



Processing '23

36. Međunarodni kongres o procesnoj industriji

1. i 2. jun 2023, Centar za stručno usavršavanje, Šabac

ZBORNİK RADOVA Proceedings



ElixirGroup



ElixirZorka

Odgovornost i održivost



 **Circular
Economy**

elixirgroup.rs

ZBORNİK RADOVA

pisanih za 36. Međunarodni kongres o procesnoj industriji
PROCESING '23



2023

ZBORNİK RADOVA
pisanih za 36. Međunarodni kongres o procesnoj industriji
PROCESING '23

Centar za stručno usavršavanje, Šabac

Izdavač

Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije (SMEITS)
Društvo za procesnu tehniku
Kneza Miloša 7a/II,
11000 Beograd

**Predsednik Društva za procesnu tehniku
pri SMEITS-u**

prof. dr Aleksandar Jovović, dipl. inž.

Urednici

Prof. dr Marko Obradović, dipl. inž.
Prof. dr Miroslav Stanojević, dipl. inž.
Prof. dr Aleksandar Jovović, dipl. inž.

Tiraž

50 primeraka

CD umnožava

Paragon, Beograd

ISBN

978-86-85535-15-4

Godina izdavanja

2023.



Društvo za procesnu tehniku
pri SMEITS-u



Katedra za procesnu tehniku
Mašinskog fakulteta u Beograd



Samit energetike Trebinje
Trebinje

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

Održavanje 36. Procesinga finansijski je pomoglo
Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog
razvoja Republike Srbije



Programski pokrovitelji

- MAŠINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU, BEOGRAD
- TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU, BEOGRAD
- FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA UNIVERZITETA U NOVOM SADU, NOVI SAD
- FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA UNIVERZITETA U BEOGRADU, BEOGRAD

Generalni pokrovitelj



Elixir Group
Šabac

36. Processing se održava uz podršku



Institut za nuklearne nauke „Vinča“
Beograd



Inženjerska komora Srbije
Beograd

Sponzori



Beograd



Beograd



Beograd



Subotica

MEĐUNARODNI NAUČNI ODBOR

- Dr Nikolina Banjanin** *Univerzitet u Beogradu, Medicinski fakultet, Institut za higijenu sa medicinskom ekologijom, Beograd*
- Dr Maja Đolić** *Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*
- Dr Mirko Dobrnjac** *Mašinski fakultet Banja Luka, BiH*
- Dr Damir Đaković** *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*
- Dr Srbislav Genić** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*
- Dr Zvonimir Guzović** *Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Hrvatska*
- Dr Gorica Ivaniš** *Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*
- Dr Jelena Janevski** *Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš*
- Dr Rade Karamarković** *Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo, Kraljevo*
- Dr Mirjana Kijevčanin** *Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*
- Dr Atanas Kočov** *Univerziteta Skopje, Mašinski fakultet, Severna Makedonija*
- Dr Dorin Lelea** *University Politehnica Timisoara, Rumunija*
- Dr Stefan Mandić-Rajčević** *University of Milan, Italija*
- Dr Ljiljana Medić-Pejić** *Universidad Politécnica de Madrid, Španija*
- Dr Sanda Midžić-Kurtagić** *Mašinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, BiH*
- Dr Dobrica Milovanović** *Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac*
- Dr Biljana Miljković** *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*
- Dr Srđan Nešić** *Ohio University, Russ College of Engineering and Technology, Ohio, SAD*
- Dr Branislava Nikolovski** *Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad*
- Dr Nataša Nord** *Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norveška*
- Dr Marko Obradović** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd (predsednik)*
- Dr Goran Orašanić** *Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Sarajevo, Bosna i Hercegovina*
- Dr Nataša Petrović** *Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Katedra za menadžment tehnologije, inovacija i održivog razvoja, Beograd*
- Dr Dejan Radić** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*
- Dr Ivona Radović** *Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*
- Dr Jelena Ruso** *Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Katedra za menadžment kvaliteta i standardizaciju, Beograd*
- Dr Niko Samec** *Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet, Slovenija*
- Dr Anastasija Selaković** *Udruženje energetičara Subotica, Subotica*
- Dr Stojan Simić** *Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Sarajevo, Bosna i Hercegovina*
- Dr Dunja Sokolović** *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*
- Dr Mirjana Stamenić** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*
- Dr Olivera Stamenković** *Univerzitet u Nišu, Tehnološki Fakultet, Leskovac*
- Dr Jasna Tolmač** *Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin*
- Dr Radoje Vujadinović** *Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Crna Gora*
- Dr Igor Vušanović** *Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Crna Gora*
- Dr Nikola Živković** *Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za termotehniku i energetiku, Beograd*
- Dr Milan Gojak** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*
- Dr Čedo Lalović** *Akademija strukovnih studija Šumadija – Odsek Aranđelovac*

ORGANIZACIONI ODBOR

Dr Miroslav Stanojević	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd (predsednik)</i>
Dr Nikola Karličić	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd (potpredsednik)</i>
Slavica Bogdanović	<i>inženjer specijalista za zaštitu životne sredine, Elixir Zorka, Šabac</i>
Dr Dušan Todorović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Dr Zoran Simić	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
Doc. dr Nemanja Milenković	<i>Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd (Katedra za operaciona istraživanja i statistiku)</i>
Dr Milica Karanac	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
Dr Marta Trninić	<i>Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd – Odsek Beogradska politehnika</i>
Branislav Todorović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Aleksandar Branković	<i>SET Trebinje, Bosna i Hercegovina</i>

POČASNI ODBOR

Prof. dr Bratislav Blagojević	<i>Predsednik SMEITS-a</i>
Prof. dr Vladimir Popović	<i>dekan Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu</i>
Prof. dr Petar Uskoković	<i>dekan Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu</i>
Prof. dr Milan Martić	<i>dekan Fakulteta organizacionih nauka Univerziteta u Beogradu</i>
Prof. dr Srđan Kolaković	<i>dekan Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu</i>
Prof. dr Svetlana Karić	<i>Predsednik Akademije strukovnih studija Šabac</i>
Prof. dr Martin Bogner	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Prof. dr Snežana Pajović	<i>Institut za nuklearne nauke "Vinča" – Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju – Univerzitet u Beogradu</i>
Jovana Jovanović	<i>ATS – Akreditaciono telo Srbije, Beograd</i>
Mijodrag Martić	<i>pomoćnik direktora za proizvodnju i tehnološki razvoj hemijske divizije, Elixir Group, Šabac</i>
Aleksandar Branković	<i>SET Trebinje</i>
Veljko Todorović	<i>Grundfos Srbija, Beograd</i>
Dejan Dotlić	<i>Kazantrade Solution, Beograd</i>
Čaba Kern	<i>Cim gas, Subotica</i>
Nemanja Tubić	<i>Wilo Beograd, Beograd</i>

ORGANIZATOR

Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije (SMEITS),
Društvo za procesnu tehniku
Kneza Miloša 7a/II, 11000 Beograd
Tel. +381 (0) 11 3230-041, +381 (0) 11 3031-696,
tel./faks +381 (0) 11 3231-372
E-mail: office@smeits.rs
web: www.smeits.rs

PREDGOVOR

Za ovogodišnji 36. Procesing, koji se održava u Šapcu 1. i 2. juna prihvaćeno je 66 radova autora iz zemlje i inostranstva.

Zbornik celih radova će u režimu slobodnog pristupa biti objavljen na sajtu www.izdanja.smeits.rs. Kao integralni dokument biće dostupan na sajtu www.smeits.rs

Međunarodni karakter Procesinga '23 i ove godine ostvaren je inostranim učesnicima sa radovima, kao i članovima naučnog odbora. Zvanični jezici za izlaganje radova na kongresu su srpski i engleski.

Osnovni ciljevi kongresa su inoviranje i proširivanje znanja inženjera u procesnoj industriji, energetici, rudarstvu, komunalnom sektoru (vodovodima, toplanama) i podrška istraživačima u predstavljanju ostvarenih rezultata istraživačkih projekata.

Tematika Procesinga '23 obuhvata osnovne procesne operacije – mehaničke, hidromehaničke, toplotne, difuzione, hemijske i biohemijske, kao i procesna postrojenja i opremu (aparate i mašine).

Program Procesinga '23 obuhvata oblasti: procesne tehnologije; projektovanje, izgradnja, eksploatacija i održavanje procesnih postrojenja; osnovne i pomoćne operacije, aparati i mašine u procesnoj industriji; inženjerstvo životne sredine i održivi razvoj u procesnoj industriji; energetska efikasnost u procesnoj industriji; procesi i postrojenja u pripremi i prečišćavanju vode u procesnoj industriji; sušenje i sušare; gasna tehnika; modelovanje i optimizacija procesnih i termoenergetskih postrojenja; merenja i upravljanje u procesnoj industriji; menadžment kvaliteta i standardizacija u organizacijama.

Osim izlaganja radova, program Procesinga '23 obuhvata i četiri okrugla stola na sledeće teme:

- 1. Monitoring emisija i kvalitet ambijentalnog vazduha;*
- 2. Dekarbonizacija industrije u Srbiji;*
- 3. Oprema pod pritiskom,*
- 4. Primena modela, standarda i alata za menadžment kvaliteta i životne sredine u procesnim industrijama.*

Procesing '23 organizuje Društvo za procesnu tehniku pri SMEITS-u, a u Naučnom i Organizacionom odboru prisutni su predstavnici mašinskih, tehnoloških i drugih fakulteta u okviru kojih je oblast procesne tehnike zastupljena u nastavi.

Pomoć u organizovanju Procesinga '23 dali su članovi Katedre za procesnu tehniku Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu kao i drugih fakulteta iz Srbije.

Ovogodišnji skup je obuhvatio i organizovan obilazak proizvodnih pogona kompanije Elixir Group u Šapcu.

*U Beogradu
jun 2023.*

Predgovor

Prof. dr Miroslav Stanojević	7
--	---

Procesne tehnologije

1. BIOPLINSKO KOGENERACIJSKO POSTROJENJE NA FARMI ZA PROIZVODNJU MLIJEKA Nurdin ĆEHAJIĆ, Jasmin FEJZIĆ, Said KARIĆ, Rafet MUMINOVIĆ, Mirsad OMEROVIĆ	15
2. KARAKTERISTIKE ZAPALJIVOSTI MEŠAVINE BIOMASE I UGLJA David LEÓN, Isabel AMEZ, Nebojsa MANIĆ, Dragoslava STOJILJKOVIC, Ljiljana MEDIC, Blanca CASTELLS	31
3. IZAZOVI I PRILIKE VODONIKA KAO ODRŽIVOG VAZDUHOPLOVNOG GORIVA BUDUĆNOSTI Toni IVANOV, Milica IVANOVIĆ, Miloš ZUBIĆ, Aleksandar SIMONOVIĆ	39
4. ISPITIVANJE ENERGETSKOG POTENCIJALA OTPADA OD KAFE Mihailo VLADIĆ, Nebojša MANIĆ, Nikola KARLIČIĆ	45
5. ASPEKTI PROIZVODNJE ENERGIJE IZ OBNOVLJIVIH IZVORA PRIMENOM ORGANSKOG RANKINOVOG CIKLUSA Nina OTAŠEVIĆ	55
6. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA GASIFIKACIONE KOMORE KOTLA NA DRVA Rade KARAMARKOVIĆ, Dušan TODOROVIĆ, Đorđe NOVČIĆ, Marko OBRADOVIĆ, Miloš NIKOLIĆ	63
7. ENERGETSKA UPOREDBA SOLARNOG APSORPCIONOG HLAĐENJA SA KLASIČNIM SISTEMOM HLAĐENJA Lejla RAMIĆ, Sandira ELJŠAN, Izet ALIĆ, Meliha ŠABANOVIĆ	73
8. ENERGETSKI PREGLED U INDUSTRIJSKIM PREDUZEĆIMA – OBAVEZA ILI KORISTAN ALAT? Mirjana STAMENIĆ, Marija STEVANOVIĆ, Srbislav GENIĆ, Miloš IVOŠEVIĆ, Branislav GAJIĆ, Aleksandar MILIVOJEVIĆ, Nikola TANASIĆ	75

Inženjerstvo životne sredine i održivi razvoj u procesnoj industriji

9. ISKORIŠĆENJE POTENCIJALA DEPONIJSKOG GASA U SLUČAJU PARCIJALNOG ZATVARANJA DEPONIJE Ana DAJIĆ, Marina MIHAJLOVIĆ, Milica SVETOZAREVIĆ	77
10. HIBRIDNI FUNKCIONALNI PANI/TIO ₂ NANOKOMPOZITI ZA TRETMAN DEGRADACIJE ORGANSKIH BOJA Milica MILOŠEVIĆ, Marija RADOIČIĆ, Gordana ĆIRIĆ-MARJANOVIĆ, Jelena SPASOJEVIĆ, Ivana VUKOJE, Aleksandra RADOSAVLJEVIĆ, Zoran ŠAPONJIĆ	83
11. ODREĐIVANJE PODATAKA ZA RAVNOTEŽU TEČNOST-TEČNOST TROKOMONENTNIH SISTEMA U CILJU TRETMANA INDUSTRIJSKIH OTPADNIH VODENIH TOKOVA Zoran SIMIĆ, Mirjana KIJEVČANIN, Ivona RADOVIĆ	91

12.	CIRKULARNA HEMIJA KAO ODGOVOR NA KRIZU IZAZVANU NEDOSTATKOM FOSFATA Alija SALKUNIĆ, Ljiljana STANOJEVIĆ, Nikola BELOBABA, Slavica BOGDANOVIĆ, Bajro SALKUNIĆ	93
13.	OD OTPADNE LJUSKE JAJA I KORIŠĆENOG KUHINJSKOG ULJA DO TEČNIH I ČVRSTIH BIOGORIVA POŠTUJUĆI POSTULATE CIRKULARNE EKONOMIJE Gorica R. IVANIŠ, Zoran V. SIMIĆ, Sofija P. MIŠKOV PANIĆ, Mirjana Lj. KIJEVČANIN, Ivona R. RADOVIĆ	95
14.	OTPORNOST ZIDA OD BALIRANE SLAME NA POŽAR Biljana M. MILJKOVIĆ	97
15.	MODELOVANJE SASTAVA SANITARNIH OTPADNIH VODA I RADA MBR POSTROJENJA SA DENITRIFIKACIJOM I NITRIFIKACIJOM David MITRINOVIĆ, Marija PEROVIĆ, Srđan KOVAČEVIĆ, Miodrag POPOVIĆ, Zorana RADIBRATOVIĆ	99
16.	ZELENE TEHNOLOGIJE – REŠENJA ZA PRILAGOĐAVANJE KLIMATSKIM PROMENAMA Titomir OBRADOVIĆ, Violeta ERIĆ	101
17.	KONTINUALNI SISTEM ZA OBEZBOJAVANJE OTPADNIH VODA. PRIMENA UMREŽENE PEROKSIDAZE IZ POLJOPRIVREDNOG OTPADA U UKLANJANJU BOJE Milica SVETOZAREVIĆ, Nataša ŠEKULJICA, Maja MARKOVIĆ, Ana DAJIĆ, Marina MIHAJLOVIĆ, Dušan MIJIN	107
18.	UTICAJ ENERGETSKE SANACIJE STAMBENIH ZGRADA NA POTROŠNJU TOPLOTNE ENERGIJE U SISTEMIMA DALJINSKOG GREJANJA Đorđe KARIĆ	113
19.	STABILIZACIJA MATRICE LETEĆEG PEPELA PRIMENOM KALCIJUM – OKSIDA, HIDROKSIDA I KARBONATA Mirjana ČUJIĆ, Marina VITOROVIĆ, Milica STOJKOVIĆ, Maja ĐOLIĆ, Aleksandra PERIĆ-GRUJIĆ	115
20.	PREVRELI OSTATAK IZ BIOGASNIH POSTROJENJA VISOKOKVALITETNO ĐUBRIVO Stojan SIMIĆ, Davor MILIĆ, Goran ORAŠANIN, Srđan VASKOVIĆ, Jovana BLAGOJEVIĆ, Krsto BATINIĆ	117
21.	BIOGAS U PROIZVODNJI BIOVODONIKA REFORMINGOM VODENOM PAROM Slobodan CVETKOVIĆ, Jovana PERENDIJA, Aleksandra RADOMIROVIĆ, Dragana MILOŠEVIĆ, Mirjana KIJEVČANIN	125

Projektovanje, izgradnja, eksploatacija i održavanje procesnih postrojenja

22.	PRAĆENJE PROJEKTNIH PARAMETARA KOD BAC KULA ZA HLAĐENJE Nemanja STOJANOVIĆ, Martin BOGNER	127
23.	PRORAČUN VEZE IZMEĐU CEVI CEVNOG SNOPA I CEVNE PLOČE RAZMENJIVAČA TOPLOTE PO JUS M.E2.259 (AD 2000) I SRPS EN 13445-3:2010 – UPOREDNA ANALIZA Lazar ĐORĐEVIĆ	131

24.	OPTIMIZACIJA PRI PROJEKTOVANJU OPREME POD PRITISKOM I NJENA PRIMENA TOKOM UPOTREBE OPREME POD PRITISKOM Milan PESEKI	135
25.	CFD ANALIZA PARKINGA SA JET VENTILATORIMA Jusuf IBRULJ, Amra HASEČIĆ, Ejub DŽAFEROVIĆ	147
26.	ИЗВОРИ ИСПУШТАЊА И ЗОНЕ ОПАСНОСТИ ВОДОНИЧНИХ ИНСТАЛАЦИЈА Иван АРАНЂЕЛОВИЋ, Раденко РАЈИЋ, Никола ТАНАСИЋ	149
27.	UPRAVLJAČKO NADZORNI SISTEM LINIJE ZA KONTINUALNU VULKANIZACIJU PROVODNIKA I KABLOVA SA IZOLACIJOM OD GUME Igor B. KOCIĆ, Nikola B. DANKOVIĆ, Darko B. MITIĆ, Miroslav B. MILOVANOVIĆ, Saša S. NIKOLIĆ, Petar S. ĐEKIĆ	157
28.	UTICAJ RADNIH REŽIMA RAZMENJIVAČA TOPLOTE SA VODENIM HLAĐENJEM NA EKSPLOATACIONE TROŠKOVE – PRIMER RAFINERIJSKOG POSTROJENJA Branislav GAJIĆ, Srbislav GENIĆ, Mirjana STAMENIĆ, Miloš IVOŠEVIĆ	159
29.	PRIMENA INTERVENTNIH MERA U CILJU POVEĆANJA EFIKASNOSTI UKLANJANJA NIKLA IZ VODE NA POSTOJEĆEM POSTROJENJU ZA PREČIŠĆAVANJE VODE ZA PIĆE Zorana RADIBRATOVIĆ, Biljana CAKIĆ, Marija VILOTIJEVIĆ, Mirjana KIJEVČANIN, Ivona RADOVIĆ	161
30.	PRIMENA, IZBORI I DIMENZIONISANJE RASTERETNIH KLAPNI U SISTEMIMA PROTIVPOŽARNE, KOMERCIJALNE I INDUSTRIJSKE VENTILACIJE Nikola TANASIĆ, Tomislav SIMONOVIĆ, Saša MARKOVIĆ, Miloš MIHAILOVIĆ	163

Osnovne i pomoćne operacije, aparati i mašine u procesnoj industriji

31.	HIDRODINAMIKA I FENOMENI PRENOSA MASE U APSORPCIONIM KOLONAMA SA PUNJENJEM Milan N. SOVILJ, Momčilo Đ. SPASOJEVIĆ	165
32.	UTICAJ SADRŽAJA VLAGE NA MELJIVOST KOLUBARSKIH LIGNITA Marko OBRADOVIĆ, Nikola KARLIČIĆ, Dušan TODOROVIĆ, Dejan RADIĆ Aleksandar JOVOVIĆ	167
33.	POMOĆNI IZDUVNI SISTEM POD PRITISKOM ZA IZBACIVANJE GASOVA IZ FABRIČKIH DIMNJAKA Radovan STANIŠIĆ	169

Procesne tehnologije

34.	BRZA IDENTIFIKACIJA POLIMERNIH MATERIJALA NA BAZI AKRILONITRIL BUTADIEN STIREN KAUČUKA PRIMENOM TESTA GORENJA I PONAŠANJA U OTVORENOM PLAMENU Matilda LAZIĆ, Dragan HALAS, Aleksandar DEDIĆ, Duško SALEMOVIĆ	175
35.	BIOHIDROGELOVI POLI(METAKRILNE KISELINE): BUBRENJE I KONTROLISANO OTPUŠTANJE KOFEINA Maja D. MARKOVIĆ, Pavle M. SPASOJEVIĆ, Sanja I. SAVIĆ, Olga J. PANTIĆ, Vesna V. PANIĆ	181
36.	ENERGETSKA BEZBEDNOST SEKTORA PRIRODNOG GASA SRBIJE Aleksandar MADŽAREVIĆ, Predrag JOVANČIĆ, Miroslav CRNOGORAC	189

37.	ODREĐIVANJE OPTIMALNOG REŽIMA ZAMRZAVANJA LISNATOG TESTA Anastasija SELAKOVIĆ	190
38.	AZO PIRIDONSKE BOJE ZA VIŠENAMENSKU UPOTREBU: SINTEZA, KAKRAKTERIZACIJA, ANTIOKSIDATIVNA I ANTIMIKROBNA AKTIVNOST Aleksandra MAŠULOVIĆ, Milica SVETOZAREVIĆ, Aleksandra IVANOVSKA, Anita LAZIĆ, Julijana TADIĆ, Dušan MIJIN, Jelena LAĐAREVIĆ	191
39.	UTICAJ OBLIKA NANOČESTICA SREBRA NA FIZIČKOHEMIJSKA SVOJSTVA POLI(N-IZOPROPILAKRILAMID) HIDROGEL NANOKOMPOZITA Jelena SPASOJEVIĆ, Ivana VUKOJE, Nikolina NIKOLIĆ, Julijana TADIĆ, Milica MILOŠEVIĆ, Vesna VODNIK, Aleksandra RADOSAVLJEVIĆ	197
40.	IN VITRO ODREĐIVANJE ANTIOKSIDATIVNE AKTIVNOSTI HALKONA NA BAZI FEROCENA Anita LAZIĆ, Luka MATOVIĆ, Jelena LAĐAREVIĆ, Aleksandra MAŠULOVIĆ, Kristina GAK SIMIĆ, Nataša VALENTIĆ	207
41.	MINERALOGIJA, HEMIJA I DISTRIBUCIJA ODABRANIH MIKROELEMENTA U UGLJU I GLINCIMA IBARSKOG BASENA (JUŽNA SRBIJA) Željana NOVKOVIĆ, Nenad NIKOLIĆ, Nevena ANDRIĆ-TOMAŠEVIĆ, Violeta GAJIĆ, M SUÁREZ, E. GARCÍA-ROMERO	215
42.	BRZINA ZVUKA ALUMINIJUM OKSID NANOFLUIDA: EKSPERIMENTALNI SET I DOBIJENI REZULTATI Divna M. MAJSTOROVIĆ, Emila M. ŽIVKOVIĆ, Stephan KABELAC	217
43.	TERMODINAMIČKA SVOJSTVA DVOKOMPONENTNIH SMEŠA TERPENA I 1-PROPANOLA U INTERVALU TEMPERATURE (288,15 – 323,15) K I NA ATMOSFERSKOM PRITISKU Ivona A. ĐORĐEVIĆ, Nikola D. GROZDANIĆ, Mirjana Lj. KIJEVČANIN, Ivona R. RADOVIĆ	219
44.	UPRAVLJAČKO – NADZORNI SISTEM CENTRIFUGE I DOZIRANJA VEZIVA U POGONU ZA PROIZVODNJU MINERALNE VUNE Stanko P. STANKOV	221
45.	SISTEM NADZORA I UPRAVLJANJA ASFALTNOM BAZOM Stanko P. STANKOV	235
46.	PRORAČUN POTROŠNJE PRIRODNOG GASA KAO GORIVA ZA PROCES PEČENJA OPEKARSKIH PROIZVODA U INDUSTRIJSKOJ TUNELSKOJ PEĆI Duško SALEMOVIĆ, Matilda LAZIĆ, Aleksandar DEDIĆ, Dragan HALAS	237
47.	KVALITET EKSPLOZIVNO ZAVARENIH ČELIČNIH PLOČA KORIŠĆENJEM EKSPLOZIVA DEMEX Miloš LAZAREVIĆ, Danica BAJIĆ, Mladen TIMOTIJEVIĆ, Ana ALIL, Nada ILIĆ, Bogdan NEDIĆ	245
48.	MOGUĆNOST MODELOVANJA PBX EKSPLOZIVA U TERMOHEMIJSKOM KODU EXPLO5 Mladen TIMOTIJEVIĆ, Danica BAJIĆ, Mirjana KRSTOVIĆ, Slavica TERZIĆ.	253

Procesi i postrojenja u pripremi i prečišćavanju vode u procesnoj industriji

49. PRIPREMA VODE ZA PROIZVODNJU PARE U INDUSTRIJSKIM PARNIM KOTLOVIMA
Jasmin FEJZIĆ, Indira BULJUBAŠIĆ, Nurdin ĆEHAJIĆ 263
50. NOVE I NAPREDNE TEHNOLOGIJE BUDUĆIH IZAZOVA U POSTROJENJIMA ZA PREČIŠĆAVANJE VODE U INDUSTRIJI ČELIKA
Jovana GRADINAC, Aleksandar JOVOVIĆ 273
51. PRIMENA MEMBRANSKIH TEHNIKA U PROCESIMA PRIPREME VODE ZA INJEKCIJE U FARMACEUTSKOJ INDUSTRIJI
Kosana POPOVIĆ, Mirjana ANTONIJEVIĆ-NIKOLIĆ, Jelena ĐURIČIĆ-MILANKOVIĆ, Roland ANTONIĆ 275

Sušenje i sušare

52. REZULTATI ISTRAŽIVANJA NA SPREJ SUŠARI
Jasna TOLMAČ, Slavica PRVULOVIĆ, Saša JOVANOVIĆ, Milan MARKOVIĆ, Dragiša TOLMAČ 277

Gasna tehnika

53. PRAĆENJE PROCESA SAGOREVANJA KORIŠĆENJEM HEMILUMINISCENCIJE PLAMENA CH*
Vuk ADŽIĆ 283

Modelovanje i optimizacija procesnih i termoenergetskih postrojenja

54. HIDRAULIČKI UDAR U DVOFAZNYM SISTEMIMA – UZROCI, MEHANIZMI, POSLEDICE
Sanja MILIVOJEVIĆ 285
55. NUMERIČKO MODELIRANJE I SIMULACIJA MEŠANJA VODONIKA I VAZDUHA DA SE SPREČAVA KAŠNJENJE PALJENJA I POVRATAK BLESKA
Marc JAEGER, Matjaž HRIBERSEK, Filip KOKALJ, Matej ZADRAVEC, Niko SAMEC 287
56. MOGUĆNOSTI POVEĆANJA EFIKASNOSTI RADA MLINSKOG POSTROJENJA U CILJU OPTIMIZACIJE PROCESA SAGOREVANJA UGLJA U ENERGETSKOM PARNOM KOTLU
Ognjen STAMENKOVIĆ, Goran STUPAR, Dragan TUCAKOVIĆ, Andrija JANKOVIĆ 289
57. NUMERIČKE SIMULACIJE PNEUMATSKOG TRANSPORTA LETEĆEG PEPELA IZ TERMOELEKTRANE KORISTEĆI OpenFOAM
Nikola KARLIČIĆ, Darko RADENKOVIĆ, Marko OBRADOVIĆ, Dušan TODOROVIĆ, Aleksandar JOVOVIĆ, Dejan RADIĆ 291

Merenja i upravljanje u procesnoj industriji

58. INSTALACIJE ZA ETALONIRANJE PROTOKOMERA ZAPREMINSKO-TEŽINSKOM METODOM VISOKE TAČNOSTI
Dejan B. ILIĆ 293
59. AKREDITACIJA KAO KLJUČNI ELEMENT U PROCESU IMENOVANJA TELA ZA OCENJIVANJE USAGLAŠENOSTI U TEHNIČKOM ZAKONODAVSTVU, UKLJUČUJUĆI OBLAST OPREME POD PRITISKOM
Senka TIŠMA 301

Inženjerski menadžment, kvalitet i standardizacija

60. INTERNA KONTROLA KVALITETA KAO ZNAČAJAN DEO RADIOLOŠKE
ANALIZE UZORAKA IZ ŽIVOTNE SREDINE POMOĆU POLUPROVODNIČKE
HPGE SPEKTROMETRIJE
Aleksandra SAMOLOV, Aleksandar KANDIĆ, Mirjana ĐURAŠEVIĆ,
Igor ČELIKOVIĆ, Tamara MILANOVIĆ, Milić ERIĆ, Ivana VUKANAC 309
61. KATEGORIZACIJA TROŠKOVA KVALITETA U SISTEMU
MENADŽMENTA BEZBEDNOSTI HRANE PREMA PAF MODELU
Sara DIMITRIJEVIĆ, Jelena RUSO 311
62. BUKA U PROCESNOJ INDUSTRIJI
Nikolina BANJANIN 327
63. AGILNE METODOLOGIJE U KONTEKSTU OBEZBEĐIVANJA KVALITETA U
PROCESNOJ INDUSTRIJI
Vojislav STEFANOVIĆ, Mladen ĐURIĆ, Jovan FILIPOVIĆ 329
64. POBOLJŠAVANJE KVALITETA ZASNOVANO NA OPTIMIZACIJI
I AUTOMATIZACIJI POSLOVNIH PROCESA
Marko PANTIĆ, Mladen ĐURIĆ, Jelena RUSO 355
65. РАЗВОЈ МЕЂУНАРОДНИХ СТАНДАРДА ЗА САРАДЊУ
ИЗМЕЂУ УНИВЕРЗИТЕТСКИХ И ПОСЛОВНИХ ОРГАНИЗАЦИЈА
Mladen ĐURIĆ 371
66. TEORETSKI ASPEKTI I PRAKTIČNA ISKUSTVA
KORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASA U POSTROJENJIMA
ZA PROIZVODNJU ENERGIJE NA BALKANU
Georgios KONIARIS, Branislav TODOROVIĆ, Vladislav STANKOVIĆ 383

BIOPLINSKO KOGENERACIJSKO POSTROJENJE NA FARMI ZA PROIZVODNJU MLIJEKA

BIOGAS COGENERATION PLANT ON A DAIRY FARM

Nurdin ČEHAJIĆ^{1*}, Jasmin FEJZIĆ¹, Said KARIĆ²,
Rafet MUMINOVIĆ³, Mirsad OMEROVIĆ³

¹JP Elektroprivreda BiH, Termoelektrana Tuzla

²Farma Spreča d.o.o Kalesija, Bosna i Hercegovina;

³Milkos d.o.o Sarajevo, Bosna i Hercegovina

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.015>

Proizvodnja i korištenje bioplina za pogon kogeneracijskog postrojenja predstavlja troškovno i energetske efikasan način zbrinjavanja organskog otpada nastalog uzgojem muznih krava. Poticajno zakonodavno okruženje u BiH, široka raspoloživost tehnologija za pretvorbu sirovina u bioplin kao i korištenje bioplina u proizvodnji električne i toplotne energije, podloga su za razmatranje opravdanosti izgradnje kogeneracijskih postrojenja na farmama različite veličine. U bioplinskom postrojenju na farmi za uzgoj muznih krava proizvodi se bioplin koji se koristi u kogeneracijskoj jedinici za dobivanje električne i toplotne energije. Na temelju godišnjeg potencijala proizvodnje bioplina dimenzionirano je kogeneracijsko postrojenje sa svim pripadajućim sklopovima od prijemnog bazena biosirovine, fermentora sa membranom za skladištenje bioplina, pumpne stanice supstrata i toplifikacione stanice za grijanje fermentora i objekata na farmi, kogeneracijskog modula (gasni motor i generator), upravljačkog sistema i svih dijelova cijevnog sistema sa pripadajućom armaturom, uređajima za analizu i čišćenje bioplina, zaštitnim i regulacionim uređajima. Proizvedena električna energija se šalje u mrežu a toplotna energija za zagrijavanje objekata na farmi i potencijalno za plasteničku proizvodnju, procese sušenja i drugo.

Ključne riječi: supstrat, fermentor, bioplin, plinski motor, električni generator

The production and use of biogas to power a cogeneration plant is a cost and energy efficient way of disposing of organic waste generated by raising dairy cows. The stimulating legislative environment in BiH, the wide availability of technologies for the conversion of raw materials into biogas as well as the use of biogas in electricity and heat production, are the basis for considering the feasibility of building cogeneration plants on farms of different sizes. The biogas plant on the dairy farm produces biogas that is used in the cogeneration unit to generate electricity and heat. Based on the annual potential of biogas production, a cogeneration plant was dimensioned with all associated assemblies from the receiving pool of raw materials, fermenters with membrane for biogas storage, substrate pumping station and heating station for heating fermenters and farm facilities, cogeneration module (gas engine and generator). system and all parts of the pipe system with associated fittings, devices for analysis and purification of biogas, protection and regulation devices. The produced electricity is sent to the network and the thermal energy for heating the facilities on the farm and potentially for greenhouse production, drying processes and others.

Key words: substrate, fermenter, biogas, gas engine, electric generator

1 Uvod

Potrebe za energijom rastu, te sve strožiji zahtjevi u pogledu očuvanja okoliša, nameću potrebu za povećanjem energetske efikasnosti postojećih i upotrebom novih tehnologija, koje mogu iskoristiti niskotemperaturne i srednjotemperaturne izvore toplote i smanjiti emisije stakleničkih plinova. World Energy Council [1] procjenjuje da će se do 2060. godine potrošnja električne energije

* Corresponding author, e-mail: nurdin.cehajic@epbih.ba

udvostručiti. Posebno će biti povećana potražnja za energijom iz zemalja čije su ekonomije u brzom razvoju (Kina, Indija, Brazil, Rusija i Južna Afrika). Postoje scenariji prema kojima bi potrošnja primarne energije iz fosilnih goriva do 2060. godine mogla pasti ispod 50 %. Nafta će i dalje imati značajnu ulogu u sektoru transporta sa 60 % udjela, dok će prirodni plin rasti sa stalnom stopom [1]. Da bi došlo do smanjenja upotrebe fosilnih goriva neophodno je ostvariti brzu dostupnost i zrelost tehnologija za iskorištenje obnovljivih izvora energije.

U cilju racionalnijeg gospodarenja energijom kao ključnom pretpostavkom održivog razvoja, kao i povećanju industrijske konkurentnosti i zaštite okoliša, energetska politika EU teži ka decentraliziranoj proizvodnji električne energije, odnosno na lokaciji potrošača. Na taj način se izbjegavaju troškovi zbog gubitaka u prenosu i distribuciji električne energije, a značajno se smanjuju i investicijski troškovi u javnu mrežu i distribuciju električne energije [2].

Predložen je veliki broj novih tehnoloških rješenja za decentralizovanu proizvodnju električne i toplotne energije iz OIE. Među njima, CHP ORC je jedna od najčešće korištenih tehnologija, koja traži daljnja istraživanja u cilju poboljšanja stepena efikasnosti. Dobrim energentom za upotrebu u CHP ORC se pokazuje biomasa koja je široko dostupna, a čine je poljoprivredni, šumski, drvni, komunalni i industrijski otpad. Toplotnu i električnu energiju dobijenu iz CHP ORC je najbolje koristiti u malim lokalnim zajednicama gdje postoji određena količina biomase, jer je gustoća energije biomase mala, što povećava troškove transporta.

Izbor radnog fluida za upotrebu u CHP ORC je jedan od najvažnijih zadataka, jer zbog niske temperature izvora toplote postoji i neefikasnost u procesu prenosa toplote sa toplotnog izvora na radni fluid u isparivaču. Istražujući radne fluide predložen je metod za nalaženje odgovarajućeg radnog fluida za ORC baziran na biomasi [3]. Istraženi su sigurnosni, fizički i okolinski parametri postojećih i alternativnih rashladnih fluida [4]. Analiziran je uticaj benzena, toluena, p-ksilena, R113 i R123 na efikasnost ORC za iskorištenje otpadne toplote [5]. Istraživan je podkritični ORC sa 28 radnih fluida za iskorištenje otpadne toplote [6]. Usporedno su istražene termodinamičke performanse ORC sa regeneratom sa NH₃, R134a, R22, iC₄H₁₀, R152a, R143a, C₄H₁₀, i C₃H₁₂ i nC₅H₁₂ na osnovu drugog zakona termodinamike. Pokazano je kako vrijednost ulaznog pritiska u turbinu utiče na eksergijske gubitke na raznim komponentama sistema, ali i na eksergijsku efikasnost sistema [7]. Analiza je obuhvatila industrijska i CHP postrojenja pogonjena biomasom i prirodnim gasom sa primjenom za daljinsko grijanje [8]. Autori [9] su analizirali uticaj grupe radnih fluida i njihovih termodinamičkih osobina na termičku i eksergijsku efikasnost ORC za iskorištenje niskotemperaturne otpadne toplote. Mago i dr. [10] su analizirali performanse ORC postrojenja za osam radnih fluida i pokazali varijaciju eksergijske i termičke efikasnosti ORC-a u zavisnosti od vrijednosti temperature na ulazu u turbinu.

2 Izbor i dimenzioniranje opreme za bioplinsko kogeneracijsko postrojenje

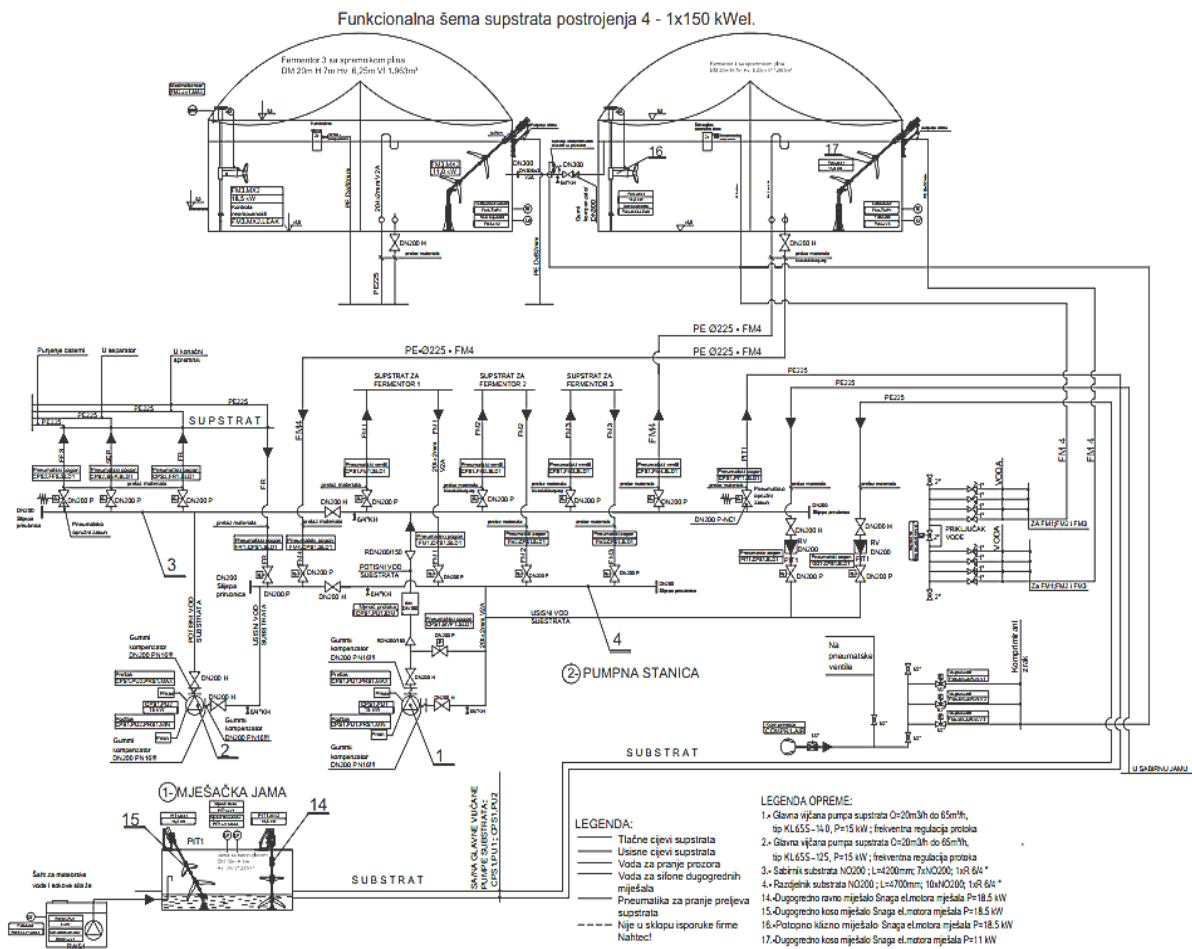
2.1 Mješačka jama i pumpna stanica

Mješačka jama služi kako bi se potrebna dnevna količina kukuruzne silaže i pilećeg stajnjaka promiješala sa tekućom podlogom (goveđi gnoj, recirkulat iz separacije kao i recirkulat iz fermentacije) i da se dobije homogena mješavina sa približno 11 % suhe materije.

Iz mješačke jame se fermentori mogu puniti tokom dana sa konstantnom količinom smješe. U mješačkoj jami je zbog nedovoljno visoke temperature nepovoljna okolina za razgradnju sirovine i za produkciju bioplina. Kondenzat iz kondenzacijskog šahta se pumpa u mješačku jamu i zatim dolazi u tok fermentacijskog procesa. Nastale količine sokova iz skladišta za silažu, preko sabirne jame se pumpama prebacuju u mješačku jamu, i dalje u proces. Višak tekućine iz separatora automatski se usmjerava u završnu lagunu.

Silaža se dnevno dozira pomoću utovarivača u mješačku jamu. Dva dugogredna mješala u mješačkoj jami održavaju smjesu homogenom, odnosno u tekućem stanju. Ove sirovine se pumpaju preko centralne stanice za pumpanje u fermentore. Na slici 1. je prikazan način kretanja supstrata iz mješačke jame ka dvjema glavnim vijčanim pumpama sa frekventnom regulacijom snage 15 kW (pozicija 1 i 2 na slici 1.), a koje supstrat potiskuju prema fermentorima. U ovom slučaju se supstra-

tom snabdijevaju četiri fermentora, od kojih svaki služi za generisanje bioplina za jedno CHP na bioplin.



Slika 1. Šema supstrata bioplinskog postrojenja

Glavne vijčane pumpe za transport supstrata iz mješačke jame ka fermentorima su prikazane na slici 2. Protok jedne pumpe je od 20 m³/h do 65 m³/h.



Slika 2. Glavne vijčane pumpe za transport supstrata

Iz mješačke jame u fermentor se dnevno transportuje od 10 m³/h do 20 m³/h izmiješane sirovine. U tabeli 1. su dati osnovni podaci o mješačkoj jami.

Tabela 1. Osnovni podaci o mješačkoj jami

Mješačka jama	Vrijednost	Jedinica
Prečnik	10	m
Apsolutna visina	4	m
Korisna visina	3	m
Ukupna zapremina	314	m ³
Korisna zapremina	236	m ³

Tehnički podaci dugogrednih ravnih i kosih mješala u mješačkoj jami su dati u tabeli 2.

Tabela 2. Podaci za dugogredno ravno i koso mješalo

Mješačka jama	[kW _{el}]	[kW _{el}]	Zaštita
Dugogredno ravno mješalo	18,5	16	Mješalo II 2 G c Biogas Motor II 3 G Ex nA II T3 Reduktor II 2 G ck T4
Dugogredno koso mješalo	18,5	16	Mješalo II 2 G c Biogas Motor II 3 G Ex nA II T3 Reduktor II 2 G ck T4

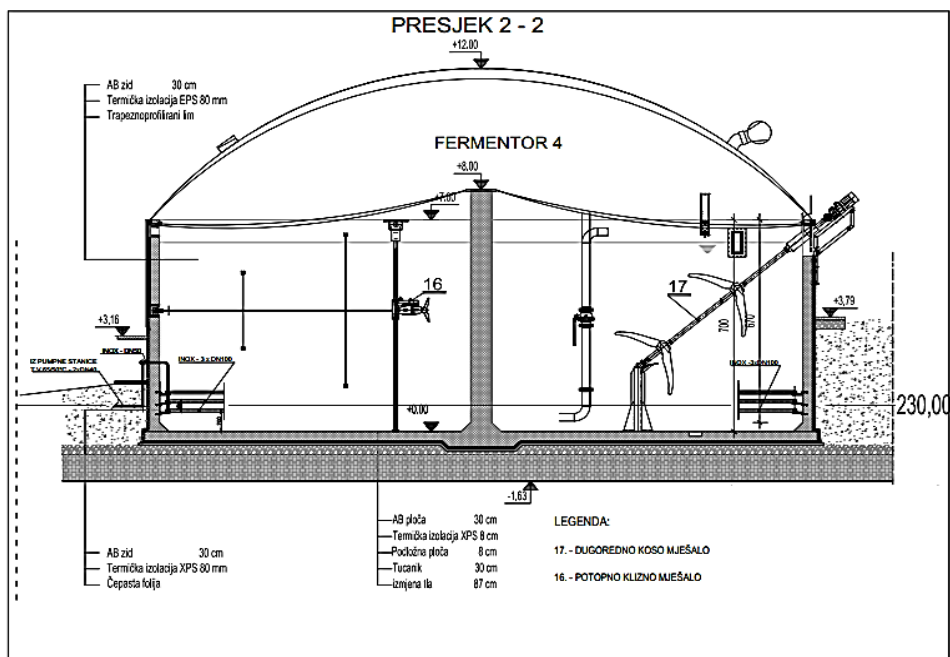
2.2 Fermentor

Fermentor je plinski nepropusan i betonsko - armirani spremnik, koji je izolovan i opremljen sa dva mješača za sprječavanje plutajućih ili taložnih slojeva uzrokovanih prisustvom velikog udjela suhe tvari. Tekućina se pomoću instaliranih grijača unutar spremnika zagrijava i drži konstantno na temperaturi od oko 40 °C. Izvor toplotne energije za grijanje je sa izmjenjivača toplote plin/voda za hlađenje plinskog motora i iznosi 93 kW i sa izmjenjivača toplote plinovi/voda temperature 440 °C/85 °C. Maseni protok ispušnih plinova motora je 881 kg/h. Dobivena toplota hlađenjem ispušnih plinova motora je 57 kW, tako da je ukupno dobivena toplota za grijanje fermentora 150 kW. Ispušni plinovi motora se u izmjenjivaču toplote ohlade na 260 °C.

Teoretski rok trajanja fermentacije u fermentoru iznosi minimalno 60 dana. Fermentor sa fiksnim nivoom supstrata sadrži cca 1.963 m³ korisne zapremine i pokriven je sa spremnikom za plin, slika 3. Zidovi su obloženi sa 8 - 10 cm vanjske izolacije obložene trapeznim limom. Za održavanje sirovine u homogenom stanju instalirano je dugogredno i potopno mješalo. Mješala su pričvršćena za pod i zid fermentora, slika 4. Izvedba mješala je takva da se miješajući organ nalazi 1m ispod čvrstog, konstantnog nivoa tekuće sirovine. U slučaju potrebe servisiranja, produkcija bioplina će se reducirati čim se prestane dozirati svježa sirovina. Fermentor je ukopan 3 m u tlo. Na slici 3. je prikazan vanjski izgled fermentora, a na slici 4. izgled u presjeku.



Slika 3. Vanjski izgled fermentora



Slika 4. Poprečni presjek fermentatora [11]

Dimenzije fermentora su date u tabeli 3.

Tabela 3. Dimenzije fermentora

Fermentor	Vrijednost	Jedinica
Prečnik	20	m
Apsolutna visina	7	m
Korisna visina	6,25	m
Ukupna zapremina	2200	m ³
Korisna zapremina	1963	m ³

U tabali 4. su dati osnovni podaci opreme fermentora sa neophodnim zaštitama u Ex izvedbi.

Tabela 4. Snage pogona i zaštite mješala i ventilatora fermentora

Mješačka jama	[kW _{el}]	[kW _{el}]	Zaštita
Dugogredno koso mješalo	11	9	Mješalo II 2 G c Biogas Motor II 3 G Ex nA II T3 Reduktor II 2 G ck T4
Potopno klizno mješalo	18,5	14	II 2 G Ex e ck ib II C T3
Ventilator	0,25	0,15	Ex II 2 Gc T3

Fermentori su opremljeni sa mjernom opremom za mjerenje temperature supstrata i nivoa u fermentoru i spremniku plina. Podaci o mjernim uređajima su dati u tabeli 5.

Tabela 5. Popis mjerača sa odgovarajućom izvedbom za rad u potencijalno eksplozivnoj sredini

<i>Mjerna oprema</i>	<i>Zaštita</i>
Mjerač temperature	
Mjerač nivoa	
Mjerač nivoa u spremniku gasa	EEX II3 G Ex ia IIA T4
Mjerač nivoa max	

Mjerači temperature se nalaze na spoljašnjem zidu fermentora i izvan su Ex - zone. Mjerač nivoa se nalazi nisko blizu tla sa spoljne strane fermentora (unutrašnja strana senzora je zaštićena za zonu 0).

Servisna vrata koja su instalirana u armirano betonskom zidu fermentora služe kao eventualni ulaz za servisiranje mješala u fermentoru ili eventualno pražnjenje sedimentiranog taloga na tlu. Otvor za servisna vrata je zaptiven protiv plina i tekućina. Mješala se pomoću kрана mogu izvući. Mogu se servisirati, ponovo ugraditi ili zamijeniti. Električni aktuatori za pogon mješala su dimenzionirani na način da ostvare ravnomjerno miješanje supstrata.

2.3 Bioplin

Proizvodnja i potrošnja plina se ne odvija uvek paralelno. Bioplin koji je proizveden u fermentorima akumulira se u spremnicima za bioplin. Skladište bioplina odgovara kriterijumima nepropustljivosti plina i otpornosti na pritisak, temperaturu i starenje. Na fermentoru se postavlja visoki silažni krov sa plinski nepropustljivom membranom. Kao skladište koristi se membrane sa folijom sa visokim stepenom čvrstoće protiv cijepanja i povećanom otpornošću na plin. Karakteristike skladišta bioplina i materijala:

Unutarnja membrana:

- materijal: PELD
- debljina: 0,8 mm
- težina: cca. 750 g/m²
- zatezna čvrstoća: 650 N/cm²
- površinski otpor: < 3 · 10⁹ Ω
- otpor propuštanja: < 3 · 10⁹ Ω
- Propustljivost plina (metan): 260 cm³/ m² · d · 1 bar
- Otpornost na temperaturu: -30 °C do + 70 °C

Oprema:

UV - otporan, otporna na vremenske neprilike, otporna na gnoj, pogodna za primjenu na otvorenom

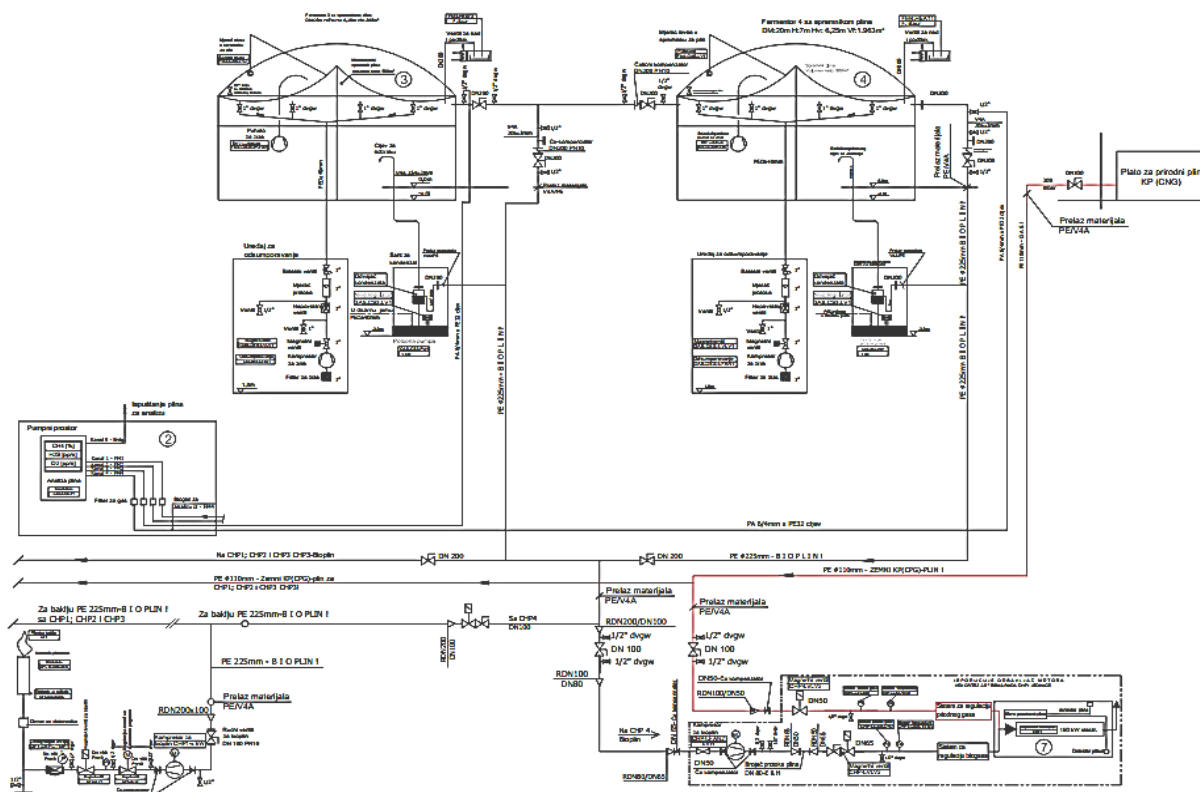
Spoljašnja membrana:

- materijal: dvostrano PVC obložene poliesterske tkanine
- težina: cca. 670 g/m²
- zatezna čvrstoća: 2800 N/cm², EN 1421
- površinski otpor: < 3 · 10⁹ Ω
- otpor propuštanja: < 3 · 10⁸ Ω
- propustljivost plina (metan): 230 cm³/ m² · d · 1 bar
- otpornost na temperaturu: -30 °C do + 70 °C

Oprema:

UV - otporna, otporna na vremenske neprilike

Funkcionalna šema razvoda proizvedenog bioplina u fermentoru i prirodnog plina prema kogeneracijskom modulu je prikazana na slici 5.



Slika 5. Funkcionalna šema razvoda bioplina i prirodnog plina ka plinskom motoru

2.3.1 Tretman bioplina

Bioplin se prije uvođenja u plinski motor mora tretirati pomoću uređaja za:

- odvajanje kondenzata iz bioplina
- odsumporavanje bioplina
- analizu bioplina

Uređaj za odvajanje kondenzata iz bioplina se sastoji od odvajača kondenzata, regulatora nivoa, potopne pumpe za prebacivanje kondenzata iz šahta u dozirnu jamu i odgovarajućih cijevnih elemenata. Desumporizacioni vod služi da se smanji proizvedeni udio sumpora u bioplina, uduvanjem vazduha. Pomoću kompresora se uduvava vazduh u skladište plina. Nakon ventilatora postavljen je nepovratni ventil da bi se spriječilo isticanje plina. Da bi se dobila pravilna doza vazduha, ventilatori se regulišu pomoću frekventnih pretvarača i s druge strane uz pomoć ventila za balansiranje. Aparatom za analizu plina mjeri se sastav plina u fermentoru. U zavisnosti od toga kolika je vrijednost H_2S tj. O_2 , frekventni pretvarač reguliše protok bioplina. Ovaj proces se u potpunosti reguliše preko PLC-a. Osnovni podaci dijelova u procesu odsumporavanja su dati u tabeli 6.

Tabela 6. Podaci dijelova za odsumporavanje bioplina

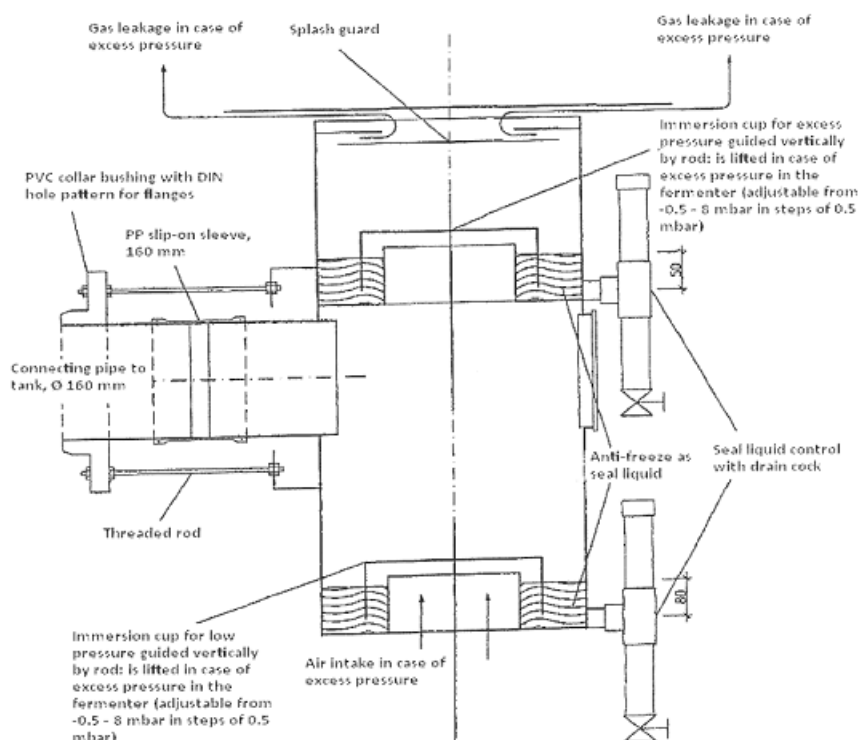
Opis	[kW _{el}]	[kW _{el}]	Vrsta zaštite
Odsumporavanje (kompresor)	0,75	0,55	IP 55
Kompresor za zrak	0,75	0,55	IP 55
Magnetni ventil	0,10	0,10	

Za analizu sastava proizvedenog plina koristi se aparat za analizu plina. On mjeri sadržaj CH₄, CO₂ i H₂S u plinu. Ovi podaci služe za optimizaciju procesa opterećenja i za desumporizaciju. Aparat za analizu plina instalira se u centralnom pumpnom šahtu.

2.3.2 Sigurnosni uređaji za bioplin

Fermentor su opremljeni ventilima za nadpritisak i podpritisak. Ventil za nadpritisak/podpritisak je sigurnosni uređaj, koji sprječava prekomjerni pritisak plina u skladištu za plin. Ventil za nadpritisak/podpritisak podešen je za nadpritisak od 3,5 mbar, a za podpritisak od 1 mbar.

Spoljašnja membrana održava oblik polukruga pomoću upuhivanja vazduha ventilatorom. Spoljašnji vazduh između unutrašnje i spoljašnje membrane se uduvava tako da se konstantno održava pritisak od prosječno 3 mbar. Kod porasta pritiska unutrašnje membrane zbog stvaranja plina u plinskom prostoru, višak vazduha između spoljašnje i unutrašnje membrane izlazi kroz ispusni ventil. Na slici 6. prikazan je ventil nadpritiska i podpritiska u fermentorima.



Slika 6. Sigurnosni ventil

Aparati za detekciju metana u kontejneru CHP modula služe da detektuju nastanak veoma male količine metana. Za tu namjenu postavljaju se plinski senzori, jedan ispod plafona i drugi na dnu, da bi se uočilo curenje plina. Ovi senzori povezani su sa aparatom za upozorenje. Ako se izmjeri plinska miješavina 20 % donje granice eksplozivnosti (UEG), onda se uključuje ventilator preko PLC upravljanja i prostor se ventilira, tako što se odvodi otpadni vazduh. Ako smješa plina i dalje raste (40 % UEG), onda se dodatno blokira i plinski magnetni ventil ispred kontejnera blokvske toplane i blokvska toplana obustavlja rad.

Kompresor za bioplin povećava pritisak bioplina na oko 120 mbar, kako bi obezbijedio odgovarajuće sagorijevanje u CHP jedinici. Motorom kompresora za bioplin se upravlja putem frekventnog regulatora, kako bi se regulisala količina i pritisak plina. Između gore navedenih tačaka montira se nekoliko senzora temperature i pritiska, kako bi se obuhvatili pojedinačni procesi i regulisali preko PLC-a.

Nakon gore navedenih ugradnih djelova, bioplin još prolazi kroz plinsku rampu u kojoj se plin filtrira i u kojoj se reguliše pritisak plina prije upuštanja u motor za sagorijevanje CHP jedinice.

Svi vodovi u kontejneru blokvske toplane izvode se od nehrđajućeg čelika. Izbor materijala i montaža plinskih vodova i njihovih sastavnih dijelova vrši se u skladu sa zakonskim propisima i smjernicama ÖNORM EN 1127-1:2011 09 01, austrijsko udruženje za plin i vodu.

2.3.3 Bioplinska rampa

Dodatna plinska rampa se dodaje da bi se kogeneracijski modul mogao napajati mješavinom bioplina i prirodnog plina sa procentom vrijednosti u skladu sa regulatornim granicama. Da bi plinski motori mogli efikasno da koriste bioplin, moraju biti ispunjeni određeni zahtjevi u pogledu fizičkih karakteristika plina. To su prije svega pritisak pod kojim bioplin ulazi u plinski motor (uglavnom 100 mbara) i definisani zapreminski protok. Ako ti parametri nisu u skladu sa zahtjevima, npr. ako se u fermentoru ne oslobađa dovoljno plina, motor radi sa djelimičnim opterećenjem ili se isključuje. Da bi ti zahtjevi bili konstantno ispunjeni i da bi se ispunili bezbjednosni propisi, vrši se instaliranje plinske rampe direktno ispred CHP jedinice. Plinska rampa zajedno sa cjelokupnim plinovodom treba da je usklađena sa smjernicama Njemačkog stručnog i naučnog udruženja za plin i vodu (DVGW). Svi plinovodi moraju se obilježiti ili žutom bojom ili žutim strelicama.

Rampa mora da posjeduje dva samostalno zatvarajuća ventila (magnetni ventili), jedan zaporni ventil izvan mjesta postavljanja, zaustavljač plamena i prekidač koji reaguje u slučaju potpirtiska. Svrishodno je da se u plinsku rampu integriše plinsko brojilo za utvrđivanje količine plina i fini filter za uklanjanje čestica iz bioplina. Ukoliko je potrebno, u rampu se ugrađuje i kompresor [12]. Izgled plinske rampe je dat na slici 7.



Slika 7. Plinska rampa za bioplin [12]

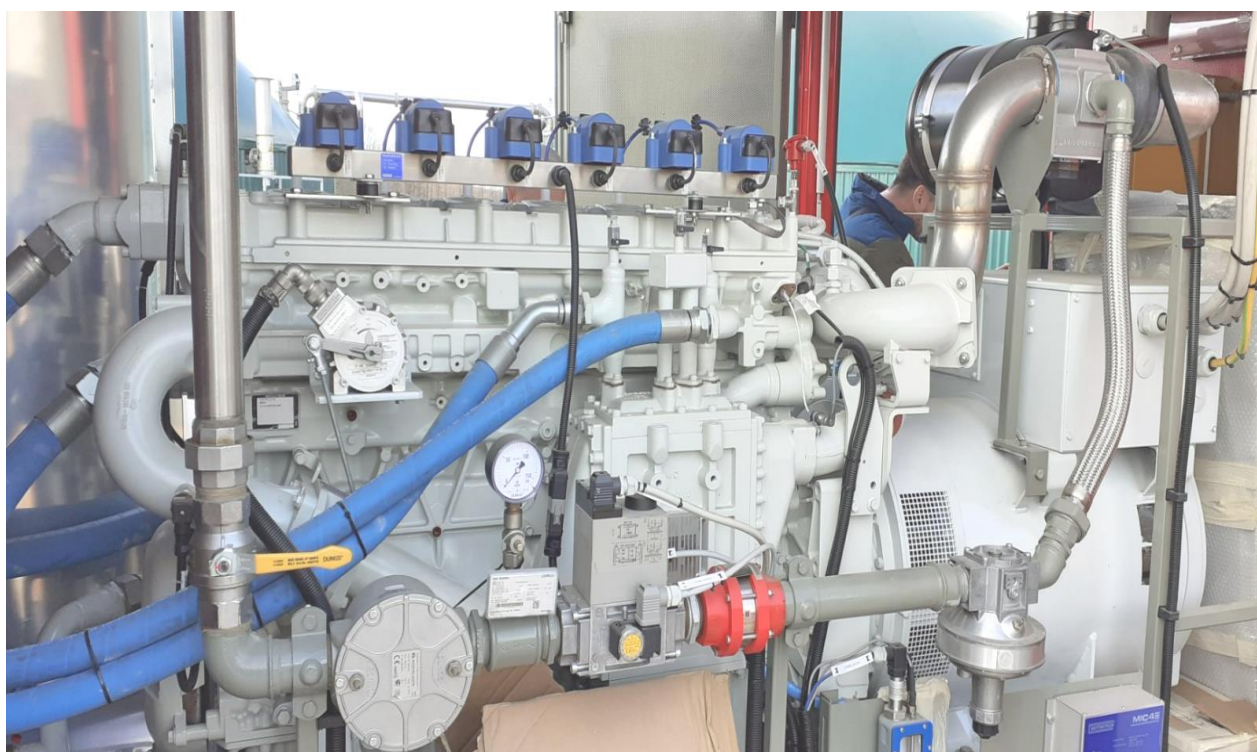
2.4 Izbor plinskog motora i generatora

Za sagorijevanje generisanog bioplina u fermentoru izabrana je CHP jedinica tip MAN snage 150 kW_e i 150 kW_t, te ukupnog stepena efikasnosti 85 %. CHP je smještena u kontejner tip ECOMAX 1,5 - Biogas koji je prikazan na slici 8. Kontejner je dužine 7 m, širine 3 m i visine 2,6 m. Opremljen je odgovarajućom zvučnom izolacijom (65 dB/10 m) i odgovarajućim ventilatorima.



Slika 8. Izgled kontejnera za smještaj CHP jedinice

Na slici 9. prikazan je izgled plinskog motora i generatora CHP sa svim pomoćnim uređajima za mjerenje, zaštitu, regulaciju i sigurnost rada.



Slika 9. Blokmotor sa generatorom u kontejneru tip „ECOMAX 1,5 - BIOGAS“ [13]

2.4.1 Tehničke karakteristike bioplinske CHP jedinice

Bioplinska CHP jedinica je smještena kontejner tip ECOMAX 1,5 - Biogas i osnovne tehničke karakteristike su date u tabeli 7.

Tabela 7. Tehničke karakteristike bioplinske CHP jedinice

<i>Parametar/veličina</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Vrijednost</i>
Električna snaga	kW _{el}	150
Toplinska snaga	kW _t	150
Emisije (korelacija 5% O ₂) NO _x <500	mg/Nm ³	<500
Energija goriva (bioplin)	kW	395
Zapreminski protok goriva	Nm ³ /h	65,8
Nazivni broj obrtaja	min ⁻¹	1500
Električna efikasnost	%	38
Toplotna efikasnost	%	38

Tehničke karakteristike plinskog motora MAN E2676 LE212 su date u tabeli 8.

Tabela 8. Tehničke karakteristike plinskog motora MAN E2676 LE212

<i>Parametar/veličina</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Vrijednost</i>
Maksimalna temperatura dotoka smjese nakon ventila	° C	50
Električna snaga	kW	150/128/105
Toplinska snaga	kW _t	150
Nazivni broj obrtaja	min ⁻¹	1500
Potrošnja ulja za podmazivanje motora	kg/h	0,15
Količina punjenja mazivim uljem min./maks.	l	35/70
Količina punjenja rashladne tečnosti	l	50
Srednji efektivni pritisak	bar	14,2
Srednja brzina klipa	m/s	8,3
Min. količina cirkulacije rashladne tečnosti motora	l/min	320
Temperatura rashladne tečnosti min.	° C	80
Temperatura rashladne tečnosti max.	° C	88
Razlika temperature ulaz/izlaz max.	° C	6
Maks. temperatura usisne vode za hlađenje smjese LT	° C	40
Maks. količina kružne vode za hlađenje smjese LT	l/min	58
Maks. temperatura usisne vode za hlađenje smjese HT	° C	85
Min. količina cirkulacije vode za hlađenje smjese LT	l/min	42
Maks. usisni pritisak	mbar	15
Maks. povratni tlak ispušnih plinova	mbar	40
Broj cilindara	-	6
Dužina motora	mm	1589
Visina motora	mm	1206
Širina motora	mm	808
Masa suhog motora	kg	895
Toplina rashladne tekućine	kW	93/85/77

Električna energija se proizvodi tako što se obrtni moment koljenastog vratila prenosi na rotor generatora. Zbog induciranja u zavojnicama, na statoru dolazi do proizvodnje izmjenične električne struje, koja nema dovoljan napon pa se isti povećava upotrebom transformatora. Tehničke karakteristike generatora električne energije Marelli MJB 315 SB4 (sinhroni) su date u tabeli 9.

Tabela 9. Tehničke karakteristike generatora električne energije Marelli MJB 315 SB4

<i>Parametar/veličina</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Vrijednost</i>
Tip generator	-	50
Aktivna snaga pri nominalnom cos φ	kW	150
Nominalni cos φ	-	1
Opseg cos φ	-	0,8 do 1
Napon	V	400
Frekvencija	Hz	50
Nazivni broj obrtaja	min ⁻¹	1500

Navedeni tehnički podaci temelje se na standardnim uvjetima prema DIN ISO 3046-1 [14]. Tolerancija za specifičnu potrošnju goriva je +5 % kod nazivne proizvodnje. Tolerancija na iskoristivu toplotu iznosi 7 % kod nazivne snage. Svi podaci u tehničkoj specifikaciji temelje se na punom opterećenju motora (osim ako nije drugačije navedeno) na navedene temperature, a podložni su izmjenama radi tehničkog razvoja.

2.4.2 Baklja za spaljivanje plina

Količina proizvedenog bioplina na postrojenju može varirati jer ovisi o mnogo faktora: od količine bakterija, toplote u fermentoru i postfermentoru pa sve do smjera okretanja mješalica u dozirnim jamama i fermentorima. Zbog tih razloga u sklopu plinskog motora je ugrađena i baklja koja se koristi za spaljivanje bioplina koji je višak, odnosno koji se ne može se iskoristiti. Baklja je prikazana na slici 10.



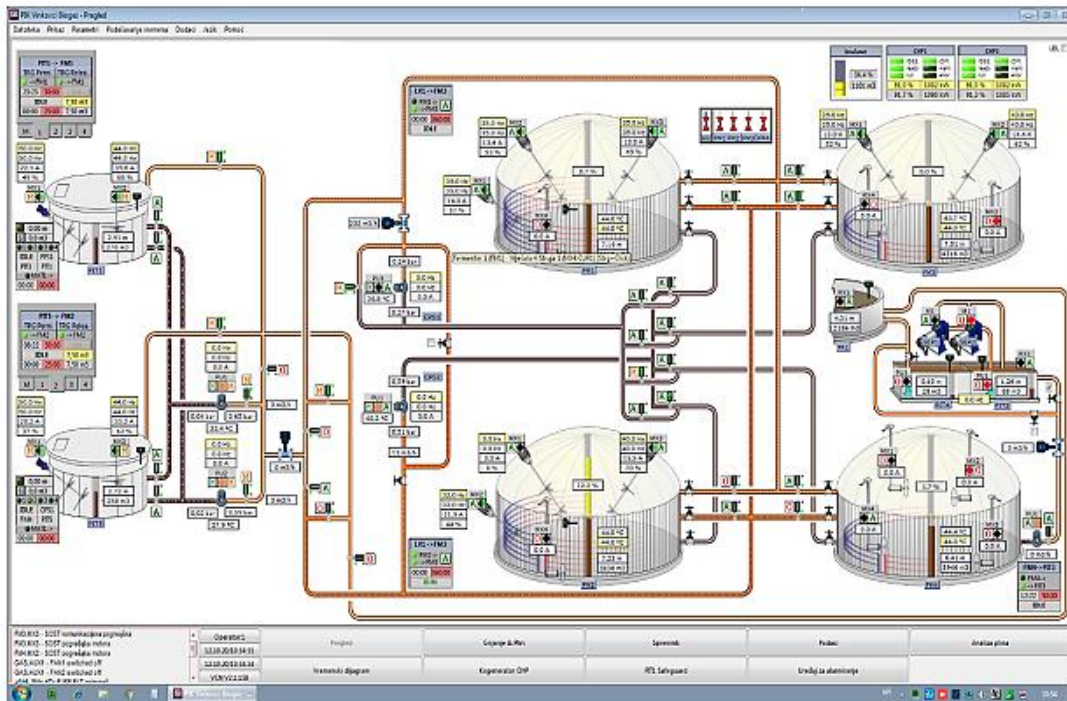
Slika 10. Sistem za obradu bioplina i baklja za spaljivanje bioplina

2.5 Sistem upravljanja i nadzora

Bioplinska CHP je najčešće u sistemu daljinskog nadzora i upravljanja (SCADA) i sistem daljinskog očitavanja brojila (AMM).

Nadzor i upravljanje tehnološkim procesom kao i nadzorom nad električnim parametrima elektrane se izvodi iz Centra za nadzor i upravljanje (CENUS). Rad i upravljanje elektranom je realizovano u skladu sa preporukama i propisima u ovom području. Na slici 11. je prikazan sistem za upravljanje i nadzor rada bioplinskog CHP.

Sistem daje uvid u osnovne podatke postrojenja kao što su trenutne količine proizvedenog plina, trenutna snaga generatora, zagrijavanje generatora, trenutna snaga motora, količine biomase u fermentorima, obavijesti itd. Sistem u svakom trenutku dostavlja obavijesti kada postrojenje radi unutar parametara, a kada dođe do napuštanja parametara u bilo kojem dijelu postrojenja voditelj pogona odmah dobiva upozorenje i podatak gdje je pogreška. Također se sve obavijesti spremaju u bazu podataka da bi se kasnije mogao imati uvid u iste.

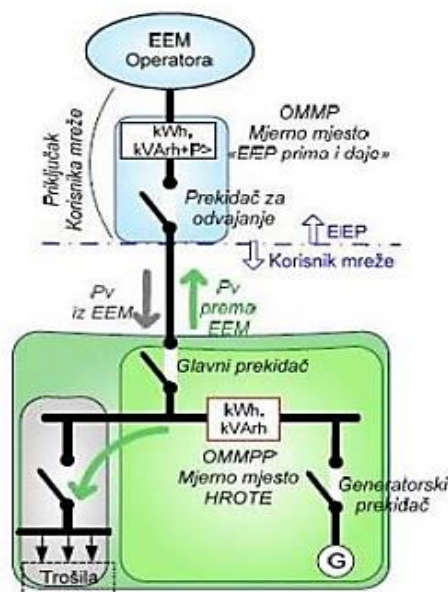


Slika 11. Sistem - program za upravljanje bioplinskog postrojenja

2.6 Transformatorska stanica i električna mreža

Postrojenje može da svu proizvedenu energiju predaje u sistem što podrazumijeva da sistem može preuzeti proizvedenu električnu energiju snage 150 kW. Odgovarajući priključak za ovo je na prijenosnoj mreži od 180 kV. U blizini lokacije mora se nalaziti dalekovod prijenosne mreže na naponskom nivou od 400 kV. Postoji i mogućnost priključka na bližu niskonaponsku distribucijsku mrežu, pri čemu se kao uređaj za odvajanje koristi četveropolni prekidač. Preporučeno je i spajanje na niskonaponsku mrežu bez trafo stanice. Tačniji parametri vezani uz priključak trebaju se utvrditi elaboratom optimalnog tehničkog rješenja priključka.

Slika 12. prikazuje izgled priključka s obzirom na trenutno primjenjivanu koncepciju obračunskog mjerenja.



Slika 12. Principijelna shema spajanja postrojenja na EES BH [15]

Postrojenje dijelom pokriva vlastitu potrošnju električne energije električnom energijom kupljenom od operatera. Obračunska mjerna mjesta nalaze se na samom priključku i neposredno kod proizvođača.

3 Zaključak

Efikasnim korištenjem svih oblika energije moguće je smanjiti potrošnju fosilnih goriva i emisiju stakleničkih plinova. Velike količine električne energije rasipaju se korištenjem neefikasnih uređaja na farmama, što nije samo neodgovorno prema okolini već i povećava troškove poslovanja i smanjuje konkurentnost. Ulaganja u efikasniju opremu brzo se isplaćuju, a osim niže cijene proizvodnje smanjuje se i negativan utjecaj na okoliš kroz smanjenje energetske potreba.

Zadnjih nekoliko desetina godina čovječanstvo pokušava pronaći izvore energije koji će što manje zagađivati prirodu, a pritom biti ekonomski isplativi. Opšte je poznato da je možda i najveći problem modernog čovjeka prevelika emisija ispušnih plinova u atmosferu, odnosno CO₂. Iako smo daleko od nekog značajnog smanjenja emisije ispušnih plinova, zahvaljujući novim tehnologijama i ulaganjima vidi se napredak. Vjetroelektrane, solarne elektrane i bioplinska postrojenja postala su naša sadašnjost i budućnost.

Bioplinska postrojenja nisu toliko raširena kod nas, možda zbog opšteg neznanja ili jednostavno nedovoljne količine goriva. Ta tehnologija je još u začetku u Bosni i Hercegovini. Iskreno se nadam da to neće biti slučaj u budućnosti jer možemo dosta naučiti od članica Europske Unije koje su daleko ispred nas po količini proizvedene električne energije iz postrojenja na bioplin.

Proizvedena električna energija iz bioplinske CHP se u potpunosti može isporučiti u EES, a dobivena toplotna energija se ponovno vraća u proces i koristi se za grijanje fermentora, objekata proizvodnje i poslovnih objekata.

U cijelom postrojenju ima mnogo različitih elektromotora, pumpi, ventila, aktuatora i senzora koji cijeli pogon elektrane drže u funkciji i gotovo potpuno automatiziranom radu. Potrebno je dosta novog znanja kako bi službe održavanja odgovorile zahtjevima za preventivno, redovno i remontno održavanje. Planiranje potrebnih rezervnih dijelova i praćenje uputa proizvođača opreme za održavanje, pogon i upravljanje bioplinske CHP je izazov za radnike održavanja jer postrojenje radi u realnom vremenu i svaki njegov zastoj proizvodi značajan finansijski gubitak.

4 Literatura

- [1] World Energy Council report, 2016., Dostupno na: https://www.worldenergy.org/news-and-media/news/world-energy-council-launches-2016-energy-resources-report-at-23rd-world-energy-congress/ [Pristupljeno 05. 04. 2022.]
- [2] **Karl, J.**, Dezentrale Energiesysteme, 2. Auflage, Oldenbourg Verlag München Wien, 2006.
- [3] **Drescher, U., D. Bruggemann**, Fluid selection for the organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants, *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007.), pp. 223-228
- [4] **Calm, J. M., G. C. Hourahan**, Physical, Safety and Environmental data for current and alternative Refrigerants, *ICR 2011*, Prague, Czech Republic, 21 - 26 - August 2011.
- [5] **Hung, T. C.**, Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids, *Energy Conversion and Management*, 42 (2001.), pp. 539-553
- [6] **Liu, C., C. He, H. Gao, X. Xu, J. Xu**, The optimal evaporation temperature of subcritical ORC based on second law efficiency for waste heat recovery, *Entropy*, 14(2012), pp. 491-504
- [7] **Kim, K. H., H. J. Ko, S. W. Kim**, Exergy analysis of organic Rankine cycle with internal heat exchanger, *International journal of materials, mechanics and manufacturing*, 1 (2013.)
- [8] **Ertesvag, I. S.**, Exergetic comparison of efficiency indicators for combined heat and power (CHP), *Energy*, 32 (2007.), pp. 2038-2050
- [9] **Wang, D., X. Ling, H. Peng**, Performance analysis of double organic Rankine cycle for discontinuous low temperature waste heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, 48 (2012), pp. 63-71

- [10] **Mago, P. J., L. M. Chamra, C. Somayaji**, Performance analysis of diferent working fluids for use in organic Rankine cycles, *Proc. ImechE, Vol. 221* (2007.), pp. 255-265
- [11] **Stojić, M.**, Anaerobna kodigestija stajske gnojnice i kukuruzne silaže u pilot postrojenju
url: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:841147> (08.06.2022.)
- [12] Rampa za biogass, url: <https://www.saitsrl.it/ITA/bruciatori-industriali-rampa-gas.asp>
(15.06.2022)
- [13] ECOMAX® Biogas, url: <https://www.gruppoab.com/ecomax/ecomax-biogas/>
- [14] International Standard ISO 3046-1, url: <https://www.sis.se/api/document/preview/901797/>
- [15] Službene novine Federacije BiH”, broj:70/13 (NN, 120/12);
url: <https://fbihvlada.gov.ba/bosanski/zakoni/2010/uredbe/13b.html> (13.05.2022)

KARAKTERISTIKE ZAPALJIVOSTI MEŠAVINE BIOMASE I UGLJA

FLAMMABILITY CHARACTERIZATION OF BIOMASS AND COAL MIXTURES

David LEÓN^{1,2*}, Isabel AMEZ^{1,2}, Nebojsa MANIC³, Dragoslava STOJILJKOVIC³,
Ljiljana MEDIC^{1,2}, Blanca CASTELLS^{1,2}

¹ Department of Energy and Fuels, E.T.S. Ingenieros de Minas y Energía,
Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

² TECMINERGY - Laboratorio Oficial Madariaga, LOM
(UPM Technical University of Madrid, Spain), C/Eric Kandel, 1 (TECNOGETAFE),
Parque Científico y Tecnológico de la UPM, 28906 Getafe, Spain

³ University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering,
Fuel and Combustion Laboratory, Belgrade, Serbia

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.031>

Upotreba obnovljive energije je značajno porasla poslednjih godina zbog klimatskih promena i globalnog upozorenja. Zbog toga je nekoliko zemalja smanjilo upotrebu uglja za proizvodnju energije, što je dovelo do napuštanja ili nekorišćenja više elektrana. U tom kontekstu, moguće je prilagoditi elektranu da kao gorivo koristi mešavinu uglja i biomase kako bi se smanjila potrošnja uglja uz održavanje ovih postrojenja u funkciji. U tom kontekstu potrebno je definisati parametre zapaljivosti mešavine goriva, kako bi se definisale moguće nove mere zaštite i prevencije. Ova studija se fokusira na karakterizaciju zapaljivosti mešavine uglja i pšenične slame (80% i 20% respektivno) kroz dva testa: minimalna energija paljenja (MIE) i minimalna temperatura paljenja oblaka (MITc). Ovi testovi su takođe sprovedeni na sirovom uglju i pšeničnoj slami da bi se definisalo kako mešavina oba goriva može uticati na parametre zapaljivosti. Iz rezultata je utvrđeno da smeša značajno smanjuje MIE u poređenju sa oba materijala, jer smeša ima MIE od 170 mJ, dok ugalj i slama 540 mJ i >1000 mJ respektivno. S druge strane, MITc smeše je blago povećan u poređenju sa slamom (500°C naspram 480°C), ali je smanjen u poređenju sa ugljem (640°C).

Ključne reči: bezbednost u industriji; biomasa; ugalj; kogeneracija

The use of renewable energy has heavily increased in the last years due to climate change and global warning. Because of that, several countries have reduced the use of coal to produce energy, leading to abandon or disuse of multiple power plants. In this context, it is possible to adapt the power plant to use a mixture of coal and biomass as fuel in order to reduce coal consumption while keeping in operation these plants. In this context it is necessary to define the flammability parameters of the fuel mixture, in order to define possible new protection and prevention measures. The present study focuses on the flammability characterization of a coal and wheat straw mixture (80% and 20% respectively) through two tests: minimum ignition energy (MIE) and minimum ignition temperature of cloud (MITc). These tests were also performed in the raw coal and wheat straw in order to define how the mixture of both fuels might influence flammability parameters. From the results it was found that the mixture significantly reduced the MIE if compared to both materials, as the mixture presented a MIE of 170 mJ, while coal and straw 540 mJ and >1000 mJ respectively. On the other hand, MITc of the mixture was slightly increased if compared to straw (500°C versus 480°C) but decreased if compared to coal (640°C). These results show the importance of analysing the flammability and explosion severity parameters of biomass and coal mixtures, as both materials influence each other, and equipment and facilities should be designed in accordance to the used fuel.

Key words: Industrial safety; biomass; coal; cogeneration

* Corresponding author, e-mail: david.leon.ruiz@upm.es

1 Introduction

In recent years, the utilization of biomass as a source of energy has gained significant attention due to its renewable and sustainable nature. Biomass can be used as a fuel in various forms, such as wood chips, sawdust, and agricultural residues. However, the use of biomass alone as a fuel has limitations, including lower energy density and higher moisture content, which can affect its combustion efficiency [1,2]. On the other hand, coal is a widely used fossil fuel that has a high energy density but is a non-renewable resource and contributes significantly to greenhouse gas emissions [3].

To overcome the limitations of using biomass alone, it has been proposed to co-fire biomass and coal in power plants. Thermal power plants that use coal and biomass mixtures, also known as co-firing power plants, are becoming increasingly popular as a way to reduce greenhouse gas emissions while maintaining a reliable source of energy. Co-firing involves combusting a blend of coal and biomass, such as wood chips or agricultural residues, in a boiler to produce steam, which then drives a turbine to generate electricity [4,5].

One of the main advantages of co-firing is that it can reduce the carbon intensity of the fuel blend. Biomass is a renewable and carbon-neutral resource, meaning that the carbon dioxide released during its combustion is offset by the carbon dioxide absorbed during the growth of the biomass. By using biomass in conjunction with coal, the overall carbon footprint of the power plant can be significantly reduced [6].

Co-firing can also help power plants comply with emissions regulations. Burning biomass in combination with coal can lower the emissions of sulfur dioxide, nitrogen oxides, and other pollutants that are typically associated with coal combustion. Additionally, co-firing can help power plants reduce their waste streams by using agricultural and forestry residues that might otherwise be discarded.

However, there are some challenges associated with co-firing. For example, the combustion behavior of the fuel blend can be different from that of coal or biomass alone, which can affect the efficiency of the power plant. The composition of the fuel blend can also affect the emissions profile of the power plant, so it is important to carefully control the ratio of coal to biomass in the fuel mixture [6].

Overall, co-firing coal and biomass in thermal power plants has the potential to be a sustainable and environmentally friendly way to generate electricity, but careful consideration of the fuel blend and combustion parameters is necessary to ensure efficient and clean-burning operation [7].

Nevertheless, the use of coal and biomass presents an associated risk due to possible self-ignition processes, explosions severity and ignition sensitivity [8]. Several authors have focus on defining these characteristics both for coal and biomass. However, the flammability characteristics of the biomass and coal mixture are different from those of the individual fuels, which can affect the combustion behavior of the fuel blend. One of the main factors affecting the flammability of biomass and coal blends is the composition of the fuel mixture. The ratio of biomass to coal, as well as the type and quality of the biomass and coal, can affect the ignition and combustion behavior of the fuel blend. Biomass fuels typically have lower heating values and higher moisture content than coal, which can affect their ability to ignite and sustain combustion.

Another factor that affects the flammability of biomass and coal blends is the size and shape of the fuel particles. The blending process can lead to size and shape variations in the fuel particles, which can affect the air flow and fuel distribution in the combustion chamber. This can, in turn, affect the ignition and combustion behavior of the fuel blend.

The flammability of biomass and coal blends can also be affected by the combustion conditions, such as temperature, oxygen concentration, and turbulence. The presence of biomass in the fuel blend can affect the combustion kinetics and the formation of combustion products, which can affect the emissions profile of the power plant.

Overall, the flammability of biomass and coal blends is a complex issue that depends on a variety of factors. Understanding the behavior of these fuels in combination is important for safe and efficient use in power generation and other industrial applications, and careful control of the fuel

composition and combustion conditions is necessary to optimize the performance and reduce the emissions of the power plant.

Therefore, the objective of this study is to investigate the flammability parameters of biomass and coal mixtures and their combustion behavior. The flammability parameters that will be studied include ignition temperature and minimum ignition energy. The results of this study will provide valuable information on the combustion behavior of biomass and coal mixtures and help in the development of efficient and clean-burning fuel blends for power generation.

2 Materials and Methods

2.1 Samples

In order to obtain a sample which represents the blends used in co-firing power plants, bituminous coal has been selected. Moreover, the most commonly used biomass types are straw (wheat straw, rice straw and corn straw) and sugar cane bagasse. Therefore, wheat straw has been used in the present study, and mixed with bituminous coal in a proportion of 20% of straw and 80% of coal.

Samples were milled and sieved using a 500 μm sieve in order to produce an homogeneous mixture. The samples were physically characterized by defining particle size distribution and moisture content. Particle size distribution (PSD) was defined using a Malvern Mastersizer 2000 apparatus that provides PSD curves determined using laser diffraction method. Moreover, some important parameters such as d_{10} , d_{50} , d_{90} and specific surface area (SSA) were defined.

On the other hand, moisture content was determined using a halogen analyzer. The tests were repeated three times in order to avoid deviated results, and the value reported corresponds to the average measure.

2.2 Flammability parameters

Several parameters define flammability or ignition sensitivity, among those are included minimum ignition temperature of a dust cloud and minimum ignition energy. Both tests were carried out following the standard procedure defined in ISO/IEC 80079-20-2:2016 [9].

Minimum ignition temperature of dust cloud (MITc) is defined as the minimum temperature required to produce the ignition of a sample dispersed in the air forming a dust cloud. The test was carried out using a vertical Godbert-Greenwald furnace. On the other hand, minimum ignition energy was determined using a MIKE 3 apparatus, which is based on the Hartmann tube. The equipment is shown in figure 1.



Figure 1: G-G furnace for MITc determination (left) and MIKE 3 apparatus for MIE determination (right)

3 Results and discussion

Table 1 shows the results for moisture content, together with the main parameters obtained from particle size distribution test. Moreover, PSD curves are plotted in figure 2.

Table 1: moisture and PSD parameters

	Moisture [%]	d_{10} [μm]	d_{50} [μm]	d_{90} [μm]	SSA [m^2/g]
Bituminous coal	1.67	17.9	190.4	499.3	0.14
Wheat straw	7.10	8.6	108.4	607.7	0.27
Blend	2.73	13.0	147.6	489.2	0.18

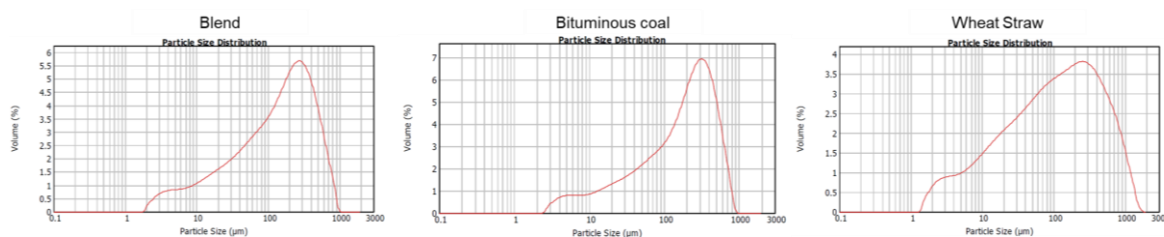


Figure 2: Particle Size Distribution (PSD) curves

For each sample, the standard deviation between the three measurements was lower than 0.15, which means that the results obtained are considered to be representative.

From PSD curves it can be seen that the blend behaves similar to coal and the addition of wheat straw does not lead to a significant change in the PSD curve. Moreover, from the data it can be noticed that, even though wheat sample has been sieved using a 500 μm sieve, d_{90} value is greater than 600 μm . This can be explained due to the fact that biomass particles are usually elongated and fibrous particles that might go through the sieve but when using a more accurate particle size determination method, the samples present greater particle sizes [10]. It is important to consider that the morphology of the sample might influence the ignition characteristics [11,12].

Regarding minimum ignition temperature and minimum ignition energy results, table 2 reports the values obtained in the tests.

Table 2: ignition sensitivity parameters

	MIT_c [$^{\circ}\text{C}$]	MIE [mJ]
Bituminous coal	640	540
Wheat straw	480	>1000
Blend	500	170

From the results reported it is easy to notice that the mixture of both samples significantly modifies the flammability parameters. If the blend is compared to the coal, it has to be remarked that the addition of biomass increases the associated risk as both MIT_c and MIE are reduced. On the other hand, if the blend is compared to the biomass different tendencies are obtained for both parameters. While the addition of coal leads to an increase of the MIT_c and, therefore, a reduction of the associated risk, when addressing MIE the results are quite the opposite.

The lower ignition temperature and energy of the blend can be attributed to the high volatile content of wheat straw, which increases the availability of combustible gases in the fuel mixture

leading to a cloud which can be easily ignited [13]. Moreover, the higher specific surface of the wheat, and lower density leads to a better formation of the dust cloud and ease the ignition.

When testing straw MIE no ignition was recorded during the test even applying 1000 mJ at different concentrations, which is the maximum test energy. Therefore, it was concluded that the minimum ignition energy for wheat straw is greater than 1000 mJ. However, when the blend was tested, a heavy drop of this value is obtained, as the MIE was defined in 170 mJ. This result would not be such important if the bituminous coal was lower and therefore, the addition of wheat straw increased MIE value. However, the results showed that, when mixing both samples the dust cloud produced is more prone to ignite than the samples individually. In other words, it seems that the samples interact with each other leading to a more flammable substance.

MITc parameter does not show such significant differences between samples as MIE. Indeed, in this test the expected result is obtained: the mixture presents a MITc value located between coal and straw MITc. However, despite the tendency shown in MIE in which coal was more susceptible to ignition, in MITc test straw showed a lower value.

This is not an unusual result. Indeed, several authors have noted that biomasses are easy to ignite when applying high temperatures but not when using electrical sparks as ignition sources. This is due to the fact that the high temperatures provide enough thermal energy to initiate the ignition process through pyrolysis, which is the breakdown of organic materials in the absence of oxygen. In contrast, electrical sparks generate a small amount of heat and do not provide enough thermal energy to initiate pyrolysis in the biomass material. Instead, electrical sparks may only ignite small, exposed surfaces of the biomass material, such as sawdust or wood shavings [14,15].

Moreover, if the moisture values reported un table 1 are considered, it can be noticed that biomass moisture is significantly greater than coal value. The moisture content of the biomass material also plays an important role in its ignitability. Biomass materials with higher moisture content are less prone to ignition, as the moisture helps to dissipate the heat and prevent pyrolysis from occurring [16].

Overall, the ease of igniting biomass materials depends on a variety of factors, including the type of material, its moisture content, and the ignition source used. High temperatures can provide enough thermal energy to initiate pyrolysis and ignite biomass materials, while electrical sparks may only be able to ignite small, exposed surfaces of the material.

On the other hand, the ignitability of coal is different than that of biomass materials due to differences in their chemical and physical properties. Coal is a fossil fuel composed of carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, and sulphur, and its ignitability depends on various factors, such as coal type, moisture content, volatile matter content, particle size, and heating rate.

Unlike biomass materials, coal can be ignited by a range of ignition sources, including high temperatures, electrical sparks, and even spontaneous combustion. In general, coal has a higher ignition temperature than biomass materials, and its ignition requires a higher amount of thermal energy [17–19]. Additionally, coal dust can be highly flammable and can ignite easily when exposed to electrical sparks or other ignition sources.

Overall, the ignitability of coal is different than that of biomass materials, but it is still influenced by factors such as moisture content and particle size.

4 Conclusions

The research carried out in the present study has shown that adding wheat straw to bituminous coal can significantly affect the flammability properties of the fuel blend. In particular, the addition of wheat straw to bituminous coal can lower the minimum ignition temperature and minimum ignition energy of the fuel blend. This means that the fuel blend can ignite more easily and sustain combustion with less energy input than coal or biomass alone. The lower ignition temperature and energy can be attributed to the high volatile content of wheat straw, which increases the availability of combustible gases in the fuel mixture. However, careful control of the fuel blend composition and combustion conditions is necessary to ensure safe and efficient operation of the power plant. Overall, these findings suggest that adding wheat straw to bituminous coal can be a promising op-

tion for promoting sustainability in the energy sector, but further research is needed to fully understand the behavior of the fuel blend and optimize its performance.

In conclusion, co-firing coal and biomass in thermal power plants can be a sustainable and environmentally friendly option for generating electricity, as it can significantly reduce the carbon footprint of the power plant while also helping to comply with emissions regulations. However, the combustion behavior of the fuel blend can be different from that of coal or biomass alone, and careful consideration of flammability parameters is necessary to ensure safe and efficient operation of the power plant. Controlling the ratio of coal to biomass in the fuel mixture, particle size, moisture content, and combustion conditions are critical to optimizing the performance and reducing the emissions of the power plant. By taking these factors into account, co-firing can be a viable option for reducing greenhouse gas emissions and promoting sustainability in the energy sector.

5 References

- [1] **A.E. Farrell, A.R. Gopal**, Bioenergy research needs for heat, electricity, and liquid fuels, *MRS Bull.* 33 (2008) 373–380. <https://doi.org/10.1557/mrs2008.76>.
- [2] **N. Scarlat, J.F. Dallemand, F. Monforti-Ferrario, M. Banja, V. Motola**, Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union - An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51 (2015) 969–985. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.062>.
- [3] **A. Zhou, J. Hu, K. Wang**, Carbon emission assessment and control measures for coal mining in China, *Environ. Earth Sci.* 79 (2020) 461. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09189-8>.
- [4] **N. Fernandez-Anez, D.J.F. Slatter, M.A. Saeed, H.N. Phylaktou, G.E. Andrews, J. Garcia-Torrent**, Ignition sensitivity of solid fuel mixtures, *Fuel.* 223 (2018) 451–461. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.106>.
- [5] **J.S. Tumuluru, S. Sokhansanj, C.T. Wright, R.D. Boardman, N.A. Yancey**, A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods, *Am. Soc. Agric. Biol. Eng. Annu. Int. Meet.* 2011, ASABE 2011. 3 (2011) 2053–2083. <https://doi.org/10.13031/2013.37191>.
- [6] **F. Al-Mansour, J. Zuwala**, An evaluation of biomass co-firing in Europe, *Biomass and Bioenergy.* 34 (2010) 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.004>.
- [7] **W. Qing, X. Hao, L. Hongpeng, J. Chunxia, B. Jingru**, Thermogravimetric analysis of the combustion characteristics of oil shale semi-coke/biomass blends, *Oil Shale.* 28 (2011) 284–295. <https://doi.org/10.3176/oil.2011.2.03>.
- [8] **N. Fernandez-Anez, B. Castells Somoza, I. Amez Arenillas, J. Garcia-Torrent**, *Explosion Risk of Solid Biofuels*, 1st ed., Springer International Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43933-0>.
- [9] **European committee for standardization CEN-CENELEC**, ISO/IEC 80079-20-2:2016 Explosive atmospheres - Part 20-2: Material characteristics - Combustible dusts test methods, 2016.
- [10] **B. Castells, I. Amez, L. Medic, J.G. Torrent**, Particle size influence on the transport classification labels and other flammability characteristics of powders, *Appl. Sci.* 10 (2020) 1–14. <https://doi.org/10.3390/app10238601>.
- [11] **C.K. Man, M.L. Harris**, Participation of large particles in coal dust explosions, *J. Loss Prev. Process Ind.* 27 (2014) 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.11.004>.
- [12] **R.K. Eckhoff**, Understanding dust explosions. The role of powder science and technology, *J. Loss Prev. Process Ind.* 22 (2009) 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.07.006>.
- [13] **W. Cao, J. Li, L. Lue**, Study on the ignition behavior and kinetics of combustion of biomass, *Energy Procedia.* 142 (2017) 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.022>.
- [14] **V.S.P. Bitra, A.R. Womac, Y.T. Yang, P.I. Miu, C. Igathinathane, N. Chevanan, S. Sokhansanj**, Characterization of wheat straw particle size distributions as affected by knife

- mill operating factors, *Biomass and Bioenergy*. 35 (2011) 3674–3686. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.026>.
- [15] **T. Grotkjær, K. Dam-Johansen, A.D. Jensen, P. Glarborg**, An experimental study of biomass ignition, *Fuel*. 82 (2003) 825–833. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00369-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00369-1).
- [16] **R.K. Eckhoff**, *Explosion hazards in the process industries*, Gulf Professional Publishing, Norway (University of Bergen), 2005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2014-0-03887-7>.
- [17] **B. Janković, N.G. Manić, D.D. Stojiljković, V. V. Jovanović**, The assessment of spontaneous ignition potential of coals using TGA–DTG technique, *Combust. Flame*. 211 (2020) 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.020>.
- [18] **P.R. Amyotte, M.J. Pegg, F. Khan, M. Nifuku, T. Yingxin**, Moderation of dust explosions, *J. Loss Prev. Process Ind.* 20 (2007) 675–687. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.05.011>.
- [19] **G.T. Marangwanda, D.M. Madyira, P.G. Ndungu, C.H. Chihobo**, Combustion characterisation of bituminous coal and pinus sawdust blends by use of thermo-gravimetric analysis, *Energies*. 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14227547>.

IZAZOVI I PRILIKE VODONIKA KAO ODRŽIVOG VAZDUHOPLOVNOG GORIVA BUDUĆNOSTI

CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR HYDROGEN AS A VIABLE AVIATION FUEL OF THE FUTURE

Toni IVANOV¹, Milica IVANOVIĆ^{1*}, Miloš ZUBIĆ², Aleksandar SIMONOVIĆ¹

¹ Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd

² Vojnotehnički institut, Beograd

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.039>

Jedan od ključnih elemenata za proces dekarbonizacije mogla bi biti upotreba vodonika u energetske sektorima. Potencijal zamene fosilnih goriva održivo proizvedenim vodonikom odavno je prepoznat. Zbog porasta troškova energije poslednjih godina, uticaja konvencionalnih goriva na životnu sredinu i postignutog/predviđenog tehnološkog napretka u skladištenju i transportu, vodonik postaje sve više izvodljivo rešenje u smislu primarnog izvora energije. Evropske zemlje su postavile ambiciozne planove za korišćenje vodonika kao obnovljivog izvora energije. Mnogi istraživački projekti finansirani su iz grantova EU, dok je Evropska komisija postavila u martu 2022. godine plan za što veću nezavisnost od uvoza fosilnih goriva, koji između ostalog za cilj ima proizvodnju 10 miliona tona vodonika, dok je 10 miliona tona planirano za uvoz do 2030. godine.

Korišćenje vodonika kao izvora goriva u sektoru vazduhoplovstva se takođe dosta razmatra poslednjih godina. Prednosti vodonika kao avionskog goriva su očigledne. Vodonik je održiv, ne proizvodi emisije štetnih gasova, ima veliku gustinu energije itd. Međutim, još uvek postoje velike tehničke poteškoće koje bi trebalo prevazići, što predstavlja izazov pri postavljanju vodonika kao održivog goriva za vazduhoplovstvo. U radu su predstavljani i diskutovani najznačajniji izazovi, neka moguća rešenja i mogućnosti koje proizilaze iz upotrebe vodonika za vazduhoplovne propulzore.

Ključne reči: vodonik; obnovljiva energija; vazduhoplovno gorivo; vazduhoplovna propulzija

One of the key elements for the decarbonization process could be the use of hydrogen in the energy sectors. The potential of replacing fossil fuels with sustainably produced hydrogen has been recognized long ago. Due to the rise of energy costs in recent years, the environmental impact of conventional fuels and achieved/foreseen technological advances in storage and transportation, hydrogen is becoming a more and more feasible solution as a primary energy source. European countries have established ambitious plans for the use of hydrogen as a renewable energy source. Many research projects have been financed by EU grants, while European Commission set a plan in March 2022 for a greater independence from fossil fuel imports, with the aim of producing 10 million tons of hydrogen, with 10 million tons intended for import by the year 2030.

The use of hydrogen as a fuel source in the aviation sector has been considered a lot in recent years as well. The benefits of hydrogen as an aviation fuel are obvious. Hydrogen is sustainable, produces no harmful gas emissions, has a large energy density, etc. However, large technical difficulties still need to be overcome, challenging the placement of hydrogen as a viable aviation fuel source. Here, the most significant challenges, some possible solutions and the opportunities that arise from using hydrogen in aerospace propulsion are presented and discussed.

Key words: hydrogen; renewable energy; aviation fuel; aerospace propulsion

* Corresponding author, e-mail: mivanovic@mas.bg.ac.rs

1 Uvod

Vodonik se ne nalazi u slobodnom obliku na Zemlji, stoga se može dobiti iz drugih organskih i neorganskih jedinjenja. U prvom redu to su voda, prirodni gas, biomasa, alkoholi. Podelom različitih tehnoloških postupaka za dobijanje vodonika želeo se istaći uticaj na postojanje emisije ugljen-dioksida tokom procesa proizvodnje. Tendencija postavljenih vodoničnih strategija ide u pravcu proizvodnje takozvanog zelenog vodonika, odnosno akcentat je stavljen na proizvodne procese elektrolize bez emisije CO₂. U smislu porekla vodonika, proizvodni procesi se kategorišu u devet grupa (svaka označena različitom bojom), gde je klasifikacija bazirana na procesima dobijanja vodonika iz uglja, prirodnog gasa, obnovljivih izvora energije i posredstvom nuklearne energije. Najčešći metod danas korišćen je termički proces parnog reformisanja prirodnog gasa i elektroliza. Druge metode uključuju solarne i biološke procese, zasnovane na fotobiološkim, fotoelektrohemijskim, termohemijskim procesima, kao i aktivnostima mikroba, bakterija i mikroalgi. Bitno je napomenuti da vodonik danas jeste pre nosilac energije, koji se koristi kao medij za skladištenje, transport i isporuku energije proizvedene iz drugih izvora, nego sam izvor energije. Širok spektar resursa ne odnosi se samo na proizvodne procese, već i na primenu: za proizvodnju električne energije, kao gorivo za transportna sredstva, u hemijskoj industriji, za grejanje itd. Sektor industrije je najviše upoznat sa proizvodnjom, rukovanjem i distribucijom vodonika, s obzirom da se u današnje vreme dominantna količina (oko 90 %) proizvedenog vodonika koristi upravo u ovom sektoru u procesima dobijanja toplotne i električne postupcima kogeneracije ili direktnog sagorevanja [1]. Pored toga, danas sve više postoji tendencija upotrebe vodonika u električnim vozilima (automobilima i autobusima), ali i ostalim transportnim sistemima. Fokus ovog rada je na upotrebi vodonika u vazduhoplovnoj industriji, koji ponovo privlači veliku pažnju i sve više se prepoznaje kao pravac razvoja za smanjenje klimatskog uticaja ove industrije. Pretpostavka važne uloge vodonika ne zasniva se samo na klimatskom uticaju, već i sa njim povezanim ekonomskim merama i troškovima, kao ključnim mehanizmom kompenzacije na koji se model trgovanja emisijama (EU ETS) zasniva (komercijalna avijacija je deo ovog sistema od 2012. godine).

1.1 Direktive i strategije EU

Važno je istaći da je u strategiji Evropske komisije za klimatski neutralnu Evropu [2], vodonik prepoznat kao buduće rešenje nulte emisije u okviru integrisanog energetskeg sistema, koje podržava dekarbonizaciju industrije, transportnih sistema, proizvodnje energije i građevinarstva. U istom dokumentu, akcentat je stavljen pre svega na istraživanja i inovacije, kreiranje tržišta, pravne regulative i investicije. Takođe, dokument navodi da se vodonik još uvek najvećim delom proizvodi iz fosilnih goriva (najviše iz prirodnog gasa ili uglja) što rezultuje oslobađanjem od 70 do 100 miliona tona CO₂ godišnje u zemljama EU. Strategijski pristup predviđa ambiciozni plan dostizanja 2x40 GW (40 GW u EU i 40 GW u susjednim zemljama sa izvozom u EU) elektrolizera do 2030. godine. U najnovijem predlogu direktive o obnovljivim izvorima energije [3], Evropska komisija upućuje na zamenu 50% sivog vodonika (iz fosilnih goriva) do 2030. godine, zelenim vodonikom (iz OIE). U sektoru transporta želi se postići da 2,6% potražnje za energijom bude zadovoljeno iz tzv. RFNBO (*Renewable fuels of non-biological origin*), što uključuje vodonik i sintetička e-goriva, proizvedena iz zelenog vodonika. Navedeni postotak obuhvata morski, drumski, železnički saobraćaj, kao i vazduhoplovstvo.

2 Transportni sektor

U današnje vreme, vodonik u transportnom sektoru se koristi u kompresovanom ili utečnjem stanju. Međutim upoređujući sa električnim vozilima značajno je manji broj vozila sa vodonikom kao gorivom [4]. Isti rad analizira finansijsku izvodljivost upotrebe vodonika za sektore energetskeg sistema: za dobijanje električne energije, za grejanje, u industriji i transportu. Rezultati su dali zaključak da upotreba tehnologije koja počiva na vodoniku u svakom od razmatranih sistema dovodi do povećanja troškova energetskeg sistema. U dokumentu [5] napominje se da 19% globalne emisije gasova staklene bašte potiče iz transportog sektora i u tom domenu predviđa se najznačajnija upotreba vodonika sa projekcijom potražnje od 285 MT do 2050. godine. Posmatrajući kroz

prizmu dekarbonizacije, vazduhoplovstvo i pomorski saobraćaj imaju udeo od 4% u globalnoj emisiji [6]. Usklađenost sa pomenutim udelom potiče iz odlika ovakvih vidova transporta, da su namenjeni za duže distance i zahtevaju velike snage.

Avijacijski sektor se procenjuje kao vrlo inertan što se tiče dekarbonizacije zbog strogih zahteva za što manjom masom i zapreminom za smeštaj goriva. Pomak je načinjen sa održivim gorivima za avijaciju (*Sustainable Aviation Fuels* - SAFs), međutim ova goriva nisu ispunila očekivanja zbog ograničene ponude i visokih cena.

3 Emisije gasova letelica

Pored emisije CO₂ goriva za pogon letelica, klimatski uticaj je izazvan i drugim štetnim supstancama. U zavisnosti od visine leta i atmosferskih uslova, nusprodukti izduvnih gasova su oksidi azota (NO_x), sumporni oksidi (SO_x), kombinacija čestica čađi i vodene pare.

Predviđa se da u doglednoj budućnosti baterijski pogon aviona neće biti moguć za veće avione i veće domete leta. Vodonik se može koristiti kao pogonsko gorivo aviona kroz termičku konverziju u motorima sa sagorevanjem ili putem elektrohemijske konverzije koja se odvija u gorivnim ćelijama. Važno je napomenuti da oba principa ne izazivaju emisije CO₂, dok je emisija NO_x i čađi značajno smanjena pri sagorevanju vodonika, a u potpunosti eliminisana za pogon sa gorivnim ćelijama. Podaci za komercijalnu avijaciju iz avgusta 2022. godine govore da emisija CO₂ u proseku iznosi 141 g/(sedište milja) [6].

4 Forme vodonika kao goriva za pogon letelica

Jedan od većih problema predstavlja projektovanje skladišta goriva. Goriva *Jet A* i *Jet A-1* danas se najviše koriste za pogon turbinskih motora, mlaznih motora kerozinskog tipa i za pogon turbo-mlaznih i turboelisnih motora.

Vodonik skladišti 2,8 puta više energije po jedinici mase od *Jet A*, sa napomenom da je njegova zapreminska gustina energije znatno manja (pri skladištenju na 35 MPa, gustina energije dostiže samo 8% gustine energije benzina) [7]. Pri standardnoj temperaturi i pritisku (0°C, 100 kPa), vodonik je u gasnom stanju sa gustinom od 0,899 kg/m³, dok *Jet A* ima gustinu za oko 900 puta veću (808 kg/m³). Da bi se dovoljno vodonika smestilo u avion, potrebno je povećati njegovu gustinu. To se može postići skladištenjem gasovitog vodonika (GH₂) pod visokim pritiskom, ili njegovim skladištenjem u tečnom stanju (LH₂) na veoma niskim temperaturama. Tečni vodonik je najlakša poznata tečnost, što je od posebnog značaja za redukciju mase letelice. Gustina tečnog vodonika na ambijentalnom pritisku je skoro tri puta veća nego kod vodonika u gasovitom stanju. Vodonik u gasovitom stanju se skladišti na pritiscima do 700 bar [7]. Trenutno rešenje skladištenja tečnog vodonika je nešto iznad atmosferskog pritiska (101 – 150 kPa) na kriogenim temperaturama od –253°C do –248°C (tačka ključanja vodonika na atmosferskom pritisku je na –253°C) [7].

Za pomenute uslove u Tabeli 1 predstavljene su termodinamičke karakteristike za tri goriva u vazduhoplovstvu.

Tabela 1. Termodinamičke osobine za *Jet A*, GH₂, LH₂ [8]

	<i>Jet A</i>	Komprimovan vodonik u gasnom stanju - GH ₂	Tečni vodonik - LH ₂
Specifična energija (MJ/kg)	43	120	120
Gustina (kg/m ³)	808	42	71
Gustina energije (GJ/m ³)	34,7	5	8,5

Može se uočiti da je za istu količinu energije dobijenog od *Jet A* potrebna 7 puta veća zapremina komprimovanog GH₂ i 4 puta veća zapremina LH₂. Ovo utiče u izvesnoj meri na ukupni odnos uzgona i otpora - L/D (*lift to drag ratio*). Takođe, zbog povećane zapremine i zbog toga što se vodonično tečno gorivo mora čuvati na veoma niskim temperaturama i u većoj zapremini u odnosu

na kerozinska goriva, izolacija posude dodatno povećava zauzetost prostora za skladištenje i što je verovatno bitnije, povećava masu prazne letelice. Ono što bi takođe moglo da predstavlja problem su nepostojeća standardizacija projektovanja, izrade i rada sistema za hlađenje na kriogenim temperaturama u kontekstu skladištenja u letelici, kao i specifične bezbedonosne procedure u smislu lanca snabdevanja i ostale logistike. Specifičnost predstavlja i dopunjavanje goriva u smislu izvođenja određenih operacija koje uključuju odzračivanje i spečavanje mržnjenja.

Veća gustina energije čini LH₂ boljom opcijom sa stanovišta poboljšanja nosivosti i raspona potencijalnih projektnih verzija aviona. Dodatna statistika koja govori u prilog korišćenju tečnog vodonika je da je za istu distancu leta upoređujući sa gorivom *Jet A*, potrebno tri puta manje tečnog vodonika. U uporednoj Tabeli 2 prikazane su neke od karakteristika dva koncepta letelice sa različitim pogonskim gorivom za režim krstarenja: 0,85 M; kapacitet sedišta 400; dolet 10 185 km.

Tabela 2. Karakteristike konvencionalnog i LH₂ koncepta letelice [8]

Karakteristika	Jet A	Komprimovan vodonik u tečnom stanju - LH ₂	Odnos LH ₂ / Jet A
Masa prazne letelice (t)	112,2	111,2	0,99
Masa goriva (t)	86,5	28	0,30
Poletna masa (t)	237	177	0,75
Udeo u masi (%)			
- struktura	26	30,7	1,18
- propulzija	6,4	12,3	1,92
- gorivo	36,5	15,7	0,45
- korisni teret	16,8	22,5	1,33
- oprema	14,3	18,8	1,32
L/D	17,91	16,07	0,89
Specifična potrošnja goriva ((kg/h)/dN)	0,267	0,091	0,34
Korišćenje energije (kJ/ sedište milja)	1,46	1,31	0,89

5 Bezbedonosni aspekti

Još otkad je izolovan u 16. veku, vodonik je nazvan “zapaljivi vazduh” i sa vazduhom gradi izuzetno reaktivnu smešu. Neke od osobina kada se razmatraju bezbedonosni aspekti su toplota sagorevanja (LH₂ – 120 kJ/g, Jet A - 42,8 kJ/g), granica zapaljivosti (4,0 – 75,0 vol% za LH₂, u odnosu na Jet A - 0,6 – 4,7 vol%), minimalna energija paljenja u vazduhu (LH₂ – 0,02 mJ, Jet A – 0,25 mJ), temperatura plamena (LH₂ – 2318 K, Jet A – 2200 K) [9]. Zbog niskih temperatura skladištenja tečnog vodonika, posebna pažnja se poklanja materijalima koji su u direktnom kontaktu sa tečnošću, a takođe i izolacija treba da je kompatibilna. Zbog veličine molekula i niskog viskoziteta, vodonik može da curi iz cevovoda i drugih struktura pa je redovna inspekcija potrebna posebno na spojevima duž cevovoda i drugim kritičnim tačkama posuda pod pritiskom. Vodonik prodire u metalne materije i izaziva tzv. vodoničnu krtost, deformisanje i razaranje materijala. Zbog veličine molekula, na spojevima duž cevovoda i drugim kritičnim tačkama potrebna je redovna inspekcija zbog veličine vodonika. Prednost u smislu organizovanja na pisti je što je energija zračenja prilikom sagorevanja tečnog vodonika manja nego za *Jet A* gorivo (17-25% naspram 30-42%) [9], pa se sigurna zona projektuje sa manjim prečnikom (uglavnom oko 100 m). Međutim, vodonik gori veoma

svetlim plamenom, koji je skoro nevidljiv na dnevnom svjetlu, plamen emituje elektromagnetno zračenje na talasnim dužinama od 2-4 μm , i specifični detektori plamena obavezni.

Sveukupno, aspekti bezbednosti rukovanja vodonikom u tečnom i gasovitom stanju, u čitavom sistemu logistike i upotrebe, obuhvataju veliki varijetet osobina i bezbedonosnih problema.

6 Planovi i izvedeni projekti velikih kompanija

Krajem 2020. godine kompanija *Airbus* se oglašila sa planom nazvanim ZEROe, za razvoj komercijalnih aviona na vodonik, sa ambicijom da oni uđu u upotrebu 2035. godine. Plan sveobuhvatno podrazumeva projektovanje, razvoj, testiranje, finansiranje, kontrolu, izlazak na tržište, formiranje distribucionih lanaca i na kraju masovnu proizvodnju.

Tokom januara 2023. godine obavljen je prvi test let britansko - američke kompanije *ZeroAvia* sa do sada najvećim avionom na svetu koji delimično pokreće električni motor sa vodonikom. Avion *Dornier 228* ima 19 sedišta, pokreće ga motor sa unutrašnjim sagorevanjem na desnom krilu *Honeywell TPE-331*, dok je na levom krilu električni motor snage 600 kW. Avion sa 6 sedišta iste kompanije iz 2021. godine *HyFlyer II* do sad imao više od 30 probnih letova. Kompanija navodi da ima plan potpuno komercijalne avijacije koja bi bila spremna za podnošenje sertifikacije do kraja godine, a koja bi obavljala komercijalne avionske letove za predviđenih 9 do 19 sedišta do 2025. godine. Što se tiče doleta, *Dornier 228* može sa 19 putnika da leti do 1130 km. Trenutno je u izradi pogonska grupa sa 2,5 MW snage, sa 40-80 sedišta i doletom od 1852 km, koja je planirana za 2026. godinu. Startup kompanija iz Danske *Destinius* razvija hipersoničnu letelicu ultra dugog doleta, sa kapacitetom od ~25 putnika. Predviđeno je da letelica bude sposobna da saobraća i koristi konvencionalne aerodrome. Avion bi trebalo da bude kombinacija turbomlaznih motora na vodonik za poletanje i sletanje, dok bi postojao i zasebni raketni motor za dostizanje planirane brzine do 5 Ma. Vodeći svetski proizvođač aviona *The Boeing Company* ima u planu testiranje mlaznih motora na vodonik, američka kompanija *Boom Technology* razvija supersonične avione sa vizijom takvog vida budućeg transporta u SAD, dok *Hermes Aviation* koji razvija autonomne letelice, trenutno saraduje sa američkim avio snagama i NASA–om na planiranju i razvoju različitih vrsta autonomnih letelica.

7 Zaključak

Globalno se intenzivno istražuju mogućnosti, potencijali, načini iskorišćenja i poboljšanja alternativa fosilnih goriva u čitavom spektru privrede. Vodonični pogon nailazi sve više na buduće prihvatanje i planiranje u sektoru vazdušnog transporta, što potvrđuju planovi i izvedene test letelice velikih kompanija. S obzirom da obnovljivi izvori energije pokazuju velike prednosti u pogledu zaštite životne sredine, fokus proizvodnje vodonika gravitira ka takvim sistemima. Međutim, potrebno je konstantno pratiti i procenjivati druge eksterne efekte, kao što su u prvom redu troškovi proizvodnje goriva, potom razvijanja efektivnih i inovativnih pogonskih sistema, koji mogu da utru put prodoru vodonika na tržište u kome će cena i efikasnost sistema biti uporediva sa konvencionalnim vidovima energije.

8 Zahvalnost

Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-47/2023-01/ 200105 od 03.02.2023. god.

9 Reference

- [1] **International Energy Agency (IEA)**, Global Hydrogen Review, 2022
- [2] **European Commission**, A hydrogen strategy for a climate neutral Europe, Brussels; 2020.
- [3] **DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL** of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources

- [4] **Korberg A., Thellufsen J., Skov I., Chang M., Paardekooper S., Lund H., Mathiesen B.**, On the feasibility of direct hydrogen utilisation in a fossil-free Europe, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.
- [5] A special report by **International Energy Agency (IEA)**, Net zero by 2050 - A roadmap for the global energy sector, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [6] **International Energy Agency (IEA)**, CO₂ Emissions in 2022,
- [7] **Tang D. Et al.**, State-of-the-art hydrogen generation techniques and storage methods: A critical review, *Journal of Energy Storage*, 64, 2023,
- [8] **Mukhopadhaya J., Rutherford D.**, Performance analysis of evolutionary hydrogen-powered aircraft, *The international council on clean transportation*, 2022
- [9] **Brewer DG**, Hydrogen aircraft technology, N.W. Roca, Raton, Florida, USA: CRC Press, Inc.; 1991.

ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГЕТСКОГ ПОТЕНЦИЈАЛА ОТПАДА ОД КАФЕ

EXAMINATION OF SPENT COFFEE GROUNDS ENERGY POTENTIAL

Михаило ВЛАДИЋ, Небојша МАНИЋ, Никола КАРЛИЧИЋ*,
Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд

Konsumiranje kafe je dnevni ritual rasprostranjen širom sveta. Procenjeno je da se u svetu popije čak 2,25 milijardi šoljica ovog napitka u jednom danu, čime se proizvodi velika količinu otpada. U radu je ispitан energetski potencijal ovog otpada metodom tehničke i termalne analize. Rezultati ispitivanja su pokazali niske vrednosti HGI, nizak sadržaj volatila i koksnog ostatka usled velike količine vlage

.Кljučне речи: *отпад од кафе; енергија из отпада; техничка анализа; термална анализа*

Drinking coffee is a daily ritual all over the world. It is estimated that as many as 2.25 billion cups of this beverage are consumed in one day, which produces a large amount of waste. The paper examines the energy potential of this waste using the method of technical and thermal analysis. The test results showed low HGI values, low content of volatiles and coke due to a large amount of moisture.

Key words: *Spent coffee grounds; waste to energy; proximate analysis; thermal analysis*

1 УВОД

Живимо у времену које карактерише интезивно коришћење енергије у свим пољима људског живота. Такав приступ располагању енергетским ресурсима је растући тренд, за који не постоје назнаке да ће се зауставити. Проблем у томе је што се највећи део енергетских потреба и даље задовољава коришћењем фосилних горива. Поред тога што најзаступљенијих енергената има све мање, њихово коришћење неповољно утиче на животну средину. Сходно томе, целокупна енергетска политика тежи да се потпуно окрене обновљивим изворима енергије и тако у потпуности избаци фосилна горива из употребе. Такав заокрет оправдавају бројне предности обновљивих извора. Изузетно низак степен загађења, доступност, цена, енергетски потенцијал и квалитет добијене енергије су само неки од њих. Са аспекта сагоревања као процеса трансформације енергије, директна замена фосилних горива би била биомаса, јер се може користити у облику чврстог, течног и гасовитог горива.

Деф. 1. „Биомаса представља биоразградиви део производа, отпада и остатака биолошког порекла из пољопривреде, шумарства и повезаних индустрија, као и биоразградиви део индустријског и комуналног отпада.“ [1]

Познавајући основне појмове биомасе, идеја овог истраживања је била да се одабере и испита узорак који поседује одређени енергетски потенцијал, свима је доступан, а опет неповољно испитан и искоришћен као енергент. Узевши у обзир све наведене факторе, за узорак је изабрана кафа, тачније млевени остатак кафе након припремања напитака на апаратима за кафу. Потенцијал је уочен у великој количини отпада која настаје прилоком прављења ових напитака, о чијој широкој употреби сви сведочимо.

* Corresponding author, e-mail: nkarlicic@mas.bg.ac.rs

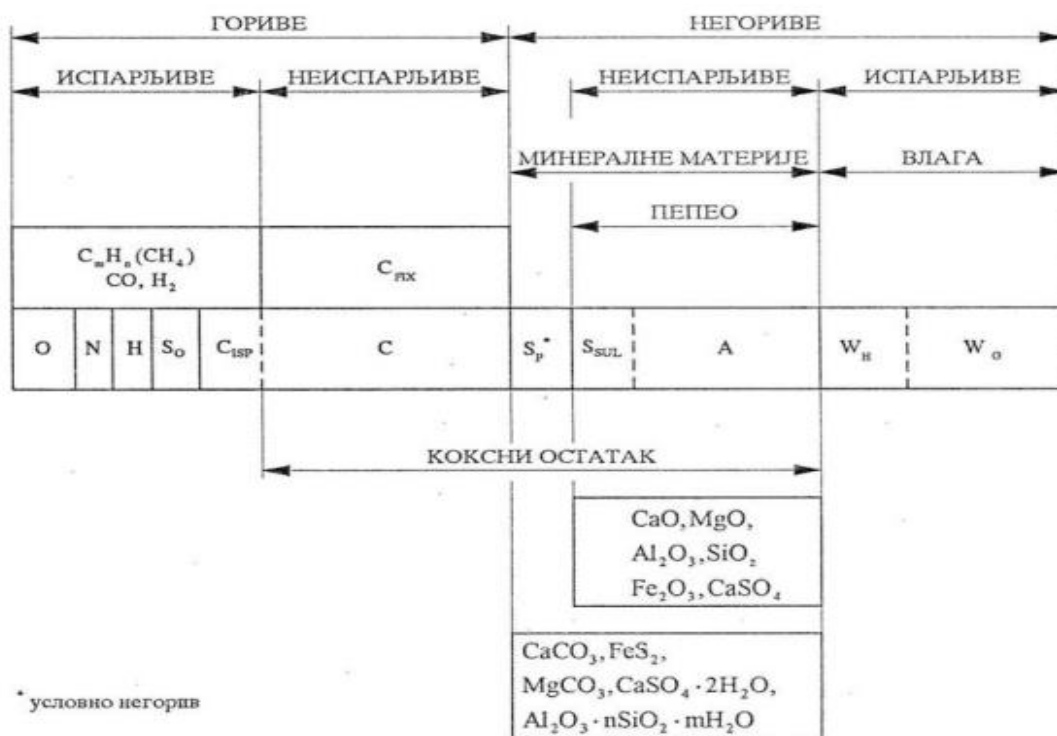
2 ТЕХНИЧКА АНАЛИЗА

Техничка анализа представља скуп различитих особина горива које указују на могућности адекватне примене тог горива, нарочито чврстог. Техничка анализа се заснива на термичком разлагању масе горива, процесу који обухвата све методе коришћења чврстих горива, при чему се добијају испарљиве и неиспарљиве материје. Као последица сложене структуре чврстих горива, наведне материје садрже гориве и негориве компоненте. Све четири врсте наведених компоненти горива заједно представљају основне податке техничке анализе.

Подаци техничке анализе:

- садржај негоривих испарљивих материја – садржај грубе влаге и хигроскопске влаге
- садржај горивих испарљивих материја (волатила), у чијем се саству налазе испарљиви угљеник и водоник, и условно кисеоник и азот
- садржај негоривих неиспарљивих материја – садржај минералних материја (пепела)
- садржај коксног остатка – горивих и негоривих неиспарљивих материја.

Поред ових карактеристика, подаци техничке анализе су још и топлотна моћ, понашање пепела на повишеним температурама, дужина и боја планема, изглед и структура коксног остатка и др.



Слика 1. Подаци техничке анализе [2]

3 МЕТОДЕ ТЕХНИЧКЕ АНАЛИЗЕ

3.1 Одређивање садржаја влаге

Садржај влаге у гориву неповољно утиче на његову ефикасност, јер се део количине топлоте троши за њено испаравање, снижава топлотну моћ, а утицајем на масу горива, диктира цену његовог транспорта. Разликују се три врсте влаге: груба (површинска), хигроскопска (унутрашња) и конституциона. У техничким прорачунима се конституциона влага занемарује, тако да укупна влага представља збир грубе и хигроскопске.

– Одређивање садржаја грубе влаге сушењем на ваздуху [3]:

На ваги тачности 0,1% измерен је послужавник без узорка. Затим, равномерно распоређен узорак у посуди се поново мери на ваги. После другог мерења, посуда са узорком се одлаже на место погодно сушењу на ваздуху током 24 часа. Добијена маса након сушења представља аналитичку масу узорка.

Образац за израчунавање губитка грубе влаге у узорку сушеном на ваздуху:

$$M_f = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\% \text{ m/m}],$$

где је:

M_f - губитак влаге у узорку сушеном на ваздуху [% m/m]

m_1 – маса празне посуде [g]

m_2 – маса посуде и узорка пре сушења на ваздуху [g]

m_3 – маса посуде и узорка после сушења на ваздуху [g]



Слика 2. Узорак на послужавнику пре сушења

– Одређивање садржаја хигроскопске влаге:

Припрема аналитичког узорка за одређивање садржаја хигроскопске влаге врши се у-ситњавањем кроз сито (слика 3), да би добијени узорак био у складу са стандардом SRPS EN 14780. Измери се маса празне посуде са поклопцем, а потом у њу сипа око 1g узорка и поново измери маса пре сушења (слика 4). Отворена посуда са узорком и поклопац посуде се стављају у сушницу где се узорак суши у атмосфери ваздуха на претходно достигнутој температури од 105 °C до 110 °C, у трајању од 2 сата. Након сушења, када се посуда извади из сушнице, затворити посуду поклопцем и оставити је да се хлади на керамичкој плочи не дуже од 5 минута. Потом се посуда са узорком пребацује у дексикатор где се хлади до собне температуре. Када узорак достигне собну температуру, потребно је поново извршити мерење масе.

Образац за израчунавање садржаја хигроскопске влаге у узорку:

$$M_{ad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\% \text{ m/m}],$$

где је:

M_{ad} – губитак хигроскопске влаге у узорку [% m/m]

m_1 – маса празне посуде [g]

m_2 – маса посуде и узорка пре сушења [g]

m_3 – маса посуде и узорка после сушења [g]



Слика 3. Сито



Слика 4. Посуда са узорком

3.2 Одређивање садржаја волатила

Гориве испарљиве материје, односно једним именом волатили су веома значајна компонента горива јер са кисеоником стварају смешу која обезбеђује паљење, односно сам почетак сагоревања горива.

Одређивање садржаја горивих испарљивих материја у чврстим биогоривима се одређује у складу са одредбама стандарда SRPS EN 15148. Први корак у извођењу експеримента је загревање муфолне пећи до температуре од 900 ± 10 °C. Празна посуда са поклопцем се ставља у муфолну пећ где се загрева у трајању од 7 минута. Након тога се хлади у десикатору, а затим мери маса такве празне посуде са поклопцем. У ту посуду се затим издваја приближно 1 g аналитичког узорка, измери му се масу и постави у муфолну пећ да се жари у трајању од 7 минута. Након тога се узорак вади на керамичку плочу, хлади до собне температуре у десикатору и понавља мерење. Процент масеног удела волатила израчунава се из губитка масе узорка.

Образац за израчунавање садржаја волатила:

$$V_d = 100 \cdot \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} - M_{ad} \quad [\% \text{ m/m}],$$

где је:

V_d – садржај волатила у узорку [% m/m]

m_1 – маса празне посуде [g]

m_2 – маса посуде и узорка пре жарења [g]

m_3 – маса посуде и узорка после жарења [g]

3.3 Одређивање садржаја пепела

Пепео представља непожељни део горива јер смањује удео горивих компоненти, отежава сагоревање и директно утиче на повећање трошкова транспорта горива и одржавања постројења.

Одређивање садржаја пепела се врши у складу са одредбама стандарда SRPS EN 14755. Пре мерења се врши загревање празне посуде у пећи на температури од 550 ± 10 °C у трајању од једног сата. Мерење се врши након што је посуда извађена из пећи и охлађена у десикатору. Количина од око 1 g аналитичког узорка се уноси у посуду, а затим се понавља мерење. Посуда са узорком се ставља у пећ у којој се температура равномерно подиже до 250 ± 10 °C у току од 50 минута. Испаравање волатила из узорка пре паљења се остварује одржавањем

температуре у периоду од 60 минута. По завршетку овог корака наставља се равномерно подизање температуре у пећи до 550 ± 10 °C током 60 минута и одржавање ове температуре најмање 120 минута. Након свега тога посуда са пепелом се вади из пећи, хлади се у десикатору до амбијенталне температуре, и потом се мери маса посуде са пепелом. Садржај пепела у аналитичком узорку се добија применом следећег обрасца:

$$A = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\% \text{ m/m}],$$

где је:

A – садржај пепела у аналитичком узорку [% m/m]

m_1 – маса празне посуде [g]

m_2 – маса посуде и узорка пре спаљивања [g]

m_3 – маса посуде и узорка после спаљивања [g]

3.4 Одређивање горње топлотне моћи

Горња топлотна моћ представља количину топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

1. Сумпор и угљеник из горива се налазе у облику својих диоксида у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло;
2. Продукти сагоревања су доведени до температуре коју је гориво имало пре почетка сагоревања (20 °C);
3. Вода, која потиче од влаге из горива и сагорелог водоника, преведена је у течно стање

Одређивања топлотне моћи биогорива се врши у складу са одредбама стандарда ISO 1928 којим је дефинисано одређивање горње топлотне моћи горива при константној запремини, на температури од 25 °C, у калориметру са бомбом калибрисаним сагоревањем бензо-еве киселине. Припрема се састоји из мерења око 1 g узорка који стављамо у одговарајућу посуду. Затим у ту исту посуду са узорком ураћамо фитиљ завезан за жицу која ће касније иницирати паљење. У бомбу се доводи кисеоник и одводе продукти сагоревања. Такође, калориметар поседује мешач воде ради равномернијег загревања воде, као и термометар.

4 ТЕРМАЛНА АНАЛИЗА

Термална анализа је грана науке о материјалима која се заснива на проучавању промене својства материјала у зависности од промене температуре. Примена ове методе захтева веома прецизно мерење температуре, промене масе, димензија итд. Неопходно је да сва ова мерења буду извршена у инертној атмосфери аргона, како би се избегле реакције узорка са ваздухом. У зависности од жељених информација о материјалу који се испитује, могу се применити различите термоаналитичке технике [4]. Током испитивања разматраног узорка коришћене су следеће технике:

Термогравиметријска анализа (TGA - Thermogravimetric analysis)

Техника којом се региструје промена масе узорка у функцији температуре. Термогравиметријска крива даје квантитативне информације о саставу узорка, термичкој стабилности и садржају лако испарљивих гасова (влаге). Термичка стабилност је највиша вредност температуре до које се узорак може довести тако да не дође до његове разградње на хемијском нивоу.

Деривативна термогравиметрија (DTG - Differential Thermogravimetric analysis)

Ова техника представља брзину промене масе током разградње. Захваљујући кривој која представља први извод TGA криве, промена масе се може лакше уочити. Стога TGA и DTG су најчешће приказане у пару.

Диференцијална термичка анализа (DTA - Differential thermal analysis)

Користи се за праћење промене температуре узорка у односу на референтну супстанцу. Крива која се добија применом ове технике нам говори да ли се ради од ендо- или екзотермним реакцијама, односно о топлотним ефектима хемијских реакција. Ендотермне реакције препознајемо по карактеристичном пику усмереном навише, док је код екзотермних тај пик усмерен наниже.

5 ОБРАДА РЕЗУЛТАТА

5.1 Мерење садржаја влаге

Табела 1: Резултати мерења садржаја грубе влаге сушењем ваздуху:

	Маса посуде, g	Губитак грубе влаге, %
Без узорка	208,1	3,02
Са узорком пре сушења,	506	
Са узорком након сушења	497	

На основу резултата приказаних у табели 1, користећи једначину (1) добијамо да губитак грубе влаге у узорку сушеном на ваздуху износи **3,02 % m/m**.

Табела 2: Резултати мерења садржаја хигроскопске влаге:

	Прво мерење		Друго мерење	
	Маса посуде, g	Садржај хигроскопске влаге, %	Маса посуде, g	Садржај хигроскопске влаге, %
Без узорка	23,71	51,73	23,81	51,71
Са узорком пре сушења,	24,67		24,70	
Са узорком након сушења	24,17		24,24	

Садржај хигроскопске влаге рачунамо помоћу једначине (2). Просечну вредност садржаја хигроскопске влаге израчунава се као аритметичка средина добијених вредности за оба мерења, тако да за вредности приказане у табели 2 он износи **51,72% m/m**.

Садржај укупне влаге у узорку је функција садржаја грубе (M_f) и садржаја хигроскопске влаге (M_{ad}). Рачуна се према обрасцу:

$$M_T = M_f + M_{ad} \cdot \left(1 - \frac{M_f}{100}\right),$$

и износи 53,18%.

5.2 Мерење волатила

Садржај волатила рачунамо помоћу једначине (3). Просечна вредност садржаја волатила израчунава се као аритметичка средина добијених вредности за оба мерења, тако да за вредности приказане у табели 3 он износи 41,33660% m/m.

Табела 3. Резултати мерења садржаја волатила

	Прво мерење		Друго мерење	
	Маса посуде, g	Садржај волатила, %	Маса посуде, g	Садржај волатила, %
Без узорка	12,42750	41,23774	13,17560	41,33660
Са узорком пре жарења	13,21695		14,06655	
Са узорком након жарења	12,48310		13,23665	

5.3 Мерење садржаја пепела

Табела 4. Резултати мерења садржаја пепела

	Прво мерење		Друго мерење	
	Маса посуде, g	Садржај пепела, %	Маса посуде, g	Садржај пепела, %
Без узорка	16,81635	0,40540	17,61200	0,55244
Са узорком пре спаљивања	17,64270		18,77050	
Са узорком након спаљивања	16,8190		17,61840	

Садржај пепела рачунамо помоћу једначине (4). Просечну вредност садржаја пепела израчунава се као аритметичка средина добијених вредности за оба мерења, тако да за вредности приказане у табели 4 он износи **0,47892% m/m**.

5.4 Мерење садржаја коксног остатка

Садржај коксног остатка добијамо одузимањем збира укупног садржаја влаге и укупног садржаја волатила у узорку од целокупне масе:

$$КО = 100 - (M_T + V_d) = 5,48538 \% \text{ m/m}.$$

5.5 Одређивање горње топлотне моћи

На основу мерења извршеног на ИКА С200 калориметарском систему (слика 5), добијена вредност горње топлотне моћи узорка кафе износи **10,735 MJ/kg**.

Табела: Приказ резултата техничке анализе

Влага, %m/m	Волатили, %m/m	Пепео, %m/m	Коксни остатак, %m/m	Горња топлотна моћ, MJ/kg
53,18	41,34	0,48	5,5	10,735



Слика 5. Приказ интерфејса калориметарског система ИКА С200

5.6 Термална анализа

Применом претходно наведених техника, посредством Netzsch STA 449 F3 Jupiter система (слика 6), извршена је термална анализа. Резултати су приказани графички, у виду кривих за сваку примењену технику појединачно (график 1).



Слика 6. Netzsch STA 449 F3 Jupiter

Посматрањем TGA криве најпре се уочава њен опадајући карактер, што и јесте свакако било очекивано. Детаљнију информацију нам показује DTG крива, која показује брзину промене масе. На само почетку, до 100 °C, има нагли пад што је последица испаравања влаге из узорка. Затим је до око 220 °C губитак масе релативно константан, али од 220 °C до 420 °C долази до деволатилизације па се опет уочава пад криве. Карактер криве након тога остаје без значајнијих промена.

Анализом DTA криве добија се информација о топлоти која је утрошена или ослобођена током испитивања узорка. Први превој на око 110 °C указује на ендотермну реакцију услед испаравања влаге. Следећи, такође ендотермни превој криве се уочава након процеса ослобађања волатила, при температури од око 450 °C. Благи, егзотермни пикови се појављују на 600 °C и 800 °C, који представљају ослобађање топлоте услед сагоревања волатила.

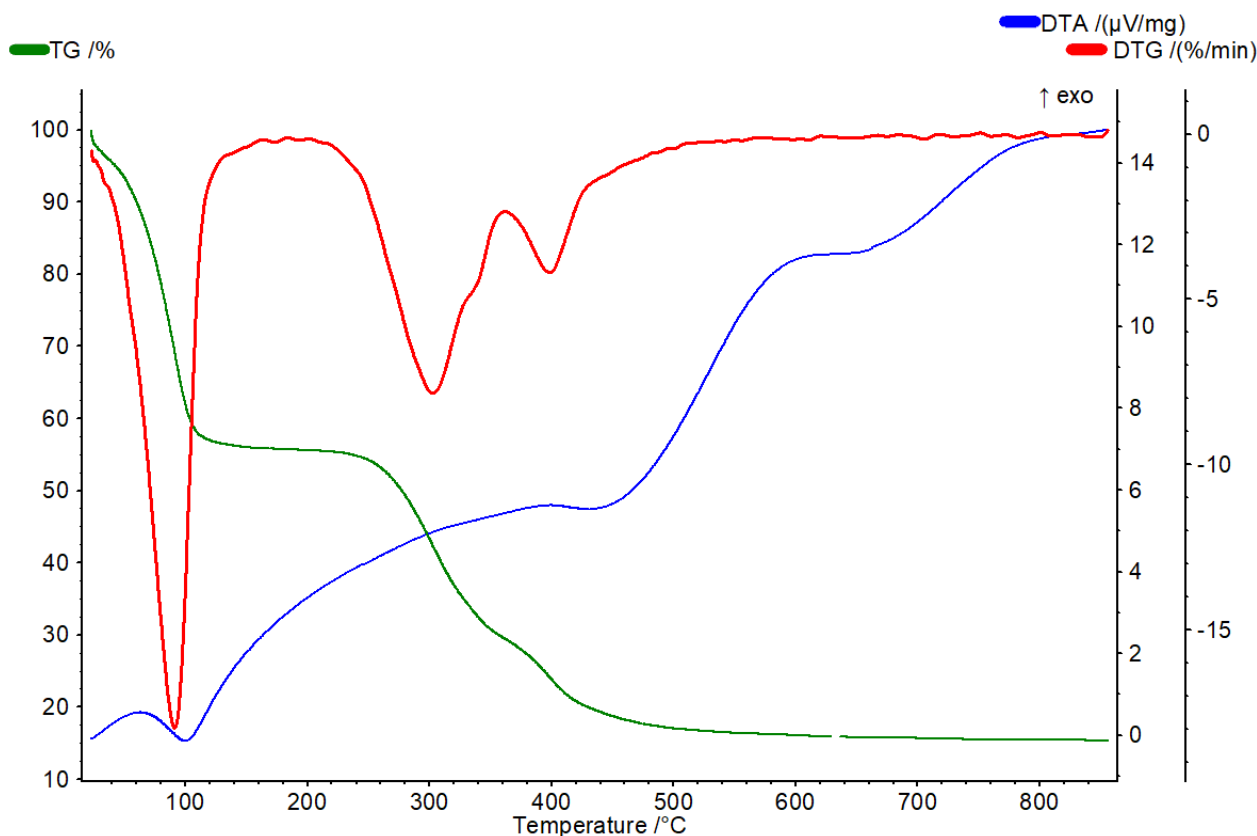


График 1. Приказ резултата термалне анализе

Слика 9. Графички приказ резултата термалне анализе

6 ЗАКЉУЧАК

Добијени резултати техничке и термалне анализе показују да кафа поседује енергетски потенцијал, али да је за максималну ефикасност неопходна одређена припрема узорка. Испитивани узорак је дао ниске вредности топлотне моћи, услед велике количине влаге. Велика количина влаге је последица коришћења воде током процеса прављења напитка од кафе, која директно пролази кроз узорак и натапа га. Сушење на ваздуху у дужем временском периоду би била довољна припрема за боље резултате. Низак садржај волатила и коксног остатка је такође последица велике влажности узорка. На добијене резултате утиче и то што је узорак у виду сировине, без икаквих технолошких захвата који би побољшали његове гориве перформансе.

7 ЛИТЕРАТУРА

- [1] *** Директива 2009/28/ЕЗ
- [2] **Манић Н. Г.:** Сагоревање пелета од биомасе у пећима за домаћинство, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2014.
- [3] **Манић Н. Г.:** Посебна поглавља из сагоревања – Техничка анализа горива
- [4] **Барта Холо Б.:** Термичка анализа у неорганској хемији, Природно-математички факултет, Нови Сад, 2021.

ASPEKTI PROIZVODNJE ENERGIJE IZ OBNOVLJIVIH IZVORA PRIMENOM ORGANSKOG RANKINOVOG CIKLUSA

ASPECTS OF ENERGY PRODUCTION FROM RENEWABLE SOURCES USING THE ORGANIC RANKIN CYCLE

Nina OTAŠEVIĆ*

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering

Problem emisije ugljen-dioksida kao i rast cene energenata dovodi do sve veće potražnje ka čistijim izvorima energije. Organski Rankinov ciklus, kao posebna vrsta Rankinovog ciklusa koji umesto vode kao radni fluid koristi organske tečnosti, predstavlja jednu od alternativa za dobijanje čiste energije. Zadovoljavanje energetske potreba pomoću sistema baziranih na Organskom Rankinovom ciklusu postiže se iz niskotemperaturnih ili srednjotemperaturnih izvora otpadne toplote. Zbog tog svojstva može se koristiti za dobijanje električne energije iz obnovljivih izvora kao što su solarna energija, geotermalna energija, otpadna toplota iz industrije, biomasa i dr. U ovom radu se vrši poseban osvrt na otpadnu toplotu iz data centara i geotermalnog izvora. Izrađen je proračun korišćenjem radnog fluida pentafluoropropan, R245fa. Prikazan je i analiziran termodinamički stepen efikasnosti na realnim primerima. Dobijeni rezultati energetske efikasnosti iznose 16.40% (za geotermalni toplotni izvor od 75°C) i 6.80% (toplotni izvor iz data centra 40°C). Izvršen je i proračun izbegnute emisije ugljen-dioksida u Organskom Rankinovom ciklusu, u odnosu na termoelektranu u kojoj se koristi lignit. Dobijeni rezultati prikazuju da bi smanjenje emisije ugljen-dioksida iznosilo 824 t. U radu se analiziraju prednosti i mane koje treba prevazići, efikasnost procesa i performanse različitih konfiguracija, kako iz inženjerske tako i iz ekonomske perspektive.

Ključne reči: *Organski Rankinov ciklus; proizvodnja električne energije; energetska efikasnost; otpadna toplota*

The problem of carbon dioxide emissions as well as the growth of energy prices is leading to increasing demand for cleaner energy sources. The organic Rankine cycle, as a special type of Rankine cycle that uses organic liquids instead of water as a working fluid, is one of the alternatives for obtaining clean energy. Satisfaction of energy needs with the help of systems based on the Organic Rankin cycle is achieved from low-temperature or medium-temperature waste heat sources. Due to this property, it can be used to obtain electricity from renewable sources such as solar energy, geothermal energy, waste heat from industry, biomass, etc. In this paper, a special review is made of waste heat from data centers and geothermal sources. A calculation was made using the working fluid pentafluoropropane, R245fa. The thermodynamic degree of efficiency on real examples is presented and analyzed. The obtained energy efficiency results are 16.40% (for geothermal heat source of 75 ° C) and 6.80% (heat source from the data center 40 ° C). The calculation of the avoided carbon dioxide emission in the Organic Rankine cycle was also performed, in relation to the thermal power plant in which lignite is used. The obtained results show that as much as 824 t of carbon dioxide would be avoided. The paper analyzes the advantages and disadvantages to be overcome, process efficiency and performance of different configurations, both from an engineering and economic perspective.

Keywords: *Organic Rankine Cycle; electricity production; energy efficiency; waste heat*

1 Organski Rankinov ciklus

Organski Rankinov ciklus (ORC) ima isti princip rada kao i Rankinov ciklus. Ključna razlika je u tome što se umesto vode kao radna materija koristi neki organski fluid. Organski fluidi koji se koriste u organskom Rankinovom ciklusu su alkani, aromati i siloksani. Razlog za korišćenje ovih

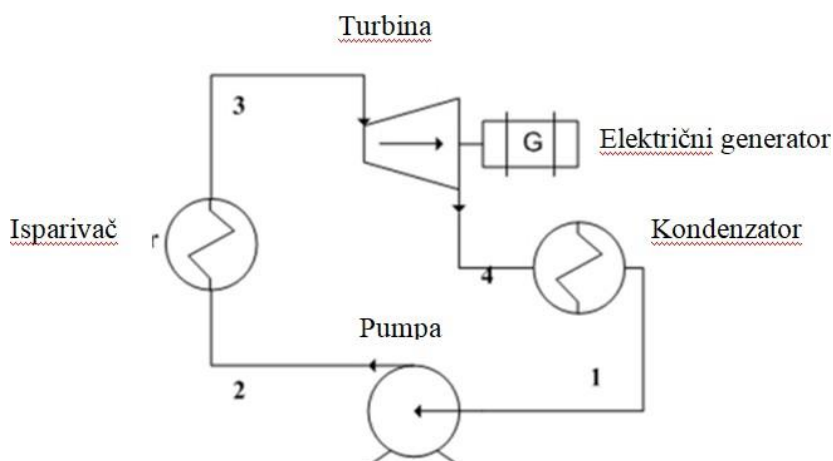
* Corresponding author, e-mail: ninaotasevic13@gmail.com

tečnosti je što imaju niže temperature ključanja u poređenju sa vodom. Tačnije rečeno, promena faze se odigrava na nižim temperaturama nego kod vode. To je razlog zbog kojeg je ORC pogodan za iskorišćenje niskotemperaturnih i srednjotemperaturnih izvora toplote.

Postoji nekoliko primera koji prikazuju da je ova tehnika itekako upotrebljiva i izvodljiva. Jedna strana kompanija u Velikoj Britaniji je instalirala ORC sistem za proizvodnju čiste električne energije i za zagrevanje zgrada. Temperatura izvora se koristi iz geotermalnog niskotemperaturnog toplotnog izvora i iznosi 77-122°C. Takođe, klanica u Švajcarskoj koristi niskotemperaturnu otpadnu toplotu koja dolazi iz sistema za hlađenje. Toplota iz sistema za hlađenje se koristi za grejanje vode u domaćinstvu. Rezultat korišćenja ORC procesa na godišnjem nivou dolazi do uštede 260 000m³ prirodnog gasa i čak 510t ugljen-dioksida [1].

Firma ElectraThrem, čije je sedište u Gruziji, pruža rešenja za ponovno korišćenje toplote uz pomoć Organskog Rankinovog ciklusa. Pomoću raznih tehnologija koje pretvaraju toplotu iz niskotemperaturnih izvora, kao što je otpadna toplota iz data centara ili toplota iz manjih geotermalnih izvora, u električnu energiju. Često koriste toplotne izvore od 70°C pretvarajući ih u 150kWh čiste električne energije [2].

ORC se sastoji od četiri komponente, kao što je prikazano na slici 1: isparivač, turbina povezana sa električnim generatorom, kondenzator i pumpa. Uz pomoć pumpe vrši se kompresija organske tečnosti (1-2) koja prolazi kroz isparivač i potpuno isparava pomoću spoljnjeg izvora toplote (2-3). Zasićena para ekspandira u turbini koja je povezana sa električnim generatorom (3-4). Konačno, para nakon turbine prolazi kroz kondenzator i vrši se kondenzacija iste prije ulaska u pumpu.



Slika 1 - Organski Rankinov ciklus

Primena organskog Rankinovog ciklusa:

- Primena kod biomase kao izvora energije
- Primena kod solarnih izvora toplote
- Primena kod geotermalnih izvora toplote

Udeo proizvedene električne energije korišćenjem ORC ciklusa kao toplotnog izvora najveći u slučaju geotermalne energije (72%), nakon čega sledi biomasa (14%) i iskorišćavanje otpadne toplote (13%), dok je procenat proizvodnje korišćenjem solarne energije zanemaljiv (1%) [3].

1.1 Radni fluidi

U RC koristi se samo voda, dok postoji veliki broj različitih radnih fluida koji se mogu koristiti u ORC ciklusu. Većina organskih fluida ima nižu tačku ključanja od vode. Ovo pokazuje da je organskim fluidima potrebna niža temperatura kako bi prešli u parnu fazu, te kao takvi, mogu koristiti niskotemperaturne izvore toplote.

Izbor radnog fluida je jedna od najbitnijih odluka pri projektovanju ORC procesa. Od izbora fluida direktno zavisi efikasnost i ekonomičnost celog procesa.

Kako bi se optimalno koristila energija i smanjili gubici eksergije, postoje termodinamički kritični parametri koji se uzimaju u obzir pri izboru radnog fluida. To su najčešće:

- graničnu temperaturu primene radnog fluida,

- minimalni granični pritisak u kondenzatoru ORC,
- maksimalni pritisak pare radnog fluida u isparivaču ORC,
- visoka termička stabilnost i kompatibilnost sa materijama,
- nizak uticaj na životnu sredinu,
- visok nivo bezbednosti,
- dobra dostupnost i niska cena,
- visoke performace (energetska efikasnost),
- niska specifična cena instalacije, itd (Živković, 2019).

Veliki broj radnih fluida koji imaju dobre termodinamičke osobine istovremeno negativno utiču na životnu sredinu. Glavni parametri koji definišu uticaj radnog fluida na životnu sredinu su:

- potencijal globalnog zatopljenja i
- potencijal osiromašivanja ozona.

Radni fluid treba da je neotrovan, nezapaljiv i nekorozivan.

Pored navedenih, potrebno je pratiti hemijske trendove pri upotrebi različitih radnih fluida i kontrolisati povećanje određenih hemijskih elemenata (ugljenik, azot, kiseonik, sumpor, vodonik, fluor, hlor, brom, bor i silicijum) na termodinamičke, sigurnosne i aspekte životne sredine radnog fluida.

Uzimajući u obzir ove parametre, izbor fluida predstavlja vrlo težak zadatak, iako postoje određene metode za izbor istog.

Uzimajući u obzir niz kriterijuma i parametara koji radni fluid mora da ispuni, izbor pogodnog radnog fluida i dalje predstavlja jedan od najtežih zadataka. Uprkos nekoliko metoda dostupnih uliteraturi i dalje postoje velike poteškoće u izboru istog.

1. Eksperimentalni deo

Zadatak

U daljem tekstu, razmatra se ORC koji koristi geotermalnu energiju kao niskotemperaturni izvor toplote u prvom slučaju, zatim otpadnu toplotu od data centra u drugom slučaju. U procesu se koristi jedan organski radni fluid. Na samom kraju tumače se dobijeni rezultati.

Organski fluid odabran za rad je **R245fa** (Pentafluoropropan), a njegova svojstva nalaze se u tabeli 1.

Tabela 1 – Svojstva radnog fluida R245fa

Hemijski naziv	Hemijska oznaka	Molekulska masa (g/mo)	Tačka topljenja (°C)	Tačka ključanja (1.013bar)	Kritična temperatura (°C)
Pentafluoropropan	$CF_3CH_2CHF_2$	134,05	-102,1	15,13	154,0

Temperatura geotermalnog izvora toplote $t_1 = 75^\circ\text{C}$. Ova temperatura uzeta je iz realnog slučaja koji je prethodno bio istraživani. Temperatura okoline je $t_0 = 15^\circ\text{C}$.

Šema dobijanja energije iz geotermalnog niskotemperaturnog izvora toplote predstavljena je na slici 2 i sastoji se od sledećih procesa:

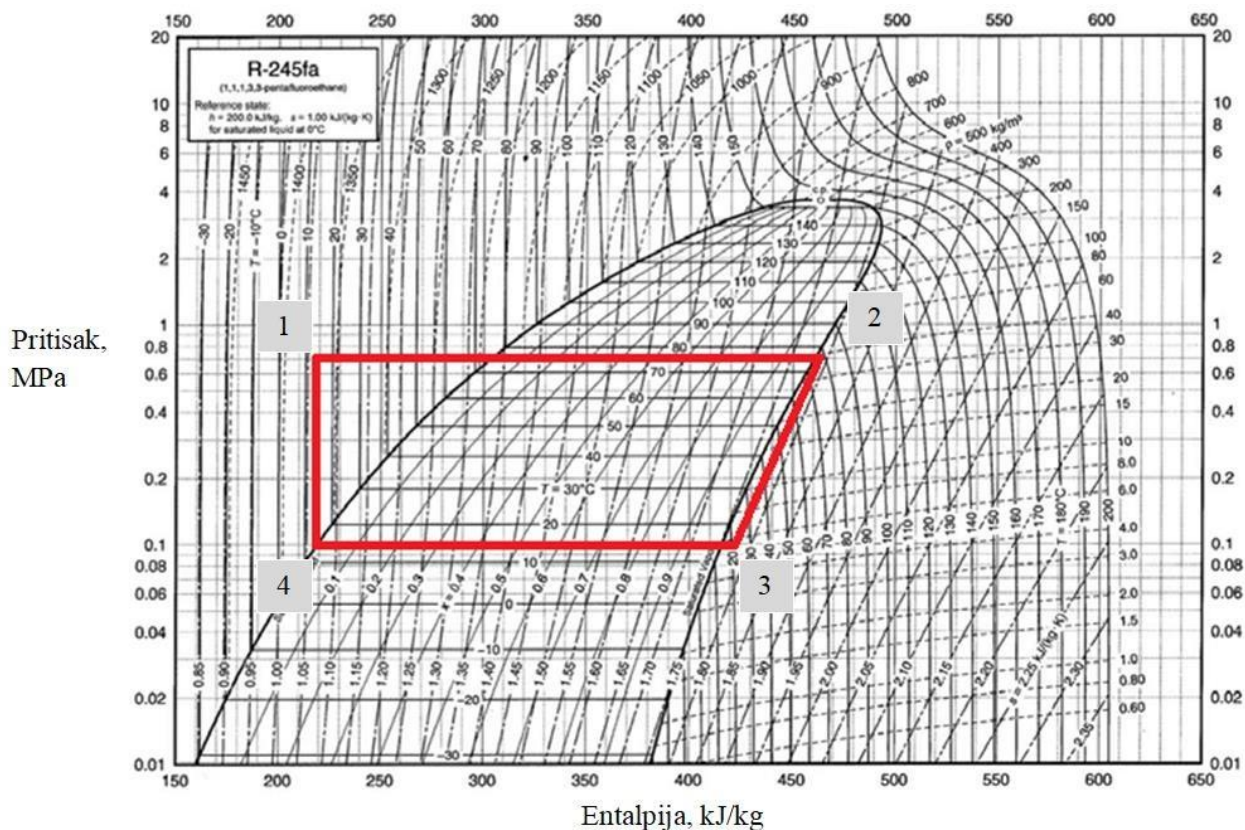
1 - 2 → Radni fluid se zagreva do temperature promene faze, koja je u ovom slučaju 75°C , zatim isparava i ulazi u pregrejanu paru

2 - 3 → Pregrejana para ekspandira u turbini, gdje se mehanička energija sa turbine konvertuje u električnu uz pomoć generatora

3 - 4 → Radni fluid ulazi u kondenzator gde se hladi uz pomoć temperature okoline, kojaje u ovom slučaju 15°C

4 - 1 → Fluid se ponovo zagreva, čime se jedan ciklus završava.

U i-p dijagramu na slici 2 prikazan je ORC proces sa radnim fluidom R245fa na temperaturi izvora 75°C .



Slika 2 - ORC ciklus u i-p dijagramu na temperaturi izvora 75 °C za radni fluid r245fa

Sa dijagrama se mogu očitati vrednosti pojedinačnih entalpija. Međutim, podaci koji su upotrebljeni za vrednosti iste uzeti su iz tabele, u zavisnosti od temperature na kojoj se pojedinačni procesi nalaze. Tabela iz koje su uzeti podaci za entalpiju, verodostojno prikazuje termodinamička svojstva fluida R245fa.

Tačka 1 i tačka 4 su na temperaturi 15°C i njihova entalpija iznosi $i_1 = i_4 = 219,325$ kJ/kg. Tačka 2 nalazi se na temperaturi 75°C, odakle proizilazi da entalpija iznosi $i_2 = 458,401$ kJ/kg. Dok je tačka 3 na temperaturi 20°C i vrednost entalpije je $i_3 = 419,115$ kJ/kg.

Sledeći proračun i najbitniji korak je određivanje termodinamičkog stepena korisnosti η koristeći geotermalnu energiju kao niskotemperaturni izvor toplote na 75°C.

$$\eta_1 = \frac{W_t}{Q_k} = 1 - \frac{|i_4 - i_3|}{(i_2 - i_1)} = 1 - 0,836 = 0,164 \cdot 100\% = 16,40\%$$

Dobijeni rezultati prikazuju da je termodinamički stepen korisnosti $\eta_1 = 16,40\%$, što znači da se iz geotermalnog izvora energije na 75°C, čak 16,40% se može efikasno iskoristiti za dobijanje energije.

Teorijski maksimum rada koji može da proizvede fluid R245fa u ovom ciklusu, odnosno Karnoov stepen korisnosti:

$$\eta_{c1} = 1 - \frac{T_0}{T_1} = 1 - \frac{288,15K}{348,15K} = 1 - 0,828 = 0,172 \cdot 100\% = 17,20\%$$

U drugom slučaju razmatra se niskotemperaturni izvor energije iz data centra, koji iznosi $t_2 = 40^\circ C$. Temperatura ponora predstavlja takođe temperature okoline čija je vrednost takođe $t_0 = 15^\circ C$.

Šema dobijanja energije iz data centra sastoji se od sledećih procesa (slika 3):

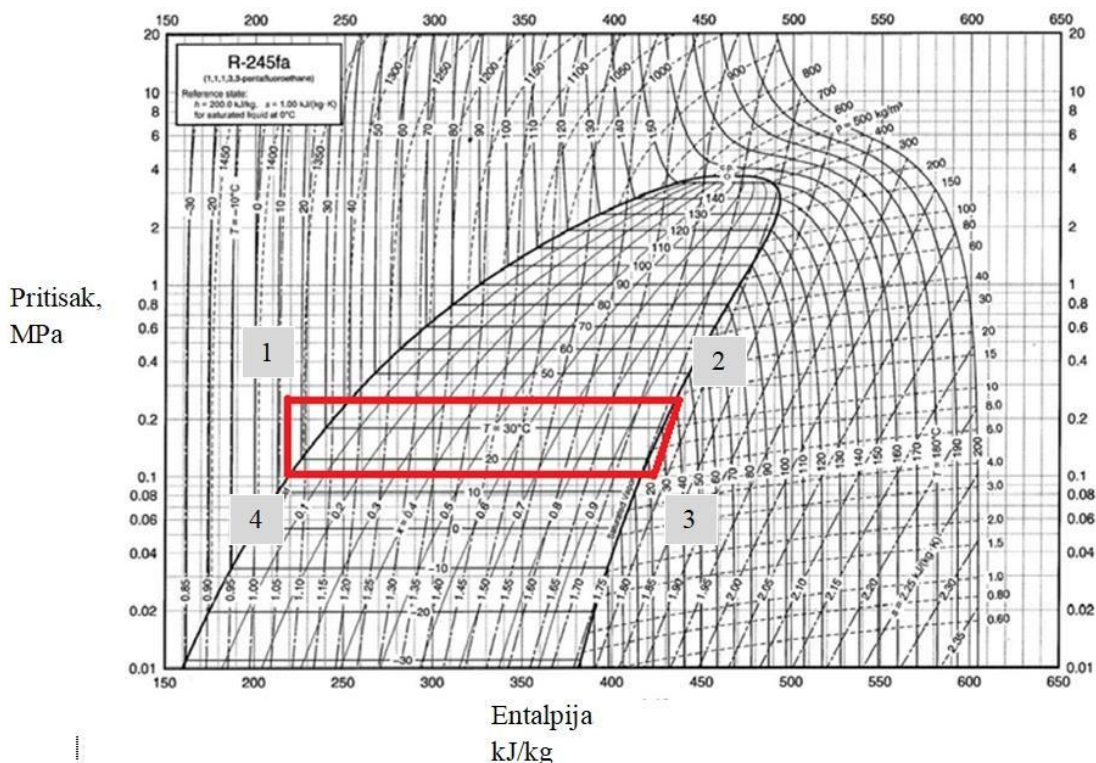
1 - 2 → Radni fluid se zagreva do temperature promene faze, koja je u ovom slučaju 40°C, zatim isparava i ulazi u pregrejanu paru

2 - 3 → Pregrejana para ekspandira u turbini, gdje se mehanička energija sa turbine konvertuje u električnu uz pomoć generatora

3 - 4 → Radni fluid ulazi u kondenzator gde se hladi uz pomoć temperature okoline, kojaje u ovom slučaju 15°C

4 – 1 → Fluid se ponovo zagreva, čime se jedan ciklus završava.

U i-p dijagramu na slici 3 prikazan je ORC proces sa radnim fluidom R245fa na temperaturi izvora 40°C.



Slika 3 - ORC ciklus u i-p dijagramu na temperaturi izvora 40 °C za radni fluid r245fa

Određuju se vrednosti entalpije u svakoj tački posebno. Na osnovu dobijenih entalpija računa setermodinamički stepen korisnosti, kao i Karnoov stepen korisnosti.

Tačka 1 i tačka 4 su na temperaturi 15°C i njihova entalpija iznosi $i_1 = i_4 = 219,325$ kJ/kg. Tačka 2 nalazi se na temperaturi 40°C, odakle proizilazi da entalpija iznosi $i_2 = 433,713$ kJ/kg. Dok je tačka 3 na temperaturi 20°C i vrednost entalpije j $i_3 = 419,115$ kJ/kg.

Sledeći proračun i najbitniji korak je određivanje termodinamičkog stepena korisnosti η korišćenjem iz data centra kao niskotemperaturni izvor toplote na 40°C.

$$\eta_2 = \frac{W_t}{Q_k} = 1 - \frac{|i_4 - i_3|}{(i_2 - i_1)} = 1 - 0,932 = 0,068 \cdot 100\% = 6,80\%$$

Dobijeni rezultati prikazuju da je termodinamički stepen korisnosti $\eta_2 = 6,80\%$, što znači da se iz data centra kao izvora energije na 45°C, čak 6,80% se može efikasno iskoristiti za dobijanje energije.

Teorijski maksimum rada koji može da proizvede fluid R245fa u ovom ciklusu, odnosno Karnoov stepen korisnosti:

$$\eta_{c2} = 1 - \frac{T_0}{T_1} = 1 - \frac{288,15K}{313,15K} = 1 - 0,920 = 0,08 \cdot 100\% = 8,00\%$$

Dobijeni rezultati prikazuju da energetska efikasnost zavisi od temperature izvora i ponora, koji su u ovom slučaju:

$$\eta_1 = 16,40\% \text{ (za geotermalni toplotni izvor od } 75^\circ\text{C)}$$

$$\eta_2 = 6,80\% \text{ (izvor toplote iz data centra } 40^\circ\text{C)}$$

Umesto ispuštanja toplote u okolni vazduh, ovo je dokaz da ista može biti vrlo korisna. Toplota u ovom slučaju nije nus proizvod, već je iskorišćena za dobijanje energije. Na taj način se obija “besplatnu” energiju, jer bi se u suprotnom toplota ispustila u okolni vazduh.

Veća termodinamička korisnost postignuta je sa izvorom toplote koji ima višu temperaturu. Upravo zbog toga, geotermalni toplotni izvor ima veću termodinamičku efikasnost u odnosu na izvor iz data centra jer ima višu temperaturu toplotnog izvora. S obzirom da se proučava dobijanje energije iz niskotemperaturnih izvora toplote, termodinamički stepen korisnosti je poprilično nizak, ali je i dalje dovoljan za proizvodnju određene količine električne energije. Iako postoji mogućnost da se na taj način dobije “besplatna” energiju, najveći problem ORC postrojenja je visoka cena istog, odnosno isplativost procesa. Isplativost zavisi od mnogih faktorau koje spada: cena električne energije, cena postrojenja, cena radnog fluida, temperatura izvora toplote i još mnogi drugi faktori.

Izrađen je i proračun koeficijenta emisionog faktora ugljen-dioksida (K_{CO_2}). Vrednosti su dobijene sagorevanjem lignita u termoelektranama. Koristeći zbirni energetski bilans Republike Srbije dobijaju se sledeći podaci [4]:

Ukupan energetski bilans za termoelektrane i TE-TO: 6,798 Mtoe, odnosno **284618664 GJ**

Ukupna proizvedena električna energija iz termoelektrana i TE-TO [5]: 2,297 Mtoe, odnosno

$$26714110000kWh$$

Koeficijent emisije lignita : **96,4 kgCO₂/GJ**

$$m_{CO_2} = \frac{284618664 \text{ GJ} \cdot 96,4 \text{ kg}_{CO_2}/\text{GJ}}{26714110000kWh} = 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

Proračunom je dobijeno da se za 1 kWh proizvedene električne energije emituje 1,03kg ugljen-dioksida.

Poznato je da Organski rankinov ciklus predstavlja ekološki prihvatljiv proces dobijanja električne energije, odnosno proces koji nema emisije ugljen dioksida (CO₂). Sledeći proračun će nam prikazati smanjenje emisije ugljen-dioksida (CO₂), kada bi se električna energija proizvodila u ORC postrojenju umesto u termoelektrani.

Za primer uzimamo ORC postrojenje koje ima snagu: **100kW** i koje radi **8000h** godišnje. Ukupna proizvedena električna energija dobijena iz ovakvog ORC postrojenja bi bila:

$$100kW * 8000h = 800\ 000kWh$$

Dobijenu proizvedenu električnu energiju množimo sa $m_{CO_2} = 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$

$$800\ 000kWh \cdot 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 824\ 000kg = 824 \text{ t } (CO_2)$$

Dobijeni podatak prikazuje da kada bi umesto termoelektrane koristili ORC proces za dobijanje električne energije, izbegli bi emisiju 824t ugljen-dioksida (CO₂). Ovaj podatak je itekako značajan faktor u borbi protiv klimatskih promena, koji predstavlja ujedno i jedan od najvećih problema sa kojim se čovečanstvo suočava u ovom veku.

2. Zaključak

Proučavanjem Organskog Rankinovog ciklusa u ovom radu, dolazi se do zaključka da je ova tehnologija vrlo perspektivna i da će interesovanje za istu sve više rasti. Organski Rankinov ciklus otvara nove mogućnosti za proizvodnju čiste električne energije u područjima sa niskotemperaturnim izvorima toplote, odnosno otpadne toplote (geotermalna, solarna energija, biomasa, industrijska potrojenja...). Korišćenjem Organskog Rankinovog sistema u energetsku i privrednu sliku jedne zemlje doprinosi štednji fosilnih goriva, energetskoj nezavisnosti, razvoju privrede kroz zapošljavanje stanovništva i najbitnije, smanjenju emisije ugljen-dioksida, što može biti deo rešenja za ublažavanje posledica klimatskih promena.

U ovom radu izrađene su i dve termodinamičke analize stepena korisnosti koje se upoređuju jedna sa drugom. Izrađen je proračun korišćenjem radnog fluida n-pentana, R245fa. Rezultati prikazuju da termodinamički stepen korisnosti Organskog Rankinovog procesa sa geotermalnim izvorom toplote, koji je 75°C bi bio $\eta_1 = 16,40\%$. S druge strane, termodinamički stepen korisnosti Organskog Rankinovog procesa otpadnog izvora toplote iz data centra, koji je 40°C, bi bio $\eta_2 = 6,80\%$. Na temelju proračuna može se zaključiti da je termodinamički stepen korisnosti poprilično nizak, ali je i dalje dovoljan za proizvodnju određene količine električne energije. Na taj način dobijamo “besplatnu” energiju, jer bi se u suptonom toplota ispustila u okolni vazduh.

Izvršen je i proračun izbegnute emisije ugljen-dioksida u Organskom Rankinovom ciklusu u odnosu na termoelektranu u kojoj se koristi lignit. Izbegnuta emisija ugljn-dioksida korišćenjem Organskog Rankinovog ciklusa bi bila 824t (CO_2).

Međutim, na putu za usvajanje i implementaciju Organskog Rankinovog ciklusa postoji niz izazova i prepreka koje tek treba prevazići. Isplativost zavisi od mnogih faktora u koje spada: cena električne energije, cena postrojenja, cena radnog fluida kao i temperatura izvora toplote i još mnogi drugi faktori.

3. Reference

- [1] *** *Low-grade waste heat utilization in the European Union*. (2022). Preuzeto sa <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/CE-HEAT/Low-grade-waste-heat-utilization-in-the-European-Union.html>
- [2] *** ElektraTrem. (n.d.). Preuzeto sa <https://electratherm.com/waste-heat-recovery-experts/>
- [3] *** Cycles, T.(2011). Preuzeto sa <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461426/FULLTEXT01.pdf>
- [4] **Živković, M.** (2019). Osnove energetike, 2019
- [5] **Otašević, N.** (2022). Organski Rankinov ciklus, 2022

EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA GASIFIKACIONE KOMORE KOTLA NA DRVA

EXPERIMENTAL TESTS OF THE GASIFICATION CHAMBER OF A WOOD-BURNING BOILER

**Rade KARAMARKOVIĆ^{1*}, Dušan TODOROVIĆ², Đorđe NOVČIĆ¹,
Marko OBRADOVIĆ², Miloš NIKOLIĆ¹**

¹ Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu Univerziteta u Kragujevcu, Srbija

² Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd

Na evropskom tržištu od ukupnog broja prodatih kotlova u 2021. god., 36% otpada na kotlove na biomasu. Među njima se za sagorevanje drveta koriste 3 konstrukcije: tipična sa strujanjem na više i konstrukcije sa istosmernom i unakrsnom gasifikacijom. Dve poslednje navedene konstrukcije karakteriše višestepeno sagorevanje: u zasebnoj komori se prvo vrši gasifikacije a potom se gorivi gas sagoreva u ložištu. Između pomenutih komora koriste se vatrostalni umeci koji omogućavaju sagorevanje gorivog gasa i velike količine čestica koje on nosi sa sobom, kao i unapređenje prenosa toplote u ložištu. Prilikom projektovanja vatrostalnog dela i ložišta potrebno je uzeti u obzir temperaturna i brzinska polja, kao i sastav gorivog gasa. Cilj rada je da: (i) predstavi eksperimentalna ispitivanja gasifikacione komore i (ii) da smernice za njeno projektovanje. Ispitivanja su rađena na gasifikacionom kotlu na drva termičke snage 18 kW i sprovodila su se diskontinualno na taj način što bi kotao prvo ušao u nominalni radni režim, koji bi potom bio prekinut zatvaranjem otvora za dovodjenje sekundarnog vazduha. Tokom takvih uslova, uzorkovao bi se gorivi gas, na čiji sastav najviše utiču: rastojanje između otvora primarnog vazduh i izlaza iz komore za gasifikaciju, veličina, oblik i vlažnost drva, karakteristike gasifikovanog sloja (šupljine, zone različitih temperature), gubitak toplote i oblik i geometrija izlaznog otvora komore.

Ključne reči: *Biomasa; kotao; gasifikacija; eksperimentalna ispitivanja; model*

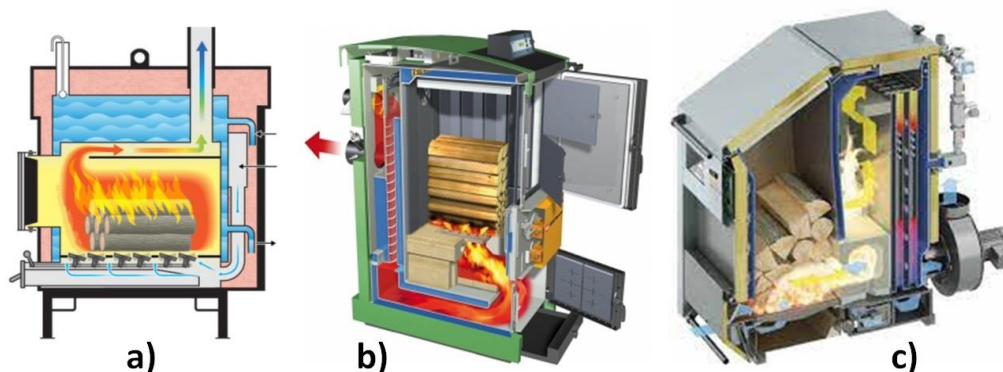
On the European market, biomass boilers accounted for 36% of the total number of boilers sold in 2021. Among them, there are three constructions used for burning wood: the typical upward flow design and constructions with co-current and cross-current gasification. The latter two constructions are characterized by multi-stage combustion: first, gasification is carried out in a separate chamber, and then the combustible gas is burned in the combustion chamber. Refractory inserts are used between the mentioned chambers to enable the combustion of combustible gas and the large amounts of particles it carries, as well as to improve heat transfer in the combustion chamber. When designing the refractory part and the combustion chamber, it is necessary to know the temperature and velocity fields, as well as the composition of the combustible gas. The aim of the study is to: (i) present experimental tests of the gasification chamber and (ii) provide guidelines for its design. The tests were carried out on an 18 kW wood gasification boiler, and were conducted intermittently by first entering the nominal operating mode, which was then interrupted by closing the secondary air inlet. Under such conditions, the combustible gas was sampled, and its composition was most affected by the distance between the primary air inlets and the gasification chamber outlet, the size, shape, and moisture content of the wood, the characteristics of the gasified layer (voids, zones of different temperatures), heat loss, and the shape and geometry of the outlet of the chamber.

Key words: *Biomass; boiler; gasification; experimental investigation; model*

* Corresponding author, e-mail: karamarkovic.r@mfkv.kg.ac.rs

1 Uvod

Od ukupne energije biomase koja se koristi u umerenom klimatskom pojasu, 20% otpada na ogrevno drvo [1]. U Republici Srbiji je u 2017. godini ogrevnom drvu pripadao još veći udeo u biomasi koja je činila 10% primarne i 11% energije raspoložive za finalnu potrošnju [2]. Navedeni pokazatelje svedoče o još uvek važnosti drveta kao energenta. Dodatni razlog vezan za korišćenje ogrevnog drveta čine sve stroža ograničenja emisije zagađujućih materija iz uređaja koji ga sagorevaju. Zahtevnost graničnih vrednosti emisije kod uređaja male snage najjasnije pokazuju nacionalni aneksi standarda EN 303-5:2021. Da bi zadovoljili ove anekse proizvođači najčešće koriste tri načina višestepenog sagorevanja [3] prikazana na Sl. 1. Sva tri načina u prvom stepenu koriste nepotpuno sagorevanje (gasifikaciju) u nepokretnom sloju: suprotnosmernu, istosmernu i unakrsnu.



Slika 1. Metode višestepenog sagorevanja drveta: a) tradicionalno sagorevanje naviše [4], b) istosmerna gasifikacija [5], c) poprečna gasifikacija [6]

Prilikom korišćenja numeričkog modelovanja u cilju adekvatnog dimenzionisanja komore za sagorevanje gasa i keramičkog dela (dodatak, umetak) koji se u njoj koristi za što potpunije sagorevanje gasa i letećih čestica, unapređenje transfera toplote i taloženje letećeg pepela (videti Sl. 2.) kao ulazan podatak potrebni su sastav i temperatura gorivog gasa na izlazu iz gasifikacione komore. Njih za konstrukciju prikazanu na Sl. 1 b), gotovo i da nema u literaturi. Uglavnom se autori, poput [7] bave sagorevanjem gorivog gasa nastalog u istosmernom reaktoru za gasifikaciju. Drozatos i dr. su u radu [8] numerički modelovali kotao vrlo sličan kotlu prikazanom na Sl. 2. Da bi odredili sastav gasa pretpostavili su da je njegova temperatura na izlazu iz gasifikacione komore 850°C i da se u komoru dovodi toliko primarnog vazduha da koeficijent viška vazduha iznosi $\lambda=0.66$. Sastav su određivali minimiziranjem Gibsove slobodne energije i od gorivih komponenti dobili: ugljen monoksid CO 6.8% i vodonik H_2 i metan CH_4 ispod 0.5%. Druge izvore za sastav i temperaturu gorivog gasa iz konstrukcije prikazane na Sl. 1 b) autori nisu uspeli da pronađu. U literaturi najviše podataka ima za tradicionalno višestepeno sagorevanje prikazano na Sl. 1 a). Kod njega je gasifikacija do detalja ispitana i što je vrlo značajno sastav gasa je veoma blizak onom koji se dobija u istosmernim reaktorima za gasifikaciju. Kod ovog tipa, autori [9] su ispitivali gasifikaciju drvene sečke u zavisnosti od njene vlažnosti i količine vazduha. Do detalja su predstavili rezultate ispitivanja i merni lanac. Glavni zaključci rada [9] su da količina primarnog (gasifikacionog) vazduha i sadržaj vlage u gorivu značajno utiču na sastav gasa i njegovu temperaturu, na ponašanje gasifikovanog sloja goriva i emisiju praškastih materija. Pri niskim vrednostima primarnog vazduha značajan je uticaj tera na toplotnu moć gasa i niže su emisije praškastih materija. Ove emisije su značajno niže kod suve biomase. Ponašanje drveta u uslovima gasifikacije u kotlovima, tj. njegove geometrijske deformacije i gubitak mase sa vremenom i temperaturom obrađuje rad [10]. Kirč sa koaturima u radovima [11] i [12] obrađuje šaržni reaktor za gasifikaciju u peći koja koristi različite vrste biomase. U ovim radovima, autori su takođe dobili sastave gasa vrlo slične onima koji se dobijaju pri istosmernoj gasifikaciji. Imajući u vidu prethodno navedene činjenice, kao i potrebe modelovanja i projektovanja, cilj rada je da predstavi ispitivanja gasifikacione komore u radu i da definiše osnovne konstruktivne i radne parametre koji utiču na sastav i temperaturu gorivog gasa.

2 Eksperimentalna ispitivanja

2.1 Kotao

Eksperimenti su izvođeni na gasifikacionom kotlu na drva nominalne termičke snage 18kW. Glavni delovi kotla su: komora za gasifikaciju (pozicija 1 na Sl. 2., 3.b) i 5.), komora za sagorevanje (5 na Sl. 2. i 3.b) i konvektivni deo kotla (6 na Sl. 2.).

Gasifikaciona komora dimenzija 410x520x700 mm je ujedno i skladište goriva. Velika zapremina komore omogućava celodnevni rad kotla sa dva nalaganja. Otvori za ubacivanje predgrejanog primarnog vazduha nalaze se na bočnim stranama komore na visini 150 mm od njenog dna. Vatrostalni beton (Sl.2. i 3.b) ima više funkcija: nosi šaržu goriva, deli dve komore, akumulira toplotu za endotermne reakcije, služi za dovod, predgrevanje i uvođenje sekundarnog vazduha. Osim vatrostalnog betona i masivnih vrata, komora je najvećom delom okružena kanalima kroz koje struji kotlovska voda.

Gorivi gas sagoreva na prelazu između gasifikacione i komore za sagorevanje. Njegovo što potpunije sagorevanja kao i sagorevanje sitnih čestica koje nosi sa sobom omogućava keramičko postolje (poz. 5 na Sl. 2. i 3.b). Osim pomenutih ono ima i sledeće uloge: pepeo prinosi vratima za čišćenje, pospešuje transfer toplote u ložištu i kombinacijom promena brzina i inercijalnih sila pospešuje taloženje čestica.

Konvektivni deo kotla (poz. 6 na Sl. 2.) se sastoji od cevi prečnika 82,5 mm sa turbulatorima u vidu opruga. U odnosu na okolinu, kotao je na potpritisku zahvaljujući ventilatoru (7 na Sl. 2.).

Automatika upravlja kotlom pomoću dva ventila i odsisnog ventilatora. Ventil primarnog vazduha zajedno sa varijabilnom brzinom ventilatora pokušava da dostigne zadatu snagu, dok ventil sekundarnog vazduha pokušava da održava konstantnim zadatu vrednost kiseonika u dimnom gasu (najčešće 7%).

2.2 Gorivo

Za ispitivanja su korišćena bukova drva sastava datog u Tabeli 1. Sastav drveta uziman je sa ranijih ispitivanja iste seče (gomile) [13] dok je vlažnost merena za svaku od korišćenih cepanica. Količina vlage u njima varirala je u opsegu od 6.5% do 22.6% sa najčešćim vrednostima između 9.5 i 11 mas%. Vlaga je kontrolisana pomoću uređaja Testo 616 (merno mesto 5 u Tabeli 2.).

Tabela 1. Tehnička i elementarna analiza goriva. 1- u suvoj masi, 2- kao ostatak, 3 – u suvoj masi bez pepela, 4 – prosečna vrednost

Isparljiva masa ¹	Pepeo ¹	Fiksni ugljenik ^{1,2}	C ³	H ³	O ^{3,2}	N ³	S ³	W ⁴
85,9	0,57	13,4	49,1	5,7	44,5	0,15	0,045	12,85

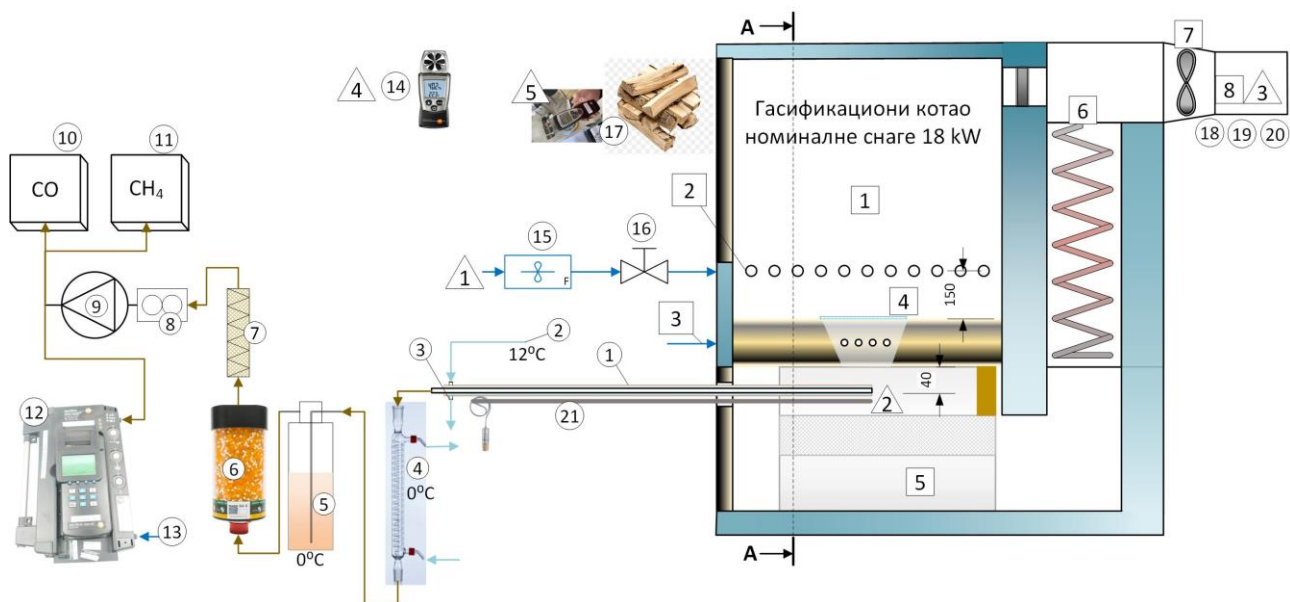
2.3 Merene veličine i postupak merenja

Komora za gasifikaciju ne dozvoljava nezavisna ispitivanja zato što je u najvećem delu ograničena kanalima za strujanje kotlovske vode. Zbog toga, a i da bi što verodostojnije oponašala radne uslove, ispitivanja su vršena ciklično: na svakih 25 minuta rada, komora je ispitivana u interval od 10 minuta. Tokom uzorkovanja ventilator (7 na Sl. 2) bi radio sa konstantnim brojem obrtaja a protok primarnog vazduha bi se održavao približno konstantnim pomoću ručnog regulacionog ventila (poz. 16 na Sl. 2. i Sl. 3.a). Zbog stalnih promena otpora u komori, protok vazduha se neprestano menja ali ga ja sa ventilom (16) moguće održavati u opsegu $\pm 0,1$ l/s. Ovaj ventil je neophodan i zato što se zatvaranjem dovoda sekundarnog vazduha (poz. 3 na Sl. 2.) remeti strujna slika kotla: protok kroz gasifikacionu komoru raste zato što se zatvara njemu paralelna grana za sekundarni vazduh. Zapreminski merač protoka (15) i pomenuti regulacioni ventil (16) su korišćeni na ovom mernom mestu (Sl. 2. i Sl. 3.a). Radi tačnosti merenja, vodilo se računa da budu postavljeni na pravoj deonici, minimum 5D, od najbližeg lokalnog otpora. Maseni protok primarnog vazduha je računat na osnovu merenja temperature i vlažnosti okolnog vazduha (videti merno mesto 4 na Sl. 2. i Tab. 2.).

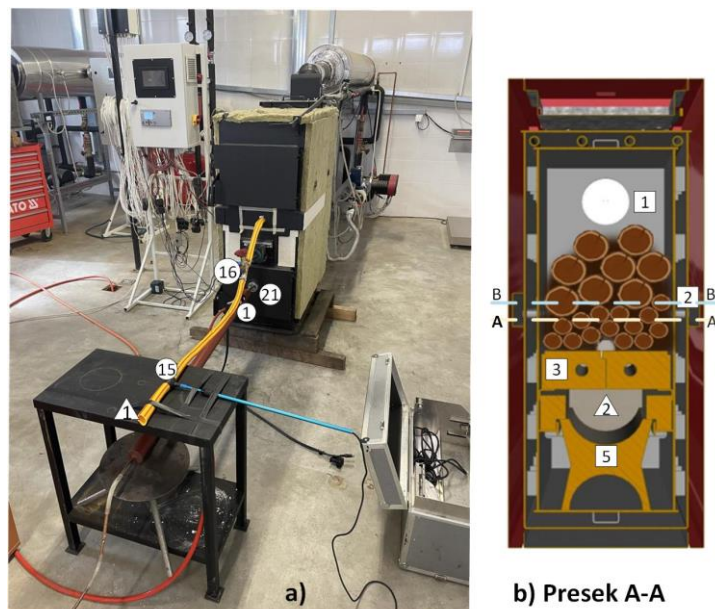
Tabela 2. Merna mesta, merene veličine i karakteristike korišćene merne opreme.

Merno mesto	Br.	Merena veličina i oprema	Greška merenja (aps. ili relativna)
1	15	Merač zapreminskog protoka primarnog vazduha Flowatch,merni opseg 1 – 30 m/s, Ø 20 mm, rezolucija 0.1 m/s, 3 cm/s, radna temperatura -50 do 100°C	±2% PS
2	8	Zapreminski protok gorivog gasa- Zambeli ZB1 – min 16 dm ³ /h, max protok 4m ³ /h	±3%
2	10	Koncentracija CO u suvom gorivom gasu Gasni analizator Uras 3E (proizvođač Hartmann & Braun) Opseg merenja: 0 – 25% CH ₄ , 0 – 50% CH ₄	±1%
2	11	Koncentracija CH ₄ u suvom gorivom gasu, Gasni analizator Uras 3E (proizvođač Hartmann & Braun), Opseg merenja: 0 – 10% CO, 0 – 40% CO	±1%
2	12	Koncentracija CO u suvom gorivom gasu	±5%
2	12	Koncentracija CO ₂ u suvom gorivom gasu	±0,3 zap%+1%
2	12	Koncentracija O ₂ u gasu	±0,8%
2	4,5	Količina vlage i tera u suvom gorivom gasu – gravimetrijskom metodom JEX-200	±0,2 mg
2	21	Temperatura sgg na izlasku iz komore za gasifikaciju – Termopoar tip K (NiCr-Ni) max. 1370°C	±1°C
3	18	Temperatura, koncentracija kiseonika u dimnom gasu – kotlovska automatika	±1°C ±0,1 zap%
3	19,20	Zapreminski sastav i količina praškastih materija u dimnom gasu – Horiba ENDA 5000	O ₂ ±0,8%, CO ±10ppm, NO _x ±5%, SO ₂ ±10ppm
4	14	Temperatura i relativna vlažnost okolnog vazduha – Testo 410-2	rel. vlaž. ±2,5rH temp. ±0,5°C
5	17	Vlažnost drva – Testo 616 (<50% vlage), rezolucija 0.1%	rel.=0,1%/MV%

Slike 2. i 3.b) prikazuju 2. merno mesto. Na njemu su nakon zatvaranju sekundarnog vazduha kroz otvor za vizuelno praćenje sagorevanja postavljane sonde za uzorkovanje gasa i merenje temperature. Tabela 2. prikazuje karakteristike korišćenih mernih uređaja. Termopar K-tipa je postavljan do same sonde za uzorkovanje gasa i bio je smešten u prohromskoj cevi, koja je sprečavala termičko zračenje od okolne keramike. Za uzorkovanje gasa korišćena je vodom hlađena sonda (poz. 1 na Sl. 2., ulaz 2 vode temperature ~10°C i njen izlaz 3). Sonda je bila blago nagnuta prema ledenom vodom (0°C) hlađenom kondenzatoru (4). Ohlađen gas je sa kondenzatora (4) vođen na ispiralicu (5) zapremine 0,25 dm³ napunjenu sa 0,15 dm³ izopropanola. Ispiralica (5) se sve vreme nalazila u ledenoj vodi 0°C. Glavnice vlage i tera su izdvojene iz gasa u kondenzatoru (4). Slika 5.c je načinjena tokom merenja i prikazuje izdvojeni kondenzat koji predstavlja smešu vode, tera i čestica. Ove poslednje u najvećem delu predstavljaju negasifikovani ugljenik ponesen gasnom strujom. U radu [14] Hasler i dr. su predstavili apsorpcioni metod za uzorkovanje i selekciju tera iz gorivog gasa. Na osnovu njihovog metoda, Buhmajer i dr. [9] su uzorkovali ter iz gasa dobijenog gasifikacijom drvene sečke u kotlu male snage. Za razliku od [9] gde su korišćene 2 ispiralice sa vodom i 5 sa izopropanolom, od kojih su 3 bile u posudi održavanoj na -10°C, u predstavljanom ispitivanju je imajući u vidu njegove potrebe, zahtevanu tačnost, vodom hlađenu sondu i veliki kondenzator, korišćena samo jedna ispiralica (5).



Slika 2. Šema eksperimentalnih ispitivanja. Kvadratnim oznakama obeleženi su glavni delovi kotla: 1 – gasifikaciona komora, 2 – otvori za primarni vazduh, 3 – sekundarnih vazduh, 4 – izlaz iz gasifikacione komore (uvođenje sekundarnog vazduha), 5 – vatrostalna keramika u zoni sagorevanja, 6 – konvektivni deo kotla sa turbulatorima u obliku opruge. Merna mesta označena truglovima: 1 – primarni (gasifikacioni) vazduh, 2 – uzorkovanje gasa i merenje njegove temperature, 3 – merenje karakteristika dimnog gasa na izlasku iz kotla, 4 – stanje okoline, 5 – vlažnost cepanica. U kružićima merna oprema: 1 – sonda za uzorkovanje gasa, 2,3 – ulaz i izlaz rashladne vode iz sonde, 4 – kondenzator, 5 – ispiralica napunjena izopropanolom, 6 – filter sa silika gelom, 7 – filter od staklenih vlakana, 8 – merač protoka suvog gasa, 9 – vakum pumpa, 10 – merenje količine CO, 11 – merenje količine CH₄, 12 – gasni analizator, 13 – vazduh za razblaživanje gasa, 14 – anemometar, 15 – merač protoka, 16 – ručni regulacioni ventil, 17 – merač vlažnosti drva, 18 – merači temperature i O₂ u dimnom gasu, 19 – gasni analizator, 20 – izokinetičko uzorkovanje čestica.



Slika 3. a) ispitivani kotao sa delom merne opreme, b) poprečni presek kotla preko komore za gasifikaciju (Oznake su iste kao na Sl. 2.)

Nizvodno od ispiralice (5) za izdvajanje preostale vlage i čestica korišćeni su filteri od silika gela (6) i staklenih vlakana (7). Po izlasku iz filtara, mereni su zapreminski protok i temperatura uzorkovanog gasa pomoću Zambeli ZB1 (8,9, videti i Tab. 2.). Potom je suvi gorivi gas razdvajana na dva toka. Jedan prema uređajima za određivanje koncentracije metana CH₄ i ugljen monoksida

CO (10, 11 videti Tab. 2.) a drugi prema gasnom analizatoru Testo 350 xl (12). Ovi uređaji (10÷12) imaju sopstvene vakum pumpe, koje su zarad preglednosti izostavljene na Sl. 2. U gasnom analizatoru (12) je suvi gas razblaživan sa okolnim vazduhom sa faktorom 40 (1:39) i određivane su koncentracije kiseonika O₂, ugljen dioksida CO₂, i kao i u (10) koncentracija ugljen monoksida CO. Koncentracija azota N₂ je računata na osnovu protoka primarnog vazduha (15) i elementarnog sastava bukovih cepanica (videti prethodno poglavlje). Kao i u radu [9] pretpostavljeno je da je sav ter u obliku heptana C₇H₁₆. Koncentracija vodonika H₂ je određivana uz pretpostavku da u suvom gasu nakon izdvajanja vlage i tera nije bilo drugih komponenti osim CO, CO₂, CH₄, O₂ i N₂.

Na mernom mestu 3 (Sl. 2., Tab. 2.) sve vreme su pomoću kotlovske automatike očitavane temperatura i količina kiseonika O₂ u dimnom gasu. Pre nego su izvedena opisana merenja na istom mernom mestu rađene su kotlovska ispitivanja shodno EN 303-5 (videti Tab. 3.).

Temperatura gasa u mernom lancu je kontrolisana na mestu merenja zapreminskog protoka (8).

3 Rezultati

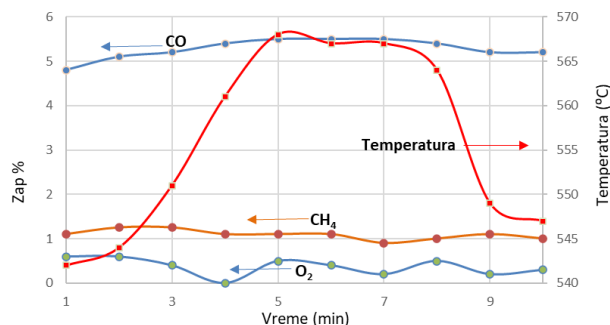
Tabela 3. prikazuje osnovne tehničke podatke kotla kod kog je ispitivana gasifikaciona komora. Kod ove vrste kotlova, automatika reguliše protok sekundarnog vazduha tako da količina kiseonika u dimnom gasu bude oko 7% ili da odgovara nekoj drugoj vrednosti koja daje visok stepen korisnosti pri najnižim mogućim emisijama. Otuda je najčešća vrednost koeficijenta viška vazduha između 1,5 i 1,6. U tabeli su prikazane i merene vrednosti količine primarnog vazduha svedene na koeficijent viška vazduha. Kretale su se u opsegu $\lambda = 0,35 \div 0,45$.

Tabela 3. Karakteristike ispitivanog kotla.

Nominalna snaga	18,07 kW
Stepen korisnosti	90,3%
Emisija CO (svdena na 10% O ₂ u sdg)	126,57 mg/m ³ N
Emisija NO _x (10% O ₂)	175,75 mg/m ³ N
Emisija OGC (10% O ₂)	5,02 mg/m ³ N
Emisija praškastih mmaterija (10% O ₂)	18,44 mg/m ³ N
λ - najčešće	1,5÷1,6
λ primarnog vazduha u radu (tokom ispitivanja)	0,22÷0,67 (min÷max) (sr. vr. 0,35÷0,45)

Tabela 4. prikazuje rezultate 4 serije ispitivanja. U njoj su u poslednje dve kolone dati sastavi gorivih gasova na optimalnim tačkama gasifikacije bukovih drva sa 12,85% vlage na pritisku od 0,1 MPa. CBP – SRS je optimalna gasifikacija sa vazduhom na standardnom referentnom stanju [15], dok je CBP -PV optimalna gasifikacija sa vazduhom predgrejanim na temperaturu gasifikacije [16]. Optimalna tačka se naziva i granična tačka ugljenika. Kod nje je proces gasifikacije predstavljen kao hemijsko isparavanje pri kom se dodaje minimalna količina vazduha koja je potrebna da sav ugljenik pređe u gasovito stanje. U tom slučaju u gasu ostaje najveća količina hemijske energije iz originalne biomase. U poređenju sa ovim vrednostima i eksperimentalnim rezultatima predstavljanim u [9] i [12] izmereni su neočekivani sastavi gasa. Kolona 1 predstavlja gas dobijen na samom početku ispitivanja kad je kotao bio napunjen gorivom do linije koja je niža od otvora za uvođenje primarnog vazduha (linija A-A na Sl. 3.b). U ovom slučaju ni kotao nije mogao da postigne svoju nominalnu snagu. Potom je nivo goriva u komori podignut na visinu koja odgovara liniji B-B na Sl. 3.b). Dobjijene vrednosti su prikazane u kolonama 2-4. Kolona 3 odgovara najčešće dobijanom sastavu gasa. Ovo su srednje vrednosti a kako su se menjale u toku uzorkovanja prikazuje Slika 4. Na njoj su date srednje minutne vrednosti dobijene kao srednje vrednosti 4 merenja u toku minuta uzorkovanja. Na slici se vide relativno male varijacije rezultata tokom jedne serije merenja. Mase vlage i tera dobijene opisanim gravimetrijskim metodom pokazuju relativno velike količine tera u

gorivom gasu. Zapravo ter je taj koji je davao toplotnu moć gasu. Količina H₂O i tera u gasu izmerene su za sve serije ispitivanja, pa su na kraju svodene na pojedinačne sastave gasa pod pretpostavkom da su u svakoj od serija ispitivanja emitovane iste količine vlage i tera. Dobijeni odnos vlage i tera odgovara vrednostima koje su u [9] dobili za $\lambda=0.25$. U istom radu pokazano je da količina tera opada sa povećanjem količine primarnog vazduha. Sa njegovim povećanjem generalno raste temperatura gasa na izlazu iz komore.



Slika 4. Promene zapreminskih koncentracija CO, CH₄, O₂ i temperature dimnog gasa tokom testa 3.

Rezultati su proveravani na osnovu materijalnog i elementarnog bilansa. Prosečno odstupanje materijalnog bilansa bilo je 8,4%, dok je kod elementarnog bilansa najveće odstupanje bilo kod kiseonika i ugljenika. Manjak od 8 do 14% ugljenika u produktima može se objasniti postojanjem negasifikovanog ugljenika, dok je manjak kiseonika u produktima posledica više uzroka: greške merenja ulaznog vazduha i gasovitih produkata, kao i napred navedenih pojednostavljenja i osrednjavanja.

Dobijeni rezultati su slični teorijskim rezultatima koje su u svojim istraživanjima koristili u radu [8], ali se od njih razlikuju po tome što je gas dosta niže temperature i što u sebi ima dosta tera. Pomenuta činjenica da je gasifikaciona komora u najvećem delu okružena kotlovskom vodom utiče na nižu temperaturu gasa i na njegov sastav.

Tabela 4. Dobijeni eksperimentalni i rezultati teorijskih modela.

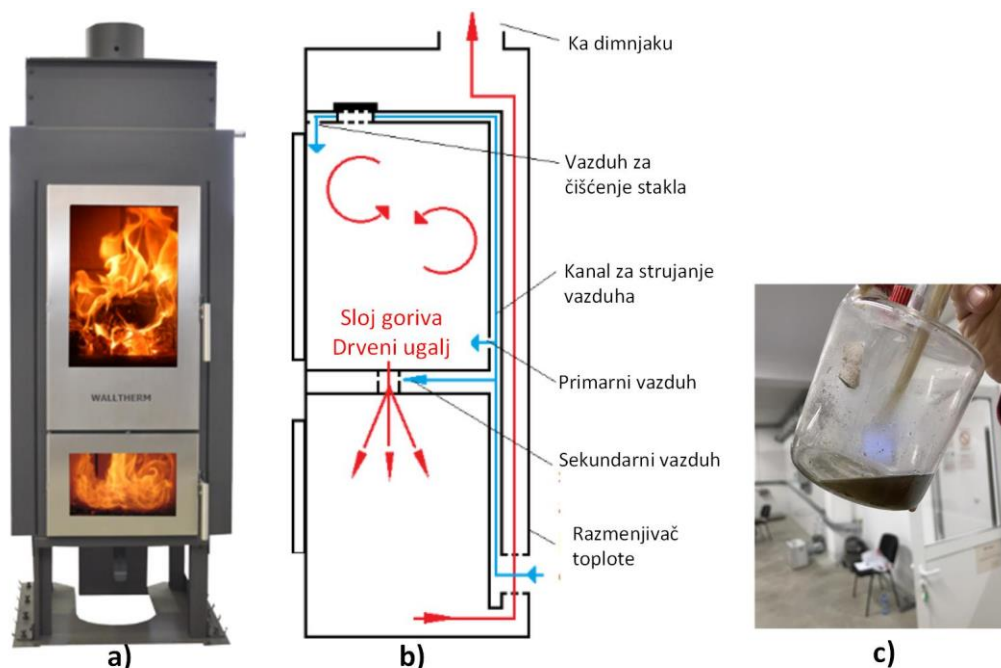
Test	1	2	3	4	CBP - SRS	CBP - PV
Koeficijent viška vazduha λ	0,28	0,43	0,34	0,28	0,285	0,239
CO	2,4%	4,1%	5,3%	5,4%	22,2%	26,2%
CO ₂	19,5%	14,7%	15,7%	17,2%	10,3%	8,4%
CH ₄	0,3%	1,0%	1,1%	1,3%	1,3%	1,3%
H ₂	0,2%	1,1%	1,1%	1,2%	22,8%	25,5%
H ₂ O	22,0%	15,5%	18,2%	20,0%	5,4%	4,6%
N ₂	55,2%	62,8%	58,1%	54,5%	38,0%	33,9%
O ₂	0,3%	0,6%	0,5%	0,4%	0,0%	0,0%
Hd (MJ/kg _B)	0,69	2,25	2,21	2,14	12,64	13,53
Hd sa terom (MJ/kg _B)	11,5	11,5	11,5	11,1		
masa vlage (kg/m ³ sgg)	0,152					
masa tera(kg/m ³ sgg)	0,122					
Temperatura (°C)	497	618	556	570	674,5	698,6

3.1 Diskusija

U prvoj seriji ispitivanja (videti Tab. 4.) niske vrednosti sagorljivih elemenata su posledice tankog sloja gasifikovanog goriva i stvaranja kanalića, uskih prolaza u sloju goriva. U ovom slučaju u prolazu, koji je za protok vazduha a potom i gasa neka vrsta hidrauličke kratke veze, se odvija gotovo potpuno sagorevanje. Kroz ostali deo mase struje manje količine vazduha i uzrokuju gasifikaciju sloja goriva. Devolatilizacija goriva koja se dešava i čija posledica je ter zavisi od brzine širenja toplotnog fluksa sa uskih zona oko kanalića na ostatak goriva. Devolatilizovan gas:

- (i) Cirkuliše iznad goriva u zoni gasifikacije zbog izjednačavanja pritiska. O ovome svedoči ter nalepljen na zidove komore kroz koje struji voda.
- (ii) Zbog relativno velikog otvora za prolaz gasa iz zone gasifikacije u zonu sagorevanja (220x80 mm), ter se meša sa dimnim gasom ali zbog nedostatka kiseonika i opadanja temperature gasa ne stiže da se redukuje. Opisani proces objašnjava izmerenu količinu tera u gorivom gasu. Ter gasu daje toplotnu moć i razlog je što i pored niske toplotne moći sagorevanje gasa stvara vidljivi plamen.
- (iii) Stvara efekat duplog plamena prikazan na Sl. 5.a) i 5.b). Pri punjenju male količine materijala u kotlu se stvara efekat koji se koristi kod gasifikacionih kamina. Kod ispitivane konstrukcije ovaj efekat je poželjan i javlja se kad se u kotao stavlja količina drva koja je ispod otvora za dovod primarnog vazduha. No i pored ove pozitivne osobine ovakav način rada je nepovojan sa stanovišta upravljanja naročito pri prvoj šarži. Pomenuti kanalići onemogućavaju adekvatno upravljanje i postizanje nominalne snage. Pri ispitivanju kod nalaganja do linije A-A (videti Sl. 3.b) kotao nije mogao da ostvari termičku snagu veću od 15.5 kW.

Temperatura gasa na izlazu iz komore nije mnogo oscilovala tokom perioda uzorkovanja i generalno je bila viša pri korišćenju veće količine primarnog vazduha. Više vazduha oslobađa veću količinu energije pri reakcijama oksidacije što za posledicu ima više temperature gasa. Izmerene vrednosti su niže nego na optimalnoj tački gasifikacije zbog toplotnog gubitka ka vodi, sekundarnom vazduhu i okolini i u skladu su sa vrednostima dobijenim u [9]. Anomalije se javljaju pri punjenjima sa manjom količinom drveta zbog već pomenutih kanalića za protok gasa. Pomenuti kanalići nestaju nakon nekoliko šarži zbog usitnjavanja drveta usled pojava pojava sukpljanja i termičke degradacije o čemu se opširnije može pročitati u [10].



Slika 5. a) izgled peći koja koristi gasifikaciju drva [17], princip rada peći pod a) [3], c) izgled smeše kondenzata

4 Zaključak

U radu su predstavljena ispitivanja gasifikacione komore kotla na drva radi evaluacije njenih performansi i modeliranje komore za sagorevanje. Sastava i temperature proizvedenog gorivog gasa zavise od:

- Broja šarže. Prva šarža je najviše sklona stvaranju kanalića u sloju gasifikovanog materijali. Kanalići utiču na stabilan rad kotla a njihova pojava se redukuje kad se na dnu komore stvori dosta sitnijih komadića drvenog uglja. Tada kotao ulazi u stacionarni radni režim.
- Rastojanja od otvora za primarni vazduh do otvora za izlaz iz komore. Ovo rastojanje treba da bude od 30 do 40 cm i zavisi od oblika i veličine izlaznog otvora.
- Od oblika i veličine izlaznog otvora. Veći otvori stvaraju veću verovatnoću za pojavu kanalića i propadanje čestica u zonu sagorevanja. Zbog toga je potrebno na dnu komore postavljati adekvatnu prepreku. Zato proizvođači kotlova na dnu komore dodaju različite prepreke najčešće napravljene od vatrostalnog čelika. Opcija za smanjenje propadanja goriva i uznošenja čestica u gasnoj struji se može postići i odgovarajućim oblikom dna komore.
- Toplotnog fluksa koji se sa komore odvodi ka vazduhu za sagorevanje, zagrevanoj vodi i okolini. Veći toplotni gubici ka vodi i okolini zahtevaju korišćenje veće količine primarnog vazduha.
- Visini do koje je komora napunjena gorivom i njegovog oblika, veličine i vlažnosti. Ako se koriste komore manje napunjene gorivom tada je moguće koristiti toplotni fluks na način koji se radi kod duplih gasifikacionih peći (videti Sl. 5 a) i b)). Maksimalno punjenje gasifikacione komore drvima posle izvesnog vremena redukuje stvaranje kanalića.

Kod ispitivanog tipa komore za gasifikaciju toplotna moć gasa je dolazila od sadržaja tera u njemu. Osim oblepljivanja zidova same komore, ter nije stvarao druge probleme. Razlog za dobijeni sastav gasa je u relativno malom rastojanju između ulaznih otvora vazduha i otvora na izlazu iz gasifikacione komore, koji je u ovom slučaju ~ 20 cm (rastojanje je promenljivo videti Sl. 2). Gas dobijen tokom ispitivanja prikazane komore napunjene na način prikazan u radu veoma se razlikuje od gasa proizvedenog u reaktorima za istosmernu gasifikaciju. Njegov sastav odgovara smeši gasa dobijenog suprotnosmernom gasifikacijom i produkata gotovo potpunog sagorevanja.

5 Reference

- [1] **Hassan R.**, *Ecosystems and Human Well-being : Current State and Trends , Volume 1*. 2005.
- [2] **Vučičević. A.**, “Statistical Pocketbook of the Republic of Serbia 2020,” Beograd, 2020. doi: : ISSN 2683-5622.
- [3] **Adam A.**, “Performance Optimisation of a Residential Wood Log Burning Stove,” 2023.
- [4] “ALK Contracting,” 2023. <https://alkcontracting.com/outdoorwoodfurnaces.html>.
- [5] “Premier Plumbing & Heating,” 2023. <http://premplumbingberwick.co.uk/biomass/>.
- [6] Viessmann, “Kotlovi na cepanice,” 2023. <https://www.viessmann.rs/sr/daljinsko-grejanje/kotlovi-na-biomasu/kotlovi-na-cepanice.html>.
- [7] **Chanphavong L., Al-Attab K. A., Zainal Z. A.**, “Flameless Combustion Characteristics of Producer Gas Premixed Charge in a Cyclone Combustor,” *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 103, no. 3, pp. 731–750, 2019, doi: 10.1007/s10494-019-00043-x.
- [8] **Drosatos P., Nesiadis A., Nikolopoulos N., Margaritis N., Grammelis P., Kakaras E.**, “CFD Simulation of Domestic Gasification Boiler,” *J. Energy Eng.*, vol. 143, no. 2, pp. 1–19, 2017, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000406.
- [9] **Buchmayr M., Gruber J., Hargassner M., Hochenauer C.**, “Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 81, pp. 356–363, 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.07.016.
- [10] **Caposciutti G. et al.**, “Experimental investigation on biomass shrinking and swelling behaviour: Particles pyrolysis and wood logs combustion,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 123, no. August 2018, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2019.01.044.

- [11] **Kirch T., Medwell P. R., Birzer C. H., van Eyk P. J.**, “Feedstock Dependence of Emissions from a Reverse-Downdraft Gasifier Cookstove,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 56, pp. 42–50, 2020, doi: 10.1016/j.esd.2020.02.008.
- [12] **Kirch T., Medwell P. R., Birzer C. H., Van Eyk P. J.**, “Influences of Fuel Bed Depth and Air Supply on Small-Scale Batch-Fed Reverse Downdraft Biomass Conversion,” *Energy and Fuels*, vol. 32, no. 8, pp. 8507–8518, 2018, doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b01699.
- [13] “ITEM Consult”ltd, “Test Report,” Sofia, Bulgaria, 2018.
- [14] **Hasler P., Nussbaumer T.**, “Sampling and analysis of particles and tars from biomass gasifiers,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, no. 1, pp. 61–66, 2000, doi: 10.1016/S0961-9534(99)00071-9.
- [15] **Karamarkovic R., Karamarkovic V.**, “Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures,” *Energy*, vol. 35, no. 2, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.10.022.
- [16] **Karamarković R. M., Karamarković V. M., Jovović A. M., Marašević M. R., Lazarević A. D.**, “Biomass gasification with preheated air: Energy and exergy analysis,” *Thermal Science*, vol. 16, no. 2, pp. 535–550, 2012, doi: 10.2298/TSCI110708011K.
- [17] “Walltherm gasification stove,” 2023. <https://www.wallnoefer.it/en/products/wallthermr-wood-stoves/wood-boiler-stoves/new-vajolet-basic-insert-stove.html>.

ENERGETSKA UPOREDBA SOLARNOG APSORPCIONOG HLAĐENJA SA KLASIČNIM SISTEMOM HLAĐENJA

ENERGY COMPARISON OF SOLAR ABSORPTION COOLING WITH CLASSICAL COOLING SYSTEM

Lejla RAMIĆ, Sandira ELJŠAN*, Izet ALIĆ, Meliha ŠABANOVIĆ
Univerzitet u Tuzli, Mašinski fakultet, Tuzla, Bosna i Hercegovina

U radu su ispitane mogućnosti primjene solarnog hlađenja u B&H, budući da je potencijal solarne energije veliki. Cilj je smanjene potrošnje primarne energije, kao i smanjenje emisije štetnih plinova, prvenstveno CO₂. Istražena je izvodivost jednostepenog H₂O/LiBr apsorpcionog rashladnog uređaja, koji je pogonjen toplinom solarnih kolektora za zgradu u Tuzli, kao i uporedba sa postojećim kompresionim rashladnim uređajem. Za proračunate vrijednosti toplinskog opterećenja odabran je sistem solarnog hlađenja. Razvijen je matematski model za apsorpcioni jednostepeni rashladni ciklus koji uključuje bilansne jednačine mase i energije, kao i jednačine izmjene topline. Sistem apsorpcije dizajniran je za maksimalno opterećenje hlađenja navedenog objekta.

Ključne reči: solar absorption cooling; compression cooling; comparison; cooling coefficient; energy saving

The paper examines the possibilities of applying solar cooling in B&H, since the potential of solar energy is great. The goal is to reduce primary energy consumption, as well as to reduce emissions of harmful gases, primarily CO₂. The feasibility of a single-stage H₂O / LiBr absorption cooling device powered by heat from solar collectors for a building in Tuzla was investigated, as well as a comparison with the existing compression cooling device. A solar cooling system was selected for the calculated heat load values. A mathematical model for the absorption single-stage cooling cycle has been developed that includes mass and energy balance equations as well as heat exchange equations. The absorption system is designed for the maximum cooling load of the specified facility.

Key words: solarno apsorpciono hlađenje; kompresiono hlađenje; uporedba; koeficijent hlađenja; ušteda energije

* Corresponding author, e-mail: sandira.eljsan.msf@gmail.com

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

ISKORIŠĆENJE POTENCIJALA DEPONIJSKOG GASA U SLUČAJU PARCIJALNOG ZATVARANJA DEPONIJE

THE POTENTIAL OF LANDFILL GAS UTILIZATION FOR THE CASE OF PARTIAL CLOSURE OF THE SANITARY LANDFILL

Ana DAJIĆ*, Marina MIHAJLOVIĆ, Milica SVETOZAREVIĆ
Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, Beograd

Deponovanje otpada jedan je od elemenata integrisanog upravljanja otpadom. Valjano projektovanje bi, između ostalih elemenata, obavezno moralo da podrazumeva i prikupljanje deponijskog gasa. Deponijski gas (eng. Landfill gas – LFG) nastaje kao proizvod anaerobnog razlaganja biodegradabilnih komponenti ostataka komunalnog otpada na deponiji i prosečno sadrži 50-55% metana (CH₄) i 45-50% ugljen-dioksida (CO₂). Energetska vrednost deponijskog gasa kreće se u rasponu 46-30 MJ/m³. Pored energetske potencijala deponijski gas je veoma važan sa stanovišta zaštite životne sredine i važno je iskoristiti deponijski gas pre nego što se deponija potpuno zatvori. Rad govori o mogućnosti iskorišćenja potencijala deponijskog gasa pre njenog zatvaranja.

Ključne reči: otpad; deponija; iskorišćenje deponijskog gasa

Waste disposal is an important element of integrated waste management. It is a necessary step although it could significantly affect the environment and the goal is to do everything to protect it. Collection of landfill gas (LFG) should be included in proper landfill design. Landfill gas, as a product of the anaerobic decomposition of biodegradable components from municipal waste at the landfill, contains on average 50-55% methane (CH₄) and 45-50% carbon dioxide (CO₂). The energy value of landfill gas ranges from 46 to 30 MJ/m³. The paper is about the possibility of utilizing the potential of landfill gas before its closure.

Key words: waste; landfill; landfill gas utilization systems

1 Uvod

Kao proizvod mikrobiološke razgradnje otpada u aerobnim ili anaerobnim uslovima nastaje deponijski gas. Sastav deponijskog gasa, u čijem sastavu su procentualno najzastupljeniji ugljen-dioksid i metan, zavisi od faze razgradnje, sastava i starosti otpada, dubine deponije, sadržaja vlage, pH vrednosti, temperature, stepena sabijanja otpada, atmosferskog pritiska itd. Energetska vrednost deponijskog gasa kreće se u rasponu 16-30 MJ/m³. Osim energetske potencijala, deponijski gas je značajan i sa stanovišta zaštite životne sredine. Metan spada u grupu gasova sa efektom staklene bašte (eng. Greenhouse gases - GHG) i ima 21 put veći potencijal globalnog zagrevanja (eng. Global Warming Potential) od ugljen-dioksida.

U prvoj fazi, koja započinje odmah nakon odlaganja otpada, dolazi do aerobne razgradnje otpada na ugljen-dioksid i vodu, uz oslobađanje toplote. U ovoj fazi troši se kiseonik koji je prisutan u otpadu. Nakon nje, sledi nemenogena faza čiji proizvodi su kisela jedinjenja, vodonik i ugljen-dioksid. Treća faza je neravnotežna metanogena faza, u kojoj dolazi do opadanja proizvodnje ugljen-dioksida usled pomeranja reakcije dekompozicije otpada iz aerobnih u anaerobne uslove. Četvrta faza je ravnotežna metanogena faza i tokom nje nastaje 40-70% od ukupno nastale količine metana. U tipičnim uslovima, ova faza se uspostavlja već nakon druge godine od odlaganja otpada. Deponijski gas može se generisati unutar deponije tokom nekoliko desetina godina, a u nekim slučajevima i do sto godina od trenutka odlaganja otpada na deponiju [1].

Prikupljanje deponijskog gasa obično započinje nakon zatvaranja deponije. Sistem za prikupljanje deponijskog gasa može se sastojati od mreže vertikalnih i horizontalnih gasnih bunara (biotronova) koji imaju ulogu da usmere difuzne emisije deponijskog gasa u usmereno strujanje. Najčešći

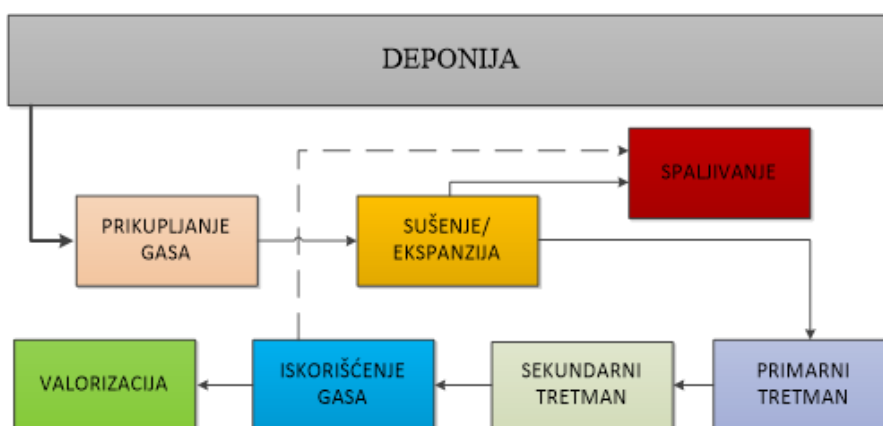
* Corresponding author, e-mail: aveljasevic@tmf.bg.ac.rs

metod aktivnog prikupljanja je izdvajanje gasa kroz vertikalne perforirane cevi, što je najjednostavniji metod. Vertikalni bunari se obično postavljaju na međusobnom rastojanju 40-80 metara. U zavisnosti od dubine deponije, poležu se između 50-90% visine tela deponije, a najdalje do 30 metara dubine. Biotrnovi se nadograđuju kako raste visina deponije i projektuju se kao deo sistema za prikupljanje gasova. Biotrnovi se zatvaraju zaptivačima i priključuju na cevovodni sistem za prikupljanje gasa. Sistem za prikupljanje deponijskog gasa se potom prekriva ravnujućim slojem na čijem vrhu se postavlja ograničavajući zaptivni sloj [2].

Za procenu emisije deponijskih gasova korišćen je Microsoft Exel model LandGEM (eng. Landfill Gas Emissions Model) koji je razvila US EPA [3]. Ovaj model zasniva se na jednačini degradacije kojom se određuje stvorena masa metana u zavisnosti od kapaciteta stvaranje metana i mase odloženog otpada, vrste otpada, projekta deponije, konstante brzine stvaranja metana (k), potencijala stvaranja metana (LO) [4].

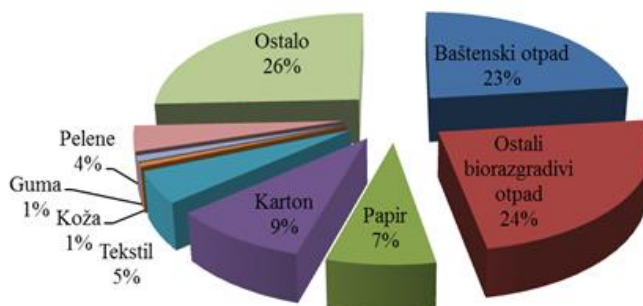
2 2 Eksperimentalni deo

Na slici 1 prikazan je primer kompleksnog sistema za iskorišćenje deponijskog gasa koji se sastoji iz sledećih podcelina: sistema za prikupljanje i spaljivanje, sistem za prečišćavanje i sistem za iskorišćenje.



Slika 1. Sistem za tretman deponijskog gasa

Dinamika punjanja deponije otvara mogućnost za valorizaciju gasa na deponiji u optimalnom vremenskom periodu u odnosu na starost deponije. Kapacitet hipotetičke deponije je dovoljan da isprati povećane količine otpada u godinama do 2026. Uzeto je u obzir da bi okolne opštine dodatno do zatvaranja mogle da odlože na deponiju ukupno 1046,5 t otpada. U ovom slučaju ispunjava se maksimalna teorijska zapremina deponije od 837.250 m³ (800.000+ 37.200 m³), slika 4.



Slika 2. Morfološki sastav otpada na deponiji

3 Rezultati i diskusija

Procenjeno je da bi ovakvom dinamikom projektovana zapremina deponije bila ispunjena do kraja 2026. godine na sledeći način:

- Faza I – Novo odlagalište se od 2023. godine puni do 21 m visina deponije povećanim količinama, poštujući pravilo stabilnosti kosina deponije (3:1). Ovim principom ispunjava se 800.000 m², a po ispunjenju date zapremine iznad novog odlagališta ono se fazno zatvara i pristupa se faznom iskorišćenju gasa. U nastavku otpad se dalje odlaže na starom odlagalištu kao što je opisano u Fazi II.
- Faza II – Na preostalu površinu starog odlagališta, površine 37.200 m³, dovoziće se nove količine otpada. Staro odlagalište raste ka novom odlagalištu do njegove pune visine. Nakon ispunjavanja ovog dela deponije pristupa se zatvaranju Faze II i priključenju na sistem za iskorišćenje deponijskog gasa.

Tabela 1 daje zbirni prikaz protoka deponijskog gasa koji je moguće iskoristiti.

Tabela 1. Zbirni prikaz protoka deponijskog gasa koji je moguće iskoristiti

Godina	Faza I	Faza II	Zbir
2025.	0	0	0
2026.	35633	0	35633
2027.	54235	0	54235
2028.	70235	29345	99579
2029.	86971	46760	133731
2030.	91516	66332	157849
2031.	47776	34628	82404
2032.	24941	18078	43019
2033.	13020	9437	22458
2034.	6797	4927	11724
2035.	3548	2572	6120
2036.	1852	1343	3195
2037.	967	701	1668
2038.	505	366	871
2039.	264	191	455
2040.	138	100	237

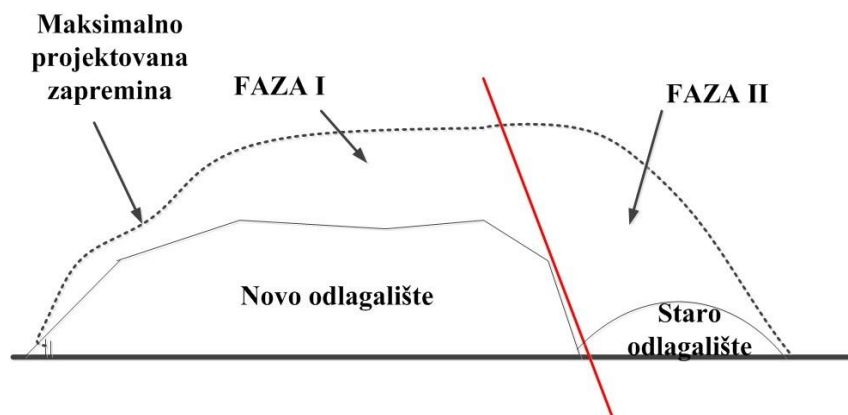
Nakon prestanka rada svake deponije, a kada su ispunjeni uslovi navedeni u dozvoli i projektu za zatvaranje deponije (ili jednog njenog dela), neophodno je propisno izvršiti njeno zatvaranje. Zatvaranje deponije se vrši formiranjem gornjeg prekrivnog zaštitnog sloja koji mora da zadovolji sledeće zahteve:

- • Sprečavanje dotoka padavinskih voda u telo deponije
- • Zaštita tela deponije od povećanja procednih voda.

Pri zatvaranju deponije potrebno je obezbediti nesmetano funkcionisanje sistema za degazaciju (sistem za kontrolisano i bezbedno sakupljanje deponijskog gasa), sve dok za tim postoji potreba, kao i kontrolu i monitoring deponije u skladu sa propisima.

Nakon završenog perioda eksploatacije deponija se zatvara za dalje odlaganje otpada formiranjem gornjeg, prekrivnog sloja koji mora da zadovolji tehničko-tehnološke uslove u skladu sa propisima Republike Srbije, tj. Uredbom o odlaganju otpada na deponije [5].

Predmetna deponija može se grubo podeliti na dve podceline: staro i novo odlagalište. Ukoliko se dalje odlaganje otpada bude odvijalo prema dinamici prikazanoj u tabeli 1, sa usvojenom gustinom otpada $0,8 \text{ t/m}^3$, može se očekivati dostizanje maksimalnog kapaciteta deponije za 10 godina. Ova procena bazirana je na pretpostavci da će deponija nastaviti da raste sve dok je moguće ispoštovati nagib 3:1, koji osigurava građevinsku stabilnost deponije.



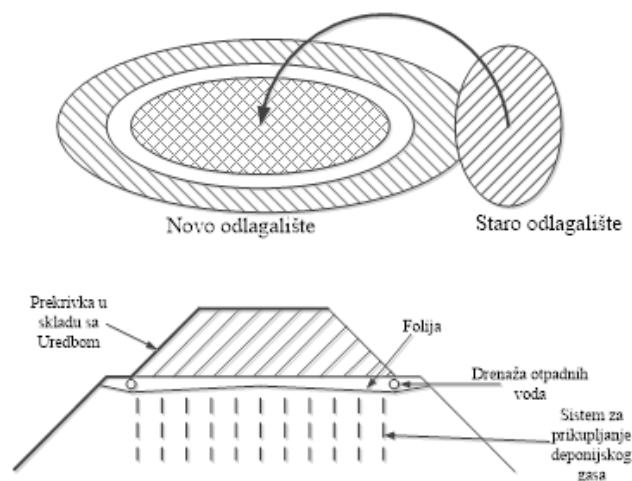
Slika 3. Finalno zatvaranje hipotetičke deponije

Faza I obuhvata postavljanje sistema za prikupljanje deponijskog gasa pre dostizanja punog kapaciteta novog odlagališta, dok se postavljanje prekrivnog sloja vrši nakon dostizanja punog kapaciteta.

Cilj je iskorišćenje deponijskog gasa pre dostizanja punog kapaciteta novog odlagališta. Preko otpada postavlja se najpre sloj odgovarajućeg inertnog materijala (na primer šljake), a zatim se postavlja sistem za iskorišćenje deponijskog gasa. Nakon postavljanja ovog sistema, kosine deponije se finalno zatvaraju, odnosno na njima se postavlja prekrivka u skladu sa Uredbom. Na zaravnjenom delu deponije, tj. vrhu deponije postavlja se folija i sistem za drenažu voda. Folija sprečava prodor atmosfreskih voda u postojeće telo deponije. Na ovaj način smanjuje se količina kiseonika u telu deponije, što omogućava anaerobne uslove koji pogoduju stvaranju metana na uštrb ugljen-dioksida. Na ovom ravnom delu nastavlja se odlaganje otpada do dostizanja punog kapaciteta (slika 5).

Faza I započinje prebacivanjem otpada sa starog na novo odlagalište. Kosine zarubljene piramide su u nagibu 1:3, što garantuje stabilnost. Ova zarubljena piramida čini „donji” deo rešenja konačnog zatvaranja deponije.

Gornji, završni prekrivni sloj bi trebalo da ima debljinu minimum 1,30 m (0,30 m šljunka za deponijski gas, 0,43 cm sabijenog inertnog materijala, 0,07 m vodonepropusne barijere, 0,50 humusne zemlje za rekultivaciju). Posle zatvaranja deponije i posle završene rekultivacije gornja kota zatvorenog tela deponije je 101,70 mm.



Slika 4. Faza I zatvaranja deponije

4. Zaključak

Odlaganje komunalnog otpada predstavlja jedno od najvažnijih tema u oblasti zaštite životne sredine u Srbiji. Deponijski gas nastaje kao proizvod razgradnje biodegradabilnih komponenti ostataka komunalnog otpada na deponiji i sastoji se većinskim delom od metana i ugljen-dioksida. Prikupljanje deponijskog gasa, koji nastaje kao posledica odlaganja otpada, je jedan od elemenata važnog projektovanja deponija. Gas može biti iskorišćen za dobijanje električne energije ali se može i direktno isporučivati krajnjim potrošačima kao energent. Najčešće korišćeni sistemi za prikupljanje gasa sastoje se iz mreže vertikalnih ili horizontalnih gasnih bunara (biotrnova), ili iz njihove kombinacije. Izbor najbolje tehnologije za konkretan slučaj zavisi od nekoliko faktora a može se reći da je najvažniji parametar količina deponovanog otpada, jer od njega direktno zavisi količina nastalog deponijskog gasa.

Procena potencijala iskorišćenja deponijskog gasa na zamišljenoj deponiji izvršena je primenom softvera LandGem.

5. Zahvalnica

Istraživanja u ovom radu izvršena su u okviru aktivnosti koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije pod ugovorima evidencioni brojevi 451-03-47/2023-01/200287 i 451-03-47/2023-01/200135.

6. References

- [1] **Karanac, M., Mihajlović, M., Dajić, A., Stevanović, D., Jovanović, J., Jovanović, M.**, „Tehnološki elementi projektovanja deponija” 27.međunarodni kongres o procesnoj industriji Procesing ´14, 22- 24 septembar, 2014, Beograd Srbija, 978-86-81505-75-5, pp. 1-6
- [2] **Karanac, M., Mihajlović, M., Dajić, A., Stevanović, D., Jovanović, J., Jovanović, M.**, „Upravljanje deponijskim gasom” 27.međunarodni kongres o procesnoj industriji Procesing ´14, 22- 24 septembar, 2014, Beograd Srbija, 978-86-81505-75-5, pp. 1-6
- [3] *** Environment Protection Agency Ireland, Final Draft BAT Guidance Note on Best Available Techniques for the Waste Sector: Landfill Activities, December 2011 <http://www.epa.ie/pubs/advice/bat/BAT%20Landfill%20-%20Final%20Draft%20-%20December%202011.pdf> (mart2023.).
- [4] *** LFG Energy Project Development Handbook, Chapter 2: Landfill Gas Modeling (epa.gov) (mart2023.)
- [5] *** Uredba o odlaganju otpada na deponije („Sl. glasnik RS“, br. 92/2010 i 77/2021).

HIBRIDNI FUNKCIONALNI PANI/TiO₂ NANOKOMPOZITI ZA TRETMAN DEGRADACIJE ORGANSKIH BOJA

HYBRID FUNCTIONAL PANI/TiO₂ NANOCOMPOSITES FOR DYES DEGRADATION TREATMENT

Milica MILOŠEVIĆ^{1*}, Marija RADOIČIĆ¹, Gordana ĆIRIĆ-MARJANOVIĆ²,
Jelena SPASOJEVIĆ¹, Ivana VUKOJE¹, Aleksandra RADOSAVLJEVIĆ¹,
Zoran ŠAPONJIĆ³

¹“Vinča” Institute of Nuclear Sciences - National Institute of the Republic of Serbia,
University of Belgrade, Vinča, Belgrade

² Faculty of Physical Chemistry, University of Belgrade, Belgrade

³ Institute of General and Physical Chemistry, Belgrade

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.083>

Aktuelna potreba za zaštitom životne sredine ne jenjava i s tim u vezi postavljeni su visoki zahtevi vezani za tematiku primenjenih tehnologija za uklanjanje organskih zagađujućih supstanci. Ispostavlja se da napredni procesi oksidacije (engl. Advanced oxidation processes, AOPs) predstavljaju jedan od najefikasnijih procesa, među kojima heterogena fotokataliza, bazirana na upotrebi nanokristala TiO₂ aktiviranih UV zračenjem, nesumnjivo predstavlja jedan od najčešće korišćenih tretmana za degradaciju organskih boja. Problem ograničene fotokatalitičke efikasnosti TiO₂ pod dejstvom sunčevog zračenja može se prevazići formiranjem kompozita sa polianilinom (PANI), čija se uloga bazira na smanjenju rekombinativnih procesa e^-/h^+ , kao i sposobnosti PANI-a da optički aktivira nanokristale TiO₂, što je bila osnova za formiranje novih funkcionalnih PANI/TiO₂ nanokompozita. Takvi hibridni nanomaterijali bazirani na provodnom polimeru i nanokristalima različitih oblika pokazuju jedinstvena svojstva koja najčešće nisu karakteristika pojedinačnih komponenti, već njihovog sinergističkog dejstva. Efikasnim i ekološki prihvatljivim sintezama razvijena je serija funkcionalnih nanokompozita na bazi PANI-a i koloidnih TiO₂ nanočestica (NPs) (TP), karbonizovanog PANI-a i koloidnih TiO₂ NPs (TPC) i karbonizovanog PANI-a i TiO₂ nanotuba (NTs) (TTPC). Nanokristali TiO₂ različitog oblika pažljivo su sintetisani sol-gel i hidrotermalnom metodom i procenjen je uticaj njihove veličine i oblika na fotokatalitičku efikasnost hibridnih nanokompozita. Nekarbonizovani PANI/TiO₂ nanokompoziti sintetisani su hemijskom oksidativnom polimerizacijom anilina sa amonijum peroksidisulfatom, u prisustvu odabranih nanokristala TiO₂, dok je karbonizovana serija uzoraka dobijena naknadnim procesom karbonizacije, prateći polimerizaciju, u inertnoj atmosferi na 650 °C. Morfologija i struktura sintetisanih fotokatalitički aktivnih sistema ispitana je TEM analizom i Ramanskom spektroskopijom. Funkcionalnost nanokompozita je procenjena prateći procese fotokatalitičke degradacije model-jedinjenja Methylene blue i Rhodamine B i primećena je povećana efikasnost degradacije testiranih organskih boja.

Ključne reči: nanokompoziti; PANI; TiO₂; karbonizacija; životna sredina

A calling need for environmental protection is not abating and high demands have been set for the current topic that deals with applied technologies for removal of organic pollutants. The AOPs appear to be one of the most effective processes, where heterogeneous photocatalysis using efficient UV light-harvesting TiO₂ nanocrystals has unquestionably become one of the most commonly used process for dyes degradation treatment. Limited photocatalytic efficiency of TiO₂ under sunlight illumination was overcome by coupling with polyaniline (PANI) as notably investigated conductive polymer. Reducing the level of e^-/h^+ recombination in TiO₂ and photosensitized properties of PANI was the basis for creation of new functional PANI/TiO₂ nanocomposites. Such hybrid

* Corresponding author, e-mail: milicam@vin.bg.ac.rs

functional nanomaterials consisting of conductive polymers and dissimilar nanocrystals manifest the unique properties, usually not characteristic of independent components but their synergistic effect. Series of developed functional nanocomposites based on PANI and colloidal TiO₂ nanoparticles (NPs) (TP), carbonized PANI and colloidal TiO₂ NPs (TPC) and carbonized PANI and TiO₂ nanotubes (NTs) (TTPC) by the efficient and harmless synthesis pathways are presented. Differently shaped TiO₂ nanocrystals are carefully prepared via sol-gel and hydrothermal synthesis and the influence of their size and shape on the photocatalytic efficiency of hybrid nanocomposites was evaluated. The non-carbonized PANI/TiO₂ nanocomposites were synthesized by the chemical oxidative polymerization of aniline with ammonium peroxydisulfate, in the presence of selected TiO₂ nanocrystals, while the carbonized class was obtained in the subsequent carbonization process, following the polymerization, in an inert atmosphere at 650 °C. The morphology and structure of these nano-based photocatalysts was determined by TEM analysis and Raman spectroscopy. Functionality of nanocomposites was evaluated following the photocatalytic degradation processes of model compounds Methylene blue and Rhodamine B and enhanced degradation efficiencies in the used dyes were observed.

Key words: nanocomposites; PANI; TiO₂; carbonization; environment

1 Introduction

Widespread application of an efficient UV light-harvesting TiO₂ nanocrystals, considering various crystalline structures and shapes, is gaining momentum for photocatalytic removal of organic pollutants taking into account its simple synthesis, low cost and the ability to resist photocorrosion [1]. However, limited use of only ~5% of solar radiation of TiO₂ crystals leads to the constant development of new strategies for tuning optical response of TiO₂ in visible region with an aim to increase its photoactivity [2]. An approach that meets both demands, including visible light absorption and non-hindered charge separation in TiO₂, is based on the synthesis of nanocomposite systems consisting of electronically coupled conductive polymers (*e.g.*, polyaniline (PANI), polythiophene, polypyrrole, and their derivatives) and TiO₂ [3], [4]. Actually, such extended π -conjugated electron systems, as conducting polymers electronically coupled to TiO₂, possess moderate-to-high mobility of charge carriers, enabling better separation of photoinduced e^-/h^+ in TiO₂ nanocrystals. Generally, hybrid functional materials consisting of conductive polymers and dissimilar nanocrystals exhibit some unique properties which are usually not a property of individual components [5], [6].

Excluding formerly mentioned aspects of N-containing conductive polymers (PANI or polypyrrole) in photoinduced charge-transfer processes, these materials are also used in the obtaining of new N-containing 1-D nanostructured carbon materials during the carbonization process at high temperature (500-1050 °C) and in an inert atmosphere [7-9]. Nanocomposites based on such N-containing carbonaceous materials and dissimilar inorganic components (metals, oxides) provide supplemental properties/improvements in various applications [10]. Therefore, the possibility to design the photocatalysts with tailored and unique properties is open by the evolution of carbon-nanostructure-based-titania nanocomposites [11].

Conventional photoactive nanocomposites based on neat and carbonaceous materials and TiO₂ nanocrystals are ordinarily synthesized by challenging routes using costly equipment or at high temperatures. In contrast, this research offers a simplified approach for the synthesis of multiple classes of these functional nanocomposites.

Concerning the examination of the influence of carbonization process of PANI, as well as the influence of shape of TiO₂ nanocrystals on the photocatalytic efficiency of the developed classes of nanocomposites, the degradation processes of model molecules (*Methylene blue, MB* and *Rhodamine B, RB*) is followed within this research. The morphological properties of designed nanocomposites are investigated by TEM analysis, while the molecular properties of individual components are studied by Raman spectroscopy. Photocatalytic activity of carbonized PANI/TiO₂ nanocomposites, synthesized in the presence of either colloidal or tubular TiO₂ nanocrystals, are compared to non-carbonized nanocomposites examined in our previous work [7].

2 Experimental part

2.1 Synthesis of TiO₂ nanoparticles

The colloidal solution of TiO₂ nanoparticles (NPs) was prepared in a manner analogous to the procedure proposed by Rajh *et al.* [12]. The concentration of TiO₂ was determined from the concentration of the peroxide complex obtained after dissolving the particles in concentrated H₂SO₄ [13].

2.2 Synthesis of TiO₂ nanotubes

TiO₂ nanotubes (NTs) were synthesized in alkaline conditions by hydrothermal treatment in accordance with procedure of Vranješ *et al.* [14]. Calcined TiO₂ NTs (carbonized tubes) were synthesized in an argon atmosphere, starting from the described TiO₂ NTs powder, which was subsequently heated from room temperature to 650 °C, kept at that temperature for 15 min and cooled down to room temperature in an inert atmosphere.

2.3 Synthesis of non-carbonized and carbonized PANI/TiO₂ nanocomposites

Non-carbonized PANI/TiO₂ nanocomposites were synthesized by chemical oxidative polymerization of aniline (ANI) by oxidant (ammonium peroxydisulfate, APS) in the presence of colloidal TiO₂ NPs at room temperature. The first set of the samples was prepared in the presence of colloidal TiO₂ NPs, with TiO₂:ANI molar ratio of 50, 100 and 150, and denoted as TP-50, TP-100 and TP-150.

Carbonized TPC nanocomposite samples were prepared in the two-step procedure. The first step of synthesis included chemical oxidative polymerization (previously described). The second step was based on the carbonization process, considering heating of the samples from room temperature to 650 °C, keeping at this temperature for 15 min, and cooling to room temperature. Whole process was conducted in an inert atmosphere. The second set of the samples was prepared in the presence of colloidal TiO₂ NPs, with TiO₂:ANI molar ratio of 20, 50 and 80, and denoted as TPC-20, TPC-50 and TPC-80.

The third set of the samples was prepared in the same manner as TPC nanocomposites, where TiO₂ NTs were used instead of colloidal TiO₂ NPs. Initial molar ratios of TiO₂ NTs and ANI were 50, 100 and 150, and samples were denoted as TTPC-50, TTPC-100 and TTPC-150.

All chemicals used for the synthesis were commercial analytical quality products (*Aldrich*, *Fluka*, *Centrohem*) used as-received except ANI. ANI (*Centrohem*, Serbia, p.a. > 99.5%) was distilled under the reduced pressure and stored at room temperature, under argon, prior to use. *Milli-Q* deionized water was used as a solvent.

3 Methods

3.1 TEM analysis

The shape and size of synthesized nanocomposites (TP-50, TPC-50, TTPC-50) were determined by Transmission Electron Microscopy (TEM) using a *JEOL 100CX* device operating at 100 kV.

3.2 Raman analysis

Raman spectra of TP-50, TPC-50, TTPC-50 nanocomposite samples, excited by a HeNe gas laser (excitation wavelength: 633 nm), were collected on a *Thermo Scientific DXR* Raman microscope equipped with a research optical microscope and a CCD detector. The scattered light was analyzed by the spectrograph with a 600 lines-per-mm grating. Laser power at the sample was 0.5 mW.

3.3 Photocatalytic performances

The photocatalytic performances of all samples were investigated by monitoring the degradation processes of the test dye molecules, MB and RB, under simulated solar light. A 1 gL⁻¹ of the photocatalyst was mixed with the 50 mL of 1 × 10⁻⁵ molL⁻¹ of aqueous dye solution, continuously

stirred in an air atmosphere and illuminated by a lamp that simulates solar irradiation (*Osram Vitalux* lamp, 300 W). Before illumination, the system was stirred in the dark for 30 min to achieve adsorption-desorption equilibrium. The aliquots were taken every 1h for TP, 5 min for TPC and 2 min for TTPC samples. Changes in the absorbance of dye molecules (MB or RB) in supernatant were measured on *Thermo Scientific Evolution 600* UV/Vis spectrophotometer λ (MR) = 664 nm and λ (RB) = 554 nm.

4 Results and discussion

4.1 Morphological properties – TEM analysis

The shape and size of synthesized nanocomposites, TP-50, TPC-50 and TTPC-50 are presented in *Fig. 1*. On the TEM micrograph of non-carbonized nanocomposite prepared in the presence of colloidal TiO₂ NPs (TP-50) thin PANI layer on anatase TiO₂ NPs was observed. According to the distance between crystal planes and thickness of the carbonized PANI (CPANI) cover onto NPs in TPC-50 sample, it can be observed that carbonization process caused change in the crystal phase of TiO₂ NPs (appearance of the rutile phase), as well as decreasing of the thickness of the carbonized polymer layer. Nanocomposites prepared in the presence of TiO₂ NTs and carbonized thereupon showed completely change of morphological structure (TTPC-50, *Fig. 1*). Namely, process of carbonization completely destroyed tubular structure of TiO₂ NTs and formation of granular structure occurs. In addition, the CPANI layer still exist after thermal process in an inert atmosphere and it can be clearly observed at *Fig. 1*. (TTPC-50).

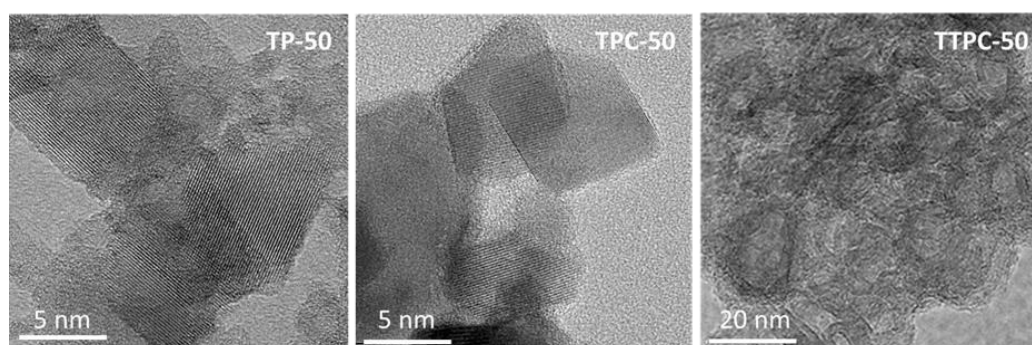


Fig. 1. TEM micrographs of TP-50, TPC-50 and TTPC-50 nanocomposite samples.

4.2 Raman analysis

A molecular structure of TP-50, TPC-50 and TTPC-50 was provided by Raman spectroscopy analysis and shown in *Fig. 2*. Vibrational bands positioned at 1598, 1513, 1345 and 1172 cm⁻¹ corresponds to the C=C and C~C stretching vibrations of the quinonoid (Q) and/or semiquinonoid (SQ) rings, respectively (~ denotes the bond intermediate between the single and double bond), the N-H bending vibration of protonated amine, the C~N⁺ stretching vibration of polaronic structures and the C-H bending in-plane vibration of SQ rings in polaronic structures, respectively. Also, the bands which have been associated with the substituted phenazine units of ordinary PANI, were also observed at 1633, 1569 and 1410 cm⁻¹ for the TP-50 sample.

Carbonization process had a strong influence on both components of composite. Namely, appearance of G (1584 cm⁻¹) and D (1350 cm⁻¹) bands in treated samples (TPC-50 and TTPC-50) confirmed formation of carbonaceous material and completely destruction of PANI emeraldine salt form. In the course of the carbonization of PANI/TiO₂ at 650 °C, some changes in the crystalline structures of TiO₂ NPs are observed. To be precise, in the Raman spectrum of TPC-50 and TTPC-50 nanocomposite sample, the appearance of the bands at 147 cm⁻¹ (*E_g* phonon mode) and 382 (400) cm⁻¹ (*B_{1g}* mode) confirmed the presence of anatase crystalline phase [1]. Also, the new bands that appeared at 613(605), 447(479), 245 and 147 cm⁻¹ can be assigned to *A_{1g}*, *E_g*, second-order scattering and *B_{1g}* modes of rutile crystalline phase, respectively, formed by the temperature induced phase transformation in TiO₂ component of the nanocomposite [1]. The band at 147 cm⁻¹ is formed by mixed contributions of rutile *B_{1g}* mode and anatase *E_g* mode.

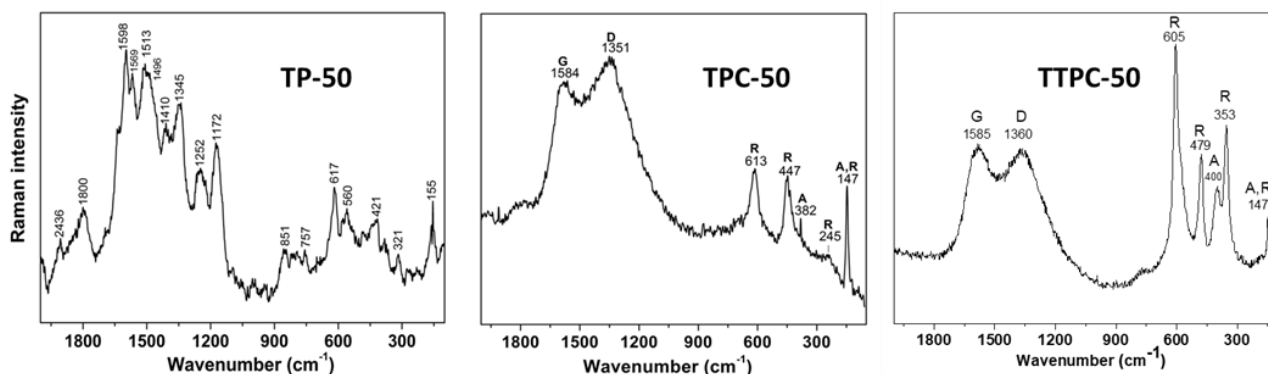


Fig. 2. Raman spectra of synthesized nanocomposites: TP-50, TPC-50 and TTPC-50.

4.3 Photocatalytic activity test

The photocatalytic degradation of organic dyes, MB and RB, was studied in the presence of three different PANI/TiO₂ nanocomposite sets, under white light irradiation in an oxygen atmosphere. The photodegradation of both dyes was monitored by concentration changes (C/C_0) as a function of illumination time (Fig. 3).

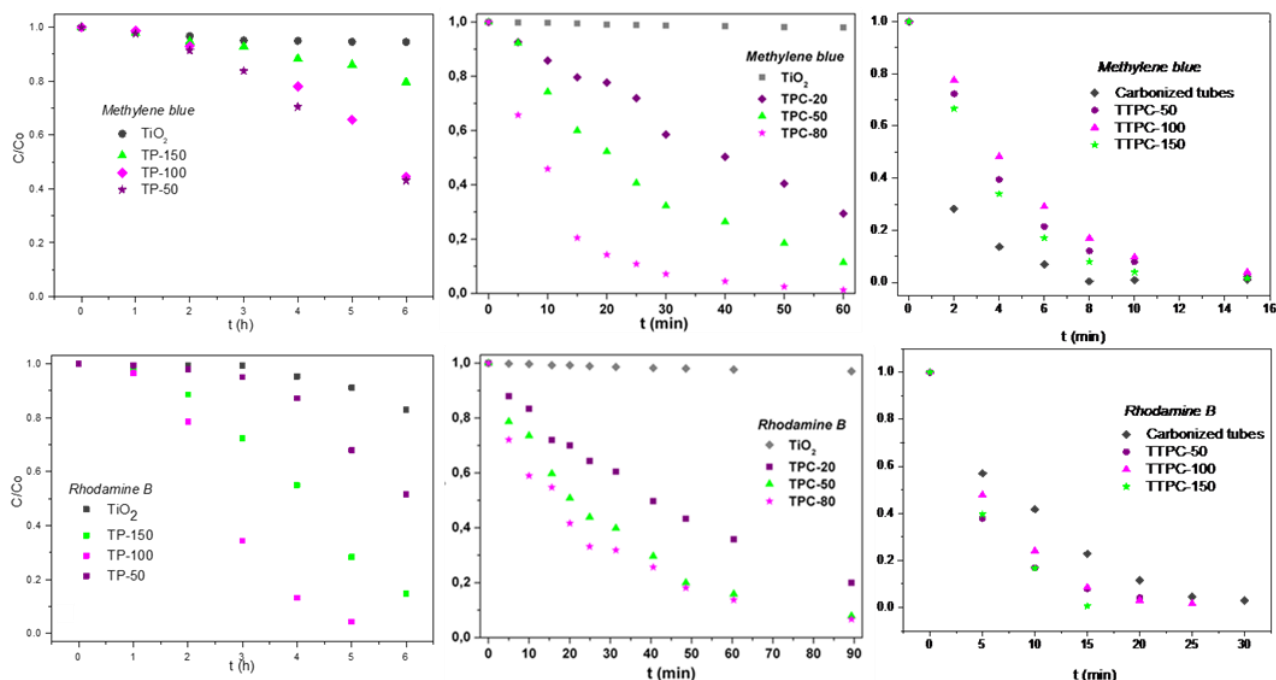


Fig. 3. Photocatalytic properties of TP, TPC and TTPC sets of nanocomposite photocatalysts.

Non-carbonized TP nanocomposites with a colloidal TiO₂/ANI molar ratio ranging from 50 to 150 removed only 20-60% of MB within 6 h of white-light illumination, while the degradation efficiency of RB was in the range of 50-100% for the same period [7]. New sets of nanocomposites (TPC and TTPC) were formed through the carbonization process, with a significant improvement in photocatalytic properties. Compared to non-carbonized samples, the complete decomposition of the investigated dye molecules occurred after 60 (for MB) – 90 (for RB) min with TPC *i.e.* after 15 (for MB) – 30 (for RB) min with TTPC nanocomposite samples [1]. In the investigated photocatalytic processes for the reference samples, neat colloidal TiO₂ NPs and TiO₂ NTs showed a noticeably lower photocatalytic ability to degrade molecules of MB and RB organic dyes. It can be observed that the presence of PANI and CPANI layer on TiO₂ nanocrystals (NPs and NTs) caused a successful hindrance of the e^-/h^+ recombination processes in TiO₂, as well as a photosensitizing effect for efficient use of sunlight irradiation.

In accordance with the obtained results, it can be noticed that both variables, the carbonization process, as well as the shape of TiO₂ nanocrystals have a huge and positive influence on the photocatalytic activity of the synthesized nanocomposites during the degradation/decomposition of organic pollutants.

5 Conclusion

With the aim to improve the photocatalytic properties of TiO₂, PANI/TiO₂ nanocomposites were synthesized and three different sets of samples were prepared: 1) non-carbonized TP nanocomposites and 2) carbonized TPC nanocomposites, which are synthesized in the presence of colloidal TiO₂ NPs and 3) carbonized TTPC nanocomposites synthesized in the presence of TiO₂ NTs. The carbonization process was carried out in an inert atmosphere by heating the samples from room temperature to 650 °C, kept at this temperature for 15 min, and cooled down to room temperature. The synthesized nanocomposites were further characterized by TEM measurements and Raman spectroscopy. TEM micrographs showed changes in the crystal structure and shape of TiO₂ nanocrystals, as well as the formation of a thin PANI or CPANI layer onto TiO₂. Raman spectroscopy confirmed the presence of emeraldine form of PANI in TP nanocomposites, the presence of *D* and *G* bands in carbonized TPC and TTPC nanocomposites. The temperature treatment caused changes in the crystalline phases of TiO₂, in addition to anatase, rutile crystal structure was obtained in the carbonized TPC and TTPC samples. The synthesized samples showed an improved ability to photodegrade the tested dyes, compared to untreated TiO₂ nanocrystals. The photocatalytic activity of nanocomposites is strongly influenced by the initial molar ratio of TiO₂:ANI, the carbonization process, the crystal and molecular structures of individual components, as well as the molecular structures of the used organic dyes.

6 Nomenclature

ANI – Aniline

AOPs – Advanced oxidation processes

APS – Ammonium peroxydisulfate

CPANI – Carbonized polyaniline

e⁻ – Electrons

h⁺ – Holes

MB – Methylene blue

NPs – Nanoparticles

NTs – Nanotubes

PANI – Polyaniline

RB – Rhodamine B

TEM – Transmission Electron Microscopy

TP – Non-carbonized nanocomposites based on PANI and colloidal TiO₂ NPs

TP-50, TP-100, TP-150 – TP nanocomposites with TiO₂:ANI molar ratio of 50, 100 and 150, respectively

TPC – Carbonized nanocomposites based on PANI and colloidal TiO₂ NPs

TPC-20, TPC-50 and TPC-80 – TPC nanocomposites with TiO₂:ANI molar ratio of 20, 50 and 80, respectively

TTPC – Carbonized nanocomposites based on PANI and TiO₂ NTs

TTPC-50, TTPC-100 and TTPC-150 – TTPC nanocomposites with TiO₂:ANI molar ratio of 50, 100 and 150, respectively

7 References

- [1] **Radoičić, M., G. Ćirić-Marjanović, V. Spasojević, P. Ahrenkiel, M. Mitrić, T. Novaković, Z. Šaponjić**, Superior photocatalytic properties of carbonized PANI/TiO₂ nanocomposites, *Applied Catalysis B: Environmental*, 213 (2017), pp. 155-166.

- [2] **Fujishima, A., X. T. Zhang, D. A. Tryk**, TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena, *Surface Science Reports*, 63 (2008), 12, pp. 515-582.
- [3] **Riaz, U., S. M. Ashraf, J. Kashyap**, Role of conducting polymers in enhancing TiO₂-based photocatalytic dye degradation: a short Review, *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 54 (2015), 17, pp. 1850-1870.
- [4] **Reddy K. R., M. Hassan, V. G. Gomes**, Hybrid nanostructures based on titanium dioxide for enhanced photocatalysis, *Applied Catalysis A: General*, 489 (2015), pp. 1-16.
- [5] **Islam, M.A., T. K. Purkait, M. H. Mobarok, I. M. D. Hoehlein, R. Sinelnikov, M. Iqbal, D. Azulay, I. Balberg, O. Millo, B. Rieger, J. G. C. Veinot**, Grafting poly(3-hexylthiophene) from silicon nanocrystal surfaces: synthesis and properties of a functional hybrid material with direct interfacial contact, *Angewandte Chemie International Edition*, 55 (2016), 26, pp. 7393-7397.
- [6] **Reddy, K. R., K. P. Lee, A. I. Gopalan**, Self-assembly directed synthesis of poly(ortho-toluidine)-metal(gold and palladium) composite nanospheres, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 7 (2007), 9, pp. 3117-3125.
- [7] **Radoičić, M., Z. Šaponjić, I. A. Janković, G. Ćirić-Marjanović, S. P. Ahrenkiel, M. I. Čomor**, Improvements to the photocatalytic efficiency of polyaniline modified TiO₂ nanoparticles, *Applied Catalysis B: Environmental*, 136-137 (2013), pp. 133-139.
- [8] **Ćirić-Marjanović G., I. Pašti, S. Mentus**, One-dimensional nitrogen-containing carbon nanostructures, *Progress in Materials Science*, 69 (2015), pp. 61-182.
- [9] **Ćirić-Marjanović G., I. Pašti, N. Gavrilov, A. Janošević, S. Mentus**, Carbonised polyaniline and polypyrrole: towards advanced nitrogen-containing carbon materials, *Chemical Papers*, 67 (2013), 8, pp. 781-813.
- [10] **Milikić J., G. Ćirić-Marjanović, S. Mentus, D. M. F. Santos, C. A. C. Sequeira, B. Šljukić**, Pd/c-PANI electrocatalysts for direct borohydride fuel cells, *Electrochimica Acta*, 213 (2016), pp. 298-305.
- [11] **Tang Z. R., F. Li, Y. H. Zhang, X. Z. Fu, Y. Xu**, Composites of titanate nanotube and carbon nanotube as photocatalyst with high mineralization ratio for gas-phase degradation of volatile aromatic pollutant, *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (2011), 16, pp. 7880-7886.
- [12] **Rajh T., D. Tiede, M. Thurnauer**, Surface modification of TiO₂ nanoparticles with bidentate ligands studied by EPR spectroscopy, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 207 (1996), 2, pp. 815-820.
- [13] **Thompson R.**, Oxidation of peroxotitanium(IV) by chlorine and cerium(IV) in acidic perchlorate solution, *Inorganic Chemistry*, 23 (1984), 13, pp. 1794-1798.
- [14] **Vranješ M., Z. V. Šaponjić, Lj. S. Živković, V. N. Despotović, D. V. Šojić, B. F. Abramović, M. I. Čomor**, Elongated titania nanostructures as efficient photocatalysts for degradation of selected herbicides, *Applied Catalysis B: Environmental*, 160-161 (2014), 1, pp. 589-596.

ODREĐIVANJE PODATAKA ZA RAVNOTEŽU TEČNOST-TEČNOST TROKOMPONENTNIH SISTEMA U CILJU TRETMANA INDUSTRIJSKIH OTPADNIH VODENIH TOKOVA

DETERMINATION OF LIQUID-LIQUID EQUILIBRIUM DATA OF TERNARY SYSTEMS FOR THE TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER STREAMS

Zoran SIMIĆ^{1*}, Mirjana KIJEVČANIN², Ivona RADOVIĆ²

¹ Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, Beograd

² Univerzitet u Beogradu, Tehnološko Metalurški Fakultet, Beograd

U ovom radu su prikazani podaci o ravnoteži tečnost-tečnost za trokomponentnu smešu voda + aceton + dimetil ftalat na $T = 298\text{ K}$ i atmosferskom pritisku. Zbog povećanja potrošnje energije na globalnom nivou, potrebno je ispitati nove mogućnosti zamene klasičnih energetski intenzivnih procesa separacije koji bi bili zasnovani na ravnoteži tečnost-tečnost. Ekstrakcija tečnost-tečnost je isplativa, efikasna i iznad svega, metoda separacije koja je prihvatljiva za prirodu u industrijskim procesima. Ovaj postupak bi takođe uključivao zamenu standardnih industrijskih rastvarača sa ekološki štetnim karakteristikama novim, zelenim rastvaračima. Dimetil ftalat je dobar kandidat kao zeleni rastvarač jer je relativno netoksičan, dobijen iz obnovljivih izvora i biorazgradiv. Termodinamički podaci o ravnoteži tečnost-tečnost kako što su binodalna kriva i ravnotežne linije za odgovarajući sistem su neophodni za projektovanje procesa separacije kao i za bolju percepciju ponašanja višekomponentnih sistema i poboljšanje termodinamičkog modelovanja i predviđanja fazne ravnoteže.

Ključne reči: *ravnoteža tečnost-tečnost; hromatografija; indeks refrakcije; gustina; zelena hemija*

This paper presents liquid-liquid equilibrium data for the ternary mixture of water + acetone + dimethyl phthalate at $T = 298\text{ K}$ and atmospheric pressure. Due to the increase in energy consumption on a global level, it is necessary to examine new possibilities of replacing the classic energy-intensive separation processes that would be based on liquid-liquid extraction. Liquid-liquid extraction is a cost-effective, efficient and, above all, environmentally friendly separation method in industrial processes. This procedure would also involve the replacement of standard industrial solvents with environmentally harmful characteristics with new, green solvents. Dimethyl phthalate is a good candidate as a green solvent because it is relatively non-toxic, renewable and biodegradable. Thermodynamic liquid-liquid equilibrium data such as the binodal curve and tie lines for the corresponding system are necessary for the design of the separation process as well as for a better perception of the behavior of multicomponent systems and the improvement of thermodynamic modeling and prediction of phase equilibrium.

Key words: *liquid-liquid equilibria; chromatography; refractive index; density; green chemistry*

* Corresponding author, e-mail: zsimic@tmf.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Hemijska industrija".

CIRKULARNA HEMIJA KAO ODGOVOR NA KRIZU IZAZVANU NEDOSTATKOM FOSFATA

CIRCULAR CHEMISTRY IN RESPONSE TO THE PHOSPHATE CRISIS

Alija SALKUNIĆ^{1*}, Ljiljana STANOJEVIĆ², Nikola BELOBABA¹,
Slavica BOGDANOVIĆ¹, Bajro SALKUNIĆ²

¹ Elixir Zorka – Mineralna đubriva, Šabac, Srbija

² Elixir Group, Šabac, Srbija

Sirovi fosfat se koristi kao sirovina za proizvodnju đubriva na bazi fosfora, a nedostatak njegove ponude mogao bi negativno uticati na globalno snabdevanje hranom. Kako je brzina kojom se eksploatišu ležišta fosfatne stene veća od brzine formiranja, sirovi fosfat se smatra neobnovljivim resursom. Evropska komisija je klasifikovala ovu sirovinu kao kritičnu sa aspekta procenjenih zaliha. Godinama unazad istražuju se novi resursi koji mogu biti zamena za fosfatnu stenu u proizvodnji đubriva i drugih supstanci koje sadrže fosfor. Kao alternativa javila se mogućnost primene pepela kanalizacionog mulja koji je bogat fosforom. Elixir Group kao jedan od regionalnih lidera u oblasti hemijske industrije, proizvodnji kompleksnih mineralnih đubriva, kao i ostalim segmentima agrobiznisa teži poslovanju po principima cirkularne ekonomije i hemije, te ostvaruje osnovnu misiju ovih principa – proizvodnja uz stvaranje nula otpada ima u planu izgradnju energane na otpad na lokaciji Elixir Prahovo koja će spaljivati i kanalizacioni mulj na teritoriji Republike Srbije. Zbog visokog sadržaja P₂O₅ kanalizacioni mulj je obećavajuća alternativna sirovina, a kako je planirano da se u Republici Srbiji do 2041. godine izgradi preko 300 postrojenja za prečišćavanje otpadnih komunalnih voda, projekcije su da će ga biti generisano oko 135.000 t/god.

Ključne reči: cirkularna ekonomija; ponovna upotreba; mineralna đubriva

Raw phosphate is used as a raw material for the production of phosphorus-based fertilizers, and a lack of its supply could negatively affect the global food supply. As the rate at which phosphate rock deposits are exploited is greater than the rate of formation, raw phosphate is considered a non-renewable resource. The European Commission has classified this raw material as critical from the aspect of estimated stocks. For years, new resources have been researched that can be a substitute for phosphate rock in the production of fertilizers and other substances containing phosphorus. As an alternative, the possibility of applying sewage sludge ash, which is rich in phosphorus, appeared. Elixir Group, as one of the regional leaders in the field of chemical industry, production of complex mineral fertilizers, as well as other segments of agribusiness, strives to do business according to the principles of circular economy and chemistry, and achieves the basic mission of these principles – production with the creation of zero waste and plans to build a waste-based energy plant at the Elixir Prahovo location, which will also burn sewage sludge on the territory of the Republic of Serbia. Due to the high content of P₂O₅, sewage sludge is a promising alternative raw material, and since it is planned to build more than 300 facilities for the treatment of waste municipal water in the Republic of Serbia by 2041, the projections are that it will be generated around 135,000 t/year.

Key words: circular economy; reuse; mineral fertilizers

* Corresponding author, e-mail: alija.salkuniclixirzorka.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Hemijska industrija".

OD OTPADNE LJUSKE JAJA I KORIŠĆENOG KUHINJSKOG ULJA DO TEČNIH I ČVRSTIH BIOGORIVA POŠTUJUĆI POSTULATE CIRKULARNE EKONOMIJE

FROM WASTE EGGSHELL AND USED COOKING OIL TO LIQUID AND SOLID BIOFUELS APPLYING THE POSTULATES OF CIRCULAR ECONOMY

Gorica R. IVANIŠ¹, Zoran V. SIMIĆ², Sofija P. MIŠKOV PANIĆ¹,
Mirjana Lj. KIJEVČANIN¹, Ivona R. RADOVIĆ^{1*}

¹ Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

² Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta,
Univerzitet u Beogradu, Beograd

Model linearne ekonomije se odavno pokazao problematičnim i neodrživim. Neophodan je prelaz na model cirkularne ekonomije gde se smanjuje količina nastalog otpada i otpad se tretira kao sirovina. U tom smislu, prepoznate su dve vrste otpada koje se lako mogu iskoristiti kao sirovine za proizvodnju biodizela, ljuske jaja i korišćeno kuhinjsko ulje. Ljuske jaja su čvrsti organski otpad koji se uglavnom odbacuje bez prethodnog tretmana i smatra se opasnim otpadom. One se uglavnom (oko 96 %) sastoje od CaCO₃, što nudi mogućnost njihove revalorizacije u vidu proizvodnje CaO. Korišćeno kuhinjsko ulje, takođe, predstavlja opasan organski otpad koji se često sipa u kanalizacione odvođe, što smanjuje efikasnost postrojenja za tretman otpadnih voda i loše utiče na vodeni ekosistem. Biodizel se dobija reakcijom transesterifikacije viših masnih kiselina iz biljnih ulja uz prisustvo katalizatora i pri tome nastaje glicerin kao sporedni proizvod. Kao katalizator može da se koristi CaO (heterogenokatalizovana reakcija) čime se izbegava dodatno stvaranje otpada prilikom prečišćavanja biodizela. Sirovi glicerin koji nastaje kao sporedni proizvod u reakciji, takođe, predstavlja opasan otpad i on može biti revalorizovan kroz proizvodnju peleta.

Ključne reči: valorizacija otpada; biodizel; peleti; sirovi glicerin; korišćeno kuhinjsko ulje; termodinamika

The linear economy model has long been proven to be problematic and unsustainable. A transition to a circular economy model, where the amount of generated waste is reduced and waste is treated as raw material, is necessary. In this sense, two types of waste have been recognized that can easily be used as raw materials for the production of biodiesel, eggshells and used cooking oil. Eggshells are solid organic waste that is generally discarded without prior treatment. They mainly (about 96%) consist of CaCO₃, which offers the possibility of their revalorization in the form of CaO production. Used cooking oil is also a hazardous organic waste that is often poured into sewers, which reduces the efficiency of wastewater treatment plants and adversely affects the aquatic ecosystem. Biodiesel is obtained by the transesterification reaction of higher fatty acids from vegetable oils with the presence of a catalyst, and glycerine is produced as a side product. Crude glycerine that is produced as a side product in the reaction is also a hazardous waste and can be revalued through the production of pellets.

Key words: waste valorisation; biodiesel; pellets; crude glycerine; used cooking oil; thermodynamics

* Corresponding author, e-mail: ivonag@tmf.bg.ac.rs

OTPORNOST ZIDA OD BALIRANE SLAME NA POŽAR

STRAW BALE WALL FIRE RESISTANCE

Biljana M. MILJKOVIĆ*

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,
Novi Sad, Srbija

Sprovedena su teorijska ispitivanja ponašanja zida od zbijenih, omalterisanih bala slame izloženih zračenju toplotnog fluksa. Cilj je bio da se ispita požarna sigurnost bala slame koje se koriste za izgradnju kuća u ruralnim područjima. Malterisani zid od bala slame je debljine 500 mm, sa obostranim slojem maltera debljine 20, 30 ili 40 mm. Prikazan je jednodimenzionalni matematički model koji opisuje prenos toplote kroz gips i slamu, kao i termičko uništavanje slame. Kinetički parametri za termičku destrukciju izvedeni su termo-gravimetrijskom analizom slame. Model je predvideo prolazne temperaturne profile unutar bala slame kao i toplotno uništavanje slame.

Ključne reči: bala slame; matematički model; otpornost na vatru

Theoretical investigations of the behavior of a wall made of compacted, plastered straw bales exposed to radiant heat flux were conducted. The aim was to investigate the fire safety of straw bales used to build houses in rural areas. The plastered wall of straw bale is 500 mm thick, with a 20, 30 or 40 mm thick plaster layer on both sides. A one-dimensional mathematical model is presented that described the heat transfer through plaster and straw, as well as the thermal destruction of the straw. The kinetic parameters for the thermal destruction were derived from thermo-gravimetric analysis of the straw. The model predicted transient temperature profiles within the straw bale as well as heat destruction of the straw.

Key words: straw bale; mathematical model; fire resistance

* Corresponding author, e-mail: bmilj@uns.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

MODELOVANJE SASTAVA SANITARNIH OTPADNIH VODA I RADA MBR POSTROJENJA SA DENITRIFIKACIJOM I NITRIFIKACIJOM

MODELLING OF SANITARY WASTEWATER COMPOSITION AND OPERATION OF MBR PLANT WITH DENITRIFICATION AND NITRIFICATION

David MITRINOVIĆ^{1*}, Marija PEROVIĆ¹, Srđan KOVAČEVIĆ²,
Miodrag POPOVIĆ¹, Zorana RADIBRATOVIĆ¹

¹ Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ a.d., Beograd, Republika Srbija

² Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Srbija

Odnos koncentracija ukupnog azota i BPK₅ u sanitarnoj otpadnoj vodi jednog objekta energetske infrastrukture u Srbiji je višestruko veći nego što je uobičajeno za ovaj tip otpadnih voda, zbog čega se u PPOV (MBR sa anoksičnim i aerobnim reaktorom) denitrifikacijom eliminiše samo polovina ukupnog azota iz otpadne vode. Prvi korak analize je predstavljalo matematičko modelovanje geneze otpadnih voda da bi se ustanovio uzrok neuobičajeno velikog udela organskog i neorganskog azota. Prema projektnom zadatku za PPOV bio je predviđen skoro deset puta veći broj radnika od sada prisutnih, i kuhinja i tuševi za osoblje kojih nema ili se ne koriste. Na osnovu podataka iz naučne literature o sastavu ljudskog urina i ekskrementa i podataka o sastavu vode koja se koristi za piće, određena je specifična potrošnja vode i faktor umanjenja produkcije ekskrementa tokom radnog vremena u odnosu na srednju dnevnu vrednost uz dobro poklapanje za utvrđenim kvalitetom otpadnih voda. Osim azota, u efluentu je prisutna praktično ista koncentracija ukupnog fosfora kao u influentu. Da bi se ispitalo funkcionisanje PPOV i isprobali efekti različitih mogućih modifikacija u procesu, napravljen je model u programu BioWin (Envirosim Associates Ltd.).

Ključne reči: BioWin; ekskrement; acetat

The ratio of concentrations of TN and BOD₅ in the sanitary wastewater of an energy infrastructure facility in Serbia is many times higher than usual, resulting in only half of the TN being eliminated in WWTP (MBR with anoxic and aerobic reactors) by denitrification. The first step of analysis was mathematical modelling of the composition and origins of wastewater. Based on the scientific literature data on the composition of human excrement and data on the composition of water used for sanitary purposes, the consumption of water per person and the share of defecations during work hours in the daily defecation occurrences were determined. To examine the functioning of the WWTP and test the effects of several possible modifications to the process, a model was created in BioWin wastewater treatment simulation software. A good match with the quality of the effluent determined by laboratory analyses was achieved. Several variants of dosing of the acetate in the anoxic reactor, ferric chloride dosing for phosphate elimination and 50% sodium hydroxide solution dosing for pH regulation in the MBR were tested. The results showed a tenfold decrease in the TN concentration and a fortyfold decrease in the TP concentration in the effluent.

Key words: BioWin; excrement; acetate

* Corresponding author, e-mail: david.mitrinovic@jcerni.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Hemijska industrija".

ZELENE TEHNOLOGIJE – REŠENJA ZA PRILAGODAVANJE KLIMATSKIM PROMENAMA

GREEN TECHNOLOGIES – SOLUTIONS FOR CLIMATE CHANGE ADAPTATION

Titomir OBRADOVIĆ*, Violeta ERIC
“Expert – Inženjering” d.o.o. Šabac

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.101>

Uticaji klimatskih promena su ovde. I oni su ovde na snazi. Samo u 2022. godini oboreno je nekoliko tragičnih rekorda, a trend sve češćih, ekstremnih vremenskih pojava postaje sve očigledniji sa svakom godinom koja prolazi. Adaptacija je neophodna.

Inovacije i zelene tehnologija nude rešenja. Međutim, ne radi se o oslanjanju na brze popravke i skaliranje nekoliko velikih prodornih rešenja. Umesto toga, radi se o razvoju i primeni hiljada rešenja na svim nivoima sofisticiranosti. Ali takođe bi bilo pogrešno verovati da inovacije i tehnologija mogu sve da reše. Ne mogu. Tehnologija nije zamena za širok spektar fundamentalnih i neophodnih promena u načinu na koji proizvodimo i konzumiramo. Tehnologija nam može pomoći da se uhvatimo u koštac sa nekim od najgorih uticaja klimatskih promena. A inovacije su ključ za otključavanje moći tehnologije da unapredi akciju prilagođavanja. Inovacija je ključna za razvijene zemlje i zemlje u razvoju. Od suštinskog je značaja za sektore koji zahtevaju kreativnost, genijalnost i „razmišljanje van okvira“ da se pozabave sve složenijim pitanjima izazvanim i pogoršanim klimatskim promenama. U najnovijem izveštaju IPCC-a (Međudržavni panel za klimatske promene) navodi se da rastuće temperature predstavljaju ozbiljnu i rastuću pretnju ljudskom životu, biodiverzitetu i infrastrukturi. Svaka godina koja prođe pokazuje nam da nijedna zemlja neće izbeći uticaje klimatskih promena.

Ključne reči: inovacije; zelene tehnologije; klimatske promene; adaptacija

The impacts of climate change are here and in force. In 2022 alone, several tragic records have been broken, and the trend towards more frequent, extreme weather events such as rainfall and flooding is becoming more apparent every year. Adaptation is necessary.

Green innovation and technology have solutions to offer. However, it's not a matter relying on quick fixes and scaling up of a few major breakthrough solutions. It's instead a matter of developing and deploying thousands of solutions at all levels of sophistication. But it would also be wrong to believe that innovation and technology can solve everything. They cannot. Technology is no substitute for a broad range of fundamental and necessary changes to the way we produce and consume. Technology can help us tackle some of the worst impacts of climate change. And innovation is the key to unlocking technology's power to advance adaptation action. Innovation is key critical to developed and developing countries alike. It is fundamental to sectors demanding creativity, ingenuity and 'thinking outside the box' to address the increasingly complex issues caused and exacerbated by climate change. As the most recent IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report states with high confidence, rising temperatures are a serious and mounting threat to human life, biodiversity and infrastructure. Each year that passes shows us that no country will escape the impacts of climate change.

Key words: innovation; green technologies; climate change; adaptation

* Corresponding author, e-mail: expertinzenjering@gmail.com

1 Uvod

Cilj autora rada je da prikažu inauguraciono izdanje publikacije iz 2022.godine „Knjiga zelene tehnologije“ [1]. Publikaciju je izradila WIPO (World Intellectual Property Organization) agencija UN za inovacije, kreativnost i intelektualnu svojinu (IP), posvećena podršci razvoju zelenih tehnologija i novih inovativnih rešenja u borbi protiv klimatskih promena. Globalni IP sistem igra ključnu ulogu u osiguravanju da takva rešenja ostvare uticaj. Pomaže u prevodenju osnovnih istraživanja u opipljiva rešenja za prilagođavanje na klimatske promene, podstiče javna i privatna ulaganja u istraživanje i razvoj u za životnu sredinu prihvatljive tehnologije i stvara ogromnu riznicu informacija koja je otvorena i dostupna svima.

Adaptacija će sve više postajati neophodnost za brzorastuće delove svetske populacije, kao i za prirodne ekosisteme u svakom regionu naše planete. Kako ne postoji jedinstven pristup prilagođavanju na klimatske promene, rešenja poprimaju različite oblike u skladu sa lokalnim kontekstom i potrebama. Međutim, ulaganja u klimatsku adaptaciju zaostaju za ulaganjima u mere ublažavanja klimatskih promena.

„Knjiga zelene tehnologije“, se fokusira na tri oblasti koje mogu imati koristi od novog tehnološkog napretka: poljoprivreda i šumarstvo, voda i priobalna područja i prilagođeni gradovi.

Knjiga predstavlja praktičan vodič za one koji su na prvoj liniji klimatskih promena – priobalne zajednice, poljoprivrednike, ugroženo urbano stanovništvo i druge, kao i inovatore, industriju, istraživače i agencije, koji podiže svest o rešenjima.

Od ključnog značaja je i uravnoteženi i neutralni pristup knjizi kao vodiču o globalnom stanju zelenih inovacija i tehnologija. Usmeravajući pažnju na trenutne i nove tehnološke trendove, knjiga zelene tehnologije može biti resurs i dodati zamah onim oblastima koje pokreću preko potrebne promene.

U knjizi ćete naći riznicu korisnih informacija i dragocenih uvida u to kako nam inovacije mogu pomoći da se pozabavimo klimatskim promenama i njihovim uticajima.

2 Uloga tehnologije u prilagođavanju klimatskim promenama

Adaptacija na klimatske promene ima za cilj povećanje otpornosti i prilagođavanje na klimatske uticaje i smanjenje ranjivosti. Ne radi se samo o tome da se zaštitimo od ekstremnih događaja. Uticaji klime utiču na to kako uzgajamo useve, uzgajamo stoku, koristimo vodu, živimo sa morem, planiramo naše gradove i još mnogo toga. Takođe, pošto su mnogi prirodni ekosistemi ugroženi, biće im potrebna naša aktivna podrška ako želimo da izbegnemo kolaps i široko rasprostranjeno izumiranje vrsta. Iako se svaka zemlja suočava sa uticajima klimatskih promena, mnoge zemlje u razvoju su posebno ranjive. Štaviše, kako mnoge zemlje u razvoju nikada nisu bile i nisu glavni emiteri CO₂, mere ublažavanja štetnih klimatskih uticaja mogu biti daleko manje relevantne u njihovom slučaju od mera prilagođavanja na klimatske promene.

Mnoge zemlje su pripremile strategije i sprovode specifične programe i planove adaptacije. Sve veći deo klimatskih fondova se dodeljuje za prilagođavanje na uticaje klimatskih promena, iako još uvek finansiranje ublažavanja negativnih uticaja klimatskih promena nadmašuje ulaganja u prilagođavanja na klimatske promene. Takođe treba napomenuti da mnoge tehnologije klasifikovane kao tehnologije prilagođavanja takođe imaju aspekte ublažavanja, premošćujući uspostavljenu dihotomiju između prilagođavanja i ublažavanja. Rešenja zasnovana na prirodi, gde se prirodni procesi koriste ili pojačavaju da bi se, na primer, zaštitili od poplavnih voda, sve više dobijaju na značaju.

3 Tematske oblasti knjige zelene tehnologije

U publikaciji je dat fokus na tri glavne oblasti u kojima će uticaji klimatskih promena biti veoma značajni, a to su poljoprivreda i šumarstvo, voda i priobalna područja i gradovi. Traženi su primeri inovacija koje mogu pružiti rešenja.

3.1 Klimatski pametna poljoprivreda i šumarstvo

Poljoprivreda i šumarstvo su pod velikim uticajem klimatskih promena. Uticaji se manifestuju u nepovoljnoj raspodeli padavina tokom godine, odnosno smanjenju atmosferskih padavina u vegetacionom delu godine kao i poplavama, višim temperaturama, zaslanjenosti zemljišta i stvaranju uslova koji pogoduju širenju štetočina.

Kao odgovor na ove rizike, dešava se značajan napredak u vezi sa optimizovanim i sofisticiranim praksama. One uključuju korišćenje podataka sa daljinskih i terenskih senzora, odnosno monitoringa da bi se pružilo detaljno razumevanje stanja i potreba biljaka i životinja. Informacije onda mogu da usmere razne uređaje za navodnjavanje i na primer za doziranje tačne doze pesticida i herbicida. Ovo smanjuje potencijalno štetnu upotrebu takvih proizvoda, štedi resurse i pomaže u optimizaciji proizvodnje u okruženju koje se menja. Trenutno, mnoge od zelenih tehnologija zahtevaju pristup kapitalu za velika ulaganje u opremu. Međutim, druge napredne tehnologije možda neće trebati tako velika ulaganja. Na primer, korišćenjem skoro sveprisutnih mobilnih uređaja, napredne tehnologije prikupljanja podataka i kontrole mogu se učiniti relevantnim u daleko manjim ulaganjima. Igradnjom dvonamenskih kanala i akumulacija i uštedom vode, farmeri mogu smanjiti svoju ranjivost na uticaje klimatskih promena. Modifikovanje biljaka i životinja kako bi se bolje nosile sa promenljivom klimom je još jedna aktivna oblast inovacija. Ali ova rešenja, u zavisnosti od primenjenih metoda, mogu da nose sa sobom kontroverze povezane sa genetskom modifikacijom.

3.2 Očuvanje voda i zaštita priobalnih područja

Voda je osnova života. Klimatske promene uzrokuju previše ili premalo. Priobalne zone su posebno osetljive na klimatske promene. Pošto su često gusto naseljene i važne ekonomske zone, uticaji mogu biti dalekosežni. Za priobalne zajednice, porast nivoa mora, nasilne oluje i poplave, kao i prodor slane vode, sve su češći rizik. Ali i kiseliji i topliji okeani, zahtevaju pojačane i inovativne pristupe očuvanju morskog ekosistema.

Mnoge važne inovacije mogu pomoći u uštedi vode, kao i praćenju kvaliteta i stanja rezervi vode. Daljinski senzori i senzori na terenu igraju važnu ulogu u usmeravanju drugih tehnologija, na primer za regulisanje korišćenja vode. Poboľšani sistemi za prikupljanje kišnice i rezervoari za skladištenje vode mogu da održe snabdevanje tokom sušnih perioda. U nekim zemljama, sve veća potražnja za velikim postrojenjima za desalinizaciju vode pokreće inovacije ka većoj efikasnosti i nižim troškovima. Tretman vode i napredna kontrola distributivnih mreža kombinuju nekoliko inovativnih tehnologija za postizanje impresivnih ušteda vode. Potreba za zaštitom od prevelike količine vode koja pristiže odjednom je podstakla značajne inovacije u barijerama od poplava, prirodnim akumulacijama atmosferskih voda i sistemima za rano upozoravanje. Napredno modeliranje kretanja vode i sedimenta pomaže da se odredi koja je najprikladnija mera zaštite, bilo da se radi o nasipima ili drugim čvrstim i mekim zaštitnim strukturama. Ovde takođe rešenja zasnovana na prirodi, mogu biti rešenja sa široko rasprostranjenim koristima za ljude i morske ekosisteme.

3.3 Klimatski prilagođeni gradovi i urbanističko planiranje

Ekstremni vremenski događaji poslednjih godina jasno su pokazali da su gradovi i njihovo stanovništvo veoma osetljivi na klimatske promene. Potrebno je novo razmišljanje - ne samo nove inovacije. Toplotni talasi, obilne padavine, poplave, oluje i porast nivoa mora već su naneli danak stanovništvu i uticali na gradske budžete.

Napredak u urbanističkom planiranju može pružiti neka rešenja. Na primer, uključivanje zelene infrastrukture kao što je odvodnjavanje atmosferskih voda može smanjiti ranjivost grada prema obilnim padavinama. Novi materijali i dizajn zelenih zgrada mogu pomoći u ublažavanju uticaja toplotnih talasa i smanjenju efekta toplotnog ostrva koja su redovna pojava u većini gradova. Postoji mnogo opcija za ozelenjavanje gradskog pejzaža. Ovo može pomoći u povećanju infiltracije površinske vode, smanjenju toplote, obezbeđivanju senke, pa čak i proizvodnji hrane.

4 Kako je napisana knjiga zelene tehnologije

Za potrebe publikacije, WIPO je razmotrio širok skup naučnih članaka, sivu literaturu, kao i tehnološke baze podataka koje su razvili privatni, javni i civilni subjekti i organizacije. Nizovi za pretragu su uključivali široke termine koji se odnose na prilagođavanje klimi upareni sa ključnim terminima za tri tematske oblasti, i ključnim terminima koji se odnose na specifične tehnologije („desalinizacija“, „morski zid“, „đubrivo“ i tako dalje). Razgraničavanju tehnoloških oblasti su u velikoj meri pomogle taksonomije prilagođavanja koje su razvili Centar i mreža za klimatsku tehnologiju Ujedinjenih nacija (CTCN) (CTCN, 2017), UNEP-ov centar za klimu u Kopenhagenu i Korean Green Technology Center (UNEP-DTU, 2021). Pretraženi su publikacije i radovi na nekoliko svetskih jezika kako bi se osiguralo široko geografsko rasprostranjenje.

5 Kako su sakupljene tehnologije

U prvom izdanju knjige zelene tehnologije, prikazano je više od 200 tehnologija, odnosno bogatstvo inovacija i tehnologija usmerenih na prilagođavanje klimatskim promenama, ali ne samo tehnologija koje su trenutno dostupne već i onih koje su u razvoju. Kontaktirani su vlasnici identifikovanih tehnologija i sve su smeštene u WIPO GREEN bazu podataka o potrebama i zelenim tehnologijama, bilo od strane vlasnika tehnologije (vlasnici tehnologije mogu slobodno da uploaduju svoju tehnologiju u WIPO GREEN bazu podataka i na taj način postanu deo projekta) ili od WIPO, što je čini izvorom inovacija, tehnologija i rešenja koja se neprestano širi.

Cilj je bio da se inspirišu i svi ostali potencijalni akteri da otkriju i razviju rešenja za sopstvene izazove. Verovatno, postoji mnogo više tehnologija koje nisu inferiorne u odnosu na one koje su uključene u publikaciju WIPO iz 2022.godine. Važno je naglasiti da su tehnologije u publikaciji predstavljene oslanjanjem na javno dostupan materijal i da nisu testirane niti na bilo koji način proverene od strane WIPO-a. Stoga uključivanje u Knjigu zelene tehnologije nije preporuka određene tehnologije. Predstavljene tehnologije treba posmatrati kao primere tehnološke oblasti, od kojih može postojati mnogo sličnih ponuda koje nisu ni na koji način inferiorne. Fotografije koje ilustruju tehnologije korišćene se uz dozvolu vlasnika tehnologije. Kada nije bilo moguće dobiti dozvolu, korišćene su relevantne fotografije. Fotografije tehnologija stoga možda ne predstavljaju stvarnu tehnologiju.

Prikladnost tehnologije je često veoma specifična za kontekst i odnosi se na faktore koji nisu geografska lokacija. Stoga nisu date nikakve preporuke o tome gde, kada ili kako su te tehnologije prikladne. Takvu procenu uvek treba napraviti uz uključivanje lokalnih stručnjaka i zainteresovanih strana. Prilikom odabira tehnologija za Zelenu tehnološku knjigu 2022, korišćeni su sledeći kriterijumi :

- značaj za prilagođavanje klimatskim promenama;
- relevantnost za tri tematske oblasti: 1) poljoprivreda i šumarstvo, 2) vodna i priobalna područja i 3) gradovi;

Pored toga, uzeti su u obzir sledeći faktori:

- očekivani uticaj implementacije;
- dostupnost dovoljno kvalitetnih informacija ili odobrenja trećih strana;
- dostupnost na tržištu (za proverene i granične tehnologije);
- trošak u odnosu na uticaj;
- geografska ravnoteža;
- poslovni balans (velika i mala preduzeća, start-up, istraživački timovi, nevladine organizacije i tako dalje);
- princip bez štete.

Kod predstavljanja tehnologija, uključeni je nekoliko klasifikatora kao lako uputstvo za relevantnost za čitaoca. Cilj je bio široka zastupljenost tehnologija u različitim fazama složenosti i spremnosti. Tehnologije su klasifikovane kao niski, srednji ili visoki nivo složenosti. Ovo služi samo kao indikacija i ne prati striktnu definiciju složenosti. Klasifikacija odražava nivo ljudskih, materijalnih i novčanih resursa potrebnih za implementaciju rešenja. Zrelost tehnologije za primenu je široko procenjena prema standardnoj definiciji nivoa tehnološke spremnosti (TRL).

6 Zaključak

Publikacija, ni na koji način nije povezana ni sa jednom od predstavljenih kompanija u knjizi. Niti ova publikacija implicira da druge kompanije ili tehnološka rešenja ne postoje. Sav sadržaj u ovoj publikaciji je dat u dobroj veri i zasnovan na informacijama koje su date direktno od provajdera i/ili korišćenjem javno dostupnih materijala. Fotografije tehnologija ne moraju nužno da prikazuju stvarnu tehnologiju. Stoga WIPO se odriče bilo kakve garancije, izričite ili implicirane, u pogledu tačnosti, adekvatnosti, validnosti, pouzdanosti, dostupnosti ili potpunosti bilo koje date informacije. WIPO nije odgovoran za bilo kakve negativne ishode kao rezultat radnji preduzetih na osnovu informacija u publikaciji.

7 Reference

- [1] *** World Intellectual Property Organization 34, chemin des Colombettes, P.O. Box 18 CH-1211 Geneva 20, Switzerland, *Green Technology Book*, Publisher, Town, Country, 2022.

KONTINUALNI SISTEM ZA OBEZBOJAVANJE OTPADNIH VODA. PRIMENA UMREŽENE PEROKSIDAZE IZ POLJOPRIVREDNOG OTPADA U UKLANJANJU BOJE

FLOW IN THE TUBE: CROSSLINKING OF PEROXIDASE FROM AGRICULTURAL WASTE FOR DYE REMOVAL IN MICROTUBULAR REACTOR

Milica SVETOZAREVIĆ^{1*}, Nataša ŠEKULJICA¹, Maja MARKOVIĆ¹,
Ana DAJIĆ¹, Marina MIHAJLOVIĆ¹, Dušan MIJIN²,

¹ Innovation Center, Faculty of Technology and Metallurgy in Belgrade, Belgrade

² University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade

Poljoprivredni otpad predstavlja lako dostupan prirodni izvor ugljenika, koji se može koristiti za dobijanje proizvoda sa dodatkom vrednošću. Poljoprivredni otpad se može koristiti kao sirovina za proizvodnju električne energije, biogorivo, biogas i proizvodnju biođubriva. Dalja primena poljoprivrednog otpada može biti kao supstrat za fermentaciju u čvrstom stanju (eng. solid state fermentation), za proizvodnju antibiotika, enzima i fitohemikalija. Izolovanje enzima iz otpadnog materijala kao sirovi ekstrakt doprinosi konceptu održivosti i značajno smanjuje cenu enzima. Enzim od interesa u ovom radu je peroksidaza izolovana iz sojinih ljuspica. Sirova peroksidaza iz sojinih ljuspica umrežena je oksidovanim pektinom na unutrašnje zidove PTFE cevnog mikroreaktor, i ispitivan je uticaj koncentracije umreživača na aktivnost enzima i efikasnost umrežavanja, kao i uticaj protoka reagensa na aktivnost enzima i efikasnost umrežavanja. Nakon toga, vršeno je ispitivanje uticaja prečnika cevnog mikroreaktora na efikasnost umrežavanja i aktivnost peroksidaze: 0,5 i 0,8 mm. Nakon imobilizacije ispitana je mogućnost uklanjanja antrahinonske boje umreženom peroksidazom u cevnom mikroreaktoru. U ovom radu je takođe je ispitivana mogućnost ponovne upotrebe imobilisanog enzima.

Ključne reči: mikroreaktor; peroksidaza iz otpadnog materijala; čistija proizvodnja; C.I. Acid Violet 109; imobilizacija

Agro-industrial waste has gained special attention as an abundantly available natural carbon source, which can be used for value-added products such as generating power, biofuel, biogas and biofertilizers production. Further application of agro-industrial waste may be as a substrate for solid state fermentation for production of antibiotics, enzymes, and phytochemicals. Isolation of enzymes from waste material as crude extracts contributes to the concept of sustainability and lowers their cost significantly. The enzyme of interest in this study was peroxidase isolated from soybean hull. Furthermore, the crude peroxidase from soybean hull was crosslinked by oxidized pectin onto the inner walls of PTFE microtubular reactor. The influence of the crosslinker concentration on the enzyme activity and crosslinking efficiency was evaluated, together with the effect of the reagents flow rate on the enzyme activity and crosslinking efficiency. Two different microtubular diameters were examined for the crude peroxidase crosslinking: 0.5 and 0.8 mm. After the immobilization, the possibility of anthraquinone dye removal by crosslinked peroxidase in the microtubular reactor was examined. The reusability of the immobilized enzyme was also evaluated in this study.

Key words: microreactor; peroxidase from waste material; cleaner production; C.I. Acid Violet 109; immobilization

1 Introduction

Waste material from the food industry or from any industry that processes agricultural materials is commonly used for feedstock or disposed on landfills. The improper disposal of waste materials rich in carbohydrates, proteins and bioactive compounds, such as burning or dumping on an un-

* Corresponding author, e-mail: msvetozarevic@tmf.bg.ac.rs

planned landfill, may lead to adverse impact on the environment. The untreated waste contributes to increasing greenhouse gas emissions, which means that it has direct influence on climate change [1], [2]. Furthermore, it leads to economic loss because valuable nutrients are not being used. The agro-industrial waste can be used for value-added products such as generating power, biofuel, biogas and biofertilizers production [3]–[6]. Further application of agro-industrial waste may be as a substrate for solid state fermentation for production of antibiotics, enzymes, and phytochemicals [7], [8]. Isolation of enzymes from waste material as crude extracts contributes to the concept of sustainability and lowers the costs significantly. Moreover, the application of continuous flow contributes to automatization of processes and increases process productivity. The use of microreactors has several advantages over batch reactors: high surface-to volume ratio; better mixing and mass transfer; laminar flow; process intensification and cleaner production which contributes to supporting the circular economy concept. Another characteristic of microtubular reactors is the possibility of numbering-up, where the scale-up is possible with increasing the number of same reactors, so the process efficiency remains constant on lab and industrial scale [9]. The immobilization of enzymes contributes to their reusability. In this study, peroxidase was isolated from soybean hull. The crude peroxidase from soybean hull was crosslinked by oxidized pectin onto the inner walls of PTFE microtubular reactor. The influence of the crosslinker concentration on the enzyme activity and crosslinking efficiency was evaluated, together with the effect of the reagents flow rate on the enzyme activity and crosslinking efficiency. Two different microtubular diameters (0.5 and 0.8 mm) were examined for the crude peroxidase crosslinking. After the immobilization, the removal of the dye C.I. Acid Violet 109 by crosslinked peroxidase in the microtubular reactor was examined. The reusability of the immobilized enzyme was also evaluated in this study.

2 Materials and Methods

2.1 Materials

Soybean seeds were obtained from the local groceries; C.I. Acid Violet 109 from DCC colorants (Ningbo); pyrogallol, monobasic potassium phosphate anhydrous, dibasic potassium phosphate trihydrate, sodium periodate from Sigma Aldrich, hydrogen peroxide 35% and sodium bicarbonate from Zorka Šabac; citric acid from Alkaloid; and trisodium citrate dihydrate from Alkaloid. Apple pectin was purchased from Sigma-Aldrich. All reagents were of analytical grade.

2.2 Isolation of peroxidase from soybean hull

The isolation of peroxidase from soybean hull was done as previously described [10]. Briefly, wet mass of 30g soybean hull was soaked in 120 mL distilled water, and homogenized. The mixture was left for extraction overnight at 4 °C. Next, filtration through gauze was performed. The filtrate was heated at 65 °C for 3 min, then cooled to room temperature. The mixture was centrifuged, and the supernatant was stored at 4 °C.

2.3 Periodate oxidation of pectin from apple

The oxidation of pectin was done by periodate oxidation described by Ivanovska et al. with slight alterations [11]. Pectin from apple, 2g was added in Erlenmeyer flask together with 20% ethanol (20 % v/v). After stirring the mixture, 0.5 M sodium periodate was added. The reaction was performed at 60 °C, 2h in dark conditions. The oxidized pectin was precipitated with cold 2-propanol, vacuum filtrated and then freeze-dried.

2.4 Immobilization of soybean hull peroxidase in microtubular reactor

The soybean hull peroxidase was immobilized by oxidized pectin as cross-linker in the microreactor which length was 1 m and diameter 0.5 mm. The flow rate of the peroxidase solution was 0.0008 mL/min, while the flow rate of the 0.5 % cross-linker was 0.001 mL/min. The residence time for the cross-linking reaction was 108.8 min. Next, 50 mM citric buffer solution pH 4 was pumped through the microreactor to clear away the peroxidase that is not immobilized.

2.5 Activity determination of cross-linked peroxidase in microtubular reactor

The determination of the immobilized soybean hull peroxidase activity was performed by pyrogallol as a standard substrate [12]. Briefly, pyrogallol was added to a 100 mM phosphate buffer pH 7, resulting in final concentration of 13 mM. The substrate solution inlet flow rate was 0.1 mL/min, the same as the hydrogen peroxide flow rate. The absorbance was measured at 420 nm. One unit of activity ($\mu\text{mol}/\text{min}$) is defined as the amount of peroxidase that will form 1 mg of purpurogallin from pyrogallol in 1 min under the assay conditions.

2.6 Influence of the cross-linker concentration on the enzyme activity and immobilization efficiency

The effect of the cross-linker concentration was assessed by varying the concentration of oxidized pectin in the range 0.05 - 1%. The flow rate of the cross-linker solution was 0.001 mL/min, while the peroxidase flow rate was 0.008 mL/min. The immobilization efficiency was measured as the difference in the mass of protein in the initial solution and the mass of protein in the outlet solution, divided by the protein mass in the initial solution.

2.7 Influence of the flow rate and the reactor's diameter on the enzyme activity and immobilization efficiency

The influence of the reactants flow rate was examined by changing the rate of the inlet flow as follows: F1 consisting of peroxidase flow rate of 0.0004 mL/min and cross-linker flow rate of 0.0005 mL/min; F2 consisting peroxidase flow rate of 0.001 mL/min and cross-linker flow rate of 0.0008 mL/min; and F3 consisting of peroxidase flow rate of 0.0008 mL/min and cross-linker flow rate of 0.001 mL/min. The same flow rates were examined in a microreactor with 0.5 mm and 0.8 mm diameter.

2.8 Operational stability of cross-linked peroxidase in microtubular reactor

The cross-linked soybean hull peroxidase in microtubular reactor was tested for the decolorization of the anthraquinone dye C.I. Acid Violet 109 under optimal conditions that were determined in previous research studies. After one cycle of decolorization, 50 mM citric buffer solution pH 4 was pumped through the microreactor to clear away residues. The cycles were rerun until a significant change in the decolorization was noticed. The absorbance for the AV109 decolorization was measured at 590 nm.

3 Results and discussion

In this study, cross-linking of crude peroxidase in a microtubular reactor was performed and the decolorization of anthraquinone dye AV109 was validated. Peroxidase was isolated from agricultural waste such as soybean hull. In this way waste valorization was achieved. The cross-linking of peroxidase was carried out by oxidized pectin. The activity of the immobilized peroxidase was measured using pyrogallol as a standard substrate and was 21.31 $\mu\text{mol}/\text{min}$.

3.1 The influence of the cross-linker concentration on the enzyme activity and immobilization efficiency

The influence of the cross-linker concentration on the enzyme activity and immobilization efficiency is given in Fig. 1. As it can be seen from the figure, the increase of the cross-linker concentration has a positive effect on the immobilization efficiency, where it increases from 14.9 % for 0.05 % (w/v) cross-linker, to 26.6 % efficiency for 1 % (w/v) solution of cross-linker. As for the activity of the enzyme, it drops with the increase of cross-linker concentration. Lioret et al. came across similar finding when they studied the immobilization of laccase in a continuous flow microreactor [13].

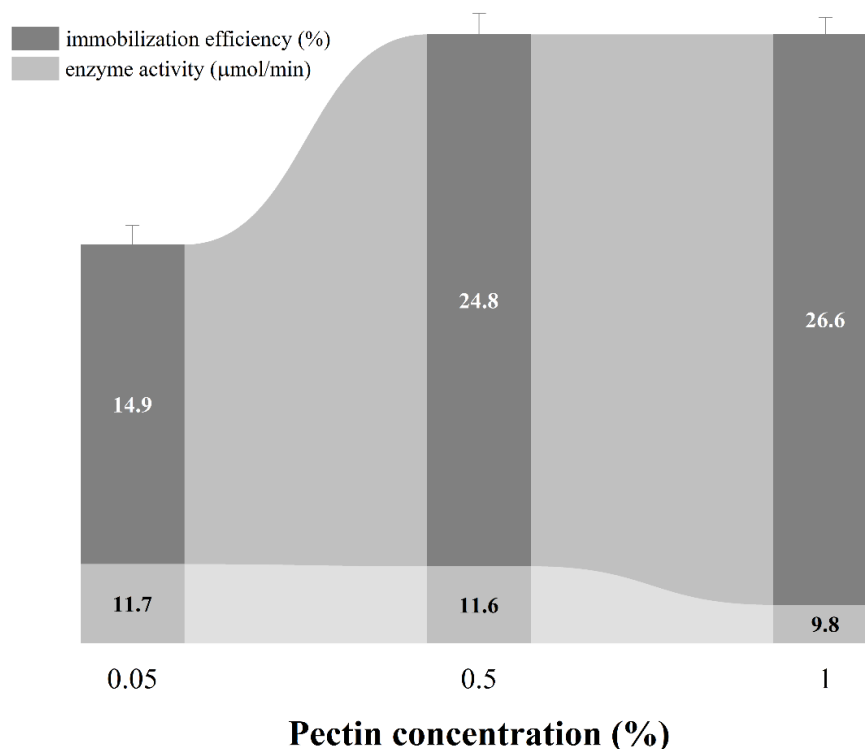


Fig 1. The influence of the cross-linker concentration on the enzyme activity and immobilization efficiency. Conditions: cross-linker flow rate 0.001 mL/min; enzyme flow rate 0.0008 mL/min; enzyme activity 60 U/mL; temperature 25 °C; length of the reactor 1m; diameter 0.5 mm

3.2 The influence of the flow rate and the reactor's diameter on the enzyme activity and immobilization efficiency

The influence of the flow rate on the enzyme activity and immobilization efficiency in a microreactor with 0.5 mm diameter is given in Fig 2. The highest enzyme activity was measured at the flow rate F3: peroxidase flow rate of 0.0008 mL/min and cross-linker flow rate of 0.001 mL/min. It can be concluded that the immobilization efficiency is the highest when the cross-linker flow rate is higher than the flow rate of the enzyme. This indicates the importance of the ratio between the cross-linker and the soybean hull peroxidase.

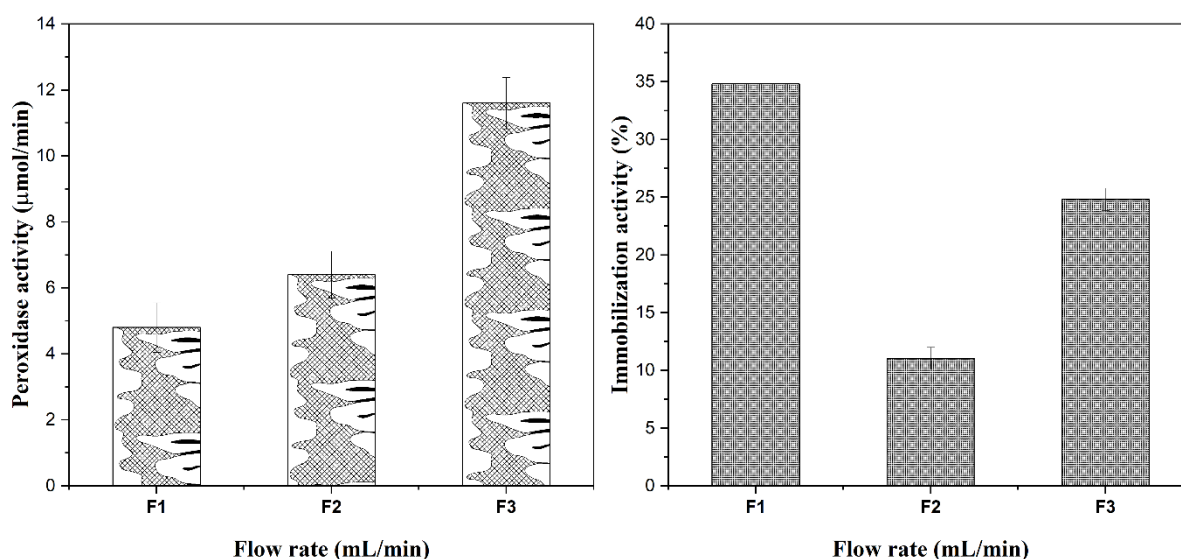


Fig 2. The influence of the flow rate on: a) the enzyme activity and b) immobilization efficiency. Conditions: enzyme activity 60 U/mL; cross-linker concentration 0.05 % (w/v), temperature 25 °C, length of the reactor 1m; diameter 0.5 mm

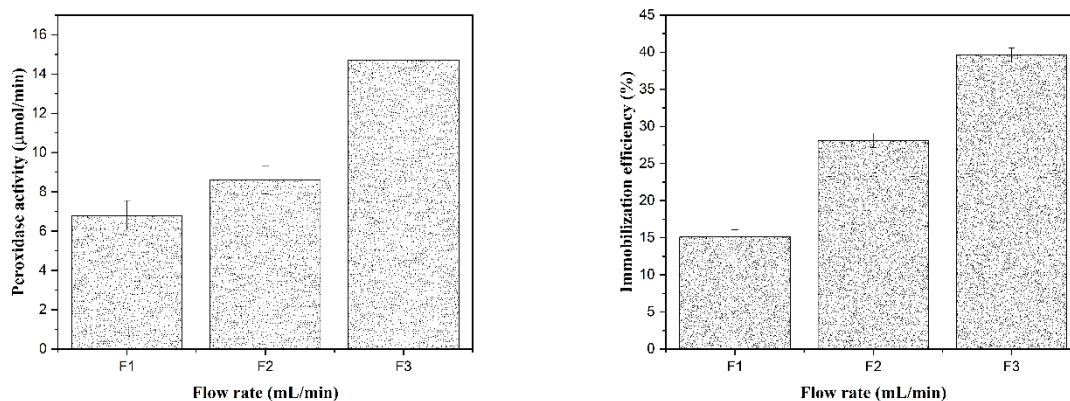


Fig 3. The influence of the flow rate on: a) the enzyme activity and b) immobilization efficiency. Conditions cross-linker concentration 0.05 % (w/v), temperature 25 °C, length of the reactor 0.390 m; diameter 0.5 mm

The influence of the flow rate on the enzyme activity and immobilization efficiency in a microreactor with 0.8 mm diameter is given in Fig 3. As it can be seen from Fig. 3, the enzyme showed to be most active when the immobilization was performed at F3: peroxidase flow rate of 0.0008 mL/min and cross-linker flow rate of 0.001 mL/min. The reactor's diameter had no significant influence on the enzyme activity. The immobilization efficiency was the highest when the immobilization was carried out at F3, and the lowest at F1: peroxidase flow rate of 0.0004 mL/min and cross-linker flow rate of 0.0005 mL/min. It can be concluded that with decrease of the flow rate, the immobilization efficiency also decreases.

3.3 Operational stability of cross-linked peroxidase in microtubular reactor

The operational stability of cross-linked soybean hull peroxidase in a microtubular reactor used for decolorization of AV109 is given in Fig. 4. The decolorization reaction was performed at pH 4, dye concentration 10 mg/L, hydrogen peroxide 0.2 mM and enzyme activity 11,7 µmol/min. The cross-linked peroxidase retained 80% of its activity after 6 consecutive cycles. After 10 cycles, the activity dropped to 65% of the initial value. Kalsoom et al. worked on immobilization of soybean peroxidase in polyacrylamide gel. The peroxidase retained 60% of its activity after 6 cycles of diazo dye degradation [14].

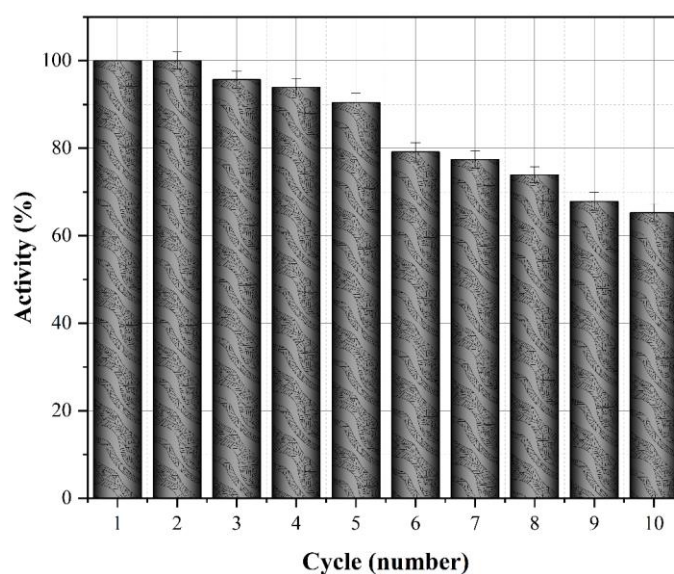


Fig 4. Operational stability of immobilized soybean hull peroxidase in microtubular reactor. Conditions: pH 4; enzyme activity 11,7 µmol/min; temperature 25 °C, hydrogen peroxide concentration 0.2 mM; dye concentration 10 mg/L

4 Conclusion

In this study, immobilization of peroxidase from waste material in continuous flow micro-tubular reactor was performed. The enzyme was cross-linked with oxidized pectin. The influence of the cross-linker concentration was examined, together with the reactor's diameter and the flow rate of the reactants. After optimization of the immobilization conditions, the operational stability of the immobilized peroxidase in the microreactor in the decolorization reaction of AV109 was validated. After 10 consecutive cycles, the soybean peroxidase retained 65 % of its activity.

5 References

- [1] **Yaashikaa P. R., P. Senthil Kumar, and Varjani S.**, “Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review,” *Bioresour Technol*, vol. 343, p. 126126, (2022), doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126>.
- [2] **Sadh P. K., Duhan S., and Duhan J. S.**, “Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review,” *Bioresour Bioprocess*, vol. 5, no. 1, p. 1, (2018), doi: 10.1186/s40643-017-0187-z.
- [3] **Freitas L. C., Barbosa J. R., da Costa A. L. C., Bezerra F. W. F., Pinto R. H. H., and . de Carvalho Jn R. N.**, “From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products?,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 169, p. 105466, (2021), doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>.
- [4] **Keerthana Devi M. et al.**, “Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of Techno-Economic analysis,” *Bioresour Technol*, vol. 363, p. 127871, (2022), doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127871>.
- [5] **Srivastava N., Verma B., and Mishra P. K.**, Eds., *Agroindustrial Waste for Green Fuel Application*. Singapore: Springer Nature Singapore, (2023). doi: 10.1007/978-981-19-6230-1.
- [6] **Ma Y., Shen Y., and Liu Y.**, “Food Waste to Biofertilizer: A Potential Game Changer of Global Circular Agricultural Economy,” *J Agric Food Chem*, vol. 68, no. 18, pp. 5021–5023, (2020), doi: 10.1021/acs.jafc.0c02210.
- [7] **Matei J. C., dos S. Oliveira J. A., Pamphile J. A., and Polonio J. C.**, “Agro-industrial wastes for biotechnological production as potential substrates to obtain fungal enzymes,” *Ciência e Natura*, vol. 43, no. 0, p. e72, (2021), doi: 10.5902/2179460X63133.
- [8] **Mussatto S. I., Ballesteros L. F., Martins S., and Teixeira J. A.**, “Use of Agro-Industrial Wastes in Solid-State Fermentation Processes,” in *Industrial Waste*, K.-Y. Show and X. Guo, Eds., Rijeka: IntechOpen, (2012). doi: 10.5772/36310.
- [9] **Šalić A. and Želić B.**, “Synergy of Microtechnology and Biotechnology: Microreactors as an Effective Tool for Biotransformation Processes,” *Food Technol Biotechnol*, vol. 56, no. 4, (2018), doi: 10.17113/ftb.56.04.18.5673.
- [10] **Svetozarević M., Šekuljica N., Knežević-Jugović Z., and Mijin D.**, “Agricultural waste as a source of peroxidase for wastewater treatment: Insight in kinetics and process parameters optimization for anthraquinone dye removal,” *Environ Technol Innov*, vol. 21, p. 101289, (2021), doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101289>.
- [11] **Ivanovska A., Branković I., Ladarević J., Pavun L., and Kostić M.**, “Oxidized jute as a valuable adsorbent for Congo Red from an aqueous solution,” *J Eng Fiber Fabr*, vol. 17, p. 15589250221101380, (2022), doi: 10.1177/15589250221101380.
- [12] **Svetozarević M. et al.**, “Biodegradation of synthetic dyes by free and cross-linked peroxidase in microfluidic reactor,” *Environ Technol Innov*, vol. 26, p. 102373, (2022), doi: 10.1016/j.eti.2022.102373.
- [13] **Lloret L., Eibes G., Moreira M. T., Feijoo G., Lema J. M., and Miyazaki M.**, “Improving the catalytic performance of laccase using a novel continuous-flow microreactor,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 223, pp. 497–506, (2013), doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.03.018>.
- [14] **Kalloom U., Ashraf S. S., Meetani M. A., Rauf M. A., and Bhatti H. N.**, “Mechanistic study of a diazo dye degradation by Soybean Peroxidase,” *Chem Cent J*, vol. 7, no. 1, p. 93, (2013), doi: 10.1186/1752-153X-7-93.

UTICAJ ENERGETSKE SANACIJE STAMBENIH ZGRADA NA POTROŠNJU TOPLOTNE ENERGIJE U SISTEMIMA DALJINSKOG GREJANJA

THE IMPACT OF ENERGY MEASURES ON RESIDENTIAL BUILDINGS – REDUCING HEAT ENERGY CONSUMPTION IN DISTRICT HEATING SYSTEMS

Dorđe KARIĆ*

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd
Akademija tehničkih strukovnih studija, Beograd

Toplotni gubici građevinskih objekata zavise od termofizičkih karakteristika građevinskih elemenata i konstrukcija od kojih su objekti izgrađeni. Potrošnja energije u zgradama, u razvijenim zemljama, učestvuje u ukupnoj potrošnji energije sa 20 do 40 %. Posmatrajući procentualni udeo, potrošnja energije u zgradama je veća od potrošnje u industriji i transportu, u zemljama Evropske unije i SAD. Zbog ovog razloga uvedene su direktive, kao što je direktiva Evropske unije o energetskej efikasnosti u zgradama, sa ciljem da se postignu minimalni energetske standardi, kako za pojedinačne komponente građevinskog objekta, tako i za celu zgradu. Razvoj kvaliteta gradnje i izbora pravih komponenti je od suštinskog značaja u primeni mera energetske efikasnosti. Osim u novim zgradama, primena mera energetske efikasnosti je značajna i u objektima sa zidanim predošenja današnjih standarda i direktiva. Istraživanje se bazira na zgradama, starosti 35, 40 i više godina, toplotno izolovanim, sa ugrađenim termostatskim ventilima, koje su obuhvaćene projektom Energetske sanacije zgrada u Šapcu koji JKP „Toplana-Šabac“ realizuje sa Evropskom bankom za obnovu i razvoj (EBRD).

Ključne reči: *termotehnika; toplotna energija; energetska sanacija; mere energetske efikasnosti; informacione tehnologije*

The heat losses of residential buildings depend on the thermophysical characteristics of building elements and constructions from which the buildings are built. Energy consumption in buildings, In developed countries, buildings account for 20 to 40 percent of total energy consumption. Looking at the percentage share, energy consumption in buildings is higher than consumption in industry and transport, in the countries of the European Union and the USA. For this reason, directives have been introduced, such as the European Union directive on energy efficiency in buildings, with the aim of achieving minimum energy standards, both for individual components of the construction object and for the entire building. The development of construction quality and the selection of the right components is essential in the application of energy efficiency measures. Apart from new buildings, the application of energy efficiency measures is also important in buildings built before the adoption of today's standards and directives. The research is based on buildings, 35, 40 and more years old, thermally insulated, with built-in thermostatic valves, which are included in the Energy Efficiency of buildings project, in Šabac, Serbia which JKP "Toplana-Šabac" is implementing with the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD).

Key words: *thermotechnics; thermal energy; energy efficiency measures; information technologies*

* Corresponding author, e-mail: djordje.karic@yahoo.com

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

STABILIZACIJA MATRICE LETEĆEG PEPELA PRIMENOM KALCIJUM-OKSIDA, HIDROKSIDA I KARBONATA

STABILIZATION OF FLY ASH MATRIX USING CALCIUM-OXIDE, HYDROXIDE AND CARBONATE

Mirjana ČUJIC¹, Marina VITOROVIĆ², Milica STOJKOVIĆ^{2*},
Maja ĐOLIĆ², Aleksandra PERIĆ-GRUJIĆ²

¹ Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu

² Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Sagorevanjem uglja u termoelektranama nastaju velike količine letećeg pepela koji u svom sastavu sadrži teške metale i metaloide čije izluživanje može narušiti stanje životne sredine u velikoj meri.

Cilj ovog rada jeste optimizacija procesa stabilizacije matrice letećeg pepela upotrebom oksida, hidroksida i karbonata kalcijuma, kao i ispitivanje stepena desorpcije (izluživanje) elemenata u desorpcionim rastvorima. Stabilizacijom letećeg pepela omogućila bi se njegova dalja upotrebe u građevinskoj industriji ili u svrhu adsorbenta.

Kako bi se dobili optimalni uslovi korišćeno je nekoliko različitih stabilizatora (CaO, Ca(OH)₂ i CaCO₃) u različitim koncentracijama (5% i 7%). Variraran je i sastav desorpcionog rastvora (dejonizovana voda i 4% i 8% sirćetna kiselina) kao i odnos letećeg pepela i desorpcionog rastvora (1:10 i 1:30). Koncentracija jona teških metala i metaloide (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb) određivana je metodom masene spektrometrije sa indukovano spregnutom plazmom (ICP-MS).

Za obradu podataka rađena je multivarijaciona statistička analiza (korelaciona analiza, analiza glavnih elemenata i klastera analiza). Korišćen je statistički softver MINITAB.

Ključne reči: *leteći pepeo; stabilizacija; izluživanje; teški metali; metaloidi*

Combustion of coal in thermal power plants produces large amounts of fly ash, which contains heavy metals and metalloids, and their leaching can greatly damage the environment.

The aim of this paper is to optimize the process of stabilization of the fly ash matrix using calcium oxide, hydroxide and carbonate, as well as to examine the degree of desorption (leaching) of elements in desorption solutions. Stabilization of fly ash would enable its further use in the construction industry or as an adsorbent.

In order to obtain optimal conditions, several different stabilizers (CaO, Ca(OH)₂ and CaCO₃) were used in different concentrations (5% and 7%). The composition of the desorption solution (deionized water and 4% and 8% acetic acid) is also variable, as is the ratio of fly ash to the desorption solution (1:10 and 1:30). The concentration of heavy metal ions and metalloids (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb) was determined by the method of Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

Multivariate statistical analysis (correlation analysis, principal component analysis (PCA) and cluster analysis (CA)) was performed for data processing. MINITAB statistical software was used.

Key words: *fly ash; stabilization; leaching; heavy metals; metalloids*

* Corresponding author, e-mail: mstojkovic@tmf.bg.ac.rs

PREVRELI OSTATAK IZ BIOGASNIH POSTROJENJA – VISOKOKVALITETNO ĐUBRIVO

OVERBOILED RESIDUE FROM BIOGAS PLANTS – HIGH-QUALITY FERTILIZER

Stojan SIMIĆ*, **Davor MILIĆ**, **Goran ORAŠANIN**, **Srđan VASKOVIĆ**,
Jovana BLAGOJEVIĆ, **Krsto BATINIĆ**

Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Istočno Sarajevo, BIH

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.117>

U biogasnim postrojenjima procesom anaerobne digestije se dobija biogas i prevreli ostatak – digestat. Biogas se koristi za proizvodnju toplotne i električne energije, a digestat je našao primenu u poljoprivredi. Digestat predstavlja visokokvalitetno organsko đubrivo koje se koristi za obogaćivanje poljoprivrednog zemljišta. U radu su prezentovane osnovne karakteristike i prednosti digestata dobijenog u biogasnim postrojenjima u odnosu na stajnjak i veštačka đubriva.

Ključne reči: *prevreli ostatak; biogas; đubrivo; poljoprivreda*

In biogas plants, the process of anaerobic digestion produces biogas and boiled residue – digestate. Biogas is used for the production of heat and electricity, and the digestate was used in agriculture. Digestate is a high – quality organic fertilizer that is used to enrich agricultural land. The paper presents the basic characteristics and advantages of digestate obtained in biogas plants compared to manure and artificial fertilizers.

Key words: *boiled residue; biogas; fertilizer; agriculture*

1 Uvod

Anaerobna digestija je biohemijski proces pri kojem se biorazgradivi organski supstrati razgrađuju mikrobiološkim procesima bez prisustva kiseonika. Kod biogasnih postrojenja, rezultat procesa anaerobne digestije je nastajanje biogasa i prevrelog ostataka – digestata. Biogas predstavlja primarni, a digestat sekundarni proizvod ovog procesa. Biogas se koristi za proizvodnju toplotne i električne energije, dok se digestat koristi za obogaćivanje poljoprivrednog zemljišta. Digestat predstavlja kvalitetno đubrivo za poljoprivredne površine zbog velikog sadržaja korisnih sastojaka neophodnih za uzgoj biljaka. Pre korišćenja u poljoprivredi neophodno je izvršiti pripremu digestata.

U radu su prezentovane osnovne karakteristike digestata dobijenog u biogasnim postrojenjima. Razmatrane su njegove prednosti prilikom primene u poljoprivrednoj proizvodnji u odnosu na stajnjak i veštačka đubriva.

2 Digestat kao nusprodukt procesa u biogasnom postrojenju

Konfiguracija postrojenja za proizvodnju biogasa najviše zavisi od vrste i karakteristika korišćenih supstrata. Tipovi biogasnih postrojenja određeni su vrstom supstrata koji se koristi kao sirovina u procesu proizvodnje. Ukoliko se koriste supstrati iz poljoprivrede (stajnjak i/ili energetske biljke), biogasna postrojenja klasifikuju se kao poljoprivredna. Biogasna postrojenja koja koriste organski otpad iz prehrambene industrije, klasifikuju se kao industrijska. Ako postrojenja za proizvodnju biogasa kao supstrat koriste klanični otpad, komunalni čvrsti organski otpad i mulj dobijen prečišćavanjem industrijskih i komunalnih otpadnih voda klasifikuju se kao biogasna postrojenja za zbrinjavanje organskog otpada.

* Corresponding author, e-mail: stojans@modricaoil.com

Supstrati koji se koriste u biogasnim postrojenjima mogu se podeliti na tečne i čvrste supstrate. Tečni supstrati se nakon privremenog skladištenja u rezervorima ili predjamama, podvrgavaju procesu pasterizacije i nakon toga transportuju u anaerobni digestor. Čvrsti supstrati se skladište u trenč silosima (silaža) ili podzemnim betonskim rezervoarima (biloški otpad iz prehrambene industrije) i oni se nakon prethodne manipulacije i pripreme transportuju na anaerobni tretman u digestor.

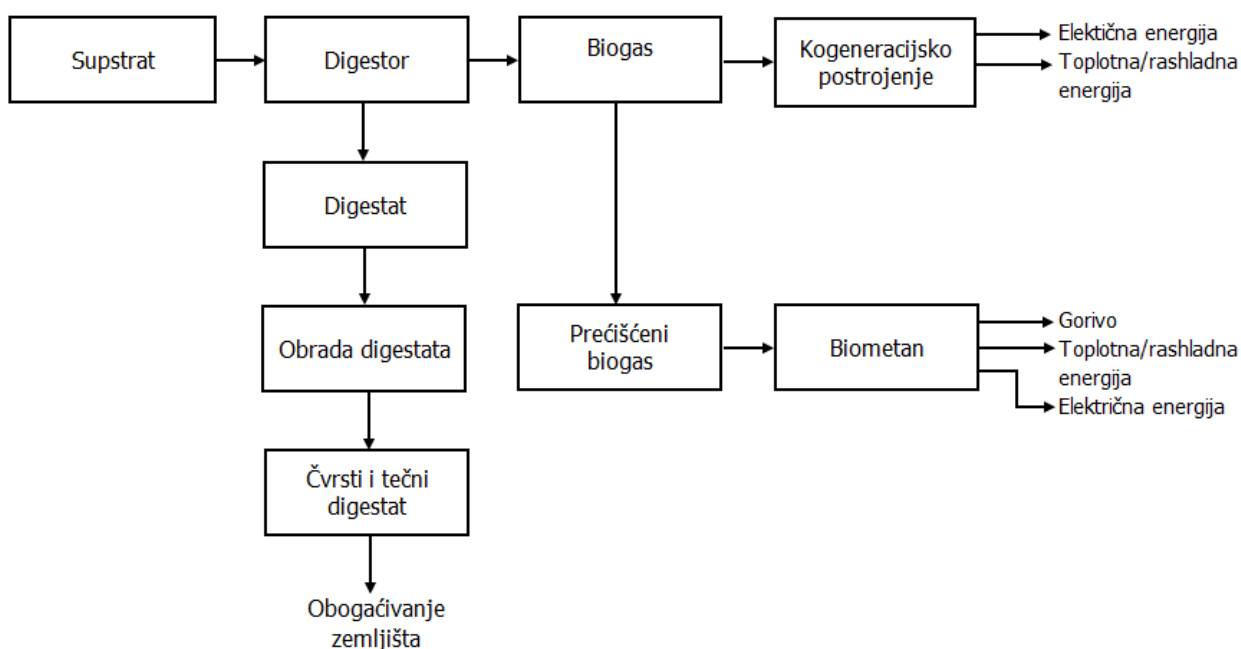
U biogasnim postrojenjima mogu se koristiti različite vrste organskih supstrata, a to su najčešće:

- tečni i čvrsti stajnjak,
- razgradivi organski otpad iz prehrambene i agro industrije (životinjskog ili biljnog porekla),
- organske frakcije iz komunalnog otpada i ugostiteljstva,
- otpad iz poljoprivredne proizvodnje (slama, kukuruzovina i dr.), i
- namenski uzgajane energetske biljke (silaža kukuruza, sirak, slonova trava i dr.).

Biogasna postrojenja mogu biti izvedena kao mali pogoni za proizvodnju energije za sopstvene potrebe ili veliki energetske sistemi gde se proizvedeni biogas koristi za proizvodnju toplotne i električne energije koja se predaje u javnu elektrodistributivnu mrežu. Proizvodni proces biogasnih postrojenja najčešće se odvija u sledećim fazama:

- priprema sirovine za obradu,
- anaerobna digestija,
- skladištenje i upotreba prevrele tečnosti (digestata), i
- skladištenje, prečišćavanje i korišćenje biogasa.

Na slici 1 prikazan je proces anaerobne digestije u biogasnom postrojenju gde je primarni proizvod biogas, a sekundarni digestat.



Slika 1. Osnovni proizvodi procesa anaerobne digestije u biogasnom postrojenju

Anaerobni digestori koji mogu biti sa pokretnom ili nepokretnom kupolom predstavljaju glavni deo biogasnog postrojenja i oni se obično izrađuju od betona, visokokvalitetnog čelika ili različitih vrsta plastičnih materijala otpornih na dejstvo hemijskih jedinjenja, koroziju i udare. Razvijene su mnogobrojne varijante digestora: mali, veliki, podzemni, nadzemni, delimično ukopani, okrugli, pravougli, uspravni i horizontalni.

U anaerobnom digestoru se odvijaju svi neophodni biološki i hemijski procesi koji za rezultat u poslednjoj fazi digestije imaju metanogenezu odnosno izdvajanje biogasa. Većina savremenih biogasnih postrojenja radi u termofilnoj temperaturskoj oblasti zbog niza prednosti, u odnosu na procese koji se odvijaju u mezofilnim i psihofilnim oblastima, kao što su [1]:

- efikasno uništenje patogena;
- viša stopa rasta metanskih bakterija pri višim temperaturama;
- kraće vreme digestije, što proces čini bržim i efikasnijim;
- poboljšana razgradnja i iskorišćenje hranljivih komponentata iz supstrata;
- jednostavnije razdvajanje tečne i čvrste frakcije supstrata.

Pored temperaturne oblasti na efikasnost procesa anaerobne digestije u biogasnim postrojenjima utiču sledeći tehnološki uslovi: krupnoća i vrsta materijala, pritisak u digestoru, pH vrednost, kvalitet metanskih bakterija, bezkiseonična atmosfera digestora, vreme zadržavanja supstrata u digestoru, mešanje supstrata u digestoru, odnos organske suve materije i vode u supstratu, prisustvo toksičnih komponentata i dr.

Razvoj tehnike i tehnologije proizvodnje biogasa ide u pravcu skraćivanja vremena zadržavanja supstrata u digestoru. U tom pravcu razvijena su dva postupka:

- postupak sa korišćenjem produktivnijih hibridnih metanskih bakterija (čime se skraćuje vreme zadržavanja za 10%, a povećava stepen razgradnje supstrata za 50 do 70%), i
- postupak sa razdvojenim fazama digestije u kome se dobija biogas sa visokim udelom metana (od 80 do 85%), vremenom zadržavanja supstrata od 4 do 6 dana i povećanjem stepena razgradnje organske materije na 80 do 90%.

Tehnološki proces dobijanja biogasa, bez obzira na tip digestora, obuhvata tri osnovne faze: pripremu sirovine, samu anaerobnu digestiju, prihvatanje i obradu proizvedenog gasa i anaerobno prevrele tečnosti. S obzirom da je biogas osnovni proizvod anaerobne digestije kompletan tehnički i tehnološki proces u biogasnom postrojenju je usmeren na efikasnost dobijanja i kvalitet biogasa. Pored biogasa, proizvod anaerobnog procesa u digestoru je digestorski mulj (digestat, anaerobno prevreli ostatak) iskoristiv kao kvalitetno đubrivo nakon aerisanja, ceđenja i sušenja. Kvalitet đubriva u obliku humusa koje se dobije procesom anaerobne digestije u biogasnim postrojenjima je neporedivo veći u odnosu na veštačka đubriva. Zbog toga se vođenju procesa u biogasnom postrojenju sa aspekta dobijanja digestata, njegove pripreme i kvaliteta u odnosu na druga đubriva (prirodna i veštačka) mora posvetiti znatno veća pažnja.

3 Karakteristike i sastav digestata

Digestat je nusproizvod procesa anaerobne digestije u biogasnim postrojenjima koji sadrži makro hranjive materije (azot, fosfor, i kalijum) i mikro hranjive materije (magnezijum, sumpor, kalcijum, bor, bakar, kobalt, mangan i cink). Uporedno istraživanje digestata u tečnoj fazi i stajnjaku pokazalo je da je tečna faza digestata u poređenju sa stajnjakom:

- bogatija amonijačnim jonima,
- smanjen je sadržaj organske materije i biološkog kiseonika,
- povišen pH, i
- smanjen odnos C:N.

U tabeli 1. prikazan je tipični sastav digestata dobijenog procesom anaerobne digestije u biogasnom postrojenju.

Tabela 1. Tipični sastav digestata [1]

Sastav digestata	Tečni digestat	Tečna izdvojena frakcija digestata	Cvrsta izdvojena frakcija digestata
Suve materije [%]	6,5	5,7	24,3
Azot ukupni [kg/m ³]	5,1	4,9	5,8
Amonijak (NH ₄) [kg/m ³]	3,2	3,1	2,7
Amonijak (NH ₄) [%]	62,7	63,3	46,5
Fosfor (P ₂ O ₅) [kg/m ³]	2,3	2,0	5,0
Kalijum (K ₂ O) [kg/m ³]	5,5	5,4	5,8

Hranjivi sastav digestata varira u zavisnosti od sirovine koja se koristi u procesu anaerobne digestije. Osim toga, različit sastav se može dobiti i u zavisnosti od načina prerade (razgradnja tečne i čvrste frakcije, sušenje i dr.) kojem se digestat podvrgava. Veća je verovatnoća da će prilikom razgradnje tečne i čvrste frakcije digestata amonijak (NH_4) i kalijum (K_2O) ostati u tečnoj frakciji, a fosfor (P_2O_5) i organski materijal u čvrstoj frakciji. Zbog toga je potrebno redovno vršiti ispitivanje digestata da bi se biljkama obezbedila odgovarajuća ishrana azotom. U osnovi, takve analize pokazuju da tečni digestat sadrži 4 do 6% suve materije i 60 do 80% azota, koji je, usled anaerobne digestije, prisutan kao direktno raspoloživi amonijak (NH_4). To utiče na pH vrednost digestata, koja je viša nego kod tečnog stajnjaka (vrednost pH oko 8), što povećava rizik od gubitka gasovitog amonijaka.

U zavisnosti od vrste supstrata zavisi i sadržaj hranjivih materija u digestatu. U tabeli 2. prikazan je sadržaj hranjivih materija u digestatu dobijenom preradom supstrata iz prehrambene industrije.

Tabela 2. Sadržaj hranjivih materija u digestatu dobijenim preradom supstrata iz prehrambene industrije [2]

Komponenta	Jedinica	Vrednost
Sadržaj suve materije	%	4
Sadržaj hranjive materije		
Azot (N)	kg/t	5
Fosfor (P_2O_5)	kg/t	0,5
Kalijum (K_2O)	kg/t	2
Magnezijum (MgO)	kg/t	0,1
Sumpor (SO_2)	kg/t	0,4
Raspoloživi azot (N)	kg/t	4

Hranjive materije su prisutne u digestatu kao delimično mineralizovane u raznim oblicima i delimično u organski vezanom obliku, što tokom vremena dovodi do razlika u njihovoj dostupnosti u poređenju sa mineralnim đubrivima.

Da bi se digestat koristio kao đubrivo u poljoprivredi važno je poznavati njegov sastav i svojstva. Zbog toga se iz svakog punjenja digestora moraju uzeti prosečni uzorci digestata kako bi se odredio sadržaj azota, fosfora, kalijuma, suve materije, isparljivih materija i pH vrednost. Ukoliko biogasno postrojenje koristi organski otpad pri procesu kodigestije, dodatno je potrebno odrediti prisustvo teških metala i otpornih organskih zagađivača u digestatu. Da bi se digestat mogao bez rizika primenjivati kao đubrivo i sredstvo za obogaćivanje zemljišta, mora da bude bez patogena, bolesti iz grupe spongiformnih encefalopatija (TSE) i fizičkih nečistoća.

Tokom procesa u biogasnom postrojenju neophodno je obratiti pažnju na sledeće aspekte kako bi se dobio kvalitetan digestat za upotrebu u poljoprivrednoj proizvodnji [3]:

- stalna kontrola procesa anaerobne digestije u cilju dobijanja stabilnog digestata (temperatura procesa, vreme zadržavanja supstrata);
- sanitacija digestata u skladu sa odgovarajućim propisima radi efikasnog smanjenja patogena;
- periodično uzorkovanje, analiza i deklarisanje digestata;
- za svako punjenje digestora pratiti poreklo, sastav, sadržaj teških metala i otpornih organskih sastojaka, kontaminaciju patogena i drugih potencijalno opasnih materija u supstratu i na osnovu toga odabrati sirovine koje su pogodne sa aspekta kvaliteta digestata.

4 Tehnologija pripreme digestata za korišćenje u poljoprivredi

U današnje vreme preporuka je da se obogaćivanje zemljišta vrši visokokvalitetnim organskim đubrivima kako bi se poboljšala količina humusa u tlu i smanjilo očeđivanje i erozija tla koje nastaje kao posledica obogaćivanja zemljišta mineralnim đubrivima duži niz godina. Digestat nastao procesom anaerobne digestije poželjno je primenjivati kao osnovno đubrivo i đubrivo za prihranu biljaka koje se uzgajaju u povrtarstvu, voćarstvu, vinogradarstvu i ratarstvu.

U slučajevima kada je neophodno obezbediti dodatne kapacitete za skladištenje ili kada digestat mora da se prevozi na velike razdaljine, mnogi vlasnici biogasnih postrojenja razmatraju mogućnost za dalju preradu digestata. Prilikom izbora tehnologije za dalju preradu potrebno je uzeti u obzir do kog kvaliteta je potrebno obraditi digestat. Neophodno je obratiti pažnju na zakonske propise za primenu digestata u određenoj oblasti ili regiji. Na primer, da li je sadržaj fosfora i azota u digestata ograničavajući faktor za njegovu primenu ili je cilj da se smanji sadržaj vode u digestatu. Razlog za preradu može biti kada je potrebno optimizovati izgled i rukovanje digestatom jer je smanjena njegova prodaja zbog konkurencije koju stvaraju druga organska đubriva.

Obično je prva faza u preradi digestata razdvajanje na tečnu i čvrstu frakciju mehaničkim putem, odnosno dobijaju se dva proizvoda koji mogu da se koriste na različite načine. Razdvajanjem čvrste frakcije samo se smanjuje potreba za rezervoarima za skladištenje tečnog digestata za 10 do 20%, ali se ne smanjuje prvobitna zapremina digestata. Za razdvajanje digestata mehaničkim putem na čvrstu i tečnu frakciju koriste se: pužne prese, centrifuge i trakaste filter prese. U kombinaciji sa prethodno navedenim tehničkim postupcima mogu se koristiti i rešetke za izdvajanje čvrstog materijala ili nečistoća. Takođe, radi boljeg izdvajanja čvrstog materijala iz tečne frakcije često se primenjuju i flokulanti.

Za obezvodnjavanje i zgušnjavanje tečne frakcije digestata najčešće se koriste isparavanje (atmosfersko i isparavanje pod vakuumom) i membranska filtracija (ultrafiltracija i reverzna osmoza). U poslednje vreme sve više raste interesovanje za procese kao što su rektifikacija i taloženje, odnosno obnavljanje rastvora amonijum-sulfata iz tečnog digestata. Izdvajanje vode iz tečne frakcije digestata smanjuju se kapaciteti za skladištenje, koji moraju da postoje u područjima sa hladnom klimom, za slučaj da đubrenje više nije potrebno u kasnu jesen i tokom zime.

Sušenje čvrste frakcije, a po potrebi granulacija ili peletiranje osušenog digestata su tehnike koje imaju relativno široku primenu. Tu se naglasak stavlja na poboljšanje izgleda, mogućnost rukovanja, pogodnost za skladištenje i mogućnosti plasmana na tržištu. Za vreme peletiranja mogu se dodavati ostali mineralni i organski dodaci, kako bi se u ponudi našla ona đubriva koja su potrebna korisniku, što tržištu đubriva proizvedenih od digestata daje dobru perspektivu. Najčešće se koriste sušare sa pokretnom trakom u kojima se digestat stavlja na pokretnu traku i suši pri temperaturama od 60 do 150°C u trajanju od 2 h. Moguće je postaviti i više pokretnih traka, jednu iznad druge. Sličan princip se primenjuje i kod sušara sa mehaničkim mešanjem, fluidnih i rotacionih sušara, u kojima se digestat transportuje kroz vreo vazduh pokretanjem lopatica, ubrizgavanjem vazduha ili u rotirajućem bubnju. Kod sušara u obliku prikolice ili kontejnera, vruć vazduh prolazi kroz nepokretnu gomilu. Kod sušenja uz pomoć solarne energije, digestat se raspoređuje po podu velike staklene bašte i prevrće se pomoću okretnih kolica. Topao vazduh od 40°C se usmerava na slojeve digestata pomoću ventilatora. Sušenje je potpomognuto sunčevim zračenjem koje prodire u staklenu baštu. Često se vrši peletiranje osušenog digestata radi postizanja veće gustine, lakšeg rukovanja i boljeg izgleda. Da bi se to postiglo sadržaj suve materije u osušenom digestatu treba da je od 85 do 90% [4].

U poslednje vreme vrši se kompostiranje čvrstog digestata koji je nastao u postrojenju za suhu digestiju ili razdvajanjem čvrste i tečne frakcije. Na ovaj način se dobija kvalitetan kompost. Kompostiranje se najčešće primenjuje kada se vrši digestija komunalnog biootpada. U nekim slučajevima se tečni digestat iz biogasnog postrojenja obrađuje u postrojenje za tretman otpadnih voda, zajedno sa komunalnim otpadnim vodama.

Može se vršiti ekstrakcija hranjivih materija iz tečne frakcije digestata koje bi se, nakon toga, koristile kao mineralna đubriva ili u hemijskoj industriji. Faze dalje prerade u cilju potpune ekstrak-

cije hranjivih materija obuhvataju filtraciju, taloženje fosfata i rektifikaciju radi izdvajanja amonijuma. Trenutno ovi procesi nemaju značajniju primenu u daljoj preradi digestata [4].

5 Prednosti korišćenja digestata u poljoprivredi u odnosu na stajnjak i veštačka đubriva

Stajnjak se tradicionalno koristi za obogaćivanje poljoprivrenog zemljišta. Sa razvojem petrohemijske industrije došlo je do razvoja veštačkih đubriva koja se koriste u cilju povećanja prinosa useva na poljoprivrednom zemljištu. Strogi zakonski propisi u pojedinim zemljama i regionima zabranjuju direktno odlaganje stajnjaka na poljoprivredno zemljište. Zbog toga je neophodno izvršiti odgovarajući tretman stajnjaka, kako bi se u njemu smanjila koncentracija štetnih komponenata i nakon toga izvršiti njegovo odlaganje na zemljište.

U poslednje vreme sve veću primenu za obogaćivanje poljoprivrednog zemljišta ima digestat koji se dobija u biogasnim postrojenjima. Digestat ima određene prednosti u odnosu na stajnjak i veštačka đubriva. Prednosti korišćenja digestata za obogaćivanje zemljišta i povećanje prinosa useva u odnosu na stajnjak su:

- ima bolju hranjivu vrednost od svežeg stajnjaka zbog ujednačene strukture i hranjivih elmenata u obliku u kojem ih biljke mogu apsorbovati;
- bogat je kiseonikom, fosforom, kalijumom i brojnim mikroelementima;
- prednosti digestata u odnosu na sveži stajnjak su smanjenje neprijatnih mirisa i muva;
- pri proizvodnji biogasa neprijatni mirisi se značajno smanjuju kao i semenje korova u đubrivu, a hranjivi elementi se zadržavaju;
- kada se digestat nanosi na zemljište veća je reprodukcija humusa nego kada se koristi stajnjak;
- praktični rezultati pokazuju da se u odnosu na tradicionalni stajnjak korišćenjem digestata povećava prinos poljoprivrednih kultura.

Digestata se može koristiti kao zamena za veštačka đubriva. Prednosti korišćenja digestata u poljoprivrednoj proizvodnji u odnosu na veštačka đubriva su:

- u odnosu na veštačka đubriva potrebna je manja količina energije za proizvodnju i transport digestata;
- cena digestata je niža u odnosu na cenu veštačkih đubriva, a prinos poljoprivrednih kultura po jedinici površine zemljišta je uglavnom veći;
- zemljišta koja se obogaćuju digestatom ne prolaze kroz anaerobnu fazu;
- kada se koristi digestat dolazi do manjeg iskorišćenja kiseonika koji se nalazi u zemljištu;
- digestat ima relativno visoku pH vrednost (oko 8,7) što je povoljno za popravljavanje pH zemljišta (neutralno do slabo kiselo zemljište sa pH = 5,5 do 7,5);
- u odnosu na veštačka đubriva ima veći sadržaj kiseonika, fosfora i kalijuma (100 kg digestata prosečno sadrži 2 do 3 kg kiseonika, 3 do 3,8 kg fosfora i 2 do 3 kg kalijuma).

Jedna od najznačajnijih prednosti korišćenja digestata u odnosu na veštačka đubriva je veća reprodukcija humusa u poljoprivrednom zemljištu.

Da bi se postiglo optimalno korišćenje digestata kao đubriva za obogaćivanje poljoprivrednog zemljišta, moraju se uzeti u obzir aspekti koji se odnose na druga đubriva [3]:

- dovoljan kapacitet skladištenja (najmanje 6 meseci),
- ograničena sezona primene đubriva (u toku vegetacije biljaka),
- količina đubriva po jedinici površine zemljišta (prema planu đubrenja),
- tehnika primene đubriva (neposredna primena, minimalni gubitak hranjivih materija).

6 Zaključak

Digestat je anaerobno razgrađeni supstrat bogat hranjivim elementima u obliku u kojem ih biljke mogu apsorbovati. Skoro svi minerali koji su se nalazili u supstratu, nakon procesa anaerobne digestije u biogasnom postrojenju, zadržavaju se i u digestatu.

U radu su sveobuhvatno razmatrane i prezentovane osnovne karakteristike i prednosti digestata dobijenog u biogasnim postrojenjima u odnosu na stajnjak i veštačka đubriva. Digestat predstavlja visokokvalitetno đubrivo koje je poželjno primenjivati kao osnovno đubrivo i đubrivo za prihranu biljaka koje se uzgajaju u ratarskoj proizvodnji. Najčešće se upotrebljava kada je potrebno da se poveća sadržaj humusa i samanji očeđivanje i erozija zemljišta, na kojem su se dugi niz godina primenjivala veštačka mineralna đubriva.

Za regulisanje uslova i korišćenja đubriva, a samim time i digestata u poljoprivrednoj proizvodnji, na način koji pogoduje očuvanju životne sredine, neophodni su odgovarajući zakonski propisi, koji mogu biti utvrđeni na regionalnom, nacionalnom ili kontinentalnom nivou.

7 Literatura

- [1] **Stanojević, M., S. Simić, A. Jovović, D. Radić, M. Obradović, D. Todorović**, *Biogas – dobijanje i primena*, Mašinski fakultet, Beograd, 2014.
- [2] **Omerdić, N.**, *Anaerobnom digestijom do visokovrijednog organskog gnojiva*, Hrvatske vode, 28 (2020), str.43-50.
- [3] **Al Seadi, T., D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk, R. Janssen**, *Big East, Biogas for Eastern Europe*, Priručnik za bioplin, Prevod sa engleskog jezika, Zagreb, 2008.
- [4] **Wilken, D., i dr.**, *Digestat kao đubrivo*, GiZ, Beograd, 2018. <http://biogas.org.rs>

BIOGAS U PROIZVODNJI BIOVODONIKA REFORMINGOM VODENOM PAROM

BIOGAS IN BIOHYDROGEN PRODUCTION BY STEAM REFORMING

**Slobodan CVETKOVIĆ^{1*}, Jovana PERENDIJA¹, Aleksandra RADOMIROVIĆ²,
Dragana MILOŠEVIĆ¹, Mirjana KIJEVČANIN³**

¹ Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd, Srbija

² Društvo "Chemical and Energy Engineering", 11000 Beograd, Srbija

³ Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-Metalurški fakultet, Beograd, Srbija

Iscrpljivanje fosilnih goriva, zagađenje životne sredine i klimatske promene doveli su do sve većeg interesovanja za obnovljivim vodonikom. Vodonik se u današnjim tehnološkim postupcima uglavnom dobija reformingom prirodnog gasa. Biogas koji nastaje anaerobnim procesom iz otpadne biomase predstavlja dobru zamenu za prirodni gas. U ovom radu elaboriran je tehnološki proces reforminga parom biogasa, koji je ukazao da je potrebno ukloniti nedostatke ovog procesa, posebno deaktivaciju katalizatora i uklanjanje vodonik sulfida, kako bi se potencijal biogasa za proizvodnju obnovljivog vodonika u potpunosti iskoristio.

Ključne reči: biogas; vodonik; reforming parom; energija

Depletion of fossil fuels, environmental pollution, and climate change have led to an increasing interest in renewable hydrogen. In today's technological processes, hydrogen is mainly obtained by steam reforming of natural gas. Biogas produced by an anaerobic process from waste biomass can be a good substitute for natural gas. In this paper, the technological process of biogas steam reforming was elaborated, which indicated that it is necessary to remove the lack of this process, especially the deactivation of the catalyst and the removal of hydrogen sulfide, in order to fully utilize the potential of biogas to produce renewable hydrogen.

Keywords: biogas; hydrogen; steam reforming; energy

* Corresponding author, e-mail: slobodan.cvetkovic@ihtm.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Procesna tehnika".

PRAĆENJE PROJEKTNIH PARAMETARA KOD BAC KULA ZA HLADENJE

MONITORING OF DESIGN PARAMETERS FOR BAC COOLING TOWERS

Nemanja STOJANOVIĆ¹, Martin BOGNER^{2*}

¹ Technology International Services, Beograd,

² Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

U radu je opisano praćenje parametara i izbor termički i ekonomski optimalne rashladne kule. Prikazani su svi tehnički podaci za jednu BAC otvorenu rashladnu kulu. Objasnjeni su svi projektni parametri za izbor rashladnih kula. Prikazan je dijagram temperatura vazduha po suvom termometru – relativna vlažnost vazduha koji može priložiti prodavac kako bi krajnji korisnik mogao lakše pratiti rad kule.

Ključne reči: rashladana kula; projektni parametri; vlažni termometar; rashladni kapacitet; parametri spoljnog vazduha

The paper describes the monitoring of parameters and the selection of a thermally and economically optimal cooling tower. All technical data for one BAC open cooling tower are presented. All design parameters for the selection of cooling towers are explained. A diagram of air temperatures according to dry bulb - relative air humidity is shown, which can be attached by the seller so that the end user can more easily monitor the operation of the cooling tower.

Keywords: cooling tower; design parameters; wet bulb thermometer; cooling capacity; outdoor air parameters

1. Uvod

Rashladni toranj je jedan od uređaja koji prenose toplotu vode visoke temperature iz razmenjivača na vodu niske temperature, a zatim ohlađena voda ponovo cirkuliše do razmenjivača toplote. Rashladna kula generiše ohlađenu vodu u velikoj količini i skladišti u bazenu za vodu. Ako rashladna kula nije pravilno projektovana, to može uticati na rashladni učinak. Rashladne kule su velike i imaju razne jedinstvene specifikacije u zavisnosti od okruženja u kojima će raditi i u kojoj meri krajnji korisnici žele da ostanu efikasne i ekološki prihvatljive. Rashladne kule koriste isparavanje vode za uklanjanje toplote i mogu da ohlade vodu to temperature koja je blizu temperature vlažnog termometra vazduha.

Za termički proračun kule za hlađenje potrebni su sledeći projektni parametri:

1. Toplotni kapacitet Q [kW]
2. Masetni protok vode \dot{m} [l/s]
3. Ulazna i izlazna temperatura vode t_i [°C] t_o [°C]
4. Parametri spoljnog vazduha: temperatura suvog termometra vazduha t_a [°C]
5. i relativna vlažnost ϕ_a [%] ili temperatura vlažnog termometra [°C].

Podaci za jednu kulu za hlađenje vode BAC (Baltimore aircoil company)

THEMAL DESIGN DATA

Requested capacity (overall/unitary)	1000 kW
Max. capacity (overall/unitary) (@ 100% RPM).....	1009 / 1009 kW
Fluid type	H2O
Requested fluid flow (overall/unitary)	47.78 / 47.8 l/s
Max. fluid flow (overall/unitary) (@ 100% RPM).....	48.22 / 48.2 l/s
Entering wet bulb temp	23.0 °C

* Corresponding author, e-mail: mbogner@mas.bg.ac.rs

Entering dry bulb temp	33.0 °C
Process fluid inlet temperature	35.0 °C
Process fluid outlet temperature	30.0 °C
Operating mode	Wet

PHYSICAL DATA (including accessories) - UNITARY

Overall length	3651 mm
Standard unit	3651 mm
Overall width	2394 mm
Standard unit	2394 mm
Overall height	3336 mm
Standard unit	3336 mm
Shipping / operating weight	2064 / 4477 kg
Standard unit	2064 / 4477 kg
Heaviest section	2064 kg
Material option	BALTIPLUS
Inlet diameter	(1x) 200 mm
Outlet diameter	(1x) 200 mm
Overflow diameter	(1x) 80 mm
Make up diameter	(1x) 40 mm
Drain diameter	(1x) 50 mm

Exact unit dimensions and weights may be influenced by accessories/option combinations.

WET DECK SURFACE

Wet deck surface type	BACross III
Wet deck surface spacing	17 mm
Wet deck surface material	PVC
Wet deck surface maximum process temp	55 °C

ELECTRICAL DATA - UNITARY

Fan motor	
General	
Fan motor BHP (Net mech output power at motor shaft)	(3 x) 1.87 kW
Fan motor oversized for	
Total ESP	0 Pa
Accessories total external static pressure	0 Pa
Customer external static pressure	0 Pa
Fan motor voltage	400 V
Frequency	50 Hz
Protection class	IP55
Mounting	V6
Single speed	
Fan motor power	(3 x) 2.2 kW
Efficiency level fan motor	IE3
Fan full load current (Nominal Voltage)	(3 x) 4.64 A (400 V)
Fan synchrone speed	1500 RPM
Framesize	100

* Note: For indicative cable sizing the "Fan Full Load Current" and the corresponding "Nominal Voltage" have to be used.

* To prevent moisture ingress in fan motors installed in the wet discharge air stream, these fan motors have space heaters. The space heaters should be activated whenever the fan motor is idle. Units with motors outside the unit do not have space heaters as standard execution but are available as an option.

AERODYNAMICAL DATA - UNITARY

Air flow (100% RPM/100% RPM).....	19.0 / 19.0 m³/s
Number of fans	3
Fan type	Axial
Approximate Fan speed	965 RPM

HYDRAULICAL DATA - UNITARY

Total pressure drop (@47.8 / 48.2 l/s).....	0.0 / 0.0 kPa
Standard unit	0.0 / 0.0 kPa
Maximum evaporation	0.383 / 0.386 l/s
Bleed (cycles of concentration 2.5)	0.255 / 0.258 l/s
Make-Up (cycles of concentration 2.5).....	0.638 / 0.644 l/s
Pan volume operating	838 l
Pan volume overflow	2416 l
Pressure range mechanical make-up valve	1 to 3,5 bar

Acoustical data (Standard unit no attenuation)

100 % RPM (@ 15.0m)	63 dB(A)
Sound Power Level (@100 %RPM).....	102.0 dB(A)

All acoustical data as sound pressure levels at quietest side of unit at indicated distance. Values are obtained according to CTI ATC-128,2019 (Test Code for Measurement of Sound From Water-Cooling Towers) for small towers with a 2 dB(A) tolerance.



Slika 1.1 BAC SI1500 otvorena rashladna kula

Pri izboru projektnih parametara spoljnog vazduha obavezno treba uzeti u obzir potrebe tehnološkog procesa i trajnost temperature vlažnog i suvog termometra. Što se tiče zahteva tehnologije treba razmotriti da li je dozvoljeno kratkotrajnije ili duže povišenje temperature vode iznad projektovane i koliki je taj period. Takodje je povoljno ako se može unapred predvideti remont postrojenja u najtoplijem mesecu, koji za određene tehnologije može trajati desetak i više dana. Sve ovo navodi na zaključak da je vrlo nepovoljno vršiti termički proračun kule za hlađenje za najviše temperature spoljnog vazduha, za posmatranu klimatsku mikro lokaciju, zbog kratkotrajnosti tih temperatura. Projektovana kula za hlađenje, proračunata za maksimalne temperature spoljnog vazduha bila bi veoma skupa. S druge strane, suviše niska proračunska temperatura vazduha može dovesti do povišenja temperature ohlađene vode i pogonskih teškoća u toplijim periodima.

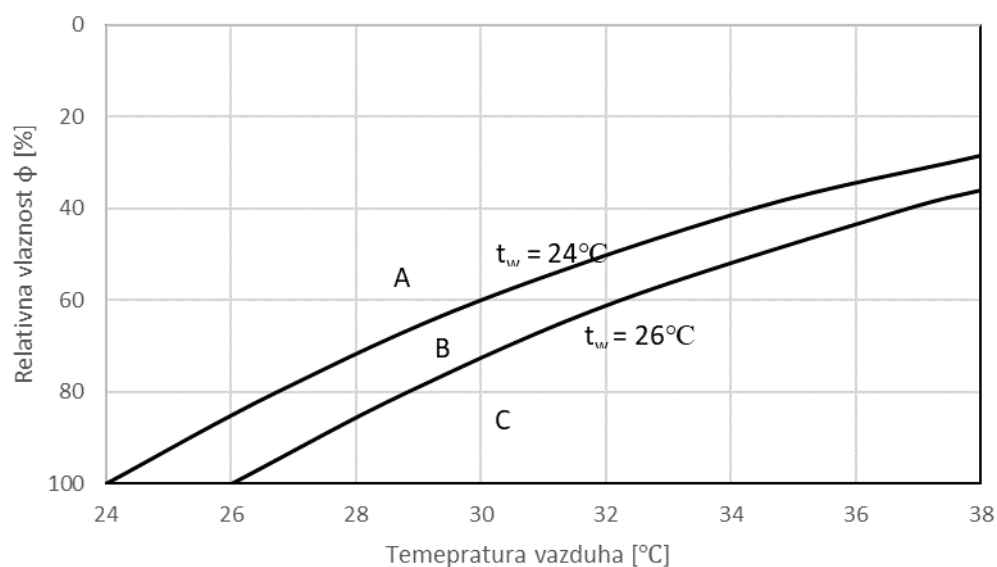
Tabela 1 - Temperature po mesecima Beograd

Meseci	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	avg	sep	okt	nov	dec
t_{amax}	4	6	12	18	22	26	28	28	24	18	10	5
t_a	1	2	7	12	17	21	23	22	18	13	7	2
t_{amin}	-2	-1	3	7	12	15	17	16	12	8	3	-1
Srednje relativne vlažnosti												
φ [%]	83	79	69	64	70	70	62	56	59	67	74	80

t_{amax} – srednja maksimalna temperatura po suvom termometru;

t_a – srednja temperatura po suvom termometru;

t_{amin} – srednja minimalna temperatura po suvom termometru



Slika 1.2 – A – moguć rad, B – tehnički problematičan rad, C – nemoguć rad

Na slici 1.2 je prikazan dijagram temperatura vazduha po suvom termometru – relativna vlažnost vazduha u koji je ucrtana izoterma $t_w = 24^\circ\text{C}$ koja odgovara projektnoj temperaturi po vlažnom termometru i izoterma $t_w = 26^\circ\text{C}$ što odgovara temperaturi ohlađene vode a istovremeno i teorijskoj granici hlađenja vode evaporativnim putem. Ovaj dijagram omogućuje nalaženje radne tačke u svakom trenutku vremena, a u zavisnosti od spoljnih uslova odnosno stanja spoljnog vazduha. Oblast označena sa A pokazuje da će rashladni efekat biti uvek zadovoljen. Granična kriva između oblasti A i B pokazuje proračunsku vrednost, tj. projektne parametre spoljnog vazduha. U oblasti B se još može postizati rashladni efekat ili će doći do neznatnog povišenja temperature ohlađene vode. Granična kriva između oblasti B i C pokazuje teorijsku granicu hlađenja, a oblast C nemoguć rad, odnosno znatno povišenje temperature ohlađene vode od proračunske. Između graničnih krivih za navedene oblasti mogu se povući i ostale izoterme vazduha po vlažnom termometru. Tada se za dobijene kule može izvršiti kontrolni termički proračun da bi se odredila kolika će biti temperatura ohlađene vode.

Dijagram 1.2 korisniku kule za hlađenje može biti veoma koristan. Ovaj dijagram može priložiti prodavac. Takođe može da ga za svoje potrebe izradi i korisnik. Tada se sa prosečnim vrednostima temperatura i vlažnosti, naročito u letnjem periodu, može pratiti rad kule. Ukoliko uslovi za vazduh padnu u oblast C (slika 1.2) i traju veoma kratko, neće se mnogo promeniti rashladni kapacitet kule za hlađenje.

PRORAČUN VEZE IZMEĐU CEVI CEVNOG SNOPA I CEVNE PLOČE RAZMENJIVAČA TOPLOTE PO JUS M.E2.259 (AD 2000) I SRPS EN 13445-3:2010 – UPOREDNA ANALIZA

CALCULATION OF THE CONNECTION BETWEEN THE PIPE BUNDLE AND THE TUBE PLATE OF THE HEAT EXCHANGER ACCORDING TO JUS M.E2.259 (AD 2000) AND SRPS EN 13445-3:2010 - COMPARATIVE ANALYSIS

Lazar ĐORĐEVIĆ*

PhD student

Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Serbia

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.131>

U ovom radu je prikazan proračun veze između cevi i cevne ploče dobošastog razmenjivača toplote. Uvaljivanje cevi u cevnu ploču je tema rada. Dat je uporedni prikaz proračuna po dva različita standarda: JUS M.E2.259 (AD 2000) i SRPS EN 13445-3:2010. Pri uporednoj analizi uzeta je vrednost debljine cevne ploče 14mm, dok su vrednosti za spoljašnji prečnik cevi bile promenljive: 16mm, 20mm i 24mm. Na osnovu navedenih vrednosti izračunata su opterećenja veze cevi i cevne ploče.

Ključne reči: razmenjivač toplote; cevni snop; cevi; cevna ploča

This paper presents the calculation of the connection between the pipe and the tubesheet of the drum heat exchanger. Inserting the pipe into the tubesheet is the topic of the paper. A comparative presentation of calculations according to two different standards is given: JUS M.E2.259 (AD 2000) and SRPS EN 13445-3:2010. During the comparative analysis, the value of the thickness of the tube plate was taken as 14 mm, while the values for the outer diameter of the tube were variable: 16 mm, 20 mm and 24 mm. Based on the above values, the loads of the pipe connection and the pipe plate were calculated.

Keywords: heat exchanger; tube bundle; pipes; tubesheet

1 Uvod

U ovom radu je razmatran slučaj razmenjivača toplote sa ravnom cevnom pločom u koju su cevi cevnog snopa uvaljane. Bitna napomena je da je proračun sproveden za cevi cevnog snopa koje su fiksirane na oba kraja za cevne ploče. Cilj rada je bio da se uoče razlike između standarda i dođe do zaključka čime je unapređen prethodni standard.

2 SRPS EN13445:2010

Urađen je proračun prema standardu SRPS EN13445:2010 i u nastavku su prikazane formule prema kojima je račun sproveden.

Računati su sledeći naponi:

- Maksimalni radijalni napon savijanja cevne ploče

$$\sigma = \left(\frac{1.5 F_m}{\mu^*} \right) \left(\frac{D_e}{e - h_g} \right)^2 P_s \quad (1)$$

- Maksimalni napon smicanja cevne ploče

$$\tau = \left(\frac{\dots}{\dots} \right) \left(\frac{\dots}{\dots} \right) |P_s - P_t| \quad (2)$$

* Corresponding author, e-mail: djordjevic.lazar1997@gmail.com

- Maksimalni dozvoljeni napon na spoju cevi sa cevnom pločom

$$f_{t,j} = 0.5 f_{min} \min \left[\frac{l_{t,x}}{d_t}; 1.6 \right] \quad (3)$$

- Maksimalni dozvoljeni napon smicanja cevi

$$f_{t,bk} = \frac{1}{x} \left[x * \sigma_{t,p} + \frac{R_{p0,2/t} - |x * \sigma_{t,p}|}{\sqrt{\left(1 + \frac{(1+b_0)R_{p0,2/t} - |x * \sigma_{t,p}|}{\sigma_{t,cr}}\right)^2}} \right] \quad (4)$$

gde su:

R_m – napon kidanja

μ^* – efektivni koeficijent slabljenja vezne linije

D_e – prečnik perforirane površine cevne ploče

h'_g – efektivna dubina žleba

$f_{t,j}$ – maksimalni dozvoljeni napon na spoju cevi sa cevnom pločom

$l_{t,x}$ – dužina uvaljivanja cevi u cevnu ploču

d_t – prečnik cevi

$f_{t,bk}$ – maksimalni dozvoljeni napon smicanja cevi

$R_{p0,2/t}$ – napon tečenja

Prilikom proračuna uzeta je fiksna vrednost za debljinu cevne ploče $e = 14 \text{ mm}$, dok su vrednosti za spoljašnji prečnik cevi cevnog snopa bile promenljive $d = 16 \text{ mm}$, $d = 20 \text{ mm}$ i $d = 24 \text{ mm}$ i tako upoređivani izračunati podaci.

Vrednosti dobijene proračunom prema SRPS EN13445:2010 prikazane su u narednoj tabeli:

Tabela 1. Dobijene vrednosti napona prema standardu SRPS EN13445:2010

	σ MPa	τ MPa	$f_{t,j}$ MPa	$f_{t,bk}$ MPa
d = 16 mm	38,6	2,96	61,46	25,05
d = 20 mm	47,92	4,178	49,16	39,15
d = 24 mm	83,78	6,97	41	57,65

S obzirom da su dobijene vrednosti napona daleko manje od dozvoljenih (predimenzionisani), smanjenjem debljine cevne ploče ćemo dovesti vrednosti napona da budu malo manji od dozvoljenih. Takođe, usvojicemo da je dužina uvaljivanja jednaka debljini cevne ploče tj. da je maksimalno moguća, $l_{t,x} = e$.

Uzimali smo da je maksimalni radijalni napon savijanja cevne ploče blizu vrednosti maksimalnog dozvoljenog napon, a zatim određivali debljinu cevne ploče. Dobijene vrednosti debljine cevne ploče smo koristili za izračunavanje ostalih vrednosti napona čije su formule navedene iznad. Dobijene vrednosti su prikazane u narednoj tabeli.

Tabela 2. Dobijene vrednosti napona prema standardu SRPS EN13445:2010 nakon korekcije parametara

	e mm	σ MPa	τ MPa	$f_{t,j}$ MPa	$f_{t,bk}$ MPa
d = 16 mm	7	260 (usvojeno)	6	43	25
d = 20 mm	7,5	260 (usvojeno)	7,8	36,87	39,15
d = 24 mm	8,33	260 (usvojeno)	11,7	34,1	57,65

Primećujemo da je po ovom standardu zahtevano da se izračunaju i provere vrednosti napona prilikom mehaničkog proračuna razmenjivača toplote.

3 JUS M.E2.259

Pri upoređivanju sa standardnom JUS M.E2.259 za l_w smo dobijali značajno manje vrednosti:

Tabela 3. Dobijene vrednosti dužine uvaljivanja prema standardu JUS M.E2.259

$d = 16 \text{ mm}$	$l_w = 0,0154 \text{ mm}$
$d = 20 \text{ mm}$	$l_w = 0,025 \text{ mm}$
$d = 24 \text{ mm}$	$l_w = 0,038 \text{ mm}$

U nastavku je prikazan proračun dozvoljene sile izvlačenja cevi iz cevne ploče na osnovu standarda JUS M.E2.259 tj. nemačkog standarda AD2000.

Međutim, fiksiranjem vrednosti l_w na maksimalnu vrednost ($l_w = e$) na osnovu dozvoljenog opterećenja valjanog spoja po standard JUS M.E2.259 izračunali smo dozvoljenu silu u cevi da ne dođe do izvlačenja cevi. Korišćene formule su sledeće:

$$A_w = (d_s - d_u)l_w \quad (5)$$

$$\frac{F_R}{A_w} = 150 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (6)$$

$$F_R = \frac{d_u^2 P_i \pi}{40} \quad (7)$$

gde su:

A_w – korisna površina cevne ploče

d_s – spoljašnji prečnik cevi

d_u – unutrašnji prečnik cevi

F_R – maksimalna dozvoljena sila izvlačenja cevi iz cevne ploče

P_i – proračunski pritisak u cevima

Sproveden je postupak mehaničkog proračuna prilikom koga je usvojena vrednost 150 N/mm^2 za dozvoljeno opterećenje ravnog valjanog spoja. Uz pomoć navedenih formula izračunata je dužina uvaljivanja a zatim i usvojena tako da bude jednaka debljini cevne ploče. Pri fiksiranoj navedenoj vrednosti postojala je mogućnost da se izračuna maksimalna dozvoljena sila izvlačenja što je i urađeno. Rezultati su prikazani u narednoj tabeli:

Tabela 4. Dobijene vrednosti za dozvoljenu silu izvlačenja prema standardu SRPS M.E2.259

Dužina uvaljivanja	Dozvoljena sila izvlačenja cevi
$l_w = 7 \text{ mm}$	$F_R = 2100 \text{ N}$
$l_w = 7,5 \text{ mm}$	$F_R = 2250 \text{ N}$
$l_w = 8,33 \text{ mm}$	$F_R = 2500 \text{ N}$

Uočavamo da je stari jugoslovenski standard bio jednostavniji za primenu zbog mnogih pojednostavljenja i usvojenih vrednosti, kao što je dozvoljeno opterećenje valjanog spoja (za ravan valjani spoj). Samim tim u proračunu su dobijana nepreciznija rešenja.

4 ZAKLJUČAK

Prema standardu SRPS EN13445:2010, povećanjem prečnika cevi cevnog snopa, zahtevane debljina cevne ploče ima sve veću vrednost. Ovaj zaključak je donet nakon fiksiranja vrednosti maksimalnog radijalnog napona savijanja cevne ploče na 260 MPa što je skoro maksimalni dozvo-

Ijeni napon u ovim uslovima. Takođe, prilikom povećanja prečnika cevi cevnog snopa, uočene su promene različitih napona:

- prečnik cevi cevne ploče ↑
- maksimalni radijalni napon savijanje cevne ploče ↑
- maksimalni napon smicanja cevne ploče ↑
- maksimalni dozvoljeni napon na spoju cevi sa cevnom pločom ↓
- maksimalni dozvoljeni napon smicanja cevi ↑

Prema standardu JUS M.E2.259, povećanjem prečnika cevi cevnog snopa možemo izračunati minimalnu dozvoljenu površinu tj. dužinu uvaljivanja cevi pri kojoj neće doći do izvlačenja cevi iz cevne ploče. Primećujemo da ta dužina ima sve veću vrednost ukoliko povećavamo prečnik cevi. I obrnuto, ukoliko dužinu uvaljivanja fiksiramo na maksimalno moguću što je zapravo jednako debljini cevne ploče, onda možemo izračunati silu izvlačenja kod ravnog valjanog spoja i primetiti da su debljina cevne ploče (dužina uvaljivanja) i sila izvlačenja srazmerne.

5 REFERENCE

- [1] **Ramesh K. S., Dusan P. S.**, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
- [2] *** *JUS M.E2.259*, Savezni zavod za standardizaciju, 1991.
- [3] *** *SRPS EN 13445-3*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010.

OPTIMIZACIJA PRI PROJEKTOVANJU OPREME POD PRITISKOM I NJENA PRIMENA TOKOM UPOTREBE OPREME POD PRITISKOM

OPTIMISATION IN THE DESIGN OF PRESSURE EQUIPMENT AND ITS APPLICATION DURING THE USE OF PRESSURE EQUIPMENT

Milan PESEKI¹,
PED Inspect, Beograd

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.135>

Posude pod pritiskom predstavljaju važan deo procesne tehnike. Ukoliko je u pitanju proizvodnja, gotovo da svaki tehnološki proces sadrži opremu pod pritiskom. Oprema pod pritiskom, se takođe upotrebljava za skladištenje i transport materija koje se nalaze u čvrstom, tečnom ili gasovitom agregatnom stanju.

Uticao na zaštitu životne sredine i održivi razvoj, predstavlja važan aspekt koji utiče na projektovanje opreme pod pritiskom, usled ograničenih resursa koje dobijamo iz prirodne okoline.

Da bismo konstruisali i projektovali, pouzdanu i bezbednu opremu pod pritiskom, a pritom odredili njenu minimalnu upotrebljivu veličinu, potrebno je posedovati tehnička znanja koja su veoma obimna za razumevanje ove oblasti mašinstva i kojoj se treba posvetiti posebna pažnja pri njenom izučavanju.

Načini obeležavanja posuda pod pritiskom prema pravilnicima koji su važeći i harmonizovani sa direktivama evropske unije. Preporuka za dodatnim podacima, za obeležavanje posuda pod pritiskom.

Navođenje 14 proračunskih modela za projektovanje primenjene na dancima posuda pod pritiskom, sa mogućnošću vizuelnog upoređivanja između proračunskih modela i objavljenih tehničkih propisa.

Prikaz autorovog proračunskog modela za približno određivanje proračunske debljine cilindričnog omotača, za posude koje su izrađene.

Ključne reči: *Posude pod pritiskom; Debljina zida omotača; Optimizacija; Tehnički propisi; Označavanje posuda pod pritiskom.*

Pressure vessels are an important part of process engineering. When it comes to production, almost every technological process contains equipment under pressure. Pressurized equipment is also used for storage and transport of substances that are in solid, liquid or gaseous aggregate state.

The impact on environmental protection and sustainable development is an important aspect that affects the design of pressure equipment, due to the limited resources we get from the natural environment.

In order to construct and design reliable and safe pressure equipment, while determining its minimum usable size, it is necessary to possess technical knowledge that is very extensive to understand this field of mechanical engineering and which should be given special attention when studying it.

Ways of marking pressure vessels according to the rules that are in use and harmonized with the directives of the European Union. Recommendation for additional data for pressure vessel marking.

Listing of 14 design calculation models applied to Heads for Pressure Vessels, with the possibility of visual comparison between calculation models and published technical regulations.

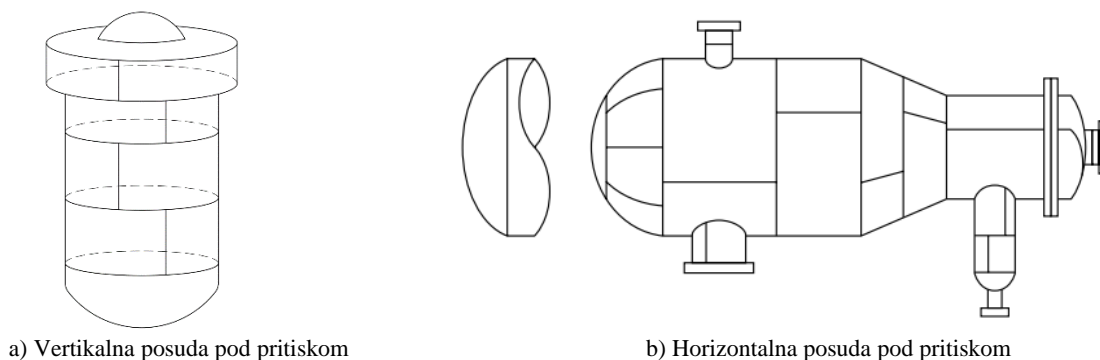
Presentation of the author's calculation model for the approximate determination of the calculation thickness of the cylindrical shell, for vessels that have been made.

Key words: *Pressure vessels; Shell wall thickness; Optimization; Technical regulations; Marking of pressure vessels.*

¹ Corresponding author, e-mail: milan.peseki@pedinspect.rs i milan87.peseki@gmail.com

1 Uvod

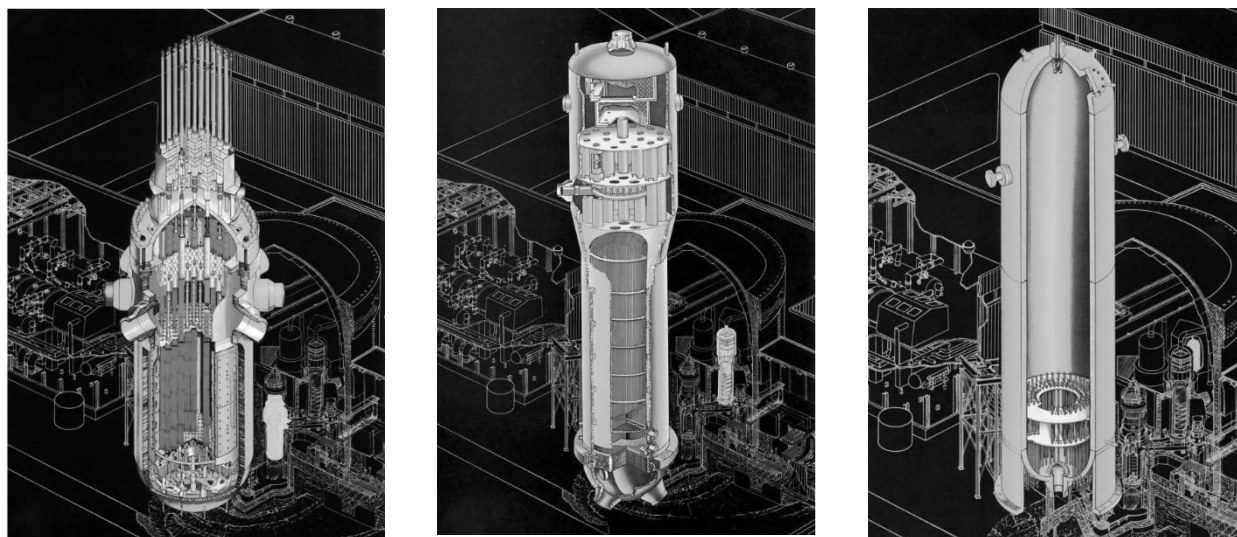
Primarni deo opreme pod pritiskom čine sve komponente opreme koje su opterećene unutrašnjim natpritiskom. Kada posmatramo posude pod pritiskom, one mogu imati jednostavniji geometrijski izgled (Slika 1.) ili složeni geometrijski izgled (Slika 2.). Pri svakom početnom definisanju oblika, neophodno je da se započne od jednostavnijeg geometrijskog izgleda. Iz tog razloga se češće susrećemo sa jednostavnijim geometrijskim modelima. Na slici 1.a) prikazana je vertikalna, a na slici 1 b) je prikazana horizontalna posuda pod pritiskom koja se često u literaturi prikazuje kao model za definisanje različitih tipova zavarenih spojeva.



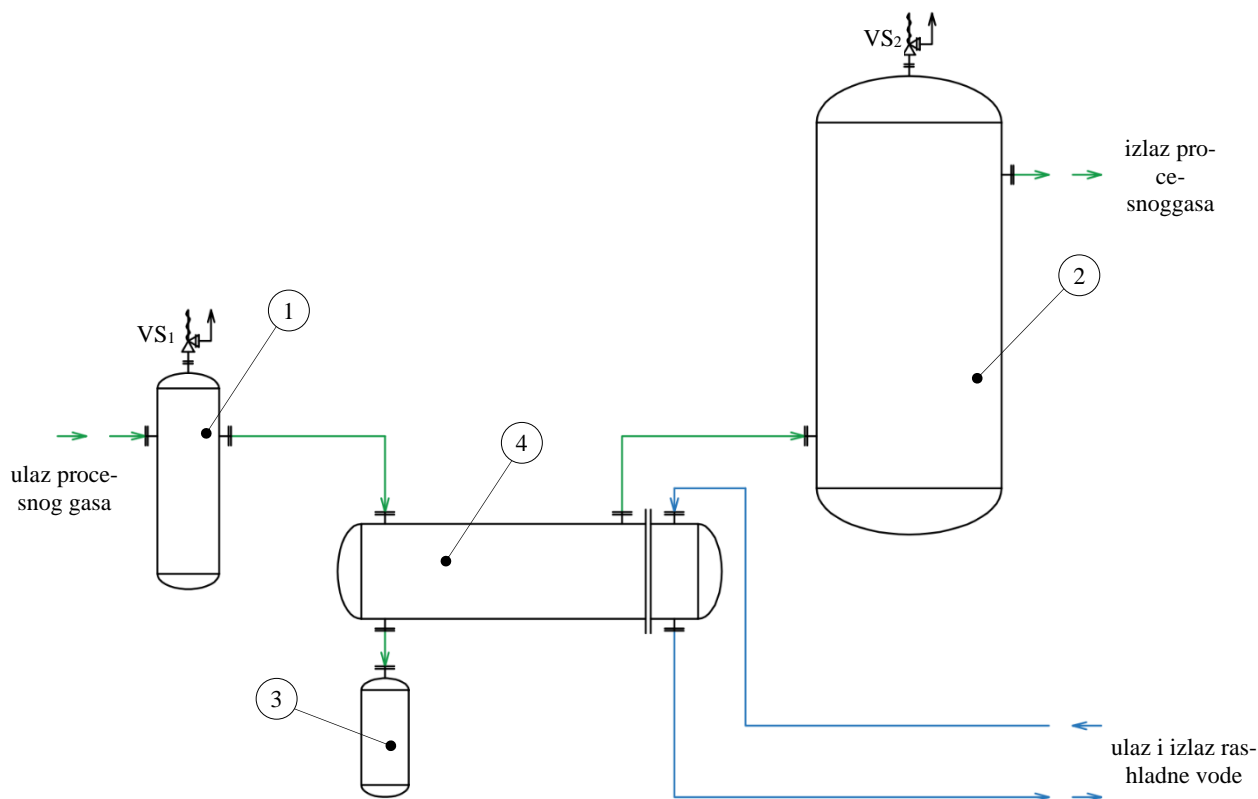
Slika 1. Osnovni izgled posuda pod pritiskom osnovne konstrukcije [3]

Posude pod pritiskom na slici 2 se ugrađuju u nuklearnim elektranama koje pripadaju drugoj generaciji, koje sadrže reaktor sa vodom pod pritiskom “Pressurized water reactor (PWR)”, zasniva se na principu dva odvojena rashladna kruga. Primarni rashladni krug reaktora i sekundarni rashladni krug generatora vodene pare. Sve tri posude se nalaze u velikoj zaštitnoj posudi “Containment Structure” koja je projektovana da primi pritisak koji bi nastao u slučaju pucanja cevovoda primarnog kruga, a opasnost je veća kod postrojenja sa četiri primarna rashladna kruga.

U ovom radu su istaknuti primeri posuda pod pritiskom složenog geometrijskog izgleda gde se može uočiti složenost same opreme koja se ugrađuje u proizvodne sisteme savremenih konstrukcija, gde se teži ka većoj efikasnosti tehnološkog procesa proizvodnje, kao i efikasnosti proizvodnje same opreme pod pritiskom. Ovo je samo jedan od razloga zašto se ovoj opremi treba posvetiti posebna pažnja pri izučavanju.



Slika 2. Realističan prikaz posuda pod pritiskom složene konstrukcije [3]



Slika 3. Određivanje pritiska otvaranja ventila sigurnosti

Na slici 3 je prikazan deo tehnološke šeme gde se uočava način povezivanja opreme pod pritiskom u tehnološku celinu. Cevovodi obeleženi zelenom bojom predstavljaju procesni gas, a plavom bojom su obeleženi cevovodi rashladne vode. Nakon upotrebe u tehnološkom procesu, procesni gas se dovodi u primarnu posudu pod pritiskom br.1 a zatim se dovodi u kondenzator procesnog gasa br.4 u kom se vrši njegovo pothlađivanje i izdvajanje tečne faze koja se odvodi u posudu br.3, a gasna faza se odvodi u posudu za skladištenje br.4, za potrebe ponovne upotrebe procesnog gasa. Na prikazanoj slici za tako opisan tehnološki proces, potrebno je odrediti pritisak otvaranja ventila sigurnosti. Prva analiza, posude pod pritiskom koje su obeležene na slici brojevima 1, 2 i 3 imaju iste maksimalno dozvoljene radne pritiske od 7 bar-a. To nam ukazuje da pritisak otvaranja ventila sigurnosti koji su obeleženi na slici VS₁ i VS₂, budu podešeni prema referentnom pritisku od 7 bar-a. Međutim, pri drugoj analizi datog sistema uočavaju se tehnički podaci ugrađene opreme pod pritiskom, kondenzatora procesnog gasa br.4 koja sadrži dva radna prostora, sa maksimalno dozvoljenim radnim pritisima od 5 bar-a za procesni gas i 4 bar-a za rashladnu vodu. Shodno navedenom, ventili sigurnosti koji štite sistem posuda pod pritiskom, koji sadrži procesni gas za referentan pritisak otvaranja mora se uzeti 5 bar-a. U ovakvim slučajevima grešku je lako napraviti ako se ne analizira ceo tehnološki sistem. Ako se analizira pojedinačno svaki postavljeni ventil sigurnosti prema posudi pod pritiskom, svakako bi zadovoljio uslov podešavanja pritiska otvaranja ventila sigurnosti, dok kondenzator procesnog gasa ne sadrži uređaj za sprečavanje povećanog radnog pritiska i parcijalno posmatrano bilo bi sve u redu. Takođe ovde se otvara pitanje optimizacije opreme pod pritiskom pri projektovanju. Da li su posude pod pritiskom optimalno projektovane? Pojedinačno posmatrano jesu, ali u opisanom tehnološkom sistemu svakako nisu.

2 Posude pod pritiskom i njihovo obeležavanje

2.1 Opšte o propisima i njihova primena

Posude pod pritiskom predstavljaju specifičnu vrstu proizvoda iz razloga što one moraju da budu unapred definisane sa svojim tehničkim karakteristikama pre proizvodnje, prema zahtevima naručioca. Svaka oprema pod pritiskom koja je proizvedena mora zadovoljavati zahtevane tehničke

karakteristike proizvoda. Prema Zakonu o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti [8] Tehničke karakteristike proizvoda drugačije nazivamo tehničke specifikacije proizvoda, to je dokumenat kojim se utvrđuju tehnički zahtevi koje treba da ispuni proizvod, proces ili usluga, odnosno tehnička specifikacija je dokument kojim su propisani tehnički zahtevi koje oprema pod pritiskom ili sklopovi moraju da ispune.

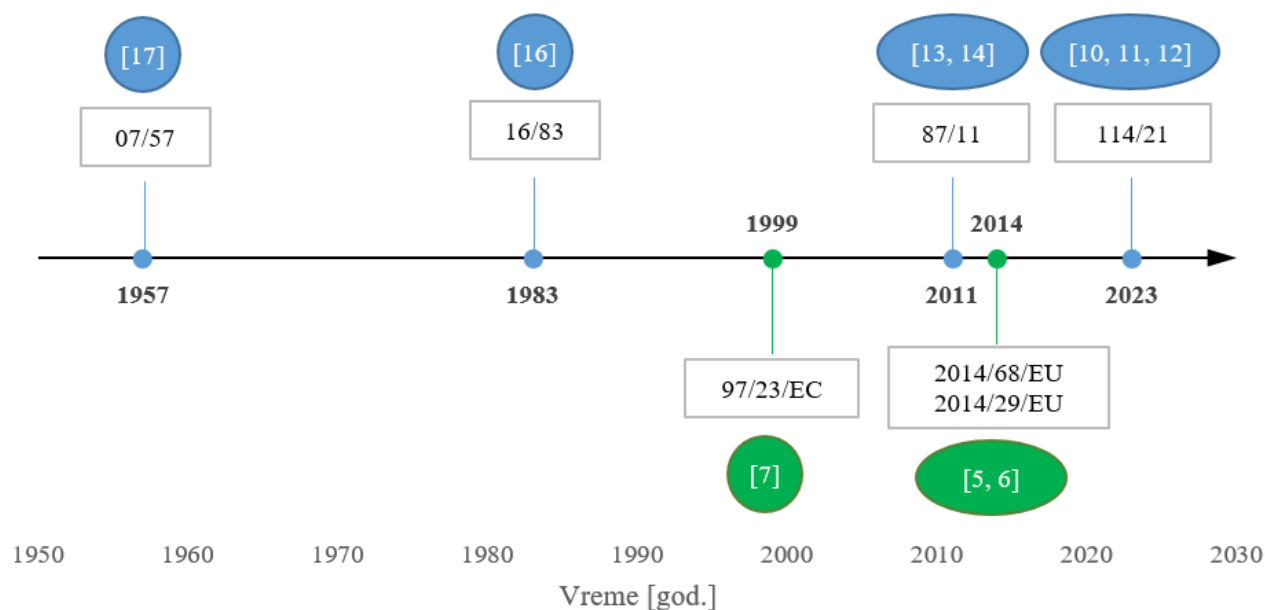
Zakonom o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti uređuje se način propisivanja tehničkih zahteva za proizvode, način ocenjivanja usaglašenosti proizvoda sa zahtevima tehničkih propisa, obaveze isporučilaca i vlasnika proizvoda, pretpostavka usaglašenosti, zaštitna klauzula i klauzula o jedinstvenom tržištu, važenje inostranih isprava o usaglašenosti, obaveštenje o tehničkim propisima i postupcima ocenjivanja usaglašenosti, opšti zahtevi za imenovanje i obaveze imenovanih tela, notifikacija tela za ocenjivanje usaglašenosti i tehničkih propisa, vođenje registra i vršenje nadzora nad sprovođenjem ovog zakona i propisa donetih na osnovu tog zakona.

Propisivanje tehničkih zahteva za proizvode se vrši tehničkim propisom koji predstavlja svaki propis kojim se za proizvod, odnosno grupe proizvoda, uređuje najmanje jedan od sledećih elemenata: tehnički zahtevi koje mora da ispunjava proizvod koji se isporučuje na tržištu, odnosno stavlja u upotrebu (u daljem tekstu: tehnički zahtevi), tehnička dokumentacija, postupci ocenjivanja usaglašenosti i drugi postupci koje sprovodi isporučilac u cilju ispunjavanja zahteva tehničkog propisa, oznake i način označavanja proizvoda, zahtevi u pogledu pakovanja i obeležavanja i druge elemente propisane u članu 4. Zakona o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti.

U Republici Srbiji poslednje tehničke propise za opremu pod pritiskom je doneo ministar rudarstva i energetike na osnovu člana 5. Zakona o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti [8]. Prvi pravilnik je Pravilnik o opremi pod pritiskom [10] koji je usklađen sa Direktivom 2014/68/EU Evropskog parlamenta i Saveta od 15. maja 2014. godine o usaglašavanju propisa država članica o satvljanju na tržište opreme pod pritiskom. Drugi pravilnik je Pravilnik o jednostavnim posudama pod pritiskom [11] koji je usklađen sa Direktivom 2014/29/EU Evropskog parlamenta i Saveta od 26. februara 2014. godine o stavljanju na tržište jednostavnih posuda pod pritiskom. Ovim pravilnicima se propisuju tehnički zahtevi koji se odnose na projektovanje, izradu, ocenjivanje usaglašenosti, označavanje i zahteve koje mora da ispuni imenovano telo ili drugo za ocenjivanje usaglašenosti. I treći pravilnik je Pravilnik o pregeldima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe [12] koji su stupili na snagu.

Upotrebom Pravilnika o pregeldima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe [12], dolazi se do rešenja problema koji je naveden pri opisu slike 3. gde se primenjuju članovi 25. ili 26. Član 25. Pregled pre ponovnog puštanja u rad, predstavlja izmenjen i dopunjen član 17. prema prethodnom pravilniku, odnosno Pravilniku o pregeldima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe [14]. Dok član 26. Prenamena opreme pod pritiskom, predstavlja dopunu prethodnog pravilnika. Prenamena opreme pod pritiskom obavlja se kod lica koje je vlasnik/korisnik ili proizvodi tu vrstu opreme pod pritiskom pod nadzorom imenovanog tela za ocenjivanje usaglašenosti, koje je imenovano za tu vrstu opreme pod pritiskom, postavlja se nova natpisna pločica na opremu pod pritiskom, izrađuje tehnička dokumentacija na osnovu novih projektnih karakteristika, odnosno parametara opreme pod pritiskom na osnovu kojih se sprovodi razvrstavanje opreme pod pritiskom i vrše potrebni pregledi i ispitivanja. Ili u drugom slučaju izvodio bi se Pregled pre ponovnog puštanja u rad opreme pod pritiskom, koji se sprovodi kad oprema nije radila duže od godinu dana nakon rekonstrukcije i sanacije ili u sličaju preseljenja na drugu lokaciju, kao i kada je oprema pod pritiskom bila stavljena privremeno van upotrebe. Ukoliko je obim izmena na opremi pod pritiskom takav da utiče na moguće neispunjavanje bitnih zahteva za bezbednost radovi na opremi moraju biti pod nadzorom imenovanog tela za ocenjivanje usaglašenosti, koje mora da odobri projekat sanacije/ rekonstrukcije, kontroliše izradu delova, izvođenje sanacije/rekonstrukcije, sprovodi završno ocenjivanje i izdaje izveštaj o kontrolisanju.

Ovakva pojašnjenja tehničkih propisa su značajna kompanijama odnosno fizičkim i pravnim licima koji su vlasnici/korisnici opreme pod pritiskom, radi njihovog boljeg sagledavanja i definisanja zahteva koji upućuju imenovanim telima.



Slika 4. Grafički prikaz početka primene pravilnika i evropske direktive za opremu pod pritiskom

Na slici 4 je predstavljen uporedni grafički prikaz pravilnika o opremi pod pritiskom, koji se primenjuju od 28. februara 1957. godine. Poređenja radi, godinu dana pre objavljivanja našeg pravilnika iz 1957. godine u Sjedinjenim Američkim Državama je napravljen prvi reaktor sa vodom pod pritiskom za potrebe komercijalne nuklearne elektrane koji je prikazan na slici 2.a). Tadašnja Federativna Narodna Republika Jugoslavija (FNRR, od 29. novembra 1945. do 7. aprila 1963) je uredila propise za opremu pod pritiskom koja se odnosi na izradu i upotrebu parnih kotlova, parnih sudova, pregrejača pare i zagrejača vode. Zanimljivo je, da je ostala ista granica unutrašnjeg natpritiska na koju se odredbe propisa ne odnose, od navedenog pravilnika [17] do pripisa koji su i danas u primeni, da unutrašnji natpritisk ne prelazi 0,5 bar-a. Takođe je zanimljivo i to da je tada bila izvršena podela u pogledu veličine parnih kotlova na male, srednje i velike. Gde su poredbene karakteristike bile: 1) sadržina vode pri punjenju do linije najnižeg vodostaja sa granicama od 1 i 1,5 m³, 2) radni pritisak nije veći od 6 i 12 bar-a, 3) unutrašnji prečnik nije veći od 1200 i 1300 mm, pri čemu veliki parni kotlovi su prelazili više vrednosti koje su navedene.

2.2 Obeležavanje posuda pod pritiskom

Svaka posuda pod pritiskom mora da ispunjava bitne zahteve za bezbednost koja su propisana i primenjuju se samo ako postoji odgovarajuća opasnost od opreme pod pritiskom kada se ona koristi pod uslovima koje je predvideo proizvođač. Proizvođač mora da analizira opasnosti, da bi odredio one opasnosti od pritiska koje se odnose na njegovu opremu pod pritiskom. Pri projektovanju i izradi, analiza opasnosti se mora uzeti u obzir. Bitni zahtevi za bezbednost moraju da se tumače i primene tako što se uzima u obzir najsavremenija i važeća dobra praksa u vreme projektovanja i izrade, kao i tehničke i ekonomske činjenice koje su u skladu sa visokim stepenom zaštite zdravlja i opšte bezbednosti.

Ukoliko se posmatraju sve posude pod pritiskom koje su ugrađene na teritoriji Republike Srbije, ukupna bezbednost opreme pod pritiskom čini značajan deo energetske bezbednosti koja predstavlja važnu komponentu stabilnosti energetskeg sistema. U tom smislu se vrši i procena ukupne starosti posuda pod pritiskom, odnosno životnog ciklusa posuda pod pritiskom. Kao i kompletne opreme pod pritiskom u širem smislu, koja se takođe mora sa akademskim pristupom dobro sagledati.

Posude pod pritiskom se proizvode pojedinačno ili serijskom proizvodnjom. U oba načina proizvodnje, posude pod pritiskom moraju biti propisno obeležene zbog njene identifikacije. Minimalno potrebni podaci koji su potrebni za identifikaciju posude pod pritiskom, moraju biti obeleženi na uočljivom mestu gde su postavljene na posudi, kako bi se iz tih informacija moglo pristupiti kompletnoj tehničkoj dokumentaciji. Primenom pravilnika [10] oznake i natpisi kojima su obavezno

označeni proizvodi su: 1) godina proizvodnje, 2) identifikacija opreme pod pritiskom prema karakteristikama, kao što je tip, identifikacija serije ili partije i serijski broj ili fabrički broj, 3) bitne najveće i najmanje dozvoljene radne parametre, 4) zapervina (V) opreme pod pritiskom izražena u litrama (l), 5) ispitni pritisak (PT) izražen u bar-ima (bar) i datum ispitivanja pritiskom. 6) osnovna namena, odnosno naziv posude pod pritiskom, 7) naziv i grupa fluida koji sadrži posuda pod pritiskom, 8) masa prazne posude pod pritiskom izražena u kilogramima (kg), 9) najveća masa pumenja posude izražena u kilogramima (kg), 10) koeficijent punjenja izražena u kilogramima po litru (kg/l), 11) kod primera razmenjivača toplote, odnosno razmenjivače toplotne snage posuda pod pritiskom, obeležava se snaga opreme pod pritiskom izražena u kilovatima (kW), na primeru kod upotrebe električnih grejača i napojni napon izražen u voltima (V). Ukoliko su u pitanju cevovodi umesto podatka o zapremini navodi se podatak o nazivnom prečniku cevovoda (DN), a ukoliko su u pitanju sigurnosni uređaji potrebno je navesti podatak o podešenom pritisku otvaranja sigurnosnog uređaja koji je izražen u bar-ima (bar).

Osim navedenih podataka mora se obeležiti znak usaglašenosti prema članu 19. i sa definisanim oblikom propisanim u prilogu V navedenim u Pravilniku o opremi pod pritiskom [10] ili ako se primenjuje Pravilnik o jednostavnim posudama pod pritiskom [11], označavanje usaglašenosti član 16. i sa definisanim oblikom propisanim u prilogu V. Potrebno je istaći da se znak usaglašenosti ne obeležava ukoliko je oprema pod pritiskom i/ili sklopovi kod kojih su radni uslovi niži ili jednaki vrednostima iz člana 5. tehnički zahtevi stava 1. i 2., prema Pravilniku o opremi pod pritiskom [10].

Dodatno označavanje, pored propisanog načina označavanja posuda pod pritiskom može biti od važnosti za identifikaciju posuda pod pritiskom. Dodatne oznake na natpisnim pločicama mogu biti: 1) debljina zida osnovnih materijala (cilindričnog omotača, danca) od kojih je izrađena posuda pod pritiskom, 2) oznaka osnovnih materijala, 3) predviđeno vreme upotrebe posude pod pritiskom određene pri projektovanju posude pod pritiskom izraženo na godišnjem nivou, 4) upozorenje na opremi pod pritiskom kojim se skreće pažnja na nepravilnu upotrebu koja je poznata iz prakse.

Autorov predlog za poboljšanje načina dodatnog obeležavanja opreme pod pritiskom koje bi ukazivalo na razliku opreme pod pritiskom visokog i niskog nivoa opasnosti. Nakon sprovedenog postupka razvrstavanja opreme pod pritiskom prema pravilniku [12] izdaje se izveštaj o razvrstavanju opreme pod pritiskom, nakon toga bi se postavila oznaka na opremu pod pritiskom, koja može biti u vidu nalepnice sa određenim grafičkim znakom obaveštenja da je u pitanju oprema pod pritiskom visokog ili niskog nivoa opasnosti. Oznaka za opremu visokog nivoa opasnosti bi sadržila broj evidencionog lista kako bi se mogla izvršiti identifikacija i jasnije uočila oprema pod pritiskom koja je zavedena u centralni registar opreme pod pritiskom ministarstva energetike. Grafički simboli za takvo obeležavanje bi bili uređeni po uzoru na Pravilnik o klasifikaciji, pakovanju, obeležavanju i oglašavanju hemikalije i određenog proizvoda u skladu sa Globalno harmonizovanim sistemom za klasifikaciju i obeležavanje UN („Službe-ni glasnik RS”, br. 105/13, 52/17 i 21/19).

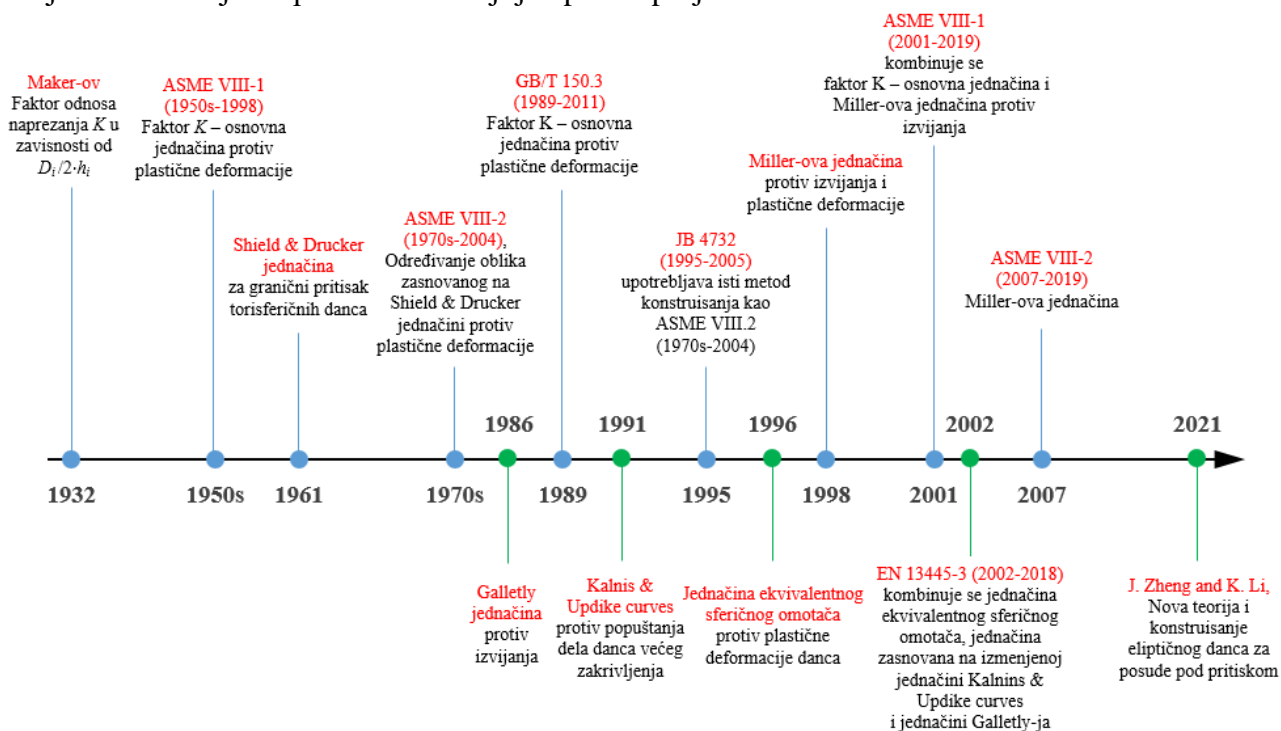
Označavanje opreme pod pritiskom vrši proizvođač opreme pod pritiskom. Postoje slučajevi u kojima se obaveze proizvođača primenjuju na uvoznika i distributera, kada se smatraju proizvođačem, u smislu pravilnika [10] član 11. podležu zahtevima proizvođača kada opremu pod pritiskom ili sklop stavljaju na tržište pod svojim ili trgovačkim znakom ili kada izmeni opremu pod pritiskom ili sklop koji su već stavljeni na tržište na takav način da to može da utiče na usaglašenost sa zahtevima ovog pravilnika. Važno je istaći da prema Pravilniku o opremi pod pritiskom [10], članu 6. slobodan promet, stav 2., kada je oprema ili sklop pod pritiskom namenjen korišćenju u Republici Srbiji oznake i uputstva koja su neophodna za bezbednu i pravilnu upotrebu opreme pod pritiskom a to su oznake i natpisi, kao i uputstva za rad moraju biti na srpskom jeziku.

U čestim opravdanim slučajevima kada se moraju zameniti natpisne pločice opreme pod pritiskom u uslovima transporta, skladištenja, ugradnje ili premeštanja na drugu lokaciju, kao i kada je u upotrebi dugi niz godina, može doći do oštećenja. U tim slučajevima postupak za zamenu se opisuje u članu 5. stav 7. koji glasi: U slučaju kada se projektne karakteristike ne mogu očitati sa natpisne pločice, odnosno kada je natpisna pločica potpuno ili delimično uništena može se na osnovu projektnih karakteristika iz tehničke dokumentacije opreme pod pritiskom postaviti nova natpisna pločica sa projektnim karakteristikama. Postavljanje nove natpisne pločice na opremi pod pritiskom

postavlja se pod nadzorom imenovanog tela za ocenjivanje usaglašenosti opreme pod pritiskom, o čemu se sastavlja odgovarajući izveštaj o kontrolisanju čitavog postupka. Na ovaj način oprema pod pritiskom koja nije proizvedena u Republici Srbiji, a uvozom je došla na naše tržište, može se propisno zameniti natpisna pločica i prilagoditi srpskom jeziku ili biti višejezičnog sadržaja.

3 Razvoj metoda konstruisanja posuda pod pritiskom primenjene na eliptičnim dancima

Eliptična danca se koriste kao završni zatvarači posuda pod pritiskom zbog njihovog dobrog primanja opterećenja i lakoće izrade. Tehnologija izrade omogućava da se proizvode do prečnika od 43 m i veoma tanka eliptična danca sa odnosom prečnika i debljine do 1000. Prema konstrukcionom pogledu, prečnik danca određuje prečnik cilindričnog omotača. Razvojem tehnologije izrade danca značajno se uticalo na mogućnost izrade opreme pod pritiskom većih radnih zapremina², kao i povećanja najvećih dozvoljenih pritisaka³ za koji je oprema projektovana.



Slika 5. Grafički prikaz metoda konstruisanja primenjene na eliptičnim dancima [2]

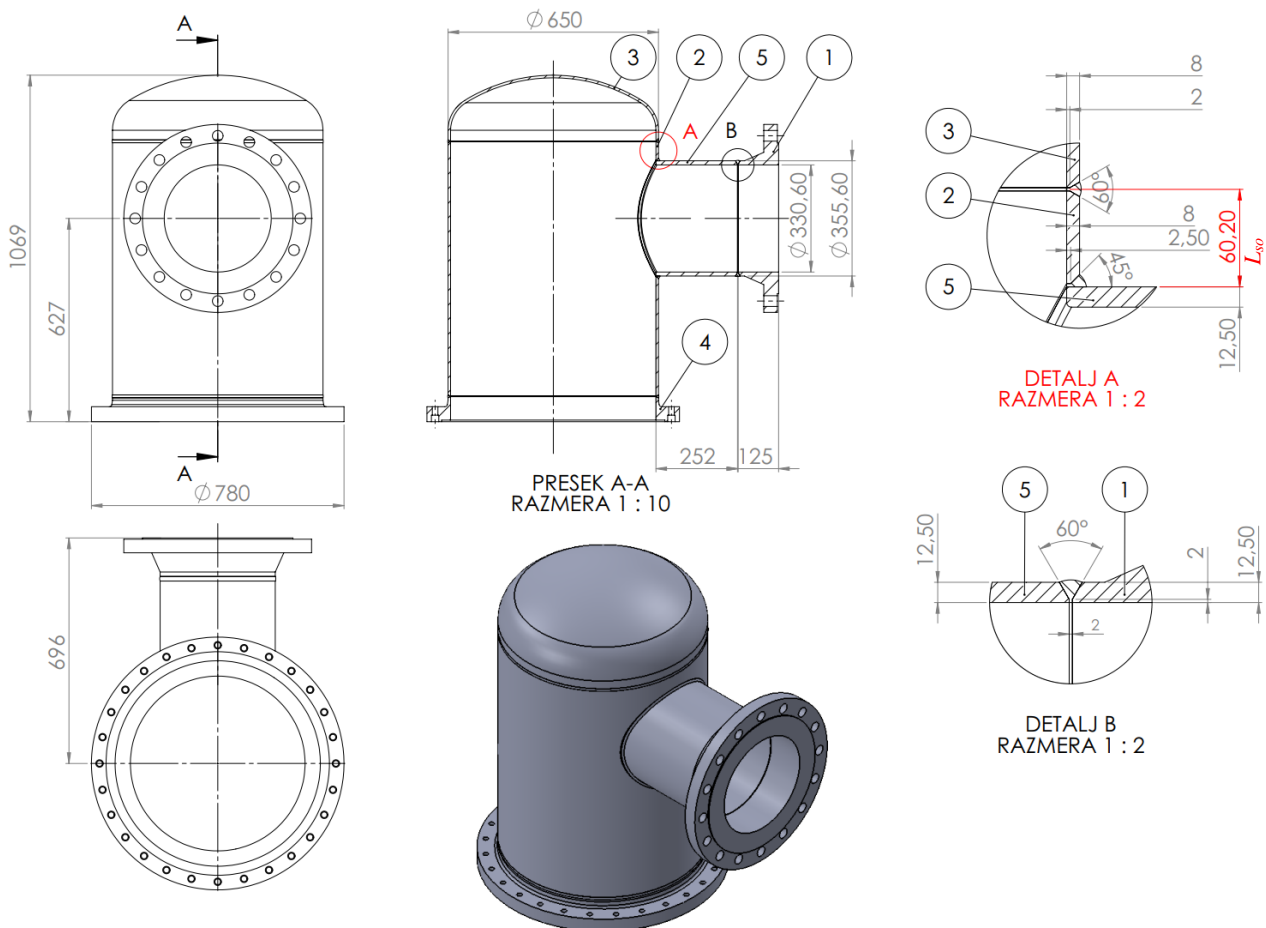
Na slici 5 prikazan je takođe uporedni grafički prikaz, koji nam omogućava da se jasnije vizuelno sagleda hronološki način usavršavanja proračunskih modela, koje su značajno uticale na razvoj posuda pod pritiskom tokom godina proizvodnje i upotrebe. Analiza navedenih metoda nije obuhvaćena i predviđena ovim radom zbog same složenosti navedenih proračunskih metoda.

4 Određivanje približne vrednosti minimalne debljine zida cilindričnog omotača

Na slici 6, prikazana je gornja komora koja predstavlja sastavni deo posude pod pritiskom. Komora se sastoji od pet delova koji su opterećeni unutrašnjim natpritisakom. Cilindrični omotač (pozicija 2), torisferično dance (poz. 3), prirubnica sa grlom (poz. 4), cilindrični omotač priključka (poz. 5) i prirubnica sa grlom (poz. 1). Navedene pozicije su obeležene na slici poprečnog preseka A-A, gde se uočavaju dva detalja koja su obeležena slovnim oznakama A i B.

² Zapremina (V) – unutrašnja zapremina komore, uključujući i zapreminu priključka do prvih spojeva ili zavarenih spojeva, a bez zapremine stalnih unutrašnjih delova.

³ Najveći dozvoljeni pritisak (PS) – najveći dozvoljeni pritisak za koji je oprema projektovana i koji je utvrdio proizvođač; ovaj pritisak se utvrđuje za određeno merno mesto na opremi, koje odredi proizvođač; mesto mora biti u blizini uređaja za zaštitu ili ograničenje ili na najvišoj tački na opremi, ili ako je to moguće, na drugom mestu koji je odredio proizvođač.



Slika 6. Komora gornja, posude pod pritiskom

Detalj A: Dva zavarena spoja, prvi je sučeoni zavareni spoj koji spaja cilindrični omotač (poz. 2) i torisferično dance (poz. 3), drugi je ugaoni zavareni spoj koji spaja cilindrični omotač (poz. 2) i cilindrični omotač priključka (poz. 5).

Detalj B: Sučeoni zavareni spoj priрубnice sa grlom (poz. 1) i cilindričnog omotača priključka (poz. 5).

Na detalju A uočava se rastojanje između dva zavarena spoja (L_{so}) iznosi 60.20 mm, čija je kota obeležena crvenom bojom. Ukoliko je ova vrednost pri konstruisanju određena primenom standarda 13445-3 [18] može se uspostaviti veza između ove dimenzije i spoljašnjeg prečnika cilindričnog omotača koja iznosi 650 mm, da bi se odredila približna vrednost minimalne debljine zida koja je određena pri projektovanju cilindričnog omotača. Minimalna debljina zida koja je određena pri projektovanju cilindričnog omotača mora biti manja od usvojene debljine zida cilindričnog omotača ($e_{c,a}$) koja iznosi 8 mm (poz. 2).

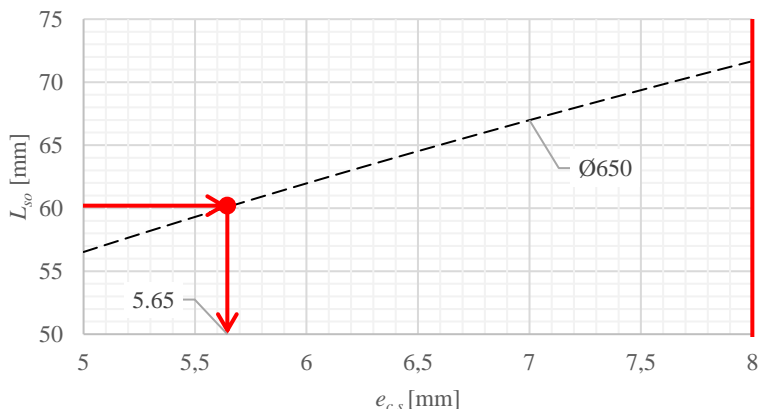
$$L_{so} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{c,s}) \cdot e_{c,s}} \quad (1)$$

Upotrebom prikazane jednačine (1) za cilindrični omotač spoljašnjeg prečnika 650 mm napravljen je grafički prikaz koji je predstavljen na slici 7. Gde je na ordinati prikazana vrednost rastojanja između dva zavarena spoja L_{so} sa intervalom od 50 do 75 mm, a na apscisi približna vrednost minimalne debljine zida cilindričnog omotača $e_{c,s}$ sa intervalom od 5 do 8 mm, pri čemu granica od 8 mm je obeležena linijom crvene boje kako bi se istakla vrednost debljine zida materijala koji je ugrađen. Takođe ova vrednost je upotrebljena i za određivanje linije prečnika omotača radi preciznijeg očitavanja vrednosti debljine zida cilindričnog omotača. Da bismo odredili približnu proračunsku vrednost minimalne debljine zida cilindričnog omotača, koja mora biti manja od ugrađene debljine zida, posmatra se isprekidana linija obeležena crnom bojom koja predstavlja vrednost prečnika cilindričnog omotača od 650 mm. Merenjem i očitavanjem vrednosti L_{so} unosi se

podatak na dijagram da bi se odredila presečna tačka na isprekidanoj liniji, a zatim na apscisi očitala vrednost 5,65 mm. Za ovaj slučaj i na ovaj način, u praksi dovoljno pomaže da se približno odredi da je vrednost u granicama od 5,5 do 6 mm, prikazano je u jednačinama (2) i (3).

$$e \leq e_{c,s} \leq e_{c,a} \quad (2)$$

$$e \leq 5,5 \div 6 \leq 8 \quad (3)$$



Slika 7. Dijagram za približno očitavanje minimalne debljine zida omotača

Da bi se u praksi mogao primeniti ovakav način kontrolisanja, na slici 8. je prikazana prilagođena slika 7. sa većim intervalima vrednosti na ordinati i apscisi, radi primemne za veći broj različitih prečnika omotača. Na ordinati interval je od 30 do 140 mm, a na apscisi interval je od 5 do 20 mm, dok je obeležen veći broj linija koje predstavljaju različite prečnike cilindričnih omotača i one obuhvataju prečnike od 200 do 1000 mm. Za prikaz linija je upotrebljena jednačina (4) koja predstavlja izmenjenu jednačinu (1), gde je za definisanje srednjeg prečnika cilindričnog omotača usvojena srednja vrednost najniže i najviše vrednosti debljine zida cilindričnog omotača, koja se dobija prema usvojenom intervalu apscise prikazane na dijagramu. Vertikalna linija obeležena crvenom bojom predstavlja vrednost debljine zida iz navedenog primera sa slike 7. kako bi se moglo jasnije uvideti razlika između dijagrama koji su prikazani na slikama 7 i 8.

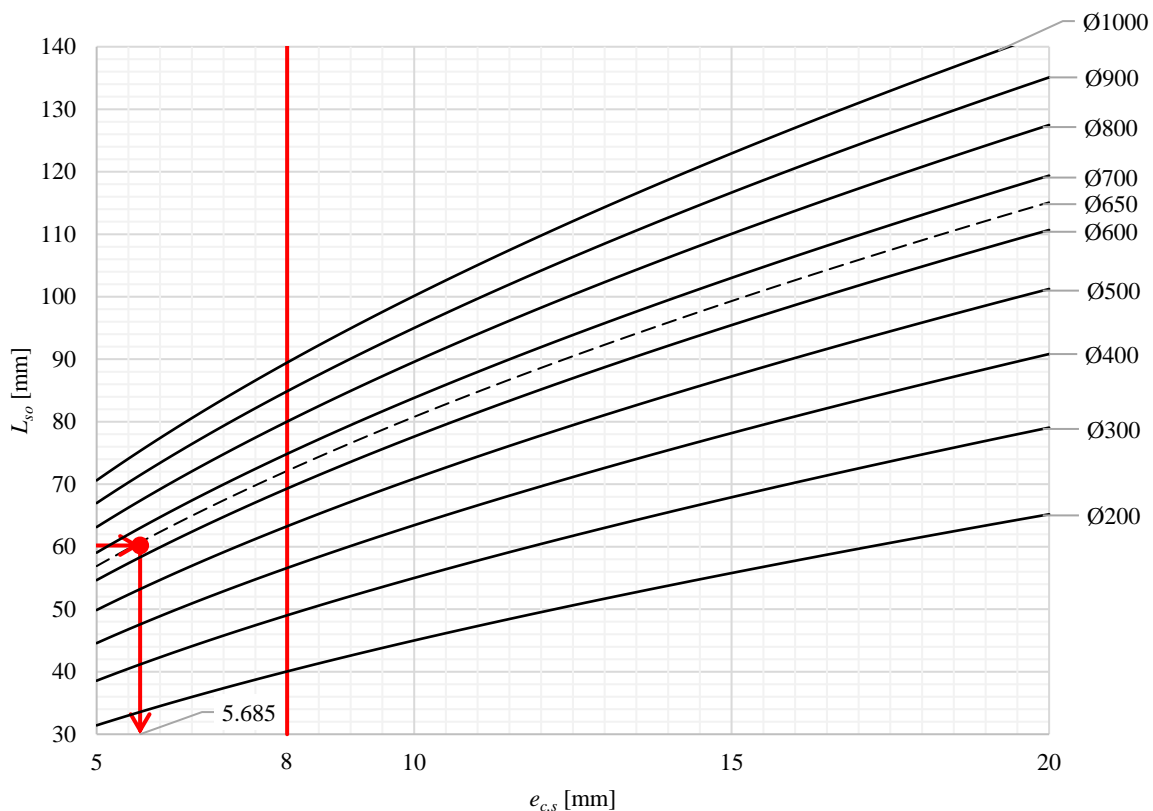
$$L_{so} = \sqrt{(D_s - C_e) \cdot e_{c,s}} \quad (4)$$

$$C_e = \frac{e_{c,s,max} + e_{c,s,min}}{2} \quad (5)$$

Sada se dijagramom može vršiti očitavanje vrednosti velikog broja različitih tipova posuda pod pritiskom, na primer rezervoara za komprimovan vazduh koji se često upotrebljavaju u proizvodnim halama automobilske industrije, tekstilne industrije, itd., razdelnicima i sabirnicima vodene pare koji se često nalaze u toplotnim podstanicama, itd.

Kada se vrši merenje debljine zida cilindričnog omotača ultrazvučnom metodom, ovakav način za upoređivanje očitanih vrednosti može biti od velike pomoći dok se prover i dobije tačna proračunska vrednost, koja je određena i nalazi se u tehničkoj dokumentaciji posude pod pritiskom.

Usvojene su pretpostavke: 1) pri određivanju linije prečnika cilindričnog omotača koristi se spoljašnji prečnik, a ne unutrašnji poluprečnik jer nisu definisane debljine zida cilindričnih omotača koje želimo da odredimo, 2) pretpostavljena je debljina zida cilindričnih omotača od 12,5 mm upotrebom jednačine (5) prema dijagramu slika 8. kako bi se mogle nacrtati linije prečnika cilindričnih omotača.



Slika 8. Dijagram za približno očitavanje minimalne debljine zida omotača (za debljine zida omotača od 5 do 20 mm i prečnike omotača od 200 do 1000 mm)

Funkcionalnost ove metode potvrđuje i to da greška pri formiranju linije prečnika, kao i ulazna veličina L_{so} ne utiče značajno na vrednost očitavanja približne debljine zida cilindričnog omotača sa dijagrama čija greška je manja od 1% na prikazanom primeru. Treba imati u vidu da postoji greška pri merenju ultrazvučnom metodom za merenje debljine zida materijala izazvana izborom sonde, kalibracije uređaja, greške pri merenju. Ukupna greška pri merenju ultrazvučnom metodom ako je veća od greške pri upotrebi ovog dijagrama, metoda koja je opisana na ovakav način je dokazana.

Najvažnije je da se pri projektovanju i izradi, priključak na cilindričnom omotaču postavi na tačno određeno rastojanje od zavarenog spoja, koja se najčešće uočava kada je posuda pod pritiskom isprojektovana poput navedenog primera na slici 6. gde je to bio geometrijski preduslov za ugradnju komore u sklop posude pod pritiskom i vezu sa drugom posudom pod pritiskom.

5 Zaključak

U uvodnom delu su navedeni jednostavni i složeni oblici posuda pod pritiskom, opisan tehnološki proces u kom se sagledava način povezivanja u tehnološku celinu opreme pod pritiskom. Navedena je njegova ukupna upotrebna efikasnost koja se javlja pri ne uniformnom odabiru opreme i definisanju tehničkih zahteva.

U domaćoj i stranoj literaturi postoji veliki broj članaka o evropskoj direktivi za posude pod pritiskom kao i za pravilnike o opremi pod pritiskom. U ovom radu je dat poseban osvrt na identifikaciju opreme pod pritiskom prema pravilnicima koji su u upotrebi u Republici Srbiji, a usklađeni su sa direktivama Evropskog parlamenta i Saveta. U delu teksta 2.2 navedeno je na koji način se vrši obeležavanje posuda pod pritiskom, prema važećem pravilniku za opremu pod pritiskom u Republici Srbiji [12].

Autorov predlog za poboljšanje načina označavanja posuda pod pritiskom gde se vrši obeležavanje radi vizuelnog iskazivanja koja je oprema visokog nivoa opasnosti, a koja je oprema niskog nivoa opasnosti, ovakav način obeležavanja može značajno da pomogne pri pregledu opreme pod

pritiskom koja je u upotrebi, sa time da se ne umanjuje važnost opreme pod pritiskom niskog nivoa opasnosti koja je u upotrebi. Takođe taj način vizuelnog obeležavanja bi povećao pažnju i opreznost pri upotrebi korisnika opreme pod pritiskom.

Navedeno je 14 metoda za projektovanje i konstruisanje primenjenih na dancima koja sadrži poslednju metodu koja je navedena a objavljena pod nazivom "Nova teorija i dizajn elipsoidnih danca za posude pod pritiskom" iz 2021. godini [2].

Ovim radom je prikazano upoređivanje između razvoja konstruisanja posuda pod pritiskom i razvoja tehničkih propisa tokom vremena iskazanim na godišnjem nivou koje prati upotrebu posuda pod pritiskom. Prikazano je na slikama 4 i 5.

Prikazan je autorov način za određivanje približne vrednosti minimalne debljine zida cilindričnog omotača. Ovaj način može da se primeni na opremi pod pritiskom koja je u radu, za potrebe približnog određivanja debljine zida cilindričnog omotača.

6 Nomenklatura

- VS_1 – ventil sigurnosti koji je ugrađen na posudi broj 1
 VS_2 – ventil sigurnosti koji je ugrađen na posudi broj 2
 PT – ispitni pritisak, [bar]
 DN – nazivni prečnik cevovoda, [mm]
 V – zapermina, [l]
 L_{so} – rastojanje između dva zavarena spoja, [mm]
 r_{is} – unutrašnji poluprečnik cilindričnog omotača, [mm]
 D_s – spoljašnji prečnik cilindričnog omotača, [mm]
 C_e – korekciona vrednost za izradu dijagrama, [mm]
 $e_{c,a}$ – usvojena debljina zida cilindričnog omotača, [mm]
 $e_{c,s}$ – približna vrednost minimalne debljine zida cilindričnog omotača, [mm]
 $e_{c,s,min}$ – najmanja približna vrednost minimalne debljine zida cilindričnog omotača, [mm]
 $e_{c,s,max}$ – najviša približna vrednost minimalne debljine zida cilindričnog omotača, [mm]
 e – proračunska vrednost minimalne debljine zida cilindričnog omotača bez dodataka, [mm]

7 Literatura

- [1] **Isailović, M., Bogner, M.**, *Tehnički propisi o posudama pod pritiskom*, SMEITS, 2003.
- [2] **Jinyang, Z., Keming, L.**, *New Theory and Design of Ellipsoidal Heads for Pressure Vessels*, Springer Nature Singapore Pte Ltd, Singapore, Singapur, 2021.
(https://doi.org/10.1007/978-981-16-0467-6_4)
- [3] **Somnath, C.**, *Pressure Vessels, Design and Practice*, CRC Press, Boca Raton, Sjedinjene Američke Države, 28.10.2004.
- [4] **John, F. H.**, *Theory & Design of Pressure Vessels*, Van Nostrand reinhold Company, New York, Sjedinjene Američke Države, 1997.
- [5] ***, *The Pressure Equipment Directive (PED), the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment* („Official Journal of the European Union”, No. 2014/68/EU), European Parliament and of the Council, 15.05.2014.
- [6] ***, *The Pressure Equipment Directive (PED) the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of simple pressure vessels* („Official Journal of the European Union”, No. 2014/29/EU), European Parliament and of the Council, 26.02.2014.
- [7] ***, *The Pressure Equipment Directive (PED)* („Official Journal of the European Communities”, br. 97/23/EC), European Parliament and of the Council, 29.05.1997.
- [8] ***, *Zakon o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju isaglašenosti* („Sl. glasnik RS”, br. 114/2021. od 14.05.2021. godine.), Narodna skupština Republike Srbije, 14.05.2021.

- [9] ***, *Zakon o izmenama i dopunama Zakona o privrednim društvima* („Službeni glasnik RS“, 44/2018. od 08.06.2018. godine), Narodna skupština Republike Srbije, 08.06.2018. (primenjuje se od 09.juna 2018 god.)
- [10] ***, *Pravilnik o opremi pod pritiskom* („Sl. glasnik RS“, br. 114/2021. od 30.11.2021. godine.), Ministarstvo rudarstva i energetike, 23.11.2021. (primenjuje se od 01.januara 2023 god.)
- [11] ***, *Pravilnik o jednostavnim posudama pod pritiskom* („Sl. glasnik RS“, br. 114/2021. od 30.11.2021. godine.), Ministarstvo rudarstva i energetike, 23.11.2021. (primenjuje se od 01.jula 2023 god.)
- [12] ***, *Pravilnik o pregeldima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe* („Sl. glasnik RS“, br. 114/2021 od 30.11.2021. godine), Ministarstvo rudarstva i energetike, 23.11.2021. (primenjuje se od 01.januara 2023 god.)
- [13] ***, *Pravilnik o tehničkim zahtevima za projektovanje, izradu i ocenjivanje usaglašenosti opreme pod pritiskom* („Službeni glasnik RS“, br. 87/2011. od 21.11.2011. godine), Ministarstvo za infrastrukturu i energetiku, 19.10.2011. (primenjuje se od 01.jula 2012 god.)
- [14] ***, *Pravilnik o pregledima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe* („Službeni glasnik RS“, br. 87/2011. od 21.11.2011. godine, 75/2013. od 25.08.2013. godine i 44/2018. od 08.06.2018. godine - drugi zakon), Ministarstvo za infrastrukturu i energetiku, 19.10.2011. (primenjuje se od 01.jula 2012 god.)
- [15] ***, *Pravilnik o izmenama Pravilnika o pregledima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe* („Službeni glasnik RS“, br. 75/2013. od 25.08.2013. godine), Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, 19.08.2013.
- [16] ***, *Pravilnik o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom* („Službeni list SFRJ“, br. 16/1983. od 01.04.1983. godine.), Savezni zavod za standardizaciju, 17.01.1983.
- [17] ***, *Pravilnik o tehničkim propisima za izradu i upotrebu parnih kotlova, parnih sudova, pregrejača pare i zagrejača vode* („Službeni list FNRJ“, br. 7/1957, 22/1957, 3/1958., „Službeni list SFRJ“, br. 56/1972 i 61/1972. od 28.02.1957. godine), Savezni zavod za standardizaciju
- [18] ***, *Standard SRPS EN 13445-3:2021 Posude pod pritiskom koje nisu izložene plamenu – Deo 3: Projektovanje*, Institut za standardizaciju Srbije 31.08.2021.

CFD ANALIZA PARKINGA SA JET VENTILATORIMA

CFD ANALYSIS OF CAR PARK AREA WITH JET-FANS

Jusuf IBRULJ*, Amra HASEČIĆ, Ejub DŽAFEROVIĆ

Univerzitet u Sarajevu, Mašinski fakultet, Sarajevo, BiH

Parkingi se grade tako da obezbede određeni broj auto-mesta za posetioce, kupce i/ili klijente komercijalnog objekta. Podrumi se uglavnom koriste kao zatvoreni parking prostori i nije ih moguće provetravati prirodnim putem. Projekat ventilacionog sistema je generalno zasnovan na lokalnim standardima koje obezbeđuju lokalne vlasti. Stoga, da bi se gustina štetnih gasova zadržala ispod određenih granica, moraju se koristiti ventilacioni sistemi. U ovoj studiji, za parking zatvorene površine 2000 m², projektovan je mlazni ventilatorski sistem i performanse sistema su simulirane pomoću Computational Fluid Dynamics (CFD). Računarska mreža je poliedarska, lokalno rafinirana blizu zidova, poda, stubova i takođe diskretizovanog prostora u 1,4 miliona ćelija. Korišćen je standardni k-ε model turbulencije sa funkcijom zida, između zida i turbulentnog potpuno razvijenog regiona. Ispitani natkriveni parking se nalazi u Tuzli, u 1. suterenu Citi Mall-a. Osnovni cilj ovog projekta je istraživanje protoka vazduha i profila brzine mlaznog ventilatorskog sistema u podzemnom parkingu korišćenjem računarske analize i ispitivanje ventilacionog sistema projektovanog za parking prostore. CFD analiza nam je omogućila da vidimo ispravan položaj mlaznih ventilatora i da odlučimo za najbolji plasman. Rezultati su pokazali da se predloženi izduvni sistem za parkiranje smatra prihvatljivim i nisu potrebne nikakve modifikacije. Dobijeni rezultati su grafički prikazani prikazom profila konture brzine iz pogleda odozgo na četiri različite visine presečene ravni podzemnog parkinga.

Ključne reči: CFD simulacija; garaža; jet ventilatori; turbulencija

Carparks are constructed to provide a certain number of car spaces for visitors, shoppers and/or clients of a commercial facility. Basements are generally used as indoor parking area and it is not possible to ventilate them by natural roads. The required ventilation system design is generally based on local standards provided by local authorities. Therefore, in order to keep the density of harmful gases below certain limits; ventilation systems must be used. In this study, for a parking lot with a closed area of 2000 m²; jet fan system is designed and the performance of the system is simulated with Computational Fluid Dynamics (CFD). Computational mesh is polyhedral, locally refined just near the walls, floor, columns and also discretised space in 1.4 million cells. Standard k-ε turbulence model with wall function, between the wall and the turbulence fully developed region is used. The covered parking area examined is located in Tuzla; It is located on the 1st basement of City Mall. The main objective of this project is to investigate the air flow and velocity profile of jet fan system in an underground car park by using computational analysis and to examine the ventilation system designed for parking areas. The CFD analysis made allowed us to see the correct placement of the jet fans and to decide the best placement. Results showed that the proposed car-park exhaust system was considered acceptable and no modifications were required. The results obtained are presented graphically by showing velocity contour profile from top view at four different heights cut planes of the underground car park.

Key words: CFD-simulation; car park; jet fan; turbulence

* Corresponding author, e-mail: j_ibrulj@yahoo.com

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

ИЗВОРИ ИСПУШТАЊА И ЗОНЕ ОПАСНОСТИ ВОДОНИЧНИХ ИНСТАЛАЦИЈА

SOURCE OF RELEASE ON HYDROGEN INSTALLATIONS AND ITS HAZARDOUS AREAS

Иван АРАНЂЕЛОВИЋ^{1*}, Раденко РАЈИЋ², Никола ТАНАСИЋ²

¹ Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд

² Академија техничких струковних студија Београд, Одсек за саобраћај,
машинство и инжењерство заштите, Београд

У оквиру рада биће дат преглед Српских прописа који дефинишу услове за безбедно држање, складиштење и употребу водоника. Затим ће бити објашњени услови за одлагање водоника у затвореним просторима дефинисани NFPA 55:2020 стандардом и услови за држање водоника у лабораторијама, према NFPA 45:2019 стандарду. У другом делу рада ће бити приказан преглед дефиниција зона опасности око извора испуштања на водоничним инсталацијама који се уобичајено користе у нашој индустрији. У завршном делу рада ће за неке од разматраних извора испуштања бити дефинисане зоне опасности израчунате према SRPS EN 60079-10-1:2017 и NFPA 55:2020.

Кључне речи: водоник; извор испуштања; зона опасности

In this paper Serbian laws, codes and standards which defined usage, storage and transportation of hydrogen will be reviewed. Further will be presented requirements from NFPA 55:2020 for storage of hydrogen in buildings and NFPA 45:2019 for usage of hydrogen in laboratories. In the second part of the paper it will be given definitions of hazardous area on hydrogen installations which are usually used in Serbian industry. In the final part of the paper, for several hydrogen release sources will be defined hazardous areas, according to standards SRPS EN 60079-10-1:2017 and NFPA 55:2020.

Key words: Hydrogen; Source of release; Hazardous area

1 Увод

Водоник има широку примену у савременој хемијској индустрији (хидрогенизација, десулфуризација,...), индустрији неметала (производња стакла и прерада драгог камења, ...), прехранбеној индустрији, производња полупроводника, и сл. Такође се користи као расхладни флуид (хлађење турбина и генератора електричне енергије), носећи гас у гасној хроматографији, за пуњење балона без људске посаде, ... Његове смеше са природним гасом се користе као гориво (градски гас, генераторски гас, ...). Последњих година се доста истражују могућности за примену водоника као горива у моторима са унутрашњим сагоревањем. У нашој држави водоник се најчешће користи као расхладни флуид у електранама и у хемијској индустрији.

И поред тога што је водоник присутан у нашој индустрији више од 60 година, и што приликом рада са њим постоје високи ризици од пожара и експлозија, у нашим техничким прописима нису посебно дефинисане зоне опасности и сигурносна растојања за водоничне инсталације. У наредна два одељка ће бити приказан развој националних и NFPA прописа који се односе на употребу, држање и складиштење водоника.

1.1 Национални прописи који дефинишу употребу, држање и складиштење водоника

Савремено уређење заштите од пожара у Србији почиње доношењем закона [1]. Наведеним прописом је било дефинисано да је доношење прописа из области заштите од

* Corresponding author, e-mail: iarandjelovic@mas.bg.ac.rs

пожара у надлежности федералних органа. 1970. године [1] је повучен и донет је закон [2] који је био привременог карактера. Он је налагао свим федералним јединицама да донесу своје законе о заштити од пожара до 31. децембра 1970, чиме је ова област практично прешла у надлежност федералних јединица, при чему је промет експлозивних материјала остао у надлежности федерације. Доношење подзаконских аката је било углавном у надлежности федерације и поверено је Југословенском заводу за стандардизацију. У периоду до 1992. године у Србији је усвојено само 5 подзаконских акта који нису примењивани у другим федералним јединицама. Детаљнији подаци се могу наћи у раду [3]. Надлежности у области противексплозијске заштите Србија је делимично преузела 1977. године доношењем закона [4]. 1981. године усвојена је (на нивоу федерације) група стандарда JUS N.S.*** којима је регулисана област противексплозијске заштите. Ти стандарди су у то време били декларисани као технички стандарди са обавезном применом, и практично су били идентични са европским стандардима групе IEC 79. Обавезност примене наведених стандарда била је потврђена правилником [5]. Неки од стандарда групе IEC 79 су промењени 1986. године, након чега су 1991. године усвојене нове верзије одговарајућих стандарда групе JUS N.S.***, чија је обавезност примене потврђена правилником [6]. Данас су у европским земљама стандарди групе IEC 79 замењени стандардима групе EN 60079, а код нас је група хармонизованих прописа SRPS EN 60079 заменила групу JUS N.S.***. Доношењем закона [7] престали су да важе чланови закона [4] који се односе на запаљиве течности и запаљиве гасове.

Једини национални пропис који се директно бави мерама заштите од пожара и експлозије приликом употребе, држања и складиштења водоника јесте [8], али се он односи само на специфичне примене везане за производњу електричне енергије. Наведени пропис не дефинише сигурносна растојања и зоне опасности.

Средином седамдесетих година прошлог века, Савезни завод за стандардизацију је припремио нацрт правилника [9], који никад није усвојен, али је коришћен као техничка препорука приликом пројектовања одржавања, изградње и реконструкције инсталација које користе водоник. Иако наведени нацрт прописа никад није објављен у целини, зоне опасности које је он дефинисао могу се наћи у књигама [10] и [11]. Истичемо да су се оне одлично показале у пракси и да су једине две забележене експлозије водоника на исталацијама које су пројектоване у Србији последица лошег одржавања предметних инсталација. Једна од њих је експлозија у невентилисаног акумулаторској станици која је детаљно описана у [12], а друга је експлозија у погону за електролитичку производњу водоника у термолектрани у Обилићу 6. јуна 2014. године.

На основу наведеног у нашој држави се на употребу, држање и складиштење водоника директно односе прописи [13], [7], [14], [8] и [15], а [16] и [17] индиректно.

1.2 NFPA стандарди који дефинишу употребу, држање и складиштење водоника

Употреба, држање и складиштење водоника дефинисана је стандардом [18]. У периоду од 1969. до 2005. у употреби је био стандард [19] који је био посвећен компримованом водонику а од 1968. до 2005. стандард [20] који је био посвећен утечњеном водонику. Од 2005. године оба наведена подручја примене су припојена стандарду [18]. Инсталације које се користе у хемијским лабораторијама су изузете из претходно споменутог и предмет су посебног стандарда [21].

2 Општи услови за употребу, држање и складиштење водоника

Према [7] држање запаљивих гасова је њихово чување или одлагање у грађевинским објектима, или изван њих, тако да њихова укупна маса не прелази 30 kg. Складиштење запаљивих гасова је њихово трајно или повремено безбедно смештање, при чему њихова укупна маса је већа од 30 kg. У тексту који следи за држање односно складиштење користећемо јединствен термин – одлагање.

Водоник се у Србији користи као компримовани гас, и може се набавити у боцама различитих запремина у којима је притисак 150 bar или 200 bar.

2.1 Одлагање водоника на отвореном простору

Националним прописима за место одлагања водоника на отвореном простору независно од тога да ли се одлагање врши у трајлеру, резервоару или батерији боца постављеној испод надстрешнице, нису дефинисана сигурносна растојања. Опште сигурносно растојање применљиво за све запаљиве гасове дефинисано је чланом 48 закона [13] и износи 6 m од производног објекта. У случају да се ради о пословном, стамбеном или јавном објекту ово растојање би требало повећати најмање на 10 m колико износи сигурносно растојање прописано правилником [17], за компримовани природни гас.

Обавезне мере заштите приликом одлагања водоника на отвореном простору су прописане законом [7] и су изложене у следећој Табели.

Табела 1 – Мере заштите приликом одлагања водоника на отвореном простору

	обавеза	правни основ
1.1	неопходно је извести стабилни систем за ручну дојаву пожара	[7] - члан 10
1.2	неопходно је имати безбедоносну расвету	[7] - члан 13
1.3	неопходно је извести заштиту од статичког електрицита	[7] - члан 14
1.4	неопходно је извести заштиту од атмосферског пражњења	[7] - члан 15
1.5	неопходно је поставити одговарјуће апарате за гашење пожара	[7] - члан 15
1.6	радно ангажована лица морају имати положен стручни испит из области заштите од пожара	[7] - члан 21

2.2 Коришћење или одлагање водоника у грађевинском објекту

Приликом коришћења или одлагања водоника у затвореном простору према закону, уколико се у предметном простору може формирати експлозивна атмосфера, обавезне мере заштите су прописане законом [7] и су изложене у следећој Табели.

Табела 2 – Мере заштите приликом коришћења или одлагања водоника у грађевинском објекту

	обавеза	правни основ
2.1	у објекту мора бити изведен стабилни систем за дојаву пожара	[7] - члан 10
2.2	просторије у којима се одлаже или користи водоник морају бити издвојене у пожарне секторе	[7] - члан 11
2.3	просторије у којима се одлаже или користи водоник морају бити имати експлозивни одушак	[7] - члан 12
2.4	просторије у којима се одлаже или користи водоник морају имати безбедоносну расвету	[7] - члан 13
2.5	просторије у којима се одлаже или користи водоник морају имати систем заштите од статичког електрицита	[7] - члан 14
2.6	у објекту мора бити изведен стабилни систем за заштиту од атмосферског пражњења	[7] - члан 15
2.7	неопходно је поставити одговарјуће апарате за гашење пожара	[7] - члан 15
2.8	радно ангажована лица морају имати положен стручни испит из области заштите од пожара	[7] - члан 21

Поред наведеног према правилнику [16] објекти у којима се одлаже или користи водоник не могу имати степен отпорности према пожару мањи од III. Такође према правилнику [14], индустријски објекти морају бити изведени тако да се спречи преношење пожара и

ефеката експлозије на објекте суседа. Испуњеност овог захтева постиже се безбедносним растојањем и/или изградњом посебног зида према суседу који може спречити пренос експлозивне смеше, пожара и ефеката експлозије (ударног таласа, летећих фрагмената и сл.) на суседни објекат. Правилником [14] дефинисано је да се безбедносно растојање одређује прорачуном у складу са српским или страним прописом којим је обухваћена методологија одређивања, уз сагласност надлежног органа за заштиту од пожара, али да оно не може бити мање од 9 m.

Услови које мора да испуни просторија намењена за одлагање водоника у грађевинском објекту, према [18], су дати у следећој табели:

Табела 3 – Услови за одлагање водоника у грађевинском објекту, према [18]

	обавеза	напомена
3.1	зидови, подови и плафон морају бити израђени од негоривог материјала	[18] – 6.5.1
3.2	цела површина унутрашњих зидова мора имати ватроотпорност већу од 2 сата	[18] – 6.5.1.1
3.3	најмање 25 % обима просторије мора бити фасадни зид	[18] – 6.5.1.2
3.4	отвори на унутрашњим зидовима, поду и плафону нису дозвољени	[18] – 6.5.1.3
3.5	обезбеђен подпритисак у просторији принудном вентилацијом не слабијом од $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$	[18] – 6.5.2 [18] – 6.17.3.2
3.6	у сфери полупречника 15 m око места испуштања ваздуха из система за вентилацију не смеју се постављати спољне јединице за климатизацију нити било какви други компресорски уређаји	[18] – 6.17.6
3.7	просторије у којима се користи или одлаже водоник најмање су 6 m удаљене од места усисавања ваздуха у систем за вентилацију	[18] – 6.17.7
3.8	обезбеђен експлозивни одушак	[18] – 6.5.3
3.9	количина водоника која се одлаже не сме да буде већа од 425 Nm^3	[18] – 6.6

Напомињемо да се наведене дефиниције (негоривост, ватроотпорност, ...) морају бити преузете NFPA стандарда, који се разликују од средњоевропских. Поред тога објекат у коме се налази просторија у којој се врши одлагање водоника мора испуњавати и све остале услове прописане NFPA стандардима.

Услови за коришћење водоника у хемијским лабораторијама дефинисани су у стандарду [21]. Он је тешко применљив у нашим условима јер, на пример захтева обавезну уградњу стабилног система за гашење пожара у свим хемијским лабораторијама. Иначе је овим стандардом количина свих запаљивих гасова у наставним хемијским лабораторијама ограничена на $2,8 \text{ Nm}^3$.

3 Зоне опасности

У овом одељку даћемо преглед дефиниција зона опасности за инсталације и уређаје који користе водоник и које се уобичајено користе у нашој индустрији. Оне су одређиване према [22] односно [23], или су преузете из [9]. Такође се могу наћи у књигама [10] и [11].

Поред тога даћемо поређења предметних дефиниција са дефиницијама добијеним прорачуном у складу са важећим техничким прописима.

3.1 Зоне опасности компресора за водоник, смештеног у објекту друге намене

зона опасности 1 – хоризонтално: 1 m око габарита компресора;
вертикално: до плафона просторије,

зона опасности 2 – просторија за смештај компресора, целом запремином;
– 1 m сферно око вентилационог отвора на крову зграде;
– 1 m хоризонтално од зиду са вентилационим отворима и вратима.

Исту распрострањеност зоне 1 имају и остали елементи инсталација за водоник (сушач, филтер и сл.) који су могући извори испуштања.

3.2 Зоне опасности у објекту намењеном за смештај компресора за водоник

Компресорско постројење је у згради, која је слободностојећи објекат, лоциран на нивоу терена. Доња зона просторије и кровна лантерна омогућавају природну вентилацију. Извори испуштања су секундарни: компресорски заптивач, вентил или прирубнички спој.

- зона опасности 2 – хоризонтално: 3 m од извора испуштања у просторији;
вертикално: до плафона просторије,
- зона опасности 2 – хоризонтално: 1 m од вентилационих отвора кровне лантерне;
вертикално: 1 m изнад вентилационог отвора кровне лантерне

3.3 Зоне опасности код сушача водоника (водоником хлађених генератора)

Капацитет: 50 m³/h; радни притисак: 6,1 bar; температура водоника: 45°C.

Секундарни извори испуштања су: спојна места, отвор са провидним поклопцем на кућишту за визуелну контролу силикагела и вентил.

Примарни извор испуштања је испусни отвор цевовода за одвођење водоника у слободан простор изван погонског објекта, јер је повремено присуство запаљивог гаса предвиђено технолошким поступком.

- зона опасности 0 – унутрашња арматура цевовода и апсорбера;
- зона опасности 1 – сфера полупречника 1,5 m од испусног отвора цевовода;
- зона опасности 2 – простор неограничено увис изнад зоне 1;
 - хоризонтално: 3 m око габарита сушача,
 - вертикално: неограничено увис до прве препреке.

3.4 Генератори у термоелектранама са водоничним хлађењем

Кућиште турбогенератора је конструисано као заптивен челични оклоп у коме се налазе статор и ротор генератора, хладњаци водоника, лежајеви вратила и др. Водоник се налази под притиском од 2 – 4 bar, а унутар кућишта принудно циркулише помоћу аксијалних вентилатора на вратилу, кроз расхладне канале дуж намотаја ротора, око намотаја статора и кроз хладњаке водоника. Запремина водоника у кућишту износи 50 – 80 m³, док се укупна количина водоника за пуњење система креће од 200 – 550 m³. Због губитака водоника, из кућишта генератора се дневно у целом систему водоника врши надокнада гаса у количини од 6 – 15 m³. Водоник може да истиче кроз заптивке лежајева кућишта, прирубничких спојева итд. У систему за хлађење генератора водоником налазе се и: гасни панел, сушач водоника, уређаји за дренажу кућишта генератора. Систем уља за заптивање, подмазивање и хлађење лежајева генератора састоји се од уређаја за заптивно уље, хладњаке уља, сабирног и експанзионог резервоара, вентилских станица, дренажа и испуста за издвајање водоника у слободан атмосферски простор.

- Извори опасности генератора хлађеног водоником и његових помоћних уређаја су:
- трајни – испусти водоника из генератора и из система заптивног уља;
 - примарни – дренаже генератора и система водоника;
 - секундарни – кућиште генератора са лежајевима;
 - сви вентили, прирубнички спојеви и заптивачи у инсталацији водоника;
 - анализатори водоника и сушач водоника;
 - сви вентили, прирубнички спојеви, заптивачи у инсталацији уља за заптивање у делу од лежаја генератора до резервоара за издвајање водоника из уља,
 - уљне пумпе.

Зона опасности 0:

- сфера полупречника 1,5 m око испуста водоника из водоничног система;
- сфера полупречника 1,5 m око испуста водоника из система заптивног уља.

Зона опасности 1 (кров машинске сале):

- 3 m око зоне 0.

Зона опасности 2 (кров машинске сале):

- хоризонтално 3 m око границе зоне 1;
- вертикално 12 m изнад границе зоне 1.

Зона опасности 2 (у машинској сали):

- хоризонтално: простор 3 m око габарита кућишта генератора;
- вертикално: до плафона просторије.

3.5 Постројење за регенерацију рабљених уља

Технолошки поступак који је у примени подразумева обраду пропаном и водоником. Фазе технолошког поступка су: филтрирање и одвајање од воде и лаких бензинских фракција, мешање са пропаном и третман водоником. Процесно постројење је на отвореном простору, процес је затвореног типа и сви гасови из процеса се одводе у бакљу и спаљују, а течности сакупљају у колектор.

зона опасности 1 (за водоник): 5 m сферно око врха бакље;

зона опасности 2 (за водоник): 5 m сферно око зоне 1;

5 m сферно око секундарних извора испуштања.

3.6 Покретни резервоари – трајлери за водоник, према [8]

Извори опасности су: трајни – унутрашњост резервоара и примарни – вентил за прикључак на колектор.

зона опасности 0 – унутрашњост трајлера;

зона опасности 1 – хоризонтално: 3 m око трајлера;

вертикално: 7,5 m од највише коте суда.

3.7 Покретни резервоари – трајлери за водоник постављени испод надстрешнице, према [18]

На надстрешници су изведене лантерне.

зона опасности 2 – хоризонтално: 1 m око трајлера;

вертикално: 1 m изнад надстрешнице.

3.8 Отвор малог пречника на водоничној инсталацији у затвореном простору

У раду [24] је разматран као извор испуштања отвор на водоничној инсталацији, површине мање од $0,025 \text{ m}^2$. Прорачуном спроведеним према [15] је показано да се у предметном простору не формирају зоне опасности ако је обезбеђена одговајућа механичка вентилација.

3.9 Прирубница на сушачу водоника (водоником хлађних генератора)

Изведена је на 9,5 m изнад пода просторије, постављена на зиду. Прорачун је урађен у [25], применом стандарда [15].

зона опасности 2 – хоризонтално: 3 m од извора испуштања;

вертикално: до плафона просторије и 3 m испод извора испуштања.

3.10 Прирубница на гасном панелу сушачу водоника (водоником хлађених генератора)

Изведена је на 1,5 m изнад пода просторије, постављена назиду. Прорачун је урађен у [25], применом стандарда [15].

зона опасности 2 – хоризонтално: 2 m од извора испуштања;
вертикално: од пода до плафона просторије.

4 Закључак

На основу претходних разматрања можемо да закључимо да су се дефиниције зона опасности за водоничне инсталације које су коришћене у Србији адекватне, и поред међусобне неусаглашености (упоредите одељке 3.1 и 3.2 или 3.3 и 3.4) зато што на инсталацијама које су пројектоване и изведене у складу са њима није било експлозија, осим у случајевима лошег одржавања. Такође несумњиво је да зоне опасности дефинисане по [17], који је у нашој држави обавезан за примену, су обично уже или их нема. Амерички пропис [21] даје знатно уже зоне (упоредите одељке 3.6 и 3.7) али је тешко применљив у средњеевропским државама зато што предметна инсталација мора испуњавати и све остале услове прописане NFPA стандардима.

5 Литература

- [1] ***, Основни законом о заштити од пожара, Службени лист Федеративне Народне Републике Југославије, 18/1956.
- [2] ***, Општи закон о заштити од пожара, Службени лист Социјалистичке Федеративне Републике Југославије 25/1970.
- [3] **Аранђеловић, И., Р. Рајић, Н. Танасић**, Преглед и класификација националних прописа из области заштите од пожара, Процесна техника (2022), (прихваћен за штампу).
- [4] ***, Закон о експлозивним материјама, запаљивим течностима и гасовима, Службени гласник Социјалистичке Републике Србије 44/1977, 45/1985, 18/1989 и Службени гласник Републике Србије 53/1993, 67/1993, 48/1994, 101/2005.
- [5] ***, Правилник о Југословенским стандардима за противексплозијску заштиту, Службени лист Социјалистичке Федеративне Републике Југославије, 18/1981.
- [6] ***, Правилник о Југословенским стандардима за противексплозијску заштиту, Службени лист Социјалистичке Федеративне Републике Југославије, 62/1991 и 10/1992.
- [7] ***, Закон о запаљивим и горивим течностима и запаљивим гасовима, Службени
- [8] гласник Републике Србије 54/2015.
- [9] ***, Прописи о техничким мерама за изградњу, погон и одржавање електричних генератора и синхроних компензатора хлађених водоником, Службени лист Социјалистичке Федеративне Републике Југославије, 13/1969.
- [10] ***, Нацрт правилника о техничким нормативима за заштиту од пожара и експлозија при пројектовању и изградњи система за водоник, ускладиштавању и коришћењу судова за водоник, Савезни завод за стандардизацију, Београд, 1975.
- [11] **Ерић, М.**, Противпожарна и превентивно техничка заштита, Јел&Мил, Чачак, 2003.
- [12] **Јованов, Р., Н. Клеут**, Простори угрожени експлозивним смешама, ИНН Винча, Београд 1994.
- [13] **Шупић, О., Ч. Жмирић, Н. Николић**, Анализа узрока и последица експлозије водоника у склоништу, настале при препуњавању никл – кадмијумових батерија, Војнотехнички гласник (1994), 42:6, 532 – 537.
- [14] ***, Закон о заштити од пожара, Службени гласник Републике Србије 111/09, 20/15 и 87/18.
- [15] ***, Правилник о техничким нормативима за заштиту индустријских објеката од пожара, Службени гласник Републике Србије 1/2018.

- [16] ***, SRPS EN 60079 – 10 – 1:2017, Експлозивне атмосфере – Део 10-1: Класификација простора – Експлозивне гасовите атмосфере, Институт за стандардизацију Србије, Београд 2017.
- [17] ***, Правилник о техничким нормативима за инсталације хидрантске мреже за гашење пожара, Службени гласник Републике Србије 3/2018.
- [18] ***, Правилник о техничким нормативима за заштиту од пожара стамбених и пословних објеката и објеката јавне намене, Службени гласник Републике Србије 22/2019.
- [19] ***, NFPA 55:2020 – Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code, National Fire Protection Association, New York 2020.
- [20] ***, NFPA 50A:1999 – Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites, National Fire Protection Association, New York 1999.
- [21] ***, NFPA 50B:1999 – Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites, National Fire Protection Association, New York 1999.
- [22] ***, NFPA 45:2019 – Fire Protection for Laboratories Using Chemicals, National Fire Protection Association, New York 2019.
- [23] ***, SRPS N.S8.007:1981, Противексплозијска заштита - Зоне опасности простора угрожених експлозивним смешама гасова и пара, Савезни завод за стандардизацију, Београд, 1981. (превод стандарда ИЕС 79-10:1979)
- [24] ***, SRPS N.S8.007:1991 (измене SRPS N.S8.007/1:1992), Противексплозијска заштита - Зоне опасности простора угрожених експлозивним смешама гасова и пара, Савезни завод за стандардизацију, Београд, 1991. (превод стандарда ИЕС 79-10:1986)
- [25] **Gojić, M., N. Tanasić, I. Arandelović**, Influence of ventilation system effectiveness on the safety of hydrogen storage and transportation applications, Book of abstracts of the Second International Symposium on Risk analysis and Safety of Complex Structures and Components, p. 56, The Society for Structural Integrity and Life, Belgrade, Serbia, 2023.
- [26] **Николић, С.**, Анализа зона опасности на местима угроженим од експлозије водоника у машинској сали ТЕ „Морава“ Свилајнац, мастер рад, Машински факултет Београд, Србија, 2021.

UPRAVLJAČKO NADZORNI SISTEM LINIJE ZA KONTINUALNU VULKANIZACIJU PROVODNIKA I KABLOVA SA IZOLACIJOM OD GUME

PLC AND HMI CONTROL OF CATERNAL CONTINOUS VULCANIZATION LINE FOR RUBBER CABLES

Igor B. KOCIC^{1*}, Nikola B. DANKOVIĆ¹, Darko B. MITIĆ¹,
Miroslav B. MILOVANOVIĆ¹, Saša S. NIKOLIĆ¹, Petar S. ĐEKIĆ²

¹ Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Katedra za automatiku, Niš

² Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija Niš,
Katedra za industrijsko i inženjersko mašinstvo, Niš

U radu je prikazan upravljački sistem kontinualne linije za proizvodnju kablova i provodnika sa izolacijom od gume pri čemu se proces vulkanizacije odvija u cevi u atmosferi vodene pare. Upravljanje, nadgledanje i zapis relevantnih parametara tehnološkog procesa u celini obavljeno je upotrebom PLC (programmable logic controller) i HMI (Human machine interface) i KepwareEx servera. Upravljački sistem koristi se za generisanje upravljačkih signala za regulaciju brzine, sile zatezanja, temperature ekstrudera, nivoa vode i pritiska pare u vulkanizacionoj cevi saglasno tehnološkim parametrima linije. Nadzornim sistemom omogućena je vizuelizacija svih tehnoloških celina linije preko ekrana HMI panela. Delovi i celine linije predstavljeni su pogodno iscrtanim simbolima, koji menjaju boju u zavisnosti od trenutnog statusa i prikazuju veličine relevantne za rad tog objekta. Primenom KepwareEx servera i baze podataka vrši se zapis vrednosti veličina bitnih za rad linije u realnom vremenu. Razvijen nadzorno upravljački sistem omogućava jednostavan rad i praćene svih bitnih parametara linije.

Ključne reči: proizvodna linija; gumeni provodnici; upravljanje; nadzor; PLC; HMI; KepwareEX

The paper presents the control system of a continuous line for the production of cables and conductors with rubber insulation, where the vulcanization process takes place in an atmosphere of water vapor. Management, monitoring and recording of the relevant parameters of the technological process as a whole was performed using PLC (programmable logic controller) and HMI (Human machine interface) and KepwareEx server. The control system is used to generate control signals for regulating speed, tension force, extruder temperature, water level and steam pressure in the vulcanization tube according to the technological parameters of the line. The monitoring system enables the visualization of all technological units of the line via the HMI panel screen. Parts and wholes of the line are represented by conveniently drawn symbols, which change color depending on the current status and show the sizes relevant to the operation of that object. By using the KepwareEx server and database, it records the values of the quantities important for the operation of the line in real time. The developed supervisory control system enables simple operation and monitoring of all important parameters of the line.

Key words: production line; rubber conductors; control; monitoring; PLC; HMI; KepwareEX

* Corresponding author, e-mail: igkocic@gmail.com

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

**UTICAJ RADNIH REŽIMA RAZMENJIVAČA TOPLOTE
SA VODENIM HLAĐENJEM NA EKSPLOATACIONE TROŠKOVE
– PRIMER RAFINERIJSKOG POSTROJENJA**

**INFLUENCE OF WORKING REGIMES OF HEAT EXCHANGERS
WITH WATER COOLING ON EXPLOITATION COST
– EXAMPLE OF REFINERY FACILITY**

Branislav GAJIĆ*, **Srbislav GENIĆ**, **Mirjana STAMENIĆ**, **Miloš IVOŠEVIĆ**
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

U ovom radu razmatra se procesno postrojenje sa razmenjivačima toplote sa vodenim hlađenjem, koji su podeljeni u serije u okviru rafinerijskog postrojenja. Cilj rada jeste da se ukaže na mogućnost postavke sistema tako da razmenjivači rade u najpovoljnijim režimima za postrojenje. Upoređeni su ostvareni protoci u režimima rada sa ulaznim temperaturama vode od 20°C, 25°C, 28°C i 30°C, kao i uticaj na smanjenje eksploatacionih troškova usled manje potrošnje električne energije za pogon pumpi. Dat je osvrt na uticaj automatskog upravljanja (regulacionih ventila) na smanjenje potrošnje rashladne vode.

Ključne reči: razmenjivači toplote; eksploatacioni troškovi; rafinerija

In this paper facility which incorporates heat exchangers divided into several series is being shown. Goal of this paper is to indicate most efficient working regimes of heat exchangers for facility. Mass flow rates of water are compared as a function of inlet water temperature of 20°C, 25°C, 28°C and 30°C and also lowering of exploitation costs because of lower electrical energy consumption for pumps. Influence of automatics (regulation valves) on lowering of cooling water consumption is shown.

Key words: heat exchangers; exploitation cost; refinery

* Corresponding author, e-mail: bgajic@mas.bg.ac.rs

PRIMENA INTERVENTNIH MERA U CILJU POVEĆANJA EFIKASNOSTI UKLANJANJA NIKLA IZ VODE NA POSTOJEĆEM POSTROJENJU ZA PREČIŠĆAVANJE VODE ZA PIĆE

IMPLEMENTATION OF EMERGENCY MEASURES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF NICKEL REMOVAL FROM WATER AT THE EXISTING WATER TREATMENT PLANT

**Zorana RADIBRATOVIĆ^{1*}, Biljana CAKIĆ¹, Marija VILOTIJEVIĆ²,
Mirjana KIJEVČANIN³, Ivona RADOVIĆ³**

¹ Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

³ Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Projektovanje postrojenja za prečišćavanje vode za piće (PPV) obuhvata kompleksnu analizu i primenu projektnih kriterijuma i ograničenja, u korelaciji sa praktičnim iskustvom. Osnovni prepoznati projektni kriterijumi podrazumevaju kriterijum kapaciteta, kvaliteta, kako sirove tako i prečišćene vode, lokacije postrojenja za preradu vode i dokazane tehnologije. Ukrštanjem kriterijuma pouzdanosti rada sistema sa tehno-ekonomski pokazateljima, dobija se optimalno rešenje procesa prerade, ne samo za nova postrojenja, već i za unapređenje procesa na postojećim postrojenjima. Na osnovu raspoloživih podataka o stanju akumulacije Ribnica, kvalitetu sirove i tretirane vode, za unapređenje procesa prerade na PPV na Zlatiboru dat je interventni, optimalni predlog unapređenja tehnologije prečišćavanja vode do kvaliteta za piće, tako da se obezbedi maksimalna efikasnost i fleksibilnost u radu sistema. Analize kvaliteta vode su pokazale da su nakon tretmana na postrojenju, svi parametri u okviru MDK koje propisuje Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, osim odstupanja nikla (Ni). U radu su prikazani rezultati analiza vode i efekata uklanjanja Ni tokom višestrukih proba u laboratoriji i na samom postrojenju u pogledu tretmana vode.

Ključne reči: PPV; voda; nikl; proces; efikasnost

The design of a water treatment plant (WTP) involves a complex analysis and application of design criteria and constraints, in correlation with practical experience. The basic recognized design criteria include capacity criteria, quality of both raw and treated water, locations of water treatment plants and proven technologies. By crossing the system reliability criteria with techno-economic indicators, the optimal solution of the processing process is obtained, not only for new plants, but also for the improvement of processes at existing plants. Based on the available data of the Ribnica accumulatio, the quality of raw and treated water, an interventional, optimal proposal for improving the technology of water purification to drinking quality was given to improve the process treatment at WTPP in Zlatibor, to ensure maximum efficiency and flexibility in system operation. Analyzes of water quality have shown that after treatment at the plant, all parameters are within the MAC prescribed by the Rulebook on the hygienic suitability of potable water, except for nickel (Ni) deviations. The paper presents the results of water analysis and the effects of Ni removal during multiple tests in the laboratory and at the plant itself in terms of water treatment.

Key words: WTP; water; nickel; process; efficiency

* Corresponding author, e-mail: zorana.radibratovic@jcerni.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Hemijska industrija".

PRIMENA, IZBOR I DIMENZIONISANJE RASTERETNIH KLAPNI U SISTEMIMA PROTIVPOŽARNE, KOMERCIJALNE I INDUSTRIJSKE VENTILACIJE

APPLICATION, SELECTION AND SIZING OF PRESSURE RELIEF DAMPERS IN FIRE PROTECTION, COMMERCIAL AND INDUSTRIAL VENTILATION SYSTEMS

Nikola TANASIĆ*, **Tomislav SIMONOVIĆ**,
Saša MARKOVIĆ, **Miloš MIHAILOVIĆ**
Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd

Klapne za rasterećenje pritiska koriste se u sistemima nadpritisne ventilacije za kontrolu dima, stabilnim sistemima za gašenje požara i drugim komercijalnim i industrijskim sistemima ventilacije za regulisanje pritiska u ventilisanim prostorijama i ventilacionim kanalima. U sistemima nadpritisne ventilacije, klapne se otvaraju automatski i održavaju natpritisak u projektovanim granicama kako bi se zaštitili evakuacioni putevi kao što su stepeništa i šahtovi liftova u slučaju požara. U tom slučaju klapne moraju biti u skladu sa standardom SRPS EN 12101-6. U slučaju primene u stabilnim sistemima za gašenje požara (kada se koriste gasovita sredstva za zaštitu server sala i drugih IT prostorija) klapne se koriste za ograničavanje nastalog nadpritisaka kako bi se sprečilo oštećenje konstrukcije objekta. Kod primene u sistemima komercijalne i industrijske ventilacije, klapne će omogućiti jednosmerno prestrujavanje vazduha i rasterećenje pritiska u kanalima. Kada pritisak u kanalu poraste iznad projektovane vrednosti, klapne se otvaraju čime se omogućava smanjenje pritiska i sprečavanje oštećenja kanala. U ovom radu razmatra se primena klapni za rasterećenje pritiska sa pregledom potrebnih isprava tj. sertifikata prema njihovoj nameni. Takođe, prikazan je postupak dimenzionisanja i izbora klapni, koji se uglavnom zasniva na softverskim paketima, slekcionim programima ili nomogramima koji su dati u tehničkoj specifikaciji od strane proizvođača opreme.

Ključne reči: rasteretne klapne; primena; sertifikati; dimenzionisanje

Pressure relief dampers are used in smoke control pressure differential systems, fire suppression systems and other commercial and industrial applications to regulate the pressure in ventilated rooms and ductworks. In smoke control pressure differential systems the dampers are automatic mechanically self-acting devices that keep the overpressure in designed limits to prevent in escape routes such as stairwells and elevator shafts during pressurization activated in the event of fire. In this case the dampers must comply with standard SRPS EN 12101-6. In fire suppression system application (when gaseous suppression agents are used for server rooms and other IT rooms) dampers are used to limit generated overpressure to prevent building construction damage. In commercial and industrial ventilation applications the dampers will allow one-way pressure relief in the ductwork. When the pressure in the duct rises above selected value the damper blades open to allow pressure relief preventing ductwork damage. In this paper the application of pressure-relief dampers is discussed with an overview of the necessary certificates according to their purpose. Also, the procedure for sizing and selection of dampers, which is mainly based on selection software or nomograms given in technical specification by the equipment manufacturer is reviewed.

Key words: pressure relief dampers; application; certificate, sizing

* Corresponding author, e-mail: ntanasic@atssb.edu.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Procesna tehnika".

HIDRODINAMIKA I FENOMENI PRENOSA MASE U APSORPCIONIM KOLONAMA SA PUNJENJEM

HYDRODYNAMICS AND MASS TRANSFER PHENOMENA IN PACKED-BED ABSORPTION COLUMNS

Milan N. SOVILJ*¹, Momčilo Đ. SPASOJEVIĆ²,

¹ Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad

² Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

U ovom radu je dat pregled eksperimentalnih istraživanja, koja su preuzete iz literature, a odnose se na određivanje hidrodinamike i fenomena prenosa mase u apsorpcionim kolonama sa punjenjem. Razmatran je uticaj radnih parametara (protok gasne i tečne faze, vrsta punjenja, kao i položaj punjenja u koloni) na pad pritiska i sadržaj tečnosti u apsorpcionoj koloni sa punjenjem. Utvrđeno je da pad pritiska u koloni raste sa porastom protoka gasa, pri konstantnom protoku tečnosti. Konstatovano je da je sadržaj tečnosti za više od 50% veći u valovitim strukturiranim punjenjem nego kod nasumičnih punjenja. Tačka opterećenja je definisana situacijom u kojoj nagib krive sadržaja tečnosti naglo počne da se povećava u odnosu na krivu sadržaja tečnosti dobijenu pri suvom punjenju. Osnovne jednačine koje opisuju hidrodinamički profil gasovitih i tečnih faza su upotpunjene terminima koji opisuju prenos mase zajedno sa ireverzibilnom hemijskom reakcijom (ako postoji) u tečnoj fazi. Visoka efikasnost prenosa mase uzrokovana je nizom faktora: odvojenim prolazom protoka tečnosti i gasa, povećanom površinom vlaženja punjenja u koloni, dužim periodom zadržavanja tokova tečnosti i gasa i povećanom međufaznom površinom.

Ključne reči: brzina plavljenja; faktor kapaciteta gasa; koeficijent difuzije; pad pritiska; sadržaj tečnosti

This paper provides an overview of experimental research, taken from the literature, and related to the determination of hydrodynamics and mass transfer phenomena in packed-bed absorption columns. The influence of operating parameters (flow of gas and liquid phase, type of packings, as well as packing position in the column) on the pressure drop and liquid hold-up in the packed-bed absorption column was considered. It was found that the pressure drop in the column increases with the increase in gas flow rate, at a constant liquid flow rate. It was found that the liquid hold-up is more than 50% higher in corrugated structured packing than in random packings. The load point is defined by the situation in which the slope of the liquid content curve starts to increase sharply in relation to the liquid content curve obtained during dry packing. The basic equations that describe the hydrodynamic profile of the gaseous and liquid phases are completed with terms that describe the mass transfer together with the irreversible chemical reaction (if any) in the liquid phase. The high efficiency of mass transfer is caused by a number of factors: separate passage of liquid and gas flow, increased wetting surface of the column packing, longer retention period of liquid and gas flows and increased interfacial area.

Key words: diffusivity coefficient, factor gas capacity, flooding velocity, liquid hold-up, pressure drop

* Corresponding author, e-mail: miso@uns.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Procesna tehnika".

UTICAJ SADRŽAJA VLAGE NA MELJIVOST KOLUBARSKIH LIGNITA

THE INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT ON THE GRINDABILITY OF KOLUBARA LIGNITES

Marko OBRADOVIĆ*, **Nikola KARLIČIĆ**, **Dušan TODOROVIĆ**,
Dejan RADIĆ, **Aleksandar JOVOVIĆ**

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

U cilju dobijanja podataka o uticaju sadržaja vlage na meljivost ugljeva izvršena su eksperimentalna istraživanja. Eksperiment je obuhvatio šest uzoraka ugljeva kolubarskog basena. Izbor uzoraka je izvršen u zavisnosti od eksperimentom dobijenih vrednosti Hardgrove indeksa meljivosti (HGI) sa ciljem da se pokrije celokupna oblast eksperimentalno dobijenih vrednosti HGI. Pored određivanja HGI, a sve uzorke je izvršena tehnička, organo-geoemijska i petrografska analiza.

Ligniti su u vlažnom stanju po svojoj prirodi žilavi, mekani i masni. Snižavanjem sadržaja vlage ligniti postaju krhkiji. Iz ovog razloga, vrednosti HGI imaju različite vrednosti ukoliko se određuju pri različitim sadržajima vlage.

Hardgrove indeks meljivosti ugljeva (HGI) ima nelinearnu zavisnost od udela vlage u uglju. Sve krive imaju dve prevojne tačke, jedan minimum i jedan maksimum vrednosti HGI u ispitivanoj oblasti. Minimalne vrednosti HGI ima u intervalu 15 – 22% masenog udela ukupne vlage u uglju, dok maksimalne vrednosti HGI ima za sadržaj ukupne vlage 5 – 13%.

Ključne reči: ugalj; lignit; sadržaj vlage; Hardgrove indeks meljivosti (HGI)

In order to obtain data on the impact of moisture content on the grindability of coals, experimental research was conducted. The experiment included six samples of coal from the Kolubara basin. The samples were selected based on experimentally obtained values of their Hardgrove grindability index (HGI), in order to cover the entire range of experimental HGI values. In addition to determining the HGI, proximate, organo-geochemical, and petrographic analyses were performed on all samples.

Lignites are naturally tough, soft, and greasy when in a moist state. By reducing the moisture content, lignites become more brittle. For this reason, HGI values have different values depending on the moisture content at which they are determined.

The Hardgrove grindability index of coal (HGI) has a nonlinear dependence on the moisture content of the coal. All curves have two inflection points, one minimum and one maximum value of HGI in the tested range. The minimum values of HGI are in the range of 15 – 22% of the mass fraction of total moisture in coal, while the maximum values of HGI are for a total moisture content of 5 – 13%.

Key words: coal; lignite; moisture content; Hardgrove grindability index (HGI)

* Corresponding author, e-mail: mbradovic@mas.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

POMOĆNI IZDUVNI SISTEM POD PRITISKOM ZA IZBACIVANJE GASOVA IZ FABRIČKIH DIMNJAKA

AUXILIARY EXHAUST SYSTEM UNDER PRESSURE FOR THE DISCHARGE OF GASES FROM FACTORY CHIMNEYS

Radovan STANIŠIĆ*
(patentna prijava 2022/0264)

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.167>

Predmet istraživanja rada je rešavanje problema smanjenja zagađenja vazduha oko fabričkih dimnjaka, a da se pri tome ne utiče na strujanje gasova u samom dimnjaku.

Predlog rešenja je u strujanju vazduha pod pritiskom koji stvara „vazдушnu cev“ na samom vrhu dimnjaka, prečnika kao i dimnjak, a koja se može posmatrati kao da je fizička nadogradnja dimnjaka.

Vazduh pod pritiskom treba da obezbedi zaštitu izlaznih gasova od udara vetra i time da im poveća visinu dipergovanja gasova u atmosferi.

U prvom delu je definisanje problema i razmatranje njegovog rešenja.

U drugom delu je opisana konstrukcijom uređaja u 2 varijante.

U trećem delu je dat predlog rešenja za prosečan fabrički dimnjak. Ulazni parametri za proračun i izbor opreme su: visina i prečnik dimnjaka, kao i brzina vetra, udar vetra kao najuticajni faktor na izlazne gasove. Dat je i predlog rešenja sa karakteristikama opreme, uređaja i drugih delova koji se ugrađuju.

Ključne reči: dimnjak; gasovi; vazдушna cev; kompresor; dizne

The subject of research work is solving the problem of reducing air pollution around factory chimneys, without affecting the flow of gases in the chimney itself.

The proposed solution is in the flow of pressurized air that creates an "air tube" at the very top of the chimney, with the same diameter as the chimney, which can be seen as a physical extension of the chimney.

Pressurized air should ensure the protection of the exiting gases from the impact of the wind and thereby increase the dispersion height of the gases in the atmosphere.

In the first part, there is a definition of the problem and consideration of its solution.

The second part describes the construction of the device in 2 variants.

In the third part, a solution proposal for an average factory chimney is given. Input parameters for the calculation and selection of equipment are: height and diameter of the chimney, as well as wind speed, wind impact as the most influential factor on the output gases. A solution proposal with the characteristics of equipment, devices and other parts to be installed is also given.

Keywords: chimney; gases; air pipe; compressor; rise

1 Definisane problema isticanja gasova iz fabričkih dimnjaka

Rad se bavi rešavanjem problema „vrtloženja“ gasova, a koji se pojavljuju neposredno pri izbacivanju gasova iz dimnjaka, a u sudaru sa okolnim vazduhom.

Uređaj koji se predlaže treba da osigura da prav stub gasa bude što viši, čime bi i dimna perjanica gasova bila viša, a stepen zagađenja prizemnih koncentracije bi time bio znatno manji.

Detaljnije o perjanicama u Referenci [4].

* Corresponding author, e-mail: radovan64@yahoo.com

Uređaj koristi snagu komprimovanog vazduha u tankom sloju, a po obodu dimnjaka na samom vrhu dimnjaka stvara „vazдушnu cev“, koja sprečava negativan uticaj vetra, vazdušnog pritiska, temperature vazduha u atmosferi i sl.

Jednostavno, omogućava da gasovi neometano teku kao kroz fizički dimnjak odođenu visinu, koja zavisi od snage uređaja koji se koriste u smislu ekonomske opravdanosti.

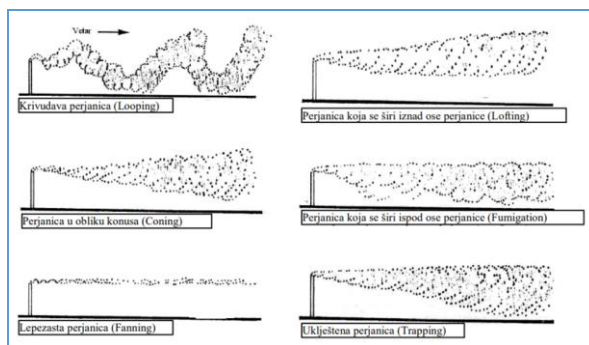
Uticaj dimnjaka na rasprostiranje zagađujućih materija

Od ukupnog broja izvora emisije iz industrijskih objekata najveći deo se može svrstati u kategoriju visokih izvora ili dimnjaka. Na rasprostiranje zagađujućih materija iz ovih izvora primaran uticaj ima turbulencija koja nastaje kao rezultat strujanja vazduha oko ispusta dok je sekundaran uticaj stanje atmosfere. Zbog toga se dominantno zagađenje prizemnog sloja atmosfere može očekivati na širem području oko izvora zagađenja. Ovo je veoma važno jer se često ne pravi razlika pa se, na primer, za proračun rasprostiranja zagađujućih materija iz prizemnih ili niskih izvora primenjuju modeli koji se koriste za visoke izvore. Kao posledica dobijaju se koncentracije koje su, po pravilu, u okolini izvora manje od stvarnih a na izvesnom rastojanju veće.

Visinom dimnjaka se može uticati na prostornu raspodelu aerozagađenja. Na velikim rastojanjima od dimnjaka njihova visina postaje beznačajna tj. relativan značaj visine dimnjaka opada sa rastojanjem od izvora zagađenja. U podnožju dimnjaka koncentracija je vrlo mala, dok je na otvoru dimnjaka ekstremno velika. Sa udaljavanjem od dimnjaka koncentracija raste do određenog rastojanja kada dostiže svoju maksimalnu vrednost, a zatim udaljavanjem opada i teži nuli. Maksimalna koncentracija pri tlu je srazmerna intenzitetu izvora, dok je obrnuto srazmerna brzini vetra i kvadratu visine dimnjaka. Ova poslednja činjenica je veoma važna i uzima se u obzir pri konstrukciji dimnjaka.

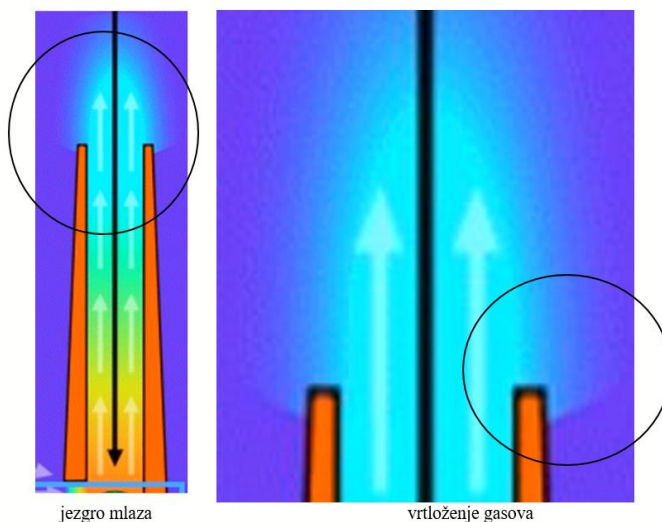
U modelima, usled uzdizanja dimne perjanice umesto fizičke visine dimnjaka figuriše *efektivna visina dimnjaka*. To je važno uključiti u model difuzije, jer povećanje visine dimne perjanice npr. za faktor dva - dovodi do smanjenja maksimalnih vrednosti prizemnih koncentracija zagađujućih materija za faktor četiri.

Uticaj visine dimnjaka na rasprostiranje zagađujućih materija (Referenca 4)



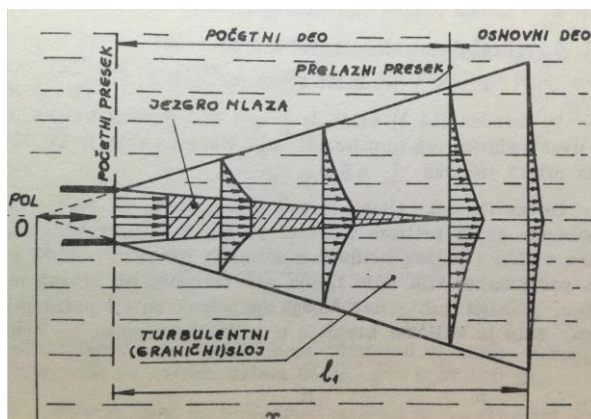
Tipovi dimnih perjanica“ (Referenca 4)

U Referenca 4 je definisan „uticaj temperature vazduha na distribuciju zagađujućih materija“, koji zavisi, između ostalog i od stepena vertikalnog mešanja i promene temperature sa visinom. Sa visinom opada i pritisak i gustina gasova.



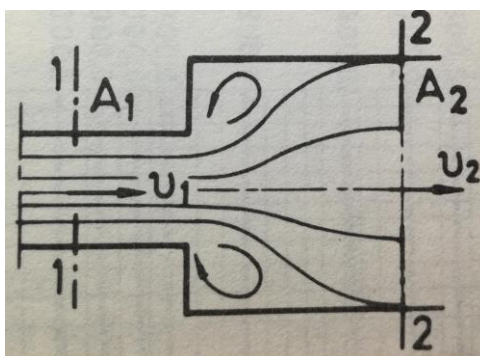
Grafički prikaz izbacivanja gasova iz dimnjaka

Sa slike se jasno uočava „jezgro mlaza“ i širenje (vrtloženje) gasova na samom izlasku iz dimnjaka, što potvrđuje teorijski deo iz navedene Reference 1, sl.89 str.183 gde je prikazan i opisan „potopljeni mlaz“.



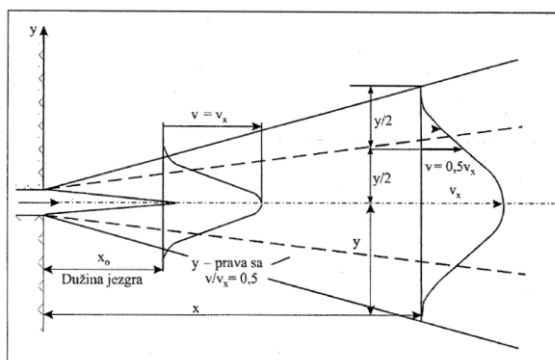
Potopljeni mlaz

„Potopljeni mlaz“ - stvaranje vrtloga na granici mlaza i nepokretne tečnosti (izotermni mlaz). Vidi se vrtloženje tečnosti „potopljenog“ ili „rasejanje mlaza“ pri isticanju. Može se posmatrati da je to idealni prikaz druge vrste iz teorije mlaza „...u potopljene struje spadaju struje vazduha koje ističu u vazdušni prostor ili u prostor sa vodom...“ Reference 1, Glava 14.1, str. 182- sl.89



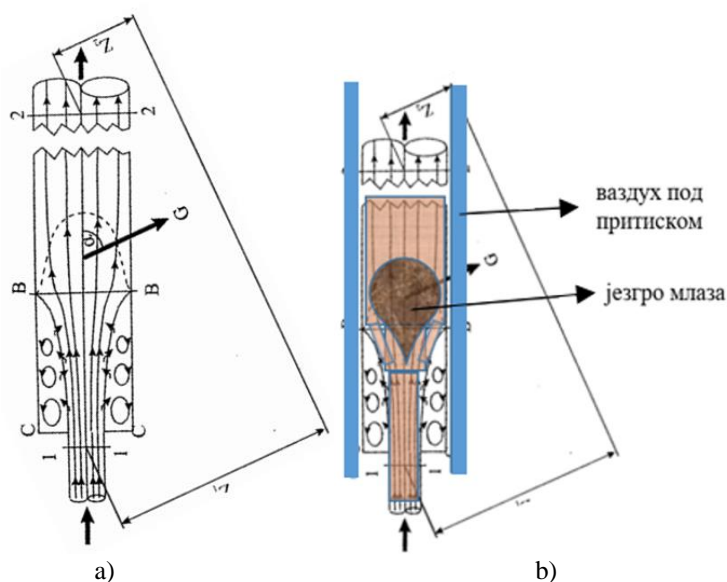
Gubitak strujne energije

Grafički prikaz gubitka strujne energije kod naglog proširenja cevovoda „BORDO-KARNO gubitak“, Reference 2, str. 161, sl. 8.V



Profil kružnog slobodnog izotermnog mlaza

Profil kružnog slobodnog izotermnog mlaza preuzeta iz Reference 3, str. 278, sl. 8.1, u kome se navodi da je dužina jezgra (2-6) prečnika okruglog otvora dimnjaka.



Uticaj promene preseka cevi na karakter strujanja

Prikazuje sve elemente problema vrtloženja i širenja gasova i tu se vidi osnovna ideja na slici (b) da se fizička cev zameni „vazdušnom cevi“ čiji bi „zid“ bio vazduh pod pritiskom. Slika (a) preuzeta iz Reference 3, str.308, sl. 9.9.

Uređaj koji bi davao komprimovani vazduh se montira na izlaznom obodu dimnjaka i ne bi ulazio u poprečni presek izlaza dimnjaka. Tako da ne bi uticao na postojeće strujanje gasove i na promenu njegovih osobina.

Strujanje vazduha pod pritiskom u smeru izlaska gasova iz dimnjaka sprečava vrtloženje gasova, kontinualno, po celom obimu dimnjaka. To se dešava u kritičnoj zoni „sudara“ gasova sa atmosferskim vazduhom.

Dakle, gasovi iz dimnjaka bi nastavili da se kreću (do određene visine) bez širenja.

Širenje bi počelo uporedo sa širenjem komprimovanog vazduha iz uređaja.

Visina pravog stuba gasova (bez širenja) direktno zavisi od pritiska i količine protoka vazduha pod pritiskom u uređaju

Rešenje konstrukcije uređaja treba da zadovoljiti osnovne uslove:

1. da se bez prepravki ili nadogradnji dimnjaka, reši problem povećanja visine „pravog“ stuba izlaznih gasova
2. poštovanja osnovnog uslova: da se izlazni gasovi „ne rezrede“ u dimnjaku ili na samom izlasku iz dimnjaka.

2 Razmatranje rešenja konstrukcije uređaja u zavisnosti od veličine prečnika dimnjaka, izbor opreme i delova opreme na radnom pritisku 9-10. bar

2.1 Kompresor:

Vijčani (obavezno sa sušaćem vazduha i bocom od 500 l) i u zavisnosti od elektro-instalacija izabrati i dimenzionisati dizne:

- a) protok 1,50 m³/min pri pritisku od 10 bar (11,0 kW/kom) 1,10 m³/min na 13 bar
- b) protok 0,96 m³/min pri pritisku od 10 bar (7,5 kW/kom) 0,77 m³/min na 13 bar

2.2 Dizne

Element uređaja koji treba da optimalno distribuirava vazduh pod pritiskom po obimu dimnjaka, a u što tanjem mlazu i one mogu imati različit oblik izlaznog mlaza , koji se bira prema potrebi:

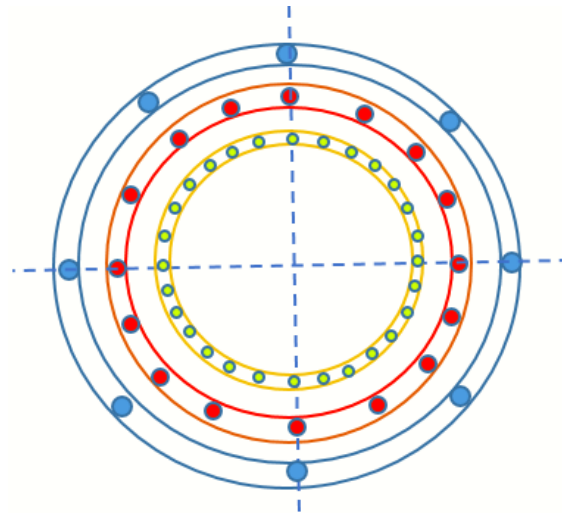
- a) „ravan lepezasti mlaz“ sa uglom širenja od 20-120 stepeni (proizvođač: “LECHLER” Nemačka)

b) „pun konusni mlaz“ kada je dizna okruglog poprečnog preseka koji daje enrgičan i oštar mlaz (proizvođač: “STASTO” Austrija)

Broj dizni zavisi od njenog protoka u zavisnosti raspoloživog protoka kompresora, kao i raspored izlaznog mlaza koji mora dati kontinualnu „vazдушnu“ cev

2.3 Konstrukcija uređaja

Uređaj se se sastoji od 3 kružna prstena različitih prečnika, urađena od debelozidnih cevi za pritisak, prečnika oko 30 mm, a koji su crevima priključeni na kompresore



varijanta-1

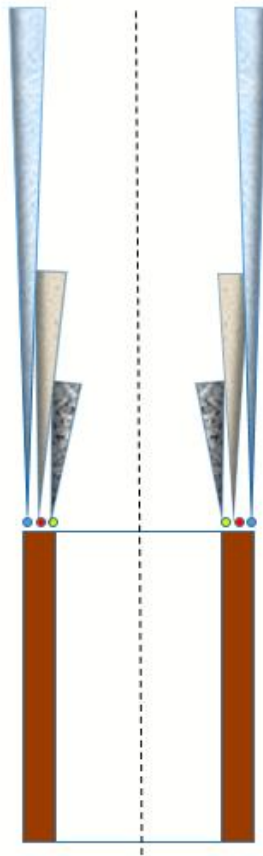
1. prsteni su montirani koncentrično u odnosu na vertikalnu osu dimnjaka, a na rastojanju od min 100 mm međusobno
2. prsteni imaju različit broj dizni i različite otvore dizni, kako bi se zadržao kontinualna „vazдушna cev“
3. dizne spoljašnjeg prstena je postavljena po uglom od 10° prema centru dimnjaka, Tako je osa mlaza, koji se širi pod uglom od 20° , paralelna sa vertikalnom osm dimnjaka
4. međusobno paralelno postavljane dizne, prave „COANDA“ efekat i time se povećala visina pravog mlaza

Postavlja se pitanje:

Šta se dešava u slučaju kada je vetar veće snage od vazduha iz dizni?

Odgovor:

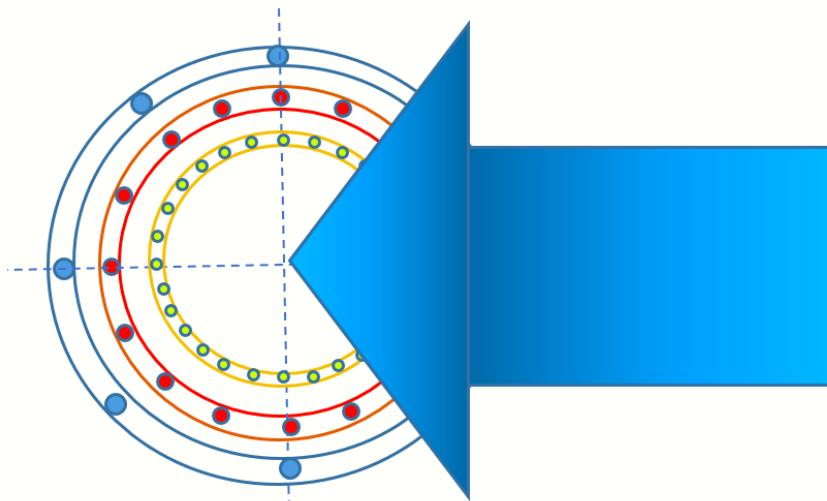
„Vazдушna cev“ će poviti pod udarom vetra, ali će zadržati primarni oblik i gasovi će izlaziti kroz nju, kao i u slučaju da je prava.



3-stepena „vazдушna cev“

Prikaz ideje rešenja „vazdušne cevi“ sa konusnim širenjem mlaza vazduha

- sastoji se iz 3 stepena visine vazduha
- njihov dodir je na izabranom mestu slabljenja mlaza, a u zavisnosti od veličine dizne



Varijanta-2

(„slabljenje vetra“ -za veće prečnike dimnjaka)

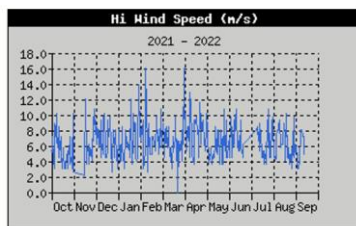
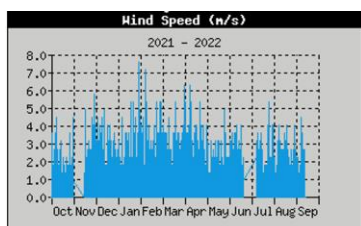
1. na obod dimnjaka se montira 8 (osam) bežičnih merača brzine vetra (naspram svake dizne)
2. cevi su podeljene na 8 (osam) celina koje nezavisno primaju i daju komprimovani vazduh u dizne
3. ispre uređaja se montira razvodnik sa 8 (osam) izlaza za creva koja ulaze u 8 EMV (elektromagentnih ventila)

4. kada se obrade podaci u realnom vremenu brzne vetra, aktivira se vazduh u 6 od 8 delova cevi – ostaju zatvorena 2 (dva) segmenta uređaja, gde je najveća brzina vetra
- Šta se time dobija?
1. udar vetra će oslabiti u sudaru sa izlaznim gasom na obodu dimnjaka (gde nema duvanja komprimovanog vazduha) i
 2. jezgro mlaza će dodatno oslabiti vetarjezgro mlaza i tako oslabljen vetar će se svojim ulaskom u „vazдушnu cev“ biti zarobljen
 3. veća količina vazduha će biti na raspolaganju iz kompresora (za +25%)
 4. izlazni gas će imati povećan prav stub i biće podignut na veću visinu od dimnjaka

3 Predlog rešenja za prosečan fabrički dimnjak (potrebni parametri)

3.1 Dimnjak i gasovi:

- visina dimnjaka..... 30-60 m (iz tabele 1.)
- prečnik dimnjaka..... _____ m
- temperatura gasova..... (_____ ° - _____ °) ©
- specif.težina gasova..... _____ kg/m³
- izlazni pritisak gasova..... _____ mbar
- intenzitet vetra..... 0,7 kN/m²
- brzina vetra..... _____ km/h _____ m/s



Intenzitet osnovnog opterećenja vetrom se može odrediti prema podacima navedenim u tabeli 1.

Tabela 1. Dejstvo vetra - intenzitet vetra „qw“ [2]

Redni broj	Visina objekta iznad terena	Stepen izloženosti objekta	Dejstvo vetra u kN/m ² za geografske zone (qw)		
			0.30	0.40	0.55
1	do 10 m	Zaštićen	0.30	0.40	0.55
2		Poluzaštićen	0.40	0.55	0.80
3		Izložen	0.45	0.70	1.10
4	preko 10 – 30 m	Poluzaštićen	0.50	0.75	1.10
5		Izložen	0.60	0.90	1.30
6	preko 30 – 60 m	Izložen	0.70	1.05	1.50
7	Preko 60 – 100 m	Izložen	0.80	1.20	1.70

Brzina vetra i intezite vetra po geografskim zonama

Podaci iz tabela iz Reference 5, omogućavaju da se izračuna jačina vetra na vrhu dimnjaka, a samim tim opreme i izbor dizni, kako bi one dale mlaz vazduha koji bi omogućio pravu „vazдушnu cev“ na vrhu dimnjaka.

3.2 Potrebna oprema i elementi za ugradnju:

- 3 vijčana kompresora , 10/13 bar, 1,1 m³/min (7,5/11 kW/)
- dizne (u zavisnosti od željenog oblika i raspodele mlaza vazduha) opciono:
 - a. _____ dizni fi _____ mm (protoka _____ l/min na 10 bar) - spoljni prsten
 - b. _____ dizni fi _____ mm (protoka _____ l/min na 10 bar) - srednji prsten
 - c. _____ dizni fi _____ mm (protoka _____ l/min na 10 bar) - unutrašnji prsten
- 3 cevi oblika kružnog prstena, obima većeg od obima dimnjaka za 100 mm, iz nezavisnih 8 segmenata

- ____ m creva za vazduh (13 bar)
- 1 razvodnik za creva sa 8 izlaza ,10 bar
- 8 elektromagnetnih ventila ,10 bar
- uređaj za obradu podatka brzine vetra i davač signala za položaj (0/1) EMV (Elektro-Magnetnih Ventila)

4 Zaključak

Na osnovu predloženih rešenja i fizičko-tehnoloških parametara izabrati varijantu uređaja za ugradnju

5 Reference

- [1] **Ašković:** *Osnovi hidraulike i pneumatike*, Univerzitet u Beogradu, 1982 god
- [2] **Čantrak S., Benišek M., Pavlović M., Marjanović P., Crnojević C., Petković Z.:** *Rešeni zadaci iz mehanike fluida sa izvodima iz teorije*, Univerzitet u Beogradu, 1985 god, UDK 532 (076)=861 izdavač IRO "GRAĐEVINSKA KNJIGA", BEOGRAD, 1985
- [3] **Branislav Todorović,** *Klimatizacija*, Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Beograd 2009. god.
- [4] *****,** *Studija o proceni uticaja na životnu sredinu projekta izgradnje termoelektrane toplane na KP 3523/ K-O- Vojlovica*, Mašinski Fakultet u Beogradu evidncioni izveštaj br.505/916/2018
- [5] **Mora:** *Uporedni prikaz proračuna dejstva vetra prema SRPS EN 1991-1-4, SRPS U.C7,110-112 i PTP-2 1948 – Seminarski rad iz predmeta „MONTAŽNE BETONSKE KONSTRUKCIJE , UNIVERZITET U NOVOM SADU Građevinski fakultet Subotica, januar 2016*

BRZA IDENTIFIKACIJA POLIMERNIH MATERIJALA NA BAZI AKRILONITRIL BUTADIEN STIREN KAUČUKA PRIMENOM TESTA GORENJA I PONAŠANJA U OTVORENOM PLAMENU

RAPID IDENTIFICATION OF POLYMER MATERIALS BASED ON ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE RUBBER USING THE BURNING TEST AND ITS BEHAVIOR IN AN OPEN FLAME

Matilda LAZIĆ^{1*} Dragan HALAS¹ Aleksandar DEDIĆ²
Duško SALEMOVIĆ¹,

¹ Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin,

² Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet, Beograd

U radu je izvršena brza identifikacija polimernog materijala na bazi akrilonitri butadie stiren kaučuka (ABS) primenom testa gorenja. Pretpostavljeno je da se preliminarna identifikacija komercijalnih, duromernih materijala na bazi ABS može izvesti ispitivanjem ponašanja uzoraka u otvorenom plamenu. Na osnovu uvida u tehničku dokumentaciju proizvođača, kao polazna smernica za brzu identifikaciju, smatralo se da su ispitivani uzorci od kompaundiranih ABS, uz prisustvo neorganskih filera i/ili drugih aditiva što je trebalo ispititi primenom testa gorenja. Pretpostavljeno je da prisustvo punila i aditiva u polimernom materijalu na bazi ABS utiču na ponašanje ispitivanih uzoraka u otvorenom plamenu. Rezultati ovog rada su potvrdili da prisustvo punila i aditiva u polimernom materijalu, utiču na njegovo ponašanje tokom testa gorenja na taj način što izazivaju odstupanja od ponašanja čistog ABS polimera. Prisustvo različitih vrsta dodataka u polimernom materijalu na bazi ABS utiče na mogućnost njegove preliminarne identifikacije primenom testa gorenja. Na osnovu dobijenih rezultata u ispitivanoj seriji uzoraka, može se smatrati da ponašanje ABS kompaunda tokom testa gorenja zavisi od sastava odnosno, vrste i odnosa polaznih monomera, prisutva i osobina kako filera tako i aditiva.

Ključne reči: ABS, test gorenja, preliminarne identifikacija, polimerni materijal, aditivi i fileri

In this paper, a rapid identification of the polymer material based on acrylonitrile butadiene styrene rubber (ABS) was performed using a burning test. It was assumed that a preliminary identification of commercial, ABS-based duromer materials could be performed by testing the behavior of the samples in an open flame. Based on a review of the manufacturer's technical documentation, as a starting point for quick identification, it was considered that the tested samples were made of compounded ABS, with the presence of inorganic fillers and/or other additives, which should have been tested using a burning test. It was assumed that the presence of fillers and additives in the polymer material based on ABS affect the behavior of the tested samples in an open flame. The results of this work confirmed that the presence of fillers and additives in the polymer material affect its behavior during the burning test in such a way that they cause deviations from the behavior of pure ABS polymer. The presence of different types of additives in ABS-based polymer material affects the possibility of its preliminary identification using the burning test. Based on the results obtained in the tested series of samples, it can be considered that the behavior of the ABS during the burning test depends on the composition, that is, the type and ratio of the starting monomers, the presence and properties of both fillers and additives.

Key words: ABS, burning test, preliminary identification, polymer material, additives and fillers

* Corresponding author, e-mail: matildalazic@outlook.com

1 Uvod

Akrilonitil butadien stiren kaučuk (u daljem tekstu: ABS) predstavlja široko upotrebljavani inženjerski termoplast a takođe, i veoma popularan masovni polimer za izradu predmeta za domaćinstvo. ABS je duromerni terpolimer, koji se sastoji od stiren akrilonitrilnog kopolimera (u daljem tekstu: SAN) i SAN graftovanog polibutadienom [1,2]. Standardno dobra kvalitativna svojstva ABS neprestano se poboljšavaju modifikovanjem osnovnog polimera kompaundiranjem sa filerima (punilima) i aditivima ili preko razvoja njegovih blendi, kompozita i legura [2]. Ciljevi modifikacije svojstava osnovnog ABS polimera i konsekvantno, proizvodnja polimernih materijala na bazi ABS je proširenje mogućnosti primene (pri čemu se povećava konkurentnost istog u odnosu na druge masovne i inženjerske polimere), sniženje cene, olakšavanje prerade, itd. [2].

Polimerni materijali na bazi ABS široko se primenjuju za izradu cevi i fittinga za hemijsku i naftno-petrohemijisku industriju zbog visoke otpornosti na hemikalije [1]. Prerađeni i oblikovani delovi od ABS se veoma široko koriste za izradu igračaka, sportske/medicinske opreme, zaštitne opreme i delova nameštaja. ABS visokog sjaja se koristi za proizvodnju delova kućnih aparata i uređaja (npr. kućišta usisivača, frižidera, telefona, itd.) ali i za pojedine delove za unutrašnjost automobila i kamiona (npr. rešetke za zvučnike, ručke na vratima, obloge vrata, za instrument table, konzole, itd.) kao i za spoljašnje komponente automobila (npr. kućište navigacionih sistema, itd.). ABS otporan na vatru se koristi za proizvodnju komponenti električnih uređaja i za oblaganje električnih kablova. Transparentni ABS se primenjuje za proizvodnju delova za kancelarijske uređaje (npr. štampači, skeneri, itd.) [3].

Veoma široka primena a time i proizvodnja polimernih materijala na bazi ABS implicira primenu različitih metoda kontrole njegovog kvaliteta, među kojima značajno mesto zauzimaju brze metode identifikacije.

Brze metode identifikacije polimernih materijala, od kojih su izrađeni krajnji proizvodi (npr. od ABS) jesu jednostavni testovi, koji se mogu primenjivati u pogonima za proizvodnju/preradu polimera ali i na deponijama čvrstog, polimernog otpada [4]. Brze metode identifikacije omogućavaju samo procenu ili preliminarnu identifikaciju ispitivanog polimernog materijala [5,6]. Brze metode identifikacije reprezentuju preliminarne metode [5,6], bez mogućnosti primene u svojstvu konačnih metoda identifikacije. Test gorenja uzoraka u otvorenom plamenu predstavlja veoma značajnu i široko primenjivanu brzu metodu identifikacije polimernih materijala [5,6].

U radu je izvršena brza identifikacija polimernog materijala na bazi ABS primenom testa gorenja. Pretpostavljeno je da se preliminarna identifikacija komercijalnih, duromernih materijala na bazi ABS može izvesti ispitivanjem ponašanja uzoraka u otvorenom plamenu [5,6]. Na osnovu uvida u tehničku dokumentaciju proizvođača/distributera, kao polazna smernica za brzu identifikaciju, smatralo se da su ispitivani uzorci od kompaundiranih ABS, uz prisustvo neorganskih filera i/ili drugih aditiva [7,8,9,10,11]. Pretpostavljeno je da prisustvo punila i aditiva u polimernom materijalu na bazi ABS utiču na ponašanje ispitivanih uzoraka u otvorenom plamenu, tokom testa gorenja [5,6] jer ponašanje materijala u primeni zavisi od kvalitativnih svojstava, odnosa polaznih monomera i prisutva filera odnosno, aditiva [2].

2 Eksperimentalni deo

2.1 Materijal

Za ispitivanje primenom testa gorenja, korišćena je serija od 5 uzoraka različitih proizvođača/distributera [7,8,9,10,11]. Cilj ispitivanja je bila načelna provera uticaja filera i dodatka na gorivost a time i na procenu vrste materijala od kojih su izrađeni uzorci.

Iz proizvođačke dokumentacije pretpostavljeno je da su ispitivani uzorci izrađeni od polimernih materijala (kompaunda) na bazi ABS [7,8,9,10,11]. Osnovni podaci o seriji uzoraka ispitivanih primenom testa gorenja prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni podaci o seriji uzoraka za ispitivanje testom gorenja prema navodima proizvođača

	Komercijalni oblik predmeta za ispitivanje	Opis uzorka	Prisustvo filera	Prisustvo aditiva	Pretpostavka za vrstu materijala
Uzorak 1	Duromerne ploče	Beličasta boja, neproziran, stabilne forme na vazduhu	Nije navedeno	Kolorant	ABS
Uzorak 2	Duromerne ploče	Obojen, stabilne forme na vazduhu	Čađ	TiO ₂ , trifenil fosfat	ABS
Uzorak 3	Duromerne ploče	Beličasta boja, stabilne forme na vazduhu	Nije navedeno	Kolorant, grupa aditiva bez specifikacije vrste	ABS
Uzorak 4	Sečen u obliku peleta	Beličasta boja, neproziran, stabilne forme na vazduhu	Neorganski filer	Lubrikanti/stabilizeri, modifikatori svojstava	ABS
Uzorak 5	Duromerne ploče	Svetlo braon, neproziran, stabilne forme na vazduhu	Nije navedeno	Retrdanti gorenja	ABS

2.2 Metode

Ispitivanje uzoraka primenom testa gorenja [5,6], kao brze metode preliminarne identifikacije tj. procene vrste materijala (od koje su izrađeni uzorci) izvedeno je u Laboratorijama Visoke tehničke škole strukovnih studija u Zrenjaninu. Primenjene su sve mere lične i tehničke zaštite za rad u laboratorijskim uslovima. Test gorenja ne zahteva primenu standardizovanih metoda pripreme uzoraka [5,6]. Isečeni su komadi uzoraka od duromernih ploča veličine 3cmx3cm (uzorci 1,2,3,5, Tabela 1). Od uzoraka 4 (Tabela 1) ispitna epruveta je predstavljala pojedinačne, proizvođačke oblike ABS-a koji je sečen u obliku peleta, originalne veličine, zbog lakšeg hvatanja pincetom i unosa u otvoreni plamen. Svaki uzorak pojedinačno je unet zatim, u otvoren plamen Bunzenovog plamenika. Smanjen je dovod gasa u Bunzenov plamenik na minimum, da bi se dobio slab plamen a sve to, u cilju lakšeg posmatranja promena u uzorku. Posmatrano je ponašanje uzoraka u otvorenom plamenu: zapaljivost i izgled plamena; miris para nakon uklanjanja plamena; izgled ostatka nakon testa a sve to, u skladu sa propisanom metodom [5,6].

Za procenu vrste polimernog materijala, od kojeg je izrađena ispitivana serija uzoraka, korišćena je prvenstveno, Tabela za identifikaciju plastičnih masa [5,6]. Primenjena je uporedna metoda analize.

3 Rezultati i diskusija rezultata

Rezultati testa gorenja [5,6] na ispitivanoj seriji uzoraka, prikazani su u Tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati procene vrste polimernog materijala dobijeni ispitivanjem serije uzoraka primenom testa gorenaja

	<i>Zapaljivost i izgled plamena</i>	<i>Miris oslobođenih gasova</i>	<i>Izgled ostatka nakon gorenja</i>	<i>Procena vrste polimernog materijala</i>
Uzorak 1	Zapljiv. Nastavlja da gori nakon paljenja. Žuti plamen, veoma čađav	Kiseo miris. Miris gradskog gasa slično polistirenu uz miris gume koji ga prekriva dužim gorenjem uz pojavu mirisa na cimet	Nalik nagoreloj gumi	ABS
Uzorak 2	Zapljiv. Nastavlja da gori nakon paljenja. Žuto-smeđ, tamniji plamen, veom čađav	Kiseo miris. Miris gradskog gasa slično polistirenu uz razvoj mirisa gume koji ga prekriva dužim gorenjem. Pojava i slabog mirisa arome	Nalik nagoreloj gumi	ABS
Uzorak 3	Zapljiv. Nastavlja da gori nakon paljenja. Prljavo žuti, treperavi plamen, veom čađav i izdužen.	Kiseo miris na gumu i arome	Nalik nagoreloj gumi, veoma prljav	ABS
Uzorak 4	Zapljiv. Nastavlja da gori nakon paljenja. Prljavo žuti, treperavi plamen, veom čađav i izdužen.	Oslobađanja se masna para. Kiseo miris na gumu i arome	Masan, nalik nagoreloj gumi.	ABS
Uzorak 5	Nije zapljiv.	Miris na arome nakon iznošenja iz plamena u veoma slabo oslobađanje pare svelte boje.	Gotovo nepromenjen u odnosu na polazni izgled uzorka za ispitivanje.	ABS

Dobijeni rezultati (Tabela 2) u ispitivanoj seriji uzoraka (Tabela 1) su načelno, u skladu sa literaturnim podacima [5,6], koji su korišćeni kao pretpostavke u ovom radu.

Dobijeni rezultati za uzorak 1 (Tabela 2) mogu pouzdano (u okviru primenjene metode) ukazivati da je on izrađen od ABS. Kod uzorka 1 je uočen najveći stepen sličnosti sa literaturnim podacima, što je u skladu sa očekivanjima jer je prema podacima proizvođača [7] uzorak ABS terpolimer bez dodataka punila koja bi mogla znatnije da ometaju preliminarnu identifikaciju. Kolorant u smislu aditiva ne ometa značajnije procenu vrste materijala. Može se smatrati da je uzorak 1 izrađen od komercijalnog polimernog materijala na bazi ABS. U ispitivanoj seriji uzoraka smatra se da sa

najvećom pouzdanosti u ispitivanoj seriji. Najpouzdanija preliminarna identifikacija u ispitivanoj seriji uzoraka izvršena je za uzorak 1 primenom testa gorenja. Potvrda prisustva ili odsustva aditiva u ABS-u mogla bi se dobiti dodatnim ispitivanjima, primenom tzv. konačnih metoda analize, što bi opotpunilo preliminarne tvrdnje dobijene na osnovu izvedenog testa gorenja [5].

Dobijeni rezultati za uzorak 2 (Tabela 2) preliminarano, mogu ukazivati da je on izrađen od polimernog materijala na bazi ABS, što je u skladu sa očekivanjima [5,6]. Rezultati testa gorenja su u skladu sa proizvođačkom specifikacijom [8] u kojoj je navedeno da ispitivani uzorak sadrži filer i aditive. Ouočena odstupanja ponašanja uzorka 2 u otvorenom plamenu u odnosu na literaturne podatke za ABS [5,6] mogu se objasniti upravo, prisustvom različitih vrsta i količina filera i aditiva u plastičnoj masi ali i jačom obojenošću uzorka, što je u skladu sa korišćenom pretpostavkom [5,6]. Može se smatrati da je procenjena vrsta polimernog materijala od kojeg je izrađen uzorak 2, polimerni materijal na bazi ABS. Dobijeni rezultat za uzorak 2 je uporediv sa rezultatom dobijenim za uzorak 1 ali je uočljiv uticaj koloranta (dubina obojenja). Potvrda prisustva ili odsustva aditiva u ABS-u mogla bi se dobiti dodatnim ispitivanjima, primenom tzv. konačnih metoda analize [5].

Dobijeni rezultati za uzorak 3 (Tabela 2) preliminarano, mogu ukazivati da je on izrađen od polimernog materijala na bazi ABS, što je u skladu sa očekivanjima [5,6]. Rezultati testa gorenja su u skladu sa proizvođačkom specifikacijom [9] u kojoj je navedeno da ispitivani uzorak sadrži aditive. Ouočena odstupanja ponašanja uzorka 3 u otvorenom plamenu u odnosu na literaturne podatke za ABS [5,6] mogu se objasniti upravo, prisustvom različitih vrsta (verovatno i količina) aditiva u plastičnoj masi ali i obojenošću uzorka, što je u skladu sa korišćenom pretpostavkom [5,6]. Primećeno je takođe, da je ponašanje uzorka 2 i uzorka 3 tokom testa gorenja, odnosno prema posmatranim parametrima za analizu veoma slično, što se može objasniti činjenicom da je u oba uzorka prisutan najverovatnije, sličan tip aditiva, koji izazivaju približno ponašanje tih uzoraka u otvorenom plamenu, osim u slučaju koloranata koji izazivaju uočene razlike. Može se smatrati da je procenjena vrsta polimernog materijala od kojeg je izrađen uzorak 3 polimerni materijal na bazi ABS. Potvrda prisustva ili odsustva aditiva u ABS-u mogla bi se dobiti dodatnim ispitivanjima, primenom tzv. konačnih metoda analize [5].

Dobijeni rezultati za uzorak 4 (Tabela 2) mogu ukazivati da je on izrađen od polimernog materijala na bazi ABS, što je u skladu sa očekivanjima [5,6]. Rezultati ispitivanja uzorka 4 [10] međutim, pokazuju najmanje slaganje sa očekivanjima. Fenomen se može objasniti prisustvom veoma specifičnih aditiva kao što su lubrikanti i stabilizatori za koje se može smatrati da dominantno, ometaju preliminarnu identifikaciju prema ispitivanim parametrima tokom testa gorenja. Dodatno, znatnije ometanje izaziva i prisustvo neorganskih filera u većoj količini koja je navedena u proizvođačkoj specifikaciji. Može se u principu smatrati da je procenjena vrsta polimernog materijala od kojeg je izrađen uzorak polimerni materijal na bazi ABS. Navedena tvrdnja za uzorak 4 ima najmanju pouzdanost u odnosu na tvrdnje za ostale uzorke iz ispitivane serije. Potvrda prisustva ili odsustva vrste u količine aditiva u ABS-u mogla bi se dobiti dodatnim ispitivanjima, primenom tzv. konačnih metoda analize [5].

Na osnovu dobijenih rezultata za uzorak 5 (Tabela 2) ne može se tvrditi da je ispitivani uzorak izrađen od plastične mase na bazi ABS je uzorak nije zapaljiv u otvorenom plamenu, niti se pali nakon iznošenja iz otvorenog plamena. Jedina procena po kojoj bi uzorak 5 mogao biti izrađen od polimernog materijala na bazi ABS su podaci iz proizvođačke specifikacije [11] u kojoj je navedeno da se radi o upravo, tom materijalu. Međutim, u istoj specifikaciji proizvoda od ABS [11] je navedeno da ABS sadrži retardant plamena. Retardan plamena ima ulogu da sprečava zapaljenje i gorenje odnosno, onemogućava izvođenje testa gorenja i praćenje parametara definisanih testom gorenja. Međutim, dobijeni rezultati za uzorak 4 su u širem kontekstu, u skladu sa pretpostavkom [5,6] jer retardant plamena se može smatrati da navedeni aditiv dominantno, utiče na sprečavanje izvođenja testa gorenja što mu i jeste početna namena.

Rezultati ispitivanja serije uzoraka (Tabela 1, Tabela 2) testom gorenja su generalno, potvrdili polaznu pretpostavku vrste materijala od kojih su izrađeni uzorci, koja je očitana iz podataka proizvođača. Može se smatrati da je u ispitivanoj seriji, preliminarano identifikacijom (i to, primenom testa gorenja) potvrđeno da su uzorci od polimernih materijala na bazi ABS.

Mora se naglasiti da zapaljivost i izgled plamena tokom testa gorenja uzoraka, za koje je preliminarno utvrđeno da su od polimernog materijala na bazi ABS je veoma slična svim drugim polimernim materijalima na bazi stirena (npr. PS, SAN) [5,6] što generalno umanjuje validnost tvrdnji dobijenih primenom testa gorenja.

Rezultati ovog rada su potvrdili pretpostavku da prisustvo punila i aditiva u polimernom materijalu, utiču na njegovo ponašanje tokom testa gorenja [5,6]. Fenomen se može objasniti činjenicom da ponašanje kompaunda u primeni zavisi kao od njegovih kvalitativnih svojstava, tako od (vrste i odnosa) polaznih monomera i prisutva i osobina filera i aditiva [2].

Dobijeni rezultati se mogu smatrati isključivo, kao smernice za primenu metoda konačne identifikacije, kojima bi se eventualno, potvrdilo da se radi o polimernom materijalu na bazi ABS; što konsekvntno, može predstavljati dalji tok rada.

4 Zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata u ovom radu, može se smatrati da je test gorenja pogodna metoda za preliminarnu identifikaciju polimernih materijala na bazi ABS.

Prisustvo različitih vrsta dodataka u polimernom materijalu na bazi ABS utiče na mogućnost njegove preliminarne identifikacije primenom testa gorenja.

Rezultati ispitivane serije uzoraka u otvorenom plamenu, pokazuju da se može smatrati da prisustvo filera i aditiva u polimernim materijalima otežava (ili čak onemogućava) preliminarnu identifikaciju ABS. Fenomen se može objasniti činjenicom da ponašanje kompaunda u primeni zavisi kao od sastava, kvalitativnih svojstava, ali i od prisutva filera i aditiva određenih svojstava.

Test gorenja je jednostavna metoda sa potencijalom primene u pogonima za proizvodnju/preradu polimera na bazi ABS. Preliminarno poznavanje vrste polimernog materijala, prisutnih filera i dodataka veoma je značajno iz aspekta razmatranja njihovog uticaja na ponašanje u primeni. Kombinovanje podataka iz proizvođačke dokumentacije i rezultata testa gorenja predstavlja primer tzv. dobre inženjerske prakse pri razmatranju ponašanja polimernih materijala u komercijalnoj primeni.

Dalji tok rada može obuhvatati ispitivanje serije uzoraka drugim metodama brze identifikacije polimernih materijala, primenu konačnih metoda identifikacije, materijala, utvrđivanje prisutva vrste i količine retardanta plamena, stabilizatora, filera i koloranata, itd.

5 Literatura

- [1] **Mangore, R.V., S.S. Ahankari, K.D. Verma, K.K. Kar**, Fly ash-reinforced acrylonitrile butadiene styrene composites, *Handbook of Fly Ash*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2022.
- [2] **Ananthapadmanabha, G. S., V. Deshpande**, Influence of aspect ratio of fillers on the properties of acrylonitrile butadiene styrene composites, *Journal of Applied Polymer Science, Volume 135* (2023), issue 11, pp. 46023.
- [3] **Pious, C.V., S. Thomas**, Polymeric Materials—Structure, Properties, and Applications, *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications*, William Andrew, Oxford, UK, 2016.
- [4] **Vujković, I.**, *Polimerna i kombinovana ambalaža*, Poli, Novi Sad, Republika Srbija, 1997.
- [5] **Vujković, I., D. Stoiljković, S. Đilas**, *Brza identifikacija polimernih materijala*, Poli, Novi Sad, Republika Srbija, 2000.
- [6] **Braun, D.**, *Simple Methods for Identification of Plastics (with the Plastic Identification Table by Saechtling H.)*, 5th edition, Hanser Publishers, Munich, Germany, 2013.
- [7] ***, *Document, ABS Sheet, Safety Data Sheet*, Plaskolite LLC, OH, USA, 2018
- [8] ***, *Document, ABS, Safety Data Sheet*, City Plastic, Brompton, Australia, 2009
- [9] ***, *Document, ABS Sheet, Safety Data Sheet*, King Plastic Corporation, Toledo, Spain, 2015
- [10] ***, *Document, SATRAN Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Series 800, Safety Data Sheet*, MRC Polymers, Inc., Chicago, IL, USA, 2020
- [11] ***, *Document, ABS Royalite® R15*, Emco Industrial Plastics, Cedar Grove, NY, USA, 2022

BIOHIDROGELOVI POLI(METAKRILNE KISELINE): BUBRENJE I KONTROLISANO OTPUŠTANJE KOFEINA

BIOBASED POLY(METHACRYLIC ACID) HYDROGELS: SWELLING PROPERTIES AND CONTROLLED RELEASE OF CAFFEINE

Maja D. MARKOVIC^{1*}, Pavle M. SPASOJEVIC¹, Sanja I. SAVIC²,
Olga J. PANTIC², Vesna V. PANIC¹

¹ University of Belgrade, Innovation Center of Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade

² University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, Belgrade

Savremeno društvo je suočeno sa mnogim izazovima u tretamanu raznih bolesti, naročito ozbiljnih oboljenja kao što je rak. Glavni ciljevi naučnika su da se postigne bezbednija i efikasnija terapija pacijenata koji se leče od raka. Jedan od dobrih načina da se to postigne su sistemi za dostavu lekova. Ipak, mnogi antikancerogeni lekovi su slabovodorastvorni, pa bi veliki izazov mogao da bude inkapsulacija i njihovo kontrolisano otpuštanje iz sistema za dostavu lekova. Cilj ovog rada je da se unapredi sistem za dostavu lekova na bazi hidrofilne poli(metakrilne kiseline) i amfifilnog kazeina sa inkapsuliranim slabo vodorastvornim kofeinom, koji je razvijen tokom našeg prethodnog istraživanja. U ovom radu sintetisani su hidrogelovi sa 1,6mol% umreživača i 100% neutralisanom metakrilnom kiselinom (PMAC-100N-4M). Procesi bubrenja PMAC-100N-4M hidrogelova i kontrolisanog otpuštanja kofeina su ispitivani u dve sredine koje simuliraju želudac i tanko crevo čoveka. Takođe je ispitano kako promena količine inkapsuliranog kofeina i dodatak lipozomne suspenzije sa inkapsuliranim kofeinom utiče na procese bubrenja PMAC-100N-4M hidrogelova i otpuštanje kofeina. Rezultati pokazuju da je proces kontrolisanog otpuštanje kofeina unapređen, a samim tim je moguće unaprediti i celokupnu terapiju.

Ključne reči: pH osetljivi hidrogelovi; kazein; lipozomi; kontrolisano otpuštanje; slabovodorastvorni lekovi

Modern society are faced with lot of challenges in the treatment of many diseases, especially with serious ones such as cancer. Safer and more efficient treatment of the cancer patients are main goals which researchers are aiming. One of the good approaches can be drug delivery systems. Still, a lot of anticancer drugs are poorly water-soluble and their encapsulation and controlled release can be quite challenging. Present study is focused to improve drug delivery system based on hydrophilic poly(methacrylic acid) and amphiphilic casein with encapsulated poorly water-soluble caffeine, which has been developed through our previous research. The hydrogels with 1.6mol% of crosslinker and 100% of neutralization degree of methacrylic acid are synthesized (PMAC-100N-4M). The swelling process of the PMAC-100N-4M hydrogels and caffeine release are analyzed in two environments which simulate human stomach and intestines. It is also investigated how the change in the encapsulated caffeine weight and the addition of liposomes with encapsulated caffeine, affect swelling degree of the PMAC-100N-4M hydrogels and release of caffeine. The results show that controlled release of caffeine is improved, therefore overall therapy can be enhanced.

Key words: pH sensitive hydrogels; casein; liposomes; controlled release; poorly water-soluble drugs

1 Introduction

Everyday struggle of humankind with wide range of diseases urge scientists to find new solutions or improve existing ones in order to enhance the therapies. One of the promising solutions which is extensively investigated for over two decades is certainly controlled release of the drugs. Hydrogels are polymeric materials with huge potential as drug delivery systems. One group of these

* Corresponding author, e-mail: mmarkovic@tmf.bg.ac.rs

materials are pH sensitive hydrogels based on poly(methacrylic acid) (PMAA). Nontoxicity, biocompatibility, pH sensitivity, the ability to absorb and retain large amount of fluids make the PMAA hydrogels one of the best choices for controlled release of drugs [1-4]. The PMAA hydrogels swell in the media with pH value higher than pKa of PMAA (4.6 [5-7]). This is due to the deprotonation of carboxylic groups along the polymeric PMAA chains and generation of negative charges which further leads to the repulsion of polymers chains and hydrogels swelling. The specific pH dependent PMAA hydrogels swelling are employed for targeted drug delivery and controlled release in such environments (such as human intestines).

Beside many desirable properties of the PMAA hydrogel, there are some imitating factors which affect PMAA application, such as: poor mechanical properties and highly hydrophilic nature due to which only soluble drugs can be encapsulated into the PMAA hydrogels. Good solution can be found in natural polymeric materials which could be used as interpenetrates to improve mechanical properties and enable encapsulation of drugs with wider range of solubility. We used that kind of approach and employed casein, natural pH sensitive polymer, to enhance the PMAA hydrogel properties and extend the range of its application [8, 9]. Casein is non-toxic, amphiphilic protein approved by Food and Drug Administration (FDA) [5, 10-12]. In our previous research we prepared hydrogels based on PMAA and casein with various amount of crosslinker (PMAC-100N-4M) and demonstrated that poorly water soluble model drug – caffeine can be successfully encapsulated and released in controlled manner in medium which simulated human intestines [13]. Based on these results, we chose sample with 100% neutralized methacrylic acid and 1.6 mol% of crosslinker which had optimal properties for drug delivery and in the present study we investigated how the change of synthesis parameters affect both swelling process of the hydrogels and caffeine release. We wanted to improve the drug carrier so it could be easily adjusted to the specific demands of the therapy. In that manner, bioavailability of the drug can be improved, as well as safety and efficacy of the therapy.

Hydrogels based on poly(methacrylic acid) and casein with 100% neutralized methacrylic acid and 1.6mol% of crosslinker are synthesized in present study. The caffeine was encapsulated either direct into the hydrogel network or liposomes suspension with encapsulated caffeine was embedded into the hydrogel. Swelling behavior of the PMAC-100N-4M hydrogels and caffeine release are analyzed in two media which simulated the environments in the human stomach and intestines. The influence of encapsulated caffeine weight and the addition of liposomes suspension on the swelling process of the PMAC-100N-4M hydrogels and caffeine release profiles are analyzed.

2 Materials and methods

2.1 Materials

Methacrylic acid (99.5%) and caffeine were supplied from Merck (Germany). Sodium caseinate was obtained from Lactoprot Deutschland GmbH (Germany). The crosslinker N,N'-methylenebisacrylamide (p.a.) (MBA) and sodium hydroxide (p.a.) were purchased from Aldrich Chemical Co. (USA). The initiator, 2,2'-azobis-[2-(2-imidazolin-2-yl)propane] dihydrochloride (99.8%) was obtained from Wako Pure Chemical Industries (Japan). NATIPIDE®II containing phospholipids from soybean >20% (with 3-sn-phosphatidylcholine 76+ 3%) was supplied from Lipoid (Germany). Monobasic sodium phosphate (anhydrous) and dibasic sodium phosphate (anhydrous) was supplied from Centrohema (Serbia). Hydrochloric acid (37%) was supplied from Zorka Pharma (Serbia). All chemicals were used as received.

2.2 Preparation of 2.3 PMAC-100N-4M hydrogels

The synthesis path of the PMAC and PMAC/L hydrogels and their characterization are described in details in our previous research [5]. In this study, the encapsulated mass of caffeine was varied. Also, the liposomes with encapsulated caffeine (20 mg/ml) was added into the reaction mixture of one PMAC-100N-4M hydrogel. Briefly, 4 ml of methacrylic acid and various weights of caffeine were dissolved in distilled water (Table 1.), followed by the addition of sodium hydroxide in order to completely neutralized methacrylic acid (100N). In one reaction mixture, the liposomes

suspension with encapsulated caffeine (20 mg/ml) was added instead of caffeine (Table 1.). Subsequently, the temperature of reaction mixture was elevated to 60 °C and during vigorously stirring 4 g of casein was added and dissolved. Next step was the addition of MBA (1.6 mol% with respect to methacrylic acid) and dissolution, followed by the addition and dissolution of the initiator (0.9 ml of 1 wt% aqueous solution). Final step was pouring of the obtained mixture in glass molds, that were left in the air oven at 60 °C for 5 h after which disc shaped samples were cut and dried at room temperature. Prepared samples are denoted as PMAC-100N-4M-x, where x represents the weight of caffeine which was added during the synthesis of the samples. The sample with embedded liposomes is denoted as PMAC-100N-4M-L where L represents the symbol for the liposomes suspension with encapsulated caffeine (20mg/ml).

Table 1. Feed composition

Sample	Liposome suspension with caffeine (20mg/ml), % in respect to distilled water	Distilled water, ml	Caffeine weight, g
PMAC-100N-0.2	-	6.17	0.2
PMAC-100N-4M-0.2	-	8.93	0.2
PMAC-100N-4M-1	-	8.13	1
PMAC-100N-4M-2	-	7.13	2
PMAC-100N-4M-L	50	4.56	-

2.3 PMAC-100N-4M hydrogels swelling

The swelling experiments of the PMAC-100N-4M hydrogels were conducted at 37 °C in two media with different pH values: 0.1M HCl with pH of 1 (as simulation of human stomach) and phosphate buffer with pH of 6.8 - PB 6.8 (as simulation of human intestines) [5, 14, 15]. The weight of each PMAC-100N-4M hydrogel was first measured (m_0 , g) and then each hydrogel was immersed into the investigated mediums. At previously defined time intervals PMAC-100N-4M hydrogel was removed from the medium, its weight was measured (m_t , g) and then the PMAC-100N-4M hydrogel was immersed into the medium again. The experiment was performed until equilibrium state was reached. The swelling degree (SD) was calculated according to the following equation:

$$SD = (m_t - m_0) / m_0 \quad (1)$$

The equilibrium swelling degree (SDeq) of each PMAC-100N-4M hydrogel was calculated by using the same equation (Eq. (1)) in which m_t was replaced with m_{eq} (the weight of hydrogel in equilibrium state).

2.4 Controlled release of caffeine from PMAC-100N-4M hydrogels

Release process of caffeine from the PMAC-100N-4M hydrogels was analyzed in the same media and at the same experimental conditions as was the PMAC-100N-4M hydrogels swelling analyzed. At predetermined time intervals 3 ml of the solution was collected and UV analyzed at 273 nm (caffeine maximum peak value), after which the solution was returned back into the medium. Each experiment was conducted three times and mean value of absorbance was used for further determination of caffeine concentration released into the medium.

3 Results and discussion

The swelling curves of the PMAC-100N-4M hydrogels in two media are presented in Fig. 1. a) and b). Obtained SDeq values of the PMAC-100N-4M hydrogels are listed in Table 2. The PMAC-100N-4M hydrogels had significantly higher SDeq values in PB 6.8 than in 0.1M HCl. This swelling behavior of the PMAC-100N-4M hydrogels can be explained by deprotonation of carbox-

ylic groups of PMAA and casein. Deprotonation of -COOH groups is favored in the media with pH values higher than pKa of MAA and pI of casein (4.6 [4][16]), such as PB 6.8. Deprotonation of carboxylic groups leads further to the repulsion of polymer chains due to which medium diffuses more easily into the polymer network leading to the higher SDeq values.

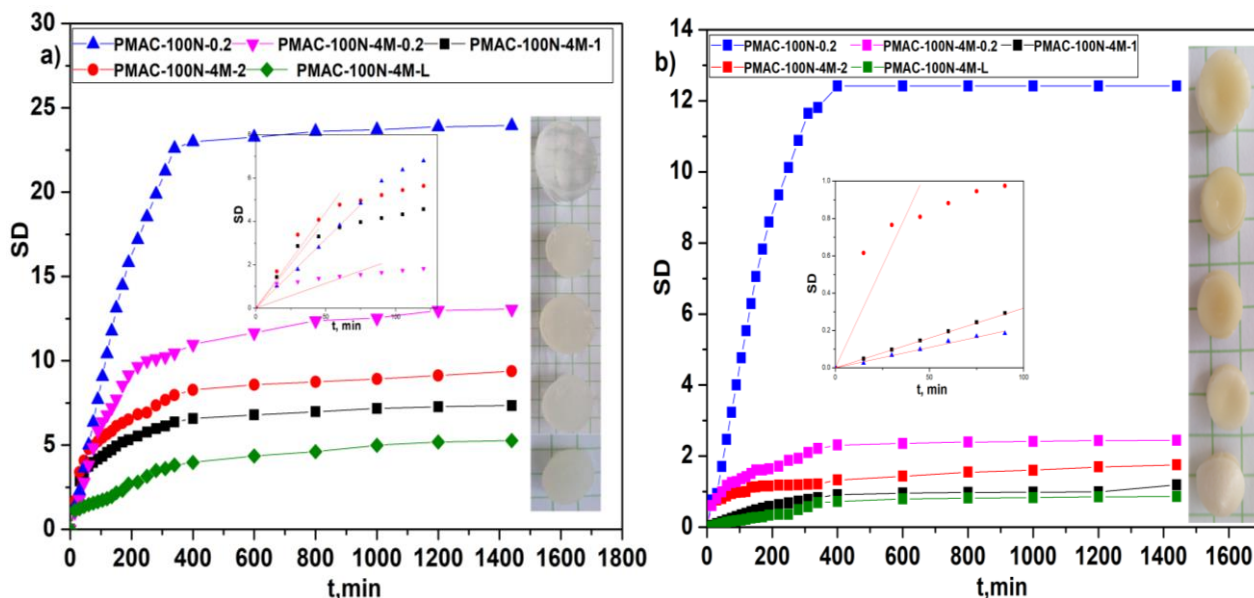


Figure 1. The curves of PMAC-100N-4M hydrogels swelling in: a) PB 6.8 and b) 0.1M HCl (the pictures present PMAC-100N-4M hydrogels swollen to equilibrium in investigated medium)

The increase in the MBA amount led to the decrease in the SDeq values (PMAC-100N-0.2 and PMAC-100N-4M-0.2 samples). Namely, higher amount of crosslinker led to the increase in the crosslinking density and diffusion of the medium into the carrier network was hindered. The increase in the encapsulated weight of caffeine led first to the decrease in the SDeq values (samples PMAC-100N-4M-0.2 and PMAC-100N-4M-1). Then, the SDeq value of the sample with the highest amount of the encapsulated caffeine (PMAC-100N-4M-2) increased. This could be a consequence of the unregular distribution of caffeine within the hydrogels network. Namely, some amount of the encapsulated caffeine was probably located near or at the surface of the PMAC-100N-4M hydrogel [17]. This led to the distribution of the lower amount of the drug within the carrier network, so the path of the medium (PB 6.8) into the polymer network was not interfered. In addition, the repulsion of polymer chains (favored in PB 6.8) led to the easier diffusion of the medium into the carrier network [17, 18]. The lowest SDeq value had the sample with embedded liposomes (PMAC-100N-4M-L) because the liposomes occupied the pores in the hydrogels network interfering in that manner diffusion of the medium into the hydrogel network.

Table 2. SDeq values of PMAC-100N-4M hydrogels in 0.1M HCl and PB 6.8

Sample	SDeq	
	0.1M HCl	PB 6.8
PMAC-100N-0.2	12.4	23.9
PMAC-100N-4M-0.2	2.44	13.1
PMAC-100N-4M-1	1.19	7.35
PMAC-100N-4M-2	1.75	9.39
PMAC-100N-4M-L	0.860	5.27

The curves of caffeine release from the PMAC-100N-4M hydrogels are presented in Fig. 2. a*) and b*). The released amounts of the caffeine from the PMAC-100N-4M hydrogels was notice-

ably higher in PB 6.8 than in 0.1M HCl due to the pH dependent swelling behavior of the hydrogels. Namely, the PMAC-100N-4M hydrogels had higher SDeq values in PB 6.8, hydrogels network expanded more in this medium, enabling easier diffusion of caffeine from the samples. It can be noticed that around two times higher amount of caffeine was released in PB 6.8 than in 0.1M HCl. The increase in the crosslinker amount significantly decreased the amount of released caffeine (PMAC-100N-0.2 and PMAC-100N-4M-0.2 samples). This was due to the increase in the crosslinker density which hindered the diffusion of caffeine from the hydrogel into the surrounding medium. Increase in the weight of encapsulated caffeine led to the increase in the release rate and release amount of the drug in both media [17]. Also, the addition of the liposomes drastically decreased the release rate of caffeine. This was due to the presence of the wall of liposomes particle which represented additional barrier for drug release, so drug release was slower.

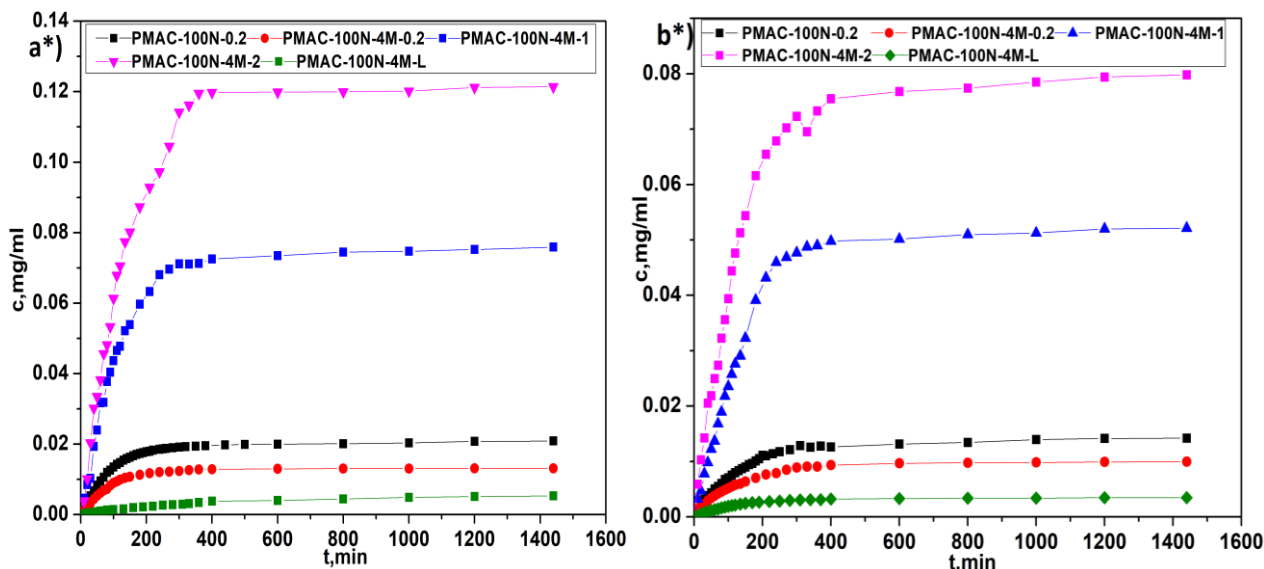


Figure 2. The profiles of caffeine release from PMAC-100N-4M hydrogels in: a*) PB 6.8 and b*) 0.1M HCl

4 Conclusions

In present study, the hydrogels based on methacrylic acid and casein with 1.6mol% of crosslinker, 100% neutralized methacrylic acid (PMAC-100N-4M) were prepared. It was investigated how the change in the encapsulated amount of caffeine and addition of the liposomes suspension affect the swelling behavior of the PMAC-100N-4M hydrogels and caffeine release. The swelling behavior of the PMAC-100N-4M hydrogels and the process of the caffeine release were investigated in two media which simulated environment in human stomach and intestines (0.1M HCl and PB 6.8).

The analysis of the PMAC-100N-4M swelling process showed that these hydrogels had significantly higher SDeq values in PB 6.8 than in 0.1M HCl. Namely, pH value of PB 6.8 is higher than pKa of PMAA and pI of casein, which leads to the formation of negative charges along the polymer chains. This further caused the repulsion of polymer chains and swelling of the PMAC-100N-4M hydrogels. The increase in the encapsulated weight of caffeine induced decrease in the SDeq values of the PMAC-100N-4M hydrogels. This could be a consequence of the increase in the number of interactions established between caffeine and casein. Such high number of casein/caffeine interactions led to the more compact polymer network and diffusion of surrounding medium was interfered. Further increase in the encapsulated weight of caffeine led to the increase in the SDeq value because some amount of caffeine was located near or at the surface of the hydrogels which enabled easier diffusion of the medium into the PMAC-100N-4M network and swelling of the PMAC-100N-4M hydrogels. The addition of the liposomes into the PMAC-100N-4M hydrogels led to the decrease in the SDeq values of the PMAC-100N-4M hydrogels. The liposomes particles physically occupied the hydrogels pores hindering in that manner swelling of the PMAC-100N-4M

hydrogels. The same trend was observed for the process of caffeine release from the PMAC-100N-4M hydrogels. The increase in the encapsulated amount of caffeine led to the increase in the released amount of caffeine in both media. The increase in the crosslinker amount and the addition of the liposomes led to the decrease in the amount of released caffeine.

Results obtained in this study showed that the PMAC-100N-4M hydrogels have huge potential for controlled release of poorly water-soluble active substance such as caffeine. Also, the kinetic of release of poorly water-soluble active substance can be easily adjust according to the demands of specific application of the PMAC-100N-4M hydrogels. So, the potential of these hydrogels for encapsulation of higher amount of poorly water-soluble drug and its release will be investigated in our future research.

4.1 Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-47/2023-01/200287).

5 References

- [1] **M.D. Markovic, M.M. Svetozarevic, V.V. Panic, S.I. Savic, A.D. Masulovic, P.M. Spasojevic, R.V. Pjanovic**, Novel eco-friendly initiation system based on vitamin C for energy efficient synthesis of PMAA hydrogel used for delivery of phenolic compounds, *Chem. Eng. J.* 459 (2023) 141580.
- [2] **M.D. Markovic, S.I. Seslija, V.D. Ugrinovic, M. Kunaver, V.V. Panic, R.V. Pjanovic, P.M. Spasojevic**, Green pH- and magnetic-responsive hybrid hydrogels based on poly(methacrylic acid) and Eucalyptus wood nanocellulose for controlled release of ibuprofen, *Cellulose* 28(17) (2021) 11109-11132.
- [3] **A.-J. Xie, H.-S. Yin, H.-M. Liu, C.-Y. Zhu, Y.-J. Yang**, Chinese quince seed gum and poly (N,N-diethylacryl amide-co-methacrylic acid) based pH-sensitive hydrogel for use in drug delivery, *Carbohydr. Polym.* 185 (2018) 96-104.
- [4] **D.S. Seeli, M. Prabakaran**, Guar gum oleate-graft-poly(methacrylic acid) hydrogel as a colon-specific controlled drug delivery carrier, *Carbohydr. Polym.* 158 (2017) 51-57.
- [5] **M.D. Markovic, V.V. Panic, S.I. Seslija, P.M. Spasojevic, V.D. Ugrinovic, N.M. Boskovic-Vragolovic, R.V. Pjanovic**, Modification of hydrophilic polymer network to design a carrier for a poorly water-soluble substance, *Polymer Engineering & Science* 60(10) (2020) 2496-2510.
- [6] **M. Suhail, C.-M. Shih, J.-Y. Liu, W.-C. Hsieh, Y.-W. Lin, P.-C. Wu**, In-vitro and in-vivo evaluation of biocompatible polymeric microgels for pH- driven delivery of Ketorolac tromethamine, *Int. J. Pharm.* 626 (2022) 122194.
- [7] **M.S. Bami, M.A. Raeisi Estabragh, P. Khazaeli, M. Ohadi, G. Dehghannoudeh**, pH-responsive drug delivery systems as intelligent carriers for targeted drug therapy: Brief history, properties, synthesis, mechanism and application, *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* 70 (2022) 102987.
- [8] **M.D. Markovic, V.V. Panic, S.I. Seslija, A.D. Milivojevic, P.M. Spasojevic, N.M. Boskovic-Vragolovic, R.V. Pjanovic**, Novel strategy for encapsulation and targeted delivery of poorly water-soluble active substances, 60(8) (2020) 2008-2022.
- [9] **M.D. Markovic, V.V. Panic, S.I. Seslija, P.M. Spasojevic, V.D. Ugrinovic, N.M. Boskovic-Vragolovic, R.V. Pjanovic**, Modification of hydrophilic polymer network to design a carrier for a poorly water-soluble substance, 60(10) (2020) 2496-2510.
- [10] **S. Haque, C.R. Patra**, Chapter 22 - Casein-based nanosystems for therapeutic applications, in: M.S. Hasnain, A.K. Nayak, T.M. Aminabhavi (Eds.), *Polymeric Nanosystems*, Academic Press 2023, pp. 621-655.
- [11] **S. Gandhi, I. Roy**, Drug delivery applications of casein nanostructures: A minireview, *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* 66 (2021) 102843.

- [12] **J.C. Cuggino, M.L. Picchio, A. Gugliotta, M. Bürgi, L.I. Ronco, M. Calderón, M. Etcheverrigaray, C.I. Alvarez Igarzabal, R.J. Minari, L.M. Gugliotta**, Crosslinked casein micelles bound paclitaxel as enzyme activated intracellular drug delivery systems for cancer therapy, *Eur. Polym. J.* 145 (2021) 110237.
- [13] **M.D. Marković, J.D. Tadić, S.I. Savić, I.Z. Matić, T.P. Stanojković, D.Ž. Mijin, V.V. Panić**, Soft 3D hybrid network for delivery and controlled release of poorly soluble dihydropyrimidinone compound: An insight into the novel system for potential application in leukemia treatment, *Journal of Biomedical Materials Research Part A* 110(9) (2022) 1564-1578.
- [14] **R.K. Dongare, R.M. Tigote, M.P. Shinde, A.A. Skelton, S.P. Patole, S.N. Inamdar**, DFT-based theoretical model for predicting the loading and release of pH-responsive paracetamol drug, *Materials Today: Proceedings* (2023).
- [15] **J. Li, X. Yang, X. Li, Z. Zhang, Z. Wei, Z. Xing, S. Deng, F. Duan**, Okra polysaccharides/gelatin complex coacervate as pH-responsive and intestine-targeting delivery protects isoquercetin bioactivity, *Int. J. Biol. Macromol.* 159 (2020) 487-496.
- [16] **D.M. Nanicuacua, F.A. Gorla, M. de Almeida Silva, M.G. Segatelli, C.R.T. Tarley**, Synthesis of a novel bifunctional hybrid molecularly imprinted poly(methacrylic acid-phenyltrimetoxysilane) for highly effective adsorption of diuron from aqueous medium, *React. Funct. Polym.* 181 (2022) 105432.
- [17] **M.D. Marković, R.V. Pjanović, P.M. Spasojević, S.I. Savić, V.V. Panić**, Kontrolisano otpuštanje kofeina iz trodimenzionih mreža na bazi poli(metakrilne kiseline) i kazeina – ispitivanje uticaja koncentracije kofeina na proces otpuštanja, (1) (2022) 19-24% V 35.
- [18] **M. Martinez-Moro, J. Jencyk, J.M. Giussi, S. Jurga, S.E. Moya**, Kinetics of the thermal response of poly(N-isopropylacrylamide co methacrylic acid) hydrogel microparticles under different environmental stimuli: A time-lapse NMR study, *J. Colloid Interface Sci.* 580 (2020) 439-448.

ENERGETSKA BEZBEDNOST SEKTORA PRIRODNOG GASA SRBIJE

ENERGY SECURITY OF SERBIAN NATURAL GAS SECTOR

Aleksandar MADŽAREVIĆ*, **Predrag JOVANČIĆ**, **Miroslav CRNOGORAC**
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

U prve dve decenije 21. veka obezbeđivanje sigurnosti snabdevanja prirodnim gasom domaćeg tržišta bio je jedan od prioriteta razvoja energetike Srbije. Istovremeno, aspekt sigurnog snabdevanja bio je neizostavni deo slagalice stvaranja energetske bezbednosti. Izražena uvozna zavisnost je dominantna karakteristika sektora prirodnog gasa, tačnije, Republika Srbija je snažno zavisna od ruskog gasa, sa više od 80% uvezenih količina gasa, a do pre dve godine snabdevala se isključivo kroz jednu interkonekciju. U radu se razmatra aktuelna situacija u sektoru prirodnog gasa, razlika u odnosu na ranije periode i potencijalni trend procene sigurnosti snabdevanja Srbije prirodnim gasom, kao i ranjivost ovog sektora na prekide u međunarodnim lancima snabdevanja. Kroz rad je izvršena analiza energetske bezbednosti sektora prirodnog gasa primenom indeksa N-1, indeksa IDUPS i parametra razvoja infrastrukture sektora. Ova tri parametra opisuju raspoloživost sistema u tehničkom smislu, diversifikaciju izvora i pravaca snabdevanja, kao i stepen strukturnog razvoja u poređenju sa predviđenim strateškim planovima razvoja, respektivno. U ovom radu je predstavljena i nova metodologija za utvrđivanje uticaja spremnosti sistema i broja izvora i pravaca snabdevanja, kao i njihove međusobne interakcije, na sigurnost snabdevanja, a u krajnjoj liniji i na energetska bezbednost Republike Srbije.

Ključne reči: N-1, IDUPS, energetska bezbednost, sigurnost snabdevanja

In the first two decades of the 21st century, ensuring the security of the supply of natural gas to the domestic market was one of the priorities of the development of the Serbian energy sector. At the same time, the aspect of secure supply was an indispensable part of the puzzle of creating energy security. Pronounced import dependence is a dominant feature of the natural gas sector, more precisely, the Republic of Serbia is strongly dependent on Russian gas, with more than 80% of imported gas volumes, and until two years ago, it was exclusively supplied through one interconnection. The paper discusses the current situation in the natural gas sector, the difference compared to earlier periods and the potential trend of assessing the security of natural gas supply to Serbia, as well as its vulnerability to interruptions in international supply chains. Through the paper, an analysis of the energy security of the natural gas sector assessed by the N-1 index, IDUPS and the parameter of infrastructure development of the sector was carried out. These three parameters describe the availability of the system in a technical sense, the diversification of sources and directions of supply, as well as the degree of structural development, compared to the foreseen strategic development plans, respectively. This paper also presents a new methodology for determining the impact of system readiness and the number of sources and directions of supply, as well as their mutual interaction, on the security of supply, and ultimately on the energy security of the Republic of Serbia.

Key words: N-1, IDUPS, security of supply, energy security

* Corresponding author, e-mail: aleksandar.madzarevic@rgf.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

ODREĐIVANJE OPTIMALNOG REŽIMA ZAMRZAVANJA LISNATOG PECIVA

DETERMINING THE OPTIMAL FREEZING REGIME OF PUFF PASTRY

Anastasija SELAKOVIĆ*

Udruženje energetičara Subotica, Subotica

U radu, koji je deo jedne od faza istraživanja u okviru doktorske disertacije, u cilju zadovoljenja trendova u pekarskoj proizvodnji ispitan je efekat šok zamrzavanja testa na tehnološke osobine lisnatog peciva. Ispitivan je uticaj ulaznih faktora (temperatura zamrzavanja t_z i temperatura postignuta u središtu testanog komada t_c) na fizičke parametre kvaliteta lisnatog peciva. Optimizacija procesa zamrzavanja izvršena je ispitivanjem izlaznih parametara kvaliteta (specifična zapremina, čvrstoća, skupljanje, eliptičnost, narastanje) lisnatog peciva od zamrznutog testa skladištenog na temperaturi -18°C 1, 7 i 30 dana. Tokom zamrzavanja testanih komada praćena je dinamika promene temperature od početka zamrzavanja do postizanja željene temperature u središtu testa. Na bazi rezultata istraživanja primenom funkcije poželjnosti izvršena je optimizacija temperature zamrzavanja (-25 , -30 i -35°C) i temperature u središtu testanog komada (-10 , -15 i -20°C). Zamrzavanje lisnatog testa na temperaturi -35°C do postizanja -10°C u središtu testanog komada je optimalni i najkraći režim zamrzavanja (19 min), sa najmanjim negativnim efektom na fizičke parametre kvaliteta lisnatog peciva.

Ključne reči: lisnato testo; temperatura zamrzavanja; temperatura u središtu testanog komada; fizički parametri kvaliteta

In the aim to meet the trends in baking industry, in paper, which is part of doctoral dissertation phase the influence of shock freezing on the technological properties of puff pastry was investigated. The effects of input factors (freezing temperature and temperature in dough center) on physical pastry quality parameters were investigated. Freezing optimization was investigated by research the output quality parameters (specific volume, firmness, lift, shrinkage and ellipticity) of puff pastry from frozen dough stored at -18°C for one, seven and thirty days. Freezing temperature regimes and temperatures in the center of the dough have a statistically significant effect on the observed physical quality parameters (specific volume, firmness, ellipticity, shrinkage, lift) of puff pastry with the addition of wholemeal flour. The values of the puff pastry specific volume after thirty days of storage are higher by 10-15% compared to the values obtained during shorter storage (one and seven days). The frozen dough storage time effects on puff pastry firmness. Depending on the applied freezing regime, after seven days of storage, the pastry firmness decreases, and after thirty days it increases from 5 to even 50%. In the case of samples frozen at -25 and -30°C , with a decrease in the temperature in the center of the frozen dough pieces, regardless of the storage time, shape deformations during baking also increase, especially shrinkage. As the temperature reached in the center of the frozen dough increases, lift decreases. The maximum lift is achieved at a freezing temperature of -30°C , while a decrease or increase in the freezing temperature has a negative effect on the pastry lift increase during baking. During the freezing of the dough, the dynamics of the temperature change from the start of freezing until the desired temperature in the center of the dough is reached. Based on the results of the investigation, freezing temperature (-25 , -30 and -35°C) and temperature in dough center (-10 , -15 and -20°C) was optimized using desirability function. The application of freezing temperature -35°C while reaching temperature in dough center -10°C was the optimal and also shortest freezing regime (19 min) and had the lowest negative effects on physical pastry quality parameters.

Key words: puff dough; freezing temperature; temperature in dough center; physical quality characteristics

* Corresponding author, e-mail: anasel71@gmail.com

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Hemijska industrija".

AZO PIRIDONSKE BOJE ZA VIŠENAMENSKU UPOTREBU: SINTEZA, KAKRAKTERIZACIJA, ANTIOKSIDATIVNA I ANTIMIKROBNA AKTIVNOST

MULTIPURPOSE AZO PYRIDONE DYES: SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, ANTIOXIDANT AND ANTIMICROBIAL ACTIVITY

Aleksandra MAŠULOVIĆ^{1*}, Milica SVETOZAREVIĆ¹, Aleksandra IVANOVSKA¹,
Anita LAZIĆ, Julijana TADIĆ², Dušan MIJIN³, Jelena LAĐAREVIĆ³

¹ Innovation Center of the Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

² Vinča Institute of Nuclear Sciences – National Institute of
the Republic of Serbia, Belgrade, Serbia

³ Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

*Široka komercijalna upotreba piridonskih azo boja zasniva se na njihovoj relativno jeftinoj i jednostavnoj pripremi, kao i činjenici da se veliki broj kuplujućih i diazo komponenti mogu međusobno kombinovati kako bi se dobile boje odgovarajućih svojstava. Veliki značaj ovih boja poslednjih nekoliko decenija, ogleda se u njihovim istaknutim svojstvima kao što su živopisna obojenja i dobra postojanost. Ove boje, takođe, nalaze primenu u ink-džet štampi i LCD ekranima. Sa druge strane, ove boje predstavljaju značajna jedinjenja u biološkim studijama, jer poseduju antioksidativnu, antimikrobnu i antiproliferativnu aktivnost. U ovom radu, sintetisane su tri boje koje u svojoj strukturi obuhvataju tri bioaktivna heterociklična jezgra, pri čemu je kao kuplujuća komponenta korišćen 6-hidroksi-4-metil-1-piridinijum-2-piridon, a kao diazo komponente anilini na bazi tiazola (2-aminotiazol, 2-aminobenzotiazol i 6-metoksi-2-aminobenzotiazol). Jedinjenja su okarakterisana temperaturom topljenja, NMR i FTIR spektroskopijama. Solvatohromna svojstva su ispitana u rastvaračima različitih svojstava. Antioksidativna aktivnost jedinjenja ispitana je ABTS (2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolin-6-sulfonat) testom, dok je minimalna inhibitorna koncentracija ispitana primenom mikrodilucione metode u bujonu prema 5 bakterijskih sojeva (*S. aureus*, *E. faecalis*, *B. subtilis*, *E. coli* i *K. pneumoniae*), kao i prema oportunističkoj gljivici *C. albicans*.*

Ključne reči: Azo boje; 2-piridon; tiazol; antioksidativna aktivnost; antimikrobna aktivost

*Wide commercial application of azo pyridone dyes rests on the cost-effectiveness of their preparation and almost innumerable possibilities for the synthesis by combining various diazo and coupling pyridone components that enable tuning of targeted properties. The great significance of these dyes in the last few decades is due to their outstanding properties, such as vivid colors and good color fastness properties. Azo pyridone dyes are also applicable in different coloration related processes such as inkjet printing and liquid crystal displays. On the other hand, they are recognized as valuable compounds in biological studies, as they possess antioxidant, antimicrobial and anti-proliferative properties. In this work, three novel 6-hydroxy-4-methyl-1-pyridinium-2-pyridone based dyes bearing three bioactive heterocyclic rings in their structures are synthesized, wherein thiazole based anilines (2-aminothiazole, 2-aminobenzothiazole, 6-methoxy-2-aminobenzothiazole) are used as diazo components. The compounds are characterized by melting points, NMR and FTIR spectroscopy. The solvatochromic properties are investigated in solvents of different properties. Furthermore, the antioxidant capacities of the compounds are evaluated by ABTS (2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) assay, while antimicrobial activity is determined by broth microdilution method against five bacterial strains (*S. aureus*, *E. faecalis*, *B. subtilis*, *E. coli* and *K. pneumoniae*) and one fungal strain (*C. albicans*).*

Key words: Azo dye; 2-pyridone; thiazole; antioxidant activity; antimicrobial activity

* Corresponding author, e-mail: amasulovic@tmf.bg.ac.rs

1 Introduction

Is our colorful closet one of the main reasons for water pollution? According to Ellen MacArthur Foundation, the fashion industry uses around 93 billion cubic meters of water annually which makes dyeing of clothes one of the most polluting and energy-intensive processes [1]. Dye chemistry nowadays is in a constant search of finding solutions to overcome fast fashion disadvantages without leaving our closets colorless. As one of the most promising coloring organic compounds, azo dyes arise, with ease in preparation, intense color and diverse innovative application [2]. The application of azo dyes is not limited only on textile dyeing as it expands on usage in advanced technology products such as LCD screens [3], different storage devices [2], dye sensitized solar cells [4], sensors and optical recording systems [2]. In the last decade the attention has shifted towards heterocyclic azo dyes, which besides versatile application, possess an advantage of an easy design for donor- π -acceptor (D- π -A) molecular structure. Due to the presence of azo π -conjugated system there is an innumerable number of colors that can be synthesized by replacing one of the substituents of the azo linkage, either donating (D) or accepting (A) one [2,5]. On the other side, azo bond in the architecture of heterocyclic systems is shown to be responsible for remarkable biological application. The literature reports heterocyclic azo dyes with antimicrobial, antioxidant, antituberculosis, anti-inflammatory and anticancer activities [6,7]. As economic and ecological aspects play an important part in the development of azo dyes, the need of developing multifunctional colorants becomes a great challenge. In this manner heterocyclic azo dyes possessing pyridone frameworks become of a great interest from a synthetic aspect due to their color deepening effect, simplicity of preparation and high molar extinction coefficients [8]. Pyridone containing azo dyes are considered a class of heterocyclic compounds that are rapidly replacing industrial dyes like C.I. Disperse Yellows 114, 119, 211 with distinctive properties as well as the presence of several biological activities [9].

Inspired to an above stated literature review, in this work three novel dyes incorporating three bioactive heterocyclic moieties have been synthesized. The coupling component was 6-hydroxy-4-methyl-1-pyridinium-2-pyridone wherein thiazole based anilines (2-aminothiazole, 2-aminobenzothiazole and 6-methoxy-2-aminobenzothiazole) are used as diazo components. Synthesized compounds were characterized by melting points, NMR and FTIR spectroscopy wherein the solvatochromic properties were investigated in solvents of different properties. Furthermore, the antioxidant capacities of the compounds are evaluated by ABTS assay, while antimicrobial activity is determined by broth microdilution method against five bacterial strains (*S. aureus*, *E. faecalis*, *B. subtilis*, *E. coli* and *K. pneumoniae*) and one fungal strain (*C. albicans*).

2 Experimental section

2.1 Synthesis

The synthesis of the novel pyridone azo dyes **1**, **2** and **3** (Figure 1) was performed following classical diazo-coupling reaction [8]. Corresponding heterocyclic amines 2-aminothiazole (**A**), 2-aminobenzothiazole (**B**) and 6-methoxy-2-aminobenzothiazole (**C**) were used for the diazotisation reaction, while 6-hydroxy-4-methyl-3-pyridinium-2-pyridone (**D**) [9] was employed as coupling component. The spectral analyses confirmed the structure of the dyes and revealed that dyes acquire hydrazone form, rather than azo tautomeric form.

Dye **1** (5-((thiazol-2-yl)diazenyl)-6-hydroxy-4-methyl-3-pyridinium-2-pyridone). Dark purple solid. Yield: 48%; mp. 305.4–306.7 °C; ATR-FTIR (ν/cm^{-1}): 3357 (N–H hydrazone), 3190 (N–H pyridone), 1677, 1628 (C=O); ^1H NMR (400 MHz, DMSO- d_6 , δ/ppm): 14.32 (1H, s, NH hydrazone), 12.51 (1H, s, NH pyridone), 9.16 (2H, d, $J = 5.6$ Hz, pyridinium), 8.92 (1H, t, $J = 9$ Hz, pyridinium), 8.48 (2H, t, $J = 7.2$ Hz, pyridinium), 7.62 (1H, d, $J = 3.4$ Hz, thiazole), 7.48 (1H, d, $J = 3.4$ Hz, thiazole) 2.41 (3H, s, $-\text{CH}_3$).

Dye **2** (5-((benzothiazol-2-yl)diazenyl)-6-hydroxy-4-methyl-3-pyridinium-2-pyridone). Red solid. Yield: 55%; mp. 329.5–330.5 °C; ATR-FTIR (ν/cm^{-1}): 3420 (N–H hydrazone), 3097 (N–H pyridone), 1693, 1645 (C=O); ^1H NMR (400 MHz, DMSO- d_6 , δ/ppm): 14.51 (1H, s, NH hydra-

zone), 12.31 (1H, s, NH pyridone), 9.15 (2H, d, $J = 5.6$ Hz, pyridinium), 8.95 (1H, t, $J = 7.8$ Hz, pyridinium), 8.44 (2H, t, $J = 7$ Hz, pyridinium), 8.08 (1H, d, $J = 7.8$ Hz, benzothiazole), 7.95 (1H, d, $J = 7.8$ Hz, benzothiazole), 7.32 (1H, t, $J = 7.8$ Hz, benzothiazole), 7.15 (1H, t, $J = 7.8$ Hz, benzothiazole), 2.49 (3H, s, CH₃).

Dye **3** ((5-((6-methoxy-benzothiazol-2-yl)diazenyl)-6-hydroxy-4-methyl-3-pyridinium-2-pyridone). Dark red solid. Yield: 44%; mp. 327.3–328.5°C; ATR-FTIR (ν/cm^{-1}): 3380 (N–H hydrazone), 3105 (N–H pyridone), 1678, 1634 (C=O); ¹H NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆, δ/ppm): 14.33 (1H, s, NH hydrazone), 12.23 (1H, s, NH pyridone), 9.11 (2H, d, $J = 5.6$ Hz, pyridinium), 8.88 (1H, t, $J = 7.8$ Hz, pyridinium), 8.44 (2H, t, $J = 7$ Hz, pyridinium), 7.58–7.33 (3H, m, benzothiazole), 3.84 (3H, s, OCH₃), 2.50 (3H, s, CH₃).

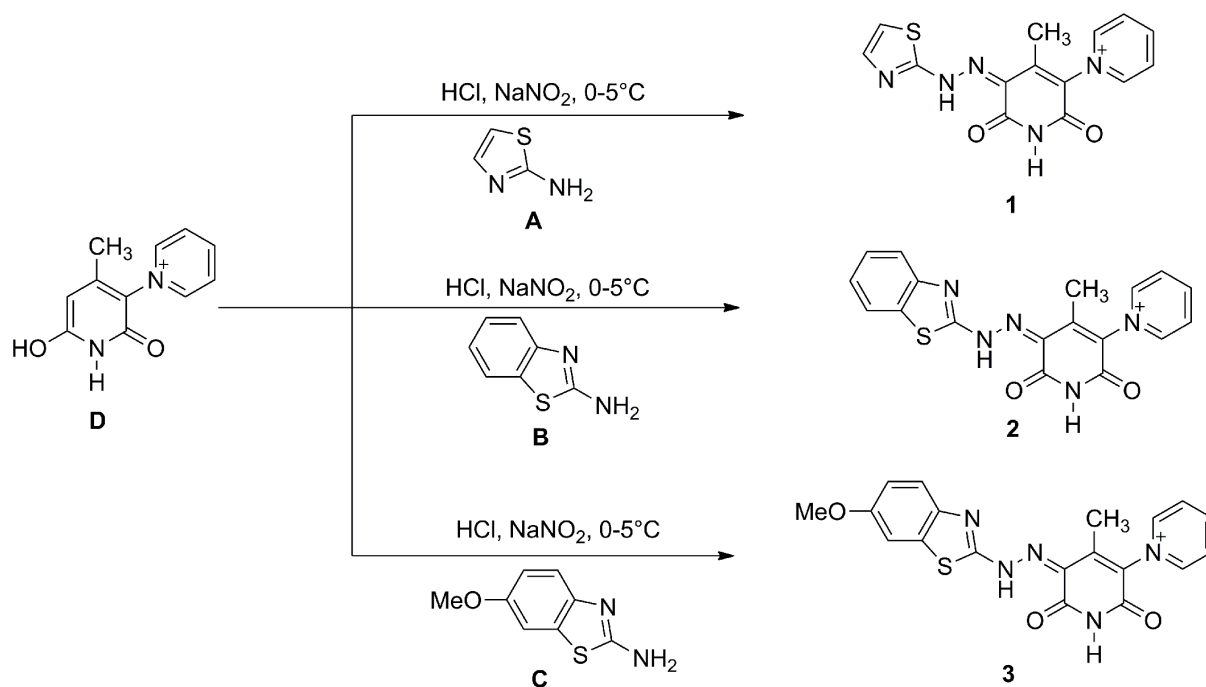


Figure 1. Synthesis of the novel dyes

2.2 Determination of the antioxidant activity

Antioxidant activity of the synthesized compounds was assayed according to the previously described procedure [8]. Ascorbic acid was used as a reference antioxidant molecule.

2.3 Determination of the antimicrobial activity

Antimicrobial activity of was determined by the broth microdilution method [10] against the Gram-positive *S. aureus* (ATCC 6538), *E. faecalis* (ATCC 29212), *B. subtilis* (ATCC6633); the Gram-negative *E. coli* (ATCC 8739) and *K. pneumoniae* (NCIMB 9111) and one yeast, *C. albicans* (ATCC 10231). The results are expressed as minimum inhibitory concentration (MIC).

3 Results and discussion

Specific nature of azo pyridone dyes is manifested through the tautomerization phenomenon. It is worth mentioning that azo dyes are also referred to as hydrazone dyes since they can be either in the azo form or in the tautomeric hydrazone one. Tautomerism is important not only to chemists but also to dye manufactures, as tautomers in distinctive isomeric forms not only differ in color, but also have different tinctorial strengths and properties such as color fastness to washing and light fastness, sublimation, perspiration, and so on. Azo dyes and corresponding hydrazone ones in the tautomeric system appear to be quite interesting from structures to properties [11]. The literature findings and the experience of the authors has shown that the more stable and dominant form is hydrazone one. On the other hand, azo form of pyridone dyes is rare and deprotonation of the hydroxyl group of the pyridone scaffold occurs in most cases, wherein there is an acid/base equilibri-

um with azo anion and hydrazone forms [8]. The acid/base equilibrium is present in the case of synthesized compounds **1–3**, wherein azo anion (**Ai**)–hydrazone (**H**) tautomeric forms are presented in Figure 2.

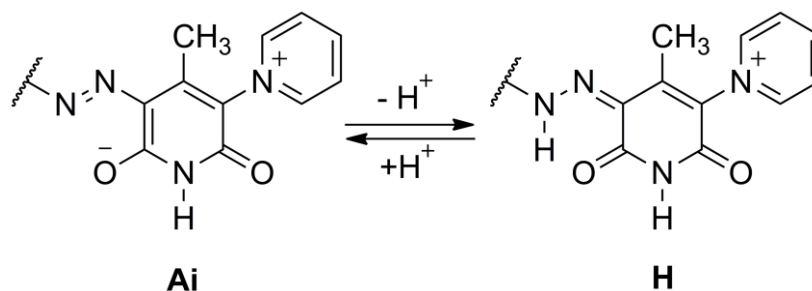


Figure 2. Azo anion-hydrazone tautomeric equilibrium

The pioneer method, mostly used for determination of the dominant tautomeric form in solution, is UV-Vis spectroscopy. In this manner, and in aspiration to determine the dominant tautomeric form, UV-Vis spectra of compounds **1–3** have been recorded in ethanol (Figure 3a). As seen from Figure 3a compound **1** exhibit a peak centered at 480.5 nm as well as another one at 445.5 nm. Furthermore, compound **2** has a distinctive peak at 474.5 nm and a broad shoulder around 444 nm, wherein compound **3** has only one distinctive peak at 457 nm. Dominant peaks can be ascribed to a π - π^* transition of the π conjugated system of the hydrazone form [8].

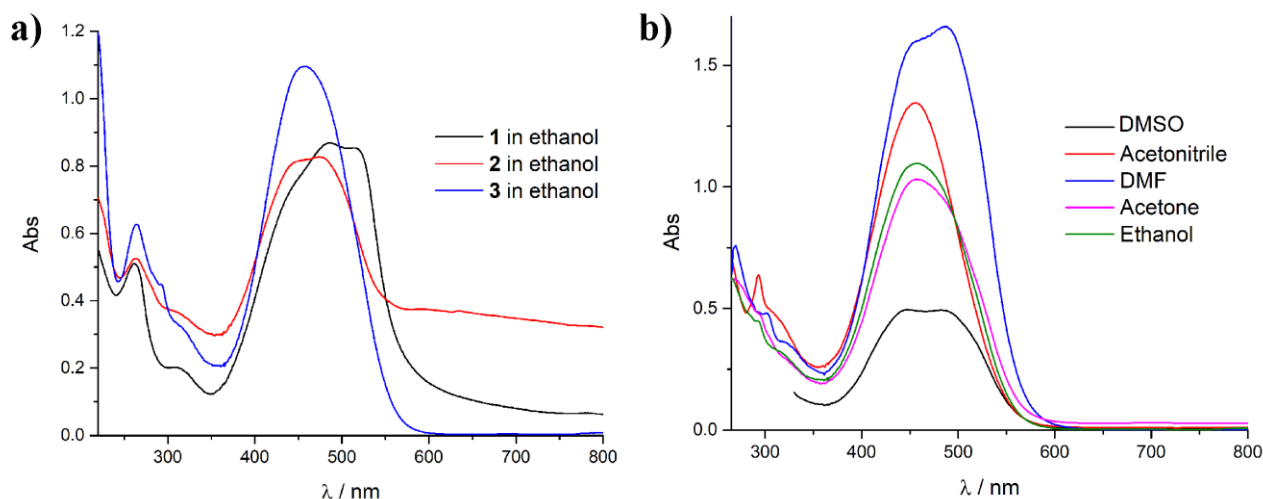


Figure 3. UV-Vis spectra of compounds **1–3** in ethanol (a) and compound **3** in different solvents (b)

The appearance of a shoulder or another peak in the recorded spectra of the compounds **1** and **2** suggest the existence of azo-anion hydrazone equilibrium in ethanol. To examine the solvent effect on azo anion-hydrazone equilibrium of compound **3**, which, according to one dominant band, appeared to have only one form in ethanol. As seen from Figure 3b, UV-Vis spectra of compound **3** in more polar and solvents of high basicity and permittivity (DMF (*N,N*-dimethylformamide) and DMSO (dimethylsulfoxide)), there is a slight bathochromic shift of a dominant peak and another peak at higher wavelengths arises. A new peak can be ascribed to the azo anionic structure, formed by deprotonation of the hydrazone form in the alkaline environment. Therefore, it can be concluded that the equilibrium of the azo anion-hydrazone form is present, wherein anionic form is positioned at higher wavelengths with respect to hydrazone form [12].

Antioxidant activity of the dyes was estimated by ABTS assay at the concentration of 3 mM and the results are presented in Figure 4. The results show that only dye **1** showed significant antioxidant activity comparable to the activity of the reference ascorbic acid. IC₅₀ values of the dye **1** and ascorbic values are determined and are 1.95 and 1.48 mM, respectively, indicating that although

dye has lower antioxidant capacity than ascorbic acid, it is still a candidate for good antioxidant molecule.

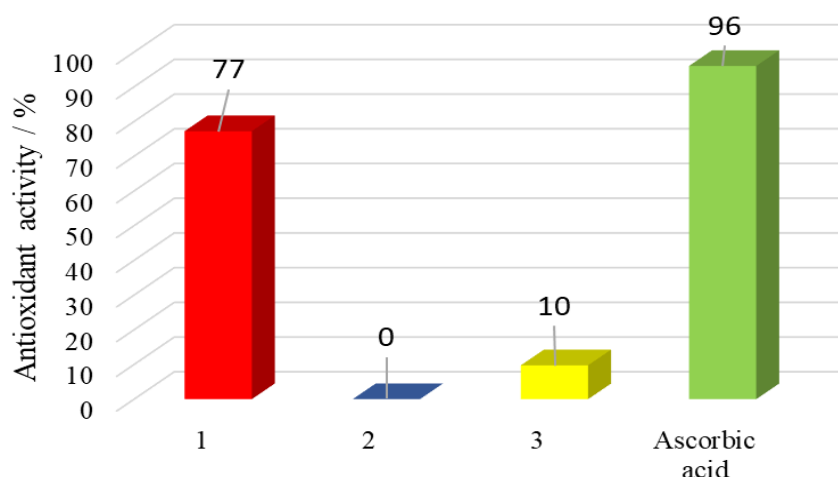


Figure 4. Antioxidant activity of the synthesized dyes

Antimicrobial activity of the synthesized compounds was studied based on a determination MIC value and are presented in Table 1. The results show that dyes **1** and **3** do not exhibit antimicrobial activity against all strains, while dye **2** showed moderate activity against fungal *C. albicans* and causes significant inhibition of the bacterial strain *K. pneumoniae*. However, *S. aureus*, *E. faecalis*, *B. subtilis* *E. coli*, were resistant to the action of the dye **2**.

Table 1. MIC values [$\mu\text{g mL}^{-1}$] for antimicrobial activity for the synthesized dyes

Microorganisms	1	2	3
<i>S. aureus</i> (ATCC 6538)	>1000	>1000	>1000
<i>E. faecalis</i> (ATCC 29212)	>1000	>1000	>1000
<i>B. subtilis</i> (ATCC 6633)	>1000	>1000	>1000
<i>E. coli</i> (ATCC 8739)	>1000	>1000	>1000
<i>K. pneumoniae</i> (NCIMB 9111)	>1000	250	>1000
<i>C. albicans</i> (ATCC 10231)	>1000	500	>1000

4 Conclusion

Inspired by the lack of multifunctional colorants, in this work three novel dyes **1**, **2** and **3**, incorporating three bioactive heterocyclic moieties have been synthesized. NMR and ATR-FTIR characterization of the synthesized compounds lead to a conclusion that dyes are found in hydrazone, rather than azo anionic form. The other conclusion derived from UV-Vis spectra of these compounds is that the azo anion-hydrazone equilibrium of compounds is found when in solution. Basic solvents deprotonate hydroxyl group of the pyridone scaffold and therefore increase the share of azo anionic form in the mixture, which is evidence by the bathochromic shift in the spectra. Moreover, the results obtain by ABTS screening assay revealed that only dye **1** showed significant antioxidant activity comparable to the activity of the reference ascorbic acid. IC_{50} values of the dye **1** and ascorbic values are determined and are 1.95 and 1.48 mM, respectively, which makes this dye a prominent antioxidant agent. Antimicrobial activity of the dyes showed that dyes **1** and **3** do not exhibit antimicrobial activity against tested strains. On the other hand, dye **2** showed moderate activity against fungal *C. albicans* and causes significant inhibition of the bacterial strain *K. pneumoniae*, but *S. aureus*, *E. faecalis*, *B. subtilis* *E. coli*. To conclude, it can be stated that from three synthesized dyes dye **1** has potential to be used as antioxidant and dye **2** has potential to be used as

antifungal and antibacterial agent. These properties can, hopefully be transferred on the textile material when dyeing is employed and therefore lead to some novel, protective textile materials.

4.1 Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-47/2023-01/200135 and 451-03-47/2023-01/200287)

5 References

- [1] <https://edition.cnn.com/style/article/dyeing-pollution-fashion-intl-hnk-dst-sept/index.html> (19.4.2023.)
- [2] **Kumar V., J. Keshavayya, M. N. Matada, S. M. Srinivasa, S. Rangappa**, Synthesis, Characterization and Biological Potency of Butyl-Pyridone Based Azo Dyes, *ChemistrySelect* 5 (2020), pp. 5460–5464.
- [3] **Chigrinov V., H. S. Kwok, H. Takada, H. Takatsu**, Photo-aligning by azodyes: Physics and applications, *Liquid Crystals Today* 14 (2005), 4, pp. 1-15.
- [4] **Mahmood A., M. H. Tahir, A. Irfan, A. G. Al-Sehemi, M. S. Al-Assiri**, Heterocyclic azo dyes for dye sensitized solar cells: A Quantum chemical study, *Computational & Theoretical Chemistry* 1066 (2015), pp. 94–99.
- [5] **Song X., A. Hou, K. Xie, T. Hu**, Synthesis and Dyeing Properties of New Bi-heterocyclic Disperse Dyes Containing Pyridone Group for Polyester Fabrics, *Fibers and Polymers* 21 (2020), 8, pp. 1743–1749.
- [6] **Maliyappa M. R., J. Keshavayya, N. M. Mallikarjuna, P. Murali Krishna, N. Shivakumara, T. Sandeep, K. Sailaja, M. A. Nazrulla**, Synthesis, characterization, pharmacological and computational studies of 4, 5, 6, 7-tetrahydro-1, 3-benzothiazole incorporated azo dyes, *Journal of Molecular Structure* 1179 (2019), pp. 630–641.
- [7] **Karci F., F. Karci, A. Demircal, M. Yamac**, Synthesis, solvatochromic properties and antimicrobial activities of some novel pyridone-based disperse disazo dyes, *Journal of Molecular Liquids* 187 (2013), pp. 302–308.
- [8] **Lađarević J., B. Božić, L. Matović, B. Božić Nedeljković, D. Mijin**, Role of the bifurcated intramolecular hydrogen bond on the physico-chemical profile of the novel azo pyridone dyes, *Dyes and Pigments* 162 (2019), pp. 562–572.
- [9] **Mašulović A.**, *Multifunkcionalni derivati 2-piridona dipolarne strukture i njihova potencijalna primena*, doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2022.
- [10] *CLSI M07: Methods for Dilution Antimicrobial Susceptibility Tests for Bacteria That Grow Aerobically*, Clinical and Laboratory Standards Institute, 2018.
- [11] **Chen X., T. Tao, Y. Wang, Y. Peng, W. Huang, H. Qian**, Azo-hydrazone tautomerism observed from UV-vis spectra by pH control and metal-ion complexation for two heterocyclic disperse yellow dyes, *Dalton Transactions* 41 (2012), pp. 11107-11115.
- [12] **Ertan N., F. Eyduran**, The synthesis of some hetarylazopyridone dyes and solvent effects on their absorption spectra, *Dyes and Pigments* 27 (1995), 4, pp. 313–320.

UTICAJ OBLIKA NANOČESTICA SREBRA NA FIZIČKOHEMIJSKA SVOJSTVA POLI(N-IZOPROPILAKRILAMID) HIDROGEL NANOKOMPOZITA

THE EFFECT OF SILVER NANOPARTICLE SHAPE ON THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF A POLY (N-ISOPROPYLACRYLAMIDE) HYDROGEL NANOCOMPOSITES

Jelena SPASOJEVIĆ*, Ivana VUKOJE, Nikolina NIKOLIĆ, Julijana TADIĆ,
Milica MILOŠEVIĆ, Vesna VODNIK, Aleksandra RADOSAVLJEVIĆ
Vinca Institute of Nuclear Sciences, National Institute of the Republic of Serbia,
University of Belgrade

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.197>

Hidrogelovi su materijali koji poseduju specifičnu poroznost, stabilnost, biokompatibilnost i sposobnost apsorpcije okolne tečnosti, kao i svojstva koja su promenljiva i lako podesiva širokom spektru primena, naročito u oblasti medicine i biotehnologije. Posebno je interesantna oblast "inteligentnih" hidrogelova, odnosno materijala koji reaguju na spoljašnje stimulanse i pokazuju značajanu fizičku ili hemijsku promenu pri malim promenama u okruženju. Poli(N-izopropilakrilamid) (PNiPAAm) je najpoznatiji termosenzitivni polimer sa jasno definisanom temperaturom faznog prelaza (VPTT) od oko 32 °C. S druge strane, nanočestice srebra (AgNPs) poseduju optička, katalitička i električna svojstva koja se mogu modifikovati promenom njihove veličine i oblika a imaju i izražen antibakterijski potencijal, pa su stoga, poslednjih decenija intenzivno proučavane. Pokazano je da se anizotropne nanočestice srebra mogu kontrolisano sintetisati sa fizičko-hemijskim svojstvima različitim od sfernih analoga, pri čemu su značajna istraživanja usmerena na njihovu praktičnu primenu. Zbog svega navedenog, u okviru ovog istraživanja biće izvedena jednostavna dvostepena sinteza AgNPs/PNiPAAm hidrogel nanokompozita koja uključuje hemijsko formiranje sfernih i trouglastih AgNPs u prvom koraku, a zatim gama-indukovano umrežavanje NiPAAm-a u prisustvu ovih AgNPs. Tehnika gama zračenja objedinjuje sterilizaciju i sintezu u jednom tehnološkom koraku čime se proces optimizuje i otvara širok spektar inovativnih biomedicinskih primena. Formiranje stabilnih i uniformno distribuiranih AgNPs unutar matrice hidrogela potvrđeno je UV-Vis spektroskopijom, a porozna sunderasta struktura polimerne mreže SEM analizom. Fizičko-hemijska karakterizacija izvršena je i ispitivanjem procesa bubrenja i kontrahovanja u vodi na 25°C i 48°C, redom. Pored toga, pokazano je da prisustvo AgNPs utiče na vrednosti temperature faznog prelaza polimera. Osnovni cilj ovog istraživanja je ispitivanje uticaja različite morfologije AgNPs na fizičko-hemijska svojstva sintetisanih nanokompozita, imajući u vidu njihovu potencijalnu primenu i stalnu potrebu za širokom upotrebom biokompatibilnih materijala.

Ključne reči: Hidrogel nanokompoziti; nanočestice srebra; fazni prelaz; svojstva bubrenja

Hydrogels have unique properties and many potential applications, particularly in medicine and biotechnology. Gel porosity and swelling properties, stability, and biocompatibility are characteristics that are widely variable and easily adjusted. Stimuli-responsive or intelligent hydrogels are a class of these materials that shows a significant response to small changes in the surrounding environment. Poly(N-isopropylacrylamide) (PNiPAAm) is the best-known thermosensitive polymer with a well-defined volume phase transition temperature (VPTT) around 32 °C. On the other hand, silver nanoparticles (AgNPs) have been the subject of intense interest due to their size-dependent optical, catalytic, and electronic properties as well as remarkable antimicrobial potential. Within the last decade, scientists have demonstrated that anisotropic AgNPs can be synthesized in a con-

* Corresponding author, e-mail: jelenas@vin.bg.ac.rs

trolled manner and that these materials exhibit distinctively different physicochemical properties from their spherical counterparts. A significant challenge that scientists face is establishing how these nanoparticles can be used in a wider spectrum of practical applications. Therefore, we present a simple, straightforward two-step synthesis of AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites that includes the chemical formation of both spherical and triangular AgNPs, followed by gamma irradiation-induced PNiPAAm crosslinking in the presence of nanoparticles. The gamma irradiation technique merges sterilization and synthesis in a single technological step, optimizing the process and opening up a wide range of innovative biomedical applications. The formation of stable and uniformly distributed AgNPs in the polymer was confirmed by UV-VIS spectroscopy, while the network porous sponge-like structure was observed by SEM analysis. Physicochemical characterization was performed by examining the swelling and deswelling processes in water at 25 °C and 48 °C, respectively. In addition, AgNPs were shown to have an effect on VPTT values. Our main goal is to investigate how different morphologies of AgNPs affect the physicochemical properties of nanocomposite samples, considering the potential applications and the ongoing need for the widespread use of biocompatible materials.

Keywords: *Hydrogel nanocomposites; silver nanoparticles; VPTT; swelling properties*

1 Introduction

In recent years, the technological need for new materials has led to creative approaches to the synthesis and generation of structures, properties, and functions in the field of nanocomposite systems based on polymeric hydrogels and metal nanoparticles. Considering their unique properties and synergistic effect, these materials have become a very attractive class of new materials in various fields of science and technology. Thanks to their crosslinked structure, porous morphology, ability to absorb a large amount of water or biological fluid, and similarity to living tissue, hydrogels have been studied extensively as vehicles for the controlled release of nanoparticles, drugs, therapeutic proteins, enzymes, etc. [1-3]. In addition, for particular applications or delivery active substances on specific sites, it is preferable that hydrogels are sensitive to external stimuli. The most commonly used are pH- and thermosensitive hydrogels because the pH value and temperature are the two parameters that are most frequently changed in physiological systems. Poly(*N*-isopropylacrilamide) (PNiPAAm) hydrogel is suitable for use in biological systems because it is not toxic to tissues and it's thermosensitive in the range of physiologically relevant temperatures (around 32°C) [4, 5].

On the other hand, due to their unique physical, chemical, and biological properties, silver nanoparticles (AgNPs) have attracted substantial research over the past few decades. In terms of size, shape, crystallinity, and structure, AgNPs outperform their bulk forms. Since they have distinct physical and optical properties as well as biochemical functionality that is tailored by diverse size and shapes, efforts have been made to investigate AgNPs wide range of biomedical applications, including their role as antimicrobial agents, biomedical device coatings, drug-delivery carriers, and medical devices [6-9]. In general, changing the synthesis procedures, reducing agents, and stabilizers is frequently accomplished to obtain precise control of form, size, and size distribution. What caught our attention is to give insights into how different morphologies of AgNPs, nanospheres and nanoprisms used as building blocks of PNIPAAm-based nanocomposites influence their physicochemical properties, that is, to create a material with the best possible characteristics, keeping in mind the intended application. Considering the current trend for broader use of biocompatible materials as antimicrobial agents we predominately focused on evidence that bactericidal activity is shape-dependant and triangular silver nanoprisms exhibit exceptional properties such as increased catalytic activity due to morphologies with highly active (111) facets exceeding spherical and cubical nanoparticles of comparable size [10, 11].

Bearing in mind that the principles of the radiation-chemical method of synthesis (gamma irradiation) are based on biologically harmless and biocompatible radiolytic products of water, this method combines the advantages of environmental reagents with simultaneous stabilization of par-

ticles in the polymer matrix. In addition, it is an easy and fast way of synthesis with easy process control, but one of the most important benefits is the possibility of synthesis and sterilization of products in one technological step, which is extremely important for biomedical applications [3, 6, 12]. The aim of this study is to examine how different morphologies of AgNPs affect the physico-chemical properties of nanocomposite samples, taking into account possible applications and the continued demand for biocompatible materials to be widely used.

2 Experimental

2.1 Materials

Silver nitrate (AgNO_3), sodium citrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$), polyvinylpyrrolidone (PVP, $M_w=29.000$ g/mol), sodium borohydride (NaBH_4), and *N*-isopropylacrylamide (NiPAAm) were purchased from Sigma Aldrich, while hydrogen peroxide (H_2O_2 , 30 wt%) was obtained from J.T. Baker. Solutions were prepared with water obtained from Milli-Q water system (Millipore Corporation).

2.2 Synthesis of anisotropic silver nanoparticles

A seedless approach was used to create triangular Ag nanoprisms. Aqueous solutions of AgNO_3 (0.1 mM, 25 mL), $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ (30 mM, 1.5 mL), H_2O_2 (30 wt%, 60 μL), and PVP (0.7 mM, 1.5 mL) were vigorously mixed at room temperature (25°C). The solution changed color after the addition of NaBH_4 (0.1 M, 150 μL). After adding NaBH_4 , the solution instantly turned pale yellow, indicating a nucleation process and the creation of small AgNPs. During 30 minutes of stirring, the colloidal solution changed color from dark yellow to orange, then pink, and ultimately blue. The blue color denotes the end of the reaction, i.e., the completion of the growing process of triangular Ag nanoprisms. For a few months, the colloidal solution remains stable at room temperature with no color change. Spherical AgNPs were prepared when 250 mL of the aqueous solution containing AgNO_3 (1 mM) was heated with a heating mantle in a two-neck round-bottomed flask under vigorous stirring. A condenser was used to prevent the evaporation of the solvent. After boiling had commenced, 5 mL of $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ (1 wt.%) was injected into this solution. The solution became yellow immediately, indicating the presence of spherical AgNPs, and was left under stirring without heating for 30 min. The concentration of silver in the colloidal solution was determined by Philips PYU UNICAM SP9 atomic absorption spectrometry (AAS). Before the AAS measurements, 0.1 ml of concentrated Ag colloid sample (centrifugated at 12000 rpm) was dissolved in 0.9 mL of concentrated hydrochloric acid. The obtained concentrations are 11 mg l⁻¹ and 27 mg l⁻¹ for colloidal solutions of nanoprisms and nanospheres, respectively.

2.3 Synthesis of AgNPs/PNiPAAm nanocomposite hydrogels

The solution of NiPAAm monomer (10 wt.%) was prepared in distilled water and bubbled with argon in order to remove oxygen. A colloidal dispersion of spherical and triangular AgNPs was added, with the final concentration of nanoparticles in the monomer solution being 2.5×10^{-4} mol L⁻¹. The prepared AgNPs/NiPAAm solutions were poured into specially designed molds (consisting of glass plates separated by rubber spacer). The samples were irradiated by γ -rays, at a dose rate of 0.22 kGy/h up to an absorbed dose of 25 kGy, to obtain crosslinked polymer networks, i.e., nanocomposite hydrogel samples.

2.4 Methods of Characterization

Gel content. After the completion of the crosslinking process, obtained hydrogels were cut into discs (dimension 10 x 4 mm), dried to the constant mass, and then extracted in distilled water (obtained from Milli-Q water system) for a week to remove unreacted reactants. Extracted hydrogels were dried again to the constant weight in order to determine the gel fraction. The gel fraction (W_g) was calculated from the following equation:

$$W_g(\%) = \frac{m_{ae}}{m_{be}} \cdot 100 \quad (1)$$

where m_{ae} and m_{be} were the weights of dry samples after and before extraction, respectively [3].

Optical properties. The absorption spectra of the colloidal dispersion of anisotropic AgNPs, and AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites were recorded on a Thermo Fisher Scientific Evolution 600 UV-Vis spectrophotometer in the wavelength of 300–850 nm.

Transmission electron microscopy (TEM). The size and shape of AgNPs collected on carbon-coated copper grids were observed with a PHILIPS EM-400 transmission electron microscopy (TEM) operated at 100 kV.

Scanning electron microscopy (SEM). The internal morphology of the hydrogel nanocomposite samples was performed by JEOL JSM-6610LV scanning electron microscope, operated at 20 kV. Before the observation, samples were swollen in water, frozen at -20°C , and then lyophilized using a Martin Christ Freezedryer Alpha 1-2 Ldplus ($T = -32^{\circ}\text{C}$ at 0.310 mbar).

Swelling degree studies. Dynamic swelling properties of hydrogels were examined in distilled water at room temperature. The swelling process was monitored gravimetrically by measuring the mass of the swollen gel at predetermined time intervals until the equilibrium swelling degree (SD_{eq}) was reached [3]. All swelling experiments were performed in triplicate.

Deswelling studies. The equilibrium swollen hydrogels in water at 25°C (below the VPTT) were transferred into the water at 48°C (above the VPTT), for the deswelling kinetics studies. The weight of hydrogels was measured at predetermined time intervals during deswelling until a constant weight was reached [3]. The deswelling kinetics of each sample was monitored in triplicate.

Determination of volume phase transition temperatures. In order to determine the VPTT of hydrogels and hydrogel nanocomposites, samples were equilibrated at the predetermined temperature, in the temperature range from 14°C up to 48°C . The samples were allowed to swell to equilibrium at each defined temperature, and their corresponding equilibrium swelling degree was determined using Equation (2).

3 Results and discussion

3.1 Synthesis of AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites

In this study, a two-step synthesis of AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites was performed. The first step includes the chemical formation of both spherical and triangular AgNPs, followed by gamma irradiation-induced PNiPAAm crosslinking in the presence of nanoparticles. The radiolytic method (“green method”) is a highly suitable tool for the crosslinking of polymers, and it does not require harmful initiators or crosslinkers, eliminating the problem of removing them at the end of the process. To evaluate the efficiency of the chosen crosslinking method, the percentage of gelation was calculated by using Equation (1). The obtained results for the gel fraction (Table 1) show that the chosen synthesis method is appropriate because it gives high yields of polymer networks without unreacted residues.

3.2 Optical properties of anisotropic AgNPs and AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites

The formation of a colloidal dispersion of spherical as well as triangular AgNPs, and the presence of incorporated AgNPs within the PNiPAAm hydrogel network is confirmed by UV-Vis spectral studies.

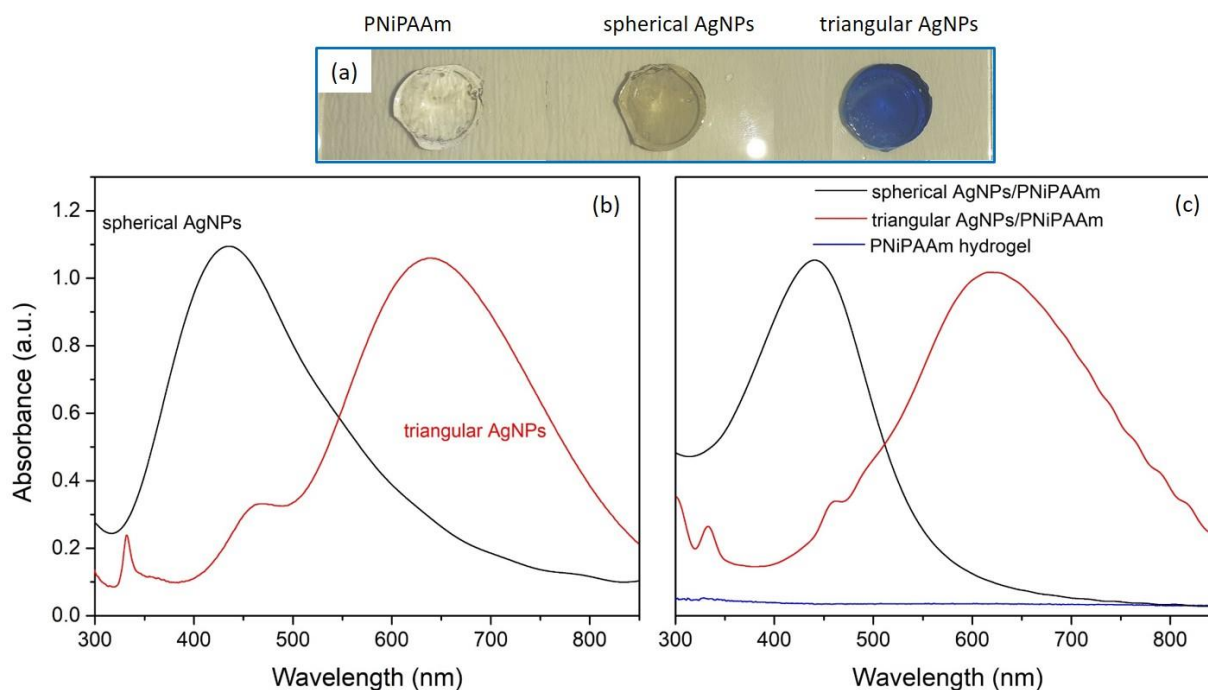


Figure 1. Photography of prepared hydrogels (a), UV-Vis absorption spectra of anisotropic AgNPs (b), and AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites (c).

During the reduction process, the formation of spherical AgNPs is visually indicated by the change of the reaction solution from colorless to yellow-brownish. Metal nanoparticles have free electrons, which create a surface plasmon resonance (SPR) absorption band as a result of the electrons mutual vibration in resonance with the light wave. The appearance of the single peak at 452 nm (Figure 1b) reveals the surface plasmon resonance assigned to the presence of spherical AgNPs. This absorption is highly dependent on particle size and shape, dielectric medium, and particle environment. On the other side, the absorption spectrum of triangular Ag nanoprisms has three distinct peaks (Figure 1b). According to the Mie theory, the blue colloid dispersion of the anisotropic AgNPs exhibits two more surface plasmon resonance bands that reflect the geometry of the particles. According to the theoretical discrete dipole approximation method for the triangular nanoprisms, the first peak at 332 nm corresponds to the quadrupole transversal out-of-plane resonance, the second band wavelength at 494 nm to the in-plane quadrupole resonance, and the third at 638 nm to the in-plane dipole plasmon resonance [13, 14]. These results are in agreement with the TEM analysis showing spherical and triangular AgNPs (Figure 2a and 2b). After the gamma irradiation-induced PNiPAAm crosslinking in the presence of both spherical and triangular AgNPs, it can be seen that there is no evidence of changed morphological characteristics of the AgNPs (Figure 1c). The slight shift in peak position is most likely due to the increase in the refractive index of the particle environment from 1.333 (water) to 1.503 (PNiPAAm) [10, 11].

3.3 Morphological characterization of AgNPs and polymer network

Morphological properties of the AgNPs. The TEM analysis of prepared colloidal anisotropic AgNPs confirmed the formation of spherical and triangular nanoparticles. Figure 2a shows spherical AgNPs with an average size of around 40 nm, while triangular Ag nanoprisms with size ranging from 40 nm to 50 nm are shown in Figure 2b. The mixture of different sizes is obtained as a consequence of the presence of statistical thermodynamics of the free energies and kinetic effects during the growth process [10, 11].

Morphological properties of the polymer network. The internal morphology of the investigated hydrogel nanocomposites was examined using SEM, and obtained micrographs are shown in Figure 2 (c and d). According to the SEM micrographs, the crosslinking process occurred uniformly throughout the hydrogel samples, and the expected porous sponge-like structure was confirmed.

Compared to PNiPAAm hydrogel, it was observed that the incorporation of AgNPs into the polymer network has no significant influence on internal morphology.

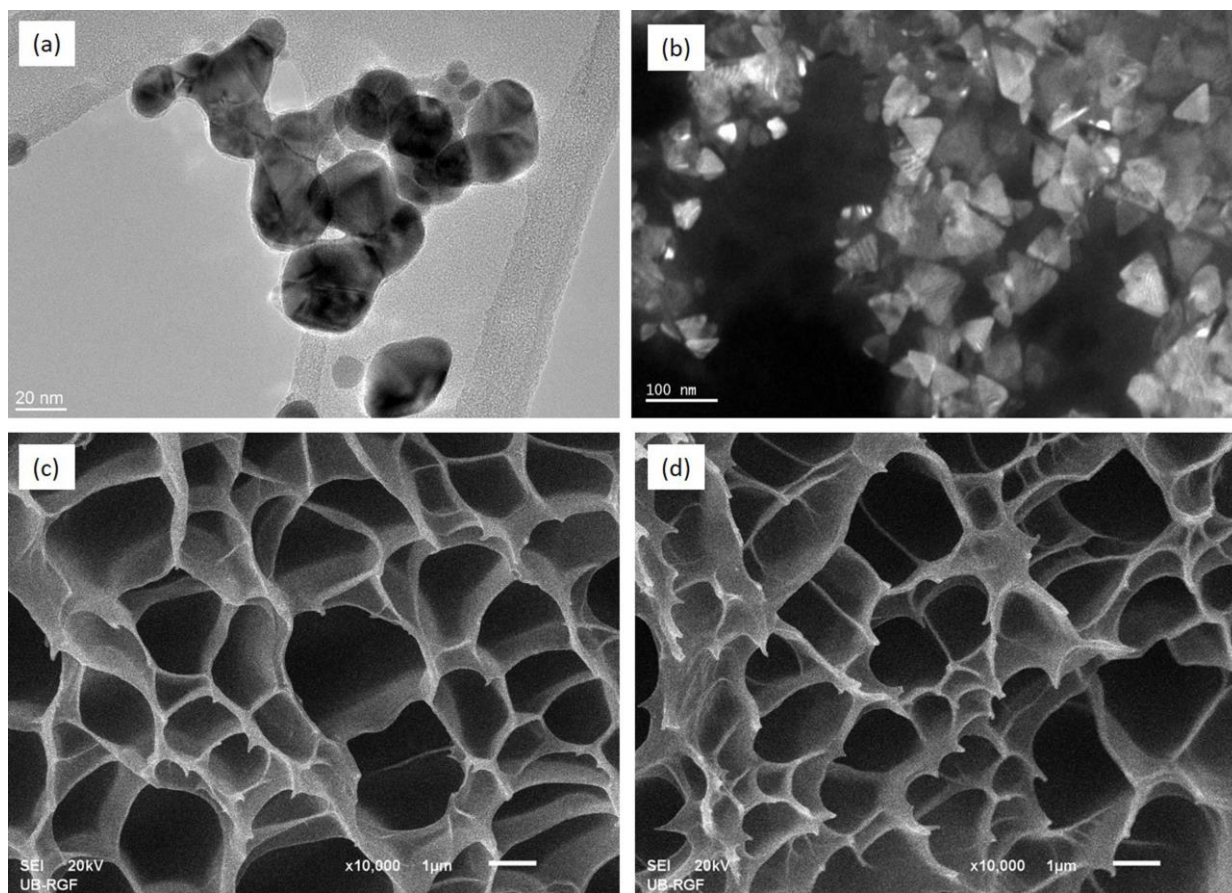


Figure 2. TEM micrographs of colloidal spherical (a) and triangular (b) AgNPs, and SEM micrographs of PNiPAAm hydrogel (c) and triangular AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites (d).

3.4 Physicochemical characterization

Swelling and fluid transport properties. Given the possible biomedical use of the synthesized system, swelling capacity and swelling kinetic parameters are important for physicochemical characterization. The swelling capacity and diffusion properties of hydrogels were investigated in a neutral medium (distilled water) at room temperature. The swelling degree was calculated by the equation [3].

$$SD = \frac{m_t - m_0}{m_0} \quad (2)$$

where m_t is the weight of the swollen hydrogel at time t , and m_0 is the weight of xerogel. In addition, swelling kinetics and the liquid transport mechanism were investigated by applying the equation that follows the change in the hydrogel mass during the swelling process [3, 15]:

$$\frac{SD}{SD_{eq}} = k \cdot t^n \quad (3)$$

where k is the kinetic constant related to the structure of the polymer network and n is the diffusion exponent. From the logarithmic form of the given equation for the initial period of swelling (first 60% of SD_{eq}), values for n and k can be determined from the slope and intercept, respectively (Figure 3b).

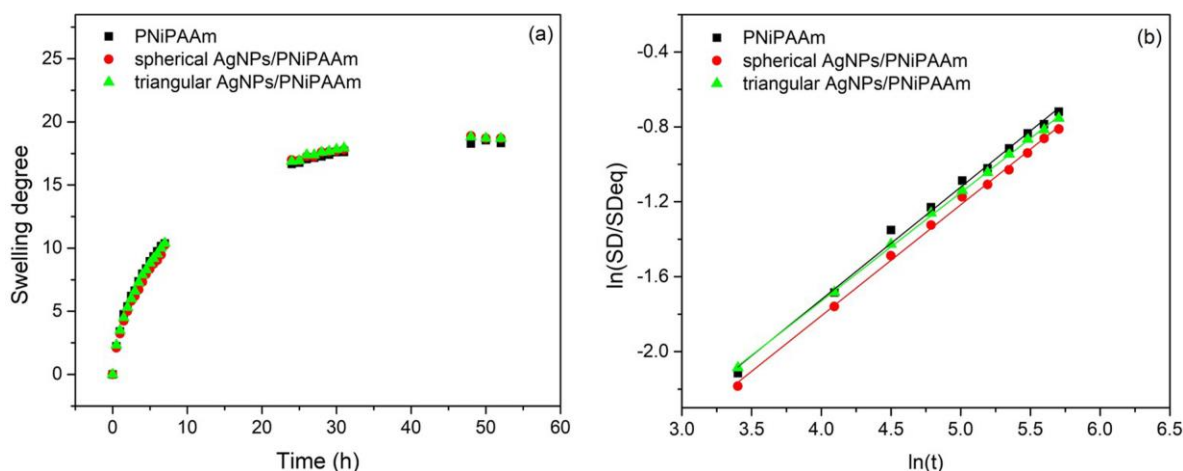


Figure 3. Swelling curves of PNiPAAm hydrogel and AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites(a), and corresponding plots of swelling kinetic curves (b).

The typical swelling curves of hydrogels (Figure 3a) show that the incorporation of AgNPs into the polymer network has no significant influence on swelling capacity. Only a slight increase of SD_{eq} (3.9% for spherical and 4.4% for triangular AgNPs) was observed for AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites, compared to PNiPAAm hydrogel (Table 1). This probably occurs due to a partially restricted crosslinking process, caused by the presence of nanoparticles, which results in a decrease in crosslinking density, followed by a slight decrease in gel content as shown in Table 1. The shape of the particles has no effect on the swelling capacity because the values obtained for spherical and triangular AgNPs are approximately the same. Moreover, all investigated samples showed non-Fickian diffusion ($0.5 < n < 1$), indicating that both diffusion and polymer relaxation processes controlled the fluid transport. By monitoring the swelling kinetics, it is possible to determine the diffusion coefficient (D) by using the following equation [3, 16]:

$$D = \left(\frac{k \cdot \pi \cdot r^2}{4} \right)^{1/n} \quad (4)$$

where r is the radius of the xerogels. According to the results presented in Table 1, diffusion coefficients are higher for nanocomposite samples, indicating a slightly higher porosity of the polymer network and easier transport of water into it. Such behavior of hydrogel nanocomposites is expected, considering the values of SD_{eq} and k .

Table 1. Parameters obtained from physicochemical characterization.

	Wg, %	SD_{eq}	k, min^{-1}	n	$D \times 10^9, \text{cm}^2 \text{min}^{-1}$	K_d, min^{-1}	VPTT
PNiPAAm	99.0	18.0	0.0015	0.60	2.9	0.096	28.1
Spherical AgNPs/PNiPAAm	98.9	18.7	0.0016	0.59	3.5	0.076	28.6
Triangular AgNPs/PNiPAAm	98.8	18.8	0.0017	0.58	3.7	0.079	28.7

Deswelling studies. Bearing in mind that PNiPAAm is a thermosensitive polymer, the response of all samples at temperatures above the VPTT was examined (Figure 4a). Water retention (WR) was measured in order to evaluate their deswelling properties, according to the following equation [3]:

$$WR = \frac{m_t - m_{col}}{m_{eq} - m_{col}} \quad (5)$$

where m_t is the weight of deswollen hydrogel at predetermined time intervals, m_{eq} is the weight of equilibrium swollen hydrogel, and m_{col} is the weight of deswollen i.e. collapsed hydrogel. To investigate the deswelling kinetics quantitatively, a semi-logarithmic plot of first-order rate analysis was used to fit the time dependence of the deswelling, where values of deswelling rate constant (K_d) were obtained from the slope of the plot given by the equation [17]:

$$\ln \left[\frac{m_t - m_{col}}{m_{eq} - m_{col}} \right] = -K_d \cdot t \quad (6)$$

Although the swelling rate (k) is approximately the same for all samples, the deswelling rate (K_d) is lower for the hydrogel nanocomposites. It is well known that PNiPAAm-based hydrogels can form a dense surface skin layer, which acted as a diffusion barrier. Namely, when the equilibrium swollen hydrogel is transferred into the water at a higher temperature, the surface PNiPAAm molecules shrink first, resulting in the formation of a dense skin layer on the hydrogel surface, which can hinder the diffusion of water molecules from the hydrogel interior [3, 18]. Moreover, the hydrogel nanocomposites absorbed more water molecules (higher SD_{eq}) which are bind to AgNPs and form a solvation shell around them [19], resulting in decreased deswelling rate.

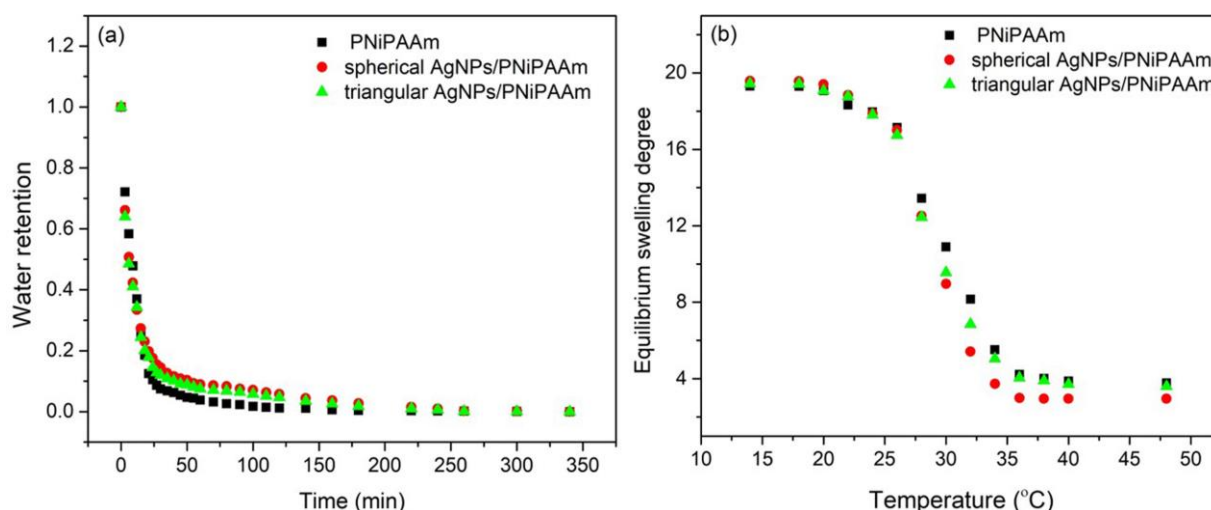


Figure 4. Deswelling curves (a) and temperature dependence of SD_{eq} (b) for PNiPAAm hydrogel and AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposite samples.

Determination of volume phase transition temperatures. The VPTT value close to the human body temperature is the most important characteristic of PNiPAAm, which makes it one of the most studied thermosensitive polymers. At low temperatures, under VPTT, the formation of hydrogen bonds between the water molecules and the hydrophilic groups in the PNiPAAm side chains causes water uptake and swelling. As the temperature of the surrounding media increases above VPTT the hydrogen bonds between water and PNiPAAm are disrupted, and PNiPAAm becomes hydrophobic, causing the leaching of water and collapsing of the polymer network.

In this investigation, the influence of the incorporation of AgNPs into the polymer network on VPTT values was examined, and results are presented in Figure 4b, and in Table 1. According to the presented results, the presence of nanoparticles between polymer chains leads to a slight increase in VPTT values. This phenomenon may be due to the fact that a more porous network structure makes it easier for water to diffuse in or out of the matrix, and thus the effect of temperature variation on phase separation is rapidly manifested [2, 3, 16]. As in the case of swelling capacity, the different shape of the nanoparticles has no significant effect on the VPTT value.

4 Conclusion

In summary, PNiPAAm hydrogel and AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites were successfully synthesized by a two-step procedure combining chemical and gamma irradiation methods. UV-Vis and TEM analysis confirmed the formation of both, spherical and triangular AgNPs, with

an average size ranging from 40 nm to 50 nm. After incorporation into the polymer matrix, the spherical and triangular AgNPs remain stable which was confirmed by UV-VIS. The SEM analysis showed a stable porous sponge-like structure of the crosslinked polymer network, while the incorporation of nanoparticles has no significant effect on the internal morphology. The AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites, compared to PNiPAAm hydrogel samples, exhibited a slightly higher swelling capacity, diffusion coefficient, as well as VPTT values. Because the geometry of AgNPs has no effect on the basic physical properties of the hydrogel polymer network, various particles can be combined to enhance their biological potential without affecting the properties of the polymer matrix. To conclude, the desired AgNPs/PNiPAAm hydrogel nanocomposites were successfully synthesized. Each component retained its primary physicochemical properties, resulting in a stable material with the desired predominant characteristics. This provides a good platform for further in-depth investigation in order to obtain materials for tailored biomedical applications.

4.1 Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract 451-03-47/2023-01/200017).

5 Nomenclature

PNiPAAm – poly(*N*-isopropylacrylamide)
 VPTT – volume phase transition temperature
 AgNPs - silver nanoparticles
 PVP - polyvinylpyrrolidone
 AAS - atomic absorption spectrometry
 SPR - surface plasmon resonance
 SEM - scanning electron microscopy
 TEM - transmission electron microscopy

6 References

- [1] **Hoffman, A.**, Hydrogels for biomedical applications, *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 43, (2002), 3–12.
- [2] **Milasinovic, N., Kalagasidis Krusic, M., Knezevic-Jugovic, Z., Filipovic, J.**, Hydrogels of *N*-isopropylacrylamide copolymers with controlled release of a model protein, *Int. J. Pharmaceut.*, 383, (2010) 53–61.
- [3] **Spasojević, J., Radosavljević, A., Krstić, J., Jovanović, D., Spasojević, V., Kalagasidis-Krušić, M., Kačarević-Popović, Z.**, Dual responsive antibacterial Ag-poly (*N*-isopropylacrylamide/itaconic acid) hydrogel nanocomposites synthesized by gamma irradiation. *Eur. Polym. J.*, 69, (2015) 168–185.
- [4] **Yu, Y., Cheng, Y., Tong, J., Zhang, L., Wei, Y., Tian, M.**, Recent advances in thermo-sensitive hydrogels for drug delivery, *Mater. Chem. B*, 9, (2021) 2979-2992.
- [5] **Qui, Y., Park, K.**, Environment-sensitive hydrogels for drug delivery, *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 64, (2001) 49–60.
- [6] **Spasojević, J., Radosavljević, A., Krstić, J., Mitrčić, M., Popović, M., Rakočević, Z., Kalagasidis-Krušić, M., Kačarević-Popović, Z.**, Structural characteristics and bonding environment of Ag nanoparticles synthesized by gamma irradiation within thermo-responsive poly(*N*-isopropylacrylamide) hydrogel, *Polym. Composite.*, 38, (2017)1014–1026.
- [7] **Bhowmick, S., Koul, V.**, Assessment of PVA/silver nanocomposite hydrogel patch as antimicrobial dressing scaffold: Synthesis, characterization and biological evaluation, *Mat. Sci. Eng. C-Bio. S.*, 59, (2016) 109–119.
- [8] **Casolaro, M., Casolaro, I., Akimoto, J., Ueda, M., Ueki, M., Ito, Y.**, Antibacterial Properties of Silver Nanoparticles Embedded on Polyelectrolyte Hydrogels Based on-Amino Acid Residues, *Gels*, 4, (2018) 42.

- [9] **Xie, Y., Liao, X., Zhang, J., Yang, F., Fan, Z.,** Novel chitosan hydrogels reinforced by silver nanoparticles with ultrahigh mechanical and high antibacterial properties for accelerating wound healing, *Int. J. Biol. Macromol.*, 119, (2018) 402–412.
- [10] **Vodnik, V., Saponjic, Z., Dzunuzovic, J., Bogdanovic, U., Mitric, M., Nedeljkovic, J.,** Anisotropic silver nanoparticles as filler for the formation of hybrid nanocomposites, *Mater. Res. Bull.*, 48, (2013) 52–57.
- [11] **Vukoje, I.,** The influence of triangular silver nanoplates on antimicrobial activity and color of cotton fabrics pretreated with chitosan, *J. Mater. Sci.*, 49, (2014) 4453–4460.
- [12] **Babu, A.T., Antony, R.,** Green synthesis of silver doped nano metal oxides of zinc & copper for antibacterial properties, adsorption, catalytic hydrogenation & photodegradation of aromatics, *J. Environ. Chem. Eng.*, 7, (2019) 102840.
- [13] **Hebeish, A., Hashem, M., Abd El-Hady, M.M., Sharaf, S.,** Development of CMC hydrogels loaded with silver nano-particles for medical applications, *Carbohydr. Pol.*, 92, (2013) 407–413.
- [14] **Perkas, N., Amirian, G., Applerot, G., Efendiev, E., Kaganovskii, Y., Ghule, A.V., Chen, B.J., Ling, Y.C., Gedanken, A.,** Depositing silver nanoparticles on/in a glass slide by the sonochemical method, *Nanotechnology*, 19, (2008) 435604.
- [15] **Liu, Y., Cui, Y., Wu, G., Liao, M.,** Preparation and properties of fast temperature-responsive soy protein/PNIPAAm IPN hydrogels, *J. Serb. Chem. Soc.*, 79, (2014) 211–224.
- [16] **Tasdelen, B., Kayaman-Apohanb, Guven, N.O., Baysal, B.M.,** pH-thermoreversible hydrogels. I. Synthesis and characterization of poly(N-isopropylacrylamide/maleic acid) copolymeric hydrogels, *Radiat. Phys. Chem.*, 69, (2004) 303–310.
- [17] **Zhao, Z.X., Li, Z., Xia, Q.B., Bajalis, E., Xi, H.X., Lin, Y.S.,** Swelling/deswelling kinetics of PNIPAAm hydrogels synthesized by microwave irradiation, *Chem. Eng. J.*, 142, (2008) 263–270.
- [18] **Kaneko, Y., Yoshida, R., Sakai, K., Sakurai, Y., Okano, T.,** Temperature-responsive shrinking kinetics of poly (*N*-isopropylacrylamide) copolymer gels with hydrophilic and hydrophobic comonomers, *J. Membr. Sci.*, 101, (1995) 13–22.
- [19] **Nešović, K., Janković, A., Radetić, T., Vukašinović-Sekulić, M., Kojić, V., Živković, Lj., Perić-Grujić, A., Yop Rhee, K., Mišković-Stanković, V.,** Chitosan-based hydrogel wound dressings with electrochemically incorporated silver nanoparticles - *In vitro* study., *Eur. Polym. J.*, 121, (2019) 109257.

IN VITRO ODREĐIVANJE ANTIOKSIDATIVNE AKTIVNOSTI HALKONA NA BAZI FEROCENA

IN VITRO ANTIOXIDANT ACTIVITY EVALUATION OF FERROCENYL CHALCONES

Anita LAZIĆ^{1*}, Luka MATOVIĆ¹, Jelena LAĐAREVIĆ², Aleksandra MAŠULOVIĆ¹,
Kristina GAK SIMIĆ¹, Nataša VALENTIĆ²

¹ Innovation Center of the Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

² Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.207>

Derivati ferocena su poznati antioksidansi, antiparazitici, antitumorni, antivirusni, antibakterijski i antifungalni agensi. Pored primene u medicinskoj hemiji, derivati ferocena su od izuzetnog značaja u sintetičkoj organskoj hemiji, naročito u katalizovanim asimetričnim sintezama. Primenuju se i u elektrohemiji i hemiji polimera, kao aditivi u gorivima, kao hemosenzori u agrohemiji i biosenzori glukoze i aktivnih komponenata u molekularnoj elektronici. U cilju dizajniranja novih antioksidativnih agenasa, u ovom radu, sintetisano je pet ferocenilchalkona koji su u potpunosti strukturno okarakterisani određivanjem temperature topljenja, FT-IR, ¹H i ¹³C NMR spektroskopskim metodama. Sintetisani halkoni međusobno se razlikuju prema vrsti i položaju supstituenta na fenil-grupi u položaju 1 linearnog nezasićenog karbonilnog sistema. Potencijalna antioksidativna aktivnost ovih jedinjenja procenjena je primenom ABTS (2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfonska kiselina) metode i određivanjem IC₅₀ vrednosti najefikasnijih jedinjenja.

Ključne reči: Halkoni; Farmakološka aktivnost; ABTS metoda.

Ferrocene derivatives are known as antioxidants, antiparasitic, antitumor, antiviral, antibacterial and antifungal agents. In addition to applications in medicinal chemistry and drug design, ferrocene derivatives are of exceptional importance in synthetic organic chemistry, especially in catalytic asymmetric transformations. They are also used in electrochemistry and polymer chemistry, as additives in fuels, as chemosensors in agrochemistry and biosensors of glucose and active components in molecular electronics. To design new antioxidant agents, five ferrocenyl chalcones were synthesized, and fully characterized by melting points, FT-IR, ¹H and ¹³C NMR spectroscopic methods. The synthesized chalcones differ in the nature and the position of the substituent attached to the phenyl group in position 1 of the linear unsaturated carbonyl system. The potential antioxidant activity of the synthesized compounds was evaluated using the ABTS (2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) method and IC₅₀ values of the most effective compounds were further determined.

Key words: Chalcones; Pharmacological activity; ABTS method.

1 Introduction

Ferrocene and its derivatives represent the leading compounds for the global chemical enterprise due to its multiple applications that range from biomedical to materials science [1]. In addition, chalcones represent naturally occurring derivatives of the parent compound 1,3-diphenyl-2-propen-1-one, pertaining to the flavonoid family of organic compounds. According to the literature, chalcones and their corresponding heterocyclic analogs possess wide spectrum of pharmacological activities due to occurrence of highly reactive unsaturated carbonyl moiety in skeleton [2]. Among them, our focus has been placed on ferrocenyl chalcones as a framework for further derivatization, especially for obtaining drugs with higher efficiency toward devastating diseases (bacteria, malaria, cancer, neurobiological diseases and free radicals). In agreement with literature review, classes of

* Corresponding author, e-mail: alazic@tmf.bg.ac.rs

ferrocenyl chalcones are primarily of two types: type 1, where the carbonyl group is at the α -position adjacent to the ferrocenyl ring, and type 2, where the carbonyl group is at the α -position adjacent to the phenyl ring. Henry demonstrated that novel functionalized type 2 ferrocenyl chalcones were effective against three kinds of clinically isolated drug resistant *S. aureus*, and against other non-resistant clinically isolated and laboratory-adapted Gram-positive bacteria [3]. Wu demonstrated that 1-(3-pyridyl)-3-ferrocenyl-2-propen-1-one and 1-ferrocenyl-3-(4-nitrophenyl)-2-propen-1-one with IC₅₀ of 4.5 and 5.1 mM, respectively, were the most active against a chloroquine resistant strain of *P. falciparum* [4]. The results of QSAR studies, performed to find quantitative relationship between fungicidal/nematicidal activity and chemical structure of synthesized ferrocenyl chalcones, demonstrated that the position of substituent on the phenyl ring in the molecule plays an important role in pharmacological activity of these compounds. Namely, (2*E*)-1-(5-chloro-2-hydroxyphenyl)-3-ferrocenyl-prop-2-en-1-one was found to be most active against *S. rolfsii*, while (2*E*)-1-(4-bromophenyl)-3-ferrocenyl-prop-2-en-1-one showed highest activity against *A. solani*. Concerning nematicidal activity, (2*E*)-1-(3-bromophenyl)-3-ferrocenyl-prop-2-en-1-one was the most potent [2]. Results of *in vitro* antiproliferative activity and SAR study of various ferrocenyl chalcones showed that the aldehyde unit of ferrocenyl chalcones containing halogens or dimethyl substituents was the most effective structural moiety against MDA-MB-231 cells [5]. Smit and coworkers demonstrated that aminoferrocenyl-chalcone amide containing a piperazinyl linker, possessed increased activity against three cancer cell lines: TK-10 (human kidney renal cell adenocarcinoma, UACC-62 (melanotic melanoma), and MCF-7 (breast cancer), compared to the reference drug, parthenolide [6]. Oxidative stress in biological systems could be defined as a complex process characterized by a disproportion between the production of free radicals and the ability of the body to eliminate these reactive species through the use of endogenous and exogenous antioxidants. During the metabolic processes, a wide diversity of reactions take place, where the promoters are the reactive oxygen species, such as hydrogen peroxide and the superoxide radical anion, among others. A biological system in the presence of an excess of reactive oxygen species could perform pathologies, from cardiovascular diseases to the promotion of cancer [7]. Meng et al. demonstrated that ferrocenyl-containing curcumin analogues can protect DNA against Cu²⁺/GSH induced oxidation, and scavenge free radicals in protecting DNA against AAPH induced oxidation. These analogues, which within their chemical structure contain powerful antioxidative group such as ferrocenyl group, provide a higher antioxidant activity than the traditional hydroxyl involved curcumin analogues [8]. Singh et al. demonstrated that ferrocene appended chalcone linked triazole allied organosilatrane possess high radical scavenging efficacy [9]. Moreover, other potential applications of investigated derivatives include molecular materials, redox-sensors, and polymers [1]. Our goal in this paper is to highlight the synthesis and antioxidant activity of ferrocenyl chalcones (Scheme 1) with particular prominence to the most active derivatives which represent an interesting starting point for the synthesis of some new pharmacologically active compounds.

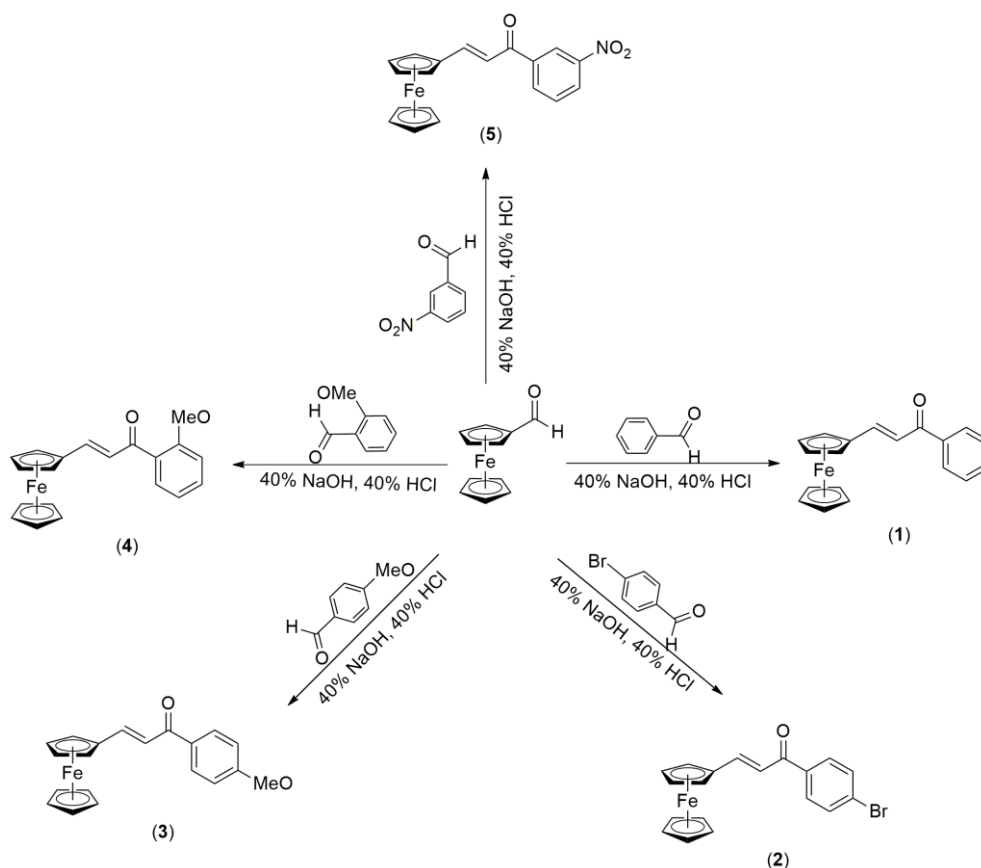
2 Experimental section

In order to study the influence of the chemical structure on the antioxidant activity of substituted ferrocenyl-chalcones, five compounds were synthesized. Ferrocenyl chalcones (**1–5**) were prepared according to modified literature procedure [10]. Synthetic pathway is illustrated on Scheme 1 and full structural characterization as melting points, FT-IR/ATR, ¹H and ¹³C NMR spectra are given. In addition, their antioxidant activity was determined using the ABTS method.

2.1 General procedure for the synthesis of substituted ferrocenyl chalcones

An equimolar amounts of ferrocene-carbaldehyde and the corresponding acetophenone (unsubstituted acetophenone, *p*-bromoacetophenone, *p*-methoxyacetophenone, *o*-methoxyacetophenone and *m*-nitroacetophenone) were dissolved in dry ethanol and the reaction mixture was stirred for 30 min at room temperature (Scheme 1). To the obtained reaction mixture an aqueous solution of sodium hydroxide (40% w/w) was added dropwise during which the reaction mixture turned violet–red. The solution was stirred for 6 h and kept in a freezer overnight. The mixture was

poured onto crushed ice and neutralized with diluted HCl (40%). The obtained precipitate was filtered and washed six times with water and recrystallized from methanol [10].



Scheme 1. Synthesis of the substituted ferrocenyl-chalcones.

2.2 Methods for the characterization of the synthesized compounds

The FT-IR/ATR spectra of all synthesized compounds were recorded in the wavelength range 400–4000 cm^{-1} using a Thermo Scientific Nicolet iS10 apparatus. ^1H and ^{13}C NMR spectra of compounds 1–3 were recorded on a Bruker Ascend 400 apparatus at room temperature in deuterated chloroform (CDCl_3), while spectra of compounds 4 and 5 were recorded in deuterated dimethyl sulfoxide ($\text{DMSO}-d_6$). All melting points were determined on Electrothermal apparatus. Elemental analysis of all studied compounds was performed using a microanalyzer of the element Elemental Vario EL III.

1-(Phenyl)-3-ferrocenylprop-2-en-1-one (1): Red-brown solid. Yield: 76%; m.p. 125–127°C, FT-IR/ATR (ν/cm^{-1}): 3068, 1660, 1600, 1589, 1577, 1469, 1449, 1410, 1393, 1376, 1356, 1301, 1290, 1248, 1220, 1190, 1177, 1103, 1061, 1043, 1036, 1028, 1012, 979, 970, 937, 848, 820, 647, 620, 607, 530, 492, 471; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , δ/ppm): 7.98 (d, 2H, $J = 7.6$ Hz, Ar-H), 7.76 (d, 1H, $J = 15.6$ Hz), 7.58–7.47 (m, 3H, Ar-H), 7.13 (d, 1H, $J = 15.2$ Hz), 4.60 (s, 2H, ferrocenyl), 4.49 (s, 2H, ferrocenyl), 4.18 (s, 5H, ferrocenyl); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3 , δ/ppm): 189.9 (C=O), 146.8, 138.6–128.3 (aromatic C-atoms), 119.2, 79.1, 77.3, 77.0, 76.7, 71.3, 69.8, 69.0, 29.7.

1-(4-Bromophenyl)-3-ferrocenylprop-2-en-1-one (2): Red-brown solid. Yield: 84%; m.p. 155–158°C, FT-IR/ATR (ν/cm^{-1}): 3083, 1654, 1588, 1581, 1559, 1481, 1398, 1376, 1357, 1321, 1300, 1288, 1249, 1219, 1179, 1105, 1067, 1048, 1028, 1005, 980, 970, 937, 862, 808, 743, 727, 680, 658, 618, 537, 490, 475, 457; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , δ/ppm): 7.85 (d, 2H, $J = 8.0$ Hz, Ar-H), 7.77 (d, 1H, $J = 15.2$ Hz), 7.63 (d, 2H, $J = 7.6$ Hz), 7.07 (d, 1H, $J = 15.2$ Hz), 4.60 (s, 2H, ferrocenyl), 4.51 (s, 2H, ferrocenyl), 4.19 (s, 5H, ferrocenyl); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3 , δ/ppm): 189.7 (C=O), 147.6, 137.5–129.8 (aromatic C-atoms), 118.4, 79.0, 77.3, 77.0, 76.7, 71.6, 69.9, 69.1, 29.7.

1-(4-Methoxyphenyl)-3-ferrocenylprop-2-en-1-one (3): Red-brown solid. Yield: 78%; m.p. 140–143°C, FT-IR/ATR (ν/cm^{-1}): 3082, 3010, 2936, 2837, 1648, 1566, 1511, 1461, 1438, 1422, 1393, 1357, 1328, 1301, 1288, 1259; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , δ/ppm): 8.01 (d, 2H, $J = 8.0$ Hz, Ar-H), 7.74 (d, 1H, $J = 8.0$ Hz), 7.15 (d, 1H, $J = 15.2$ Hz), 6.98 (d, 2H, $J = 8.0$ Hz, Ar-H), 4.59 (s, 2H, ferrocenyl), 4.48 (s, 2H, ferrocenyl), 4.18 (s, 5H, ferrocenyl), 3.89 (s, 3H, $-\text{OCH}_3-\text{C}_6\text{H}_4$); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3 , δ/ppm): 188.1 (C=O), 163.1, 145, 8, 136.5–128.8 (aromatic C-atoms), 118.9, 113.7, 77.3, 77.0, 76.7, 71.2, 69.7, 68.9, 55, 529.7.

1-(2-Methoxyphenyl)-3-ferrocenylprop-2-en-1-one (4): Black solid. Yield: 66%; m.p. 98–100°C, FT-IR/ATR (ν/cm^{-1}): 3378, 1656, 1596, 1485, 1464, 1435, 1358, 1289, 1243, 1179, 1163, 1016, 805, 754, 594, 487; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$, δ/ppm): 12.17 (s, 4H), 7.6–7.49 (m, 6H), 7.14 (d, 2H, $J = 8.4$ Hz, Ar-H), 7.00 (d, 2H, $J = 7.2$ Hz, Ar-H), 4.69 (s, 1H), 4.48 (s, 1H), 4.16 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$, δ/ppm): 199.3, 172.6, 170.2, 161.7, 158.8, 157.7, 137.1, 134.3, 130.1, 128.3, 120.7, 112.9, 71.9, 70.2, 69.5, 56.4, 32.2, 21.6.

1-(3-Nitrophenyl)-3-ferrocenylprop-2-en-1-one (5): Black solid. Yield: 74%; m.p. > 300 °C, 3370, FT-IR/ATR (ν/cm^{-1}): 3091, 1657, 1593, 1574, 1477, 1435, 1409, 1348, 1293, 1245, 1216, 1104, 1093, 1041, 1029, 1001, 969, 934, 815, 738, 707, 675, 639, 616, 479; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$, δ/ppm): 8.74 (s, 2H), 8.51 (d, 2H, $J = 7.2$ Hz, Ar-H), 8.47 (d, 2H, $J = 8$ Hz, Ar-H), 7.85 (t, 2H, $J = 7.6$ Hz), 7.78 (s, 1H), 7.75 (s, 1H), 7.5 (s, 1H), 7.47 (s, 1H), 4.91 (s, 5H), 4.6 (s, 5H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$, δ/ppm): 186.9, 148.9, 148.8, 139.4, 134.9, 130.9, 127.6, 123.1, 118.6, 79.2, 72.2, 70.2, 70.1, 40.6, 39.4.

2.3 Determination of antioxidant activity

The antioxidant activity of the investigated compounds **1–5** was determined using ABTS radical-scavenging assay. A stock solution of the $\text{ABTS}^{\bullet+}$ radical cation was prepared in the reaction of ABTS (4.912 mL, 7 mM in phosphate-buffered saline (PBS)) and potassium persulfate (0.088 mL, 140 mM in distilled water). After 16 h of incubation in the dark, the stock solution was diluted with methanol until the recorded absorbance at 734 nm was 0.700 ± 0.02 . Subsequently, 20 μL of the methanolic solutions of the investigated compounds (5 mM) were mixed with 2 mL of the ABTS radical solution, shaken and stored in the dark for 10 min. Afterward the absorbance was measured at 734 nm. Each test was done in triplicate. The inhibition percentage of $\text{ABTS}^{\bullet+}$ was calculated using the formula:

$$\text{Inhibition} = ((\text{Ac}-\text{As})/\text{Ac}) 100 \quad (1)$$

where Ac is the absorbance of the control solution (20 μL of methanol in 2 mL of ABTS solution) and As is the absorbance of the sample solution. Ascorbic acid was used as a standard antioxidant. The antioxidant ability of the most promising derivatives **2** and **3** was further evaluated by determination of the IC_{50} values. The methanolic solutions of the corresponding compound and ascorbic acid was prepared in the concentration range 5–0.5 mM. IC_{50} values were calculated and presented with standard deviation ($\pm\text{SD}$) [11].

3 Results and discussion

In the last decades, the integration of an organometallic moiety with bioactive organic frameworks is becoming an attractive approach to investigate the potential pharmacological activity of newly compounds for the treatment of various diseases. Besides the complexes of transition metals such as Pt, Ru, Os, and Ir known for anti-cancer activity, bis(cyclopentadienyl)iron(Fc, ferrocene) is a widely used structure in biomedical chemistry. According to literature review, ferrocene derivatives represent a useful structural feature in antioxidants. Zhao et al. demonstrated that aianthoidol ferrocene possess good radical scavenging activity for AAPH^{\bullet} (2,2'-azobis(2-amidinopropane)-dihydrochloride) and $\text{ABTS}^{\bullet+}$ radicals, while Štimac et al. demonstrated that the adamantly ferrocene possess antioxidant activity toward DPPH \bullet the (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine) radical. Tabrizi et al. demonstrated that derivatives obtained by a condensation reaction between the amino ferrocene and hydroxycinnamic acids, that is, caffeic acid (CA) and ferulic acid (FA) possess good

free radical scavenging activity toward the numbers of free radicals [12]. Inspired by all these results, we determined the potential antioxidant activity of the ferrocenyl chalcones using the ABTS method. The obtained results were compared with the values for ascorbic acid, which was used as a standard. Based on the obtained results, it can be concluded that the nature and position of the substituent on the phenyl nucleus significantly influence the value of the antioxidant activity (Figure 1). Among the analyzed ferrocene derivatives (**1–5**), only compounds **2** and **3**, which have a strong electron-donor (methoxy group) or electron-acceptor substituent (bromine atom) in the *p*-position of the phenyl nucleus, have significant activity (51.8 and 74.8%, respectively). Compounds **1** (with an unsubstituted phenyl nucleus) and **5** (with a nitro group in the *m*-position of the phenyl nucleus) show moderate activity (22.5 and 33.1%, respectively), while compound **4** with a methoxy group in the *o*-position has weak antioxidant activity (5.1%).

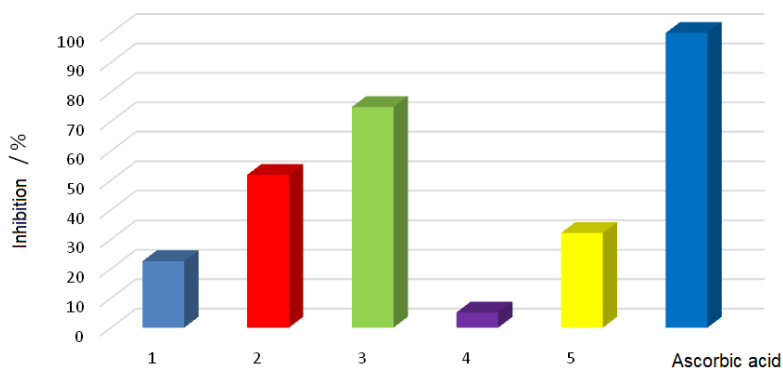


Figure 1. Antioxidant activity of the ferrocenyl chalcones (**1–5**) using the ABTS method.

Minić Jančić et al. demonstrated that some substituents in different positions of the phenyl nucleus may significantly reduce the antioxidant activity of the investigated derivatives [13]. The influence of these substituents on antioxidant activity could be complex and it further depends on their electron donating and accepting capabilities, as well as on the conformation of the molecule. A voluminous *o*-methoxy group makes it difficult for the molecule to bind the free radicals and thus disable electron exchange. Contrary, when methoxy group is in *para* position, steric interferences are reduced, hence free radical scavenging is increased. In addition, the positive resonant effect of the methoxy group results in the formation of a more stable radical form and higher antioxidant activity [13]. In order to determine IC_{50} values of the most active compounds **2** and **3**, i.e. concentrations required for inhibition of initial ABTS radical concentration by 50%, antioxidant activities are determined in the range of 5–0.5 mM (Figure 2). In general, high IC_{50} values indicate low antioxidant activity. The obtained IC_{50} values for compounds **2** and **3** are 2.44 and 2.11 mM, respectively, and are higher compared to the value for ascorbic acid (1.45 mM).

4 Conclusion

In order to create new pharmacologically active compounds, potential antioxidants, in this work, five ferrocenyl chalcones were synthesized and fully structurally characterized by melting points, FT-IR/ATR, 1H and ^{13}C NMR spectroscopic methods. The synthesized compounds differ from each other according to the nature and position of the substituent attached to the phenyl group in position 1 of the linear unsaturated carbonyl system. Results of the evaluation of antioxidant activity obtained using ABTS assay indicate that the nature and position of the substituent on the phenyl nucleus significantly influence the antioxidant activity. Among the analyzed ferrocenyl chalcones (**1–5**), only compounds **2** and **3**, bearing a strong electron-donor (methoxy group) or electron-acceptor substituent (bromine atom) in the *p*-position of the phenyl nucleus, possess moderate activity. The obtained IC_{50} values for compounds **2** and **3** are 2.44 and 2.11 mM, respectively. It has been shown that ferrocenyl chalcones exhibit less potent activity when compared to the ascorbic

acid, wherein compounds **2** and **3** could be considered as prominent antioxidant molecules. The general conclusion based on these evaluations is that the ferrocenyl chalcones represent an interesting starting point for the synthesis of some new pharmacologically active compounds.

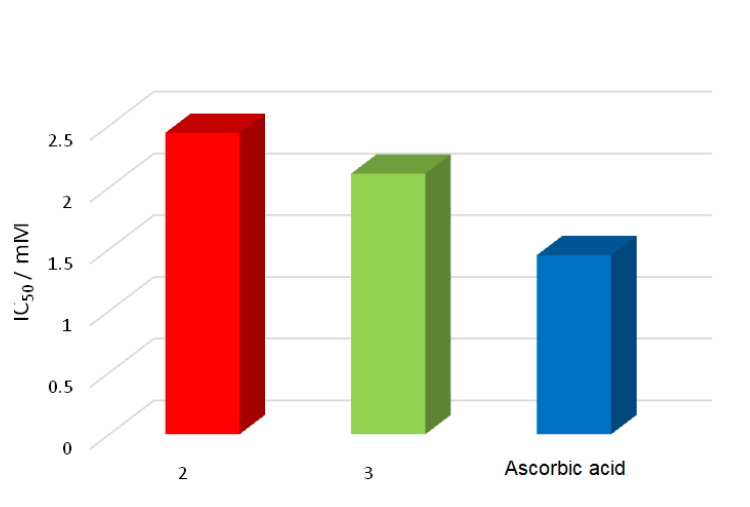


Figure 2. IC₅₀ value of compounds **2**, **3** and ascorbic acid.

4.1 Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-47/2023-01/200135 and 451-03-47/2023-01/200287).

5 References

- [1] **Montes-Gonzalez I., Alsina-Sanchez A. M., Aponte-Santini J. C., Delgado-Rivera S. M., Duran-Camacho G. L.**, Perspectives of ferrocenyl chalcones: synthetic scaffolds toward biomedical and materials science applications, *Pure Applied Chemistry* 91 (2019) pp. 653–669.
- [2] **Yadav D. K., Tripathi K. P., Kaushik P., Pankaj, Rana V. S., D. Kamil, D. Khatri, Shakil N. A.**, Microwave assisted synthesis, characterization and biological activities of ferrocenyl chalcones and their QSAR analysis: Part II, *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 56 (2021) 82–97.
- [3] **Henry E. J., Bird S. J., Gowland P., Collins M., Cassella J. P.**, Ferrocenyl chalcone derivatives as possible antimicrobial agents, *The Journal of Antibiotics* 73 (2020) pp. 299–308.
- [4] **Wu X., Wilairat P., Go M. L.**, Antimalarial activity of ferrocenyl chalcones, *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters* 12 (2002) 2299–2302.
- [5] **Tang W., Gao Y., Tong H., Xu X., Zhu Z., Liu B.**, Green synthesis of ferrocenyl chalcones against triple negative breast cancer, *Journal of Organometallic Chemistry* 989 (2023) 122640.
- [6] **Smit F. J., Bezuidenhout J. J., Bezuidenhout C. C., N'Da D.**, Synthesis and *in vitro* biological activities of ferrocenyl–chalcone amides, *Medicinal Chemistry Research* 25 (2016) 568–584
- [7] **Santos-Sánchez N. F., Salas-Coronado R., Villanueva-Cañongo C., Hernández-Carlos B.**, Antioxidant compounds and their antioxidant mechanism in Antioxidants (ed. **Shalaby E.**), IntechOpen, London, United Kingdom, 2019.
- [8] **Meng X., Li S., Ma W., Wang J., Hu Z., Cao D.**, Synthesis and antioxidant activities of ferrocenyl-containing curcumin analogues, *Letters in Drug Discovery*, 15 (2018) 1252–1258.
- [9] **Singh G., Arora A., Kalra P., Kumar Maurya I., Espinosa Ruizc C., Angeles Estebanc M., Sinha S., Goyal K., Sehgal R.**, A strategic approach to the synthesis of ferrocene appended chalcone linked triazole allied organosilatrane: antibacterial, antifungal, antiparasitic and antioxidant studies, *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 27 (2019) 188–195.
- [10] **Chauhan R., Yadav R., Kumar Singh A., Trivedi M., G. Kociok-Köhn, Kumar A., Gosavif S., Ranea S.**, Ferrocenyl chalcones with phenolic and pyridyl anchors as potential sensitizers in dye-sensitized solar cells, *RSC Advances*, 6 (2016) 97664–97675.

- [11] **Ladarević J., Božić B., Matović L., Božić Nedeljković B., Mijin D.**, Role of the bifurcated intramolecular hydrogen bond on the physico-chemical profile of the novel azo pyridine dyes, *Dyes and Pigments*, 162 (2019) 562–572.
- [12] **Tabrizi L., Le Anh Nguyen T., Dieu Thao Tran H., Quan Pham M., Quang Dao D.**, Antioxidant and anticancer properties of functionalized ferrocene with hydroxycinnamate derivatives—an integrated experimental and theoretical study, *Journal of Chemical Information and Modeling*, 60 (2020) 6185–6203.
- [13] **Minić Jančić A., Katanić Stanković J. S., Srećković N., Mihailović V., Ilić Komatina D., Stevanović D.**, Ferrocene-containing tetrahydropyrimidin-2(1H)-ones: antioxidant and antimicrobial activity, *Journal of Organometallic Chemistry*, 967 (2022) 122335.

**MINERALOGIJA, HEMIJA I DISTRIBUCIJA
ODABRANIH MIKROELEMENTATA U UGLJU I GLINCIMA
IBARSKOG BASENA (JUŽNA SRBIJA)**

**MINERALOGY, CHEMISTRY, AND DISTRIBUTION
OF SELECTED TRACE-ELEMENTS IN COAL AND SHALE FROM
THE IBAR BASIN (SOUTH SERBIA)**

**Željana NOVKOVIĆ¹, Nenad NIKOLIĆ², Nevena ANDRIĆ-TOMAŠEVIĆ³,
Violeta GAJIĆ⁴, M SUÁREZ⁵, E. GARCÍA-ROMERO⁶,
Vladimir SIMIĆ⁴, Dragana ŽIVOTIĆ^{4*}**

¹ MMI Bor Mining and Metallurgy, Bor, Serbia

² Institute for Multidisciplinary Research, University of Belgrade, Belgrade

³ Institute of Applied Geosciences, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany,

⁴ University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Belgrade,

⁵ University of Salamanca, Department of Geology, Spain,

⁶ Department of Mineralogy and Petrology,
Complutense University of Madrid and
Geosciences Institute (IGEO), Madrid, Spain

Uzorci uglja iz rudnika Jarando, Tadenje i Progorelica i glinaca iz ležišta borata Piskanja (Ibarski basen) proučavani su primenom nekoliko analitičkih metoda (mikroskopija u propuštenoj svetlosti, rendgenska difrakcija praha (XRPD), skenirajućom elektronskom mikroskopom (SEM-EDS), infracrvena spektroskopija Furijeove transformacije (FTIR) i ICP-MS spektrometrija radi određivanja njihovog mineralnog i hemijskog sastava. Ibarski basen se nalazi oko 200 km južno od Beograda i u njemu se eksploatiše kameni ugalj i istražuje borna mineralizaciju. Mineraloški i geo-hemijski podaci ukazuju da su glavni minerali u uglju kvarc, pirit, sa promenljivim sadržajem gline (kaolinit, montmorilonit, ilit), kalcit i sulfati. Framboidalni pirit je glavni nosilac sumpora u uglju. Glina i karbonati su često vezani sa maceralima u mineralno-bituminoznom kompleksu, što ukazuje na redukcione uslove tokom taloženja OS. U visokotemperaturnom pepelu uglja, konstatovan je veoma visok sadržaj As, Co, Cu, Cr i Ni, posebno u ležištu Tadenje. Sadržaj Mo, Sb, Pb, V, Zn je nešto viši u odnosu na Klark vrednosti za pepeo kamenih ugljeva. Uzorci glinaca iz ležišta Piskanja izgrađeni su uglavnom od mešavine dolomita i liskuna/glina sa promenljivom sadržajem albita do andezina, K-feldspata i kvarca. Visok sadržaj dolomita konstatovan je u višim delovima basena. Liskun se uglavnom javlja kao biotit, retko muskovit, dok su ilit i hlorit najzastupljeniji minerali glina. Sepiolit i verovatno paligorskit, pronađeni su u jednom uzorku u dubljim delovima basena. Sulfidi Pb, Zn i Cu, gips, celestin, barit, rutil i apatit su takođe konstatovani u dubljim delovima basena.

Ključne reči: Ibarski basen; kameni ugalj; mineralogija; mikroelementi

Coal samples from the Jarando, Tadenje and Progorelica mines and shale samples from the Piskanja boron deposit (the Ibar basin) were studied using several methods such as transmitted light microscopy, X-ray powder diffraction (XRPD), scanning electron microscopy with energy dispersive Xray spectroscopy (SEM-EDS), fourier transform infra-red spectroscopy (FTIR) and ICP-MS spectrometry for evaluating their composition and chemical properties. The Ibar basin is situated about 200 km south of Belgrade and contain high volatile bituminous coal and boron mineralisation. The mineralogical and geochemical data of coals indicated that the main minerals in coals are quartz, pyrite, with variable amount of clay (kaolinite, montmorillonite, illite), calcite and sul-

* Corresponding author, e-mail: dragana.zivotic@rgf.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

phates. Framboidal pyrite sulfur is the main form of sulfur in the coals. Clay and carbonate are often associated with macerals in mineral-bituminous ground mass, implying highly reducing depositional environment. Very high content of As, Co, Cu, Cr and Ni was detected in high temperature coal ash, especially in Tadenje deposit. Content of Mo, Sb, Pb, V, Zn is slightly higher than Clarke value for bituminous coal. The shale samples from the Piskanja deposit revealed that study area mostly consists of mixture of dolomite and mica/clay minerals with variable amount of albite to andesine, K-feldspars, and quartz. High dolomite content was observed in the upper parts of the basin. Mica is mostly biotite and rarely muscovite, while illite and chlorite are the most abundant clay minerals. Sepiolite and probably palygorskite, were found in one sample. Pb, Zn and Cu sulphides, gypsum, celestine, barite, rutile and apatite were detected in the deeper parts of the basin.

Key words: *Ibar basin, chemistry, mineralogy, trace elements*

BRZINA ZVUKA ALUMINIJUM OKSID NANOFLLUIDA: EKSPERIMENTALNI SET I DOBIJENI REZULTATI

SPEED OF SOUND OF ALUMINIUM OXIDE NANOFLLUIDS: EXPERIMENTAL SET AND OBTAINED DATA

Divna M. MAJSTOROVIĆ^{1*}, Emila M. ŽIVKOVIĆ¹, Stephan KABELAC²

¹ Univerzitet u Beogradu Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

² Lajbnic Univerzitet u Hanoveru, Institut za Termodinamiku,
Garbzen, Nemačka

Ispitivani nanoflluidi su pripremani mešanjem nanočestica Al_2O_3 i osnovnih fluida vode ili etilen glikola. Brzina zvuka pripremljenih nanoflluida različitih zapreminskih udela merena je u temperaturnom opsegu (298,15-343,15) K i pri atmosferskom pritisku. Merenja su sprovedena na novopredloženom aparatu koji se sastoji od generatora funkcije, ultrazvučnog senzora, prekidača, izvora napona, osciloskopa, ultrazvučnog kontejnera i neophodnih senzora i opreme za prikupljanje podataka. Vrednosti za brzinu zvuka su računati na osnovu metode Time of Flight.

Dodavanje nanočestica osnovnom fluidu dovodi do nanoflluida sa promenjenim efektivnim termofizičkim svojstvima. Izraz efektivno znači da se ne utiče na sam osnovni fluid, već se stvara nova vrsta fluida koja se sastoji od osnovnog fluida i nanočestica dispergovanih u njemu. Razblažene koloidne disperzije čestica nano veličine (ispod 100 nm) pokazale su neke prednosti u poređenju sa većim česticama suspendovanim u tečnosti, kao što su poboljšan prenos toplote, duži rok trajanja i kontrola stabilnosti suspenzije, uz manje izraženo začepljenje i erozije u kanalima nego kod većih čestica.

Analiza brzine zvuka omogućava uvid u interakcije na molekularnom nivou koje se odvijaju između nanočestica i molekula osnovnog fluida. Praćen je i beležen uticaj zapreminskog udela i temperature nanoflluida na brzinu zvuka. Eksperimentalni podaci za brzinu zvuka za čist osnovni fluid vodu i etilen glikol pokazali su odlično slaganje od 0,12% i 0,36%, redom, za srednja apsolutna procentualna odstupanja od podataka iz literature. Smanjenje vrednosti brzine sa povećanjem koncentracije, primetno kod ispitivanih nanoflluida, rezultat je smanjenja interakcija nanočestica-fluid i dominacije interakcija čestica-čestica.

Ključne reči: nanoflluid; brzina zvuka; molekulske interakcije

The investigated nanoflluids were prepared by mixing nanoparticles Al_2O_3 and base fluids water or ethylene glycol. The speed of sound of prepared nanoflluids of different volume fraction is measured in the temperature range (298.15-343.15) K and at atmospheric pressure. The measurements were conducted on the newly proposed apparatus consisting mainly of function generator, ultrasonic sensor, switch, voltage source, oscilloscope, ultrasonic container and the necessary sensors and equipment for data acquisition. The values for speed of sound were calculated based on the Time of Flight method.

Adding the nanoparticles to the base fluid will lead to nanoflluids with changed effective thermophysical properties. The term effective means that not the base fluid itself is affected, but a new type of fluid is created, consisting of the base fluid and nanoparticles dispersed in it. Dilute colloidal dispersions of nanosized particles (under 100 nm) in a fluid have exhibited some advantageous features compared to larger particles suspended in a liquid, such as improved heat transfer, longer shelf life, and control of suspension stability, with the less pronounced clogging and erosion in the channels than with larger particles.

The analysis of the sound velocity allows insight into the molecular level interactions taking place between the nanoparticles and the base fluid molecules of the nanoflluid. The influence of nanoparticle volumetric fraction and temperature on the speed of sound was followed and recorded.

* Corresponding author, e-mail: dbajic@tmf.bg.ac.rs

Experimental speed of sound data for pure base fluids water and ethylene glycol showed excellent agreement of 0.12% and 0.36%, respectively, for average absolute percentage deviations from literature data. The decrease in velocity values with the increase of concentration, noticeable in the tested nanofluids, is a result of decrease in nanoparticle-fluid interaction and dominance of particle-particle interaction.

Key words: *nanofluid; ultrasonic velocity; molecular interactions*

TERMODINAMIČKA SVOJSTVA DVOKOMPONENTNIH SMEŠA TERPENA I 1-PROPANOLA U INTERVALU TEMPERATURE (288,15 – 323,15) K I NA ATMOSFERSKOM PRITISKU

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF BINARY MIXTURES OF TERPENES AND 1-PROPANOL IN THE TEMPERATURE RANGE (288.15 – 323.15) K AND AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Ivona A. ĐORĐEVIĆ, Nikola D. GROZDANIĆ*, Mirjana Lj. KIJEVČANIN, Ivona R. RADOVIĆ

Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia

*Najzastupljenija klasa hemijskih jedinjenja prisutna u esencijalnim uljima jesu terpeni. Smatraju se zelenim rastvaračima, a potiču iz prirodnih izvora poput biljaka, citrusnog voća, ali i lišća drveća ili šišarki. Pronalaze veliku komercijalnu upotrebu u granama prehrambene industrije, kao prirodne arome i dodaci hrani, pored čega su veoma zastupljeni u farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji. U cilju proučavanja termodinamičkih svojstava smeša terpena (α -pinen, *p*-cimen i linalool) sa 1-propanolom, eksperimentalno su određene gustine i viskoznosti za navedene smeše. Eksperimentalna merenja rađena su u opsegu temperatura od 288,15 do 323,15 K na atmosferskom pritisku, za ceo opseg udela. Na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata za gustine i viskoznosti izračunate su vrednosti dopunske molarne zapremine, kao i vrednosti promene viskoznosti pri mešanju. Izmerene veličine (gustina i viskoznost) korelisane su korišćenjem Heric-Brewer-Jouyban-Acree modela, dok je za korelisanje dopunskih veličina (dopunska molarna zapremina i promena viskoznosti) korišćen Redlich-Kister polinom. Svi eksperimentalno dobijeni podaci i njihove izvedene veličine korišćene su za analizu neidealnog ponašanja odabranih smeša. Heric-Brewer-Jouyban-Acree model je uspešno korelisao eksperimentalne vrednosti za sva tri binarna sistema u celom temperaturnom opsegu i na atmosferskom pritisku, dok je Redlich-Kister uspešno korelisao izvedene veličine.*

Ključne reči: *gustina; viskozitet; dopunske veličine; modelovanje*

*The most abundant class of chemical compounds present in essential oils are terpenes. They are considered green solvents, and come from natural sources such as plants, citrus fruits, but also from tree leaves or pine cones. They find a large commercial use in a food industry, as natural flavors and food additives, besides which they are widely used in the pharmaceutical and cosmetics industries. In order to study the thermodynamic properties of binary mixtures of terpenes (α -pinene, *p*-cymene and linalool) with 1-propanol, density and viscosity of these mixtures were determined experimentally. Experimental measurements were done over the temperature range from 288.15 to 323.15 K at atmospheric pressure, over the entire composition range. Excess molar volumes and viscosity deviations were calculated based on the experimental results for the densities and the viscosities. Experimentally measured properties were correlated using the Heritz-Brewer-Jouyban-Acree model, while the Redlich-Kister polynomial was used to correlate the derived properties. All the experimentally obtained data and their derived values were used to analyze the non-ideal behavior of the selected mixtures. The Heritz-Brewer-Jouyban-Acree model successfully correlated the experimental values for all three binary systems, while the Redlich-Kister successfully correlated the derived quantities.*

Keywords: *density; viscosity; excess properties; modelling*

* Corresponding author, e-mail: ngrozdanic@tmf.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Hemijska industrija".

UPRAVLJAČKO-NADZORNI SISTEM CENTRIFUGE I DOZIRANJA VEZIVA U POGONU ZA PROIZVODNJU MINERALNE VUNE

A SUPERVISORY CONTROL SYSTEM OF SPINNER MACHINE AND BINDER DOSING IN MINERAL WOOL PRODUCTION PLANT

Stanko P. STANKOV*,

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš

Razmatra se lokalni upravljačko - nadzorni sistem, zasnovan na PLC i SCADA konfiguraciji, jedne tehnološke celine, koja je sastavni deo kompleksnog pogona za proizvodnju mineralne vune. Upravljački sistem vrši identifikaciju promene stanja procesa ispređanja vlakana mineralne vune pomoću centrifuge i ubrizgavanja veziva u vlaknastu strukturu, dijagnostikuje i predviđa greške i ponašanje objekata upravljanja u uslovima promene ulaznih protoka materijala, pri čemu generiše optimalne vrednosti upravljačkih signala kako bi se minimiziralo vreme zastoja i ostvarili tehničko-tehnološki i ekonomski zahtevi vezani za kvalitet mineralne vune. Kontroler omogućava programsko upravljanje i regulaciju tehnoloških veličina i parametara poput nivoa, protoka veziva i komprimovanog vazduha, temperature vode za hlađenje točkova centrifuge, pritiska u centrifugi i dr., pri čemu se uzimaju u obzir moguće situacije u radu centrifuge, pripreme i distribucije vezivnog sredstva, kao i instalirane prateće opreme (elektromotori za pokretanje točkova centrifuge, pumpe za doziranje veziva, dizne za čišćenje centrifuge vodom, pumpe za hlađenje točkova centrifuge), čime se smanjuje mogućnost nastajanja mehaničkih i električnih havarija. Grafička interpretacija elemenata automatizacije preko dinamičkih ekrana omogućava operateru jednostavan interfejs za praćenje procesa. Sistem pored akvizicije i obrade podataka koji su vezani za vrednosti procesnih veličina i stanje instalirane opreme vrši i njihovo arhiviranje. Omogućeno je kreiranje i štampanje smenskih, dnevnih, sedmičnih i mesečnih izveštaja o funkcionalnosti i raspoloživosti ove tehnološke celine. Razmatraju se i alarmna stanja, koja nastaju u slučaju kvara ili prekoračenja zadatih granica određenih veličina. Alarmni signali aktiviraju zvučnu i svetlosnu signalizaciju, uz odgovarajuću tekstualnu poruku na ekranu, s datumom i vremenom nastanka i uz zahtev operateru da na određen način potvrdi alarm. Alarmi kao i drugi važni podaci, čuvaju se u bazi podataka, uključujući i informaciju o vremenu otklanjanja uzroka nastajanja datog alarma. Informacije o statusu ugrađene opreme, uređaja i zaštitnih elemenata omogućavaju planiranje periodičnih pregleda i remonta, kada se vrši zamena određenih delova, što značajno doprinosi efikasnosti tekućeg, preventivnog i investicionog održavanja. Ovim se bitno povećava pouzdanost i sigurnost proizvodnog pogona.

Ključne reči: mineralna vuna; centrifuga; vezivo; upravljanje; nadzor

The local control and supervision system, based on PLC and SCADA configuration, of a technological unit, which is an integral part of a complex plant for the production of mineral wool, is considered. The control system identifies changes in the process of spinning mineral wool fibers using a spinner machine and injecting binders into the fibrous structure, diagnoses and predicts errors and the behavior of control objects under conditions of changes in material input flows, while generating optimal values of control signals in order to minimize downtime and achieve technical-technological and economic requirements related to the quality of mineral wool. The controller enables programmatic control and regulation of technological variables and parameters such as level, flow of binder and compressed air, temperature of water for cooling the spinner machine wheels, pressure in the spinner machine, etc., taking into account possible situations in the operation of the spinner machine, preparation and distribution of the binder, as well as installed supporting equipment (electric motors for starting the centrifuge wheels, pumps for dosing the binder, nozzles for cleaning the spinner machine with water, pumps for cooling the spinner machine wheels), which reduces the possibility of mechanical and electrical breakdowns. Graphical interpreta-

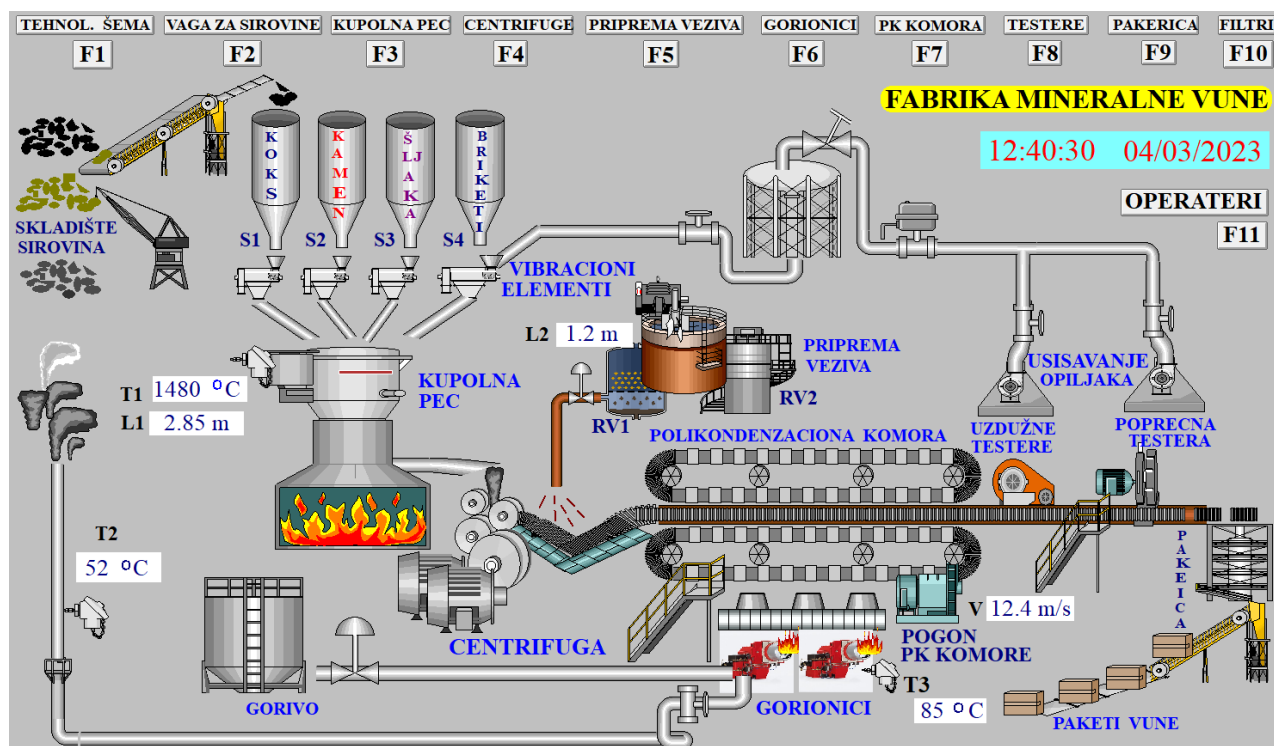
* Corresponding author, e-mail: stanko.stankov@elfak.ni.ac.rs

tion of automation elements through dynamic screens provides the operator with a simple interface for process monitoring. In addition to the acquisition and processing of data related to the values of process parameters and the condition of the installed equipment, the system also performs their archiving. It is possible to create and print shift, daily, weekly and monthly reports on the functionality and availability of this technological unit. Alarm conditions are also considered, which occur in the event of failure or exceeding the set limits of certain sizes. Alarm signals activate sound and light signaling, with a corresponding text message on the screen, with the date and time of occurrence and with a request to the operator to confirm the alarm in a certain way. Alarms, as well as other important data, are stored in the database, including information on the time of elimination of the cause of the given alarm. Information on the status of installed equipment, devices and protective elements enables the planning of periodic inspections and overhauls, when certain parts are replaced, which significantly contributes to the efficiency of current, preventive and investment maintenance. This significantly increases the reliability and safety of the production plant.

Key words: mineral wool; spinner machine; binder; control; supervision

1 Uvod

Mineralna vuna je izolacioni materijal koji se upotrebljava za toplotnu, protivpožarnu i zvučnu izolaciju. Nalazi široku primenu u građevinarstvu, industriji i brodogradnji. Pogon za proizvodnju mineralne vune sadrži nekoliko tehničko-tehnoloških celina: skladište sirovina (koks, kamen, šljaka, briketi), transport sirovina do vage za odmeravanje i uređaja za doziranje, kupolnu peć, sistem filtracije, pripremu i doziranje veziva, centrifugu, pendel klatno, polikondenzacionu komoru (PK), testere za uzdužno i poprečno sečenje vune, sistem za ventilaciju i otprašivanje, gorionici, liniju za pakovanje i transport gotovih proizvoda do skladišta, transformatorsku stanicu, kompresorsko postrojenje, skladište goriva (mazut, nafta, gas). Uprošćena tehnološka šema procesa proizvodnje mineralne vune prikazana je na slici 1 [1].



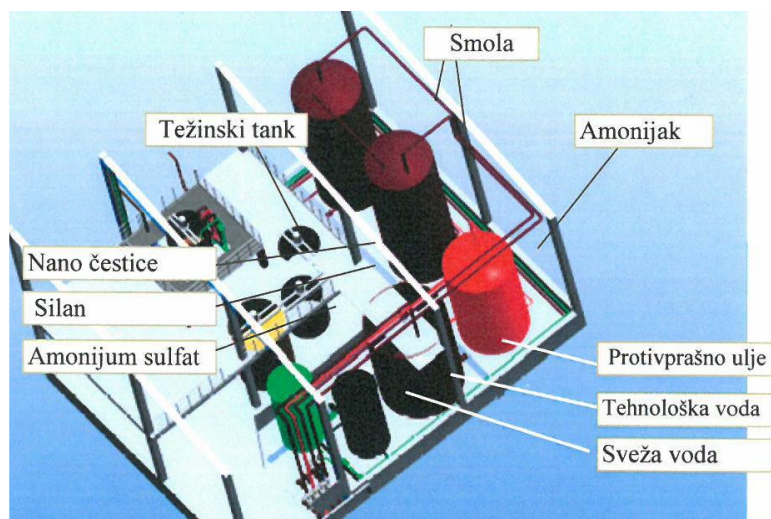
Slika 1. Uprošćena tehnološka šema procesa proizvodnje mineralne vune

Sirovine (koks, kamen, šljaka i briketi) najpre se preko kosih transporterata dopremaju do silosa (S1, S2, S3, S4). Iz silosa se ove sirovine, jedna po jedna, odmeravaju pomoću vage, a zatim automatski sipaju u posude koje su povezane s vibracionim uređajima. Pomoću njih se vrši šaržiranje (sirovine se ubacuju u slojevima) u kupolnu peć, u kojoj se tope na temperaturi od 1300 °C do 1600

°C. Sistem prečišćavanja dimnih gasova omogućava u velikoj meri uklanjanje prašine i ugljen monoksida, a značajan deo energije se vraća nazad u proces proizvodnje. Rastopljena masa se iz ku-polne peći kontrolisano dovodi na točkove automatski vođene centrifuge, gde dolazi do raspršivanja mase u vidu kapljica. Pod dejstvom visokopritisnog ventilatora uduvava se vazduh preko točkova centrifuga, pri čemu se nastale kapljice razvlače u vlakna [1, 2]. Iz vlaknaste strukture obrazuje se sloj vune tzv. filc. Tu se istovremeno vrši doziranje vezivnih sredstava. Filc zatim stiže do sistema za taloženje vune – takozvanog „pendel klatna” koji omogućava postizanje dobrih izolacionih karakteristika, tako što obezbeđuje ravnomerno raspoređivanje vlakana i visok stepen njihove isprepletanosti. Na ovaj način se stvara više mesta za „zadržavanje vazduha”, što je jedan od primarnih uslova za funkcionisanje izolacionog materijala. Sledeća etapa je prolazak filca kroz PK, u kojoj nastaje proces polimerizacije fenol-formaldehidne smole pod dejstvom cirkulacije vrućeg vazduha, čija je temperatura od 150 °C do 320 °C. U ovim uslovima dolazi do isparavanja vode i učvršćivanja veziva koje je dodato u fazi raspredanja mase. Topao vazduh dolazi preko kanala povezanih s gorionicima, čiji se rad automatski odvija na osnovu zadate temperature. Pogon PK je elektromotor s frekvencijskom regulacijom. Brzina komore se reguliše u opsegu 0–15 m/min. Ova brzina automatski se određuje na osnovu asortimana vune koja se proizvodi (meka, polumeka, polutvrda, tvrda vuna). Po izlazu iz PK komore snižava se temperatura sloja vune u zoni za hlađenje, a nakon toga preko transportera putuje do uzdužnih testera, kojima se raseca sloj vune po dužini. Osim uzdužnih postoji i poprečna testera, koja služi za poprečno sečenje na osnovu zadate dužine. Postoji sinhronizacija rada testera i PK komore. Rasečeni komadi idu putem transportera do mašine za pakovanje i dalje paketi odlaze u magacin gotovih proizvoda. Prilikom sečenja vune stvaraju se okrajci, opiljci i prašina, koji se odvođe pomoću ventilatora, preko kanala u separator. Od ovih otpadaka, koji se drobe i melju u granulat, uz dodavanje peska i cementa prave se briketi, koji se koriste kao dodatak osnovnoj sirovini [1, 2, 3]. U ovom radu se obrađuje upravljanje centrifugom i postrojenjem za pripremu i doziranje veziva.

2 Proces pripreme i doziranja veziva

Vezivna sredstva služe za povezivanje i impregnaciju vlakana mineralne vune, pri čemu obezbeđuju osobine koje zahteva industrija izolacionih materijala: čvrstinu, dugovečnost i elastičnost. Konfiguracija postrojenja za pripremu i doziranje veziva prikazana je na slici 2.

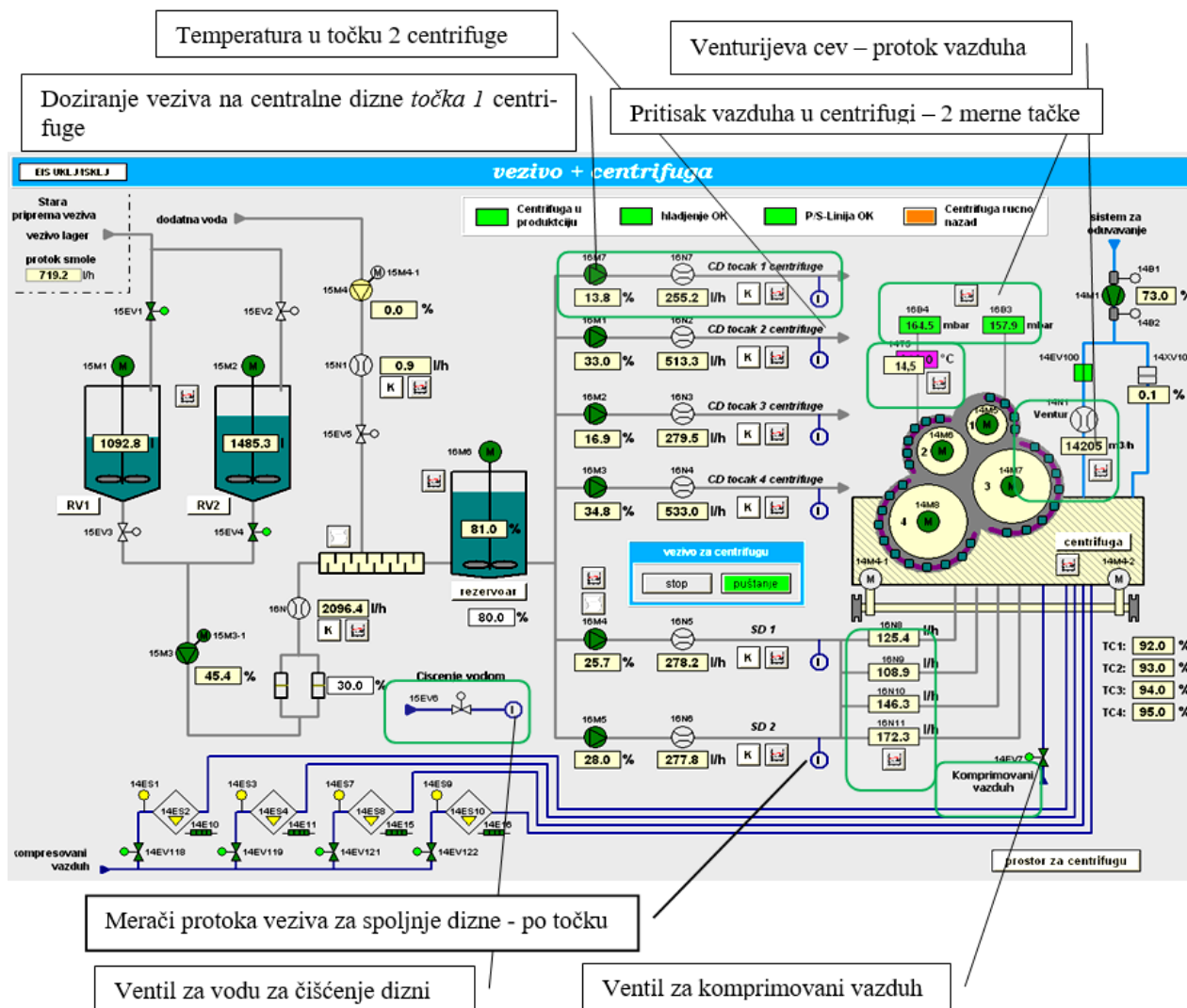


Slika 2. Skica postrojenja za pripremu i doziranje veziva

Ova tehnološka celina sadrži: dva rezervoara za smolu; rezervoare: sveže i tehnološke vode, amonijačne vode, silana, amonijum sulfata, protivprašnog ulja, nano čestica i tzv. težinski rezervoar. Vezivo je precizno određena mešavina nekoliko osnovnih komponenata: formaldehidne smole, vode, protivprašnog ulja, rastvora silana i amonijačne vode. Pored osnovnih dodaju se i pomoćne komponente: amonijum sulfat i rastvor nano čestica [1, 2, 4].

U osnovi sistema za merenje procesnih veličina, nadzora i upravljanja centrifugom i postrojenjem za pripremu i doziranje veziva je programabilni logički kontroler (PLC) sa operatorskim panelom (OP). Normalni režim rada postrojenja je automatski. Ručni (servisni) mod rada omogućava uključivanje i isključivanje pojedinačnih pogona za potrebe održavanja i servisiranja. Prelazak sa automatskog na ručni režim rada vrši se na operatorskom panelu na kome se prikazuju tekuće vrednosti

centralnih rezervoara, pomoću dozirnih pumpi 15M11 ÷ 15M23 i elektropneumatskih ventila 15Y11 ÷ 15Y23 dovode u merni rezervoar u kome se odmeravaju zadate količine određene recepturom za pripremu veziva. Na šemi su prikazani nivoi i količine komponenata u rezervoarima i mikserima, statusi mešalica, statusi pumpi i elektropneumatskih ventila. U mernom rezervoaru, po prijemu sirovina, vrši se određeno vreme mešanje mešalicom 15M6. Isparenja koja se javljaju u toku procesa mešanja odvođe se ventilacionim cevovodom pomoću ventilatora 15M7. Po završetku mešanja gotovo vezivo se transportuje u dnevne rezervoare RV1 i RV2. Pražnjenje mernog rezervoara se obavlja preko elektropneumatskih ventila 15Y17 i pumpe 15M17. Vezivo se iz dnevnih rezervoara odvodi u statički mikser preko merača protoka, ventila 15EV3, 15EV4 i pumpe 15M3–1. S druge strane, u statički mikser se dodaje i protivprašno ulje iz privremenog rezervoara, koji je smešten u prostoriji za dnevne rezervoare veziva (SCADA ekran vezivo + centrifuga prikazan na slici 4).



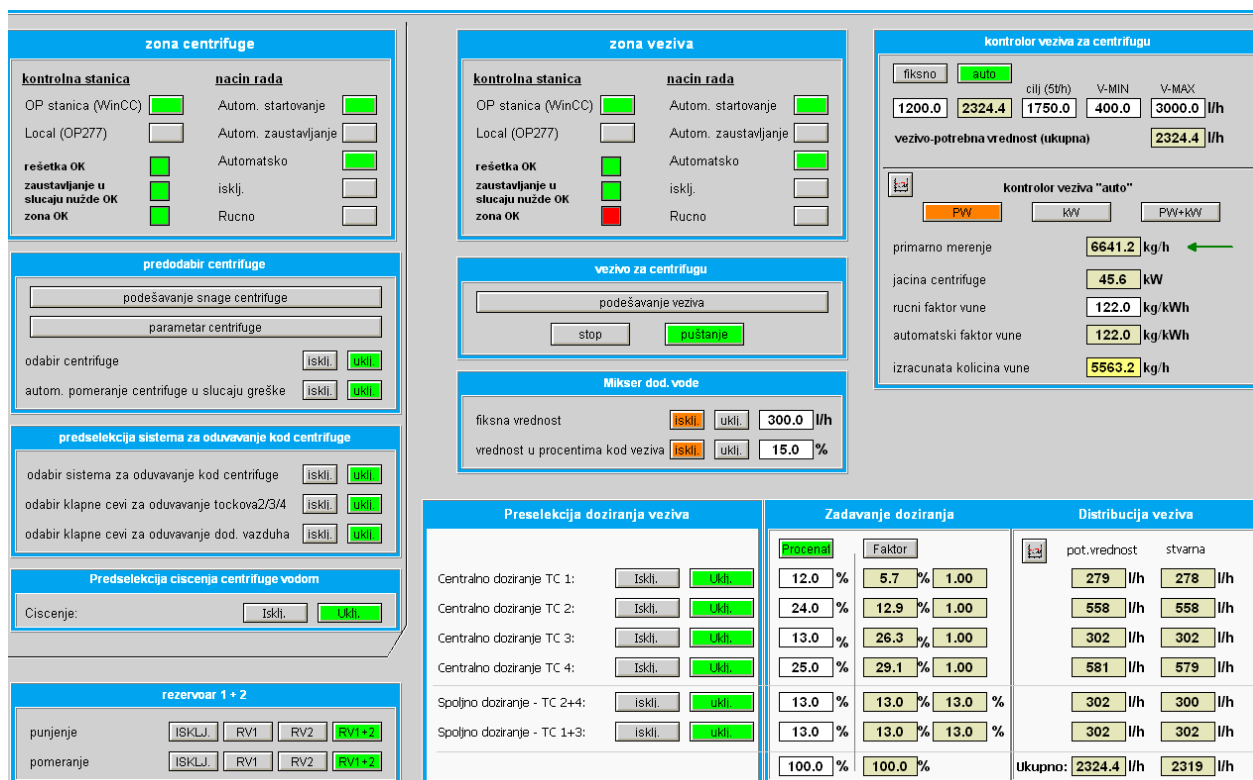
Slika 4. Doziranje veziva u prostor točkova centrifuga

Protivprašno ulje se u privremeni rezervoar ubacuje pomoću pumpe 15M27 iz skladišne cisterne u kojoj je instalirana mešalica 15M2. Privremeni rezervoar poseduje mešalicu 15M28 i senzor nivoa 15N12. Dovod u statički mikser se vrši pumpom 15M19 preko elektropneumatskog ventila 15Y22. Iz miksera se vezivo transportuje u postojeći statički mikser gde se dodaje voda pumpom 15M4-1 preko ventila 15EV5. Tako dobijena smeša veziva smešta se u privremeni rezervoar s mešalicom 16M6, odakle se odvodi pumpama 16M1, 16M2, 16M3, 16M4, 16M5 i 16M7 u prostor točkova centrifuge. Merenje protoka veziva vrši se u svakoj grani (merači protoka 16N2, 16N3, 16N4, 16N5, 16N6, 16N7). Sirovine (smola, amonijačna voda, protivprašno ulje) se dovoze auto-cisternama iz kojih se pretakanjem pomoću pneumatskih pumpi odvođe u centralne rezervoare. Elektromotorni pogoni pumpi su frekvencijski regulisani. Podaci o količini sirovina u rezervoarima

se dobijaju na osnovu podataka sa senzora nivoa. Merenje nivoa sveže vode, tehničke vode, silana, amonijum sulfata i nano čestica vrši se kontinualno, pomoću kapacitivnih senzora koji daju strujni signal $4 \div 20$ mA. Nivo protivprašnog ulja se meri posredno senzorom pritiska sa izlaznim signalom $4 \div 20$ mA. Merenje težine sadržaja u težinskom rezervoaru vrši se pomoću mernih ćelija koje, takođe daju na izlazu signal $4 \div 20$ mA. Protok protivprašnog ulja se meri masenim meraćem protoka (signal $4 \div 20$ mA). Pomenuti signali se vode na ulaze analognih modula PLC-a [1, 3].

3 Rad centrifuge

Centrifuga radi automatski preko SCADA sistema (jedan ekran operatorskog panela prikazan je na slici 5). Ekran je podeljen u nekoliko sekcija: zona centrifuge, zona veziva, kontrola veziva za centrifuge, podešavanje parametara centrifuge, doziranje vode u mikser veziva, podešavanje parametara veziva (centralno i spoljne doziranje veziva na točkove centrifuge), regulacija dnevnih rezervoara veziva RV1 i RV2. Nakon *automatskog startovanja* centrifuge i veziva, odgovarajuća polja (dugmad) se boje zeleno u zonama centrifuga i veziva (na operatorskom panelu ili SCADA računaru), a redosled operacija je sledeći: uključuje se mehanizam za podmazivanje, brzina točkova centrifuge se postavlja na određenu vrednost, uključuju se motori za pokretanje točkova centrifuge s 30 % maksimalne brzine (regulacija brzine je realizovana s frekvencijskim pretvaračima), pokreće se pumpa za vodu kojom se hlade točkovi centrifuge, stavljaju se u pogon pumpe i ventili kojima se dovodi vezivo.



Slika 5. SCADA ekran OP za upravljanje centrifugom i doziranjem vezivnog sredstva

Postupak zaustavljanja centrifuge izvršava se takođe automatski, pritiskom na dugme *automatsko zaustavljanje* u zonama centrifuge i veziva, pri čemu se isključuju pumpe za dotok veziva i pumpe vode za hlađenje, zaustavljaju se točkovi centrifuge, tri minute nakon zaustavljanja centrifuge isključuje se podmazivanje. Čišćenje centrifuge vrši se vodom. Ukoliko je selektovano čišćenje dizni, čišćenje vodom se uključuje 30 sekundi nakon prestanka doziranja veziva i traje dve minute. Mogu se pratiti na ekranu statusi elektromagnetnih ventila (uključen / isključen).

4 Doziranje veziva

Doziranje veziva u prostor točkova centrifuge vrši se pomoću pumpi i centralnih i spoljašnjih dizni. Izračunavanje potrebne količine veziva za svaku pumpu bira se pomoću podmenija Procentat i Faktor (slika 6). Procenti za pojedinačne pumpe se unose direktno u polja ispod dugmeta “Procentat”. Moguće je uneti propisane vrednosti. Zbir svih zadatih vrednosti treba da bude 100 % (boja polja je bela – slika 6a). Ukoliko zbir nije 100 %, polja se boje narandžasto slika 6b. Na slici 6c polja za pumpe 3 i 4 za doziranje veziva preko centralnih dizni su crvene boje zato što je potrebno da operater unese 0 % za pumpe koje su isključene. Ukoliko nije selektovana određena pumpa odgovarajuće polje boji se crveno. U tom slučaju potrebno je da operater unese u ovo polje 0 i da promeni vrednosti u ostalim poljima (suma svih polja mora biti 100 %). Zadavanje doziranja može se vršiti i aktiviranjem dugmeta faktor koje se boji zeleno (slika 6d).

Zadavanje doziranja			Zadavanje doziranja			Zadavanje doziranja			Zadavanje doziranja		
Procentat	Faktor		Procentat	Faktor		Procentat	Faktor		Procentat	Faktor	
12,0 %	1,8 %	1,0	12,0 %	1,8 %	1,0	12,0 %	1,8 %	1,0	12,0 %	1,8 %	1,0
8,0 %	5,1 %	1,0	8,0 %	5,1 %	1,0	8,0 %	5,1 %	1,0	8,0 %	5,1 %	1,0
20,0 %	18,4 %	1,0	20,0 %	18,4 %	1,0	20,0 %	18,4 %	1,0	20,0 %	18,4 %	1,0
16,0 %	14,8 %	1,0	16,0 %	14,8 %	1,0	16,0 %	14,8 %	1,0	16,0 %	14,8 %	1,0
14,0 %	35,0 %	35,0 %	14,0 %	35,0 %	35,0 %	14,0 %	35,0 %	35,0 %	14,0 %	35,0 %	35,0 %
30,0 %	25,0 %	25,0 %	3,0 %	25,0 %	25,0 %	3,0 %	25,0 %	25,0 %	3,0 %	25,0 %	25,0 %
a)			b)			c)			d)		

Slika 6. Podmeniji za zadavanje količine veziva

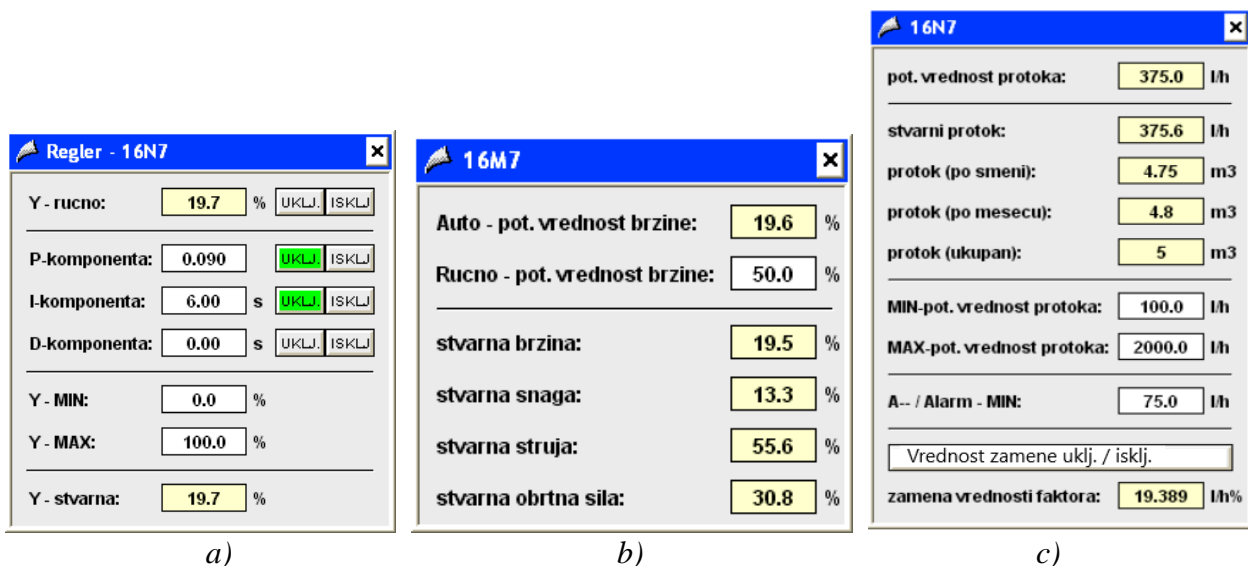
Podešavanja doziranja veziva preko faktora se vrši unosom vrednosti faktora po točku (prva četiri polja u drugoj koloni), a procenete učešća spoljašnjih dizni 2+4 i 1+3 u ukupnoj količini veziva program preračunava za svaku pumpu ponaosob (kolona u sredini). Na osnovu dobijenih procenata, program izračunava doziranje u litrima na čas. Na slici 7 dati su ekrani za manipulaciju centralnim i spoljašnjim diznama za doziranje veziva.

VEZIVO		28. 03. 2023.	
		23:58:09	
predselekcija veziva		OP277 pokrenut	
UKLJ.	odabir centralne dizne točka 1 centrifuge	ISKL.	
UKLJ.	odabir centralne dizne točka 2 centrifuge	ISKL.	
UKLJ.	odabir centralne dizne točka 3 centrifuge	ISKL.	
4 <<	pregled	način rada	>> 6

VEZIVO		28. 03. 2023.	
		23:59:55	
predselekcija veziva		OP277 pokrenut	
UKLJ.	odabir centralne dizne točka 4 centrifuge	ISKL.	
UKLJ.	odabir spoljne dizne točka 2+4 centrifuge	ISKL.	
UKLJ.	odabir spoljne točka 1+3 centrifuge	ISKL.	
5 <<	pregled	način rada	>> 7

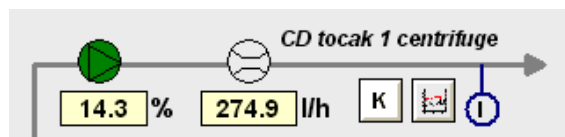
Slika 7. Ekran za manipulaciju diznama

Mogu se podešavati parametri PID regulatora elektromotora pumpi za distribuciju veziva na točkove centrifuge (slika 8 – a), očitavati struja i brzina motora (slika 8 – b) i vrednosti protoka veziva (slika 8 – c).



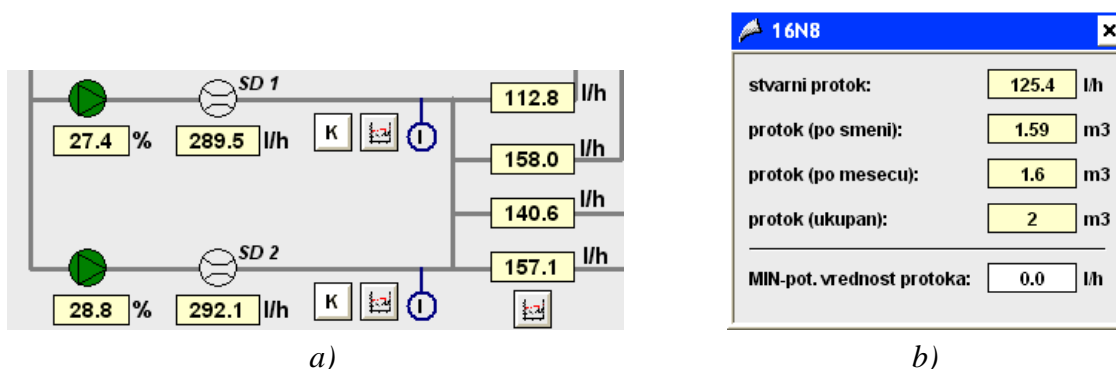
Slika 8. Parametri PID regulatora, elektromotora pumpe i vrednosti protoka pumpe 1

Na slici 9 (insert iz SCADA ekrana) prikazana je pumpa za vezivo kojom se ono šalje preko centralnih dizni na točak 1 centrifuge, s prikazom brzine motora i trenutnim protokom veziva.



Slika 9. Pumpa veziva za iočak 1 centrifuge

Merenje protoka veziva, koje se vodi preko spoljašnjih dizni na točkove centrifuge, obavlja se pomoću četiri elektromagnetna merača protoka (za svaki točak poseban merač). Podešavanje protoka vrši se preko ručnih ventila, a vizuelizacija i grafički prikazi su omogućeni na ekranu SCADA aplikacije (slika 10-a) na OP panelu.




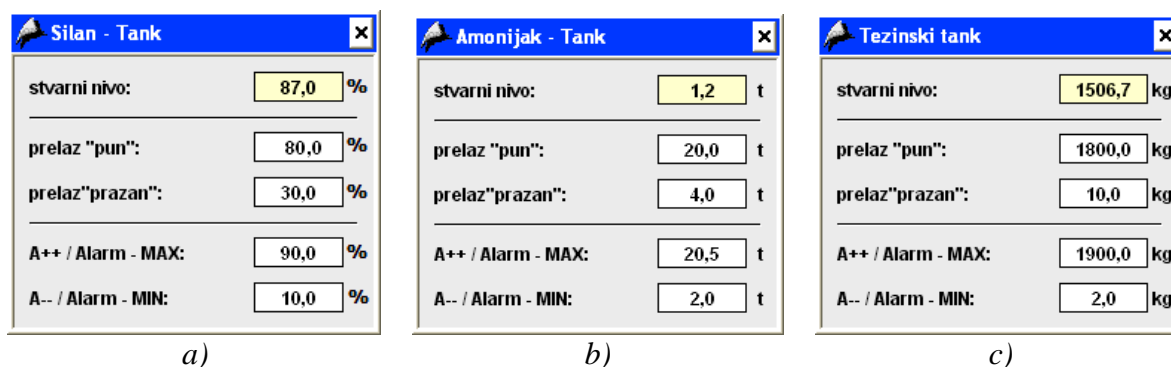
Slika 10. Merenje protoka veziva

Operater ima mogućnosti da, klikom na polje za unos, dobije ekran sa statističkim podacima (vrednost protoka po smeni, po mesecu i ukupan protok – slika 10-b) i podesi minimalnu vrednost protoka. Boja polja postaje crvena ukoliko se dese greška u merenju ili vrednost protoka padne ispod minimalne.

4.1 Pregled rezervoara, doziranja i potrošnje veziva

Manipulacija postrojenjem za pripremu i doziranje veziva, pregled i zadavanje parametara vrši se preko kreiranih ekrana na SCADA računaru i OP. Klikom miša na određeni rezervoar, na ekranima se dobijaju dijalog prozori s podacima i mogućnostima podešavanja graničnih vrednosti (pun/prazan) kao i kritične vrednosti, pri čijem se dostizanju generišu alarmi (A++/ Alarm-MAX i A-- / Alarm - MIN), što je prikazano na slici 11, Kada se prekorači zadata granična vrednost npr. „prelaz prazan“, na ekranu se pored rezervoara pojavljuje narandžasta strelica ▼. Ako je prekorače-

na granica A-- / Alarm – MIN, pojavljuje se crvena strelica .Isti prikaz graničnih vrednosti važi i za „prelaz pun“ i A ++ / Alarm-MAX.



Slika 11. Podešavanje graničnih vrednosti u rezervoarima: a) silana, b) amonijaka, c) težinskog rezervoara

4.2 Podešavanje minimalnog priraštaja doziranja

Proces pripreme i doziranja veziva vrši se prema određenoj dinamici. Upravljačko-nadzorni sistem generiše alarm u slučaju da je doziranje komponentata sporo. Na ekranu prikazanom na slici 12 definišu se pojedinačno minimalni priraštaji za svaku komponentu.

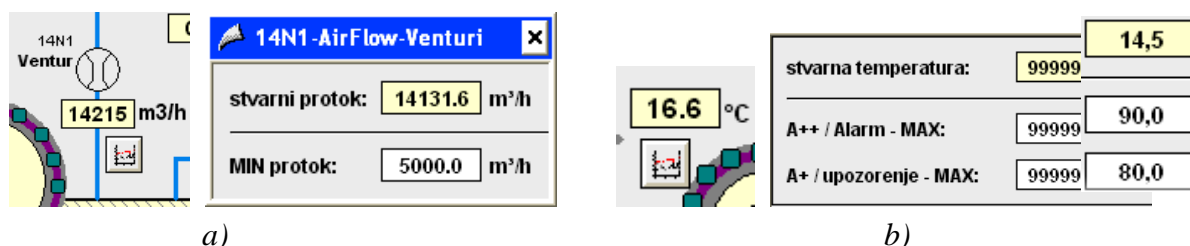


Slika 12. Podešavanje minimalnog priraštaja komponentata

Ukoliko je priraštaj pri doziranju određene komponente manji od podešenog, sistem javlja alarm u vidu poruke „Problem s doziranjem komponente u mernm rezervoaru“ i zaustavlja trenutno tok doziranja.

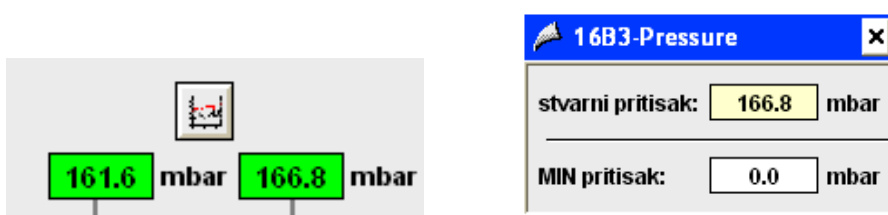
4.3 Praćenje protoka vazduha

Na ekranu OP se prikazuje i trenutna vrednost protoka vazduha (koji se meri pomoću venturi-jeve cevi), status uređaja i mogućnost pregleda i štampanja grafika promene protoka vazduha. Operater može da podesi minimalni protok za koji će SCADA aplikacija dati upozorenje (slika 13-a). Prikazuje se i trenutna vrednost temperature vode za hlađenje točka 2 centrifuge, status senzora i mogućnost posmatranja i štampanja grafika promene temperature. U polju OP mogu se podesiti dve vrednosti temperature – za upozorenje i alarm (slika 13-b).




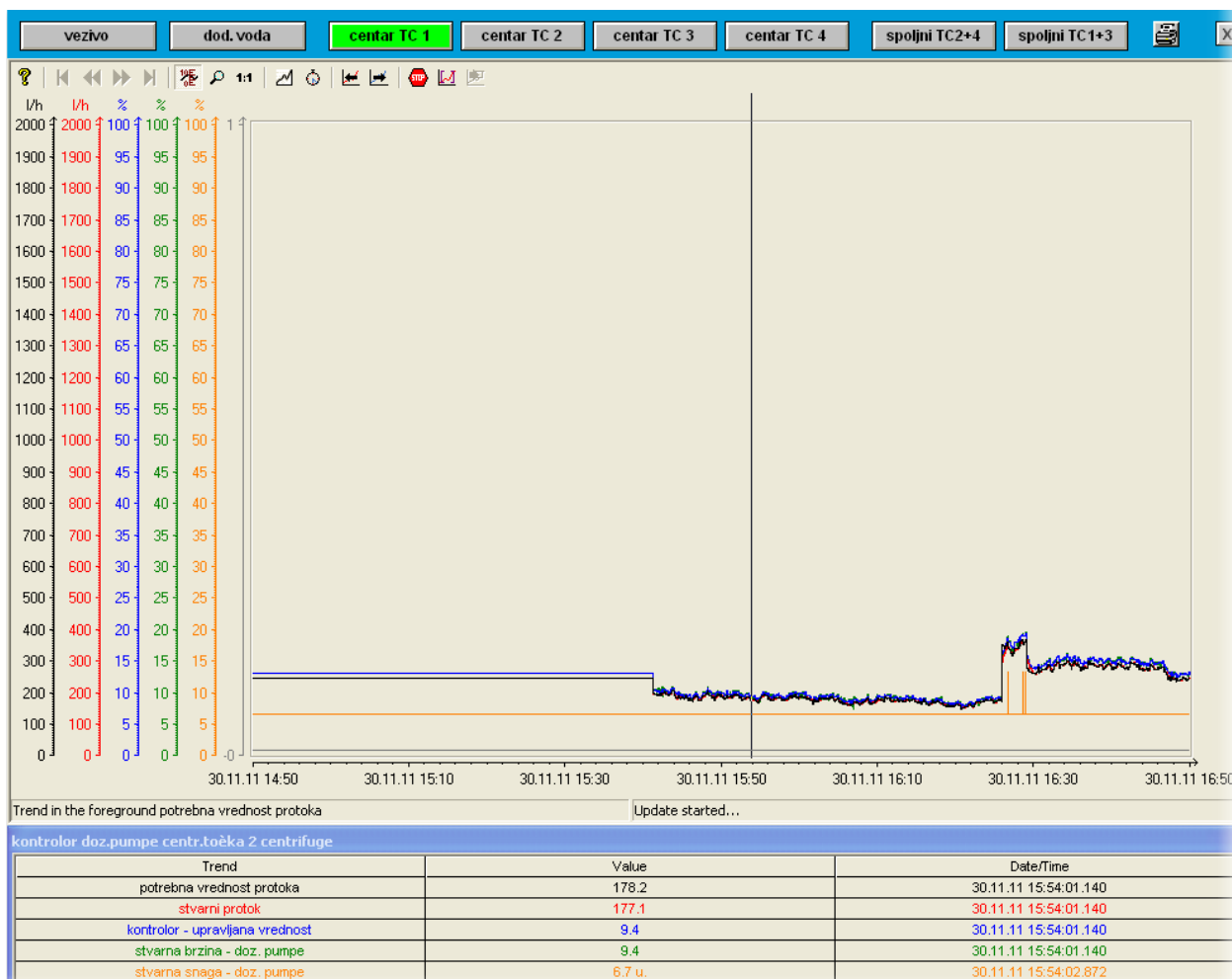
Slika 13. Merenje protoka vazduha (a) i merenje temperature za hlađenje točka 2 centrifuge (b)

Omogućeno je i merenje pritiska u centrifugi u dve merne tačke (tačkovi 1 i 2), prikaz vrednosti i praćenje trenda kretanja pritiska u obe tačke (slika 14). Moguće je podesiti vrednost minimalnog pritiska (za koji SCADA generiše alarm).



Slika 14. Merenje pritiska u centrifugi

Režim rada postrojenja se odvija automatski pomoću PLC kontrolera i pod nadzorom SCADA računara instaliranog u hemijskoj laboratoriji. Za lokalno ručno upravljanje, pregled i zadavanje parametara namenjen je OP. Na ekranima računara i panela daje se uvid u rad centrifuge i kompletan proces pripreme veziva: količine u skladišnim rezervoarima, status elektropneumatskih ventila, statusi motora (pumpi i mešalice), količina veziva u težinskom rezervoaru, doziranje protivprašnog ulja, izabrana receptura. Klikom na ikonicu  koja je na ekranima, dobija se grafički prikaz određene procesne veličine, u ovom slučaju protoka, veziva, brzine i snage određene pumpe (slika 15).



Slika 15. Grafički prikaz vrednosti protoka veziva, brzine i snage pumpe

4.4 Recepture

U automatskom režimu rada sistem dozira komponente veziva po izabranoj recepturi. Pritiskom na taster **K9** pojavljuje se meni Recepture (slika 16-a), a pritiskom na odgovarajući funkcijski

taster (F1–F10), dobija se ekran za pregled odabrane recepture (slika 16-b). Taster F12 omogućava izmenu te recepture. Softver ne dozvoljava promenu recepture čija je realizacija u toku. Kada se unesu količine za recepturu, na ekranima OP i SCADA računara može se videti ukupna količina veziva koja se dobija po toj recepturi.



Slika 16. a) Ekran recepture, b) Pregled recepture broj 1

Ta količina je manja od kapaciteta težinskog rezervoara. Izmena redosleda doziranja se može pokrenuti sa dva ekrana: Recepture i Izbor recepture veziva, pritiskom na funkcijski taster F11 (redosled doziranja). Promena u rasporedu se može izvršiti kada merenje/mešanje nije aktivno. Moguće je uneti do 10 različitih receptura za doziranje (Rec1, rec2, ..., Rec10) i menjati ih preko "Editora receptata", što je prikazano na slici 17.

Redosled doziranja		RECEPTURE										Vaga		
akt.	novi		Rec 1	Rec 2	Rec 3	Rec 4	Rec 5	Rec 6	Rec 7	Rec 8	Rec 9	Rec 10		Minimalni prirast
3	3	Smola	471,0	120,0	30,0	500,0	280,0	128,0	400,0	80,0	205,0	165,0	kg	2,0 kg/s
4	4	Amonijum sulfat	0,0	21,0	31,0	0,0	0,0	6,0	0,0	43,0	36,0	29,0	kg	0,2 kg/s
5	5	Amonijak	0,0	22,0	32,0	0,0	9,0	12,0	10,0	3,0	8,0	7,0	kg	2,0 kg/s
2	2	Silan	9,0	23,0	33,0	0,0	4,0	2,0	4,0	1,0	3,0	2,0	kg	0,2 kg/s
1	1	Sveža voda	1020,0	24,0	34,0	800,0	1096,0	549,0	1100,0	365,0	1096,0	1096,0	kg	2,0 kg/s
6	6	Nano čestice	0,0	25,0	35,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kg	0,2 kg/s
7	7	Tehnicka voda	0,0	26,0	36,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kg	2,0 kg/s
			izmena	izmena	izmena	izmena	izmena	izmena	izmena	izmena	izmena	izmena		

Slika 17. SCADA ekran za izbor receptura

U automatskom režimu rada sistem dozira komponente veziva po izabranoj recepturi. Tokom procesa doziranja nije dozvoljena promena recepture. Unošenjem količina za određenu recepturu, ukupna količina veziva koja se dobija po toj recepturi se prikazuje na dnu ekrana. Ova količina ne može bit veća od kapaciteta težinskog rezervoara. Recept koji je trenutno odabran ne treba menjati dok traje proces mešanja. Ostali recepti se mogu menjati u bilo kom trenutku, bez obzira da li je mešanje u toku. Pritiskom na dugme „Izmena“ omogućena je promena određene recepture.

4.5 Pregled potrošnje komponenata

Slika 18-a) prikazuje zadate vrednosti za trenutnu šaržu i utrošene količine svih odmerenih komponenata za smenu/mesec, koje su sabrane od trenutka poslednjeg reseta. Resetovanje se radi dužim pritiskom na odgovarajuće Reset dugme. Dat je i pregled potrošnje električne energije (slika 18 b).

Priprema veziva 29. 03. 2023. 21:33:17

Potrošnja komponenti za vezivo

	Smena	Mesec		Ukupno	
Smola	48	134	kg	134	t
Sveza voda	0	0	kg	0	t
Amonijak	30	81	kg	81	t
Silan	20	80	kg	80	t
Amonijum sulfat	50	141	kg	141	t
Nano cestice	0	0	kg	0	t
Tehnološka voda	32	86	kg	86	t
Protivprasno ulje	10	50	kg	50	t

Pregled Potrošnja vode RESET Smenske RESET Mesečne nazad

a)

Priprema veziva 29. 03. 2023. 21:33:17

E Potrošnja električne energije OP277 pokrenut Automatski Start

Trenutna snaga: 9,586 kW

Trenutna potrošnja energije: 0,003 kWh

Smenska potrošnja energije: 3,777 kWh

Mesečna potrošnja energije: 3,777 kWh

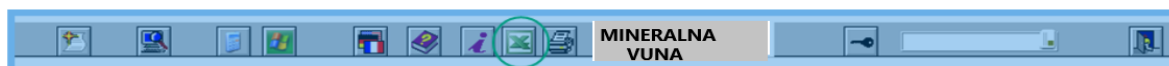
nazad pregled

b)

Slika 18. Pregled smenske/mesečne potrošnje: a) komponenta i b) električne energije

4.6 Prebacivanje podataka u Excel format

U donjem delu ekrana je dodato dugme za prebacivanje odabranih podataka u Excel fajl.



Statistički podaci koje treba smestiti u prethodno pripremljeni excel šablon su prikazani na ekranu (slika 19). Pritiskom na dugme Excel Export ti podaci se smeštaju u fajl, pri čemu će *Excel Export* dugme prebaciti trenutne vrednosti sa ekrana (vrednosti merene od početka tekuće smene) u excel fajl. Smenski i mesečni Excel izveštaji se kreiraju automatski po završetku smene (meseca) i smeštaju u folder *Excel Export*.

Izgled Excel šablona na osnovu kojeg se kreiraju izveštaji prikazan je na slici 19 desno.

Export šablon se može menjati samo u delu opisa podataka i veličina (kolone A i C), dok se kolona B automatski popunjava iz SCADA aplikacije.

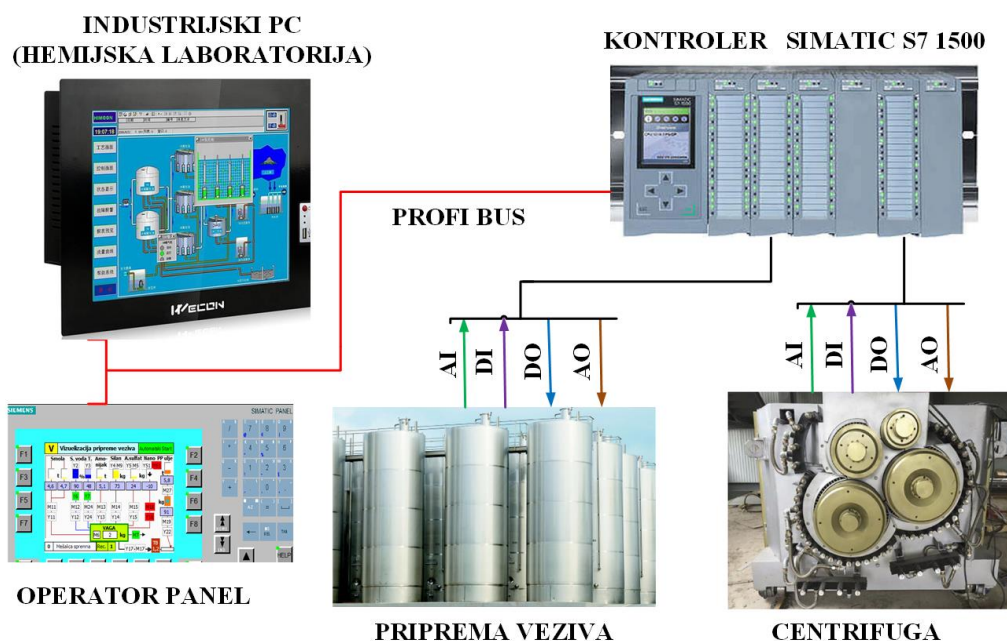
Treba napomenuti da se ne sme menjati redosled i adresa (red i kolona) za podataka u šablonu. Program je podešen da svaki podatak smešta u tačno određenu ćeliju Excel šablona.

	A	B	C	D
1	Izveštaj iz proizvodnje			
2				
3	Godina:			
4	Mesec:			
5	Dan:			
6	Smena:			
7				
8	Vrednost potrošnje silosa / protok kroz merni valjak za smenu			
9	Silosa 1		kg	
10	Silosa 2		kg	
11	Silosa 3		kg	
12	Silosa 4		kg	
13	Silosa 5		kg	
14	Silosa 6		kg	
15	Vagom		kg	
16				
17				
18	Potrošnja nafte - za SMENU			
19	svi gorionici		m3	
20				
21				
22	Brzina protoka veziva i dod. vode - za MESEC			
23	vezivo		m3	
24	dod. voda		m3	
25				
26				
27	Kapacitet proizvodnje - SMENSKI			
28	proizvod		t	
29	proizvod Seelen		t	
30				
31				
32	APPLIC Nafta potrosnja - ZA SMENU			
33	Zone 1		l	
34	Zone 2		l	
35	Zone 3		l	
36	Zone 4		l	
37	Zone 5		l	
38	Ukupno		l	

Slika 19. Prebacivanje podataka u Excel fajl

5 Konfiguracija upravljačko – nadzornog sistema

Osnovu upravljačko–nadzorne konfiguracije, čija je blok šema prikazana na slici 20, čini PLC kontroler SIMATIC S7–1500 u sprezi sa operatorskim panelom OP 277. U reku su pored CPU smešteni digitalni i analogni ulazni i izlazni moduli sa odgovarajućim brojem ulaza i izlaza (DI, DO, AI, AO), koji služe za prihvatanje digitalnih i analognih signala iz procesa (diskretne i kontinualne vrednosti nivoa, protok, brzine motora) i slanje komandi izvršnim organima (ventilima, motorima, frekvencijskim regulatorima).



Slika 20. Konfiguracija upravljačko-nadzornog sistema

Kontroler je povezan sa OP i PC računarom kablovima putem serijske komunikacije RS485–PROFIBUS. Panel SIMATIC OP277/DP služi kao interfejs operater–proces. Na OP je kreiran određen broj tehnoloških slika sa animacijama, koje prikazuju rad centrifuge i stanja procesa pripreme i doziranja veziva. Pokretanje elektromotornih pogona u ručnom režimu vrši se preko funkcijskih tastera OP. Alarmi s tekstualnim opisom i atributima nastanka, kao i potvrde alarma se hronološki prikazuju na PC računaru i OP [1]. Za svetlosnu i zvučnu signalizaciju alarma i stanja pogona (start postrojenja, statusi graničnih vrednosti i sl.) postavljene su signalne svetiljke i sirena na upravljačkom ormaru. Havarijsko isključenje (stop u nuždi) izaziva zaustavljanje procesa hardverski, nezavisno od računarskog sistema.

6 Zaključak

U radu je prikazan upravljačko – nadzorni sistem centrifuge i procesa pripreme i doziranja veziva u pogonu za proizvodnju mineralne vune. Procedura se odvija na osnovu receptura propisanim od strane tehnologa. Operater vrši izbor recepata i aktiviranje procesa. Intuitivni grafički ekrani, kreirani na operatorskom panelu i SCADA računaru, na kojima su predstavljeni simboli pojedinih elemenata postrojenja i njihovi karakteristični parametri, omogućavaju kontinualno praćenje procesa. Zadavanje i nadgledanje parametara procesa vrši se sa SCADA računara u hemijskoj laboratoriji ili lokalno na operatorskom panelu. Doziranje i priprema komponenata, nivoi u rezervoarima, mešanje i doziranje samog veziva dodatno se nadziru video kamerama sa kojih se slike prenose na ekran u laboratoriji gde su dostupni tehnologu. Upravljački sistem prati korektno funkcionisanje svih elemenata postrojenja i zaustavlja rad u slučaju kvara ili nastanka situacije koja bi izazvala oštećenje opreme, pri čemu se blokira rad izvršnih organa i pokretnih mehanizama. Omogućeno je zapisivanje bitnih podataka o radu centrifuge i procesu pripreme i doziranja veziva: korišćene recepture u smeni, količinu doziranih komponenata, količinu pripremljenog i utrošenog veziva, utrošena električna energija i dr. Sistem prati promene digitalnih signala i analognih signala (u zadatom

opsegu uz detektovanje donje i gornje granice). Registruju se alarmne situacije, pri čemu se na ekranu pojavljuje tekstualna poruka koja se automatski unosi u bazu podataka, što omogućava generisanje izveštaja o pojavi alarma u određenom vremenskom intervalu. Uz tekst poruke javlja se i zvučni signal kao upozorenje operateru o nastanku alarma. Osim prikupljanja i čuvanja relevantnih podataka vezanih za proces, SCADA sistem generiše smenske i periodične izveštaje na osnovu kojih se može vršiti analiza svih parametara procesa pripreme veziva i rada centrifuge, što predstavlja doprinos garanciji kvaliteta proizvoda. Ovo daje mogućnost detaljnog praćenja pojedinih kritičnih elemenata instalirane opreme (npr. kod elektromotornih pogona broj uključanja/isključanja, broj sati rada, broj otkaza i dr.) na osnovu kojih se mogu praviti planovi preventivnog održavanja i smanjiti broj otkaza, zastoja u proizvodnji i troškova održavanja sistema.

7 Reference

- [1] **Stankov, P. S.**, Savremen način upravljanja procesom proizvodnje mineralne vune, časopis *Hemijska industrija*, Vol. 67, broj 2, Beograd, 2013., str. 375–384.
- [2] **Stankov, P. S.**, Monitoring and Control System of Cupola Furnace at Plant for Mineral Wool Production, journal *Mining engineering*, vol. 5, No 3, 2012, Publisher: Mining and metallurgy institute Bor, pp. 245 – 254.
- [3] **Stankov, P. S.**, *Sistemi upravljanja i nadzora rekonstruisanog dela pogona za proizvodnju mineralne vune, koji omogućava proizvodnju dvoslojnog asortimana*, V Međunarodni kongres *Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, 15 - 17 mart 2017., Knjiga radova, Izdavač: Univerzitet u Istočnom Sarajevu, str. 1704 – 1713.
- [4] **Stankov, P. S., Arsić, P. S., Ičić, D. Z., N. B. Danković**, *Automatizacija postrojenja za skladištenje i pretakanje metanola u pogonu za proizvodnju biodizela*, Trideseti međunarodni kongres o procesnoj industriji PROCESING 17, Zbornik radova, Izdavač: SMEITS, Beograd, jun 2017., str. 93 – 99.
- [5] **Berger, H.**, *Automating with Simatic S7 1500, Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional*, by Publicis Erlangen, 2014.
- [6] SIMATIC HMI device, TP 277, OP 277 Operating Instructions; 09. 2007.
- [7] **Weigmann, J., G. Kilian**, *Decentralization with profibus DP/DPVI*, 2nd revised and enlarged edition, 2003.
- [8] *Siemens Simatic HMI “WinCC flexible 2008 Compact/Standard/Advanced, User’s Manual“*, Edition 07/2008.

SISTEM NADZORA I UPRAVLJANJA ASFALTNOM BAZOM

SYSTEM OF SUPERVISION AND CONTROL OF THE ASPHALT PRODUCTION PROCESS

Stanko P. STANKOV*,

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš

U radu je opisan upravljačko-nadzorni sistem postrojenja za proizvodnju asfalta. U sastavu asfaltnog postrojenja postoji veći broj tehničkih celina: priprema agregata (kamena sitnež odgovarajuće veličine) s transportom do sušare; sušenje agregata i njegov transport do sita; otprašivanja agregata; prosejavanje, vaganje i mešanje; doziranje punila i drugih dodataka; skladištenje bitumena; skladištenje goriva za zagrevanje komponenti asfaltne mase; skladištenje asfalta. Sistem vrši merenje i dinamičko prikazivanje vrednosti parametara i procesnih veličina (nivoi i temperature materijala u rezervoarima bitumena, nivoi u silosu za skladištenje kamenog brašna; parametri elektromotora pumpi za punjene rezervoara i transport bitumena; parametri elektromotornih pogona: rotirajućeg bubnja u kome se vrši zagrevanje kamenog agregata pomoću gorionika, elevatora, transportnih traka, mešalice agregata, kamenog brašna i bitumena, pužnih prenosa i ventilatora; statusi vibracionih elemenata za doziranje; elektropneumatskih on/off i regulacionih ventila, kompresorskog postrojenja). Kod određenog broja elektromotornih pogona postrojenja primenjena je frekvencijska regulacija, čime je povećana efikasnost pogona i omogućen optimalan rad i ušteda energije. Zadavanje i pregled relevantnih veličina i parametara pojedinih tehničkih celina vrši se na operatorskim panelima spregnutih sa upravljačkim jedinicama, koje su protokolom komunikacije povezane s centralnim sistemom nadzora i upravljanja. Posle odgovarajuće obrade informacije se prezentuju operateru u vidu procesnih promenljivih koje su funkcije vremena (trendovi), ili u obliku tabela određene strukture.

Predloženi upravljačko - nadzorno sistem omogućava:

- *periodično očitavanje karakterističnih veličina i radnih sati uređaja i opreme,*
- *arhiviranje promena na svim digitalnim i analognim ulazima i izlazima upravljačkih jedinica,*
- *dugoročno arhiviranje svih akcija operatera,*
- *zadavanje fleksibilnih radnih grafika.*

Vizuelizacija objekata upravljanja s grafičkim i tabelarnim prikazom relevantnih veličina i parametara, od velikog je značaja i za sektor održavanja. Na ekranu SCADA sistema, kroz desetine intuitivnih ekrana ima se uvid u funkcionalnost asfaltne baze, a pojava alarmnih signala omogućava bržu lokalizaciju kvarova, čime se znatno povećava efikasnost održavanja. Omogućena je svetlosna i zvučna signalizacija dostizanja kritičnih vrednosti (alarma), pri čemu se odvijaju odgovarajuće aktivnosti upravljačke logike.

Ključne reči: *asfaltna baza, upravljanje, nadzor, SCADA, procesne veličine*

The paper describes the control and supervision system of the asphalt production plant. As part of the asphalt plant, there are a number of technical units: preparation of aggregates (fine stone of the appropriate size) with transport to the dryer; drying of the aggregate and its transport to the sieve; dedusting of aggregates; sifting, weighing and mixing; dosing of fillers and other additives; storage of bitumen; storage of fuel for heating components of asphalt mass; asphalt storage. The system measures and dynamically displays the values of parameters and process quantities (levels and temperatures of materials in bitumen tanks, levels in silos for storage of stone flour; parameters of electric motors of pumps for filling tanks and transporting bitumen; parameters of electric motors: rotating drum in which heating of stone flour is carried out of aggregates using

* Corresponding author, e-mail: stanko.stankov@elfak.ni.ac.rs

burners, elevators, conveyor belts, mixers of aggregates, stone flour and bitumen, screw transmissions and fans; statuses of vibration elements for dosing; electropneumatic on/off and control valves, compressor plant). For a certain number of electric motor drives of the plant, frequency regulation was applied, which increased the efficiency of the drive and enabled optimal operation and energy saving. Assignment and review of relevant sizes and parameters of individual technical units is performed on operator panels coupled with control units, which are connected to the central monitoring and control system by means of a communication protocol. After appropriate processing, the information is presented to the operator in the form of process variables that are functions of time (trends), or in the form of tables of a certain structure. The proposed control and supervision system enables:

- periodic reading of characteristic variables and operating hours of devices and equipment,*
- archiving of changes on all digital and analog inputs and outputs of control units,*
- long-term archiving of all operator actions,*
- assignment of flexible work schedules.*

Visualization of control objects with graphical and tabular display of relevant variables and parameters is of great importance for the maintenance sector as well. On the screen of the SCADA system, through dozens of intuitive screens, you can see the functionality of the asphalt base, and the appearance of alarm signals enables faster localization of faults, which significantly increases the efficiency of maintenance. Light and sound signaling of reaching critical values (alarms) is enabled, during which corresponding activities of the control logic take place.

Key words: *asphalt base, control, monitoring, SCADA, process variables*

PRORAČUN POTROŠNJE PRIRODNOG GASA KAO GORIVA ZA PROCES PEČENJA OPEKARSKIH PROIZVODA U INDUSTRIJSKOJ TUNELSKOJ PEĆI

CALCULATION OF THE CONSUMPTION OF NATURAL GAS AS A FUEL FOR THE BAKING PROCESS OF BRICK PRODUCTS IN AN INDUSTRIAL TUNNEL FURNACE

Duško SALEMOVIĆ¹, Matilda LAZIĆ¹, Aleksandar DEDIĆ^{*2}, Dragan HALAS¹

¹ Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin,

² Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet, Beograd

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.237>

U radu je izvršen proračun potrošnje prirodnog gasa kao goriva za proces pečenja opekarskih proizvoda u gorioniku industrijske tunelske peći koja komercijalno radi u preduzeću iz domaće opekarske industrije. Prirodni gas predeterminisanog sastava, koristi se kao gorivo za rad gorionika tunelske peći odnosno, za proizvodnju toplote za zagrevanje i pečenje opekarskih proizvoda. Sagorevanje prirodnog gasa izvodi se u gorioniku tunelske peći. Parametri procesa sagorevanja značajno utiču na radne uslove tunelske peći i predeterminišu kvalitet proizvoda pečenja. Izračunat je sastav produkata sagorevanja prirodnog gasa sa vazduhom; kao i minimalno potrebna zapremina vazduha za potpuno sagorevanje goriva u smislu osnovnih radnih parametara tunelske peći. Stvarna temperatura vazduha na ulazu u gorionik za sagorevanje prirodnog gasa (u tunelskoj peći) izračunata je na osnovu toplotnog bilansa procesa sagorevanja u gorioniku. Kao neophodne ulazne promenljive za proračun izveden u ovom radu, korišćeni su projektni podaci za posmatranu tunelsku peć i odgovarajuće fizičke veličine na posmatranim radnim uslovima te tunelske peći. Iz jednačine opšteg toplotnog bilansa zagrevanja i pečenja opekarskih proizvoda, postavljene za tunelsku peć, izračunat je zapreminski protok prirodnog gasa kroz gorionik. Za izračunavanja su korišćene odgovarajuće fizičke veličine koje karakterišu proces sagorevanja. Dobijena vrednost utroška prirodnog gasa po jedinici mase ispečene opeke može se koristiti kao osnova za određivanje kvaliteta samog tehnološkog postupka, tehno-ekonomsku analizu procesa pečenja opekarskih proizvoda u postojećoj tunelskoj peći, kao i za optimizaciju rada tunelske peći koja je u procesu eksploatacije.

Ključne reči: sagorevanje; potrošnja prirodnog gasa; gorivo za gorionik; tunelska peć; opekarski proizvodi

In this paper, the consumption of natural gas as a fuel for the process of baking of brick products in the burner of an industrial tunnel furnace, which commercial works in domestic company of the brick industry, was calculated. Natural gas with a predetermined composition is used as fuel for the operation of the tunnel furnace burner, that is, for the production of heat for heating and baking brick products. Natural gas is burned in the tunnel kiln burner. The parameters of the combustion process significantly influence the working conditions of the tunnel furnace and predetermine the quality of the brick products. The composition of the combustion products of natural gas with air was calculated; as well as the minimum required volume of air for complete fuel combustion in terms of the basic operating parameters of the tunnel furnace. Actual air temperatures at the entrance to the burner for natural gas combustion (in the tunnel furnace) were calculated based on the heat balance of the combustion process in the burner. As necessary, input variables for the calculation performed in this paper, the design data for the observed tunnel furnace and the corresponding physical sizes on the observed operating conditions of that tunnel furnace were used. The volume flow of natural gas through the burner was calculated from the equation of the general heat

* Corresponding author, e-mail: aleksandar.dedic@sfb.bg.ac.rs

balance of heating and firing of brick products, set for the tunnel kiln. For the calculations, the corresponding physical sizes of the participants in the combustion process were used. The obtained value of natural gas consumption per unit mass of baked brick can be used as a basis for: quality determination of the industry process, the techno-economic analysis of the process of baking brick products in the existing tunnel kiln and at the same way to optimize the operation of the tunnel furnace.

Key words: *combustion; consumption of natural gas; fuel for the burner; tunnel furnace; brick products*

1 Uvod

Pečenje oblikovanih opeka od prirodne gline predstavlja važan tehnološki proces u industriji opekarskih proizvoda jer se kvalitativne osobine krajnjih proizvoda formiraju na visokim temperaturama [1]. Proizvod zadovoljavajućih primenskih (tehnoloških) svojstava ne može se dobiti samo izborom odgovarajuće sirovine. Od ključnog značaja je pravilno vođenje procesa proizvodnje u svim njegovim fazama, od pripreme sirovina i oblikovanja, do sušenja i pečenja oblikovanih gline-nih proizvoda. Savremeni trend proizvodnje opekarskih proizvoda zahteva: primenu ekoloških propisa, postizanje željenih tehnoloških svojstava, ali i postizanje optimuma potrošnje energije po jedinici proizvoda.

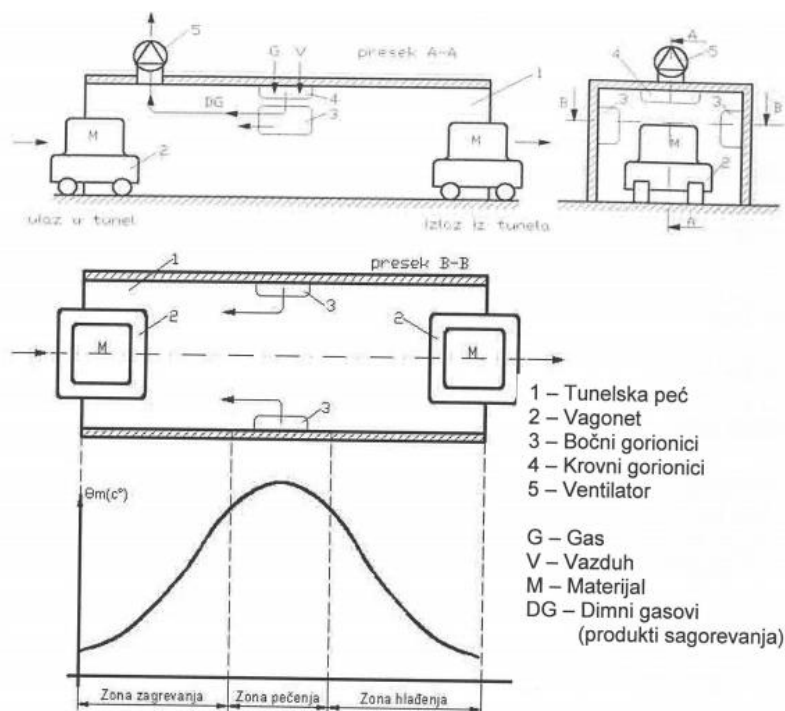
Pečenje opeke komercijalno se najčešće izvodi u tunelskoj peći [2], zahvaljujući toplotnoj energiji koja se dobija sagorevanjem prirodnog gasa, kao goriva, u gorionicima peći. Optimizacijom potrošnje prirodnog gasa za sagorevanje u gorionicima postiže se zahtevani temperaturni režim pečenja opeke prvenstveno u zoni pečenja tunelske peći, i konsekvantno, specificirani kvalitet proizvoda. Poznavanje utroška prirodnog gasa za sagorevanje predstavlja jedan od ključnih parametara održavanja i kontrole režima rada tunelske peći.

U radu je izvršen proračun potrošnje prirodnog gasa kao goriva za proces pečenja opekarskih proizvoda u gorioniku industrijske tunelske peći, koja komercijalno radi u preduzeću iz domaće opekarske industrije. Prirodni gas predeterminisanog sastava, koristi se kao gorivo za rad gorionika tunelske peći, odnosno za proizvodnju toplote za zagrevanje i pečenje opekarskih proizvoda. Parametri procesa sagorevanja prirodnog gasa značajno utiču na radne uslove tunelske peći i predeterminišu kvalitet proizvoda pečenja [1,2]. U radu je takođe, izračunat sastav produkata sagorevanja prirodnog gasa sa vazduhom; kao i minimalno potrebna zapremina vazduha za potpuno sagorevanje goriva u smislu osnovnih radnih parametara tunelske peći. Stvarna temperatura vazduha na ulazu u gorionik za sagorevanje prirodnog gasa (u tunelskoj peći) izračunata je na osnovu toplotnog bilansa procesa sagorevanja u gorioniku. Kao neophodne ulazne promenljive za proračun izveden u ovom radu, korišćeni su projektni podaci za posmatranu tunelsku peć [3] i odgovarajuće fizičke veličine na posmatranim radnim uslovima te tunelske peći [3]. Iz jednačine opšteg toplotnog bilansa zagrevanja i pečenja opekarskih proizvoda, postavljene za tunelsku peć, izračunat je zapreminski protok prirodnog gasa kroz gorionik za sagorevanje prirodnog gasa u stvarnim uslovima rada posmatrane tunelske peći.

2 Opis rada tunelske peći za pečenje opekarskih proizvoda i gorionika industrijske tunelske peći, koja komercijalno radi u preduzeću iz domaće opekarske industrije

Tunelska peć je procesni uređaj sa kontinualnim radom, u kojem se opeka kreće kroz kanal peći u suprotnom smeru od kretanja plamenih gasova kao prenosioca toplote [2,3]. Proizvodi za pečenje stavljaju se na vagonete koji se, poput kompozicije voza po šinama, polako pomeraju kroz kanal peći. U određenim vremenskim periodima, pred ulazna vrata peći se dogura po jedan vagonet sa proizvodima, vrata se otvore, vagonet se ugura i vrata zatvore. Ceo red se time pomera za jedan vagonet napred kroz kanal [2,3]. Na taj način se nova kola sa proizvodima pomeraju stalno, sve dalje kroz kanal, pri čemu im iz zone pečenja dolaze u susret plameni gasovi. Ponovo se odigrava proces razmene toplote, u kojem se gasovi hlade a opeka zagreva; dok najzad ne dospe u zonu pe-

čenja gde se održava potrebna temperatura uz pomoć plamenih gasova (produkata sagorevanja prirodnog gasa u gorioniku). Tunelska peć ima tri tehnološke zone: zagrevanja, pečenja i hlađenja opeke [2,3]. U središtu tunela peći nalaze se ugrađena dva bočna i jedan tavanički gorionik za sagorevanje smeše prirodnog gasa i vazduha. Šematski prikaz posmatrane, industrijske tunelske peći, koja komercijalno radi u preduzeću iz domaće opekarske industrije dat je na slici 1 [3].



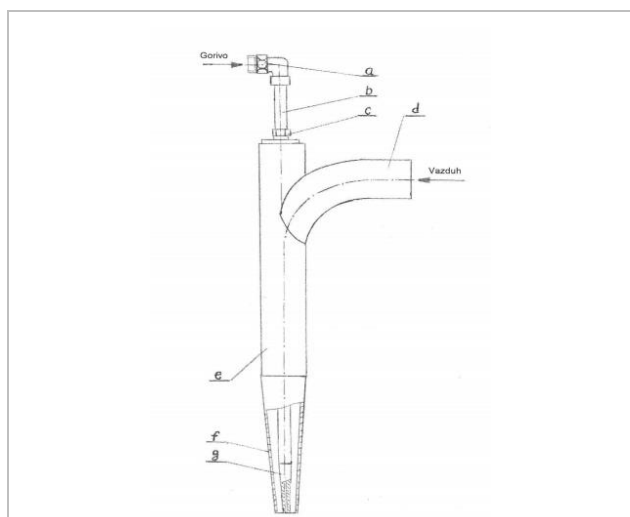
Slika 1. Šematski prikaz posmatrane, industrijske tunelske peći. Legenda: 1-tunelska peć; 2-vagoneti; 3-bočni gorionici; 4-krovni gorionici; 5-ventilator; G-prirodni gas; V-vazduh; M-materijal; DG-dimni gasovi (produkti sagorevanja)

Optimalan temperaturni režim rada posmatrane, industrijske tunelske peći po zonama, predstavlja osnov racionalnosti njenog rada. Temperaturni režim se u zoni zagrevanja i pečenja opeke uspostavlja i održava zahvaljujući plamenim gasovima, koji nastaju kao produkti sagorevanja prirodnog gasa u gorioniku. Produkti sagorevanja su prenosioci toplote, koji istu predaju materijalu a sami se hlade tokom procesa razmene toplote u tunelskoj peći [1,2]. Temperature, koje se mere i odžavaju u vidu režima, ne predstavljaju temperaturu opeke već temperature vazduha oko opeke. Od optimalnosti procesa sagorevanja prirodnog gasa u ugrađenim gorionicima (i njihove konstrukcije) zavisi mogućnost postizanja i održavanja optimalnog temperaturnog režima u zoni pečenja i postizanje zahtevanog kvaliteta pečenja opeke u posmatranoj, industrijskoj tunelskoj peći [2,3].

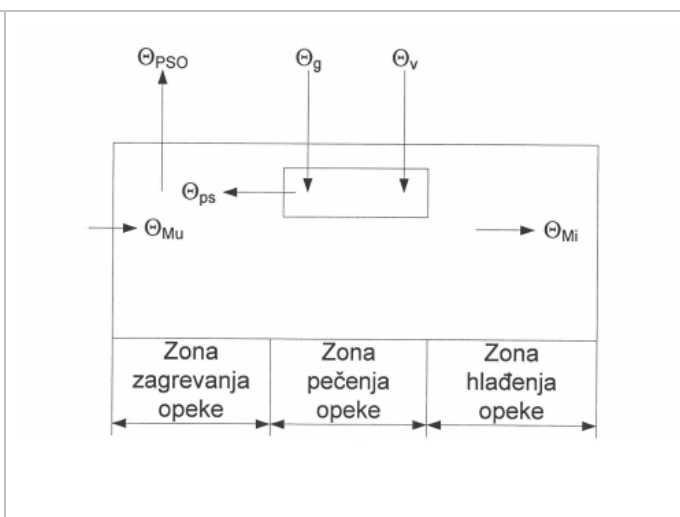
Konstrukcija ugrađenog gorionika u ložište posmatrane industrijske tunelske peći, data je na slici 2 [3].

3 Proračun utroška prirodnog gasa za sagorevanje prirodnog gasa u gorioniku posmatrane, industrijske tunelske peći, koja komercijalno radi u preduzeću iz domaće opekarske industrije

U ovom poglavlju rada će biti izvršen proračun utroška prirodnog gasa, kao goriva, koje sagoreva u gorionicima posmatrane industrijske tunelske peći, u cilju proizvodnje toplote za tehnološki proces pečenja opeke u preduzeću koje komercijalno posluje u delatnosti opekarske industrije. Ulazne promenljive za predmetni proračun su projektni podaci [3]. Nepoznate, fizičke i termodinamičke veličine neophodne za rešavanje zadataka rada a koje karakterišu proces pečenja opeke u posmatranoj industrijskoj tunelskoj peći (zahvaljujući toploti, koju oslobađaju produkti sagorevanja prirodnog gasa u gorioniku) izračunate su primenom odgovarajuće literature [3,4]. Sve veličine koje opisuju proces pečenja opeke u posmatranoj, industrijskoj tunelskoj peći, predstavljene su na slici 3.



Slika 2. Konstrukcija gorionika za sagorevanje prirodnog gasa ugrađenog u posmatranu, industrijsku tunelsku peć. Legenda: a-priključni element za gorivo; b-protočna cev; c-stezni element; d-priključni deo za vazduh; e-telo gorionika; f-konusni deo gorionika; g-dizna



Slika 3. Prikaz procesa pečenja opeke u posmatranoj, industrijskoj tunelskoj peći po zonama. Legenda: θ_g - ulazna temperatura prirodnog gasa u gorionik, [°C]; θ_v - ulazna temperatura vazduha u gorionik, [°C]; θ_{ps} - temperatura produkata sagorevanja na izlazu iz gorionika [°C]; θ_{MU} - temperatura materijala-opeke na ulazu u peć, [°C]; θ_{MI} - temperatura materijala-opeke na izlazu iz peći, [°C]; θ_{ps0} - temperatura produkata sagorevanja na izlazu iz peći [°C]

Zapreminski sastav tzv. suvog prirodnog gasa, kao gasovitog goriva, predstavljen je zbirom zapreminskih udela najzastupljenijih komponentata, po jednačini (1), literatura [4], koja glasi:

$$N_2 + CO_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} = 100\% \quad (1)$$

Na osnovu projektnih podataka o prosečnom sastavu prirodnog gasa namenjenom za distributivnu mrežu [3], izračunata je minimalna zapremina vazduha (V_{min}^*) potrebna za potpuno sagorevanje prirodnog gasa (predeterminisanog sastava) u posmatranoj industrijskoj tunelskoj peći, prema jednačini (2), [4]:

$$V_{min}^* = \frac{1}{21} \left[0,5 \cdot (H_2 + CO) + 1,5 \cdot H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2 \right] \quad (2)$$

gde su:

m - broj C atoma u ugljovodoničnim komponentama prirodnog gasa,

n - broj H atoma u ugljovodoničnim komponentama prirodnog gasa.

U produktima sagorevanja suvog prirodnog gasa, nalaze se: CO_2 , H_2O , N_2 , a ne nalazi se SO_2 jer se sumporna jedinjenja ne nalaze u polaznom sastavu prirodnog gasa [5].

Zapremine pojedinačnih produkata sagorevanja suvog prirodnog gasa predeterminisanog sastava [3], izračunate su u jednačinama (3÷5), prema [3,4], na sledeći način:

$$V_{CO_2}^* = \frac{1}{100} \cdot [CO + CO_2 + \sum m \cdot C_m H_n]; \quad (3)$$

$$V_{H_2O}^* = \frac{1}{100} \cdot \left[H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + W \right]; \quad (4)$$

$$V_{N_2}^* = \frac{1}{100} \cdot N_2 + 0,79 \cdot V_{min}^*; \quad (5)$$

U narednom koraku proračuna, izračunata je teorijska, ukupna zapremina produkata sagorevanja (V_{PS}^*), preko jednačine (6):

$$V_{PS}^* = V_{CO_2}^* + V_{H_2O}^* + V_{N_2}^*; \quad (6)$$

Na osnovu projektnih podataka posmatrane, industrijske tunelske peći [3], temperatura produkata sagorevanja - θ_{PS} prirodnog gasa u središtu peći (zona pečenja opeke) iznosi 1200 [°C].

Specifični toplotni kapaciteti (pri p=const.) pojedinačnih produkata sagorevanja prirodnog gasa u gorioniku posmatrane industrijske tunelske peći, na temperaturi $\theta_{PS} = 1200$ [°C] i iznose:

$$c_{pCO_2}^* = 2273,7 \text{ [J/m}^3\text{K]};$$

$$c_{pH_2O}^* = 1775,9 \text{ [J/m}^3\text{K]};$$

$$c_{pN_2}^* = 1416,1 \text{ [J/m}^3\text{K]}.$$

Navedeni podaci o specifičnim toplotnim kapacitetima su iskorišćeni kao ulazne promenljive za dalji tok proračuna specifičnog toplotnog kapaciteta produkata sagorevanja.

Specifični toplotni kapacitet (pri p=const.) produkata sagorevanja prirodnog gasa (c_{pPS}^*) izračunat je preko jednačine (7):

$$c_{pPS}^* = \frac{V_{CO_2}^*}{V_{PS}^*} \cdot c_{pCO_2}^* + \frac{V_{SO_2}^*}{V_{PS}^*} \cdot c_{pSO_2}^* + \frac{V_{H_2O}^*}{V_{PS}^*} \cdot c_{pH_2O}^* + \frac{V_{N_2}^*}{V_{PS}^*} \cdot c_{pN_2}^* \quad (7)$$

U narednom koraku predmetnog proračuna, iz toplotnog bilansa tunelske peći (jednačina (8)), biće izračunata stvarna temperatura vazduha pre početka sagorevanja u gorioniku posmatrane tunelske peći - θ_{vstv} (jednačina (9)) i to, korišćenjem pretpostavke iz literature [3], da temperatura prirodnog gasa pre početka sagorevanja iznosi $\theta_g \approx 0$ [°C].

Jednačina toplotnog bilansa procesa sagorevanja prirodnog gasa u posmatranoj industrijskoj tunelskoj peći data je jednačinom (8):

$$H_d^* + c_{pg}^* \cdot \theta_g + V_{min}^* \cdot c_{pv}^* \theta_{vstv} = V_{PS}^* \cdot c_{pPS}^* \cdot \theta_{PS}, \quad (8)$$

gde su:

H_d^* – prosečna donja toplotna moć prirodnog gasa [3], $H_d^* = 18500000$ [J/m³];

c_{pg}^* – specifični toplotni kapacitet (p=const.) prirodnog gasa, [J/m³K];

θ_g – pretpostavljena vrednost temperature prirodnog gasa na ulazu u gorionik za sagorevanje [3], $\theta_g \approx 0$ [°C];

V_{min}^* – minimalna zapremina vazduha potrebna za sagorevanje, $V_{min}^* = 9,48620$ [m³/m³ gasa];

θ_v – pretpostavljena vrednost temperature vazduha na ulazu u gorionik [3] za sagorevanje, $\theta_v \approx 100$ [°C];

c_{pv}^* – specifični toplotni kapacitet (pri p=const.) vazduha za pretpostavljenu vrednost $\theta_v \approx 100$ [°C] koji iznosi, $c_{pv}^* = 1301,8$ [J/m³K];

V_{PS}^* – ukupna zapremina produkata sagorevanja prirodnog gasa, $V_{PS}^* = 10,49338$ [m³/m³];

c_{pPS}^* – specifični toplotni kapacitet (pri p=const.) produkata sagorevanja prirodnog gasa [3,4], $c_{pPS}^* = 1566,604$ [J/m³K];

θ_{PS} – temperatura produkata sagorevanja prirodnog gasa u središtu peći [3], $\theta_{PS} = 1200$ [°C];

Uvrštavanjem navedenih podataka u jednačinu (8) i izražavanjem nepoznate vrednosti, izračunata je stvarna vrednost potrebne temperature vazduha na ulazu u gorionik za sagorevanje - θ_{vstv} , primenom jednačine (9):

$$\theta_{vstv} = \frac{V_{PS}^* \cdot c_{pPS}^* \cdot \theta_{PS} - H_d^*}{V_{min}^* \cdot c_{pv}} \quad (9)$$

Upoređivanjem dobijene stvarne vrednosti temperature vazduha na ulazu u gorionik - θ_{vstv} za sagorevanje prirodnog gasa koji je ugrađen u ložište posmatrane, industrijske tunelske peći, sa pretpostavljenom vrednošću - θ_v , može se smatrati da je u ovom radu dobijeno veoma dobro slaganje između posmatranih veličina, što ukazuje na ispravnost pretpostavke, odnosno izvedenog proračuna.

U narednom koraku predmetnog proračuna, iz jednačine toplotnog bilansa zagrevanja i pečenja opeke u tunelskoj peći (jednačina (10)), izračunat je zapreminski protok prirodnog gasa prilikom sagorevanja u gorioniku (\dot{V}_g):

$$\dot{V}_g \cdot V_{PS}^* \cdot c_{pPS}^* \cdot (\theta_{PS} - \theta_{PS0}) = \dot{m}_M \cdot c_{vM} \cdot (\theta_{MI} - \theta_{MU}), \quad (10)$$

gde su:

- \dot{V}_g - – zapreminski protok prirodnog gasa prilikom sagorevanja u gorioniku, [m³/s];
- V_{PS}^* - – ukupna zapremina produkata sagorevanja prirodnog gasa u gorioniku,
 $V_{PS}^* = 10,4934$ [m³/m³];
- c_{pPS}^* - – specifični toplotni kapacitet (pri p=const.) produkata sagorevanja prirodnog gasa,
 $c_{pPS}^* = 1566,604$ [J/m³K];
- θ_{PS} - – temperatura produkata sagorevanja prirodnog gasa u središtu peći [3], $\theta_{PS} = 1200$ [°C];
- θ_{PS0} - – temperatura produkata sagorevanja prirodnog gasa, koji napuštaju tunelsku peć [3],
 $\theta_{PS0} = 100$ [°C];
- \dot{m}_M - – maseni protok opeke tokom procesa pečenja u tunelskoj peći [3], $\dot{m}_M = 3$ [kg/s];
- c_{vM} - – specifični toplotni kapacitet (pri v=const.) opeke [3], $c_{vM} = 840,00$ [J/kgK];
- θ_{MI} - – temperatura opeke na izlazu iz zone pečenja tunelske peći [3], $\theta_{MI} = 920$ [°C];
- θ_{MU} - – temperatura opeke na ulazu u tunelsku peć [3], $\theta_{MU} = 20$ [°C].

Pošto su definisane vrednosti svih veličina, iz jednačine (10), izračunata je vrednost \dot{V}_g prema jednačini (11):

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{m}_M \cdot c_{vM} \cdot (\theta_{MI} - \theta_{MU})}{V_{PS}^* \cdot c_{pPS}^* \cdot (\theta_{PS} - \theta_{PS0})} \quad (11)$$

Na osnovu izračunate vrednosti \dot{V}_g (jednačina (11)), u poslednjem segmentu predmetnog proračuna, izračunat je utrošak prirodnog gasa po jedinici mase opeke - k , koji prema jednačini (12) iznosi:

$$k = \frac{\dot{V}_g}{\dot{m}_M} \quad (12)$$

Vrednosti dobijenih fizičkih veličina i parametara iz proračuna tabelarno su prikazane u tabeli 1. Na ovaj način su pregledno date sve vrednosti karakterističnih fizičkih veličina i parametara, međurezultata i konačnih rezultata, neophodnih za proračun.

Tabela 1. Vrednosti fizičkih veličina iz proračuna

Oznaka fizičke veličine	Jednačina preko koje je računata	Merna jedinica	Vrednost
V_{\min}^*	(2)	m^3/m^3	9,48620
$V_{CO_2}^*$	(3)	m^3/m^3	1,01035
$V_{H_2O}^*$	(4)	m^3/m^3	1,98116
$V_{N_2}^*$	(5)	m^3/m^3	7,50187
V_{PS}^*	(6)	m^3/m^3	10,49338
c_{pPS}^*	(7)	$\text{J}/\text{m}^3\text{K}$	1566,604
θ_{vstv}	(9)	$^{\circ}\text{C}$	99,34
\dot{V}_g	(11)	m^3/h	451,523
k	(12)	m^3/h	0,04181

4 Zaključak

Na osnovu izvršenog proračuna parametara procesa sagorevanja prirodnog gasa u prisustvu vazduha u gorioniku posmatrane industrijske tunelske peći i opštih bilansnih jednačina, izračunata je, kao kranji rezultat, vrednost zapreminskog protoka prirodnog gasa kroz gorionik tokom sagorevanja. Dobijeni rezultati proračuna predstavljaju ključne parametre obezbeđivanja zahtevanog temperaturnog režima tunelske peći u zoni zagrevanja i pečenja opeke. Izračunata vrednost zapreminskog protoka prirodnog gasa kroz gorionik tunelske peći, tokom procesa sagorevanja goriva, kao i utroška prirodnog gasa kao goriva po jedinici mase opeke služe za: praćenje potrošnje prirodnog gasa kao energenta na dnevnom nivou, za optimizaciju rada gorionika, za tehno-ekonomsku analizu procesa rada komercijalne tunelske peći, praćenje i modelovanje temperaturnog režima rada komercijalne peći u zoni zagrevanja i pečenja opeke, analizu krive pečenja, ali i za razmatranje učesća cene potrošnje prirodnog gasa u ukupnoj ceni proizvoda.

5 Reference

- [1] Ranogajec, J., Živanović, B., Kasaš, K., Vasić, R., *Opekarski proizvodi sirovine, tehnologija, svojstva*, IMS, Beograd, Jugoslavija, 1998.
- [2] Koldžić, E., Duraković, J., Jovanović, M., Mujkanović, A., *Opeka od sirovine do gotovog proizvoda*, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i metale, Zenica, Bosna i Hercegovina, 2010.
- [3] Živanović, B., *Proces pečenja opekarskih proizvoda u AD "FIT", Bečej*, Diplomski rad, Viša tehnička škola, Zrenjanin, Republika Srbija, 2007.
- [4] Salemović, D., Jašin, D., *Priručnik za procesnu tehniku*, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, Republika Srbija, 2008.
- [5] Škrbić, B., *Tehnologija proizvodnje i primene gasa*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad, Novi Sad, Republika Srbija, 2000.

КВАЛИТЕТ ЕКСПЛОЗИВНО ЗАВАРЕНИХ ЧЕЛИЧНИХ ПЛОЧА КОРИШЋЕЊЕМ ЕКСПЛОЗИВА DEMEX

QUALITY OF EXPLOSIVELY WELDED STEEL PLATES USING DEMEX EXPLOSIVE

Miloš LAZAREVIĆ¹, Danica BAJIĆ^{*2}, Mladen TIMOTIJEVIĆ²,
Ana ALIL³, Nada ILIĆ², Bogdan NEDIĆ¹,

¹ University of Kragujevac, Faculty of engineering, laky_boy_kg@hotmail.com

² Military Technical Institute, Belgrade,

³ University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, Belgrade,

Заваривање експлозивом се често користи када конвенционалне методе заваривања не могу да обезбеде заварени спој два различита материјала, али и када треба заварити неку специфичну геометрију или велике површине металних плоча. Остваривање споја код заваривања експлозивом се заснива на динамичком дејству великог притиска створеног експлозијом. У ту сврху најчешће се користе индустријски експлозиви ниских параметара детонације, а један од њих је DEMEX, произвођача TRAYAL, из Србије. У овом истраживању DEMEX је примењен за заваривање плоча две различите врсте челика. Пре експерименталног поступка заваривања одабраних металних плоча, експлозив добијен од произвођача је подвргнут улазној контроли квалитета: мерењу његове насипне густине и брзине детонације, коришћењем оптичких сонди и фотодетектора повезаног са електронским бројачем. Експериментална поставка за заваривање била је следећа: експлозив DEMEX у прашкастом стању нанесен је у равномерном слоју преко горње челичне плоче, која је хоризонтално постављена преко доње плоче од друге врсте челика, у паралелном положају, са малим дрвеним дистанцерима ивично постављеним између њих. Активација је извршена електродетонирајућом капислом и малим бустером од пластичног експлозива. Заварени спој је испитан применом метода ултразвучне дефектоскопије, течним пенетрантима и микроструктурне анализе завареног споја. Микроструктурне анализе попречног пресека заварених плоча урађене су на стерео и оптичком микроскопу како би се анализирао зона завареног споја.

Кључне речи: заваривање експлозијом, алатни/конструкциони челик, DEMEX експлозив, заварени спој

Explosion welding is often used when conventional welding methods cannot provide welded joint of two dissimilar materials, but also when some specific geometry should be welded, or large surfaces of metal plates. The formation of a joint in explosive welding is based on the dynamic effect of the high pressure created by the explosion. For this purpose, most often some industrial explosives of low detonation parameters are used, and one of them is DEMEX, produced by TRAYAL, Serbia. In this research DEMEX was applied to weld plates of two different types of steel. Prior to the experimental procedure of welding, the selected metal plates, the explosive obtained from the producer was subjected to initial quality control: measurement of its bulk density and detonation velocity, using optical probes and a photodetector connected with an electronic counter. The experimental setup for welding was as follows: explosive DEMEX in powdery state was applied in a uniform layer over the upper plate, which was horizontally placed over the lower plate, in parallel position, with small wooden spacers, marginally placed between them. Activation was performed by an electro-detonating cap and a small booster of plastic explosive. The welded joint was examined using methods of ultrasonic defectoscopy, liquid penetrants testing and microstructural analysis of the welded joint. Cross-sectional microstructural analyses of the welded plates were performed using a stereo and optical microscope to analyze the weld zone.

Key words: explosion welding, tool/construction steel, Demex explosive, welded joint

* Corresponding author, e-mail: simic_danica@yahoo.com

1 Introduction

In addition to their use in ammunition and armaments, explosives also play an important role in industrial applications such as the cladding or welding of metal plates. Explosive welding uses the energy of explosive detonation to weld together metal parts that are compatible from a metallurgical standpoint as well as those that cannot be welded using conventional techniques. [1, 2]. For this purpose, explosives with low detonation velocities are usually used to avoid severe damage to the processed metal plates. For this purpose, explosives with low values of detonation velocity are usually used to avoid severe damage to the processed metal plates.

Explosive welding is a solid-state process in which a high-speed joint is made between dissimilar metals by controlled detonation. The explosion welding process, illustrated in Figure 1, relies on the following principles [2]:

- cladder metal (flyer plate) can be placed parallel or at an angle to the base plate,
- the explosive material is spread over the top of cladder metal plate,
- after detonation, the cladder plate collides with the base plate and forms a weld,
- waves are generated so due to mechanical bonding joining takes place, and
- a single blasting cap can be used to ignite the explosive.

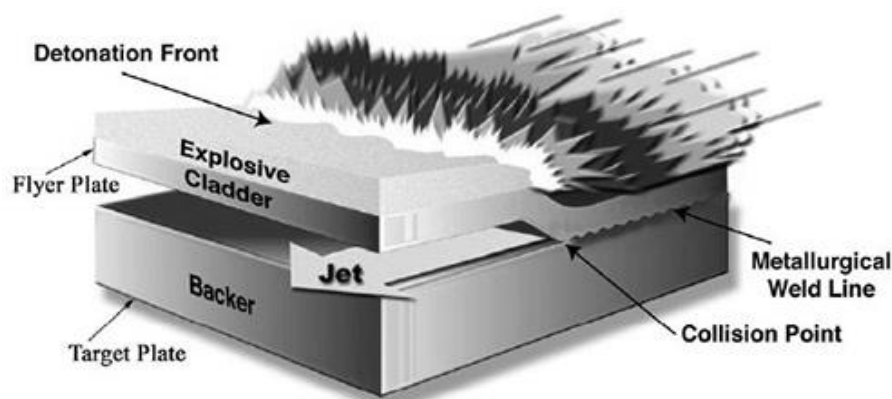


Figure 1. Schematic view of explosion welding process [2]

Explosive welding has a number of benefits over traditional welding methods, including the ability to weld dissimilar metals together, high bond strength, preservation of original metal properties, ability to weld over large areas, and practically there is no heat-affected zone. There are also some disadvantages, such as the fact that the metal pieces to be welded must have high enough impact resistance and ductility, their geometry must be simple - flat, cylindrical or conical, and the fact that this technique produces noise and carries certain risks and hazards due to manipulation with explosive.

The aim of this study was to investigate the possibility of using the industrial explosive Demex, which belongs to a group of explosives with low detonation velocity, for welding metallic materials - plates of highly wear resistant alloy steel X160CrMoV121 and low-carbon steel S355J2. These two types of steel were selected as a combination with potential application for specialized cutting tools.

2 Materials and methods

2.1 Steel plates and Demex explosive

In the experimental part of this study, two different metal materials were selected for welding: X160CrMoV121 and S355J2 steel. The chemical composition of these two metal materials is listed in Table 1 and their main properties in Table 2.

Table 1. Chemical composition of the used steels

Content	Element, wt. %													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Ti	Nb	V	Al
X160CrMoV121	1.58	0.26	0.32	0.01	0.01	12.0	-	0.9	-	-	-	-	0.7	-
S355J2	0.16	0.033	1.38	0.013	0.005	0.027	0.028	<0.001	0.029	0.007	0.008	0.029	0.004	0.038

Table 2. Properties of the used steel plates

	HV _f , HV _p – Vickers hardness	ρ_f , ρ_p – density, kg/m ³	h, thickness, mm
X160CrMoV121	2.30·10 ⁹	7.80·10 ³	3
S355J2	1.84·10 ⁹	7.85·10 ³	10

The industrial explosive Demex manufactured by TRAYAL Corporation was used for welding. Demex consists of ammonium nitrate (~95.5%) and TNT (2%) as energetic components, and other inert constituents. It is in a form of powder that can be easily spread in a desired layer over the metal plates to be welded. Detonation velocity declared by the producer was 2600-2650 m/s, and bulk density 0.75 g/cm³. Before the experiment, quality control was performed to check the main properties of Demex. Bulk density was determined using a brass vessel of the volume of 100 cm³ and the detonation velocity was measured according to an internal procedure of Military Technical Institute [3], using optical probes and a photodetector in conjunction with a high-precision time counter. The powder explosive was poured into a PVC pipe 200 mm long, with an inner diameter of 50 mm. Two holes were drilled on the PVC pipe for placing the optical probes. The first hole is 75 mm away from the initiation point, while the second hole is 175 mm away from the initiation point. Photodetector was used to register the arrival of the detonation wave on *start* and on *stop* probe, and transfer it to the time counter. In this setup, three detonation velocity measurements were made. Figure 2 shows the sample with built-in probes, ready for measuring the detonation velocity of Demex.

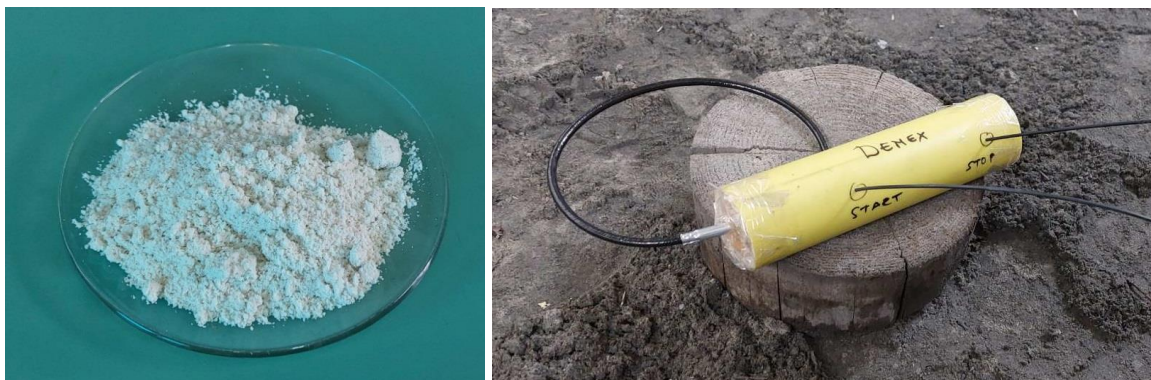


Figure 1. Left: Demex powder explosive; right: sample for measuring detonation velocity

2.2 Set-up for explosion welding

Steel plates were placed in a parallel configuration, with a distance between them 4 mm, achieved using small holders – wooden spacers positioned at the corners. Two sets of plates were prepared for welding. Demex explosive was evenly poured over the flyer plates of sets labeled with 1 and 2, in quantities of 540 and 640 g, respectively. The mass of the explosive was calculated according to theoretical approach, to meet the criteria of a quality welded joint [4-9].

Wooden frame was placed over the plates to hold the explosive in place, since it has a powdery consistency. Detonation cap/blasting cap DK8 was used for activation of Demex. The experimental set-up for the explosion welding is shown in Figure 3.



Figure 3. Experimental set-up for explosion welding, left: steel plates in parallel configuration with wooden spacers; right: wooden frame placed over the plates with DEMEX explosive and blasting cap placed in a holder

2.3 Welded joint quality inspection

The quality of the obtained welded joint was examined using methods of ultrasonic defectoscopy, liquid penetrants testing and microstructural analysis of the welded joint.

The welded steel plates were ultrasonically tested with the "Phasor XS" device / ultrasonic probe over the entire surface, by the pulse-echo method.

In order to prepare the samples for metallographic examination, the welded plate was cut with a water jet, with the following working parameters: the speed of the jet was 50 mm/min, pressure 3800 bar, and consumption of abrasive material 250 g/min and 1.5 l/min of water.

After grinding and polishing of metallographic samples, cross-sectional microstructural analyses of the welded plates were performed using a stereo microscope Leica equipped with a DFC 295 camera.

Testing with liquid penetrants of the explosively welded steel plate was performed with the penetrant system IIEd according to the standard SRPS EN ISO 3452-1 [10]. The test temperature was 23°C, while the illumination of the test surface was 750 lx. Before testing with liquid penetrants, the surface of the samples was cleaned and dried. After that, penetrant was applied to the test surface and left to penetrate into the open surface irregularities. After the time required for penetration, the excess penetrant was removed from the surface and then a developer was applied, which has a role to absorb the penetrant left in the irregularities and to give a visible indication.

3 Results and discussion

3.1 Quality of Demex explosive

For the performed measurements of detonation velocity and bulk density of Demex, the results are given in Table 3, as mean values obtained from three measurements and their standard deviations.

Table 3. Demex detonation velocity and bulk density

Property	Mean value	Standard deviation
Bulk density (g/dm ³)	0.5610	0.72
Detonation velocity, D (m/s)	2803.7	39.5

As it may be observed, the standard deviations are relatively small, so the measurements gave reproducible, relevant results. The obtained results are somewhat higher than the properties declared by the producer, which is good for future use of the selected explosive.

3.2 Ultrasonic defectoscopy results

The resulting welded area registered by ultrasonic defectoscopy is depicted in Figure 4. The area on the welded plates presented with white lines, is the area where the material was successfully welded. The welding attempt outside of this region was unsuccessful. The explosive activation was carried out in the locations designated by the numbers 1 and 2. It may be observed that in these areas the joint was not achieved, because there still was no stable detonation process developed. Also, in the marginal area of the plates, the weld was not achieved due to presence of the spacers. The area of the welded joint is similar for both the samples.



Figure 4. Explosively welded plates 1 and 2: area of weld, registered by ultrasonic method

3.3 Chemical penetrants test results

The cleaned samples were sprayed with colored penetrants and after a penetration time of 20 min. excess penetrant was removed from the surface with a cloth (Figure 5) and the samples were allowed to dry in ambient air before applying the liquid developer.

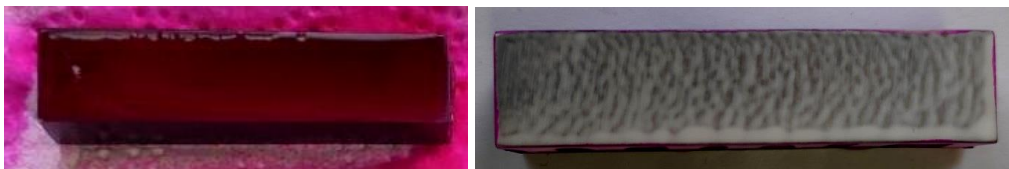


Figure 5. The appearance of the samples after the application of the chemical penetrants (left) and after their removal (right), sample 1

As seen from Figure 5, the penetrant did not show any irregularity along the welded joint, so the procedure of explosive welding may be considered successfully performed.

3.4 Microstructure of the welded joints

The observed microstructure in the zone of the welded joint is shown in Figures 6 - 8.

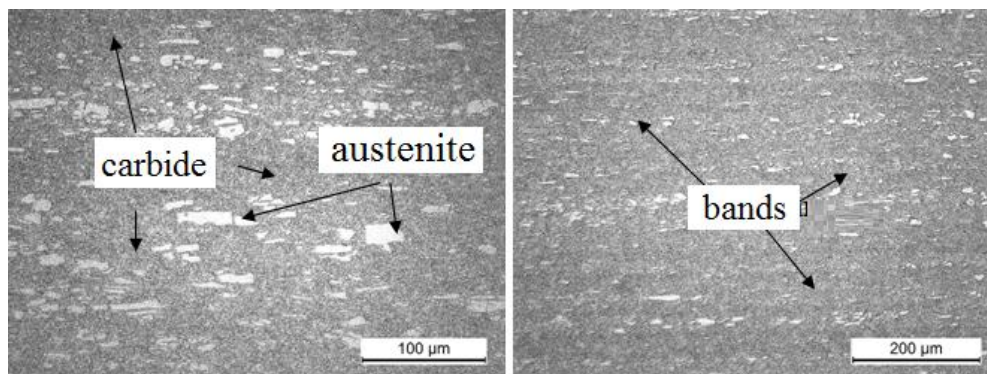


Figure 6. Microstructure of the steel X160CrMoV121

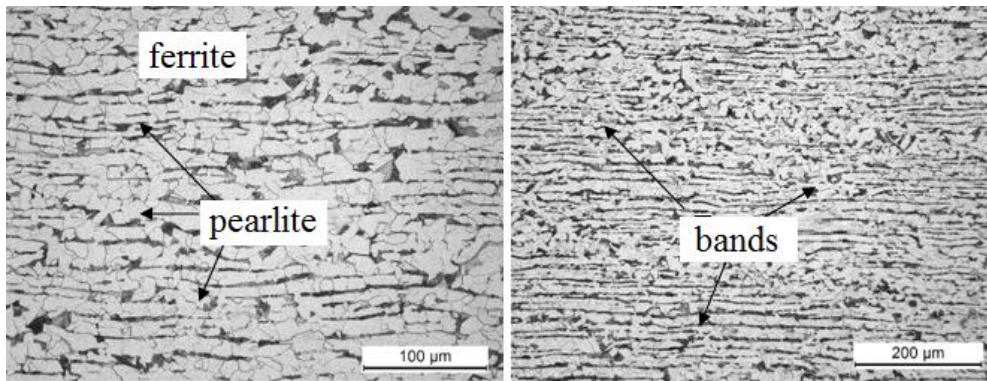


Figure 7. Microstructure of the steel S355J2

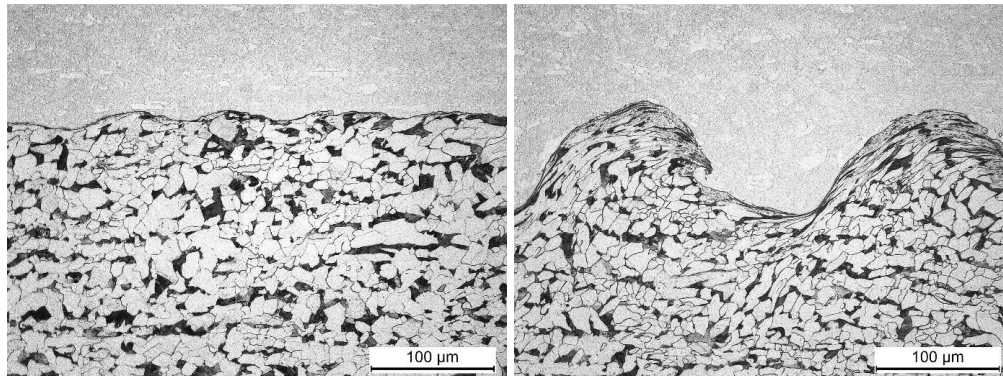


Figure 8. Microstructure of the welded joints 1 (left) and 2 (right)

In all the examined samples, the microstructure of the X160CrMoV121 steel consists of the base of carbide (cementite) particles in globular form and austenite (Figure 6). X160CrMoV121 steel is characterized by a grain structure of medium size in the range of 1 to 5 μm for carbide and 10-40 μm for austenite. The microstructure of S355J2 steel consists of a ferrite-pearlite structure (Figure 7). The S355J2 steel is in a state characterized by a uniform grain structure of medium size in the range of 5-10 μm for pearlite and 10-20 μm for ferrite. Pearlite grains are in the form of ribbon-like fine structures. The appearance of banded structure is a consequence of steel production technology, i.e. it is typical for materials subjected to hot forming [11, 12]. A secondary linear structure, i.e. pronounced bands, was observed in all samples. From Figure 8 it may be observed that welded joint 1 does not have pronounced characteristic wave-like shape, but the joint 2 does, thus having significantly bigger joining area between the two welded metal plates. This might mean that the quantity of 540 g of Demex, chosen for welding 1, maybe is on the lower limit of explosive quantity which will provide the welded joint.

4 Conclusions

The use of Demex explosive for explosion welding of plates made of the high-alloy steel X160CrMoV121 and the low-carbon steel S355J2 was investigated for potential usage in cutting tools. Prior to welding process, the explosive was examined and it was found that its bulk density and detonation velocity exceeded the minimum specified parameters provided by the manufacturer. Quantities of 540 and 640 g of Demex were used in experiment, and the quality of the welded joints was examined by ultrasonic defectoscopy, liquid penetrants, and microstructural analyses. Ultrasonic method has revealed that there are unwelded zones in the area of explosive initiation, as well as on the margins of the plates as a consequence of the wooden spacers. Liquid penetrant testing have shown good quality of the welded joint. Microstructural analysis, however, has revealed that sample which was welded with higher amount of Demex, has larger areas of the welded joint connecting the plates and more noticeable waves along the weld line typical for explosion welding.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of science, technological development and innovations (Serbia), Contract No. 451-03-47/2023-01/200325, and University of Defense, Military Academy, Proj. No. VA-TT/1/22-24.

5 References

- [1] **Crossland, B. & Williams J.** (1970) Explosive welding. *Metallurgical reviews.*, 15(1), 79-100.
- [2] *** <https://doi.org/10.1179/mtlr.1970.15.1.79>
- [3] *** Explosive Welding of Non-Ferrous Alloys: Part Two, Total Materia, <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&LN=ES&NM=475>
- [4] **Uroš Anđelić, Danica Simić, Slavica Terzić, Ivan Dimitrijević, Zoran Borković,** Improvement of experimental method for detonation velocity determination, 8th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2018, Belgrade, 11-12 October 2018. *Proceedings*, ISBN 978-8681123-88-1, pp. 189-193.
- [5] **Sherpa, B. B., Kumar, P. D., Upadhyay, A., Sandeep, K., Arun, A., & Sachin, T.** (2021). Experimental and theoretical study of dynamic bend angle in the explosive welding process. *Trans Indian Inst. Met.*, 74(2), 511-519. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02189-7>
- [6] **Blazynski, T. Z.** (1983). Mechanics of explosive welding, in *Explosive forming, welding and compaction*. Applied Science Publishers, London, 189-217. https://doi.org/10.1007/978-94-011-9751-9_6
- [7] **Radić, V.** (2000). Izbor parametara zavarivanja eksplozijom u ravanskoj geometriji (The selection of explosion welding parameters in plane geometry). *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 1, 13-18.
- [8] **Miloš Lazarević, Bogdan Nedić, Danica Bajić, Stefan Đurić, Luka Marušić,** Quality parameters of explosively welded spring steel and carbon steel, *Technical gazette / Tehnički vjesnik*, accepted for publishing - DOI: 10.17559/TV-20220810110706.
- [9] **Ghomi M. T.** (2009). Impact wave process modeling and optimization in high energy rate explosive welding. *Mälardalen University Press Licentiate Theses*.
- [10] **Bataev, I. A., Tanaka, S., Zhou, Q., Lazurenko, D. V., Jorge Junior, A. M., Bataev, A. A., Hokamoto, K., Mori, A., & Chen, P.** (2019). Towards better understanding of explosive
- [11] *** Welding by combination of numerical simulation and experimental study. *Materials & Design*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107649>
- [12] *** SRPS EN ISO 3452-1:2021 Non-destructive testing - Penetrant testing - Part 1: General principles (ISO 3452-1:2021), publication date: Sep 30, 2021.
- [13] *** https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_b/advanced/ab_5_1.html
- [14] **Prazmowski, M., Najwer, M., Henryk P., Andrzejewski, D.** Influence of explosive welding parameters on properties of bimetal Ti-carbon steel, *The 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering 2016 – CoSME'16, MATEC Web of Conferences* 94, 02012 (2017).

МОГУЋНОСТ МОДЕЛОВАЊА PBX ЕКСПЛОЗИВА У ТЕРМОХЕМИЈСКОМ КОДУ EXPLO5

POSSIBILITY OF MODELING PBX EXPLOSIVES IN EXPLO5 THERMO-CHEMICAL CODE

**Mladen TIMOTIJEVIĆ, Danica BAJIĆ*,
Mirjana KRSTOVIĆ, Slavica TERZIĆ**
Military Technical Institute, Belgrade

Истраживање и развој нових експлозива је изазован задатак, који поред ризика у раду, често укључује обиман лабораторијски рад, теренска испитивања, захтева скупе сировине и методе испитивања. За предвиђање перформанси експлозивних материјала развијени су различити софтвери и компјутерски кодови. У овом истраживању примењен је термохемијски компјутерски код EXPLO5 за предвиђање детонационих својстава пресованих PBX експлозива на бази RDX и HMX са различитим полимерним флегматизаторима. Као флегматизатори одабрани су следећи полимери: поликарбонат, полистирен и Витон А, традиционално коришћени због својих термомеханичких својстава и могућности обраде пресовањем за експлозивна пуњења и детонаторе високих перформанси. Садржај експлозивне компоненте био је 91-98 мас. % и 2-9 мас. % флегматизатора. Експлозивни састави су припремљени техником микрокапсулације, из органске фазе: експлозивни кристали су дисперговани у води у загрејаном реактору са омотачем; полимерни флегматизатор је растворен у одговарајућем органском растварачу и додат уз мешање у дисперзију експлозив/вода. Загревање је настављено до потпуног испаравања растварача и формиране су грануле експлозива са слојем флегматизатора. За одабране експлозивне формулације у овом термохемијском коду су израчунате брзине детонације користећи различите сетове константи ВКВ једначине и EXP-6 једначине. Добијени резултати су упоређени са експериментално одређеним вредностима за изабране саставе. Добијени резултати подстичу даљу употребу EXPLO5 у нумеричком моделовању, формулацији састава и изради овог типа експлозива, што ће овај процес учинити исплативијим, бржим, а најважније, смањити опасности и ризике.

Кључне речи: PBX експлозиви; термохемијски код; полимерни флегматизатор; детонациона својства

Research and development of new explosives is a challenging task, which often includes extensive laboratory work, field tests, requires expensive raw materials and testing methods, besides the safety issues. Various software and computer codes have been developed for prediction of explosive materials performances. In this research a thermo-chemical computer code EXPLO5 was applied for prediction of detonation properties of pressed PBX explosives based on RDX and HMX with different polymer phlegmatizers. The following polymers were selected as phlegmatizers: polycarbonate, polystyrene, and Viton A, traditionally used due to their thermo-mechanical properties and possibility of processing by pressing for high performance explosive charges and detonators. The content of explosive component was 91-98 wt. % and 2-9 wt. % of the phlegmatizer. The explosive compositions were prepared by microencapsulation technique, from organic phase: explosive crystals were dispersed in water in a heated jacket reactor; polymeric phlegmatizer was dissolved in appropriate organic solvent, and added while stirring in the explosive/water dispersion. Heating was continued until complete evaporation of the solvent, and granules of explosive with a layer of phlegmatizer were formed. For the selected explosive compositions, the detonation velocities were calculated in this thermo-chemical code using different sets of constants of BKW and EXP-6 EOS. The obtained results were compared to experimentally determined values for the selected composi-

* Corresponding author, e-mail: simic_danica@yahoo.com

tions. The obtained results encourage further use of EXPLO5 in numerical modeling, formulation and synthesis of this type of explosives, which will make this process more cost-effective, faster, and most important, reduce hazards and risks.

Key words: PBX explosives; thermo-chemical code; polymer phlegmatizer; detonation properties

1 Introduction

PBX (Plastic Bonded eXplosives) are composite explosive formulations made of high-explosive (HE) crystalline particles and polymer phlegmatizers, with or without additional components that are added to achieve the desired characteristics [1]. The most commonly used high explosives for this purpose are PENT, RDX, and HMX, which have great energetic characteristics (PENT detonation velocity of 8310 m/s, $\rho=1,77$ g/cm³, RDX detonation velocity of 8750 m/s, $\rho=1,76$ g/cm³, HMX detonation velocity of 9110 m/s, $\rho=1,89$ g/cm³ [2]) but high sensitivity to external mechanical impulses such as impact and friction. Using a small amount of phlegmatizers (inert, such as natural or synthetic waxes or different polymers, or active, such as TNT), can reduce the sensitivity of high explosives and facilitate safe and easy handling. Phlegmatized explosive compositions are made by the technological process of phlegmatization, which, according to its mechanism, belongs to the field of microencapsulation [3] and is classified into a group of procedures based on phase separation technology. Through the process of phlegmatization, the coating material (phlegmatizer) is separated from the aqueous or organic phase and applied to the surface of the material to be coated (explosive crystals). In this way, a thin, protective layer is formed on the surface of the explosive crystals, which ensures greater safety during the manufacturing process, manipulation, transport, and storage. Moreover, the phlegmatization process provides granulated explosive mixtures that can be pressed to densities close to the theoretical maximum density [4]. The role of the phlegmatizer in granulated PE (phlegmatized explosive) is multiple: reducing the sensitivity of explosive compositions to mechanical impulses; connecting the explosive crystals into a compact explosive charge; and improving the mechanical characteristics of pressed explosive charges. The advantages of PBX composition compared to classic pressed explosives manifest themselves through better thermal and chemical stability, higher detonation parameters, better mechanical characteristics, and lower sensitivity to unwanted external impulses. For the phlegmatization of explosives and the production of granulated PBX, various polymer materials are used: Nylon, polystyrene, polycarbonate, ethylene vinyl acetate (EVA), Fluorel, Viton A, glycidylazide polymer (GAP), polyacrylic elastomers (Hytemp), Kel F, Kraton G, Estan, Teflon, Sylgard, Elvax, BDNPA-F, Impranil DLH, Desmoflex, Cariflex, Hycar 4054, Hostaflon and etc. The most common share of polymer phlegmatizer in granulated PBX is from 1% to 10% [5, 6].

A large proportion of phlegmatizers does not mean that the explosive is properly phlegmatized and that reduced sensitivity to impact and friction has been achieved. To reduce sensitivity to mechanical impulses, it is very important that the phlegmatizer be evenly distributed over the surface of the individual crystals and that there be no exposed sharp edges on the crystals. Phlegmatization quality can be verified by explosive sensitivity tests (impact and friction) or by microscopic analysis. Pressed PBXs are used as detonator amplifiers (boosters) of various explosive devices: underwater weapons, projectiles with warheads labored solid thermobaric explosive compositions (SFAE), less vulnerable ordnance (LOVA), and ammunition with reduced sensitivity to unplanned detonations (IM). Pressed PBX charges are also represented as the main explosive charges of rocket missiles and projectiles. They are also used for special-purpose detonating cords and detonating blades. All of them have to provide reduced vulnerability throughout their entire lifetime, have good processability (to be suitable for manipulation, filling, pressing, etc.), maintain mechanical and energy characteristics at certain values during longer storage periods, and have reliable initiation and necessary detonation. In the last two decades, most of the work has been in the field of synthesis and testing of new compounds as potential energetic substances, as well as testing the possibility of their application for military purposes.

For the purpose of predicting the explosion characteristics of pressed PBX explosives based on RDX and HMX with various polymer phlegmatizers, the thermochemical computer code EXPLO5 was used in this study. The thermo-mechanical qualities of the following polymers—polycarbonate, polystyrene, and fluorocarbon rubber Viton A—as well as their potential for processing by pressing for high performance explosive charges and detonators led to their selection as phlegmatizers [7-12]. EXPLO5 is a thermochemical computer code used for estimation of the detonation or combustion performance of energetic materials, such as detonation velocity, pressure, energy, temperature, heat, specific impulse, pressure, etc. The prediction detonation parameters is based on the chemical formula, heat of formation and density, and also, model of detonation in a stable state of chemical equilibrium, steady-state model of detonation. The equilibrium composition of detonation products is calculated by applying the concept of free energy minimization. EXPLO5 uses Becker-Kistiakowsky-Wilson's (BKW) and EXP-6 equation of state for gaseous detonation products and Murnaghan or Cowan-Fickett's equation of state for solids products. It provides calculation of chemical equilibrium composition and thermodynamic parameters of the state along shock adiabat of detonation products, the CJ state and detonation parameters at the CJ state, as well as parameters of the state along the expansion isentrope [13].

2 Materials and methods

2.1 PBX samples preparation and characterization

For the preparation of the explosive samples for this research, the following materials were used: RDX – Prva Iskra – namenska, Barič; HMX – Prva Iskra – namenska, Barič; polycarbonate, polystyrene and Viton A – DuPont, ethyl acetate, trichloroethylene. The properties of the used polymer phlegmatizers are given in Table 1 [4].

Table 1. Prepared PBX formulations

Polymer	Temp. interval of melting (°C)	Temp. softening (°C)	Modulus of elasticity, N/m ²	Density (g/cm ³)	Solvents
Polystyrene	-	105	1,96-2,04x10 ⁹	1,05	trichlorethylene chloroform
Polycarbonate	220-240	150-160	2,06-2,36x10 ⁹	1,2	trichlorethylene chloroform
Viton A	does not melt below 300, decomposes at 375	-	-	1,82	methylethylketone ethylacetate

Phlegmatization technique of polymer precipitation from the solution was used to create the explosive compositions, as the microencapsulation technique. The procedure of granulated PBX samples preparation was done according to Internal technological procedure of granulated PBX manufacture [14-16]. For Viton A ethyl acetate was used, and for polycarbonate and polystyrene trichlorethylene was used as a solvent. Explosive crystals were first dispersed in water in a heated jacket reactor - water bath. The polymeric phlegmatizer was dissolved in the appropriate organic solvent and added into explosive/water dispersion while it was stirred on a mechanical stirrer. In case of Viton A / ethyl acetate, phlegmatizer-coated explosive granules were created by heating the mixture until all of the solvent had evaporated, and the polymer phlegmatizer precipitated as a thin film coat on the surface of the explosive crystals. In case of polycarbonate and polystyrene / trichlorethylene, the precipitation of the polymer on the crystals of nitramine explosives was achieved by adding ethanol, as a non-solvent to these polymers. The obtained granules were washed with water and dried in a heating oven, at moderate temperatures so that the polymer phlegmatizers do not soften and the granules do not aggregate. Process of granulated PBX samples preparation is shown in Figure 1.

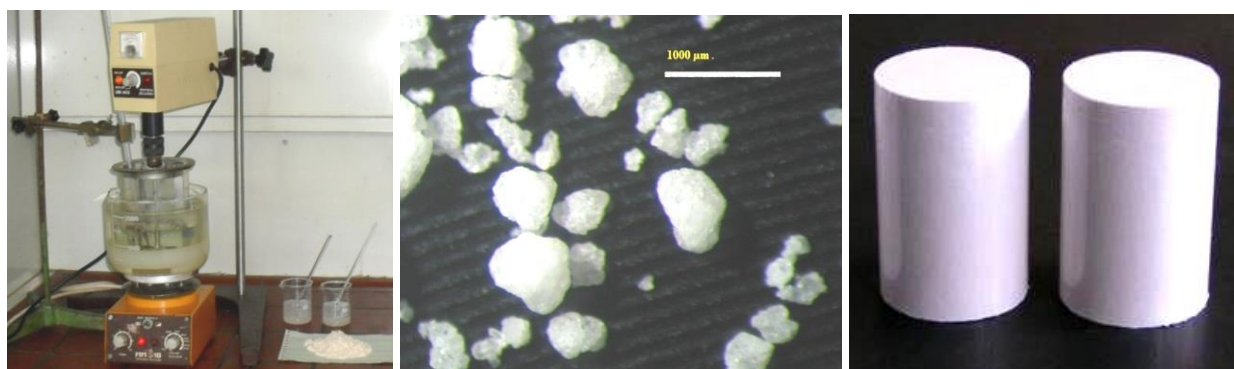


Figure 1. Illustration of preparation of PBX samples, left: laboratory glass reactor with a stirrer, prepared solutions of Viton A, and Viton A granules; middle: granules of phlegmatized HMX with Viton A; right: pressed pellets of PBX

The formulations of the prepared PBX consisted of 91–98% explosive component and 2–9% phlegmatizer component, as shown in Table 2.

Table 2. Prepared PBX formulations

Density (g/cm ³)	HMX							RDX					
	PC 9%	PC 5%	PC 2%	PS 9%	PS 5%	PS 2%	VitA 5%	PC 9%	PC 5%	PC 2%	PS 9%	PS 5%	PS 2%
1.50				•				•	•	•	•	•	•
1.55	•			•				•	•	•	•	•	•
1.60	•		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•
1.65	•	•	•		•	•							
1.69					•	•							
1.70		•	•										
1.75		•											
1.80							•						
1.83							•						
1.85							•						

The obtained granulated PBX compositions were pressed using a hydraulic press, and the obtained pressed charges were used for determination of detonation properties. Detonation velocity was measured using electro-contact probes and an oscilloscope, according to an internal procedure of Military Technical Institute [17]. The sample consisted of 6 pressed pellets of PBX, and a booster, initiated using a detonation cap with a fuse cord, as shown in Figure 2.

Based on the experimentally determined values of the detonation velocity and the density of the test samples, the detonation pressure was calculated according to the following equation [18]:

$$P_d = \frac{\rho_{ot} \times D_{sr}^2}{k + 1} \cdot 10^{-5}, \text{ kbar} \quad (1)$$

where:

P_d - detonation pressure, *kbar*;

ρ_{ot} - density of the tested PBX samples, *g/cm³*;

D - experimentally determined detonation velocity, *m/s*;

k - coefficient of polytrope; for pressed explosives of this type, the value $k=3$ is adopted;

10^{-5} - dimensional factor.

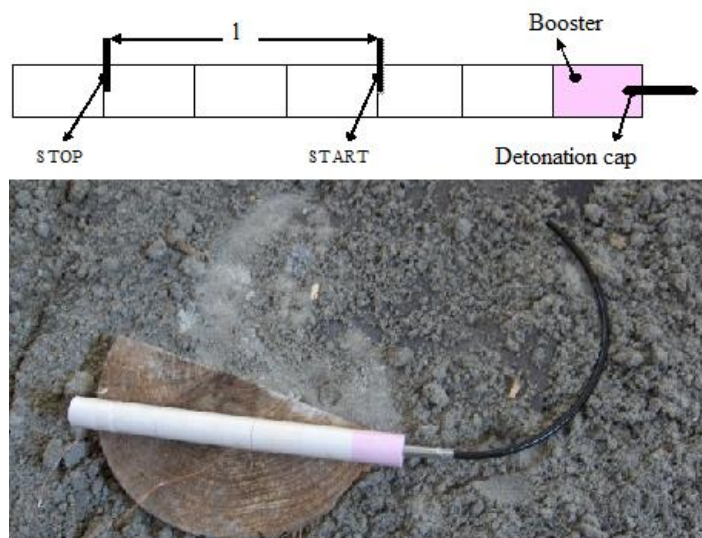


Figure 2. Pressed samples of PBX and scheme of system for detonation velocity measurement

2.2 Prediction of detonation properties of PBX in thermochemical code EXPLO5

In EXPLO5 thermochemical code, detonation parameters are calculated for a specific explosive at a given density. Optionally, additional calculations can be performed along the expansion isentrope of detonation products to derive the detonation energy, and Gurney velocity and energy. The standard detonation run is typically used by researchers interested in predicting the detonation properties of new explosives and formulations, while the expansion isentrope calculations are useful for obtaining more detailed information on the explosive's energy output and its capacity to drive surrounding materials.

To accurately describe the behavior of detonation product gases at extremely high pressures and temperatures, it is crucial to have a thorough understanding of the equations of state (EOS) of these gases. However, this is also one of the most difficult aspects of the problem. Over the years, various gaseous EOS have been proposed in an attempt to accurately capture this behavior. Among these, the semi-empirical Becker-Kistiakowski-Wilson (BKW) EOS has emerged as one of the most extensively used [19]. Explo5 uses this EOS for its thermochemical calculation, as well as EXP-6.

The BKW equation of state utilizes variable parameters α , β , κ and θ which can be adjusted during the EXPLO5 calculation to fit measured detonation properties [19]. In addition, a modified BKW equation of state with the parameter γ is also available in the thermochemical code. Recommended values for the BKW equation parameters for calculating detonation parameters can be found in various articles. The values of parameters that will be used during the calculations for PBX explosives are given in Table 3.

Table 3. Sets of constants used for calculation in EXPLO5

Constants	BKW-TNT	BKW-RDX	BKWR	BKWG	BKWS	BKWC	BKWN	BKWN-M
α	0.5	0.54	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
β	0.09585	0.181	0.176	0.096	0.298	0.403	0.38	0.154
κ	12.685	14.15	11.8	17.56	13.1	10.86	9.41	9.45
θ	400	400	1850	4950	6620	5441	4250	3765
γ	/	/	/	/	/	/	/	1.54

Detonation velocity and detonation pressure were calculating for the selected compositions of PBX given in Table 2 and sets given in Table 3 for BKW EOS. EXP-6 does not allow changes of pre-set constants defined in the software.

3 Results and discussion

Experimentally obtained densities of pressed explosive samples, the values of measured detonation velocities, as well as calculated values obtained from EXPLO5, are displayed and compared in Table 4.

Table 4. Experimental and calculated values of detonation velocity

Explosive	Density (g/cm ³)	Detonation velocity (m/s)								
		Experimental	BKW-TNT	BKW-RDX	BKWC	BKWG	BKWN	BKWN-M	BKWNR	EXP-6
HMX-PC (91/9)	1.55	7286	6898.34	7188.89	8260.96	7246.81	7576.27	7639.92	7370.5	7532.23
	1.6	7638	7033.5	7387.58	8493.02	7368.5	7760.31	7817.24	7533.43	7738.66
	1.65	7865	7168.69	7594.36	8733.04	7490.47	7950.17	7998.33	7698.8	7953.57
HMX-PC (95/5)	1.65	8205	7348.81	7870.91	8901.89	7596.46	8085.39	8134.38	7785.71	8072.49
	1.7	8362	7475.55	8090.29	9145.65	7714.4	8275.14	8313.37	7946.78	8286.87
	1.75	8466	7601.36	8319.25	9396.93	7832.78	8469.74	8495.19	8109.36	8506.6
HMX-PC (98/2)	1.6	7746	7261.35	7707.01	8793.62	7566.21	8006.03	8064.97	7696.13	7960.03
	1.65	8168	7384.36	7913.59	9026.27	7680	8186.95	8236.48	7850.44	8161.66
	1.7	8398	7506.79	8129.24	9266.65	7794.64	8372.9	8411.05	8006.89	8370.09
HMX-PS (91/9)	1.5	7473	6919.49	7188.39	7973.52	7120.37	7357.24	7422.65	7202.39	7296.64
	1.55	7717	7063.38	7392.02	8203.02	7249.81	7541.94	7601.41	7369.84	7500.21
	1.6	7953	7207.86	7603.61	8441.46	7380.03	7733.06	7784.85	7540.71	7713.39
HMX-PS (95/5)	1.5	8115	7241.7	7668.04	8637.9	7480.87	7883.23	7939.01	7630.53	7848.13
	1.55	8218	7374.07	7881.32	8877.91	7602.03	8071.96	8118.51	7794.05	8059.15
	1.6	8437	7479.47	8058.32	9075.42	7699.48	8226.75	8264.92	7926.29	8233.11
HMX-PS (98/2)	1.5	7823	7268.49	7710.53	8782.17	7564.66	7998.46	8056.49	7697.12	7951.97
	1.55	8269	7393.09	7918.3	9016.73	7679.79	8180.79	8229.81	7853.07	8155.13
	1.6	8375	7492.33	8091.01	9209.74	7772.49	8330.47	8370.64	7979.48	8322.41
HMX-vitonA (95/5)	1.8	8583	7673.01	8458	9706.73	7979.78	8711.13	8717.2	8261.91	8751.3
	1.83	8812	7741.25	8587.98	9857.34	8048.35	8828.36	8823.73	8354.07	8881.92
	1.85	8862	7786.46	8677.74	9958.08	8094.13	8907.37	8895.05	8415.36	8969.64
RDX-PC (91/9)	1.5	7272	6908.85	7195.73	8056.14	7143.73	7415.5	7485.85	7224.79	7348.81
	1.55	7437	7043.5	7393.39	8279.87	7264.3	7594.04	7658.52	7384.05	7545.09
	1.6	7700	7178.26	7599.18	8511.55	7385.65	7777.97	7835.49	7546.54	7750.37
RDX-PC (95/5)	1.5	7642	6975.74	7271.87	8236.8	7265.9	7565.5	7637.36	7330.79	7489.26
	1.55	7842	7103.46	7464.27	8456.64	7381.15	7739.46	7805.78	7484	7678.92
	1.6	7960	7231.15	7664.96	8684.53	7497.33	7918.49	7977.63	7639.98	7877.2
RDX-PC (98/2)	1.5	7658	7025.8	7326.5	8370.9	7360.06	7678.31	7751.61	7409.56	7594.39
	1.55	7796	7148.64	7514.68	8587.66	7471.74	7848.83	7916.53	7558.14	7779.27
	1.6	7904	7271.62	7711.24	8812.53	7584.57	8024.42	8084.44	7709.74	7972.29
RDX-PS (91/9)	1.5	7466	6930.33	7195.71	7993.09	7138.02	7375.42	7441.31	7216.73	7310.51
	1.55	7680	7073.79	7398.44	8222.49	7267.27	7559.57	7619.69	7383.75	7512.99
	1.6	7823	7217.88	7609.14	8460.32	7397.37	7750.33	7802.8	7554.23	7725.18
RDX-PS (95/5)	1.5	7530	6987.19	7273.72	8202.13	7259.16	6738.03	6764.93	7326.1	7464.92
	1.55	7756	7119.37	7469.16	8425.35	7378.41	7002.54	7016.28	7483.49	7658.19
	1.6	7899	7251.7	7672.84	8656.78	7498.62	7278	7276.09	7643.97	7859.87
RDX-PS (98/2)	1.5	7640	7029.74	7327.62	8356.82	7355.48	7667.87	7740.31	7407.22	7583.75
	1.55	7905	7154.2	7517.01	8575.01	7468.78	7839.74	7906.46	7557.49	7769.95
	1.6	8000	7278.75	7714.87	8801.15	7582.98	8016.81	8075.89	7710.73	7964.2

Figure 3 shows the deviations of the calculated detonation velocities from the experimentally measured values for PBX compositions with RDX (a) and HMX (b), and Figure 4 shows the com-

parison of experimental detonation velocities and theoretical predicted values obtained in EXPLO5, using different constants sets from Table 3.

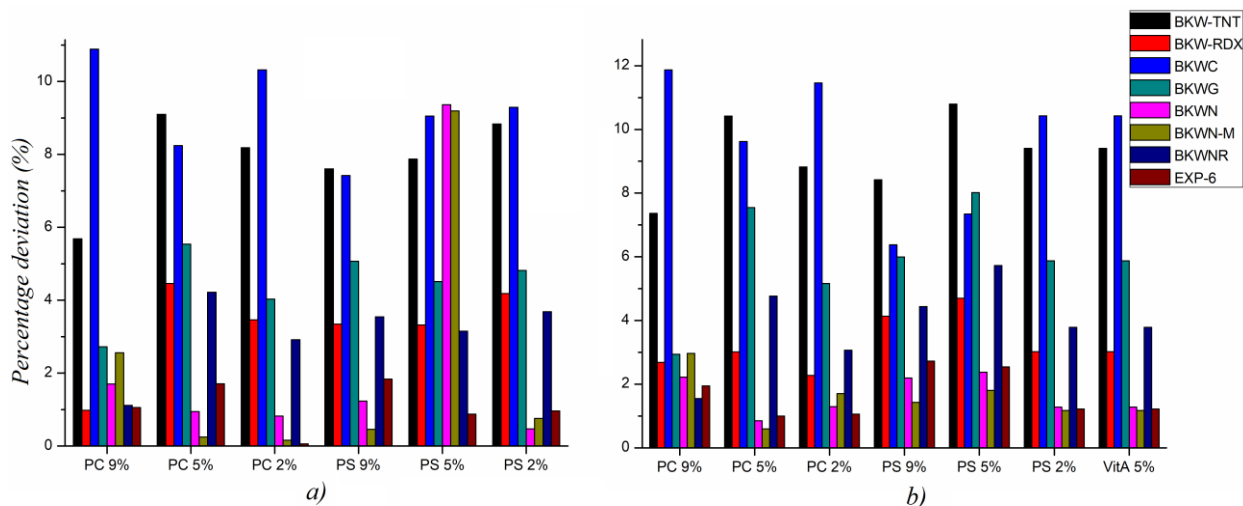


Figure 3. Percentage deviations of calculated theoretical from experimental values of detonation velocities for RDX (a) and HMX (b)

As it may be observed from Figure 3, the calculated values of detonation velocities for RDX base PBX compositions, obtained using all the applied constants sets are close to experimental results, with deviations lower than 5%, except using BKW-TNT and BKW-C. Potential reason for this may be the high oxygen balance of the RDX based explosives. The closest values were obtained using EXP-6 (1.08% of deviation), BKWN-M (2.23%), BKWN (2.42) and BKWNR (3.11%). For the compositions containing HMX, the best results were obtained with BKWN-M (2.54%), BKWN (2.62%) and EXP-6 (2.75). For BKW-RDX, the obtained values for RDX based explosives deviated from experimental values for about 3.29%, and for HMX based, the deviation was 3.58%. The explanation for this may be higher oxygen balance for RDX, so it was expected that the precision with this set of constants gives closer results for this kind of PBX [19].

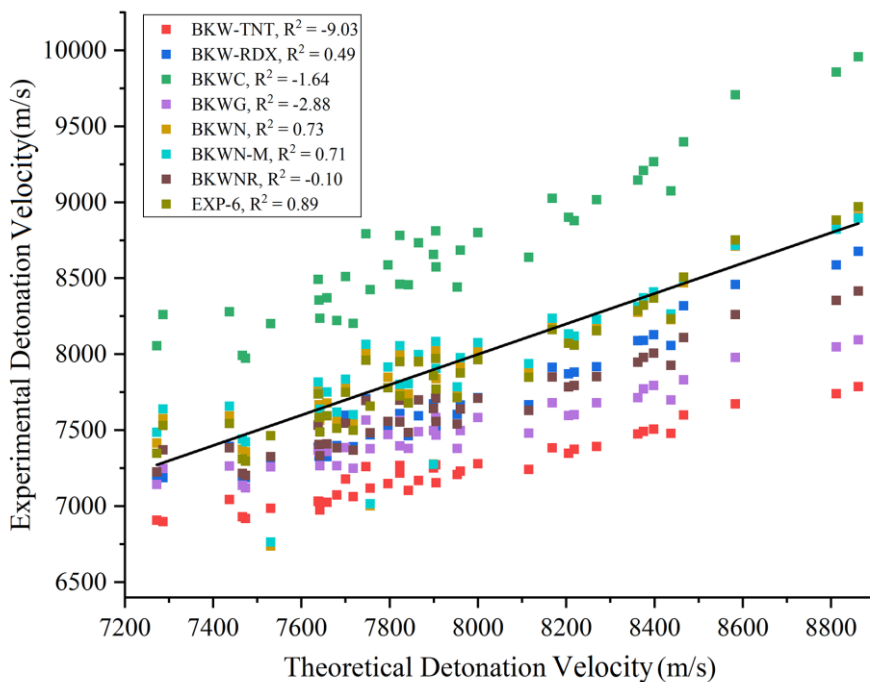


Figure 3. Experimental detonation velocities compared to theoretical predicted values from EXPLO5 obtained using with different constants sets

From Figure 4, from regression analysis, it may be observed that the best coefficient of determination was obtained with the use of EXP-6. The matches were much closer in the area of lower detonation velocities than in higher, and the best match of the results was observed for values of detonation velocities in the range 7500-8000 m/s.

4 Conclusions

For the purpose of predicting the explosion characteristics of pressed PBX explosives based on RDX and HMX with various polymer phlegmatizers, the thermochemical computer code EXPLO5 was used in this study, with EXP-6 and BKW EOS with different sets of constants. Three polymers—polycarbonate, polystyrene, and viton A were selected as phlegmatizers in PBX compositions consisting of 91–98% explosive component and a 2–9% phlegmatizer, prepared by the technology of microencapsulation from the organic phase. Densities and detonation velocities for the prepared samples were determined experimentally. Comparative analysis of the calculated theoretical values of detonation velocities has revealed that EXP-6 predicts the most accurate values, closest to experimental values. The deviation of calculated values with EXP-6 and experimental velocities of detonation are lower than 2%, in average. Regarding the BKW EOS, the best set of constants among the examined was BKWN-M, with average deviation of 2.4% between the calculated and empirical detonation velocities.

The obtained high agreement of the estimated parameters to the experimental values encourages further use of EXPLO5 in numerical modeling, formulation, and design of explosive compositions before their manufacture or extensive field tests, as well as in estimation of performance of future explosive charges, boosters, warheads, etc. This type of PBX explosives may find application in cumulative warheads and detonation penetrators, and with this method of prediction a high degree of cost-effectiveness, speed, and, most importantly, a reduction in risks and dangers can be achieved. In further adjustment of sets of constants, even higher precision in prediction of detonation parameters could be achieved.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of science, technological development and innovations (Serbia), Contract No. 451-03-47/2023-01/200325, and University of Defense, Military Academy, Proj. No. VA-TT/1/22-24.

5 References

- [1] **Klapötke T.M.**, Chemistry of High-Energy Materials, DE GRUYTER, Germany, 2001.
- [2] **Бажин, З.** Иницијални и бризантни експлозивни, АГМ књига, Београд, 2015.
- [3] **Othmer, K.** Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 9, Interscience New York, 1980.
- [4] **Terzić, S.** Pregled istraživanja i razvoja granuliranih eksplozivnih smeša u VTI, Tehnički izveštaj, VTI, Beograd, 2007.
- [5] **Corleone, J.** Tactical Missile Warheads, Aeroyet General Corporation, pp. 81–156 (Chapter 2 – Explosives), California, 1993.
- [6] **Cumming, A.S.** Collaboration on Pressable Explosives for Shaped Charges – A European Success Story, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 24, pp. 46-49, 1999.
- [7] **Andelković-Lukić, M.**, Granulisani brizantni eksplozivi, Kumulativna naučno-tehnička informacija, Vojnotehnički institut Beograd, 2000.
- [8] **Andelković-Lukić, M.**, Flegmatizacija heksogena i oktogena polistirenom i polikarbonatom, magistarski rad, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1983.
- [9] **Lukić, M.** Flegmatizacija heksogena sa polistirenom, TI-371, VTI, 1976.
- [10] **Andelković-Lukić, M.** Flegmatizacija heksogena sa polikarbonatom, TI-403, VTI, 1977.
- [11] **Terzić, S.** Tehnološki postupci dobijanja granuliranih PBX na bazi oktogena i Vitona A, Tehnički izveštaj, VTI-04-01-0394, 2004.

- [12] **Andelković-Lukić, M., Popović, T., Borković, Z.** Oktogen flegmatizovan polikarbonatom, Zbornik XV Simpozijuma o eksplozivnim materijama, 21-23.05.1984. Užice.
- [13] *** EXPLO5 product datasheet, https://mueller-instruments.de/fileadmin/Downloads/instruments-medien/Analysensoftware_-_Explo-5.pdf
- [14] **Terzić, S.** Opšti tehnološki postupak proizvodnje granuliranih (flegmatizovanih) eksplozivnih sastava, VTI-04-01-0418, 2006.
- [15] **Terzić, S.** Opšti tehnološki postupak izrade granuliranih eksplozivnih sastava na bazi oktogena i Vitona A, VTI-04-01-0481, 2007.
- [16] **Terzić, S.** Opšti tehnološki postupak proizvodnje presovanih eksploziva, VTI-04-01-0420, 2005.
- [17] **Uroš Andelić, Danica Simić, Slavica Terzić, Ivan Dimitrijević, Zoran Borković,** Improvement of experimental method for detonation velocity determination, 8th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2018, Belgrade, 11-12 October 2018. Proceedings, ISBN 978-8681123-88-1, pp. 189-193.
- [18] **Станюковича К.П.** "Физика взрыва", Москва, 1975.
- [19] **C. L. Mader,** Numerical modeling of explosives and propellants, CRC Press, Boca Raton, 2008

PRIPREMA VODE ZA PROIZVODNJU PARE U INDUSTRIJSKIM PARNIM KOTLOVIMA

PREPARATION OF WATER FOR STEAM PRODUCTION IN INDUSTRIAL STEAM BOILERS

Jasmin FEJZIĆ^{1*}, Indira BULJUBAŠIĆ², Nurdin ĆEHAJIĆ¹,

¹ JP Elektroprivreda BiH, Termoelektrana Tuzla, Bosna i Hercegovina

² Mašinski fakultet Univerziteta u Tuzli, , Bosna i Hercegovina

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.263>

U parnim kotlovskim postrojenjima voda služi za dobijanje vodene pare. Oštećenja i njima izazvani otkazi termoenergetskih postrojenja u velikom broju su izazvani usljed neadekvatnog kvaliteta napojne vode. Voda u svom hemijskom sastavu sadrži i veliki broj primjesa koje joj daju veoma složen hemijski sastav. Sve primjese štetno utiču na bezbjednost rada i stepen iskorišćenja parnog kotla. Zbog toga je vodu, kao osnovni fluid u termoenergetskim postrojenjima, prije upotrebe raznim mehaničkim i hemijskim postupcima potrebno prečistiti tj. podvrgnuti adekvatnoj pripremi kako bi se odstranile štetne primjese koje negativno utiču na rad ovih postrojenja i kako bi se oštećenja svela na minimum i mogla kontrolisati. Niz tehnoloških postupaka kojima se sirova voda obrađuje tako da dobije svojstva propisana uslovima za kvalitet napojne vode predstavljaju pripremu napojne vode. U ovom radu je prikazan primjer pripreme napojne vode za industrijske parne kotlove u jednom pogonu.

Ključne riječi: parni kotao; voda; para; priprema vode

In steam boiler plants, water is used to produce steam. A large number of damages and the resulting failures of thermal power plants are caused by the inadequate quality of the feed water. Water in its chemical composition also contains a large number of impurities that give it a very complex chemical composition. All admixtures have a detrimental effect on the safety of work and the degree of utilization of the steam boiler. That is why water, as the basic fluid in thermal power plants, needs to be purified by various mechanical and chemical processes before use, i.e. be subjected to adequate preparation in order to remove harmful impurities that negatively affect the operation of these plants and so that damage can be minimized and controlled. A series of technological procedures by which raw water is processed so that it obtains the properties prescribed by the conditions for the quality of feed water represent the preparation of feed water. This paper presents an example of preparation of feed water for industrial steam boilers in one plant.

Key words: steam boiler; water; steam; water preparation

1 Uvod

U proizvodnji industrijske pare glavni resursi su voda i energent, koje treba efikasno koristiti. Pri tome je neophodno osigurati dovoljne količine kvalitetne vode, što je moguće primjenom razvijenog tehnološkog procesa koji podrazumijeva pripremu vode, održavanje i kontrolu kvaliteta vode u svim segmentima vodeno-parnog ciklusa. Kvalitet upotrijebljene vode utiče na sigurnost rada, vjek trajanja i stepen iskorišćenja parnog kotla.

2 Negativni uticaj primjesa napojne vode na rad kotla

Voda za parne kotlove ne smije da sadrži materije koje: izazivaju koroziju metala (mineralne i organske kiseline, agresivne gasove, suviše veliki alkalitet); stvaraju taloge; negativno djeluju na stabilnost isparavanja kotlovske vode i oštećuju priključna postrojenja [1].

* Corresponding author, e-mail: jasmin.feizic@epbih.ba

Primjese koje treba ukloniti smanjuju efikasnost termoenergetskih postrojenja u smislu efikasnog prenosa toplote, usljed taloženja kamenca i stvaranja mulja [2]. Usljed prisustva štetnih primjesa ubrzava se i korozija ovih postrojenja, smanjuje radna pouzdanost i radni vijek postrojenja. Primjese u vodi mogu biti: mehaničke, koloidne i rastvorene [3].

Mehaničke primjese mogu da plivaju, da lebde i da se talože, a sve u zavisnosti od njihove specifične težine. Primjese mogu biti organskog ili mineralnog porijekla. Sačinjavaju ih zemlja, pijesak i drugo. Koloidne primjese su organskog ili mineralnog porijekla. To su vrlo male čestice. Njih čine ulja, masti, fina prašina, i sl. Rastvorene primjese u vodi su soli i gasovi. Značajnije soli u vodi su: bikarbonati i sulfiti kalcijuma i magnezijuma. Gasovi rastvoreni u vodi su: ugljendioksid, kiseonik i azot.

Taloženje mulja nastaje izdvajanjem mehaničkih primjesa iz vode, izdvajanja čestica primjesa koje su bile rastvorene u vodi, pa se zbog zagrijavanja vode izdvajaju i talože. Mulj se taloži u cjevovodu za napajanje kotlova, zagrijaču vode i armaturi kotla. On ometa rad kotla, sprečavajući prolaz napojne vode kroz cjevovod, onemogućava dobro zatvaranje kotlovske armature onemogućava dobar prelaz toplote sa grejnih površina kotla na kotlovsku vodu. Kotlovski mulj nastaje prisustvom koloidnih primjesa [2]. U određenim slučajevima može iz kotlovskog mulja nastati kamenac.

Pri radu kotla, uslijed neprekidnog isparavanja i stalnog napajanja kotla vodom, povećava se koncentracija mineralnih materija u kotlovskoj vodi. Kada dođe do zasićenosti rastvora izdvajaju se soli kalcijuma i magnezijuma i stvaraju kotlovski kamenac. Kamenac se hvata na svim površinama kotla koje su pod vodom. Kotlovski kamenac sprječava normalno hlađenje kotlovskih limova i cjevi koji su u dodiru sa vrelim dimnim gasovima, odnosno sprječava prelaz toplote sa grejne površine kotla na kotlovsku vodu. Ovo izaziva pregrijavanje kotlovskih limova i cjevi, dolazi do promjene strukture materijala, deformacije kotlovskih djelova a u težim slučajevima i do eksplozije.

Svojim taloženjem u kotlu kotlovski kamenac utiče i na smanjenje stepena iskorišćenja parnog kotla.

Korozija metalnih površina kotla u dodiru sa vodom nastaje uslijed:

- dejstva gasova sadržanih u kotlovskoj vodi. Naročito je opasno dejstvo kiseonika, koji u dodiru sa gvoždem stvara oksid,
- dejstva soli sadržanih u vodi.

3 Priprema kotlovske napojne vode

Vodu, kao osnovni fluid u termoenergetskim postrojenjima, potrebno je podvrgnuti adekvatnoj pripremi kako bi se oštećenja svela na minimum i mogla kontrolisati. Prije upotrebe sirovu vodu je raznim mehaničkim i hemijskim postupcima potrebno prečistiti [4].

Niz tehnoloških postupaka kojima se sirova voda obrađuje tako da dobije svojstva propisana uslovima za kvalitet napojne vode predstavljaju pripremu napojne vode [5].

Udaljavanje mehaničkih primjesa vrši se: propuštanjem sirove vode kroz sita razne finoće [3]. Ovim načinom se odstranjuju iz sirove vode najgrublje mehaničke primjese. Taloženjem u bazenima se izdvajaju sve taložne a donekle i lebdeće primjese. Voda u taložnicima treba da se zadrži od 12 do 24 sata. Taloženje primjesa se ubrzava dodavanjem kreča, sode i aluminijumsulfata.

Primjese koje se ne talože zadržavamo u pješčanim i drugim filterima. Propuštanjem vode kroz sud u kome se nalazi šljunak, pjesak, koks, itd., na slojevima ovih materija zadržavaju se lebdeće i plivajuće primjese. Poslije prolaska određene količine vode nastaje zaprljanost filtera. To se može vidjeti po pritisku vode na ulazu i pritisku na izlazu iz filtera. Filter se mora oprati jer njegova propusna moć opada. Pranje filtera se vrši vodom i uduvavanjem vazduha radi rastresanja filtrirajućeg materijala.

Koloidne primjese se hvataju na specijalnim pahuljastim materijama koje grade mrežu i plivaju ili padaju na dno. Za hvatanje koloidnih primjesa vodi se dodaje aluminijum sulfat ili sulfat gvožđa. Poslije ovog postupka voda se propušta kroz filtere. Hvatanje koloidnih primjesa može se vršiti i uticajem električne struje, kada nastaje skupljanje čestica ulja i masti u veće kapi, a potom se odstranjuju pomoću filtera.

Koloidne nečistoće, koje su uzrok pjenjenja, hemijskim postupkom koaguliraju, a nakon toga se odstranjuju mehaničkim putem [5].

Udaljavanje soli može da bude potpuno i djelimično. Omekšavanje napojne vode spada u djelimično udaljavanje soli. Potpuno udaljavanje soli iz vode postiže se destilacijom i demineralizacijom sa jonskim izmjenjivačima.

Hemijskim putem demineralizacija i dekarbonizacija obavljaju se tako da se smanjuje udio slobodne CO_3 grupe i prelaskom soli rastvorivih u vodi u nerastorljive i njihovim taloženjem. Omekšavanje hemijskim putem ostvaruje se prelazak hidrokarbonata u karbonate, dalji postupak kao sa karbonatima. Ovakva priprema napojne vode zadovoljavajuća je za manje kotlovske jedinice uz njihovo češće odmuljivanje.

Omekšavanje i demineralizacija jonoizmjenjivačima primjenjuje se kod većih kotlovskih jedinica. Jonoizmjenjivači su u vodi neotopive materije koje svoje labilno vezanje jona zamjenjuju jonima iz vode.

Za potpunu demineralizaciju kotlovske vode se koriste isparivači koji parom na višem pritisku isparavaju napojnu vodu koja nakon koncentracije predstavlja gotovo čistu napojnu vodu.

Osim demineralizacije, pripremom napojne vode osigurava se njena deaeracija, kada se iz te vode odstranjuje vazduh i drugi gasovi. Kiseonik rastvoren u napojnoj vodi djeluje korodirajuće na ogrevne površine kotla, a njegovo odstranjivanje uglavnom se obavlja termičkom pripremom vode (zagrijavanje na 105°C , kada više u vodi praktično nema gasova) ili hemijskom pripremom, kada se vodi dodaju hemikalije koje sa sobom vezuju kiseonik u neagresivne spojeve.

Gasovi sadržani u napojnoj vodi, a naročito kiseonik, mogu da izazovu koroziju metalnih dijelova kotla [3]. Njihovom udaljavanju iz napojne vode, preko posebnih uređaja i postupaka, mora se posvetiti velika pažnja. Uglavnom postoje tri postupka za udaljavanje iz napojne vode, i to:

1. termički postupak – zagrijavanjem napojne vode na 99°C u odplinjačima. Gasovi se izdvajaju iz napojne vode jer sa povećanjem temperature vode opada rastvorljivost gasova u vodi.
2. hemijski postupak – vodi za napajanje kotla se dodaje hidrazin koji vezuje kiseonik. Ovo je najbolji postupak za vezivanje kiseonika iz napojne vode, jer nastala jedinjenja ne čine taloge.
3. mehanički postupak – mješanjem napojne vode ili njenim rasprašivanjem pomoću pare moguće je odstraniti izvjesnu količinu gasova iz nje.

Odmuljivanje i odsoljavanje predstavlja važan dio tretmana kotlovske vode i ima zadatak da ograniči koncentraciju soli i ostalih nepoželjnih materija u kotlovskoj vodi [6]. Previsok stepen odmuljivanja rezultira u gubicima toplotne energije, potrošnji vode i povećanju količine upotrijebljenih hemijskih sredstava za tretman napojne vode, dok nizak stepen odmuljivanja povećava koncentraciju nepoželjnih materija u kotlovskoj vodi [7].

Kotlovski mulj se odstranjuje iz kotla odmuljivanjem [2]. Pjenušanje vode u kotlu nastaje zbog velike koncentracije natrijumovih soli, hidroksida i mehaničkih primjesa. Posljedice pjenušanja su: povećana vlažnost pare zaprljane sa nečistoćama iz kojih se pjena sastoji, a taloženje ove nečistoće u cijevima pregrijača u parovodu i zasunima uzrokuje netačnost vodostanja u kotlu. Ispuštanjem vode iz kotla reguliše se koncentracija soli u kotlovskoj vodi, pa se govori o odsoljavanju kotla [8].

Kod odmuljivanja i odsoljavanja kotla otpadna voda pod pritiskom i temperaturom se ispušta iz kotla, a za to postoje tri načina: kontinualno, ručno i automatsko. Svako ispuštanje vrele vode iz kotla, povećava potrošnju napojne vode tj. zahtijeva dovođenje nove količine napojne vode i povećava gubitak toplote [8]. Učestalost odsoljavanja zavisi od provodljivosti kotlovske vode, a obično je ta količina vode 5 % od parnog učinka kotla [9]. Gubici toplote uslijed odmuljivanja kotla dostižu 2% od troškova goriva [10]. Maksimalna zakonski propisana temperatura vode koja izlazi u kanalizaciju može biti 30°C [11], te ako se voda od odmuljivanja i odsoljavanja kotlova ispušta u kanalizaciju, potrebno ju je prije ispusta ohladiti na dozvoljenu temperaturu.

Vraćanje kondenzata u kotlovnici i njegovo ponovno korištenje znači uštedu energije, uštedu vode i smanjenje potreba za hemijskom pripremom vode [12].

Pogonska kontrola kvaliteta vode se mora vršiti redovno i dobijeni rezultati upisivati u određeni obrazac. U pogonima se kontroliše: sirova voda, omekšana voda, voda za napajanje, kotlovska voda i kondenzat.

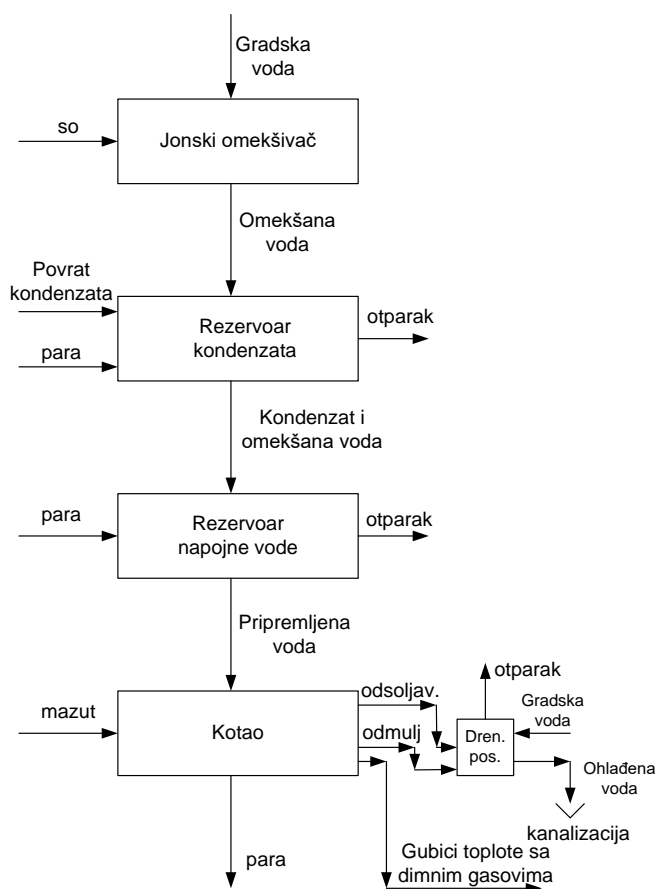
4 Priprema kotlovske vode u posmatranom industrijskom pogonu za proizvodnju pare

U kotlovskom postrojenju u posmatranom pogonu su instalisana dva kotla. Sistem korištenja toplotne energije je zatvorenog tipa, tako da se u procesu rada kotlovskog postrojenja kondenzat koristi i preko 70 %. Dva kotla, koja su instalisana u posmatranom pogonu, su parni, troprolazni, plameno – dimnocijevni, namijenjeni za proizvodnju zasićene pare sa plamenicima na mazut. Parni učinak (pri maksimalnom opterećenju) jednog kotla je 13.200 kg/h.



Slika 1. Kotlovi sa plamenicima ugrađeni u posmatranom pogonu

Ovisno od potrošnje pare, pumpa napaja kotao vodom koja je već termički pripremljena na 103–105 °C. Ugrađene su dvije pumpe, tako da je u radu uvijek jedna radna pumpa, a druga pumpa je rezervna. Na slici 1. prikazani su kotlovi ugrađeni u posmatranom pogonu . Na slici 2. je prikazana shema resursnih tokova pri proizvodnji pare u posmatranom pogonu, na kojoj se vide mjesta potencijalnih gubitaka resursa, a time i nepotrebno povećanog negativnog uticaja na okoliš [13].



Slika 2. Shema resursnih tokova pri proizvodnji pare u posmatranom pogonu

U posebnoj prostoriji, pored kotlovnice ugrađen je spremnik (rezervoar) kondenzata u kojem se sakuplja kondenzat od svih potrošača iz tehnološkog procesa, kao i iz same kotlovnice. Spremnik je zapremine 7,2 m³. Iz spremnika kondenzata se kondenzat pomoću pumpi prebacuje u spremnik (rezervoar) napojne vode sa otplinjačem. Pumpe su centrifugalne (radna i rezervna) za rad sa toplom vodom do 110 °C. Na slici 3. prikazan je spremnik kondenzata, ugrađen u posmatranom pogonu.



Slika 3. Spremnik kondenzata u posmatranom pogonu

Za potrebe dopunjavanja sistema sa hemijski pripremljenom vodom koristi se omekšivač vode. Kapacitet omekšivača je u mogućnosti da nadoknadi svu količinu utrošene vode u tehnologiji. Kapacitet omekšivača je 18 m³/h omekšane vode i može da zadovolji potrebe oba kotla za omekšanom vodom pri maksimalnom kapacitetu. S obzirom da je količina povrata kondenzata varijabilna, moguća je i promjena radnog kapaciteta omekšivača vode. Utrošak omekšane vode se prati na ugrađenom vodomjeru. Instaliran je dvostruki automatski omekšivač vode. Ovaj omekšivač radi na principu ionozmjenjivačkog postupka. Opremljen je sa upravljačkom regulacijom u funkciji protoka. Svaki izmjenjivački spremnik ima svoj vlastiti upravljački sklop. Kod ispada iz rada jednog od njih, drugi će nastaviti da radi kao jednostruki omekšivač. Regeneracija započinje nakon što se omekša prethodno zadana količina vode u jednom izmjenjivačkom spremniku.

U hemijsku pripremu vode spada i uređaj za doziranje inhibitora u napojnu vodu za otklanjanje preostalog kisika iz vode. Tip inhibitora treba da bude tako odabran da se može koristiti za prehrambenu industriju. Uređaj treba da ima i dozir pumpu koja će ubacivati inhibitor u napojnu vodu. Na slici 4. prikazan je omekšivači vode posmatranom pogonu.



Slika 4. Dvostruki automatski omekšivač vode u posmatranom pogonu

U sklopu kotlovnice ugrađena je oprema za termičku pripremu napojne vode, koja se sastoji iz napojnog spremnika, čiji je volumen 14 m³ i otplinjača, čiji je volumen cca. 1,5 m³, kapacitet max. 26,4 t/h. Spremnik napojne vode i otplinjač opremljeni su sa svim potrebnim armaturama: zaporna i sigurnosno – regulaciona armatura za regulaciju temperature i nivoa vode u napojnom spremniku, sigurnosni ventil na spremniku napojne vode.

U otplinjač se dovodi kondenzat iz spremnika kondenzata preko pumpi za kondenzat i omekšana voda iz omekšivača vode. Regulacija protoka pare koja se dovodi u spremnik napojne vode vrši se preko regulatora temperature bez pomoćne energije sa temperaturnom sondom. Temperatura na

sondi je podešena na potrebnu temperaturu napojne vode. Regulacija nivoa vode u napojnom spremniku se vrši nivo sondama, koje uključuju i isključuju pumpe za kondenzat i otvaraju ili zatvaraju elektromagnetni ventil iza omekšivača vode. Spremnik napojne vode i otplinjač izolovani su toplinskom izolacijom. Zbog odstranjivanja gasova iz napojne vode vrši se termička priprema napojne vode. Temperatura napojne vode treba da bude cca. 105 °C. Temperatura napojne vode se mjeri i nalazi se u potrebnim vrijednostima.

Na slici 5. prikazan je spremnik napojne vode sa otplinjačem u posmatranom pogonu.



Slika 5. Spremnik napojne vode sa otplinjačem u posmatranom pogonu

Na slici 6. je prikazan ventil za uzorkovanje vode na kotlu u posmatranom pogonu.



Slika 6. Ventil za uzorkovanje vode na kotlu posmatranom pogonu

Odmuljivanje i odsoljavanje kotlova u posmatranom pogonu vrši se automatski, a na kotlovima je ugrađen i ventil za ručno odmuljivanje koji se koristi po potrebi. Odmuljivanje kotlova vrši se automatskim aktiviranjem samozatvarajućeg odmuljnog ventila (sredstvo za upravljanje-komprimirani zrak), preko vremenski upravljane jedinice sa podesivim vremenima impulsa i pauze. Radi sprječavanja pojave smetnji na kotlu zbog uparavanja kotlovske vode, kao i radi izbjegavanja nastanka šteta na kotlu rada povećanja koncentracije soli u kotlu, ugrađena je i specijalna automatika za odsoljavanje. Odvođenjem određene količine kotlovske vode, tačno po potrebi, štedi se značajna količina napojne vode, energije i hemikalija [14]. Na slici 7. su prikazani automatski i ručni ventili za odmuljivanje kotlova posmatranom pogonu.

Otvor za odsoljavanje nalazi se u ravni slobodne površine vode u kotlu. Automatski uređaj za odsoljavanje sadrži elektrodu za mjerenje vodljivosti i elektronsku upravljačku jedinicu sa pokazivanjem vodljivosti i dojavom za granični slučaj. Ova automatika samostalno reguliše vodljivost kotlovske vode, koja se zbog uparavanja mijenja. Kod povećanja vodljivosti iznad neke vrijednosti vodljivosti, prethodno podešene u regulatoru, otvara se ventil i odvodi kotlovsku vodu obogaćenu sa soli. Kod daljnjeg porasta vodljivosti, iznad neke maksimalno dozvoljene granične vrijednosti, dolazi do signaliziranja. Kad je vodljivost ispod minimalne granične vrijednosti, odnosno kad je kotlovsko postrojenje van pogona, zatvara se ventil za odsoljavanje.

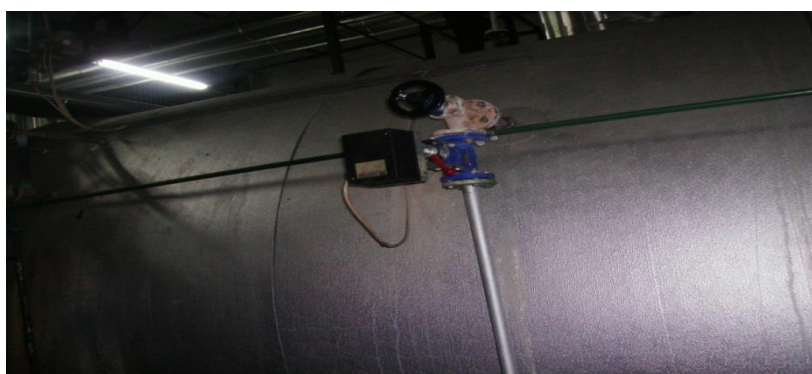


Slika 7. Automatski i ručni ventili za odmuljivanje kotlova u posmatranom pogonu



Slika 8. Uređaj za mjerenje i regulaciju vodljivosti kotlovske vode

Na slikama 8. i 9. su prikazani uređaj za mjerenje i regulaciju vodljivosti kotlovske vode i ventil za odsoljavanje kotla u posmatranom pogonu.



Slika 9. Ventil za odsoljavanje kotla

5 Provjera kvaliteta kotlovske vode u posmatranom pogonu

Kako bi kotlovska voda imala zadovoljavajući kvalitet, potrebno je svakodnevno provjeravati tvrdoću, alkalitet i pH vrijednost vode na odgovarajućim mjestima u ciklusu. Mjerenja tj. laboratorijska kontrola prethodno navedenih parametara se vrši u omekšivaču vode, rezervoaru kondenzata, rezervoaru napojne vode i kotlovima i to dva puta dnevno. Izmjerene vrijednosti moraju biti u propisanim granicama. U tabeli 1. prikazane su maksimalne dozvoljene vrijednosti parametara koji utiču na kvalitet kotlovske vode, definisanih prema proizvođaču kotlovske opreme u posmatranom pogonu.

U tabeli 2. su prikazane vrijednosti istih parametara, dobijene laboratorijskim mjerenjima u laboratoriji u posmatranom pogonu.

Poređenjem podataka iz tabela 1 i 2, može se vidjeti da su izmjerene vrijednosti parametara uglavnom u dozvoljenim granicama, osim pH vrijednosti za rezervoar kondenzata gdje je izmjerena vrijednost 8,24, a trebala bi da bude unutar intervala 8-8,20, kao i pH vrijednost za omekšivač gdje je izmjerena vrijednost 8,00 a trebala bi da bude u intervalu 6-7. Ove razlike ukazuju na to da je

potrebno izvršiti dodatnu provjeru da li se potrebna količina soli ubacuje u omekšivač prilikom regeneracije.

Tabela 1. Maksimalne dozvoljene vrijednosti parametara vode u kotlovnici prema proizvođaču kotlovske opreme u posmatranom pogonu

Vrsta opreme	Tvrdoća [°dH]	Alkalitet	pH vrijednost
Rezervoar kondenzata	0,03	0,0	8 – 8,2
Omekšivač	0,03	0,0	6 – 7
Rezervoar napojne vode	0,03	16,0	8 – 9
Kotlovi	0,03	800	10 – 12

Tabela 2. Izmjerene karakteristike vode u kotlovnici dobijene u laboratoriji posmatranog pogona

Vrsta opreme	Tvrdoća [°dH]	Alkalitet	pH vrijednost
Rezervoar kondenzata	0,01	0,0	8,24
Omekšivač	0,01	0,0	8,00
Rezervoar napojne vode	0,01	8,0	9,00
Kotao 1	0,01	360	11,84
Kotao 2	0,01	368	11,80

6 Zaključak

Voda koja se koristi u termoenergetskim postrojenjima mora da bude prethodno podvrgnuta hemijskoj pripremi, kako bi se odstranile štetne primjese koje negativno utiču na rad ovih postrojenja. Primjese koje treba ukloniti smanjuju efikasnost termoenergetskih postrojenja u smislu efikasnog prenosa toplote, usljed taloženja kamenca i stvaranja mulja. Usljed prisustva štetnih primjesa ubrzava se i korozija ovih postrojenja, smanjuje radna pouzdanost i radni vijek postrojenja. Zbog toga je potrebno izvršiti hemijsku i termičku pripremu vode koja se koristi za proizvodnju pare u parnim kotlovima. Takođe, potrebno je vršiti oduljivanje i odsoljavanje kotlova, kako bi iz kotla izašao jedan dio vode i sa tom vodom primjese koje negativno utiču na rad kotla.

7 Literatura

- [1] **Gajić A., M.Tomić, Lj. Pavlović, M. Pavlović**, „Kvalitet vode kao jedan od mogućih uzročnika korozije u termoenergetskim postrojenjima“, Zaštita materijala 51 broj 1, www.sitzam.org.rs/zm/2010/No1/ZM_51_1_29.pdf, 2010.
- [2] **Gajić A., M.Tomić, Lj. Pavlović, M. Pavlović**, „Uticaj kvaliteta vode na pouzdanost rada kotlovskih postrojenja“, Hem. ind. 64 (4) 311–317, <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0367-598X/2010/0367-598X1004311G.pdf>, 2010.
- [3] **Vuković B., S. Milić**, „Kotlovi za mašiniste, rukovaoce i ložace“, Beograd, 1976.
- [4] **Fejzić J.**, „Uticaj kvaliteta napojne vode na rad kotlovskog postrojenja“ Ceteor
- [5] **Stošić N.**, „Kotlovi“, Mašinski fakultet Sarajevo, 1987.
- [6] **Jankes G., M. Stamenić, A. Jovanović**, „Odmuljivanje i odsoljavanje industrijskih kotlova“, Bilten, MEEIS, Oblast Gazdovanje energijom, Beograd,
- [7] Boiler Blowdown Heat Recovery Project Reduces Steam System Energy Losses at Augusta Newsprint, Office of industrial technologies energy efficiency and renewable energy U.S. Department of energy, 2002.

- [8] **Pirić R., S. Delalić. R. Fazlić, S. Begić, S. Nezirović, A. Kovačević, R. Softić, I. Alić**, „Termoenergetika“, Rudarski institut Tuzla d.o.o., Tuzla, 1997.
- [9] **Bogner M., M. Isailović**, „Termotehnička i termoenergetska postrojenja“, ETA, Beograd, 2006.
- [10] **Vučković G, G. Ilić, M. Vukić, G. Stefanović**, “Preliminarna energetska revizija kotlovskeg postrojenja u fabrici Duvanska industrija „Vranje””, Mašinski fakultet Niš, 2012.
- [11] Uredba o uslovima ispuštanja otpadnih voda u prirodne recipijente i sisteme javne kanalizacije, Službene novine FBiH broj 70/06, 2016.
- [12] **Fežić J., I. Buljubašić, S. Eljšan**, “Načini poboljšanja energetske i resursne efikasnosti pri proizvodnji pare za potrebe pivarske industrije”, Tehnika, godina LXXIII, no. 5, pp. 658-664, 2018.
- [13] **Fežić J.** „Mogućnosti uštede vode i iskorištenja otpadne toplote iz procesa odmuljivanja i odsoljavanja industrijskih parnih kotlova”, Međunarodni kongres o procesnoj industriji Procesing 35, Beograd, 2022. pp. 183-193
- [14] **Fežić J.**, „Poboljšanje resursne efikasnosti u proizvodnji industrijske pare“, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, 2014.

NOVE I NAPREDNE TEHNOLOGIJE, BUDUĆIH IZAZOVA U POSTROJENJIMA ZA PREČIŠĆAVANJE VODA U INDUSTRIJI ČELIKA

NEW AND ADVANCED TECHNOLOGIES OF THE FUTURE CHALLENGES IN THE STEEL INDUSTRY'S WATER TREATMENT PLANTS

Jovana GRADINAC^{1*}, Aleksandar JOVOVIĆ²

¹ Student doktorskih nauka, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

² Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

Voda je osnovna životna potreba i može izgledati nezamislivo zamisliti život bez nje. Uticaj na životnu sredinu, zajedno sa društvenim i ekonomskim uticajem tradicionalnih tretmana vode u čeličanicama i neizbežnom činjenicom nestašice vode, vode i pokreću pomak ka novoj paradigmi u tretmanu vode. Danas se mnoge zajednice i zemlje približavaju granicama svojih raspoloživih zaliha vode i zbog toga se mnoge fabrike čelika suočavaju sa velikim problemom sa dostupnošću vode. Iako se recirkulacija i ponovna upotreba vode praktikuje u mnogim zemljama širom sveta, trenutni nivoi ponovne upotrebe čine mali deo ukupne zapremine proizvedenog industrijskog efluenta. Dodatno zadovoljavaju svoje rastuće potrebe vodosnabdevanja, zajednice razmatraju druge netradicionalne izvore koji bi mogli da dovedu do uštede vode. Recirkulacija vode i njeno ponovno korišćenje postali su atraktivna opcija za očuvanje i proširenje raspoloživog vodosnabdevanja potencijalnom primenom različitih rešenja zasnovanih na biološkim, hemijskim i mehaničkim rešenjima. Pošto su ovi trendovi novi razvoj u oblasti recirkulacije i ponovnog korišćenja vode, postoji veliki broj istraživanja povezanih sa ovim temama. Ovde je predloženo istraživanje potrebno da se bolje razumeju problemi prisutni u tradicionalnim postrojenjima za prečišćavanje vode u industriji za proizvodnju čelika, da se predlože i objasne inovativne tehnologije, koje unapređuju tradicionalna rešenja, da se razviju alati upotrebljivi unutar postrojenja za prečišćavanja voda, sprovođenjem uspešnih projekata recirkulacije i ponovne upotrebe vode.

Ključne reči: industrija čelika, postrojenja za prečišćavanje vode, ušteta vode, inovativna rešenja.

Water is a basic necessity of life, and it may seem inconceivable to imagine living without it. The environmental impact, together with social and the economic impact of past and traditional water treatments in the steel industry plants and inevitable fact of water scarcity are leading and driving a shift to a new paradigm in water treatments. Nowadays, many communities and countries are approaching the limits of their available water supplies and because of that, many steel industry plants are facing a big problem with water availability. Although water reclamation and reuse is practiced in many countries around the world, current levels of reuse constitute a small fraction of the total volume of industrial effluent generated. In addition, to meet their growing water supply needs, communities are considering other non-traditional sources of water which could lead to water saving. Water reclamation and its reuse have become an attractive option for conserving and extending available water supply by potentially applying different solution based on biological, chemical and mechanical improved solutions. Since these trends are emerging developments in the field of water reclamation and reuse, there are a number of research needs associated with these topics. Here proposed research is needed to better understand the issues present in traditional water treatment plants

* Corresponding author, e-mail: jgradinac23@gmail.com

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Hemijska industrija".

in steel industry plants, to propose and explain innovative technologies, which are improving traditional solutions of the water treatment plants, and to develop tools and other assistance for the steel industry plants to implement successful water reclamation and reuse projects.

Keywords: *steel industry, water treatment plants, water improvement, water savings, innovative solutions.*

PRIMENA MEMBRANSKIH TEHNIKA U PROCESIMA PRIPREME VODE ZA INJEKCIJE U FARMACEUTSKOJ INDUSTRIJI

APPLICATION OF MEMBRANE TECHNIQUES IN THE PROCESSES OF PREPARATION OF WATER FOR INJECTIONS IN THE PHARMACEUTICAL INDUSTRY

Kosana POPOVIĆ*, **Mirjana ANTONIJEVIĆ-NIKOLIĆ**,
Jelena ĐURIČIĆ-MILANKOVIĆ, **Roland ANTONIĆ**

Akademija strukovnih studija Šabac,
Odsek za medicinske i poslovno-tehnološke studije, Šabac

Voda je ključna komponenta u različitim operacijama u farmaceutskoj industriji. Obično se koristi kao sirovina, sastojak i rastvarač u preradi, formulaciji i proizvodnji farmaceutskih proizvoda, aktivnih farmaceutskih supstanci, međuproizvoda i analitičkih reagensa, kao i u aplikacijama za čišćenje (pranje opreme, ispiranje kontejnera).

Voda koja se koristi u farmaceutskoj industriji mora da ispunjava zahteve kvaliteta koji su propisani standardima navedenim u farmakopeji. Za farmaceutske svrhe upotrebljavaju se vode različitog stepena čistoće, neke zahtevaju ekstremnu kontrolu kvaliteta, a druge ne. Za farmaceutsku industriju, za različite namene, od primarnog značaja je proizvodnja vode propisanog kvaliteta.

Prema Evropskoj farmakopeji, voda za injekcije se proizvodi ili destilacijom ili postupkom prečišćavanja koji je ekvivalentan destilaciji. Pogodna je reversna osmoza, koja može biti jednostruka ili dvostruka, u kombinaciji sa drugim pogodnim tehnikama kao što su elektrodejonizacija, ultrafiltracija ili nanofiltracija.

Membranske tehnike za proizvodnju vode za injekcije uključuju reversnu osmozu u kombinaciji sa sekundarnom membranom, kao što je ultrafiltracija. Jedinice za reversnu osmozu koriste polupropustljive membrane koje uklanjaju iz vode većinu rastvorenih jona, organskih materija i čestica. Ultrafiltracija se koristi kao završni korak u sistemu za prečišćavanje vode za injekcije, kako bi se uklonila bilo kakva bioopterećenja i endotoksini koji još uvek mogu biti prisutni u struji vode.

Upoređivanjem energetske, prostorne i operativne troškove proizvodnje vode za injekcije membranskim tehnikama i destilacijom, membranske tehnike su u prednosti.

Sistemi za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vode treba da budu projektovani, instalirani, pušteni u rad, kvalifikovani i održavani kako bi se obezbedila pouzdana proizvodnja vode za injekcije odgovarajućeg kvaliteta. Validacija i kvalifikacija sistema za prečišćavanje, skladištenje i distribuciju vode su osnovni deo DPP (Dobre proizvođačke prakse) i sastavni su deo DPP inspekcije.

Ključne reči: *Farmakopeja, voda za injekcije, membranske tehnike, reversna osmoza, ultrafiltracija*

Water is a key component of different operations in the pharmaceutical industry. It is commonly used as a raw material, ingredient and solvent in the processing, formulation and production of pharmaceutical products, active pharmaceutical substances, intermediates and analytical reagents as well as in cleaning applications (washing equipment, rinsing containers).

Water used in the pharmaceutical industry must meet quality requirements as indicated in standards published by the Pharmacopeia. There are different grades of water used for pharmaceutical purposes, some requiring extreme quality control and others not. The production of water of prescribed quality for various purposes is of primary importance in the pharmaceutical industry.

* Corresponding author, e-mail: kosanal@gmail.com

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Procesna tehnika".

According to the European Pharmacopoeia, water for injections is produced either by distillation or by a purification process that is equivalent to distillation. Reverse osmosis, which may be single-pass or double-pass, coupled with other suitable techniques such as electro-deionisation, ultrafiltration or nanofiltration, is convenient.

Membrane techniques for the production of water for injection include reverse osmosis combined with a secondary membrane such as ultrafiltration. Reverse osmosis units use semipermeable membranes which remove most of the dissolved ions, organics and particulate matter from water. Ultrafiltration is used as a final step of a system for purification water for injections to remove any bioburdens and endotoxins that may still be in the water stream. By comparing an energy, space and operational costs of producing water for injections by membrane techniques and distillation, membrane techniques are at an advantage.

Water production, storage and distribution systems should be designed, installed, commissioned, qualified and maintained to ensure the reliable production of water for injections of an appropriate quality. Validation and qualification of water purification, storage and distribution systems are a basic part of GMP (Good manufacturing practice) and form an integral part of GMP inspection.

Ključne reči: *Pharmacopoeia, water for injections, membrane techniques, reverse osmosis, ultrafiltration*

RESULTS OF RESEARCH ON SPRAY DRYER

REZULTATI ISTRAŽIVANJA NA SPREJ SUŠARI

Jasna TOLMAČ*, Slavica PRVULOVIĆ, Saša JOVANOVIĆ,
Milan MARKOVIĆ, Dragiša TOLMAČ

¹ University of Novi Sad, Technical faculty "Mihajlo Pupin", Zrenjanin

Sprej sušare se veoma često primenjuje u hemijskoj i prehrambeno - prerađivačkoj industriji. Ova metoda sušenja podrazumeva suspenziju sa sadržajem oko (30 do 40) % praškaste materije. Period sušenja u većini slučajeva je samo nekoliko sekundi. Sredstvo za sušenje je topli vazduh. U radu su prikazana eksperimentalna i teorijska ispitivanja sprej sušare skrobne suspenzije sa 30% i 40% suve materije. Prenos toplote se ostvaruje konvekcijom, zahvaljujući principu sušenja zasnovanom na direktnom kontaktu zagrejanog vazduha i vlažnog materijala. Tokom tog procesa dolazi do intenzivne razmene toplote i mase. Na osnovu rezultata istraživanja dati su modeli sušenja – temperaturna kriva sušenja, kriva brzine sušenja i temperaturna kriva vlažnog materijala.

Ključne reči: sprej sušara, skrob, modeli sušenja, vlažnost materijala, temperatura sušenja

The spray dryer is very often applied in chemical and food - processing industries. This drying method includes suspension - spraying with the contents about (30 to 40) % of powdery matter. The drying period in most cases is only several seconds. The drying agent is the warm air. The paper presents experimental and theoretical investigations of spray drying of starch suspension with 30% and 40% dry matter. Heat transfer is accomplished through convection, thanks to the principle of drying based on direct contact between the heated air and moist material. During that process, intensive heat and mass exchange take place. Based on the research results, drying models are given - drying temperature curve, drying speed curve and temperature curve of wet material.

Key words: spray dryer, starch, models of drying, material moisture, drying temperature

1 Introduction

Different suspension of certain products reacts with uneven drying, which depends on the properties of the material that is dried. It is very difficult to recommend a unique technique of the spray driers. In comparison with other systems, spray drying requires a relatively small storage space. Service and maintenance are very simple and is performed with little labor. These advantages, as well as economical heat transfer provides the optimal cost of the final dried product. Drying time in most cases only a few seconds, and can successfully dry heat sensitive products such as vitamins, chemical and food products and others, who better to submit a high temperature in a short period of time, but lower temperatures for a longer period of time [1 - 3].

For substances such as suspension of various powdery materials with (30 to 40) % of dry matter, spray drying kilns is quality solution to the problem of drying. There have been many attempts at formulating a mathematical description of spray drying since the 1950s. In spray drying there are many phenomena which are difficult to represent in the form of a mathematical model. For many years polydispersity of spray, entrainment effects, or problems of internal heat and mass transfer in the disperse phase have been inadequately considered in such models. According to [4 - 6], the solution of the spray drying model is also presented, taking into account the axial and tangential distribution of air velocities.

Drying systems based on the principle of heat transfer by convection, such as spray driers and pneumatic dryer have been treated in the literature [7 - 14]. There is still a considerable demand for simple models which can be used to optimize the process, to minimize its costs, and to evaluate product quality [11].

* Corresponding author, e-mail: jasnatolmac@yahoo.com

2 Experimental apparatus and details

The paper presents the results of experimental research when drying a 30 - 40 % mass solution of starch and water, on a spray dryer. Spraying is mono dispersive and it is assumed that the temperature and humidity are evenly distributed in the cross section of the spray.

Starch suspensions are prepared by adding an appropriate amount of dry matter corn starch, with a particle size of 2 to 20 μm (99%) and a single particle fraction sizes below 1 μm (1%), in distilled water.

Figure 1, shows a schematic of the experimental equipment of spray dryer in which the experiments took place. In Table 1, is given the basic characteristics of the spray dryer.

Table 1. Basic characteristics of spray dryer

Name	Units	Dimensions
Diameter chamber spray dryer	mm	5000
Total chamber height	mm	5500
Fan	m^3h^{-1}	9750 - 15400
Heater	kW	160
Cyclone diameter	mm	1400

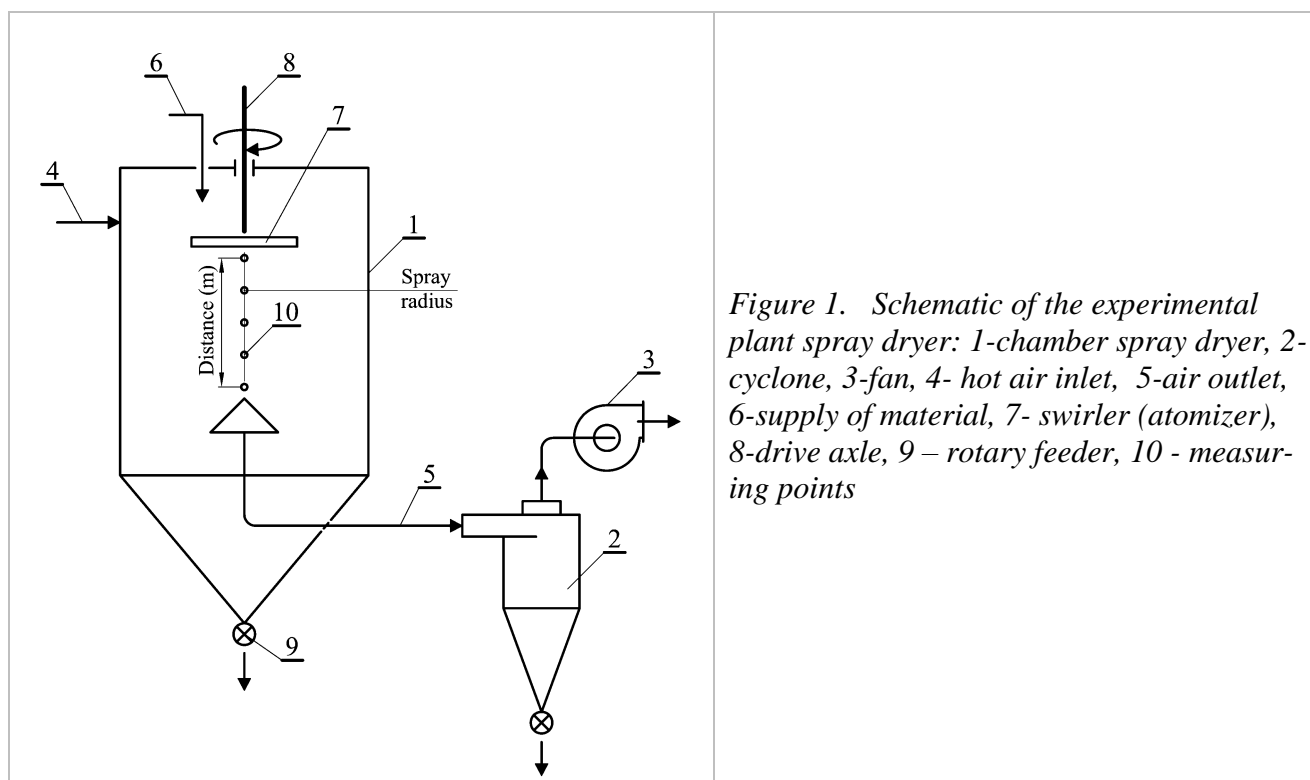


Figure 1. Schematic of the experimental plant spray dryer: 1-chamber spray dryer, 2-cyclone, 3-fan, 4- hot air inlet, 5-air outlet, 6-supply of material, 7- swirler (atomizer), 8-drive axle, 9 – rotary feeder, 10 - measuring points

Transport of hot air is performed by means of a fan (3) can be regulated in the range (9750-15400) m^3h^{-1} . Warm air - heater (4), can be regulated in the range (130 to 160) kW. The material is drying leads through the entrance (6). Material for drying empties into the atomizer (7). Axle (8), given by electric propulsion.

Atomizer (7) rotates a large number of rpm $n = 3800 \text{ min}^{-1}$, and thus made dispersal of the liquid solution in small droplets. Aerosols are obtained on a 320 mm diameter rotating disk with blades. Spray speed is 63.5 ms^{-1} .

In contact with hot air drying is done dispersed droplets and is carried out intensive exchange of heat and mass. Air flow to the fan (3), can be regulated, so that can be achieved in the drying air velocity $V = (0.14 \text{ to } 0.21) \text{ ms}^{-1}$. Dried material using a rotary feeder (9), transported as a finished product. Air with dust particles are drains with piping (5), the cyclone (2). The cyclone (2), the complete separation, after which they are using fans (3), performed taking the air in the atmosphere.

3 Experimental results and discussion

Experimental investigations of water evaporation were carried out for two feed rates (157, 204 kg h⁻¹), two values of air temperature (150, 180 °C). An example of the temperature change obtained at a feed rate of 157, 204 kg h⁻¹ is shown in Figure 2.

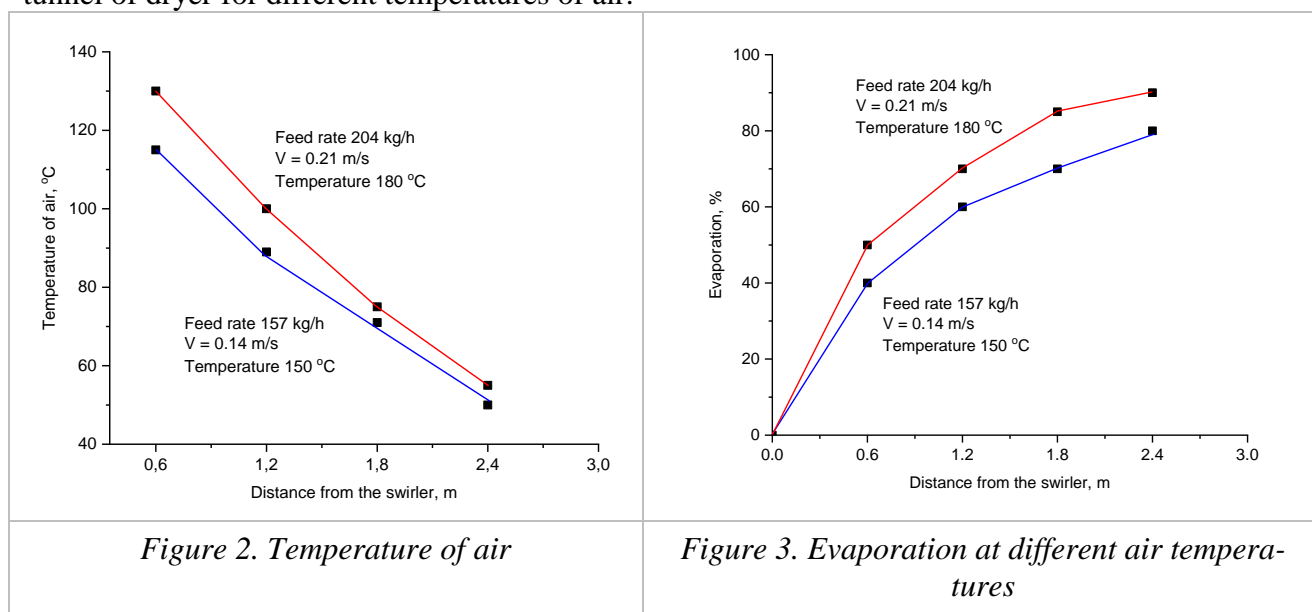
Experimental studies show the character of uniform distribution of particles depending on the distance to the atomizer in all experimental series. Changes in air and material temperature in the cross section of the dispersed material are negligible, which has been experimentally confirmed.

The absence of an air temperature gradient in the spray cross-section can be explained by the design of the experimental set-up and by process parameters. The air velocity profile in the tunnel of dryer is flat and the turbulence is low. In the study carried out by [15, 16] was observed, and obtained similar results.

The suspension of particles did not come into contact with the walls of the spray dryer, which was in accordance with the experimental observations (in all experimental tests, no wetting of the wall of the spray dryer was reported).

In Figure 2, the dependence is given changes in the temperature of air, as a function of the distance from the atomizer for the same feed rate and air flow velocity. A drop in the air temperature as a function of the distance to the atomizer is observed. Similar profiles of particular functions were obtained in many studies [17 - 19].

Experimental results shown in Figure 3, illustrate changes in the evaporation rate along the tunnel of dryer for different temperatures of air.



Air temperature has a decisive effect on the evaporation rate. The rate of addition is the parameter that determined the rate of evaporation [20]. No significant influence of the drying agent velocity on the shape of the curves discussed was observed. As the moisture content decreases, the rate of evaporation from the surface of the dried material decreases. A drop in humidity was also observed depending on the distance to the swirler. In Figure 4, the temperature curve of the wet material is given. The change in the temperature of the material is insignificant in relation to the air temperature.

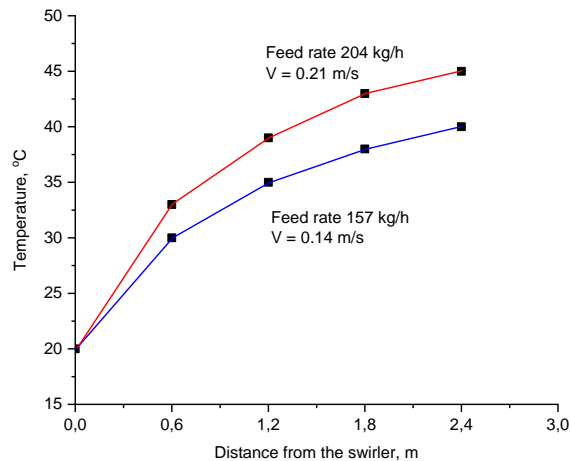


Figure 4. Temperature of material

4 Conclusion

In this paper, experimental and theoretical investigations of drying by spraying starch solution are presented. The paper presents evaporation at different temperatures, as well as drying temperature curves.

Based on the results of the research, the following was determined:

- a drop in the air temperature as a function of the distance to the atomizer is observed,
- air temperature has a decisive effect on the evaporation rate. The rate of addition is the parameter that determined the rate of evaporation,
- the change in the temperature of the material is insignificant in relation to the air temperature,
- the determined parameters of the drying regime can be considered as optimal parameters, considering that the experimental drying process obtained good quality of the dried material,
- the model presented in this paper can be used to predict many subtle phenomena that occur during spray drying, in particular at complex air flow.

The research results have practical value, because it is based on experimental data. The results of the research can serve researchers, equipment manufacturers and users of these and similar drying systems.

5 References

- [1] **Bellinghausen, R., Esper, G.J and Gehrman, D.** : Scale-up of spray driers on the basis of laboratoryscale experiments, Meet. of the EFChE Drying Working Party, Utrecht, 1993.
- [2] **Langrish, T.A.G. and Zbiciński, I.** : The effects of air inlet geometry and spray cone angle on the wall deposition rate in spray dryers, Trans. Inst. Chem. Eng., 72 (A), p. 420-430, 1994.
- [3] **Larrgrish, T.A.G., Oakley, D.E., Keey, R.B., Bahu, R.E. and. Hutchinson, C.A.** : Time-dependent flow patterns in spray dryers, Trans. Inst. Chem. Eng., 71 p.355-360, 1993.
- [4] **Indarto, A., Halim, Y., Partoputro, P.** : Pneumatic Drying of Solid Particle: Experimental and Model Comparison, Experimental Heat Transfer, Vol.20, pp.277-287, 2007.
- [5] **Islam, M., Marks, B., Bakker – Arkema, F.** : Optimization of commercial ear-corn dryers, Agricultural Engineering International the CIGR E-journal, Vol.VI, pp.15-22, 2004.
- [6] **Prvulovic, S., D. Tolmac, D., M. Lambić, M.** : Determination of energetics characteristics of convection drying place on pneumatic transportation material. Journal Process Technique, No.1, pp.70-74, SMEITS, Belgrade, 2001.
- [7] **Tolmac, D.** : Introduction to the Theory of Drying with Examples from Practice, TechnicalFaculty, Zrenjanin, Serbia, 2007.

- [8] **Prvulovic, S., Tolmac, D., Lambic, M.** : Convection Drying in the Food Industry, Agricultural Engineering International the CIGR E-journal, Vol.IX, pp.1-12. 2007.
- [9] **Prvulovic, S., Tolmac, D., Radovanovic, Lj.** : Researching results energetics characteristics convection drying, *Strojniski Vestnik (Journal of Mechanical Engineering)*, Vol.54, No.9, pp.639/644, 2008.
- [10] **Tolmac, D.** : Analysis of economic work of convection starch dryers. *Journal Process Technique*, No.1, pp.20-22, SMEITS, Belgrade, 1992.
- [11] **Miura, T., Othani, S. and Maeda, S.** : Heat and mass transfer to and from sprays, in A.S.Mujumdar (ed.), *Drying'80*, Vol. 1, Hemisphere, McGraw Hill, New York, NY, p. 351-356, 198.
- [12] **Oakley, D.E. and Bahu, R.E.** : Spray/gas mixing behaviour with spray dryers, in A.S.Mujumdar and I. Filkova (eds.), *Drying 9.1*, Elsevier, Amsterdam, p. 303-313, 1990.
- [13] **Papadakis, S.E. and King, C.J.** : Air temperature and humidity profiles in spray drying. 1. Features predicted by the particle source in cell model, 2. Experimental measurements, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 27 (11) p.,2111-2123, 1988.
- [14] **Prvulovic, S., Tolmac, D., Blagojevic, Z.** : Experimental research on energetic characteristics of starch dryer, *FME Transactions*, 37 (1) p.47-52, 2009.
- [15] **Tolmac, D.** : Systems energetic parameters for starch drying in grain industry. *Journal of Energetic Technologies*, No.2, pp.11-13, Serbia Solar, 2005.
- [16] **Tolmac, D., Prvulovic, S., Radovanovic, Lj.** : Effect of heat transfer on convection dryer with pneumatic transport of material, *FME Transactions*, Vol.36, No.1, pp.45-49, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2008.
- [17] **Tolmac, D., Prvulovic, S., Blagojevic, Z.** : Energy parameters for drying starch in the grain processing industry, *Journal of Energetic Technologies*, No, 1-2, pp. (11-13), Serbia Solar, 2005.
- [18] **Verdijch, G.J.C., Weiss, M., Presig, H.A.** : Modelling of a pneumatic dryer for potato starch, *Journal of Food Engineering*, Vol. 37, pp.243-258, 1998.
- [19] **Indarto, A., Halim, Y., Partoputro, P.** : *Pneumatic Drying of Solid Particle: Experimental and Model Comparison*, *Experimental Heat Transfer*, Vol.20, pp.277-287, 2007.
- [20] **Tolmac, D., Prvulovic, S., Radovanovic, Lj.** : *Effect of Heat Transfer on Convection Dryer with Pneumatic Transport of Material*, *FME Transactions*, Vol.36, No.1, p.45-49, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2007.

PRAĆENJE PROCESA SAGOREVANJA KORIŠĆENJEM HEMILUMINISCENCIJE PLAMENA CH*

COMBUSTION MONITORING USING FLAME CH* CHEMILUMINESCENCE

Vuk ADŽIĆ*

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

Hemiluminiscencija je emisija svetlosti kao rezultat hemijske reakcije. CH hemiluminiscencija u plamenu nastaje kada molekuli ugljovodonika u plamenu reaguju sa kiseonikom da bi proizveli CH* molekule u pobuđenom stanju. Ovi pobuđeni molekuli CH* zatim spuštaju u niže energetske stanje pritom emitujući fotone svetlosti.*

Jedna od prednosti korišćenja CH hemiluminiscencije u praćenju sagorevanja je da je beskontaktna, što znači da se može koristiti za proučavanje plamena bez ometanja. To je čini idealnim alatom za proučavanje plamena na licu mesta.*

Važno je vizuelno pratiti sagorevanje i sam plamen iz nekoliko razloga:

Efikasnost: Pravi proces sagorevanja obezbeđuje efikasno sagorevanje goriva, što dovodi do manje potrošnje, uštede i što je najvažnije smanjenja zagađenja.

Emisije: Mnoga regulatorna tela zahtevaju redovne vizuelne inspekcije sagorevanja kako bi se osigurala usklađenost sa standardima bezbednosti i emisije.

Bezbednost: Vizuelni nadzor omogućava operaterima da otkriju bilo kakve abnormalne uslove sagorevanja, što može ukazivati na nepotpuno sagorevanje, uslove bogate gorivom ili druge štetne probleme.

Održavanje: Praćenje sagorevanja takođe može pomoći u identifikaciji potencijalnih problema sa održavanjem, koji mogu uticati na performanse a zahtevaju korektivne mere.

Ključne reči: sagorevanje; CH*hemiluminiscencija; monitoring; efikasnost; emisija

Chemiluminescence is the emission of light as a result of a chemical reaction. CH chemiluminescence in flames occurs when the hydrocarbon molecules in the flame react with oxygen to produce excited-state CH* molecules. These excited-state CH* molecules then decay to a lower energy state by emitting photons of light.*

One of the advantages of using CH chemiluminescence in monitoring combustion is that it's non-intrusive and non-contact, which means that it can be used to study flames without disturbing them. This makes it an ideal tool for studying flames in situ.*

It is important to visually monitor combustion and the flame itself for several reasons:

Efficiency: Proper combustion ensures that the fuel is burned efficiently, which leads to lower fuel consumption, cost savings and most importantly reduced pollution.

Emissions: Many regulatory bodies require regular visual inspections of combustion to ensure compliance with safety and emissions standards.

Safety: Visual monitoring allows operators to detect any abnormal combustion conditions, which can indicate incomplete combustion, fuel-rich conditions, or other harmful problems.

Maintenance: Monitoring combustion can also help identify potential maintenance issues, that can impact performance and require corrective action.

Key words: combustion; CH*chemiluminescence; monitoring; efficiency; emissions

* Corresponding author, e-mail: vadzic@mas.bg.ac.rs

HIDRAULIČKI UDAR U DVOFAZNYM SISTEMIMA – UZROCI, MEHANIZMI, POSLEDICE

WATER HAMMER IN TWO-PHASE SYSTEMS – CAUSES, MECHANISMS, CONSEQUENCES

Sanja MILIVOJEVIĆ*

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

Hidraulički udar u dvofaznom sistemu može biti značajno veći od udara u jednofaznom fluidnom sistemu. Njegova pojava može dovesti do havarije i ugrožavanja bezbednosti pogonskog osoblja u različitim termoenergetskim, termotehničkim i procesnim postrojenjima. Može nastati usled implorizije pri intenzivnoj kondenzaciji pare na pothlađenoj tečnosti, pri kidanju stuba tečnosti ili usled ubrzanja diskretnih masa tečnosti, kada se međusobno sudaraju čepovi ili stubovi tečnosti ili dolazi do njihovog udara o zidove cevovoda, posuda ili armature. Do hidrauličkog udara u dvofaznom fluidnom sistemu je dolazilo u termoelektranama, nuklearnim elektranama, sistemima daljinskog grejanja, kotlarnicama i rashladnim sistemima sa amonijakom. Karakteristični primeri su puštanje u pogon parovoda koji nisu dobro drenirani nakon zastoja u radu ili remonta, direktno ispuštanje pare u bazen ispunjen hladnom tečnošću, kontakt pothlađene tečnosti i pare nakon otvaranja zaporne armature, pad pritiska u napojnom rezervoaru i usisnom cevovodu napojne pumpe nakon njenog ispada. U sistemima sa hladnom vodom, nakon naglog zatvaranja ventila ili zasuna, pritisak iza pregradne armature opada, dolazi do kavitacije rastvorenog vazduha, a zatim i do kavitacije pare, što dovodi do raskidanja vodenog stuba. Reflektovani kompresioni talas pritiska dovodi do implozije gasne faze, što dovodi do povratnog hidrauličkog udara, praćenog naglim skokom pritiska. Modeliranje i numerička simulacija hidrauličkog udara u dvofaznom sistemu se pokazuju na primeru udara pothlađenog vodenog stuba pri intenzivnoj kondenzaciji pare. Razvijen je nestacionarni jednodimenzionalni termohidraulički model strujanja homogenog dvofaznog fluida. Bilansne jednačine mase, količine kretanja i energije su rešene primenom metode karakteristika. Razdelna površina između faza je određena praćenjem talasa entalpije i Lagranževim polinomom trećeg stepena za određivanje položaja razdelne površine između fiksnih numeričkih noda u strujnom polju. Primenjen je novi mehanistički pristup za predviđanje brzina faznog prelaza, zasnovan na obliku i veličini razdelne površine tečne i parne faze i termičke neravnoteže između faza. Razvijenim modelom je moguće predviđanje prostiranja talasa pritiska tokom hidrauličkog udara, kao i praćenje kretanja razdelne površine uz modeliranje faznog prelaza i nestacionarnog trenja. Model je validiran za dostupne eksperimentalne uslove hidrauličkog udara. Primećeno je značajno rasipanje eksperimentalnih podataka za iste uslove eksperimenta, što je posledica brzine promene faze i njene zavisnosti od koncentracije razdelne površine parne i tečne faze u blizini čela stuba tečnosti.

Ključne reči: hidraulički udar; dvofazni sistemi; kondenzacija; para; modeliranje

Water hammer in two-phase systems, induced by condensation in the direct contact of vapor and the subcooled liquid or by separation of subcooled liquid column, leads to intense and sudden pressure surges in the pipeline. A transient one-dimensional thermal-hydraulic model was developed to solve the single-phase or homogeneous two-phase compressible fluid flow. For prediction of the pressure waves propagation during the water hammer accident, it was necessary to extend this model with an interface tracking model, a phase transition model and a transient friction model. The governing equations: continuity, momentum and energy equations, are solved using the method of characteristics, which accurately follows the distribution of discontinuities using the first-order derivative. It has been shown that reliable prediction of pressure wave propagation depends to a large extent on the rate of condensation and evaporation. Transient friction, as well as the propagation and shape of the interface between the liquid and vapor phase, also have a significant influence. A

* Corresponding author, e-mail: smilivojevic@mas.bg.ac.rs

new mechanistic approach for predicting phase transition rates was applied, based on the shape and size of the liquid and vapor phase interface and the phase transition potential expressed through the vapor and liquid temperature difference. A good agreement was obtained with the results of numerical simulations obtained by applying the single-fluid model to the prediction of pressure wave propagation for the available experimental conditions of water hammer. A significant scattering of experimental data was observed for the same experimental conditions, which is a consequence of the rate of phase change and its dependence on the vapor and liquid interfacial area concentration near the front of the liquid column.

Key words: *water hammer; two-phase flow; condensation; vapor; modelling*

NUMERIČKO MODELIRANJE I SIMULACIJA MEŠANJA VODONIKA I VAZDUHA DA SE SPREČAVA KAŠNJENJE PALJENJA I POVRATAK BLESKA

NUMERICAL MODELLING AND SIMULATION OF HYDROGEN AND AIR MIXING TO PREVENT IGNITION DELAY AND FLASHBACK

**Marc JAEGER, Matjaž HRIBERSEK, Filip KOKALJ*,
Matej ZADRAVEC, Niko SAMEC**

Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, Maribor, Slovenia

Praktično svi stambeni i komercijalni gasni uređaji koji su danas instalirani u EU su projektovani za rad na prirodni gas. Čisto i efikasno rešenje za grijanje i proizvodnju tople vode je sagorevanje vodonika u slučaju gasnog kondenzacionog kotla. Bezbedno i stabilno sagorevanje vodonika nije jednostavno, a za siguran dizajn gasnih kondenzacionih kotlova koji koriste vodonik treba razumeti i podesiti nekoliko uticajnih parametara. U prethodno mešanom sagorevanju vodonik-vazduh postoje dva fizička problema koja treba izbegavati po svaku cenu: povratni udar (flešbek) kroz gorionik do kanala za prethodno mešanje i zakašnjeno paljenje u komori za sagorevanje. U cilju procene uticaja komercijalizovanih rješenja u fazi mešanja (kombinacija ventilator-venturi), u ovom radu je prikazan uticaj brzine rotacije na stepen mešanja u slučaju kombinacije venturi-ventilatora koja se koristi u domaćim gasnim kondenzacionim kotlovima. Prolazne, trodimenzionalne simulacije sa različitim pristupima modeliranju turbulencije su izvedene da bi se procenio stepen mešanja uzvodno od gorionika sa više otvora za vodonik.

Ključne reči: CFD; sagorevanje vodonika; mešanje; flešbek; gasni kondenzacioni kotao

Practically all residential and commercial gas appliances installed within the EU today were designed for operation with natural gas. A clean and efficient solution for heating and hot water generation is the combustion of hydrogen in case of a gas condensing boiler. Safe and stable combustion of hydrogen is not simple, and several influence parameters are to be understood for the safe design of hydrogen capable gas condensing boilers. In premixed hydrogen-air combustion, there are two physical problems that should be avoided at all costs: flashback through the burner to the premixing duct and delayed ignition in the combustion chamber. In order to evaluate the influence of commercialized mixing stages (fan-venturi combination), this paper presents the impact of the rotational velocity on the degree of mixing in case of a venturi-fan combination used in domestic gas condensing boilers. Transient, three-dimensional simulations with different turbulence modelling approaches were performed to assess the degree of mixing upstream the hydrogen capable multi-hole burner.

Key words: CFD; hydrogen combustion; mixing; flashback; gas condensing boiler

* Corresponding author, e-mail: filip.kokalj@um.si

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

MOGUĆNOSTI POVEĆANJA EFIKASNOSTI RADA MLINSKOG POSTROJENJA U CILJU OPTIMIZACIJE PROCESA SAGOREVANJA UGLJA U ENERGETSKOM PARNOM KOTLU

POSSIBILITIES FOR INCREASING EFFICIENCY OF MILLING PLANT OPERATION FOR THE PURPOSE OF OPTIMIZING COMBUSTION PROCESS WITHIN POWER STEAM BOILER

Ognjen STAMENKOVIĆ^{1*}, Goran STUPAR¹, Dragan TUCAKOVIĆ¹,
Andrija JANKOVIĆ²

¹ Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

² JP „Elektroprivreda Srbije“, Služba za racionalizaciju
i optimizaciju proizvodnje, Beograd

U cilju povećanja kapaciteta bloka A6 termoelektrane „Nikola Tesla” tokom rekonstrukcije 2011. godine izvršene su modifikacije na mlinskim postrojenjima za pripremu ugljenog praha. Povećanje produkcije pare energetskog parnog kotla zahtevalo je povećanje kapaciteta mlevenja na svih 6 ventilatorskih mlinova. Izmene na gorionicima za ugljeni prah, elementima za distribuciju aerosmeše u kanalu aerosmeše kao i radne ugaone brzine radnog kola ventilatorskog mlina povećale su kapacitet mlevenja uglja u određenoj meri. Međutim, izvršene izmene prouzrokovale su povećanje protoka primarnog vazduha ka mlinskim postrojenjima i time redukovale količinu sekundarnog vazduha koji se dovodi u gorionike ispod preporučenih vrednosti što je negativno uticalo na process sagorevanja u ložištu parnog kotla. U ovom radu prikazani su rezultati termičkih proračuna predmetnog energetskog parnog kotla kao i aerodinamičkih proračuna pripadajućih mlinskih postrojenja za postojeće radne uslove. Proračunske vrednosti prikazane u ovom radu validirane su pomoću rezultata izvršenih merenja na predmetnom kotlu u postojećim radnim uslovima. U radu je analiziran uticaj rada mlinskih postrojenja u ovim uslovima na rad parnog kotla u celini. U radu su takođe date smernice za redukovanje negativnih efekata prethodno izvršenih modifikacija. Pozitivni efekti ovako predloženih mera, kao nova radna tačka sistema, rezultat su dopunskih izvršenih analiza termičkih i aerodinamičkih procesa u parnom kotlu i mlinskom postrojenju.

Ključne reči: mlinsko postrojenje; sagorevanje lignita; mlevenje uglja; aerodinamički proračun

During retrofits taken on power unit “Nikola Tesla” A6 in 2011 for the purpose of increasing its overall production capacity certain modifications on milling plants have been applied. Enlargment of power steam boiler production capacities included increase in milling plant output with existing number of mills in operation. Changes made on arrangement of pulverized coal burners, geometry of mill gaseous mixture distribution elements inside mill gaseous mixture duct as well as operational rotational speed of mill impeller led to increase of milling capacity to the certain extent. Consequently, applied modifications resulted in higher primary air flow required for the purpose of regulating mill gaseous mixture temperature, thus, reducing secondary airflow in burners below recommended level which affected combustion process within boiler furnace. In this paper results of thermal calculations of power steam boiler and aerodynamic calculations of milling plant for the present operating conditions have been presented. Calculations results has been validated by use of measurements taken on site in present operating conditions. Impact on overall boiler operation made by modifications taken on milling plants has been discussed in details. In text new measures, which would reduce

* Corresponding author, e-mail: ostamenkovic@mas.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu “Thermal Science”.

occured negative effects, have been proposed. Positive effects of proposed measures, as new operating point of milling plant, are confirmed by the results of additionally performed thermal and aerodynamic calculations given in this paper.

Key words: *milling plant; lignite combustion; coal milling; aerodynamic calculation*

NUMERIČKE SIMULACIJE PNEUMATSKOG TRANSPORTA LETEĆEG PEPELA IZ TERMOELEKTRANE KORISTEĆI OPENFOAM

NUMERICAL SIMULATIONS OF FLY ASH PNEUMATIC CONVEYING FROM A THERMAL POWER PLANT USING OPENFOAM

Nikola KARLIČIĆ*, **Darko RADENKOVIĆ**, **Marko OBRADOVIĆ**,
Dušan TODOROVIĆ, **Aleksandar JOVOVIĆ**, **Dejan RADIĆ**
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

U radu je prikazan numerički proračun pada pritiska pri pneumatskom transportu letećeg pepela iz termoelektrane. Cilj istraživanja je verifikacija razvijenog modela upoređivanjem numeričkih rezultata sa merenjima pritiska duž cevovoda. Numerički model je razvijen na osnovu obimnih eksperimentalnih istraživanja sprovedenih na sistemu pneumatskog transporta pepela kolubarskog lignita, velikog kapaciteta i velike dužine. Ojler-Ojlerov pristup omogućava sveobuhvatno istraživanje složenih pojava pri pneumatskom transportu, uzimajući u obzir dvofaznu prirodu sistema i pružajući mogućnost sagledavanja ponašanje čestica, pada pritiska i drugih ključnih parametara. Formiranje mreže za Ojler-Ojlerove simulacije u OpenFOAM-u predstavlja složen proces, što uključuje definisanje računskog domena, generisanje odgovarajuće mrežne strukture i postavljanje odgovarajućih graničnih uslova i za gasnu i za čvrstu fazu. Potrebno je pažljivo razmatranje da bi se što vernije predstavila geometrija i definisali svi parametri u pneumatskim transportnim sistemima. Ojler-Ojlerove numeričke simulacije pneumatskog transporta pepela u kosoj cevi su sprovedene u OpenFOAM-u, koristeći paket twoPhaseEulerFoam solver. Numerička mreža je formirana kao O-mreža za deonicu cevovoda dužine 90 m, prečnika 0,2604 m i nagiba od 1,885 °. Sve ćelije mreže su značajno veće od prečnika čestica pepela. Rezultati numeričkih simulacija u pogledu pada pritiska se veoma dobro slažu sa eksperimentalnim rezultatima za ispitivani slučaj. Iako je Ojler-Ojlerov model izutno složen u smislu definisanja graničnih uslova, pokazao se kao pouzdan za za razmatrani slučaj, odnosno za razmatrane uslove.

Key words: leteći pepeo lignita, pneumatski transport, pad pritiska, numeričke simulacije

This paper presents a numerical calculation of pressure drop in pneumatic conveying of fly ash from a thermal power plant. The objective of this research is to verify the developed model by comparing the numerical results with pressure measurements taken along the pipeline. The numerical model is developed based on extensive experimental research conducted on a high-capacity and long-distance pneumatic conveying system for Kolubara lignite ash. The Euler-Euler approach enables a comprehensive investigation of the complex dynamics involved in pneumatic conveying, considering the two-phase nature of the system and providing valuable insights into the particle behavior, pressure drop, and other key parameters. Creating a mesh for Euler-Euler simulations in OpenFOAM can be a complex process. It involves defining the computational domain, generating a suitable mesh structure, and ensuring proper boundary conditions for both the gas and solid phases. Careful consideration is required to accurately represent the geometry and capture the relevant flow physics in pneumatic conveying systems. In this study, Euler-Euler numerical simulations of pneumatic conveying of ash in an inclined pipe are conducted in OpenFOAM, using twoPhaseEulerFoam solver. Numerical mesh is generated as an O-grid for a pipeline section with a length of 90 m, a diameter of 0.2604 m, and an inclination of 1.885 °. All mesh cells are significantly larger than the ash diameter.

* Corresponding author, e-mail: nkarlicic@mas.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu "Thermal Science".

Numerical simulations results regarding pressure drop, particle volume fraction and bulk air velocities agree very well with the experimental results, for the examined case. Although Euler-Euler model is complex in terms of necessary closure models, it proved itself as reliable for simulated conditions.

Key words: *lignite fly ash, pneumatic conveying, pressure drop, numerical modelling*

ИНСТАЛАЦИЈЕ ЗА ЕТАЛОНИРАЊЕ ПРОТОКОМЕРА ЗАПРЕМИНСКО-ТЕЖИНСКОМ МЕТОДОМ ВИСОКЕ ТАЧНОСТИ

Дејан ИЛИЋ*

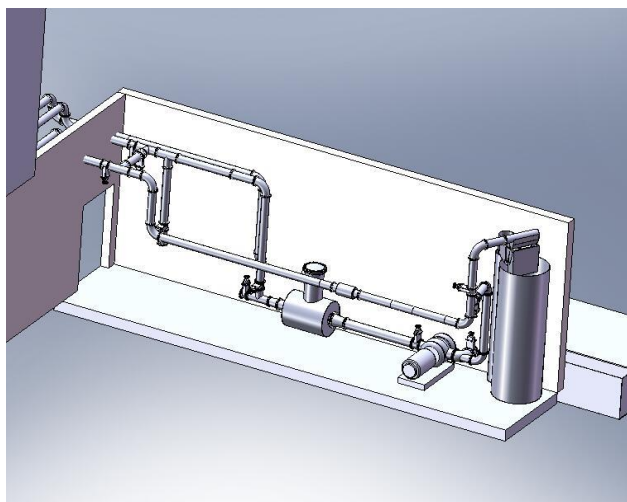
Универзитет у Београду, Машински факултет, e-mail:

За мерење протока користе се различите врсте протокомера (мерила протока): пригушнице (бленде, млазнице, Вентуриметри), ротаметри, турбински, електромагнетни, ултразвучни, вртложна мерила, Кориолисова мерила, итд. Једна од најважнијих карактеристика протокомера је његова тачност, поред: поновљивости, линеарности, хистерезиса, опсега мерења, време одзива, итд. Протокомери су веома битни делови флуидних система, тако да је њихово еталонирање неопходно. Неки од препоручених временских периода између два еталонирања су: шест месеци за ултразвучне протокомере, годину дана за електромагнетне протокомере, итд. Ако се протокомер чешће користи, овај период може бити и краћи. Да би се одредила највећа могућа тачност протокомера, потребно га је еталонирати на адекватној инсталацији. Неопходно је да инсталација за прецизно еталонирање протокомера испуни захтеве релевантних стандарда (норми): квалитетна инсталација, одговарајућа методологија еталонирања, употреба мерних инструмената високе тачности и задовољавајућа мерна несигурност. Када је инсталација прецизно конструисана, одржавана и коришћена, може се постићи грешка мерења од $\pm 0,1\%$ до $\pm 0,2\%$ (са вероватноћом од 95 %).

У овом раду су приказане три инсталације за еталонирање протокомера запреминско-тежинском методом, које се налазе на Катедри за хидрауличне машине и енергетске системе, Машинског факултета Универзитета у Београду. Пројектоване су и изведене инсталације за еталонирање протокомера (мерење протока течности у затвореним цевоводима) до: 200 l/s (I-1), 50 l/s (I-2) и 10 l/min (I-3).



а)



б)

Слика 1. Опитно постројење I-1 за еталонирање протокомера а) изглед дела опитног постројења – волуметријски резервоар са дивертером на врху б) 3D приказ опитног постројења

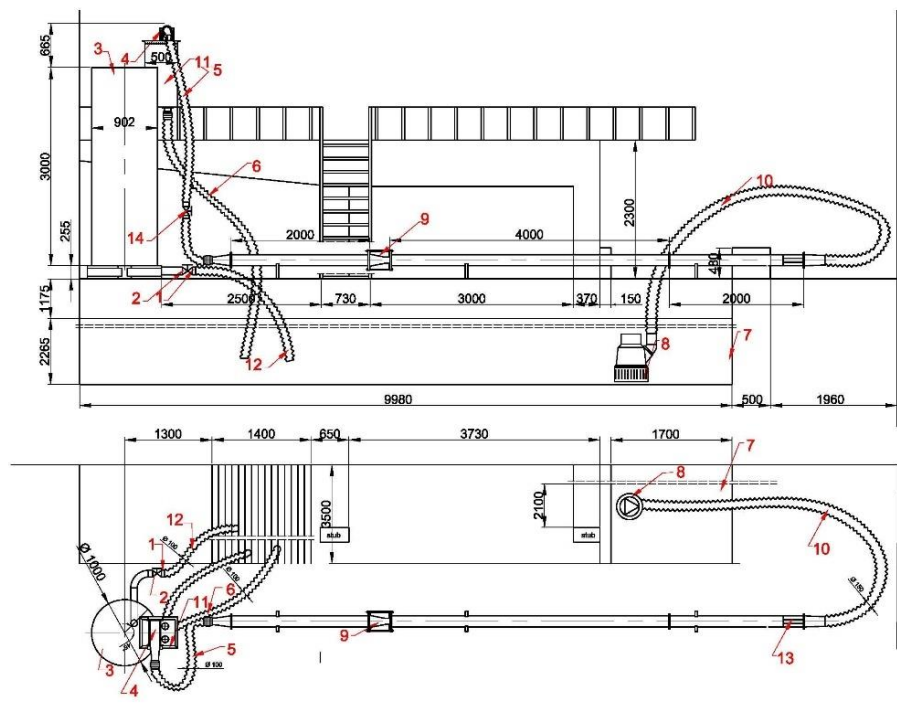
Примењена је модификована мерна методологија, која се првенствено заснива на стандардима ISO 4185 (тежинска метода) и ISO 8316 (волуметријска метода). Не постоји ограничење за примену ових метода, али у пракси у хидрауличким лабораторијама

* Corresponding author, e-mail: dilic@mas.bg.ac.rs

максимални запремински проток је до $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Максимални запремински проток на инсталацијама I-1 и I-2 су одређени према максималној корисној запремини њихових волуметријских резервоара и минимално дозвољеном времену пуњења резервоара (које према ISO 8316 износи 30 s). Еталонирање волуметријског резервоара се обавља помоћу мањег резервоара који је еталониран тежинском методом.



а)



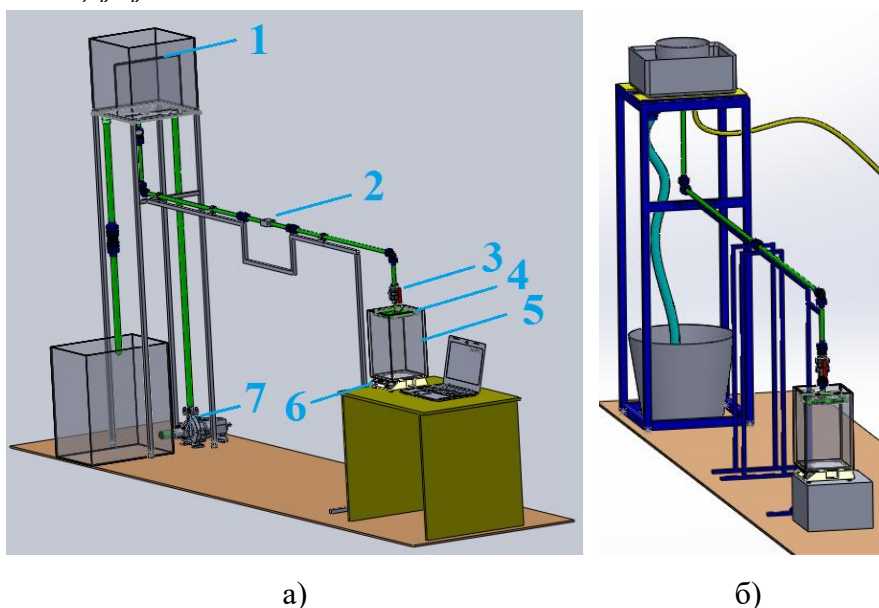
б)

Слика 2. Опитно постројење за еталонирање протокомера I-2 а) изглед дела опитног постројења – волуметријски резервоар са дивертером на врху б) цртеж опитног постројења [3, 4]

Током мерења протока запреминском статичком методом, код инсталација I-1 и I-1, одећују се почетна и крајња запремина воде у волуметријском резервоару, односно мерна запремина воде, време пуњења мерне запремине воде волуметријског резервоара и густина воде у резервоару за измерену температуру воде. Време пуњења мерне запремине воде волуметријског резервоара мери се помоћу прецизног хронометра. Укључење – искључење хронометра је подешено тако да наступа у моменту када се оштрица секача млаза нађе на средини правоугаоног отвора левка кроз који вода утиче у волуметријски резервоар или мимо њега. Покретање дивертера – скретача млаза се остварује пнеуматским серво механизмом. Ниво воде у волуметријском резервоару мери се прецизним електронским уређајем за мерење нивоа. При пуњењу резервоара водом проток мора бити константан, што се постиже радом погонске пумпе у истој радној тачки помоћу фреквентног регулатора. Због разлике температура при еталонирању волуметријског резервоара и при еталонирању протокомера, неопходно је урадити и поправку одређивања запремине воде у волуметријском резервоару. На инсталацији I-1 могућа је уградња протокомера димензија до $\text{Ø}400 \text{ mm}$ и еталонирање се, као и код I-2, врши у затвореном пумпном систему. Запремина волуметријског резервоара у оквиру инсталације I-1 је око 10 m^3 , док код I-2 износи око $1,9 \text{ m}^3$ (резервоар је условног пречника од $0,902 \text{ m}$ и висине од 3 m).

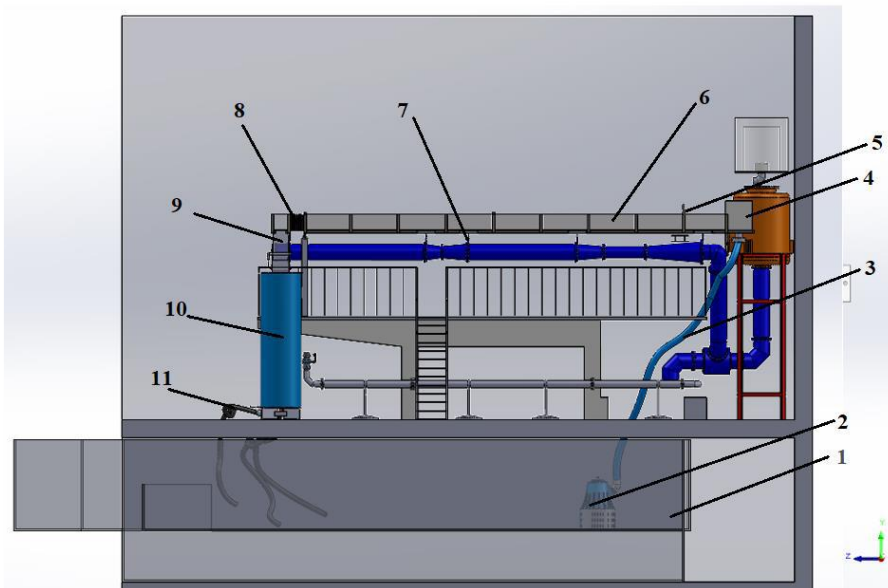
У оквиру инсталације I-3 еталонирање протокомера се обавља тежинском динамичком методом (без дивертера), код које се захтева мерење масе воде и времена пуњења. Мерна деоница у коју се уграђује протокомер је унутрашњег пречника од $12,7 \text{ mm}$. Инсталација I-3 је изведена након анализе нумеричких (CFD) резултата, при чему је извршена и експериментална валидација.

Мерне несигурности мерења протока, рачунају се на основу претходно одређених систематских и сличајних грешака мерења. Максимална мерна несигурност (грешка мерења) за све три инсталације је од $\pm 0,1$ до $\pm 0,2$ %.



Слика 3. Две верзије опитне инсталације I-3: а) са пумпом (7) и правом преливном ивицом (1) и б) са прикључком на водоводни систем и кружном преливном ивицом [5, 6]

Урађен је и пројекат инсталације за хидраулична испитивања у отвореном каналу (са променљивим нагибом), код које је еталонски проток одређен помоћу инсталације I-2.



Слика 4. Опитна инсталација за хидраулична испитивања у отвореном каналу (6) са променљивим нагибом, код које се проток одређује дивертером (9) и волуметријским резервоаром (10)

Развијене и представљене инсталације су адекватне и треба да буду акредитоване од стране Акредитационог тела Србије.

Кључне речи: протокомер; еталонирање; запреминско-тежинска метода; висока тачност

HIGH ACCURACY INSTALLATIONS FOR FLOWMETER CALIBRATION WITH VOLUMETRIC-WEIGHING METHOD

Dejan ILIĆ

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering

Different types of flow meters are used for flow measurement: pressure-based (orifice, nozzles, Venturi), variable-area (rotameter), turbine, electromagnetic, ultrasonic, vortex, Coriolis, etc. One of the most important characteristics of the fluid flow meter is its accuracy, but also: repeatability, linearity, hysteresis, range, response time, and etc. The flowmeters are very important parts of the fluid systems, so their calibration is necessary. Suitable time periods between calibrations are: six months for ultrasonic flow meters, one year for electromagnetic flow meters, and etc. If the flow meter is frequently used, this period may be even shorter. The flow meter must be calibrated on an adequate installation in order to achieve the highest possible accuracy. It is necessary that installation for precise flow meter calibrations meets the demands of the relevant standards: high-quality installation, appropriate calibration methodology, use of high-accuracy measuring instruments and satisfactory measurement uncertainty. When the installation is precisely constructed, maintained and used, a measurement uncertainty of $\pm 0.1\%$ to $\pm 0.2\%$ (with a probability of 95 %) can be achieved.

This paper presents three installations (test rig) for flow meters calibration using the volumetric-weight method, which are located at the Department of Hydraulic Machinery and Energy Systems, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade. Installations for flow meters calibration (measurement of liquid flow in closed conduits) were designed and constructed for flow rates up to: 200 l/s (I-1), 50 l/s (I-2) and 10 l/min (I-3).

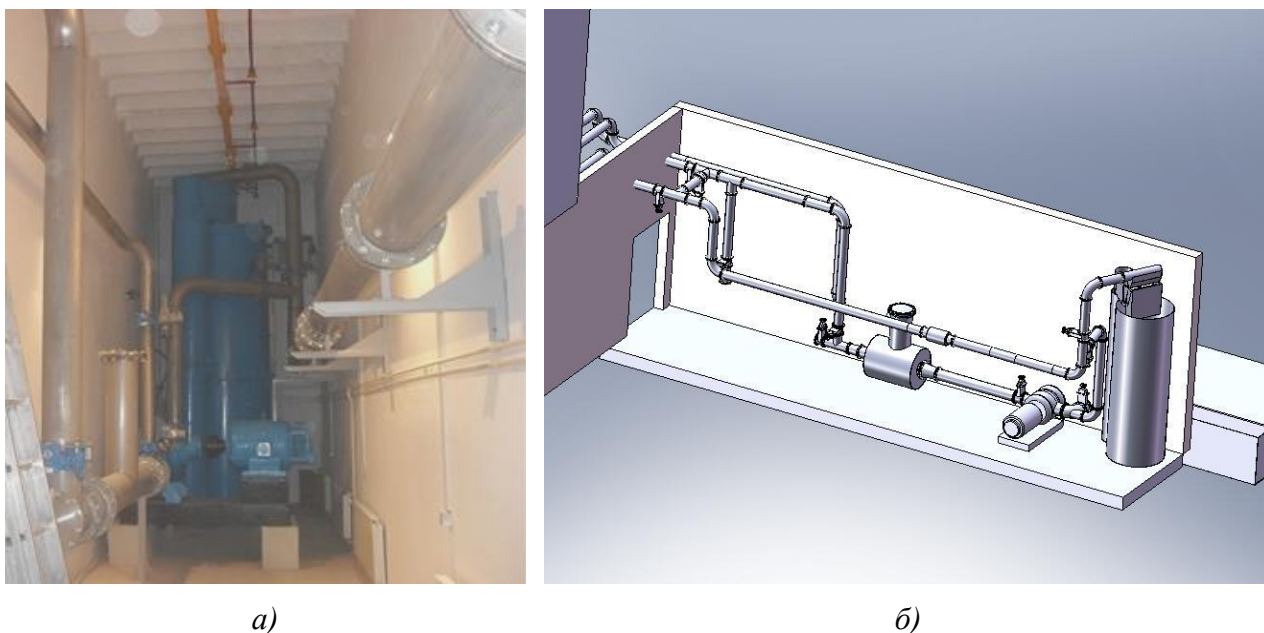
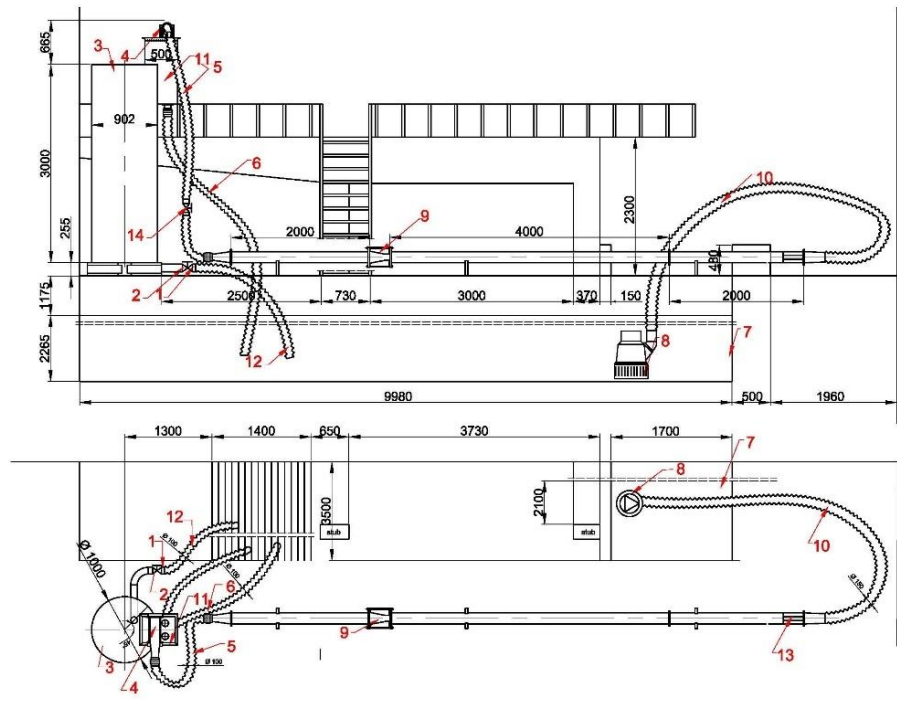


Figure 1. Experimental installations I-1 for flow meters calibration a) view of part of the installations - volumetric tank with diverter on top b) 3D view of the installations

A modified measurement methodology is applied, which is based primarily on ISO 4185 (weighing method) and ISO 8316 (volumetric method) standards. There is no limit for the application of these methods, but usually, in hydraulic laboratories, maximum achieved volume flow rate is $1.5\text{ m}^3/\text{s}$. Maximum volumetric flows for installations I-1 and I-2 are based on the maximum useful volume of the volumetric tanks and the minimum allowed tank filling time (which according to ISO 8316 is 30 s). The volumetric tank calibration is performed using a smaller tank that is calibrated using the weighing method.



a)



b)

Figure 2. Experimental installations I-2 for flow meters calibration a) view of part of the installations - volumetric tank with diverter on top b) drawing of the installations [3, 4]

During the volumetric static method flow measurements at installations I-1 and I-2, the initial and final water volumes in the volumetric tank, or the measuring water volumes, as well as the filling time of the measuring water volumes in the volumetric tank, and the water density in the tank for the measured water temperature are all determined. The filling time of the measuring water volume of the volumetric tank is measured using a precise chronometer. The on-off timer is activated when the jet cutter blade is in the middle of the rectangular opening of the funnel, through which the water flows into the volumetric tank or past it. The jet diverter is activated by a pneumatic servo mechanism. A level-measuring device is used to measure the water level in the volumetric tank. When filling the tank with water, the flow must be constant, and this is achieved by operating the drive pump at the same operating point using a frequency regulator. Due to the difference in temperatures during the calibration of the volumetric tank and during the calibration of the flow meter, it is necessary to perform a correction of the determination of the volume of water in the volumetric tank. Flow meters up to 400 mm can be installed on installation I-1, and calibration is performed, as with I-2, in a closed pumping system. The volumetric tank volume within the installation I-1 is about 10 m³, while at I-2 it is about 1.9 m³ (the tank has a conditional diameter of 0.902 m and a height of 3 m).

Within the I-3 installation, calibration of the flow meter is performed using the weighing dynamic method (without diverter), which requires the water mass and filling time measurements. The flow meters measuring part has an internal diameter of 12.7 mm. The I-3 installation was created following the examination of numerical (CFD) data, which also included the experimental validation.

Flow measurement uncertainties are calculated on the basis of previously determined systematic and random measurement errors. For all three installations, the maximum measurement uncertainty (measurement error) is ± 0.1 to ± 0.2 %.

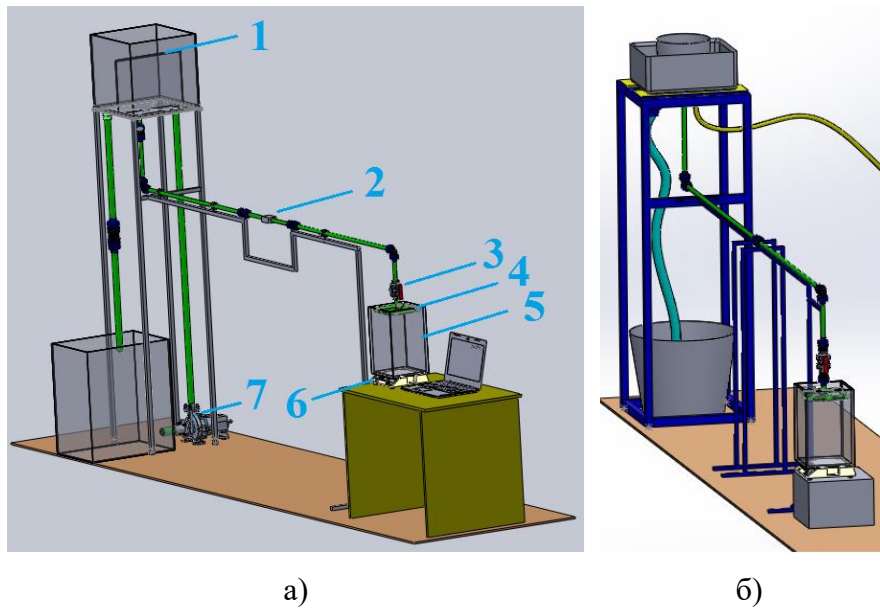


Fig. 3. Two versions of installation with flow distributor: a) with a pump and straight overflow edge and b) with tap water and circle overflow edge [5, 6]

The design of the installation for hydraulic tests in an open channel (with variable slope) was also made, where the reference flows was determined by the I-2 installation.

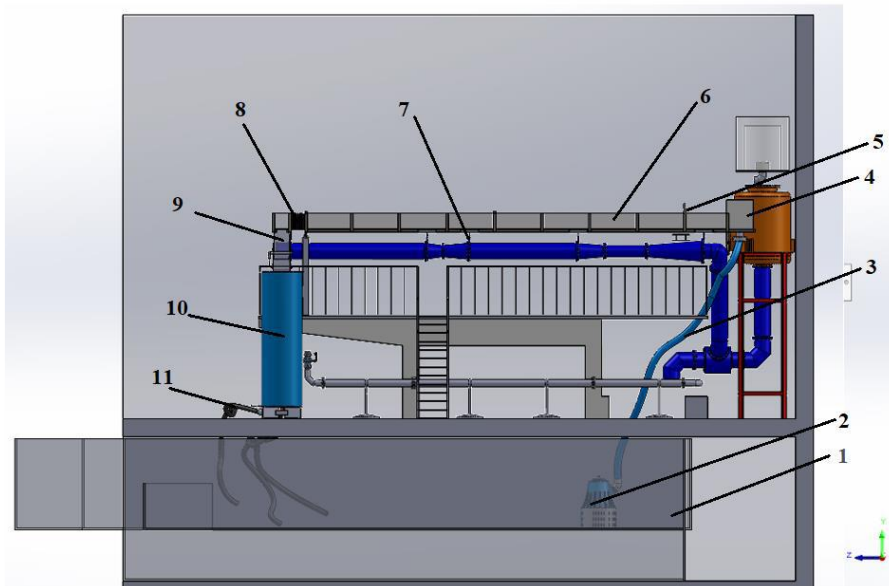


Figure 4. Experimental installations for hydraulic tests in an open channel (6) with a variable slope, where the flow is determined by a diverter (9) and a volumetric tank (10)

The developed and presented installations are adequate and should be accredited by the Accreditation body of Serbia.

Key words: flow meter; calibration; volumetric-weighing method; high accuracy

References

- [1] *** ISO 4185:1980 - Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method (method of determining the liquid flow-rate by measuring the mass of liquid delivered into a weighing tank in a known time interval), 1980
- [2] *** ISO 8316:1987 - Measurements of liquid flow in closed conduits - Method by collection of the liquid in a volumetric tank (method of determination of the volume of liquid collected in a volumetric tank in a known time interval), 1987

- [3] **Бенишек, М., Илић, Д., И., Чантрак, Ђ., Јанковић, Н.,** *Инсталација за калибрацију протокомера високе тачности*, Зборник радова, *Конгрес метролога 2015*, Златибор, CD издање, ISBN 978-86-7518-182-8, COBISS. SR-ID 218113548, 2015, 10 страна, Сесија 2., 12-15.10.2015.
- [4] **Илић, Д. Б., Чантрак, Ђ. С.,** *Практикум за лабораторијске вежбе из мерења при струјању флуида – 2. издање*, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2022, ИСБН 978-86-6060-132-4
- [5] **Илић Д. В., Јанковић Н. З., Слијепчевић М. З., Чантрак Ђ. С.,** *Proceedings High Accuracy Installation for Flow Meter Calibration with Weighing Method*, ICAS2018 International Conference on Applied Sciences, Book of Abstracts, page 121, May 9-11, Banja Luka, Republic of Srpska, 2018
- [6] **Cantrak, D., Ilic, D., Jankovic, N., Radanov B.,** *Installation for the High Accuracy Flow Meter Calibration with the Weighing Method*, 19th International Congress of Metrology (CIM2019), No. 21001, 6 pages, September 24-26, 2019, Paris, doi.org/10.1051/metrology/201921001

**АКРЕДИТАЦИЈА КАО КЉУЧНИ ЕЛЕМЕНТ
У ПРОЦЕСУ ИМЕНОВАЊА ТЕЛА ЗА ОЦЕЊИВАЊЕ УСАГЛАШЕНОСТИ
У ТЕХНИЧКОМ ЗАКОНОДАВСТВУ,
УКЉУЧУЈУЋИ ОБЛАСТ ОПРЕМЕ ПОД ПРИТИСКОМ**

**ACCREDITATION AS THE KEY ELEMENT
IN THE PROCESS OF DESIGNATION OF CONFORMITY ASSESSMENT BODIES
IN TECHNICAL LEGISLATION, INCLUDING
THE FIELD OF PRESSURE EQUIPMENT**

Senka TIŠMA*

Akreditaciono telo Srbije, Beograd

У процесу европских интеграција Република Србија, поред осталог, интензивно прати и хармонизује домаће техничко законодавство са законодавством Европске Уније (ЕУ), при чему се укључују и промене које утичу на већ хармонизовано законодавство. Посебан утицај на законодавни оквир имају сталне промене у техничко-технолошким решењима, чија специфичност утиче на потребу за дефинисањем одговарајућих прелазних периода, које је битно сагледати и кроз процес преузимања упознати све заинтересоване стране. Хармонизацијом се даје могућност произвођачима да своје производе стављају под истим условима како на домаће тако и на инострано тржиште, што доводи до веће конкурентности производа. У појединим областима, укључујући и област опреме под притиском, специфичности које произилазе из техничко-технолошких решења су допринеле у оквиру техничког законодавства да се дефинишу битни захтеви за производе, поступци оцењивања усаглашености производа са прописаним захтевима, општи захтеви за именовање и обавезе именованих тела за оцењивање усаглашености, укључујући и захтеве за безбедност, које је потребно спроводити и у употреби производа у одређеним временским периодима, како би опрема/производи и током употребе били безбедни.

У циљу компетентне и конзистентне примене прописаних поступака оцењивања усаглашености производа са применљивим битним захтевима успостављен је процес именовања тела која ће обављати те послове, при чему је акредитација један од најзначајнијих елемената у процесу именовања.

Акредитација је потврђивање, од стране националног тела за акредитацију, компетентности и оспособљености тела за оцењивање усаглашености за обављање одређених послова оцењивања усаглашености, укључујући испитивање, еталонирање, контролisanje, сертификацију производа, сертификацију система менаџмента и сертификацију особља.

Кључне речи: *национално тело за акредитацију; именована тела за оцењивање усаглашености; акредитација; битни захтеви за производе; хармонизовано законодавство*

In the process of European integration, the Republic of Serbia, among other things, intensively monitors and harmonizes the domestic technical legislation with the legislation of the European Union (EU), including changes that affect the already harmonized legislation. Constant changes in technical-technological solutions have a particular impact on the legislative framework, the specificity of which affects the need to define appropriate transitional periods, which is important to consider and introduce all interested parties through the takeover process. Harmonization gives producers the opportunity to place their products under the same conditions on both the domestic and foreign markets, which leads to greater product competitiveness. In certain areas, including the area of pressure equipment, the specificities arising from technical-technological solutions have

* Corresponding author, e-mail: senka.tisma@ats.rs

contributed within the framework of technical legislation to define essential requirements for products, procedures for evaluating the conformity of products with prescribed requirements, general requirements for naming and obligations of designated conformity assessment bodies, including safety requirements, which must be implemented in the use of products in certain periods of time, so that the equipment/products are safe during use.

In order to competently and consistently apply the prescribed procedures for evaluating the conformity of products with the applicable essential requirements, a process of appointing bodies that will perform these tasks has been established, whereby accreditation is one of the most important elements in the appointment process.

Accreditation is the confirmation, by the national accreditation body, of the competence and capability of the conformity assessment body to perform certain conformity assessment tasks, including testing, calibration, control, product certification, management system certification and personnel certification.

Key words: *national accreditation body; designated conformity assessment bodies; accreditation; essential product requirements; harmonized legislation*

1 Оцењивање усаглашености у циљу испоруке безбедних производа на тржиште Републике Србије

У циљу испоруке односно стављања на тржиште и /или употребу безбедних производа у Републици Србији је у примени техничко законодавство којим је обухваћено, како хармонизовано законодавство, које је усаглашено са законодавством Европске Уније тако и нехармонизовано законодавство, којим су поједине области уређене изворним ниционалним техничким прописима. Како би се остварили циљеви у вези унапређења безбедности и квалитета индустријских производа на тржишту, заштита потрошача и других јавних интереса развијен је систем инфраструктуре квалитета. Кроз инфраструктуру квалитета је успостављена интегрисана мрежа институција и организација у области акредитације, стандардизације, метрологије и оцењивања усаглашености са захтевима техничких прописа, стандарда и других техничких спецификација, укључујући и законодвни оквир којим је обухваћен сам рад помених институција.

Оцењивање усаглашености је поступак којим се обезбеђује да се на тржиште и/или употребу стављају производи који испуњавају захтеве за безбедност и друге прописане техничке захтеве, што уједно представља вид контроле пре њиховог стављања на тржиште. Кроз процес оцењивања су обухваћене различите активности као што су испитивање, контролisanje, сертификација производа, сертификација система менаџмента и сертификација особља. У зависности од начина дефинисаног техничким прописом поред тела за оцењивање усаглашености која се баве овим пословима, оцењивање може да се спроводе и од стране произвођача, органа државне управе када су у питању производи са већим ризиком или другог привредног субјекта. Послови оцењивања се могу обављати уз примену, једаног, више или комбинацију различитих поступака. Један од најзаступљенијих начина у потврђивању компетентности привредних субјеката који се баве пословима оцењивања усаглашености је процес акредитације. С обзиром да је у одређеним областима техничким прописима дефинисано да послове обављају именована тела за оцењивање усаглашености, акредитација заузима значајно место и у процесу именовања.

2 Акредитација као кључни елемент у процесу именовања тела за оцењивање усаглашености

Именовање је одобрење које се додељује телу за оцењивање усаглашености у циљу обављања послова оцењивања усаглашености. Оваква врста одобрења заснована је на техничком законодавству за које је надлежан одређени државни орган.

У зависности од послова за које се додељује именовање, дефинисани су и различити критеријуми које морају да испуне тела да би се бавила пословима оцењивања усаглашености у

одређеној области. Оцена критеријума у вези испуњености захтева за именовање се може спровести на више начина, један од начина је кроз поступак именовања без акредитације, док други начин је процес именовања уз прихватање акредитације, као кључног елемента у процесу именовања тела за оцењивање усаглашености.

С освртом на то да акредитација није препозната као један од обавезујућих критеријума за потврду компетентности именованих тела у хармонизованом законодавству, мањи број тела која се баве пословима оцењивања усаглашености је своју компетентност потврдио на други начин, а да није укључена и акредитација.

Поступак именовања без акредитације се спроводи прегледом докумената кроз које се потврђује компетентност тела, док поступак акредитације поред прегледа докумената, укључује и процес осведочења у рад тела за оцењивање усаглашености, како се и захтева стандардима у складу са којим се оцењује компетентност тела везано за одређене послове за које се захтева акредитација. Осведочење у активности у циљу потврде компетентности тела искључиво се спроводе на терену код клијента и/или на локацији тела. У случају да се акредитација захтева за потребе именовања подносилац пријаве за акредитацију је у обавези да назначи такав вид акредитације. Активност спровођења акредитације за потребе именовања поред захтева дефинисаних стандардима, којима су обухваћени захтеви за тела, укључује и оцењивање додатних захтева који су дефинисани другим стандардима техничким спецификацијама и/или техничким прописима за ту област.

У вези са акредитацијом за потребе именовања Акредитационо тело Србије као потписник Споразума о међусобном признавању система акредитације (ЕА ЕМЛА) у свом раду примењује и документа Европске акредитације (ЕА) укључујући и документ ЕА 2/17 М, којим је постављен основни циљ акредитације за потребе именовања када се користи као подршка у хармонизованом законодавству које је донето у складу са одредбама Одлуке 768/2008/ЕУ. Документом ЕА 2/17 М су обухваћени поступци оцењивања усаглашености дефинисани кроз техничко законодавство, који су доведени у везу са препорученим стандардима за спровођење процеса акредитације, како би се на једнозначан начин поступало у процесу акредитације у свим областима.

У односу на наведено укључен је:

1. Табеларни приказ препоручених стандарда за спровођење процеса акредитације у зависности од поступка оцењивања усаглашености за случај акредитације за потребе именовања у хармонизованом законодавству донетом према Одлуци 768/2008/ЕУ:

Модул	Опис	SRPS EN ISO/IEC 17065	SRPS ISO/IEC 17020	SRPS ISO/IEC 17021-1	SRPS ISO/IEC 17025
A	Интерна контрола производње	Н/П	Н/П	Н/П	Н/П
A1	Интерна контрола производње и надгледано испитивање производа	1 + t	* 1 + t + cd		1 + cd
A2	Интерна контрола производња и надгледаних провера производа у насумичним интервалима	1 + t	* 1 + t + cd		1 + cd
B	Преглед типа	* 1 + t + pk	1 + t + cd		
C	Усаглашеност са типом на основу интерне контроле производње	Н/П	Н/П	Н/П	Н/П

Модул	Опис	SRPS EN ISO/IEC 17065	SRPS ISO/IEC 17020	SRPS ISO/IEC 17021-1	SRPS ISO/IEC 17025
C1	Усаглашеност са типом на основу интерне контроле производње и надгледаног испитивања производа	* 1 + t + pk	1 + t + cd		1 + cd + pk
C2	Усаглашеност са типом на основу интерне контроле производње и надгледаних провера производа у насумичним интервалима	* 1 + t + pk	1 + t + cd		1 + cd + pk
D	Усаглашеност са типом на основу обезбеђења квалитета производње	* 1 + qa	1 + qa	1 + pk	
D1	Обезбеђење квалитета производње	* 1 + qa	1 + qa	1 + pk	
E	Усаглашеност са типом на основу обезбеђења квалитета производа	* 1 + qa	1 + qa	1 + pk	
E1	Обезбеђење квалитета завршног контролисања и испитивања производа	* 1 + qa	1 + qa	1 + pk	
F	Усаглашеност са типом на основу верификације производа	* 1 + t + pk	1 + t + cd		
F1	Усаглашеност на основу верификације производа	* 1 + t + pk	1 + t + cd		
G	Усаглашеност на основу верификације појединачног производа	* 1 + t + pk	1 + t + cd		
H	Усаглашеност на основу потпуног обезбеђења квалитета	1 + qa	1 + qa	* 1 + pk	
H1	Усаглашеност на основу потпуног обезбеђења квалитета и прегледа пројекта	* 1 + qa	1 + qa	1 + pk	

2. Табеларни приказ препоручених стандарда у области грађевинских производа за спровођење процеса акредитације у зависности од поступка оцењивања перформанси:

Систем ОВСП	Опис	SRPS EN ISO/IEC 17065	SRPS ISO/IEC 17025
1+	одређивање типа производа, почетни преглед фабричке контроле производње, стални надзор над фабричком контролом производње, провера – испитивање узорака	* 1 + t + pk	
1	одређивање типа производа, почетни преглед фабричке контроле производње, стални надзор над фабричком контролом производње	* 1 + t + pk	
2+	почетни преглед фабричке контроле производње, стални надзор над фабричком контролом	* 1 + pk	
3	одређивање типа производа		1

Легенда:

- * означава препоручени референтни стандард за акредитацију
- 1 означава могуће референтне стандарде за акредитацију
- + означава додатне захтеве других референтних стандарда који се користе за акредитацију ТОУ, ако је релевантно
- t означава применљиве додатне захтеве стандарда SRPS ISO/IEC 17025, ако поступак оцењивања усаглашености укључује испитивања (testing) која се обављају од стране именованог тела или под одговорношћу именованог тела; мора бити доказана испуњеност применљивих захтева т.6 и т.7 (осим т.7.9) SRPS ISO/IEC 17025;
- cd означава способност и процедуре просуђивања и одлучивања (capability of and procedures for judging and deciding), на основу резултата испитивања и/или контролисања, о томе да ли су испуњени битни захтеви (за производ), односно да су, када је потребно, примењени хармонизовани стандарди (за производ); мора бити доказана испуњеност захтева т.4.1.2, т.4.1.3, т.7.5 и т.7.6 SRPS EN ISO/IEC 17065;
- pk означава способност, засновану на знању о производу (product knowledge), за доношење професионалних закључака о испуњености захтева за производ; мора бити доказана испуњеност захтева т.6.1.2, т.6.1.3 и т.6.1.6 до т.6.1.10 SRPS ISO/IEC 17020;
- qa означава способност за проверавање и одобравање система менаџмента (quality assurance); мора бити доказана испуњеност захтева т.7.1.1, т.7.1.2, т.7.2.4, т.7.2.5, т.7.2.8, т.7.2.10, т.9.1 до т.9.4 и т.9.6 SRPS ISO/IEC 17021-1.

У вези са хармонизованим законодавством могуће је одступити од препоручених стандарда у процесу акредитације, али уз сарадњу са надлежним органима којима су у надлежност додељене одређене области, при чему се сваки стандард у зависности од захтева секторског законодавства може допунити додатним захтевима.

Током спровођења акредитације за потребе именовања законодавним оквиром је успостављен систем да се у процесу акредитације у посматрање спровођења процеса укључују представници надлежних органа за одређену област, како би у поступку именовања тела располагали са свим чињеницама које се узимају у обзир у процесу акредитације.

У нехармонизованом законодавству се спроводе анализе, доводећи у везу са додатним захтевима које је битно обухватити и на тај начин се дефинишу захтеви за компетентност тела при чему се одређује и стандард који је потребно применити у процесу акредитације. Због сложености и специфичности како опреме тако и поступка оцењивања којим се потврђује усаглашеност производа, и то за производе који се прегледају у употреби, често се наилази на критеријум да се акредитација захтева као обавезујући елемент.

3 Акредитација за потребе именовања у области опреме под притиском

Техничким законодавством у области опреме под притиском су обухваћени поред осталог и послови које обављају именована тела у овој области, укључујући послове, оцењивања усаглашености опреме под притиском, прегледе опреме под притиском у употреби, послови у вези са одобрењем радних поступака, одобрење особља за послове у вези нерастављивих спојева и испитивања без разарања.

Имајући у виду сложеност и специфичност послова који се обављају у сарадњи са надлежним органом за доношење техничких прописа у овој области, а доводећи у везу и (ЕА) документ ЕА 2/17 М, који у свом раду примењује Акредитационо тело Србије, а којим су обухваћене одређене препоруке, утврђени су стандарди у складу са којим се спроводи акредитација, за одређене активности, у циљу потврде компетентности тела. Акредитација у поступку именовања тела за обављање послова према техничким прописима у области опреме под притиском је препозната као један од кључних критеријума.

У складу са наведеним, у хармонизованом законодавству, усклађен је критеријум да се према захтевима стандарда SRPS ISO/IEC 17065 оцењују захтеви за тела за оцењивање усаглашености опреме под притиском за Модуле, што је детаљније приказано, изнад у Табели 1. Изузетак је једино укључен у вези „Модула Н“, за који је кроз одређене анализе остварен кључак да се као критеријум уврсти уместо стандарда SRPS ISO/IEC 17021-1 стандард SRPS ISO/IEC 17065.

Препоручени стандард за акредитацију у вези поступка „Одобрење нерастављивих спојева задржан је стандард SRPS ISO/IEC 17020 (Специфичан поступак оцењивања усаглашености који није усаглашени са Одлуком бр. 768/2008), док за акредитацију тела за послове одобрења особља (за послове нерастављивих спојева и ИБП метода) је одређен стандард SRPS ISO/IEC 17024.

У изворном националном законодавству којим су обухваћени послови оцењивања усаглашености за опрему под притиском у употреби, један од кључних критеријума за оцену испуњености захтева за именована тела је акредитација према стандарду SRPS ISO/IEC 17020.

У поступку акредитовања тела за потребе именовања се оцењују и додатни критеријуми укључени у техничке прописе у складу са којим се спроводи процњс акредитације, а којима су дефинисани захтеви за именована тела.

Иако оцењивање усаглашености представља трошак за произвођаче, за који се увек тежи да се сведе на прихватљив ниво, од оцењивања усаглашености сви учесници на тржишту имају користи, почев од произвођача па до крајњег корисника производа или услуга, имајући у виду да се тиме јача и поверење у безбедност производа и услуга.

4 Литература

- [1] *** Документална система менаџментна Акрдитационог тела Србије – АТС (правила, процедуре, упутства, смернице...), као и закони и прописи из домена рада АТС-а, остали закони и технички прописи у којима је прописана употреба акредитације и промотивни и информативни материјали (брошуре, билтени, извештаји, информатори, презентације)
- [2] *** Одлука 768/2008/ЕЗ Европског парламента и Савета од 9. јула 2008. године о заједничком оквиру за трговање производима и укидању одлуке 93/465/ЕЕЗ
- [3] *** Уредба (ЕЗ) 765/2008/ЕЗ Европског парламента и Савета од 9. јула 2008. године којом се прописују захтеви за акредитацију и тржишни надзор у вези са трговањем производима
- [4] *** www.tehnis.privreda.gov.rs/ последњи увид 07.05.2023. године

INTERNA KONTROLA KVALITETA KAO ZNAČAJAN DEO RADIOLOŠKE ANALIZE UZORAKA IZ ŽIVOTNE SREDINE POMOĆU POLUPROVODNIČKE HPGE SPEKTROMETRIJE

INTERNAL QUALITY CONTROL AS AN IMPORTANT PART OF RADIOLOGICAL ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL SAMPLES USING SEMICONDUCTOR HPGE SPECTROMETRY

Aleksandra SAMOLOV*, **Aleksandar KANDIĆ**, **Mirjana ĐURAŠEVIĆ**,
Igor ČELIKOVIĆ, **Tamara MILANOVIĆ**, **Milić ERIĆ**, **Ivana VUKANAC**

Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Univerzitet u Beogradu,
Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju

Ugalj kao fosilno gorivo sadrži brojne prirodne radioaktivne izotope koji pripadaju uranovom i torijumovom nizu, kao i ^{40}K . Najviše se koristi u industriji, kao i u proizvodnji energije. Problem u vezi sa proizvodnjom energije iz uglja je takozvani „energetski otpad“, kao što su pepeo i šljaka, koji predstavljaju nesagorivi i nesagoreli ostatak pri sagorevanja uglja. Ako se pepeo i šljaka odlažu u životnu sredinu, može doći do povećanja i/ili preraspodele prirodnog sadržaja radionuklida. Da bi se utvrdio potencijalni uticaj „energetskog otpada“ na životnu sredinu, uzorci uglja, pepela i šljake iz termoelektrana „Nikola Tesla“ i „Kolubara“ mereni su poluprovodničkim HPGe spektrometrom u Laboratoriji za nuklearnu i plazmu fiziku Instituta „Vinča“. Kao rezultat ovih merenja, dobijene su koncentracije prirodnih radionuklida i veštačkog radionuklida ^{137}Cs kao, što je prikazano u ranije objavljenim radovima. Prikazani rezultati su u saglasnosti sa istraživanjima sprovedenim širom sveta.

Da bi se obezbedila tačnost i preciznost (pouzdanost) dobijenih rezultata merenja, u okviru Laboratorije uspostavljen je program kontrole kvaliteta (QC) i osiguranja kvaliteta (QA). Interna kontrola obuhvata proveru karakteristika poluprovodničkog HPGe spektrometra koji se koristi za merenje svih analiziranih uzoraka. Tačkasti izvori ^{60}Co i ^{137}Cs se koriste kao kontrolni izvori za proveru položaja pika, ukupne površine ispod pika, FWHM (puna širina na polovini maksimuma pika), FWTM (puna širina na desetini maksimuma pika) i odnos FWHM/FWTM. Pored navedenih karakteristika, redovno se kontroliše i ukupni odbroj prirodnog fona. Svaka od navedenih karakteristika može ukazati na neku nepravilnost u radu detektorskog sistema.

Cilj ovog rada je da se prikažu kontrolne karte ispitivanih karakteristika poluprovodničkog HPGe spektrometra korišćenog za merenje uzoraka uglja, pepela i šljake. Dobijene kontrolne karte predstavljaju važan alat na osnovu kojeg se analizira dugoročna stabilnost spektrometra.

Ključne reči: ugalj; pepeo; gama spektrometrija; kontrola kvaliteta

Coal as the fossil fuel contains numerous radioactive isotopes including the uranium, thorium and their daughter products, as well as ^{40}K . It is widely used in industry as well as in energy production. The problems associated with the production of energy from coal is the so-called “energy waste”, such as ash and slag, which are incombustible and unburnt residue from combustion of coal. If ash and slag are released into the environment an increase and/or redistribution of natural radionuclide content can occur. To determine the potential impact of “energy waste” on the environment, samples of coal, ash, and slag from thermal power plant “Nikola Tesla” and “Kolubara” were measured with a semiconductor HPGe spectrometer. Results of activity concentration of natural radionuclides and artificial ^{137}Cs in coal, slag and ash are presented in few previously published papers and obtained values are in accordance with similar worldwide investigations.

* Corresponding author, e-mail: aleksandra.samolov@vin.bg.ac.rs

Rad je izložen na 36. Međunarodnom kongresu o procesnoj industriji i predložen je za objavljivanje u časopisu “Thermal Science”.

To ensure the accuracy and precision (reliability) of the obtained measurement results, quality control (QC) and quality assurance (QA) program were established. Internal control includes checking of the characteristics of HPGe spectrometer used for measurement of all analysed samples. Point sources of ^{60}Co and ^{137}Cs are used as control sources for checking following characteristics: peak positions, net peak area, FWHMs (Full Width at Half Maximum), FWTMs (Full Width at Tenth Maximum) and FWHM/FWTM ratios. In addition to the mentioned characteristics, the counting of back-ground is also regularly controlled. Each of the mentioned characteristics may indicate some irregularity in the operation of the detector system and thus could influence reliability of performed activity concentration measurements.

The paper presents the control charts of the examined characteristics of the HPGe spectrometer used for measurements of coal, ash and slag samples. The obtained control charts indicate the long-term stability of the spectrometer and hence confirm accuracy and precision of measurement results.

Key words: coal; ash; gamma spectrometry; quality control

KATEGORIZACIJA TROŠKOVA KVALITETA U SISTEMU MENADŽMENTA BEZBEDNOSTI HRANE PREMA PAF MODELU

QUALITY COSTS CATEGORIZATION IN FOOD SAFETY MANAGEMENT SYSTEM ACCORDING TO PAF MODEL

Sara DIMITRIJEVIĆ*, Jelena RUSO

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.311>

Zbog sve složenijeg poslovnog okruženja, učestalih promena i veće konkurentnosti, kompanije u prehrambenoj industriji moraju da obezbeđuju proizvode visokog kvaliteta, dok istovremeno minimiziraju njihove troškove kvaliteta. Troškovi kvaliteta igraju značajnu ulogu kao pokazatelji nivoa kvaliteta pa, samim tim, i usmeravanju organizacije ka prioritetima za poboljšanje kvaliteta koja mogu da dovedu do smanjivanja ukupnih troškova. Troškovi kvaliteta su, zapravo, troškovi koji nastaju kada se stvari ne urade ispravno iz prvog puta. Dakle, oni se mogu minimizirati samo kada se postigne optimalan nivo usaglašenosti.

U literaturi je u najvećoj meri zastupljen PAF model, koji troškove kvaliteta deli na tri kategorije: troškove prevencije, troškove procene i troškove neusaglašenosti. Prema istraživanjima, veće ulaganje u troškove prevencije i procene, dovodi do snižavanja ukupnih troškova.

Ovaj rad ima za cilj da utvrdi kojim kategorijama troškova pripadaju mere i aktivnosti u okviru svakog zahteva standarda ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane - Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane, obzirom na široku primenu navedenog standarda u prehrambenoj industriji i obzirom na preventivni karakter standarda, u uslovima adekvatnog i neadekvatnog ispunjavanja zahteva. U radu će biti prikazan sistematičan pregled zahteva standarda ISO 22000:2018, uz predlog mera i efekata mera kategorisanih prema PAF kategorijama troškova. Istraživanje je obuhvatilo pregled literature, a doprinos rada je tumačenje zahteva standarda ISO 22000:2018 sa aspekta kategorizacije troškova kvaliteta.

Ključne reči: sistem menadžmenta bezbednosti hrane; troškovi kvaliteta; ISO 22000:2018; PAF model

Due to the increasingly complex business environment, frequent changes and greater competitiveness, companies in the food industry must assure high-quality products while minimizing their costs. Quality costs play a significant role as indicators of quality levels and, therefore, in the direction of improvements and quality that can lead to a reduction in overall quality costs. Quality costs are, in fact, the costs that arise when things are not done correctly the first time. Therefore, they can be minimized only when the optimum level of compliance is achieved. In the literature, the most represented is the PAF cost model, which divides quality costs into three categories: prevention costs, assessment costs and non-compliance costs. According to researches, greater investment in prevention and assessment costs leads to a decrease in overall costs.

This paper aims to determine which categories of costs belong to the measures and activities within each requirement of ISO 22000:2018 Food safety management system - Requirements for any organization in the food chain, considering the wide application of this standard in the food industry and, also, preventive character of the standard, in conditions of adequate and inadequate fulfillment of requirements. The paper will present a detailed and systematic overview of the requirements of ISO 22000:2018, with a proposal of measures and effects of measures categorized according to PAF cost categories. The research included a literature review, and the contribution of the paper is the interpretation of the requirements of the ISO 22000:2018 standard from the aspect of categorizing quality costs.

Key words: food safety management system; quality costs; ISO 22000:2018; PAF model

* Corresponding author, e-mail: sd20190516@student.fon.bg.ac.rs

1 Uvod

Na savremenom globalnom tržištu, postoji stalni rast zahteva kupaca za kvalitet, rast ponude proizvoda po konkurentskim cenama, dok otvorenost tržišta rada, zemalja sa niskim troškovima rada, mogu ometati spremnost kompanija da se uključe u tržišnu utakmicu (Biadacz, 2021; Gill et al., 2017, Osei-Tutu, 2018).

U prehrambenoj industriji, zbog sve složenijeg poslovnog okruženja, učestalih promena organizacije, menadžmenta i tehnologija, zahteva se pružanje proizvoda i usluga višeg nivoa kvaliteta, kao i bezbednost hrane u svakom delu u lancima hrane od uvođenja inputa do konzumiranja (Flynn et al., 2019; Kumar et al., 2018; Walls et al., 2019). Izazovi sa kojima se suočavaju proizvođači hrane odnose se na rad u kriznim i epidemiološkim situacijama, nedostatak i oskudicu resursa, sve veću konkurenciju, rastuće zahteve i očekivanja kupaca i kompetentnost osoblja, prema Stojanova et al. (2022). Bezbednost hrane moguće je postići uvođenjem određenih regulatornih procedura i pristupa (Chaoniruthisai, 2018; Chen et al., 2020; Paunescu et al., 2018), prema svakom entitetu, kao što je obavezujući tehnički propis, Zakon o bezbednosti hrane ili usklađenost sa međunarodnim regulativama kao što su zahtevi u dokumentu standarda ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane — Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane (Chen et al., 2020; Boulfoun & Brabez, 2022). Uvođenje određenih vrsta regulativa, njihovih pravila i procedura, u prehrambenu industriju, sa jedne strane, kreira uslove za ostvarivanje cilja, rasta poverenja potrošača u proizvode (Kamble & Raut, 2019; Gordon et al., 2020). Sa druge strane, implementacija regulative u punom sadržaju omogućava upravljanje procesima i njihov stalni razvoj uz operativno minimiziranje procenjenih rizika po bezbednost hrane (Bergström et al., 2020; Gill et al., 2017; Joanna & Wojciech, 2017). To bi značilo da u industriji hrane kvalitet proizvoda ne zavisi samo od kvaliteta sirovina koji se u nju ugradjuju već i od implementiranog sistema menadžmenta kvaliteta sa svim procesima i aktivnostima na putu proizvodnje hrane do krajnjeg korisnika (Bernardo et al., 2017; Popov et al., 2018; Zimon & Domingues, 2020)

U tom smislu, mogu postojati i određeni rizici, greške, različiti nivoi higijene i sanitacije, različiti nivoi uskladenosti sirovina sa specifikacijama i tome slično. Iz tih razloga se, prema Stefanova (2022), naglašava da fokus treba staviti i na integraciju upravljanja kvalitetom i rizikom lanaca snabdevanja da bi se ispitala teorijske i praktične smernice i glavni rizici neusaglašenosti sa zahtevima kupaca i zakonodavstvom koji nastaju u stalno promenljivom spoljašnjem okruženju.

Cilj sistema menadžmenta kvalitetom, pored kontinuiranih poboljšanja kvaliteta i ispunjavanja zahteva korisnika, je i pronalaženje načina da se takvi procesi i rezultati tih procesa sprovedu po najnižim troškovima (Alinezhad & Iasi, 2020; Kazemi et al., 2020). Osnova za unapređenje kvaliteta u nekoj organizaciji je razumevanje, regulisanje i kontrola procesa u odnosu na cilj koji se želi postići. Paralelno sa tim, važno je uporedo kreirati i ekonomsku analizu unapređenja kvaliteta (Guinot, et al., 2017, Sadkowski, 2018). U praksi postoje brojni modeli za analizu troškova kvaliteta koji definišu realnu sliku efektivnosti, efikasnosti i isplativosti kontinuiranog upravljanja procesima (Glogovac & Filipovic, 2018).

Najviše je zastupljen PAF model troškova, koji troškove kvaliteta deli na tri kategorije: troškove prevencije, troškove procene i troškove neusaglašenosti. Prema istraživanjima, (Bhat & Vishwakarma, 2020) veće ulaganje u troškove prevencije i procene, dovodi do snižavanja ukupnih troškova. Troškovi prevencije su troškovi koji imaju za cilj da identifikuju moguće defekte i poremećaje pre nego što se oni pojave u samom proizvodu ili usluzi. Troškovi procene su troškovi koji nastaju radi identifikacije neusaglašenih proizvoda i usluga pre nego što se oni isporuče potrošaču ili klijentu. Troškovi neusaglašenosti ili neuspeha su troškovi koji se dele u dve grupe. Prvi su interni troškovi neusaglašenosti ili neuspeha koji se moraju preraditi ili otkloniti nedostatak pre isporuke potrošaču ili klijentu. Druga grupa troškova su eksterni troškovi neusaglašenosti ili neuspeha koji nastaju tokom i nakon isporuke neusaglašenih proizvoda ili usluge potrošaču ili klijentu. Takvi troškovi su najnepoželjniji troškovi.

Svrha ovog rada jeste da ukaže na mogućnost primene PAF modela pri analizi troškova kvaliteta prema zahtevima standarda ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane - Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane.

Ovaj rad ima za cilj da utvrdi kojim kategorijama troškova pripadaju mere i aktivnosti u okviru svakog zahteva standarda ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane - Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane, obzirom na široku primenu navedenog standarda u prehrambenoj industriji i obzirom na preventivni karakter standarda.

Implementacija sistema menadžmenta bezbednošću hrane je u protekloj dekadi na globalnom nivou značajno porasla, što je dalo na važnosti u preuzimanju ovih standarda u različitim sektorima u lancu hrane, od plantaža i farmi do trgovina brze hrane (Chivandi, 2017; Flynn et al., 2018; Fathurrahman et al., 2021). Takva situacija dalje upućuje i na aktivnosti analize istih standarda sa različitih aspekata radi boljeg sagledavanja njihove primene i značaja kojeg imaju kako na konzumente tako i na organizacije koje ga realizuju.

2 Pregled literature

Pojam hrane u današem vremenu dostigao neslućene granice interesovanja u različitim naučnim disciplinama (Radojičić, 2010). Procesi globalizacije, razvoj društvenih mreža, pametni telefoni, multimedija i internet stvari doveli su do velikog protoka informacija i podataka u lancu snabdevanja hranom dovodeći u pitanje njenu bezbednost (Jin et al., 2020). Dodatno, prema Gill et al. (2017), prehrambeni proizvodi dolaze iz celog sveta, transportuju se na velike udaljenosti, proizvode se pod različitim praksama uzgoja i klimatskim uslovima, korišćenjem nekoliko tehnika prerade, povećavajući verovatnoću rizika od incidenata i opasnosti po bezbednost hrane. Bez obzira na to da li se uzimaju u obzir lanci sa lokalnim ili međunarodnim dosegom, elementarna stvar je, da obezbeđuju hranu odgovarajućeg kvaliteta, u pravo vreme i u potrebnoj količini, prema Zimon & Domingues (2020).

Prehrambena industrija je sektorski veoma razgranata tako da ostavlja veliki prostor za različite vrste istraživanja. Ono što je svakako dugi niz godina tema koja preokupira istraživače jeste primena standarda ISO 22000 u različitim sektorima prehrambene industrije (Chen et al., 2021; El-Rouby et al., 2020). Zasnovan na principima CODEX za higijenu hrane (uključujući HACCP sistem—analizu opasnosti i kritičnu kontrolnu tačku), ISO 22000 je međunarodni standard koji zahteva implementaciju FSMS-a kako bi se osigurala bezbednost hrane i podržala održivost u lancu ishrane, prema Granja et al., (2019). Zbog toga posledice proizvodnje hrane koja ne ispunjava uslove za bezbednost hrane mogu biti veoma ozbiljne prema Kiss et al. (2019).

Mnogi autori su kroz istraživanja u vezi bezbednosti hrane, posebno primene standarda ISO 22000 u organizacijama (Casolani et al., 2018; Paunescu et al., 2018; Petljak et al., 2018; Osei-Tutu, 2018; Kamble et al., 2019) dali ilustracije značaja u svojim državama ili na globalnom nivou (Nayak & Waterson, 2019; Visciano & Schirone, 2021). Kroz istraživanja se može uočiti da poslednjih godina došlo do značajnih promena na globalnom tržištu, privredama različitih zemalja ali i u potrebama potrošača. Sertifikacija standardom ISO 22000 između ostalog stvara poverenje među potrošačima prehrambenih proizvoda. Prema El-Rouby et al. (2020) primena ISO 22000 sistema upravljanja bezbednošću hrane je dovela do poboljšane zaštite hrane, povećanog poverenja kupaca i poboljšane troškovne efikasnosti.

Implementacija standarda dovodi do niza direktnih i indirektnih poboljšanja. Svakako da je finansijska efikasnost u smislu smanjenja troškova jedan veoma značajan, direktan rezultat koji se upravo obraća uspešnosti realizacije standarda prema zahtevima. U praksi postoje broji modeli analize troškova. Najčešće korišćen model analize troškova je PAF model. Najčešće se koristi u poslovnoj praksi, u većini kompanija, gde su potrebni sistemi za prikupljanje podataka manje ili više dostupni (Chatzipetrou & Moschidis, 2017; Alglave et al., 2019). Model je najčešće korišćen kao alat u istraživanjima koja su imala za cilj jasno definisanje strukture i reorganizaciju procesa u organizacijama (Chatzipetrou & Moschidis, 2018; Dimitrantzou et al., 2020).

Model PAF kategoriše troškove u kategorije, troškovi prevencije, procene i neusaglasenosti i uspeva da obuhvati sve troškove koji se odnose na sistem i kontrolu proizvoda, kao i troškove koji nastaju kada proizvod ne ispunjava uslove, odnosno zahteve (Teli et al., 2017). Troškovi kvaliteta pored klasifikacije i merenja moraju imati i adekvatnu analizu koja bi zapravo vodila uspešnosti

poslovanja organizacije. Odnosno, takve aktivnosti treba posmatrati kao aktivnosti u načinima postizanja ciljeva organizacije, a ne da one postanu same sebi cilj. Prema Biadacz (2021), menadžment troškova kvaliteta, kao efikasan i efektivan instrument u upravljanju kompanijom, ima za cilj evidentiranje i analizu troškova vezanih za kvalitet koji dovodi do njihove optimizacije, zahvaljujući identifikaciji neefikasnih radnji i preduzimanju internih akcija poboljšanja.

Međunarodna prepoznatljivost ekonomskih i finansijskih kategorija, evolucija tehnologije, skraćivanje životnog ciklusa proizvoda, svest kupaca i brza transformacija socijalnih i ekonomskih okolnosti neki su od razloga koji su kompanije doveli do osnovnih strukturnih promena u cilju prilagođavanja (Scarpin, 2017; Farooq et al., 2017). Usled trenutnih ekonomskih prilika nastaju fleksibilne, prilagodljive i napredne organizacione institucije, dok se se program unapređenja kvaliteta smatra odlučujućim faktorom za uspešan operativni učinak (Antunes, Kuiros, & Justino, 2018). Usvojili su efikasan proizvodni proces, koji karakteriše niska cena – proizvodi visokog kvaliteta. Prema Rosiawan et al., (2019), cilj sistema troškova kvaliteta je da izmeri uspeh procesa poboljšanja kvaliteta i obezbedi da je ulaganje u program poboljšanja kvaliteta isplativo, stoga je PAF model analize troškova u organizaciji veoma prihvatljiv za organizacije i njihovni poslovni razvoj i uspešnost.

3 Metodologija

Ovaj rad je zasnovan na analizi troškova kategorisanih prema PAF kategorijama troškova u okviru zahteva standarda ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane — Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane,. Kod standarda ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane — Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane, tabelarno su izdvojeni svi zahtevi standarda uključujući tačke: 4. Kontekst organizacije, 5. Liderstvo, 6. Planiranje, 7. Podrška, 8. Realizacija operativnih aktivnosti, 9. Vrednovanje performansi i 10. Poboljšanje. U odnosu na svaki zahtev izvršena je kategorizacija troškova prema kategorijama PAF modela, odnosno svaki zahtev je identifikovan kao deo troškova prevencije, troškova procene ili troškova neusaglašenosti, internih ili eksternih. Navedeni zahtevi standarda ISO 22000:2018, posmatrani su u dva slučaja: u prvoj koloni tabele, je kategorizacija troškova prema PAF modelu kada se preduzimaju sve aktivnosti u zahtevima. Druga kolona prati posledice neadekvatnog obavljanja date aktivnosti u zahtevu, prikazujući neusaglašenosti odnosno troškove interne neusaglašenosti i troškove eksterne neusaglašenosti.

4 Rezultati i diskusija

Rezultati su dati u Tabeli 1, u prilogu.

U prvoj koloni Tabele 1, su raspoređeni zahtevi standarda ISO 22000 :2018, u uslovima kada se standard primenjuje na adekvatan način. U tački, 4. Kontekst organizacije, većina zahteva pripada kategoriji troškova prevencije dok manji broj, troškovima procene. U tački 5. Liderstvo, većina zahteva pripada kategoriji troškova prevencije, dok manji broj zahteva ulazi u kategoriju troškova procene. U tački 6. Planiranje, većina aktivnosti zahteva pripada kategoriji troškova prevencije, dok manji broj aktivnosti ulazi u kategoriju troškova procene. U tački 7. Podrška troškovi prevencije su zastupljeniji od troškova procene. Tačka 8. Realizacija operativnih aktivnosti, je najstroženija i veoma obimna po sadržaju aktivnosti zahteva. U njenoj strukturi, takođe, preovlađuju troškovi prevencije u odnosu na troškove procene ali u manjoj meri. U tački 9. Vrednovanje performansi, zastupljeniji su troškovi procene u odnosu na troškove prevencije. U tački 10. Poboljšanje, većina aktivnosti zahteva se nalazi u kategoriji troškova prevencije, u odnosu na troškove procene. Pored toga, postoji i jedan zahtev koji pripada kategoriji troškova interne neusaglašenosti.

Druga kolona u Tabeli 1, daje pregled neadekvatno primenjenih aktivnosti zahteva standarda. Zato u tački 4. Kontekst organizacije, pored troškova prevencije i procene pojavljuju se i troškovi interne neusaglašenosti, kroz aktivnosti tri zahteva, kao i troškovi eksterne neusaglašenosti kroz dva zahteva. U tački 5. Liderstvo, takođe pored troškova prevencije i procene nastaju i aktivnosti koji dovode do troškova interne neusaglašenosti. Kroz tačku 6. Planiranje, postoje aktivnosti dva zahteva kategorisanih kao interni troškovi neusaglašenosti. U tački 7. Podrška, pored troškova prevencije i procene postoji deset troškova neusaglašenosti od kojih su deset interne, a dva eksterne neusaglašenosti. Tačka 8. Realizacija operativnih aktivnosti, kao najobimnija tačka sadrži veliki broj troškova

neusaglašenosti, odnosno pedeset pet zahteva koji mogu da se kategorišu kao troškovi neusaglašenosti. Tačka 9. Vrednovanje i tačka 10. Poboljšanja imaju po četiri zahteva koja su kategorisani kao troškovi interne neusaglašenosti. U tački 10. Poboljšanja se nalazi jedan zahtev koji se kategorise kao trošak eksterne neusaglašenosti.

5 Zaključak

U odnosu na navedena istraživanja kao i tematiku ovog rada može se zaključiti da je važnost standarda ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane — Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane, evidentan u praćenju proizvodnje hrane do obezbeđivanja bezbednog proizvoda potrošaču. Odnosno standard ISO 22000 predstavlja i značajno sredstvo koje u odnosu na svoje zahteve doprinosi boljem pozicioniranju organizacija na tržištu uz mogućnost smanjenja troškova kvaliteta.

Kategorizacija troškova prema PAF modelu u odnosu na zahteve standarda ISO 22000 pokazala je rezultate u kojoj su troškovi prevencije najzastupljeniji, zatim troškovi procene. Mada troškovi interne i eksterne neusaglašenosti su zastupljeni sa najmanjim udelom, cena ovih troškova je najnepoželjnija, kako u finansijskom tako i u zdravstvenom, socijalnom, marketinškom i svakom drugom smislu.

Identifikacija kategorija troškova PAF modela u okviru svakog zahteva standarda ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane - Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane prvenstveno omogućava organizacijama koje primenjuju standard ISO 22000 da procene ulaganja u troškove kvaliteta. Drugo, organizacije mogu ostvariti konkretno praćenje nivoa rasta ili opadanja troškova prema, kategorijama troškova. Što bi dalje značilo da ukoliko postoji opadanje troškova prevencije i procene, organizacija održava kontinuitet unapređenja kvaliteta i obrnuto.

U slučajevima kada ne postoji doslednost u aktivnostima zahteva odnosno neadekvatnog obavljanja date aktivnosti, stvaraju se uslovi koji mogu da izazovu različite probleme u sistemu menadžmenta bezbednošću hrane ili opasnosti po bezbednost hrane, što dalje upućuje na velika ulaganja u troškove korekcije nastale situacije i neusaglašenosti.

6 Literatura

- [1] **Alglawe, A., Schiffauerova, A., Kuzgunkaya, O. and Shiboub, I.** Supply chain network design based on cost of quality and quality level analysis, *The TQM Journal*, Vol. 31, 2019, No. 3, pp. 467- 490.
- [2] **Antunes, M. G., Quirós, J. T., & Justino, M. R.** Total quality management and quality certification : Effects in organisational performance, *International Journal Services and Operations Management*, Vol. 29, 2018, No. 4, pp. 439 - 461.
- [3] **Bergström, P., Malefors, C., Strid, I., Hanssen, O. J., Eriksson, M.** Sustainability Assessment of Food Redistribution Initiatives in Sweden, *Resources*, Vol. 9, 2020, No. 27.
- [4] **Bernardo, M., Escalante, R., Roca, J. and Arbussà, A.** Gastronomy management: a comparative analysis of the existing management system standards, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 34, 2017, No. 2, pp .163 - 175.
- [5] **Bhat, V., Vishwakarma, A.** Measurement of Quality Costs and Quality Metrics in Excel foods Pvt. Ltd. - An Empirical Study, *International Journal of Management*, Vol.11, 2020, No. 10, pp. 1407 - 1416
- [6] **Biadacz, R.** Quality cost management in the SMEs of Poland, *The TQM Journal*, Vol. 33, No. 7, 2021, pp. 1-38.
- [7] **Boulfoul, N., Brabez, F.** Implementation of Food Safety Management in the Food Industry in Algeria: Benefits and Barriers Factors, *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, Vol.10, 2022, No. 8, pp. 1342-1351.
- [8] **Casolani, N., Liberatore, L., Psomas, E.** Implementation of quality management system with ISO 22000 in food Italian companies, *Quality-Access to Success*, Vol. 19, 2018, No. 165, pp. 125 - 131.

- [9] **Chaoniruthisai P, Punnakitikashem P, Rajchamaha K.** Challenges and difficulties in the implementation of a food safety management system in Thailand: A survey of brc certified food productions, *Food Control*, Vol. 93, 2018, pp. 274 - 282.
- [10] **Chaoniruthisai P, Punnakitikashem P, Rajchamaha K.** Challenges and difficulties in the implementation of a food safety management system in Thailand: A survey of brc certified food productions. *Food Control*, Vol. 93, 2018, pp. 274 - 282.
- [11] **Chatzipetrou, E., Moschidis, O.** An exploratory analysis of quality costing in Greek F&B enterprises, *The TQM Journal*, Vol. 29, 2017, No. 2, pp. 324 - 341.
- [12] **Chatzipetrou, E., Moschidis, O.** A multidimensional longitudinal meta-analysis of quality costing research, *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 35, 2018, No. 2, pp. 405 -429.
- [13] **Chen, H., Liou, B. K., Hsu, K. C., Chen, C. S., & Chuang, P. T.** Implementation of food safety management systems that meets ISO 22000: 2018 and HACCP: A case study of capsule biotechnology products of chaga mushroom. *Journal of Food Science*. Vol. 86, 2021, No. 1, 40-54.
- [14] **Chen, H., Liu, S., Chen, Y., Chen, C., Yang, H., Chen, Y.** Food safety management systems based on ISO 22000:2018 methodology of hazard analysis compared to ISO 22000:2005, *Accredit. Qual. Assur.* Vol. 20, 2020, pp. 23 - 37.
- [15] **Chivandi, D.A.** An Evaluation of ISO 22000 Food Safety Standards Awareness and Implementation in Zimbabwean Branded Fast Food Outlets : Customer, Employee and Management Perspectives, *African Journal of Hospitality, Tourism and Leisure*, Vol. 6, 2017, No. 2, pp. 1 - 25.
- [16] **Dimitrantzou, C., Psomas, E. and Vouzas, F.** Future research avenues of cost of quality: a systematic literature review, *The TQM Journal*, Vol. 32, 2020, No. 6, pp. 1599 - 1622.
- [17] **El-Rouby, M. Z., Bahlol, H. E., El-Desouky, A. I., Sharoba, A. M., & Darweesh, A. H.** Implementation of ISO 22000 System in Spaghetti Industry. *Journal of Food and Dairy Sciences*, Vol. 11, 2020, No. 12, pp. 321-329.
- [18] **El-Rouby, M.Z., Bahlol, H.E., El-Desouky, A.I., Sharoba, A.M., Darweesh, A.H.** Implementation of ISO 22000 System in Spaghetti Industry, *J. Food Dairy Sci.* Vol. 11, 2020, pp. 321 - 329.
- [19] **Farooq, M.A., Kirchain, R., Novoa, H. and Araujo, A.** Cost of quality: evaluating cost-quality trade-offs for inspection strategies of manufacturing processes, *International Journal of Production Economics*, Vol. 188, 2017, pp. 156 -166.
- [20] **Fathurrahman, R., Rukayadi, Y., Fatimah, U.U., Jinap, S., Abdul-Mutalib, N., Sanny, M.** The performance of food safety management system in relation to the microbiological safety of salmon nigiri sushi: A multiple case study in a Japanese chain restaurant. *Food Contro.*, Vol. 127, 2021 p. 108111.
- [21] **Flynn K, Villarreal BP, Barranco A, Belc N, Björnsdóttir B, Fusco V, Rainieri S, Smaradóttir SE, Smeu I, Teixeira P. Jörnsdóttir HÓ.** An introduction to current food safety needs. *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 84, 2019, pp. 1-3.
- [22] **Fonseca, L.M.C.M., Domingues, J.P., Machado, P.B., Calderón, M.** Management system certification benefits: where do we stand?, *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 10, 2017, No. 3, pp. 476 - 494.
- [23] **Gil, L., Ruiz, P., Escrivá, L., Font, G. and Manyes, L.** A decade of food safety management system based on ISO 22000: a global overview, *Toxicología*, Vol. 34, 2017, No. 2, pp. 84 - 93.
- [24] **Glogovac, M., Filipovic, J.** Quality costs in practice and an analysis of the factors affecting quality cost management. *Total Quality Management & Business Excellence*, Vol. 29, 2018, No.13, pp. 1521-1544.
- [25] **Gordon, A., DeVlieger, D., Vasan, A., Bedard, B.** Technical considerations for the implementation of food safety and quality systems in developing countries, *Food Safety and Quality Systems in Developing Countries*, Academian Press, Vol.3, 2020, pp. 1 - 40.

- [26] **Granja, N., Domingues, P., Cabecinhas, M., Zimon, D., Sampaio, P.** ISO 22000 Certification: Diffusion in Europe. *Resources*, Vol. 10, 2021, No. 10. p.100.
- [27] **Guinot, J., Sinn, J.W., Badar, M.A., Ulmer, J.M.** Cost consequence of failure in failure mode and effect analysis, *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 34, 2017, No. 8, pp. 1218-1342.
- [28] *ISO 22000:2018 Sistemi menadžmenta bezbednošću hrane - Zahtevi za svaku organizaciju u lancu hrane*, International Organization for Standardization, 2018.
- [29] **Jin, C., Bouzembrak, Y., Zhou, J., Liang, Q., Van Den Bulk, L. M., Gavai, A., Marvin, H. J.** Big Data in food safety-A review. *Current Opinion in Food Science*, Vol. 36, 2020, pp. 24-32.
- [30] **Joanna T, Wojciech K.** Implementation and functioning of haccp principles in certified and non-certified food businesses : A preliminary study, *British Food Journal*, Vol. 119, 2017, No. 4, pp. 710 - 728.
- [31] **Kamble, S.S., Raut, R.D.** Evaluating the factors considered for procurement of raw material in food supply chain using Delphi-AHP methodology – a case study of potato chips processing company in India, *International Journal of Productivity and Quality Management*, Vol. 26, 2019, No. 2, pp.176 - 189.
- [32] **Kazemi, A., Beheshti, S.O., Nobari, A.** A novel fuzzy knowledge-based system to measure cost of quality. *Journal of applied intelligent systems & information sciences*, Vol. 1, 2020, No. 2, pp. 91-101.
- [33] **Kiss, K., Ruzskai, C., Takács-György, K.** Examination of Short Supply Chains Based on Circular Economy and Sustainability Aspects. *Resources*, Vol. 8, 2019, No. 161.
- [34] **Nayak, R., Waterson, P.** Global food safety as a complex adaptive system: Key concepts and future prospects. *Trends Food Sci. Technol.* Vol. 91, 2019, pp. 409 - 425.
- [35] **Osei-Tutu, B.** Evaluation of Food Safety Management Systems of Food Service Establishments within the Greater Accra Region. *International Journal of Nutrition and Food Engineering* Vol.12, 2018, No. 1, pp.17 – 21.
- [36] **Păunescu, C., Argatu, R., Lungu, M.** Implementation of ISO 22000 in Romanian companies: motivations, difficulties and key benefits, *Amfiteatru Economic*, Vol. 20, 2018, No. 47, pp. 30 -45.
- [37] **Petljak, K., Zulauf, K., Štulec, I., Seuring, S., Wagner, R.** Green supply chain management in food retailing: survey-based evidence in Croatia, *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 23, 2018, No.1, pp. 1-15.
- [38] **Popov, V.G., Kadochnikova, G.D., Pozniakovsky, V.M., Ermolaeva, E.O. and Surkov, I.** Development and implementation of management systems - a state priority in providing quality and safety of AIC products, *Research Journal of Pharmaceutical Biological and Chemical Sciences*, Vol. 9, 2018, No. 6, pp. 66 -77.
- [39] **Radojčić, D.** Serbian Dishes on the Slovenian Table. *Traditiones*, Vol. 39, 2010, No. 1, pp. 111-122.
- [40] **Rosiawan, M., Singgih, M. L., Widodo, E.** Model of quality costs and economic benefits of a business process of manufacturing companies, *Cogent Engineering*, Vol. 6, 2019, No. 8, pp. 1-15.
- [41] **Sadkowski, W.** Selected models of quality costs calculation and their application, *Entrepreneurship – Education*, Vol. 14, 2018, pp. 221-232.
- [42] **Scarpin, M. R. S., Brito, L. A. L.** Operational capabilities in an emerging country: Quality and the cost trade-off effect, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.17, 2017, pp. 460 - 471.
- [43] **Stefanova, M.G.** Integrating Quality and Risk Management in Logistics, IntechOpen: London, UK, 2022, p. 122.
- [44] **Stoyanova, A., Marinova, V., Stoilov, D., Kirechev, D.** Food Safety Management System (FSMS) Model with Application of the PDCA Cycle and Risk Assessment as Requirements of the ISO 22000:2018 Standard, *Standards*, Vol. 2, 2022, pp. 329 - 351.

- [45] **Teli, S.N., Jagtap, M. Chanewar, N.** Cost of quality applications and challenges: a review, *International Journal of Scientific Engineering and Research*, Vol. 8, 2017, No. 3, pp. 52 - 58.
- [46] **Visciano, P., Schirone, M.** Food frauds: Global incidents and misleading situations. *Trends Food Sci. Technol.*, 2021, No. 114, pp. 424 - 442.
- [47] **Walls, H., Baker, P., Chirwa, E., Hawkins, B.** Food security, food safety and healthy nutrition : are they compatible?, *Global Food Security*, 2019, No. 21 pp. 69 - 71.
- [48] *Zakon o bezbednosti hrane*, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 41/2009 i 17/2019.
- [49] **Zimon, D., Domingues, P.** Impact of implementation of ISO 22000 on food safety throughout the supply chain: Insights from Poland, Slovakia and Portuga, *Int. J. Product. Qual. Manag.*, Vol. 30, 2020, pp. 509 - 526.

Tabela 1 Kategorizacija troškova prema PAF modelu

Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju pune realizacije zahteva	Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju neadekvatnog ispunjavanja zahteva
<p>4. Kontekst organizacije Troškovi prevencije tiču se svih zahteva osim, troškova procene: 4.1. Organizacija identifikuje, preispituje i ažurira informacije koje se odnose na interna i eksterna pitanja;</p>	<p>4. Kontekst organizacije Troškovi interne neusaglašenosti: 4.1. Razumevanje organizacije i njenog konteksta Organizacija identifikuje, preispituje i ažurira informacije koje se odnose na interna pitanja; 4.2 Razumevanje potreba i očekivanja zainteresovanih strana Organizacija identifikuje, preispituje i ažurira informacije koje se odnose na zainteresovane strane i njihove zahteve; 4.4 Sistem menadžmenta bezbednošću hranom Organizacija uspostavlja, primenjuje, održava, ažurira i stalno poboljšava FSMS, uključujući i potrebne procese i njihova međusobna delovanja u skladu sa zahtevima ovog dokumenta; Troškovi eksterne neusaglašenosti: 4.1. Razumevanje organizacije i njenog konteksta Organizacija identifikuje, preispituje i ažurira informacije koje se odnose na eksterna pitanja; 4.2 Razumevanje potreba i očekivanja zainteresovanih strana Organizacija utvrđuje zainteresovane strane koje su relevantne za FSMS i njihove zahteve;</p>
<p>5. Liderstvo Troškovi prevencije tiču se svih zahteva osim, troškova procene u zahtevu: 5.1. Najviše rukovodstvo obezbeđuje da se FSMS vrednuje i održava u cilju ostvarenja predviđenih rezultata (4.1);</p>	<p>5. Liderstvo U tački 5. se mogu javiti i troškovi interne neusaglašenosti: 5.3.1 Najviše rukovodstvo mora da dodeli odgovornost i vlasništvo za obezbeđenje da je FSMS usaglašen sa zahtevima ovog dokumenta, izveštavanje najvišeg rukovodstva o performansama FSMS-a, imenovanje tima za bezbednost hrane i vođenje tima za bezbednost hrane i određivanje osobe sa definisanim odgovornošću i ovlašćenjima koje iniciraju i dokumentuju meru; 5.3.2. Vođa tima za bezbednost hrane mora da bude odgovoran za obezbeđenje da je FSMS uspostavljen, primenjen, održavan i ažuriran, kao i za upravljanje timom za bezbednost hrane i organizovanje njegovog rada, obezbeđivanje relevantne obuke i kompetencije tima za bezbednost hrane i izveštavanje najvišeg rukovodstva o efektivnosti i pogodnosti FSMS-a; 5.3.3 Sve osobe moraju da imaju odgovornost da izveštavaju identifikovane osobe o problemima koji se odnose na FSMS;</p>
<p>6. Planiranje Troškovi prevencije tiču se svih zahteva osim, troškova procene u zahtevima: 6.1.1 Organizacija mora da utvrđuje rizike kojima treba da se bavi da bi se steklo uverenje da FSMS može da ostvaruje predviđeni rezultat, da bi se povećali željeni efekti i da bi se ostvarilo stalno poboljšanje; mora da planira i vrednuje efektivnost tih mera; 6.1.2 Mere, moraju da budu srazmerne u odnosu na uticaj na zahteve koji se odnose na bezbednost hrane, na upotrebu prehrambenih proizvoda i usluga za korisnike i zahteve zainteresovanih strana; 6.1.3. Ciljevi FSMS-a moraju da se prate i verifikuju; 6.2.1. Kada organizacija utvrđuje potrebu za izmenama u FSMS-u, uključujući izmene osoblja, promene moraju da se sprovedu i da budu opšte na planirani način; 6.3. Organizacija mora da razmatra svrhu izmena i njihove potencijalne posledice, kontinuitet integriteta FSMS-a, dostupnost resursa za efektivnu primenu izmena, raspodelu ili preraspodelu odgovornosti i ovlašćenja</p>	<p>6. Planiranje Troškova interne neusaglašenosti: 6.1.1. Organizacija mora da utvrđuje rizike kojima treba da se bavi da bi se steklo uverenje da FSMS može da ostvaruje predviđeni rezultata, da bi se povećali željeni efekti i da bi se ostvarilo stalno poboljšanje; 6.1.2 Organizacija mora da planira i vrednuje efektivnost tih mera;</p>
<p>7. Podrška Troškovi prevencije tiču se svih zahteva osim, troškova procene u zahtevima: 7.1.1 Organizacija mora da potvrđuje i obezbeđuje resurse koji</p>	<p>7. Podrška Pored troškova prevencije procene pojavljuju se troškovi internih neusaglašenosti:</p>

<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju pune realizacije zahteva</i></p>	<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju neadekvatnog ispunjavanja zahteva</i></p>
<p>su potrebni za uspostavljanje, primenu, održavanje, ažuriranje i stalno poboljšanje FSMS-a;</p> <p>7.1.3 Organizacija mora da obezbedi resurse za utvrđivanje, postavljanje i održavanje infrastrukture neophodne za ostvarivanje upotrebe sa zahtevima FSMS-a; 7.1.4 Organizacija mora da određuje, obezbeđuje i održava resurse za uspostavljanje i održavanje radnog okruženja, kao i za upravljanje radnim okruženjem, koji su neophodni za ostvarivanje FS održavanja.</p> <p>7.4.2 Eksterno komuniciranje Organizacija mora da uspostavi, primenjuje i održava efikasno komuniciranje sa eksternim isporučiocima i ugovaračima;</p> <p>7.5.2 Kada kreira i ažurira dokumentovane informacije, organizacija mora da obezbedi preispitivanje i odobravanje pogodnosti i adekvatnosti.</p> <p>7.5.3.2 Dokumentovane informacije eksternog; porekla za koje je organizacija utvrdila da su neophodne za planiranje i funkcionisanje FSMS-a, moraju da se identifikuju na odgovarajući način i kojima se mora upravljati;</p>	<p>7.4.2. Dokazi o eksternom komuniciranju moraju da se čuvaju kao dokumentovane informacije;</p> <p>7.4.3. Interno komuniciranje Kako bi se održavala efikasnost FSMS-a, organizacija mora da obezbedi da tim za bezbednost hrane bude blagovremeno informisan o promenama proizvoda ili novih proizvoda; o promenama sirovina, sastojaka i usluga; o promenama proizvodnih sistema i opreme; o promenama proizvodnih objekata, lokacije opreme i okoline; o promenama programa čišćenja i dezinfekcije; o promenama sistema pakovanja, skladištenja i distribucije; promenama kompetencije i/ili podele odgovornosti i ovlašćenja; o promenama primena zahteva zakona i propisa; promenama znanja u vezi sa opasnostima po bezbednost hrane i kontrolnim merama; o promenama zahteva korisnika, sektora i drugih zahteva koje organizacija uzima u obzir; promenama relevantnih pitanja i komunikacija od spoljnih zainteresovanih strana; promenama prigovora i upozorenja koji ukazuju na opasnost po bezbednost hrane u finalnim proizvodima; o promenama drugih uslova koji imaju uticaj na bezbednost hrane;</p> <p>Tim za bezbednost hrane mora da obezbedi da ove informacije budu obuhvaćene prilikom ažuriranja FSMS-a (videti 4.4 i 10.3); Najviše rukovodstvo mora da obezbedi da relevantne informacije budu obuhvaćene kao ulazni elementi za preispitivanje od strane rukovodstva (videti 9.3).</p> <p>7.5.2 Kreiranje i ažuriranje Kada kreira i ažurira dokumentovane informacije, organizacija mora da obezbedi identifikaciju i opis (npr. naslov, datum, autor ili referentni broj)</p> <p>Kada kreira i ažurira dokumentovane informacije, organizacija mora da obezbedi format (npr. jezik, verzija softvera, grafički prikaz) i medij (npr. papirni, elektronski);</p> <p>Kada kreira i ažurira dokumentovane informacije, organizacija mora da obezbedi preispitivanje i odobravanje pogodnosti i adekvatnosti.</p> <p>7.5.3 Upravljanje dokumentovanim informacijama</p> <p>7.5.3.1 Dokumentovane informacije koje se zahtevaju FSMS-om i ovim dokumentom moraju da se upravljaju da bi se obezbedilo da one budu dostupne i pogodne za upotrebu, gde i kada je to potrebno;</p> <p>7.5.3.1 Dokumentovane informacije koje se zahtevaju FSMS-om i ovim dokumentom moraju da se upravljaju da bi se obezbedilo da one budu adekvatno zaštićene (npr. od gubitka poverenja, neodgovarajuće upotrebe ili gubitka integriteta).</p> <p>7.5.3.2 Dokumentovane informacije koje se čuvaju kao dokaz o usaglašenosti moraju da budu zaštićene od nepredviđenih prepravki.</p> <p>7.5.3.2 Da bi upravljala dokumentovanim informacijama, organizacija mora da se bavi sledećim aktivnostima, kako je primenjivo distribucijom, pristupom, traženjem i korišćenjem, skladištenjem i očuvanjem, uključujući očuvanje čitljivosti, kako je primenjivo upravljanjem izmenama (npr. upravljanje verzijama), čuvanjem i odlaganjem.</p> <p>Kao i troškovi eksterne neusaglašenosti:</p> <p>7.4.2. Eksterno komuniciranje Organizacija mora da uspostavi, primenjuje i održava efikasno komuniciranje sa korisnicima i/ili potrošačima, u vezi sa informacijama o proizvodu koje se odnose na bezbednost hrane, kako bi se omogućili rukovanje, izlaganje, skladištenje, priprema, distribucija i korišćenje proizvoda unutar lanca hrane ili od strane potrošača; u vezi sa identifikovanim opasnostima po bezbednost hrane kojima treba da upravljaju druge organizacije u lancu hrane i/ili potrošači; u vezi sa postavkama rasporeda, upitima i nalogima, uključujući njihove izmene u vezi sa povratnim informacijama od korisnika i/ili potrošača, uključujući i prigovore;</p> <p>7.5.3.2 Dokumentovane informacije eksternog porekla za koje je organizacija utvrdila da su neophodne za planiranje i funkcionisanje FSMS-a, moraju da se identifikuju na odgovarajući način i kojima se mora upravljati;</p>

<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju pune realizacije zahteva</i></p>	<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju neadekvatnog ispunjavanja zahteva</i></p>
<p>8 Realizacija operativnih aktivnosti Pored troškova prevencije troškovi procene su:</p> <p>8.2.1 Organizacija mora da uspostavi, primeni, održava i ažurira PRP-ove, kako bi olakšala sprečavanje pojave i/ili smanjivanje kontaminanata (uključujući opasnost po bezbednost hrane) u proizvodima, procesu proizvodnje i radnom okruženju PRP (PRP-ovi) moraju da budu odgovarajući za veličinu i vrstu operativnih aktivnosti i prirodu proizvoda koji se proizvode i/ili kojima se rukuje;</p> <p>8.3 Pri uspostavljanju i primeni sistema sledljivosti, mora se razmatrati veza između lota primljenog materijala, sastojaka i poluproizvoda do finalnih proizvoda; mora se razmatrati dorada materijala/proizvoda; mora se razmatrati distribucija finalnog proizvoda</p> <p>8.4 Pravnost na reagovanje u vanrednim situacijama i odgovor na njih;</p> <p>8.4.2 Organizacija mora da reaguje na postojeće vanredne situacije i incidente tako što komunicira interno; Organizacija mora da periodično ispituje procedure, kada je to izvodljivo;</p> <p>8.5.1.1 Ovo mora da uključuje, ali se ne ograničava na opasnosti po bezbednost hrane koje su relevantne za FSMS;</p> <p>8.5.1.5.2 Potvrda dijagrama toka na licu mesta Tim za bezbednost hrane mora da potvrdi tačnost dijagrama toka na licu mesta, ažurira dijagrame toka, gde je to odgovara, i da ih čuva kao dokumentovane informacije;</p> <p>8.5.2.2.2 Organizacija mora da identifikuje proizvode (npr. prijem sirovina, prerada, distribucija i isporuka) pri kojima svaka opasnost po bezbednost hrane može biti prisutna, uvedena, povećana ili istrajna; Prilikom identifikacije opasnosti, organizacija mora da razmatra faze koje prethode i sledeće u lancu hrane; sve korake u dijagramu toka; opremu za procese, pomoćna; sredstva/usluge, okruženje procesa i osobe.</p> <p>8.5.2.2.3 Organizacija mora da utvrdi prihvatljiv nivo svake identifikovane opasnosti po bezbednost hrane u finalnom proizvodu, kad god je to moguće;</p> <p>8.5.2.3 Organizacija mora da sprovede ocenjivanje opasnosti za svaku identifikovanu opasnost po bezbednost hrane, kako bi se utvrdilo da li je njeno sprečavanje ili smanjenje na prihvatljiv nivo od suštinskog značaja; Organizacija mora da vrednuje svaku opasnost po bezbednost hrane uzimajući u obzir njene pojave u finalnom proizvodu pre primene kontrolnih mere; Organizacija mora da vrednuje svaku opasnost po bezbednost hrane uzimajući u obzir mogućnost mogućeg štetnog uticaja na zdravlje u odnosu na predviđenu upotrebu (videti 8.5.1.4); Organizacija mora da identifikuje sve značajne opasnosti po bezbednost hrane;</p> <p>8.5.2.4.1 Na osnovu ocenjivanja opasnosti, organizacija mora da izabere odgovarajuće kontrolne mere ili kombinaciju kontrolnih mera kojom se identifikuju značajne opasnosti po nivo bezbednosti hrane mogu sprečiti ili smanjiti prihvat na definisanje; Za svaku izabranu kontrolnu meru</p>	<p>8 Realizacija operativnih aktivnosti Troškovi interne neusaglašenosti:</p> <p>8.1 Planiranje i upravljanje realizacijom operativnih aktivnosti Organizacija mora da upravlja planiranim izmenama i da preispituje posledice nenamernih izmena, tako što preduzima mere za ublaženje svakog štetnog uticaja u meri u kojoj je to neophodno; Organizacija mora da obezbedi da se upravlja procesima iz autorsora;</p> <p>8.2 Prethodno potrebni programi (PRP-ovi) 8.2.1 Organizacija mora da uspostavi, primeni, održava i ažurira PRP-ove, kako bi olakšala sprečavanje pojave i/ili smanjivanje kontaminanata (uključujući opasnost po bezbednost hrane) u proizvodima, procesu proizvodnje i radnom okruženju;</p> <p>8.2.2 PRP (PRP-ovi) moraju da budu odgovarajući za veličinu i vrstu operativnih aktivnosti i prirodu proizvoda koji se proizvode i/ili kojima se rukuje;</p> <p>8.2.4 Pri uspostavljanju PRP-ova organizacija mora da razmatra konstrukciju, raspored zgrada i pripadajućih instalacija; raspored prostorija, uključujući zoniranje, radni prostor i pomoćne prostorije za zaposlene; kontrolu štete, otklanjanje otpada i otpadnih voda i praćenje usluga; pogodnost opreme i njenu dostupnost za čišćenje i održavanje; odobrenje isporučioaca i procesa obezbeđenja (npr. sirovina, sastojaka, hemikalija i ambalaže); prijem dostavljenih materijala, skladištenje, opremanje, transportovanje i rukovanje proizvodima; mere za sprečavanje unakrsne kontaminacije; čišćenje i dezinfikovanje; ličnu higijenu; informacije o proizvodu/svest potrošača; druge aspekte, kako se odgovara;</p> <p>8.3 Sistem sledljivosti U sistemu sledljivosti mora da bude moguće jedinstveno identifikovanje ulaznog materijala od isporučilaca i prve faze distribucionog puta finalnog proizvoda;</p> <p>Pri uspostavljanju i primeni sistema sledljivosti, mora se razmatrati veza između lota primljenog materijala, sastojaka i poluproizvoda do finalnih proizvoda; mora se razmatrati dorada materijala/proizvoda; mora se razmatrati distribucija finalnog proizvoda; Dokumentovane informacije, kao dokaz o sistemu sledljivosti, moraju da se čuvaju tokom definisanog vremenskog perioda, kako bi obuhvatile, najmanje, rok upotrebe proizvoda.</p> <p>8.4.1 Najviše rukovodstvo mora da obezbedi da su postavljene procedure za odgovor na potencijalne vanredne situacije ili incidente koji mogu uticati na bezbednost hrane i koji su relevantni za ulogu organizacije u lancu hrane;</p> <p>8.4.2 Postupanje tokom vanrednih situacija i incidenta Organizacija mora da reaguje na postojeće vanredne situacije i incidente tako što komunicira interno;</p> <p>Organizacija mora da preduzima mere za smanjenje posledica vanrednih situacija, koje odgovaraju stepenu vanrednih situacija ili incidenta i potencijalnom uticaju na bezbednost hrane;</p> <p>Organizacija mora da periodično ispituje procedure, kada je to izvodljivo</p> <p>8.5.1.1 Ovo mora da uključuje, ali se ne ograničava na opasnosti po bezbednost hrane koje su relevantne za FSMS</p> <p>8.5.1.3 Karakteristike finalnih proizvoda Organizacija mora da održava dokumentovane informacije koje se odnose na karakteristike finalnih proizvoda do obima koji je neophodan za sprovođenje analize opasnosti (videti 8.5.2), uključujući naziv proizvoda ili sličnu identifikaciju; uključivajući sastav; biološke, hemijske i fizičke karakteristike relevantne za bezbednost hrane; uključivajući predviđeni rok upotrebe i uslova skladištenja; uključivajući ambalažu; označavanje u vezi sa sigurnošću hrane i/ili uputstva za rukovanje, pripremu i predviđenu upotrebu; uključivajući način (načine) distribucije i isporuke;</p> <p>8.5.2.2.2 Organizacija mora da identifikuje proizvode (npr. prijem sirovina, prerada, distribucija i isporuka) pri kojima svaka opasnost</p>

<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju pune realizacije zahteva</i></p>	<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju neadekvatnog ispunjavanja zahteva</i></p>
<p>mora da bude ocenjena verovatnoća njenog neuspješnog funkcionisanja, mora da bude ocenjena značajnost posledica u slučaju njenog neuspješnog funkcionisanja; Ovo ocenjivanje mora da obuhvati efekat na identifikovanu značajnu opasnost po bezbednost hrane; lokaciju u odnosu na druge kontrolne mere</p> <p>8.5.2.4.1 Ovo ocenjivanje mora da obuhvati da li je posebno uspostavljena i primena da bi se opasnosti smanjile na prihvatljiv nivo; da li je to pojedinačna mera ili deo kombinacije kontrolnih mera;</p> <p>8.5.2.4.2 Proces donošenja odluke i rezultata izbora i kategorizacije kontrolnih mera moraju da se održavaju kao dokumentovane informacije; Tim za bezbednost hrane mora da validira da je izabranim kontrolnim merama moguće postići predviđenu kontrolu značajne opasnosti po bezbednost hrane; Ova validacija mora da se izvrši pre primene kontrolne mere (kontrolnih mera) i kombinacije kontrolnih mera koje su obuhvaćene planom za upravljanje opasnostima (videti 8.5.4) i nakon svake promene u njemu;</p> <p>Kada rezultat validacije pokaže da kontrolnim merama nije moguće postići predviđenu kontrolu, tim za bezbednost hrane mora da promeni kontrolne mere i izvrši ponovno ocenjivanje kontrolnih mera i/ili kombinacije kontrolnih mera;</p> <p>8.5.4.2 Kritične granice u CCP-ovima moraju da budu merljive.</p> <p>8.5.4.3 U svakom CCP-u mora da bude uspostavljen sistem za praćenje za svaku kontrolnu meru ili kombinaciju kontrolnih mera, kako bi se otkrilo svako prekoračenje kritičnih granica; Sistem mora da obuhvati sva planirana merenja koja se odnose na kritične granice; Za svaki OPRP mora da bude uspostavljen sistem za praćenje za svaku kontrolnu meru ili kombinaciju kontrolnih mera radi otkrivanja neispunjavanja kriterijuma mere;</p> <p>Kada je praćenje OPRP-a zasnovano na subjektivnim podacima uočavanja (npr. vizuelno kontrolisanje), metoda mora da bude podržana instrukcijama ili specifikacijama.</p> <p>8.5.4.4 Mere koje se predviđaju kada kritične granice ili kriterijum mera nisu ispunjen; Organizacija mora da utvrdi korekcije (videti 8.9.2) i korektivne mere (videti 8.9.3) koje treba preduzeti kada nisu ispunjene kritične granice ili kriterijumi mere; Organizacija mora da obezbedi da je identifikovan uzrok neusaglašenost; Organizacija mora da obezbedi da su parametri koji su kontrolisani u CCP-u ili od strane OPRP-a vraćeni unutar kritičnih granicama ili kriterijuma mere; Organizacija mora da izvrši korekcije u skladu sa 8.9.2 i korektne mere u skladu sa 8.9.3;</p> <p>8.6 Nakon uspostavljanja plana za upravljanje opasnostima, organizacija mora da ažurira karakteristike sirovina, sastojaka i materijala u dodatku sa proizvodom ako je to potrebno; finalnih proizvoda ako je to potrebno; predviđenu upotrebu ako je to potrebno; dijagram toka i opise procesa i okruženja procesa ako je to potrebno; Organizacija mora da obezbedi dokaz da su precizne metode i oprema za praćenje i merenje adekvatni za aktivnosti praćenja i merenja koje se odnose na PRP-ove i plan za upravljanje opasnostima;</p>	<p>po bezbednost hrane može biti prisutna, uvedena, povećana ili istrajna;</p> <p>8.5.2.2.2 Prilikom identifikacije opasnosti, organizacija mora da razmatra faze koje prethode i sledeće u lancu hrane; sve korake u dijagramu toka; opremu za procese, pomoćna sredstva/usluge, okruženje procesa i osobe</p> <p>8.5.2.3 Ocenjivanje opasnosti</p> <p>Organizacija mora da sprovede ocenjivanje opasnosti za svaku identifikovanu opasnost po bezbednost hrane, kako bi se utvrdilo da li je njeno sprečavanje ili smanjenje na prihvatljiv nivo od suštinskog značaja;</p> <p>Organizacija mora da vrednuje svaku opasnost po bezbednost hrane uzimajući u obzir njene pojave u finalnom proizvodu pre primene kontrolnih mere;</p> <p>Mora da se opiše korišćena metodologija i rezultat ocenjivanja opasnosti mora da se održava kao dokumentovana informacija;</p> <p>8.5.2.4.1 Ovo ocenjivanje mora da obuhvati da li je posebno uspostavljena i primena da bi se opasnosti smanjile na prihvatljiv nivo; da li je to pojedinačna mera ili deo kombinacije kontrolnih mera;</p> <p>8.5.3 Validacija kontrolnih mera i kombinacija kontrolnih mera</p> <p>Tim za bezbednost hrane mora da validira da je izabranim kontrolnim merama moguće postići predviđenu kontrolu značajne opasnosti po bezbednost hrane.</p> <p>8.5.4.2 Određivanje kritičnih granica i kriterijuma mere</p> <p>U svakom CCP-u, pomoću metode i učestalosti praćenja mora da bude moguće blagovremeno otkrivanje bilo kog prekoračenja kritičnih granica, kako bi se proizvod blagovremeno izdvojio i vrednovao (videti 8.9.4)</p> <p>8.5.4.4 Mere koje se predviđaju kada kritične granice ili kriterijum mera nisu ispunjen</p> <p>Organizacija mora da utvrdi korekcije (videti 8.9.2) i korektivne mere (videti 8.9.3) koje treba preduzeti kada nisu ispunjene kritične granice ili kriterijumi mere;</p> <p>Organizacija mora da obezbedi da potencijalno nebezbedni proizvodi nisu prihvaćeni (videti 8.9.4); Organizacija mora da obezbedi da je identifikovan uzrok neusaglašenost; Organizacija mora da obezbedi da su parametri koji su kontrolisani u CCP-u ili od strane OPRP-a vraćeni unutar kritičnih granicama ili kriterijuma mere; Organizacija mora da izvrši korekcije u skladu sa 8.9.2 i korektne mere u skladu sa 8.9.3;</p> <p>8.7 Organizacija mora da preduzme mere koje se odnose na opremu ili okruženje procesa i sve proizvode na koje je uticala neusaglašenost;</p> <p>8.8.1 Organizacija mora da uspostavlja, primenjuje i održava verifikacione aktivnosti.</p> <p>Pri planiranju verifikacije moraju da se definišu svrha, metode, učestalost i odgovornosti za verifikacione aktivnosti.</p> <p>Verifikacionim aktivnostima mora se potvrditi da su PRP-ovi primenjeni i efikasni; plan za upravljanje opasnostima primenjen i efektan; nivoi opasnosti unutrašnjih identifikovanih prihvatljivih nivoa; uključen element za analizu opasnosti ažuriran; se druge mere koje određuju organizaciju primenjuju i da su efektivne</p> <p>Organizacija mora da obezbedi da verifikacione aktivnosti ne sprovodi osoba koja je odgovorna za praćenje istih aktivnosti; Kada je verifikacija zasnovana na ispitivanju uzoraka finalnog proizvoda ili direktnih procesnih uzoraka i kada takvi uzorci za ispitivanje pokazuju neusaglašenost sa prihvatljivim nivoom opasnosti po bezbednost hrane, organizacija mora da rukuje takvim lotom (lotovima) proizvoda kao potencijalno nebezbednim i primeni korektivne mere u skladu sa 8.9.3.</p> <p>8.9.2.1 Kada kritične granice u CCP-ovima i/ili kriterijum mere za OPRP-ove nisu ispunjeni, organizacija mora da obezbedi da su proizvodi na koje je to uticalo identifikovani i kontrolisani u pogledu njihove upotrebe i puštanja;</p> <p>Organizacija mora da uspostavi, održava i ažurira dokumentovane informacije za metodu identifikacije, ocenjivanja i korekcije za</p>

<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju pune realizacije zahteva</i></p>	<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju neadekvatnog ispunjavanja zahteva</i></p>
<p>Oprema za praćenje i merenje koja se koristi mora da bude etalonirana ili verifikovana u specifičnim intervalima pre upotrebe; podešena ili ponovo podešena, po potrebi; identifikovana da bi se omogućilo utvrđivanje statusa etaloniranja; zaštićena od podešavanja koja bi rezultat merenja učinila nevažećim; zaštićena od oštećenja ili propadanja; Organizacija mora da oceni validnost prethodnih rezultata merenja, kada se ustanovi da oprema ili proces nisu usaglašeni sa zahtevima; Organizacija mora da preduzme mere koje se odnose na opremu ili okruženje procesa i sve proizvode na koje je uticala neusaglašenost</p> <p>Kad god ima izmene, uključujući konfiguraciju softvera/modifikacije komercijalnog softvera, jedno moraju da budu odobrene, dokumentovane i validne pre primene.</p> <p>8.8.1. Organizacija mora da uspostavlja, primenjuje i održava verifikacione aktivnosti.</p> <p>Kada je verifikacija zasnovana na ispitivanju uzoraka finalnog proizvoda ili direktnih procesnih uzoraka i kada takvi uzorci za ispitivanje pokazuju neusaglašenost sa prihvatljivim nivoom opasnosti po bezbednost hrane (videti 8.5.2.2), organizacija mora da rukuje takvim lotom (lotovima) proizvoda kao potencijalno nebezbednim (videti 8.9.4.3) i primeni korektivne mere u skladu sa 8.9.3.</p> <p>8.9.2.1 Kada kritične granice u CCP-ovima i/ili kriterijum mere za OPRP-ove nisu ispunjeni, organizacija mora da obezbedi da su proizvodi na koje je to uticalo identifikovani i kontrolisani u pogledu njihove upotrebe i puštanja</p> <p>8.9.2.4 Dokumentovane informacije moraju da se čuvaju kako bi se opisale korekcije izvršene na neusaglašenim proizvodima i procesima</p> <p>8.9.3 Potreba za korektivnim merama mora da se vrednuje onda kada kritične granice u CCP-u (CCP-ovima) i/ili kriterijum mere za OPRP-ove nisu ispunjeni</p> <p>8.9.4.1 Organizacija mora da preduzima mere kako bi se sprečilo da potencijalno nebezbedni proizvodi uđu u lanac hrane, osim ako se može pokazati da su opasnosti po bezbednost hrane o kojima je reč smanjene na definisane prihvatljive nivoe; Organizacija mora da preduzima mere kako bi se sprečilo da potencijalno nebezbedni proizvodi uđu u lanac hrane, osim ako se može pokazati da će opasnost po bezbednost hrane o kojima je reč biti smanjene na identifikovane prihvatljive nivoe pre ulaska u lanac hrane; Organizacija mora da preduzima mere kako bi se sprečilo da potencijalno nebezbedni proizvodi uđu u lanac hrane, osim ako se može pokazati da proizvod još uvek ispunjava definisane prihvatljive nivoe opasnosti po bezbednost hrane o kojima je reč bez obzira na neusaglašenost;</p> <p>8.9.4.2 Svaki lot proizvoda na koji je uticala neusaglašenost mora da se vrednuje; Proizvodi na koje je uticalo neispunjavanje kriterijuma mere za OPRP-ove moraju da budu pušteni kao bezbedni samo kada se prime neki od sledećih uslova: dokaz, osim sistema praćenja, koji pokazuje da su kontrolne mere bile efektivne; dokaz koji pokazuje da je kombinovani efekat kontrolnih mera za taj određeni proizvod usklađen sa predviđenim performansom (tj. identifikovanim</p>	<p>proizvode na koje je to uticalo da bi se obezbedilo ispravno rukovanje njima;</p> <p>8.9.2.3 Kada nije ispunjen kriterijum mere za OPRP, mora da se sprovede određivanje posledica neuspeha u pogledu bezbednosti hrane; određivanje uzroka neuspeha; identifikaciju proizvoda na koje je to uticalo i rukovanje u skladu sa 8.9.4;</p> <p>8.9.2.4 Dokumentovane informacije moraju da se čuvaju kako bi se opisale korekcije izvršene na neusaglašenim proizvodima i procesima i prirodi neusaglašenosti; uzroku (uzroke) neuspeha; posledice koje su rezultat neusaglašenosti;</p> <p>8.9.4.1 Organizacija mora da preduzima mere kako bi se sprečilo da potencijalno nebezbedni proizvodi uđu u lanac hrane, osim ako se može pokazati da će opasnost po bezbednost hrane o kojima je reč biti smanjene na identifikovane prihvatljive nivoe pre ulaska u lanac hrane;</p> <p>Organizacija mora da čuva pod kontrolom proizvoda koji su identifikovani kao potencijalno nebezbedni, sve dok proizvodi ne budu vredni i dok se ne utvrdi njihovo odbacivanje;</p> <p>Ako se za proizvode kojima organizacija više ne upravlja naknadno utvrdi da su nebezbedni, organizacija mora da obavesti relevantne zainteresovane strane i da pokrene povlačenje/opoziv (videti 8.9.5);</p> <p>8.9.4.2 Vrednovanje za puštanje</p> <p>Proizvodi na koje je uticalo prekoračenje kritičnih granica u okviru CCP-ova, ne smeju da budu pušteni, ali se njima mora rukovati u skladu sa 8.9.4.3;</p> <p>Troškovi eksterne neusaglašenosti;</p> <p>8.2.3 Pri izboru i/ili uspostavljanju PRP-ova, organizacija mora da obezbedi da su identifikovani primenjivi zahtevi zakona, propisi, kao i uzajamno dogovoreni zahtevi korisnika</p> <p>8.4. Najviše rukovodstvo mora da obezbedi da su postavljene procedure za odgovor na potencijalne vanredne situacije ili incidente koji mogu uticati na bezbednost hrane i koji su relevantni za ulogu organizacije u lancu hrane;</p> <p>8.4.2 Postupanje tokom vanrednih situacija i incidenta</p> <p>Organizacija mora da reaguje na postojeće vanredne situacije i incidente tako što komunicira eksterno (npr. sa isporučiocima, korisnicima, odgovarajućim nadležnim telima, medijama);</p> <p>Organizacija mora da reaguje na postojeće vanredne situacije i incidente tako što obezbeđuje da su identifikovani primenjivi zahtevi zakona i propisa;</p> <p>8.5.1.2 Organizacija mora da obezbedi da su svi primenjivi zahtevi zakona i propisa koji se odnose na bezbednost hrane identifikovani za sve sirovine, sastojke i materijale u dodatku proizvoda</p> <p>8.5.1.3 Karakteristike finalnih proizvoda</p> <p>Organizacija mora da obezbedi da su svi primenjivi zahtevi zakona i propisi koji se odnose na bezbednost hrane identifikovani za predviđenu proizvodnju svih finalnih proizvoda;</p> <p>8.5.1.4 Predviđena upotreba</p> <p>Predviđena upotreba, realno očekivano rukovanje finalnim proizvodom i svako nenamerno, ali realno očekivano pogrešno rukovanje i pogrešna upotreba finalnog proizvoda moraju se uzeti u razmatranje i moraju se održavati kao dokumentovane informacije u onoj meri koja je potrebna za sprovođenje analize opasnosti (8.5.2)</p> <p>8.5.2.2.3 Prilikom utvrđivanja prihvatljivih nivoa, organizacija mora da obezbedi da su identifikovani primenjivi zahtevi zakona, propisa i korisnika; predviđenu upotrebu finalnih proizvoda; sve druge relevantne informacije</p> <p>8.5.2.3 Ocenjivanje opasnosti</p> <p>Organizacija mora da vrednuje svaku opasnost po bezbednost hrane uzimajući u obzir mogućnost mogućeg štetnog uticaja na zdravlje u odnosu na predviđenu upotrebu (videti 8.5.1.4);</p> <p>Etaloniranje celokupne opreme mora biti sledljivo prema međunarodnim ili nacionalnim standardima za merenje</p> <p>Gde ne postoje standardi, osnova koja se koristi za etaloniranje ili verifikaciju mora da se čuva kao dokumentovana informacija</p>

<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju pune realizacije zahteva</i></p>	<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju neadekvatnog ispunjavanja zahteva</i></p>
<p>prihvatljivim nivoima);rezultati uzimanja uzoraka, analize i/ili drugih verifikacionih aktivnosti koji pokazuju da je proizvod usaglašen sa identifikovanim prihvatljivim nivoima za opasnost po bezbednost hrane o kojima je reč. Dokumentovane informacije o raspoređivanju neusaglašenih proizvoda, uključujući identifikaciju osoba koje imaju ovlašćenje za odobravanje, moraju da se čuvaju; 8.9.5 Organizacija mora da bude u stanju da obezbedi blagovremeno povlačenje/opoziv lota finalnih proizvoda koji su identifikovani kao potencijalno nebezbedni, tako što će imenovati kompetentne osobe koje imaju ovlašćenja za pokretanje i sprovođenje povlačenja/opoziva Organizacija mora da uspostavi i održava dokumentovane informacije za: obaveštavanje relevantnih zainteresovanih strana (npr. nadležnih tela za donošenje zakona i propisa, korisnika i/ili potrošača; Organizacija mora da uspostavi i održava dokumentovane informacije za rukovanje povučenim/opozvanim proizvodima, kao i proizvodima koji su još uvek na zalihama; Povučeni/opozvani proizvodi i preostali finalni proizvodi na zalihama moraju da se obezbeđuju ili drže pod kontrolom organizacije, sve dok se njima ne bude upravljalo u skladu sa 8.9.4.3.; Uzrok, obim i rezultat povlačenja/opoziva moraju da se čuvaju kao dokumentovane informacije i saopšte najvišem rukovodstvu kao ulazni elementi za preispitivanje od strane rukovodstva (videti 9.3).</p>	<p>Organizacija mora da oceni validnost prethodnih rezultata merenja, kada se ustanovi da oprema ili proces nisu usaglašeni sa zahtevima Organizacija mora da preduzme mere koje se odnose na opremu ili okruženje procesa i sve proizvode na koje je uticala neusaglašenost; Softver koji se koristi pri praćenju i merenju u okviru FSMS-a pre upotrebe mora da validira organizacija, isporučilac softvera ili treća strana; Organizacija mora da održava dokumentovane informacije o aktivnostima validacije i softver se mora blagovremeno ažurirati; Kad god ima izmene, uključujući konfiguraciju softvera/modifikacije komercijalnog softvera, jedno moraju da budu odobrene, dokumentovane i validne pre primene; 8.9.3 Ove mere moraju da obuhvate preispitivanje neusaglašenosti koje su identifikovane od strane korisnika i/ili na osnovu ugovora potrošača i/ili izveštaja sa kontrole od strane regulatornih organa; trendova u rezultatima praćenja koji mogu da ukažu na gubitak upravljanja; određivanje uzroka neusaglašenosti;trendova u rezultatima praćenja koji mogu da ukažu na gubitak upravljanja; utvrđivanje i primenjivanje mera, kako bi se obezbedilo da se neusaglašenosti ne ponove; dokumentovanje rezultata preduzetih korektivnih mera; verifikovanje preduzetih korektivnih mera da bi se obezbedilo da su efektivne; 8.9.4.1 Ako se za proizvode kojima organizacija više ne upravlja naknadno utvrdi da su nebezbedni, organizacija mora da obavesti relevantne zainteresovane strane i da pokrene povlačenje/opoziv; 8.9.4.3 Raspoređivanje neusaglašenih proizvoda Proizvodi koji nisu prihvatljivi za puštanje moraju da budu ponovo prerađeni ili dalje prerađeni unutar ili van organizacije, kako bi se obezbedilo da je opasnost po bezbednost hrane smanjena do prihvatljivog nivoa ili proizvodi koji nisu prihvatljivi za puštanje moraju da budu preusmereni za drugu namenu sve dok ne utiču na bezbednost hrane u lancu hrane; ili uništeni i/ili odloženi kao otpad;</p>
<p>9.Vrednovanje performansi Pored troškova procene, troškovi prevencije su: 9.3.3.Organizacija mora da čuva dokumentovane informacije kao dokaz o rezultatima preispitivanja od strane rukovodstva;</p>	<p>9.Vrednovanje performansi Troškovi interne neusaglašenosti su: 9.1.1 Organizacija mora da potvrđuje šta je potrebno da se prati i meri; metode za praćenje, merenje, analizu i vrednovanje, kako je to primenljivo, da bi se obezbedili validni rezultati; kada praćenje i merenje moraju da se sprovode; kada rezultati praćenja i merenja moraju da se analiziraju i vrednuju; ko mora da vrši analizu i vrednovanje rezultata praćenja i merenja; 9.1.2 Analiza i vrednovanje Organizacija mora da analizira i vrednuje odgovarajuće podatke i informacije koje proizlaze iz praćenja i merenja, uključujući rezultate verifikacionih aktivnosti koje se odnose na PRP-ove i plan za upravljanje opasnostima (videti 8.8 i 8.5.4), interne provere (9.2) i eksterne provere; Analiza mora da se izvede kako bi se potvrdilo da ukupne performanse sistema ispunjavaju planirane aranžmane i zahteve FSMS-a koje je uspostavila organizacija; identifikovala potrebu za ažuriranjem ili poboljšanjem FSMS-a; identifikovali trendovi koji ukazuju na veću učestalost pojave potencijalno nebezbednih proizvoda ili neuspešnih procesa; uspostavile informacije za planiranje programa interne provere koji se odnosi na status i važnost oblasti koje se proveravaju; obezbedio dokaz da su korekcije i korektivne mere efektivne; Rezultati analize i rezultujuće aktivnosti moraju da se čuvaju kao dokumentovane informacije; Rezultati moraju da se saopšte najvišem rukovodstvu i moraju da se koriste kao ulazni elementi za preispitivanje od strane rukovodstva (videti 9.3) i ažuriranje FSMS-a (videti 10.3); 9.2.1 Organizacija mora da sprovede interne provere u planiranim intervalima, radi pružanja informacija o tome da li je FSMS; radi pružanja informacija o tome da li je FSMS usaglašen sa sopstvenim zahtevima organizacija za FSMS; radi pružanja informacija o tome da li je FSMS usaglašen sa zahtevima ovog dokumenta; radi</p>

<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju pune realizacije zahteva</i></p>	<p><i>Kategorije troškova kvaliteta prema PAF modelu u slučaju neadekvatnog ispunjavanja zahteva</i></p>
	<p>pružanja informacija o tome da li je FSMS usaglašen efikasan primenjen i održavan;</p>
<p>10.Poboljšanje Pored troškova prevencije, troškovi procene su: 10.2.Najviše rukovodstvo mora da obezbedi da stalno poboljšava efikasnost FSMS-a pomoću komunikacije (videti 7.4); preispitivanja od strane rukovodstva (videti 9.3); preispitivanja od strane internih provera (videti 9.2); a pomoću analize rezultata verifikacionih aktivnosti (videti 8.8.2); pomoću validacije kontrolnih mera; kombinacije kontrolnih mera (videti 8.5.3), korektivnih mera (videti 8.9.3) i ažuriranja FSMS-a (videti 10.3); 10.3.Najviše rukovodstvo mora da obezbedi da se FSMS stalno ažurira, tim za bezbednost hrane mora da vrednuje FSMS u planiranim intervalima; Troškovi interne neusaglašenosti: 10.1.1 Kada nastane neusaglašenost, organizacija mora da reaguje na neusaglašenost i preduzima meru da upravlja njom i koriguje je; bavi se posledicama ; primeni svaku potrebnu meru; preispituje efektivnost svake i korektivne mere koja je preuzeta, izvrši izmene u FSMS-u; Kada nastane neusaglašenost, organizacija mora vrednuje potrebu za merom da bi se eliminisali uzroci neusaglašenosti, sa ciljem da se ne pojave ponovo ili da ne nastane na drugom mestu, putem preispitivanja neusaglašenosti; drugom mestu, putem utvrđivanje uzroka neusaglašenosti; putem utvrđivanja da li postoji ili potencijalno mogu da nastanu slične neusaglašenosti;</p>	<p>10.Poboljšanje Troškovi interne neusaglašenosti su: 10.1.1 Kada nastane neusaglašenost, organizacija Kada nastane neusaglašenost, organizacija mora da vrednuje potrebu za merom da bi se eliminisali uzroci neusaglašenosti, sa ciljem da se ne pojave ponovo ili da ne nastane na drugom mestu, putem preispitivanja neusaglašenosti; drugom mestu, putem utvrđivanje uzroka neusaglašenosti; putem utvrđivanja da li postoji ili potencijalno mogu da nastanu slične neusaglašenosti; Korektivne mere moraju da odgovaraju efektima koji nastaju usled neusaglašenosti; 10.1.2 Organizacija mora da čuva dokumentovane informacije kao dokaz Organizacija mora da čuva dokumentovane informacije kao dokaz o prirodni neusaglašenosti i svakoj naknadno preduzetnoj meri; Organizacija mora da čuva dokumentovane informacije kao dokaz o rezultatima svake korektivne mere. 10.3 Ažuriranje sistema upravljanja bezbednom hranom Najviše rukovodstvo mora da obezbedi da se FSMS stalno ažurira ako bi se to postiglo, tim za bezbednost hrane mora da vrednuje FSMS u planiranim intervalima; Troškovi eksterne neusaglašenosti su: 10.1.1 Kada nastane neusaglašenost, organizacija Kada nastane neusaglašenost, organizacija mora da reaguje na neusaglašenost i preduzima meru da upravlja njom i koriguje je; bavi se posledicama ; primeni svaku potrebnu meru; preispituje efektivnost svake i korektivne mere koja je preuzeta, izvrši izmene u FSMS-u;</p>

BUKA U PROCESNOJ INDUSTRIJI

NOISE IN THE PROCESS INDUSTRY

Nikolina BANJANIN*

Univerzitet u Beogradu, Medicinski fakultet,
Institut za higijenu sa medicinskom ekologijom, Beograd

Buka je neželjeni zvuk. Buka je zvuk koji nezavisno od svojih fizičkih karakteristika može izazvati neželjene psihološke i/ili fiziološke efekte kod osobe koja je izložena. Previše izloženosti buci od ili iznad 85 dBA koja se ponavlja može izazvati tinitus i trajni gubitak sluha i povezana je sa kardiovaskularnim bolestima, depresijom i problemima sa ravnotežom. U proizvodnji nameštaja od drveta, preradi kamena i proizvodnji specijalne opreme važni razlozi za gubitak sluha osoblja izloženog buci su visoka jačina buke u radnom okruženju, predugo vreme izlaganja buci i nepravilno nošenje lične zaštitne opreme. Kod radnika u industriji prerade metala neophodno je preduzeti inženjersku kontrolu zvučne izolacije i smanjenja buke. Gubitak sluha izazvan bukom se može sprečiti. Važno je sprovoditi mere zaštite od buke.

Ključne reči: buka; procesna industrija

Noise is unwanted sound. Noise is a sound that independent of its physical characteristics can cause unwanted psychological and/or physiological effects in the exposed person. Repeated overexposure to noise at or above 85 dBA can cause tinnitus and permanent hearing loss and is associated with cardiovascular disease, depression and balance problems. In wood furniture manufacturing, stone processing and special equipment manufacturing important reasons for hearing loss of noise exposed personnel are high intensity noise working environment, too long noise exposure time and incorrect wearing of personal protective equipment. In workers in metal processing industry it is necessary to take sound insulation and noise reduction engineering control. Hearing loss induced by noise is preventable. It is important to implement noise protection measures.

Key words: noise; process industry

* Corresponding author, e-mail: nikolina.banjanin@med.bg.ac.rs

AGILNE METODOLOGIJE U KONTEKSTU OBEZBEĐIVANJA KVALITETA U PROCESNOJ INDUSTRIJI

AGILE METHODOLOGIES IN THE CONTEXT OF QUALITY ASSURANCE IN PROCESS INDUSTRY

Vojislav STEFANOVIĆ, Mladen ĐURIĆ*, Jovan FILIPOVIĆ
Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.329>

U radu je razmatran potencijal agilnih metodologija u svrsi poboljšavanje obezbeđivanja kvaliteta u procesnoj industriji.

U radu su predstavljeni i objašnjeni procesi menadžmenta kvaliteta i obezbeđivanja kvaliteta, ključni standardi za softvere i procesnu industriju u kontekstu primene agilnih metodologija. Ukratko je predstavljen tradicionalni projektni menadžment sa fokusom na vodopad metod, kao i prednosti i mane tradicionalnih pristupa. Predstavljene su agilne metodologije i dat je detaljniji prikaz odabranih agilnih metodologija Scrum, Kanban, XP i Crystal Clear. Dalje u radu predstavljeno je mesto i uloga obezbeđivanja kvaliteta u agilnim metodologijama i njihova moguća primena u procesnoj industriji.

U zaključku rada, poertava se da agilne metodologije mogu da služe kao efektivan alat za poboljšavanje obezbeđivanja kvaliteta u procesnoj industriji. Usvajanjem agilnih metodologija, procesna industriji može da postane responzivnija pred rastućim zahtevima tržišta, poveća kvalitet i produktivnost i obezbedi da njeni proizvodi zadovoljavaju standarde. Autori predlažu i zalažu se za dalja istraživanja u pogledu primene agilnih metodologija u procesnoj industriji u svrsi poboljšavanja kvaliteta.

Ključne reči: *kvalitet; obezbeđivanje kvaliteta; agilne metodologije; procesna industrija*

The paper examines the potential of agile methodologies in improving quality assurance in the process industry.

The paper presents and explains quality management and assurance processes, key standards for software and process industries in the context of agile methodology implementation. Traditional project management with a focus on the waterfall method is briefly presented, as well as the advantages and disadvantages of traditional approaches. Agile methodologies are presented and a detailed description of selected agile methodologies, including Scrum, Kanban, XP, and Crystal Clear is provided. Furthermore the paper discusses the role and importance of quality assurance in agile methodologies and their application in the process industry.

The conclusion of the paper highlights that agile methodologies can be an effective tool for improving quality assurance in the process industry. By adopting agile methodologies, the process industry can become more responsive to growing market demands, increase quality and productivity, and ensure that its products meet standards. The authors propose and advocate for the adoption of agile methodologies in process industries to enhance quality assurance.

Key words: *quality; quality assurance; agile methodologies; process industry*

1 Uvod

Tradicionalni projektni menadžment sve više ustupa mesto modernim agilnim metodologijama (Papadopoulos, 2014). U 21. veku tehnologija i zahtevi klijenta u pogledu željenih karakteristika proizvoda nisu isti kao nekada. Dugi i spori ciklusi razvoja uz slabo učešće klijenata su stvar prošlosti

* Corresponding author, e-mail: djuric.mladen@fon.bg.ac.rs

(Marle i Vidal, 2016). Klijentova očekivanja u pogledu brzine isporuke primenljivog i korisnog softvera uz zadržavanje kvaliteta proizvoda rastu, a kompanije nisu u stanju da ispune ta očekivanja. Ovo je najočiglednije u IT industriji, međutim ova pojava se uočava u različitim aspektima i u modnoj, marketing, automobilskoj i u procesnoj industriji (Conforto, 2016).

Agilne metodologije stiču sve veću popularnost zbog svoje sposobnosti da obezbede efikasan i fleksibilan pristup za upravljanje projektima. Upotreba agilnih metodologija u procesnoj industriji pruža velike mogućnosti i šanse za unapređenje celokupnog poslovanja, budući da se ove industrije često suočavaju sa složenim, tehnički zahtevnim radnim izazovima koji zahtevaju dinamičan i prilagodljiv pristup koji može da rezultira povećanjem produktivnosti i poboljšanjem kvaliteta.

Napravljeni su pokušaji da se ovo reši primenom različitih agilnih metodologija koje uvode jedan prilagodljiv okvir rada koji treba da usmeri ponašanje kompanije i zaposlenih tako da mogu da odgovore na česte promene zahteva klijenata i okruženja (Bhasin, 2012). Za agilne metodologije se često kaže da imaju ugrađene mehanizme i prakse obezbeđivanja kvaliteta u svakodnevnim timskim aktivnostima i sastancima. Oni koji vode projekat i kompaniju su zaduženi za otklanjanje svih barijere i treba da uz pomoć sposobnog liderstva utiču na ispunjavanje svih ključnih praksi kako bi se obezbedila uverenost u kvalitet proizvoda i garantovao uspeh projekta (Rothman, 2009).

„Kvalitet je nivo do kojeg skup pripadajućih karakteristika ispunjava zahteve“, ISO 9000:2015. Ukoliko ova definicija nije opravdana u procesu stvaranja vrednosti proizvoda, onda proizvod nema potreban kvalitet.

Cilj istraživanja je da se ukaže na važnost i potrebu primene agilnih metodologija u procesnoj industriji, zbog njihove mogućnosti u poboljšavanju i obezbeđivanju kvaliteta. Agilne metodologije imaju u sebi ugrađene mehanizme i prakse obezbeđivanja kvaliteta, što ih razlikuje od tradicionalnih metodologija. One zauzimaju dominantniju ulogu i upotrebu u modernom dobu pogotovu u IT industriji i dovode do drastičnog poboljšavanja kvaliteta, dovode do boljeg obezbeđivanja kvaliteta u kompanijama koje ih primenjuju, povećanja efikasnosti i produktivnosti. Sve ovo su signali da bi agilne metodologije trebalo da budu prisutne u većem obimu i u procesnoj industriji, što bi svakako uticalo na kvalitet konačnog proizvoda tih industrija.

Sadržaj rada je podeljen na šest poglavlja (poglavljia 2-7). U poglavlju 2 objašnjen je pojam kvaliteta, menadžmenta kvaliteta, kao i njegova četiri osnovna podprocesa. Detaljno su objašnjeni pojmovi vezani za obezbeđivanje kvaliteta i načini sprovođenja sistema za obezbeđivanje kvaliteta (QA sistema) u organizacionim okvirima koji se mogu primenjivati i u različitim procesnim industrijama. U poglavlju 3 objašnjen je tradicionalni projektni menadžment sa fokusom na vodopad metod, navedene su poznate metode tradicionalnog projektnog menadžmenta i navedena su ograničenja tradicionalnog pristupa. U poglavlju 4 detaljno su protumačene uloge i značaj agilnih metodologija. U poglavlju 5 je svaka od odabranih agilnih metodologija Scrum, Kanban, Crystal Clear i Extreme Programming (XP) objašnjena preko svojih najznačajnijih koncepata sa fokusom na obezbeđivanje kvaliteta. U poglavlju 6 dat je sumarni pregled na način kako se obezbeđuje kvalitet u posmatranim agilnim metodologijama i kako se može primeniti u radu sa ovim metodologijama u procesnoj industriji. U poglavlju 7 su predstavljeni najznačajniji standardi, kao modeli obezbeđivanja kvaliteta koji se koriste i primenjuju u radu sa agilnim metodologijama i u procesnoj industriji.

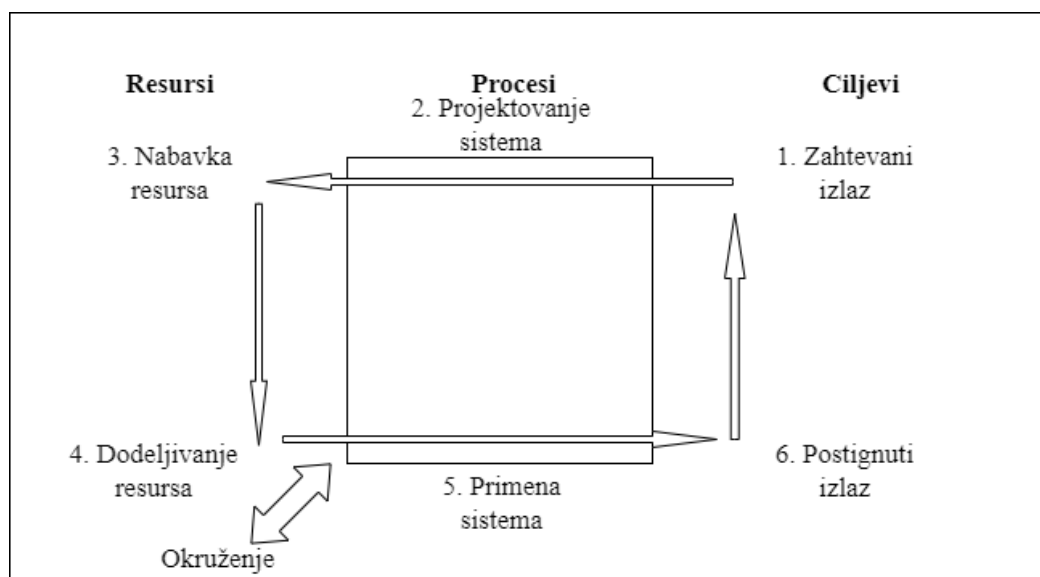
2 Kvalitet i obezbeđivanja kvaliteta

2.1 Procesi menadžmenta kvaliteta

U današnjem svetu nezamislivo je da pojedinac sam stvara, koristi i manipuliše resursima, radi zadovoljenja određenih ciljeva potpomognut isključivo svojim radom, trudom i energijom. Čak i takva osoba je u jednom periodu života, barem po rođenju morala da bude deo jednog većeg entiteta ili celine. Takvu celinu možemo da nazovemo sistem. Bilo da je zdravstveni, obrazovni, poslovni, vojni ili neki drugi sistem, svaka osoba je imala priliku da bude deo nekog sistema.

Sistemom se može posmatrati kada određeni međusobno zavisni elementi zajedno sarađuju i koriste resurse sa ciljem postizanja određenih ciljeva u okviru neke celine (Juran i Defeo, 2010).

Na slici 1, možemo da vidimo prikazanu međuzavisnost ciljeva, procesa i resursa u okviru sistema.



Slika 1. Međuzavisnost ciljeva, procesa i resursa (Filipović i Đurić, 2009)

Zvanično priznata definicija ISO 9000:2015 definiše sistem kao „skup međusobno povezanih ili međusobno delujućih elemenata“.

U kontekstu šire slike indirektno proizilazi da posledično postoji i sistem kvaliteta, sistem menadžmenta i sistem menadžmenta kvaliteta (Fryman, 2001; Filipović i Đurić, 2009). U žiži našeg interesovanja je da objasnimo i definišemo pojmove i procese menadžmenta kvaliteta kako bismo u toku daljeg razmatranja rada mogli da znamo kako i na koji način je uspostavljena spona između sistema kvaliteta, menadžmenta kvaliteta i naposljetku obezbeđivanja kvaliteta.

„Sistem kvaliteta je skup međusobno povezanih ili međusobno delujućih elemenata kojim se koristeći različite resurse, postižu ciljevi vezani za kvalitet“ – ISO 9000:2015.

Ovi ciljevi su uglavnom fokusirani na zadovoljavanje zahteva korisnika proizvodima ili uslugama koje kompanija pruža. Teži se postizanju i unapređivanju parametara koji dovode do povećanja kvaliteta proizvodnih rešenja metrikama koje vrednuju kupci. Podršku sistemu kvaliteta u kompanijama pruža menadžment kompanije (Fryman, 2001).

Prema ISO 9000:2015 standardu, menadžment i sistem menadžmenta možemo definisati kao koordinirane aktivnosti za utvrđivanje pravca i upravljanje organizacije, odnosno u slučaju sistema menadžmenta možemo ga definisati kao sistem za uspostavljanje politike i ciljeva i za ostvarenje tih ciljeva. Možemo da uočimo i shvatimo da su sve ove definicije povezane i isprepletane. U multifunkcionalnim kompanijama sa kompleksnim poslovnim okruženjima, uloge i mesta sistema menadžmenta i sistema kvaliteta rezultuju nastankom sistema menadžmenta kvaliteta (Schein, 2010).

Uloga sistema menadžmenta kvaliteta je fokusirana na ostvarivanje rezultata kompanije u pogledu ciljeva kvaliteta (Born, 1994). Na ovaj način kompanija može da se fokusira i da razloži svoje ciljeve i politike kvaliteta u određenom periodu i da se fokusira na njihovu realizaciju kako bi nakon realizacija ostvarila veću ekonomsku korist i tržišni udeo, a u većini slučajeva i svoju misiju i viziju.

Kako se sistem menadžmenta kvaliteta suštinski bavi menadžmentom kvaliteta na makro planu, definisaćemo i dati ISO 9000:2015 definiciju menadžmenta kvaliteta koja predstavlja „koordinirane aktivnosti za utvrđivanje pravca organizacije i upravljanje organizacije u tom smislu. Ovaj proces se sastoji od 4 podprocesa i to su planiranje, upravljanje, poboljšavanje i obezbeđivanje kvaliteta. Ovo su ujedno i osnovni koncepti u menadžmentu kvaliteta (Filipović i Đurić, 2009; Durivage, 2022; Rose, 2022).

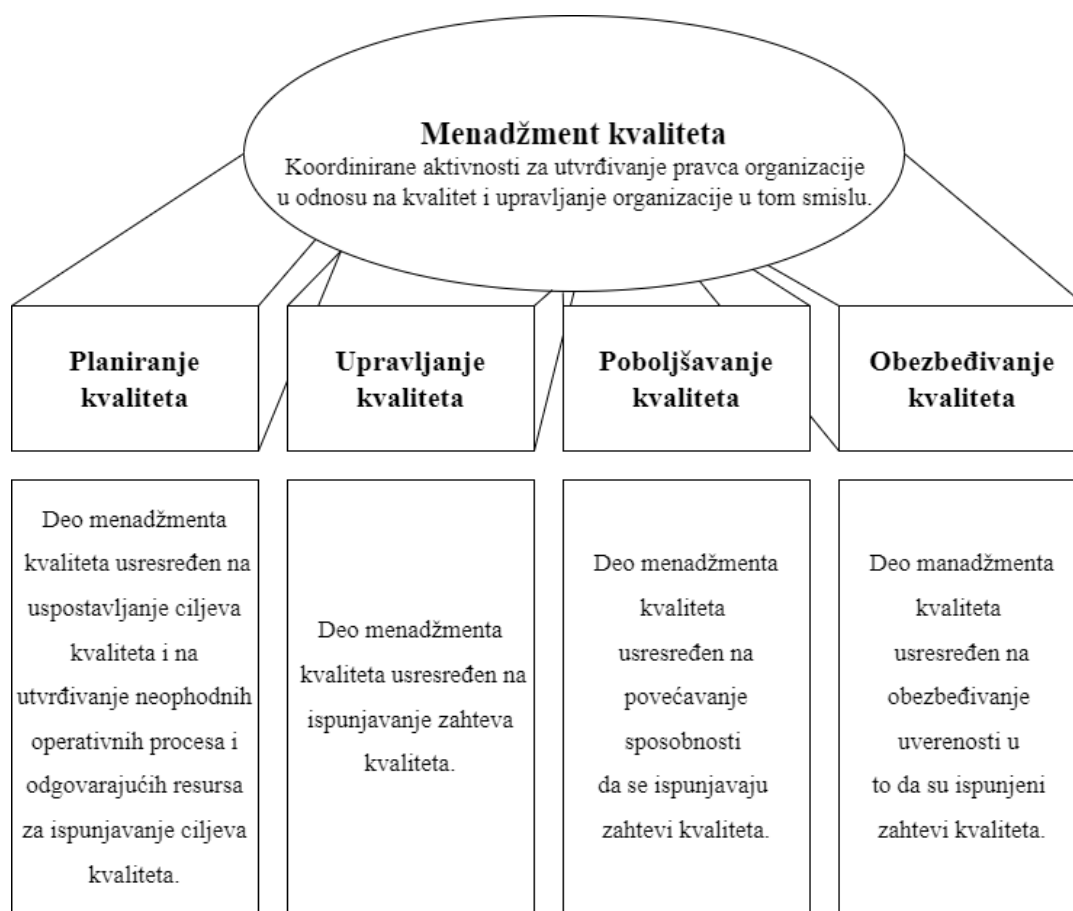
Zanimljivo je napomenuti da je IBM implementirao poznat sistem menadžmenta kvaliteta QMS (eng. Quality Management System) koji se zasniva na standardu ISO 9001. Ovaj standard je međunarodni standard za sisteme upravljanja kvalitetom i pruža okvir za organizacije da kontinuirano

ispune zahteve kupaca i poboljšaju ukupni performans. QMS IBM-a je dizajniran da osigura da proizvodi i usluge kompanije zadovoljavaju ili premašuju očekivanja kupaca i poštuju postavljene zahteve (Praeg i Spath, 2011).

QMS IBM-a uključuje brojne procese i procedure koji se koriste za planiranje, dizajniranje, razvoj, testiranje i dostavljanje proizvoda i usluga kupcima. Ovi procesi su dizajnirani da obezbede da su proizvodi visokog kvaliteta i da se isporučuju na vreme i unutar budžeta. QMS takođe uključuje sistem kontinuiranog poboljšanja, koji se koristi za identifikovanje i rešavanje bilo kojih problema ili defekata u proizvodima ili procesima.

Pored QMS-a, IBM takođe koristi brojne druge alate i tehnike upravljanja kvalitetom, kao što je Six Sigma, koji je pristup poboljšanja kvaliteta baziran na ulaznim podacima. IBM takođe koristi brojne druge alate i metodologije, kao što su Lean i Agile, kako bi poboljšao ukupne performanse svojih proizvoda i usluga.

Na slici 2, se mogu videti definicije menadžmenta kvaliteta i njegovih procesa. U nastavku rada ćemo se više fokusirati na objašnjavanju obezbeđivanja kvaliteta kao koncepta i načina njegovog funkcionisanja u organizacionim okvirima.



Slika 2. Osnovni koncepti u okviru menadžmenta kvaliteta (Filipović i Đurić, 2009)

2.2 Obezbeđivanje kvaliteta kao koncept i realizacija QA sistema u organizaciji

“Obezbeđivanje kvaliteta je deo menadžmenta kvaliteta koji je usresređen na obezbeđivanje uverenosti u to da su ispunjeni zahtevi kvaliteta.” – ISO 9000:2015

Pored ove definicije navešćemo još par definicija koje će nam pomoći da bolje shvatimo koncept i suštinu obezbeđivanja kvaliteta.

„Obezbeđivanja kvaliteta obuhvata sve planirane i na sistematičan način sprovedene aktivnosti čiji je cilj da stvori uverenost da će proizvodi (robe i usluge) zadovoljiti postavljene zahteve.“ - (ANSI/ASQC Standard A3, 1987)

„Obezbeđivanje kvaliteta označava aktivnosti namenjene obezbeđivanju kvaliteta proizvoda tako da ih korisnici kupuju sa određenom dozom uverenosti i dugo ih koriste uvereni i zadovoljni.“ – Kaoru Işikava

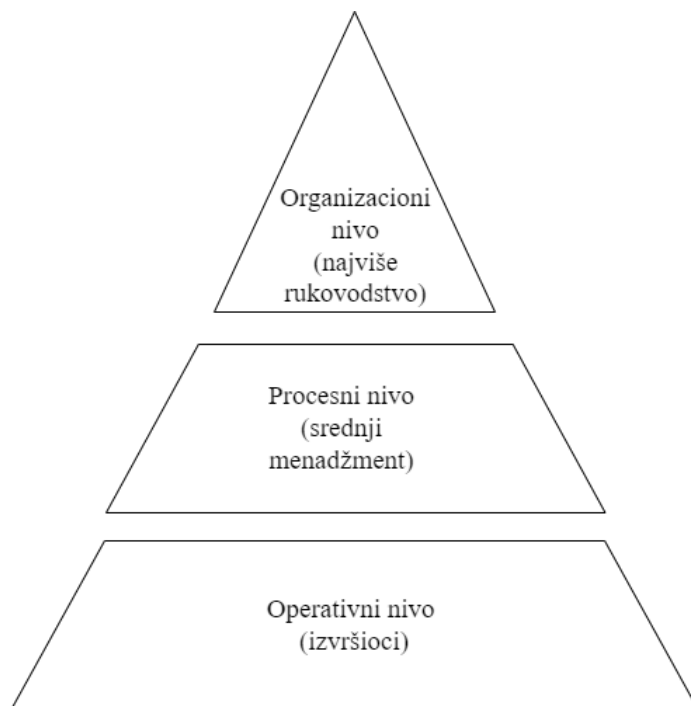
Ove definicije su usmerene na aktivnosti kojima se sprovode i uvode određeni mehanizmi kojima će da se uspostavi određena vrsta ponašanja koja će da obuhvata provere i ocene kvaliteta proizvedenih proizvoda i usluga, da bi se validirala njihova vrednost, odnosno kvalitet, najčešće u očima kupca.

Međutim nas više interesuje u kontekstu mesta i uloge obezbeđivanja kvaliteta u agilnim metodologijama, sistemska primena obezbeđivanja kvaliteta u celoj organizaciji.

Prema Filipović i Đurić, 2009 kada se termin obezbeđivanja kvaliteta upotrebi u smislu celog sistema onda označava sve aspekte kvaliteta. Svrha sistema obezbeđivanja kvaliteta je da spreči pojavu problema, a ukoliko oni ipak nastanu, da ih detektuje, utvrdi uzroke, deluje na njih i spreči njihovu ponovnu pojavu i obezbedi zadovoljavajući nivo uverenosti da je sve urađeno onako kako i treba.

Uvođenje programa obezbeđivanja kvaliteta (QA program) kojim se uspostavlja QA sistem se najčešće odvija na tri nivoa. Autori nivoa različito nazivaju (Filipović i Đurić, 2009; Russel, 2011; Hador, 2017; Cook, 2022), ali najpoznatije podele su na (slika 3):

1. Strateški ili organizacioni nivo (bavi se politikama kvaliteta, menadžmentom i ciljevima kompanije na najvišem nivou i pravi priručnik za kvalitet);
2. Taktički ili funkcionalni ili procesni nivo (bavi se generalnim praksama u preduzeću kao što je formiranje i upravljanje treningom i operacijama i mehanizmima za obezbeđivanje kvaliteta kao i prakse rada u postrojenjima i na radnim mestima);
3. Operacioni nivo (bavi se standardnim operativnim procedurama (SOP), svakodnevnim operacijama i obavezama vezanim za regulisanje odgovarajućeg kvaliteta).



Slika 3. Tri organizaciona nivoa (Filipović i Đurić, 2009)

Uvođenje sistema za obezbeđivanje kvaliteta koji će pratiti određeni program obezbeđivanja kvaliteta (QA program) i obuhvatati celu organizaciju se razlikuje za svaku firmu. Firme koje nemaju infrastrukturu koja prati QA program moraju da prave kompletan sistem, a one koje imaju postojeći ga prilagođavaju zavisno od projekta ili zahtevanog posla. Pri čemu ne treba uvoditi previše promena naglo, jer će dovesti do drastičnog povećanja obima posla za sve uključene i posledično uticati na lošiju implementaciju i primenu u praksi. (WHO/UNEP/VKI, 1997).

Prema ISO, 1990 priručnik za kvalitet koji najčešće formira strateški nivo jedne organizacije se sastoji od dokumenata koji su neophodni da se implementira QA program i uključuje politike kvaliteta, ciljeve i posvećenosti kvalitetu, organizacionu i menadžment strukturu kompanije u toku rada projekta i brojne druge procedure, testove, mehanizme i standarde za kalibraciju, proveru, verifikaciju, testiranje i drugo.

Još jedan od mehanizama preko koga se uspostavlja i uvodi QA program u jednoj firmi zasniva se na stručnim treninzima koji su najčešće u ingerenciji funkcionalnog organizacionog nivoa (Sirikrai, 2013). Menadžment dodeljuje resurse, uspostavlja politike, standarde, dodeljuje odgovornosti, obučava zaposlene o QA aktivnostima i praksama koje se uvode kroz program. U svim fazama treninga izvršiocima moraju da obaveste menadžment ukoliko uoče probleme koji otežavaju ili utiču na primenu programa i samim tim na obezbeđivanje kvaliteta.

Na trećem (operacionom) nivou najbitnije je uvesti vrlo detaljne standardne operativne procedure (SOP), koje predstavljaju veoma važnu dokumentaciju koja sadrži specifikacije, operacije i metode za određeni posao i obuhvata mehanizme uzorkovanja, merenja, kontrole, praćenja, testiranja, pravilnog skladištenja opreme i materijala i analize podataka preko kojih može da se upravlja i rukovodi adekvatnim ponašanjem zaposlenih i prave korekcije po potrebi (Pharmaguideline, 2022).

Metode standardnih operativnih procedura najčešće vuku korene iz organizacija kao što su ISO, BSI, ASTM i po potrebi se prilagođavaju kompaniji i vrsti rada ili projektu, u tim slučajevima se validiraju bilo koje modifikacije originalnih u saglasnosti sa stručnjacima i menadžmentom kompanije (Russel, 2011).

U srednjim i većim kompanijama ključnu ulogu za obezbeđivanje kvaliteta ima QA menadžer (Ponder, 2002). On je odgovoran za inspekciju svih aspekata sistema i proveru njegove usaglašenosti sa uspostavljenim standardima. On vrši česte provere i validacije. Kada je kompletna dokumentacija QA programa i sistema regulisana, QA menadžer vrši „pilot“ provere, odnosno vrši seriju provera i kontrola ključnih podataka sistema i rezultate provere jasno i precizno definiše na kraju svake pilot faze (Kieffer, Stoker i Nally, 1998).

Čest način implementacije adekvatnih provera i kontrola usaglašenosti u kompaniji podrazumeva dobijanje akreditacije od strane stabilnog i priznatog postojećeg monitoring programa – kao na primer ISO 9000. Kada se uspostavi ovaj sistem potrebna je periodična provera istoga i upoređivanja sa originalnim usvojenim kriterijumima. Svako odstupanje se prijavljuje i vrši se korekcija kako bi se zadržao kvalitet.

Stroge mere kontrole kvaliteta su prisutne i primenjuju se u svim delovima radne organizacije i na mikro i makro planu, jer je to jedan od glavnih načina kako se može obezbediti siguran kvalitet konačnog proizvoda ili usluge. Posebno je delikatan proces obezbeđivanja kvaliteta u naučno-istraživačkim laboratorijama, biomedicinskom inženjerstvu, termonuklearnim postrojenjima i dr.

Na međunarodnom forumu za obezbeđivanje kvaliteta (International Quality Assurance Forum), jula 2011. godine u sesiji koja je bila predviđena za predloge i smernice za obezbeđivanje kvaliteta u proizvodnji, predstavljen je skup ključnih elemenata za koje se smatra da kada se objedine čine i formiraju sistem za obezbeđivanje kvaliteta (QA sistem) koji je poželjno primenjivati u procesnoj industriji.

Prema IQAF-u i radu Alex Mikonowicz-a, ovi elementi se moraju integrisati da bi se omogućio procesni pristup upravljanja kvalitetom i kako bi se obezbedio kvalitet proizvoda, usklađenost sa tehničkim propisima i ostvarilo zadovoljstvo kupaca.

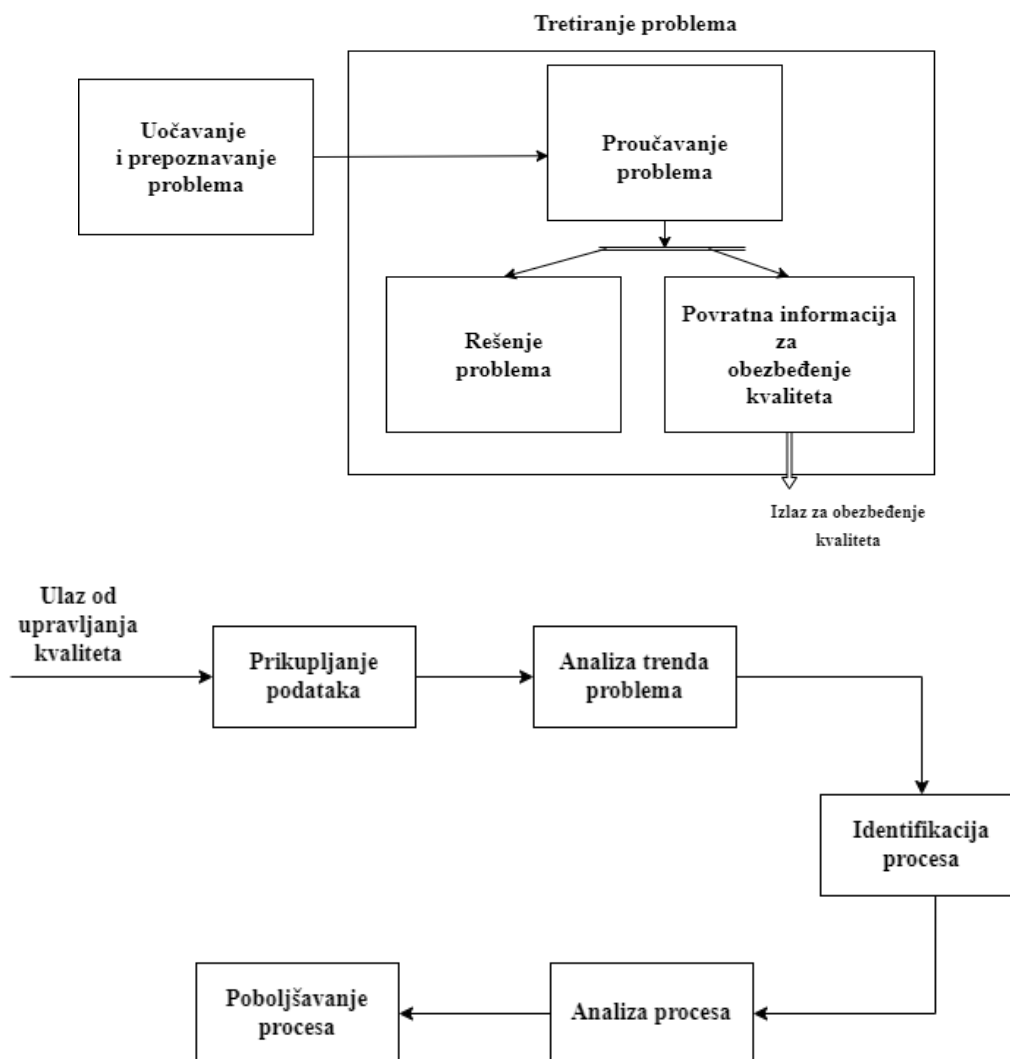
Ovi elementi uključuju:

- dokumentaciju neophodnu za kvalifikaciju materijala
- kontrolu procesa
- linijsko testiranje
- dokumentaciju koja omogućava sledljivost i praćenje proizvoda u svim fazama razvoja
- rasporede i listinge ponovnih testiranja
- programe garancije
- procedure za fabričke inspekcije
- interne i eksterne kontrole

- politike kvaliteta
- priručnik za kvalitet

Prateći IQAF-ovo tumačenje ovih elemenata, organizacije mogu stvoriti jasan okvir i strukturu sistema koji može pomoći organizacijama da uspostave radno okruženje u kome mogu da stvore bolji kvalitet proizvoda. Ovaj pristup može pomoći organizacijama da identifikuju oblasti za poboljšanje, potencijalno smanjenje troškova, uspostavljanje bezbedne radne sredine, povećanje zadovoljstva i lojalnosti kupaca.

Sumarno, prema Filipović i Đurić, 2009 na slici 4, prikazane su uopštene šeme funkcionisanja upravljanja i obezbeđivanja kvaliteta, kao i veza između njih.



Slika 4. Upravljanje i obezbeđivanje kvaliteta (Filipović i Đurić, 2009)

3 Tradicionalni projektni menadžment

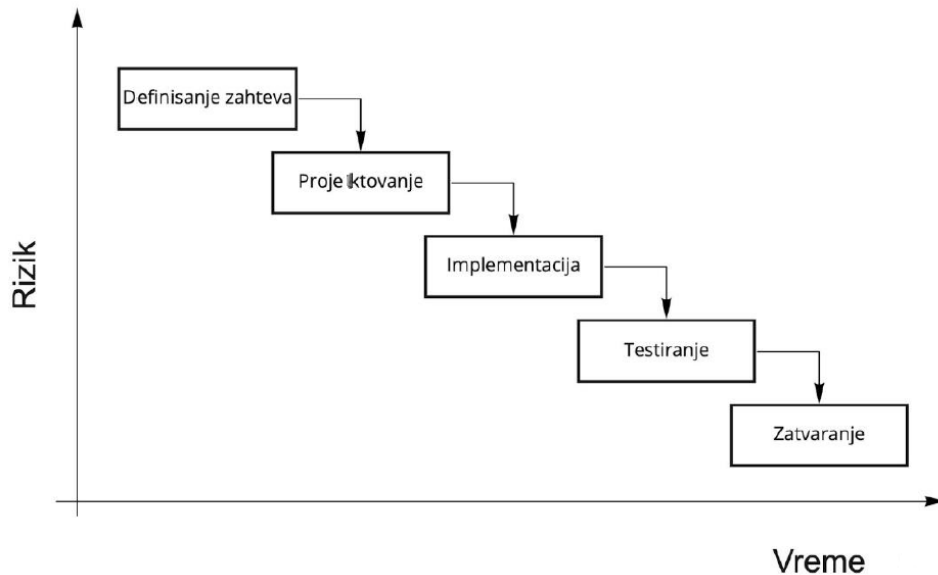
Projekat predstavlja jednokratni i neponovljiv poslovni poduhvat koji je usmeren konačnom cilju u budućnosti, a izvodi se sa ograničenim ljudskim i materijalnim resursima (Petrović, 2014).

Upravljanje projektima ili projektni menadžment predstavlja koncept primene odgovarajućih znanja, veština, metoda i tehnika u cilju racionalnog usklađivanja svih potrebnih aktivnosti i resursa neophodnih da bi se određeni projekat završio na efikasan i efektivan način.

Rezultat koncepta upravljanja projektom predstavlja ispunjenje postavljenih ciljeva projekta, odnosno završetak projekta u planiranom vremenu i sa predviđenim troškovima i kvalitetom (Petrović, 2014).

3.1 Pregled tradicionalnog projektnog menadžmenta

Tradicionalni projektni menadžment postoji od početka 20. veka. Ovaj pristup upravljanju projektima se oslanja na uverenje da se projektom može uspešno upravljati praćenjem skupa dobro utvrđenih principa, standarda i metodologija. Tradicionalno upravljanje projektima karakteriše njegov sekvencijalni proces i često se tradicionalni projektni menadžment naziva i „vodopad“ projektni menadžment (slika 5), što se karakteriše time da se svaka faza projekta završava pre nego što se pređe na sledeću, međutim postoji i izvesno preklapanje između procesa.



Slika 5. Vodopad metod (Radenković i dr. 2015)

Pored vodopad metoda postoji još par metodologija koje se često navode u okviru različitih pristupa tradicionalnom projektnom menadžmentu:

1. Critical Path Method (CPM)
2. Program Evaluation and Review Technique (PERT)
3. Lean Six Sigma
4. Rational Unified Process (RUP)
5. Project Management Body of Knowledge (PMBOK)
6. PRINCE2

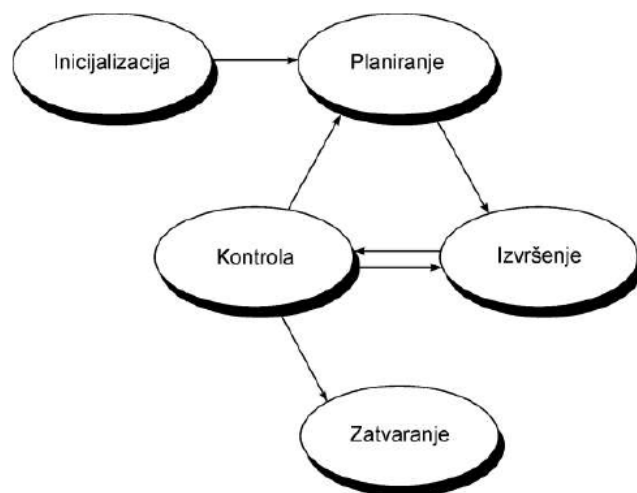
Postoji pet faza životnog ciklusa projekta u tradicionalnom projektnom menadžmentu, oni se često nazivaju procesi u upravljanju projektima (Petrović, 2014):

1. Inicijalizacija
2. Planiranje
3. Izvršenje
4. Kontrola
5. Zatvaranje

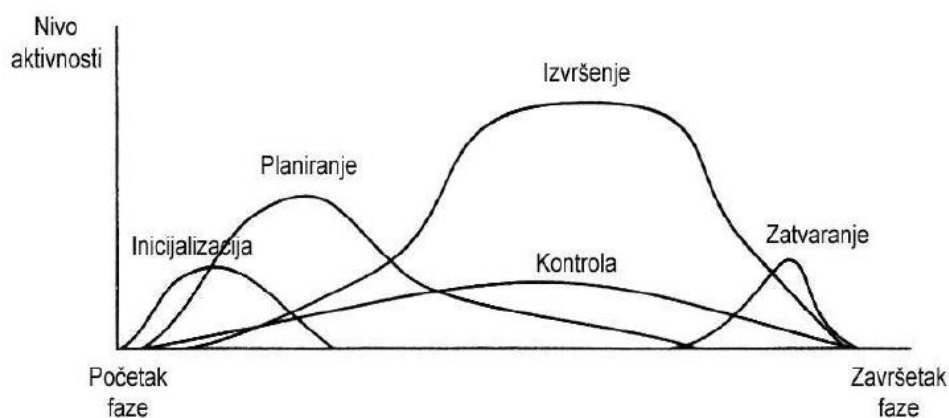
Na slikama 6 i 7, možemo da vidimo kako su međusobno povezani procesi, kao i kakvo je njihovo preklapanje.

Koreni tradicionalnog upravljanja projektima mogu se pratiti do velikih infrastrukturnih projekata kao što su Panamski kanal (1914.) i Huverova brana (1936.). Ovi projekti su zahtevali veoma pažljivo planiranje, upravljanje i koordinaciju resursa da bi se završili na vreme i u okviru budžeta (McCullough, 1978; Hiltzik, 2011). Mnogi današnji projekti i poduhvati i dalje se oslanjaju na razvijene modele i prakse projektnog menadžmenta koji su razvijani pre mnogo godina.

Uprkos brojnim kritikama da je tradicionalno upravljanje projektima nefleksibilno, sporo i skupo ono i dalje ostaje u primeni za organizacije i u industrijama gde su planiranje i koordinacija ključni za uspeh projekta.



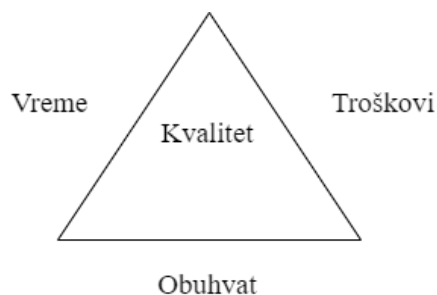
Slika 6. Povezanost procesa (Petrović, 2014)



Slika 7. Preklapanje procesa (Petrović, 2014)

3.2 Ograničenja tradicionalnog projektnog menadžmenta

Prilikom realizacije svakog projekta mora se voditi računa o usaglašavanju tri činioca (ograničenja) radi cilja postizanja željenog kvaliteta celokupnog projekta, što je prikazano na slici 8. Promene jednog od ograničenja će direktno uticati na promene u preostalim i imati dalekosežne posledice vezane za uspeh projekta. Najteže je naći odgovarajući balans sva tri ograničenja preko koga se postižu optimalni rezultati za svaki projekat, budući da čak i slični projekti imaju određene svojstvenosti koje zahtevaju veća ili manja prilagođavanja, što je prikazano u tabeli 1.



Slika 8. Trostruko ograničenje projektnog menadžmenta, sa fokusom na kvalitet (Forbes, 2022)

Tabela 1: Promene ograničenja projektnog menadžmenta (Petrović, 2014 - prilagođeno)

Promena ograničenja	Potrebne izmene ograničenja	
Kraće vreme	Veći troškovi	Smanjenje kvaliteta ili manji obuhvat radova
Smanjeni troškovi	Više vremena	Smanjenje kvaliteta ili manji obuhvat radova
Viši kvalitet	Više vremena	Veći troškovi
Povećanje obima radova	Više vremena	Veći troškovi

4 Agilne metodologije

Februrara 2001. godina grupa istaknutih programera, menadžera i IT stratega se sastala u Juti (SAD) da bi diskutovala o trenutnim problemima u svetu programiranja i razvoja softvera. Kao rezultat njihovog sastanka nastao je dokument pod nazivom „Agile Manifesto“ koji je sadržao 4 ključne vrednosti i 12 principa kojih se treba pridržavati prilikom razvoja softvera (AgileAlliance, 2022).

Većina agilnih metodologija su nastale u periodu pre 2000. godine. Jedna od najpoznatijih metoda je Scrum, njeni počeci datiraju 1986. godine u oblasti opšteg menadžmenta. Adaptive software development, Feature driven development i Dynamic systems software development metode sve nastaju 1995. godine (Saini i Chhabra, 2020). Crystal Clear i Ekstremno Programiranje (XP) se prvi put pojavljuju 1996. Koncepti Kanbana se javljaju 1940-ih godina, ali u agilne metodologije Kanban biva uvršten tek 2000ih.

Agilne metodologije danas:

1. Extreme programming;
2. Scrum;
3. Kanban;
4. Adaptive software development;
5. Crystal clear i ostale crystal metode;
6. Extreme programming;
7. Dynamic systems development method;
8. Feature driven development;
9. Agile Unified Process;
10. Agile modeling.

4.1 Agile Manifesto principi i maksime agilnog razvoja

Ovi stručnjaci su sebe nazvali „Agilnom Alijansom“, neki od njih su bili tvorci već postojećih agilnih metodologija, ali tek posle ovog sastanka je definisano da metoda, da bi bila agilna mora da teži ispunjavanju smernica koje su ogleđaju u 12 principa i 4 ključne vrednosti.

Maksime agilnog razvoja podrazumevaju da veću vrednost ima :

- Pojedinač i interakcija od procesa i alata;
- Primenljiv softver od detaljne dokumentacije;
- Saradnja sa klijentima od ugovornih aranžmana;
- Reakcija na promenu od pridržavanja plana.

Naravno ove maksime ne umanjuju važnost stavki procesa i alata, detaljne dokumentacija, ugovorenih aranžmana i pridržavanja plana, samo prednost daje pojedincima i interakciji, primenljivom softveru, saradnji sa klijentima i reakcijama na promenu.

Agile Manifesto principi su (Bjeladinović, 2021):

1. Zadovoljstvo korisnika brзом isporukom korisnog softvera;
2. Mogućnost promene zahteva čak i u poodmakloj fazi razvoja;
3. Česta isporuka softvera u razmaku od par nedelja;

4. Ispravan softver je osnovna mera napretka;
5. Razvoj koji je u stanju da održi konstantan tempo;
6. Bliska kooperacija između projekatara i poslovnih saradnika;
7. Najbolji tip komunikacije je komunikacija licem u lice;
8. Projekti se izvode u okruženju u kojem su motivisani pojedinci u koje se može imati poverenja;
9. Kontinualno usmeravanje pažnje ka tehničkoj veštini i dobrom dizajnu;
10. Jednostavnost;
11. Samoorganizovani timovi;
12. Povećanje performansi tima na osnovu prethodnog iskustva.

U agilnim metodologijama pojavljuje se pojam iteracije, on označava jedan kraći period vremena, koji uglavnom traje između jedne i četiri nedelje (Saini i Chhabra, 2020). U njemu karakteristično delovi tima ili ceo tim koji učestvuje u projektu, prolazi kroz sve faze i cikluse razvoja softvera.

Zbog velike kompleksnosti i težine projekata koje zahtevaju primenu agilnih metodologija prati se i meri brzina agilnog razvoja. Ovo se radi kako bi ovlašćeni menadžer tima vodio evidenciju i pratio efikasnost tima tokom realizacije projekta, kao i radi procenjivanja vremena koje je potrebno za stvaranje jednog inkrementa. Tako se određuje jedinica odrađenog posla koju je tim izabrao kao svoju brzinu realizacije projekta (Bjeladinović, 2021). Često se za brzinu uzima interval trajanja svake iteracije u procesima razvoja. Ona se izračunava kao količnik urađenih jedinica posla kroz trajanje iteracije.

Ono što povezuje sve agilne metodologije jeste da se pridaje veliki značaj kreiranju softvera koji je funkcionalan i primenljiv, a manje detaljnom zavodjenju i pravljenju precizne dokumentacije od tradicionalnih. Fokusiraju se na stalnom poboljšanju kvaliteta isporuke proizvoda ili usluge klijentu. Kroz iterativni i inkrementalni pristup koji je prisutan u agilnom razvoju smanjuje se broj grešaka i lakše se otklanjaju nastale. U stalno promenljivim sredinama je vrlo poželjno koristiti ove metode, jer daju mogućnost za brzu reakciju na sve uočene promene u okolini i korisničkim zahtevima.

U svim agilnim metodologijama prisutni su multifunkcionalni timovi koji su zaduženi za izvršavanje poslovnog zadatka. U većini slučajeva poslovi se obavljaju nakon kratkoročnog planiranja i onda se kreće sa realizacijom (AgileAlliance, 2022). Nju karakteriše minimalan broj funkcionalnosti za svaku iteraciju. Ovo pomaže fleksibilnoj reakciji na svaku promenu, pruža bolju kontrolu nad budžetom za projekat, omogućava klijentu bolji uvid u proizvedeno i dozvoljava mu da proveri usklađenost projekta sa njegovim zahtevima (Saini i Chhabra, 2020).

4.2 Razlike između agilnih metodologija i tradicionalnog projektnog menadžmenta (vodopad metod)

Radi boljeg razumevanja razlike između agilnih metodologija i tradicionalnog projektnog menadžmenta daćemo kratko poređenje.

Agilne metode mogu čak i u kasnijim fazama razvoja projekta da se prilagođavaju promenjenim zahtevima klijenta, što je vrlo teško za vodopad metod. Tim stručnjaka koji primenjuje vodopad metod prolazi kroz sve faze razvoja projekta sekvencijalno i ne ide na sledeću fazu dok ne završi sa prethodnom (Palmquist, Lapham, Miller, Chick i Ipek, 2013). Svi članovi tima su uključeni u to. Agilne metode ugrađuju vrednost u svoj proizvod iterativno i svaka funkcionalnost se može uključiti, čak iako nije bila predviđena originalnim planom.

Metod vodopad i agilne metodologije su pristupi upravljanja projektima, ali se razlikuju po pristupu planiranju i izvršenju projekta.

Vodopad metod je linearni, sekvencijalni pristup koji prati strogi skup faza, kao što su prikupljanje zahteva, dizajn, implementacija, testiranje i održavanje. Svaka faza mora biti završena pre nego što počne sledeća i ima malo prostora za promene ili prilagođavanja kada faza počne.

Agilne metodologije, s druge strane, su iterativni i inkrementalni pristup koji daje prioritet fleksibilnosti i prilagodljivosti. Agilne metodologije, kao što su Scrum i Kanban, podstiču aktivno učešće zainteresovanih strana i česte provere kako bi se osiguralo da projekat ostane na pravom putu i da

zadovoljava potrebe svih zainteresovanih strana. Agilni timovi imaju za cilj da isporuče male, upotrebljive delove projekta, nazvane „sprintovi“, koji se mogu pregledati i prilagoditi po potrebi.

Možemo zaključiti da je vodopad metod linearni proces sa definisanim skupom koraka koji se moraju pratiti određenim redosledom, i pogodniji je za projekte sa dobro definisanim zahtevima i gde se ne očekuju velike promene. Agilne metodologije su fleksibilnije, prilagodljivije i pogodnije za projekte sa velikom neizvesnošću, promenljivim zahtevima i velikim angažovanjem zainteresovanih strana.

5 Pregled odabranih agilnih metodologija (Scrum, Kanban, Crystal Clear, Extreme Programming - XP)

5.1 Osnovni koncepti metodologije Scrum sa fokusom na obezbeđivanje kvaliteta

Scrum kao jedna od agilnih metodologija je našla svoju primenu u upravljanju projektima, najčešće u okviru razvoja softvera, kao i u istraživanjima, marketingu, menadžmentu, prodaji, finansijama, proizvodnji automatizovanih vozila, procesnoj industriji i u mnogim drugim poslovnim oblastima (Schwaber i Sutherland, 2017). Posebno je efikasna u proizvodnji, u uslužnim delatnostima i u menadžmentu različitih kompanija.

Svoj naziv Scrum je dobio zbog sličnosti sa ragbijem. Ovaj termin označava vraćanje lopte u igru u ragbiju, uz pomoć timskog rada, što ova metoda oponaša u svom pristupu i radu. Schwaber i Sutherland su 1995. godine objavili rad „Business object design and implementation” koji je poslužio kao osnova za dalje usavršavanje ove metode. Brojni istraživači Schwaber, Babatunde, Sutherland, McKenna i drugi su godinama Scrum pristup unapređivali i razvijali do današnjih okvira. Oni su formirali sistemativnu, organizovanu, iterativnu i inkrementalnu metodologiju koja se može primenjivati u širokom spektru disciplina. Zadnja verzija Scrum vodiča je objavljena 2020. godine pod nazivom „Scrum Guide“ (Schwaber i Sutherland, 2020). Ova verzija sadrži definiciju Scrum-a, detaljno opisan svaki element, ulogu, praksu, tehniku i pristup koji treba da se razume i primeni da bi jedna metoda ispunjavala neophodne zahteva tj. da bi nosila naziv Scrum. Ken Schwaber i Jeff Sutherland definišu Scrum kao okvir u kojem ljudi mogu da se bave složenim adaptivnim problemima, dok produktivno i kreativno isporučuju proizvode najveće moguće vrednosti.

Prema Schwaber i Sutherland, 2017, Scrum nije ni proces, ni tehnika, ni metoda, nego je to okvir u kojem se mogu primenjivati različiti procesi i tehnike koje daju menadžeru mogućnost da utiče na kvalitet proizvoda, tima i radnog okruženja. U Scrumu postoje Scrum timovi, njihove uloge, događaji, artefakti i pravila.

Scrum se zasniva na iskustvenom pristupa koga čine: (tri stuba)

1. Transparentnost;
2. Inspekcija;
3. Adaptacija.

Transparentnost podrazumeva da su svima dostupne i vidljive informacije. Svi učesnici moraju biti upoznati sa svim aspektima posla i moraju imati zajednički jezik kako bi ostvarili zajednički cilj.

Da bi se cilj ostvario uspešno, vrši se čestu kontrolu Scrum artefakata i svih procesa kako bi se uočili greške i neželjena ponašanja.

Adaptacija podrazumeva otklanjanje uočenih grešaka i prilagođavanje novonastalim situacijama.

Sve što se dešava u jednom Scrumu može da se opiše nizom događaja. Sprint, Sprint planiranje, dnevni Scrum, Sprint pregled i Sprint retrospektiva su od ključne važnosti da bi se shvatilo šta se dešava prilikom stvaranja jednog inkrementa proizvoda (Muthucumaru, 2021). Svi događaji su vremenski ograničeni, imaju maksimalno trajanje i pomažu kompaniji da smanji učestale sastanka koji usporavaju progres i rad na projektu, i predstavljaju ključna mesta gde se obezbeđuje kvalitet u toku razvoja projekta. Svaki događaj omogućava inspekciju, transparentnost i adaptaciju.

Scrum metodu karakteriše Sprint kao osnovna jedinica, događaj u procesu razvoja. Sprint ima ograničeno trajanje od nedelju do mesec dana (Bjeladinović, 2021). Omogućava ograničavanje rizika i troškova za dati stalni vremenski okvir.

Veoma je bitno izdvojiti i Scrum artefakte koji predstavljaju ključne informacije, vrednosti i komponente Scrum metodologije koje pružaju osnovu primene svih Scrum stubova (Schwaber i Sutherland, 2020). Osnovna podela Scrum artefakata ih deli na Product Backlog, Sprint Backlog i inkremente (Atlassian, 2022).

Scrum Master održava i reguliše procese i ima sličnu ulogu projektnog menadžera u tradicionalnim metodologijama. Scrum Master je glavni odgovorni za upoznavanje kompanije u celini sa Scrum metodologijom, njenim praksama, ulogama, vrednostima, mehanizmima ponašanja, događajima itd. Scrum Master je vođa i lider Scrum tima (Laybourn, 2013). On ima glavnu savetodavnu ulogu. On savetuje Product Owner-a o organizaciji Product Backloga, takođe savetuje razvojni tim o samoorganizaciji i funkcionalnostima i u saradnji sa njima traži najbolji način za realizaciju inkrementa (Sutherland, 2010).

Product Owner je zadužen za obezbeđivanje maksimalne vrednosti svih inkremenata rada, tj konačnog proizvoda. On planira, upravlja, organizuje i rukovodi Product Backlog-om.

Uz Scrum Mastera, on preuzima deo odgovornosti tradicionalnog projektnog menadžera. Product Backlog je precizna lista stavki i artikala u jednom projektu koje moraju biti ostvarene kako bi se isporučio proizvod željenog kvaliteta i ispoštovao ugovor sa stakeholderima i zainteresovanim stranama (International Scrum Institute, 2011).

Funkciju Product Owner-a vrši jedna osoba, a ne grupa ljudi. Značaj njegove uloge je u tome što je Product Backlog, za koju je on glavni odgovorni, jedina lista zahteva i specifikacija za projekat koje moraju da se pridržavaju svi iz razvojnog tima i ne može niko da je menja bez saglasnosti Product Owner-a (Schwaber i Sutherland, 2020).

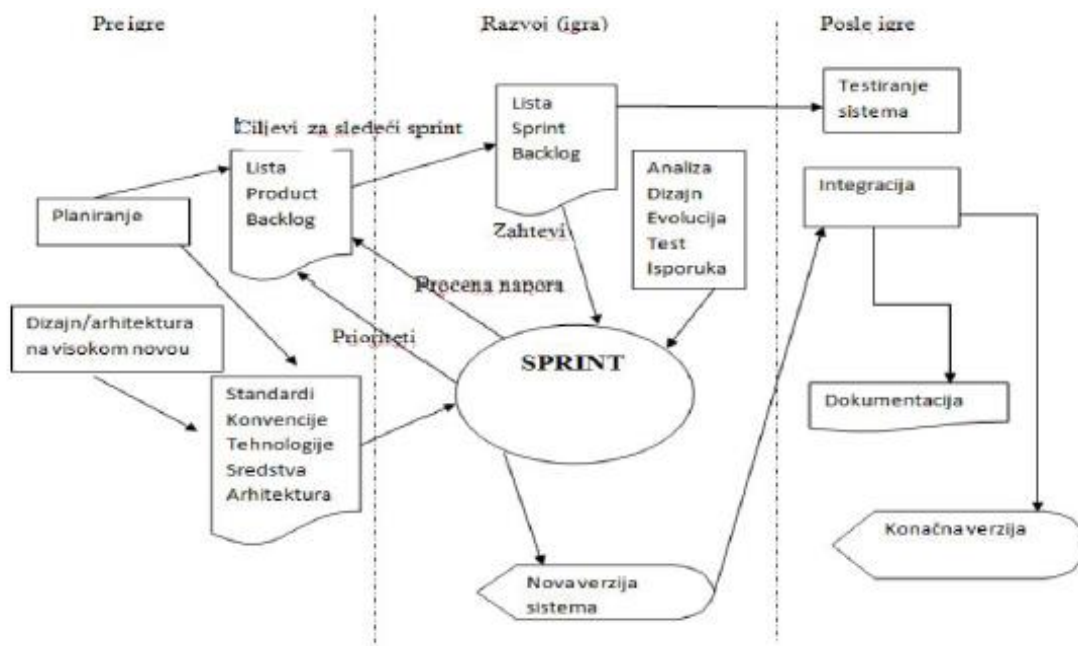
Razvojni tim čini grupa samoorganizujućih stručnjaka različitih oblasti koji se bave razijanjem i radom na projektu (Bjeladinović, 2021). Članovi razvojnog tim treba da su otvoreni za saradnju, sposobni, visoko stručni i samostalni što predstavlja jednu od ključnih Scrum vrednosti. Razvojni tim je zadužen da stvori vrednosni inkrement u Sprintu. Scrum ne prepoznaje titule za razvojni tim i ne dozvoljava raščlanjavanje na podtime bez obzira na domen posla kojim će se baviti (testiranje, frontend, backend itd.). Za sve uspehe i greške odgovoran je tim, a ne pojedinac iz tima (Sutherland, 2010). Razvojni tim je malobrojan i trebalo bi da ima od tri do devet članova za optimalnu realizaciju ciljeva. Radi lakšeg razumevanja na slici 9, slikovito je prikazana uprošćena šema načina odvijanja i funkcionisanja Scrum procesa.



Slika 9. Uprošćena šema Scrum procesa (Bjeladinović, 2021)

Metodologija Scrum prolazi tri faze, slika 10 (Bjeladinović, 2021):

1. Faza pre igre;
2. Faza razvoja (igre);
3. Faza posle igre.



Slika 10. Scrum proces – faze (Bjeladinović, 2021)

5.2 Osnovni koncepti metodologije Kanban sa fokusom na obezbeđivanje kvaliteta

Upotreba Kanban-a datira 1940-ih godina u Toyota-inoj kompaniji u Japanu od strane Taiichi Ohno-a, industrijskog inženjera. On je kreirao sistem za planiranje i upravljanje zalihama i inventarom koji je obezbeđivao kompaniji upravljanje svim aspektima i stadijumima procesa produkcije od proizvodnje do distribucije i kupovine od strane krajnjih korisnika (Kanbantool, 2022). Kasnije su kroz godine brojni autori od kojih su najpoznatiji Goldratt, Demmings, Drucker doprineli i razvili kocepte Kanban-a do nivoa kakve danas poznajemo. Teorijska osnova Kanban-a se oslanja na lean principe, teorije redova čekanja, upravljanje kvaliteta (Vacanti, 2020).

Primarni fokus Kanbana je usmeren na organizaciju tokova rada. Kanban metoda pokušava da organizuje sistem i efikasnost, efektivnost i predvidljivost njegovih činilaca i tako postigne optimalnu celinu. Ovde se vidi holistički pristup Kanban metode. Bitno je napomenuti da je tendencija Kanban-a da se usmeri na primenu teorijskih principa, praksi i konceptata celog sistema i tako dovode do poboljšanja i performansi kompanije i sistema (Kanban University, 2021). Ovo ne znači da ne obraća pažnju i na pojedinačne osobe tj. individue, već da glavni akcenat fokusira na definisanje okvira rada, tokova i politike koje će da usmeravaju rad zaposlenih i na taj način da najviše menadžuje njihovim aktivnostima.

Po nekim autorima Kanban označava agilnu metodologiju, po drugom okvir rada, metodu, pristup. Ono što je sigurno jeste da je Kanban nastao i koristi se kao strategija, vodič za optimizaciju vrednosti koja ulazi u kompaniji, prati određeni tok (tok rada) i onda izlazi iz nje. Te vrednosti se razlikuju iz aspekta klijenta i organizacije, ali zajedničko im je što i jednu i drugi žele da ostvare odnosno dobiju vrednost (dobro) koje je efikasno, efektivno i predvidljivo (Vacanti, 2020).

Nalaženje balansa između ova tri koncepta ujedno predstavlja optimizaciju vrednosti po Kanban-u. Optimizacija ne podrazumeva nužno maksimizaciju, jer i ona ima određene nedostatke (npr. preopterećenost kapaciteta sistema, kočenje tokova rada, nastanak blokada u tokovima rada, stvaranje uskih grla na određenim mestima itd.), već pronalaženje ravnoteže koja će dovesti do naboljih mogućih poslovnih rezultata po klijente i organizaciju (Kanban University, 2021). Ne optimizuje se sama vrednost direktno, već tokovi, tj procesi rada kompanije kroz koji ona mora proći da bi došla do krajnjeg korisnika.

Da bi se ovo ostvarilo koriste se brojne Kanban prakse, a najčešće se podrazumeva (Kanban University, 2021):

- Definisanje i vizuelizacija toka rada;
- Aktivno menadžovanje stavki toka rada;
- Poboljšavanje toka rada.

Pored ovih koriste se još i prakse (Kanban University, 2021):

- Limitiranje rada u progresu;
- Eksplicitne radne politike;
- Uspostavljanje petlji za povratne informacije;
- Poboljšavanje saradnje.

Kanban prakse se često nazivaju pod jednim imenom kao Kanban sistem, a osobe koje rade na primeni i realizaciji ovih praksi u radnom okruženju se nazivaju Kanban sistem članovi (Vacanti, 2020).

Prema Bjeladinović, 2021 za razliku od Scrum-a, Kanban je pogodan za korišćenje za manje projekte i manje timove (broj članova tima treba da bude manji od četiri). Svakoga dana timovi imaju nove zadatke koji obuhvataju rešavanje bagova i održavaju sistema, bez mogućnosti planiranja iteracije unapred. Kanban manje opterećuje svoje timove. U timovima nema jasno definisanih uloga ni rokova.

Još jedan bitan koncept u Kanbanu predstavljaju Kanban kadense. One predstavljaju učestalost, format i način u kojima se sastaju članovi Kanban sistema. One se razlikuju od veličine organizacije, radnog konteksta i budžeta ali uobičajeno podrazumevaju (Kanban University, 2021):

- Timski Kanban sastanci – dnevno;
- Timska retrospektiva – jednom u dve nedelje ili jedanput mesečno;
- Interni timski dopunski sastanak – po potrebi.

Timovi se sastaju određenom dinamikom i bave se upravljanjem i poboljšavanjem kvaliteta, prestrukturiranja tima ukoliko je potrebno, upravljanje radnim stavkama i tokovima rada. Ukoliko nastaju blokade ili uska grla prilikom rada, pokušavaju da ih otklone i obaveste sve uključene strane o novonastaloj situaciji.

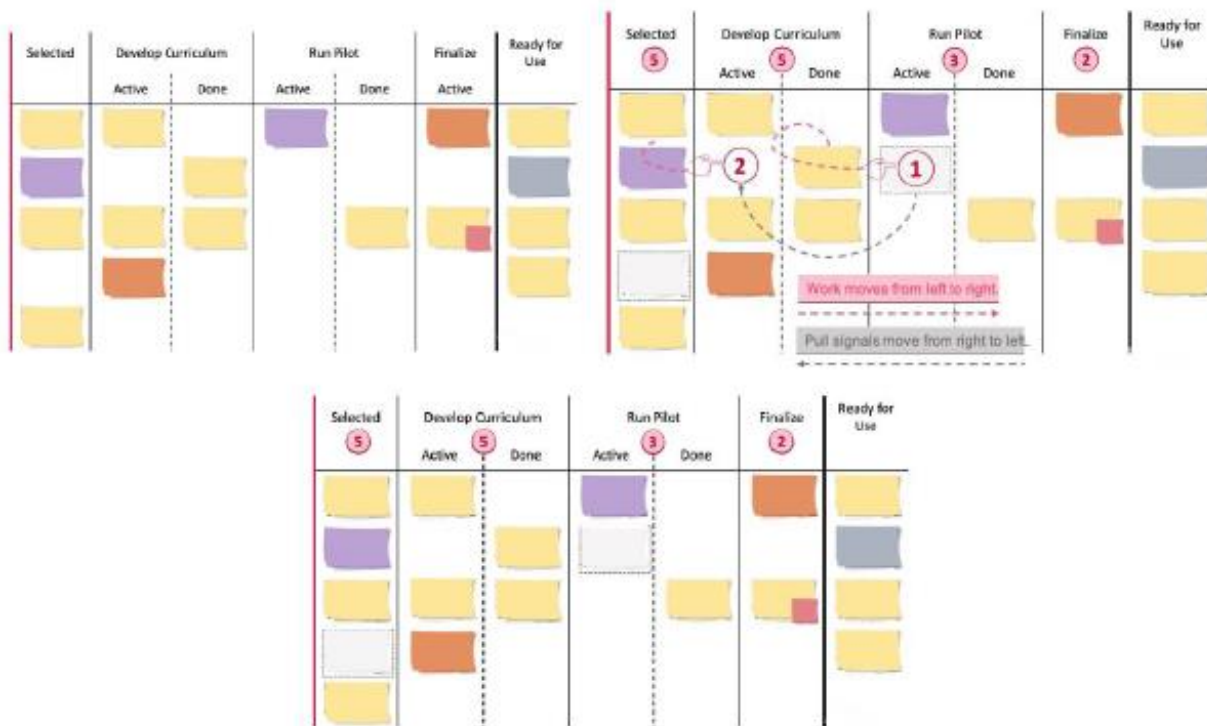
Kanban je vrlo korisno upotrebiti zajedno sa drugim metodologijama i okvirima i brojni autori preporučuju njegovu kombinovanu primenu. Zbog ovoga doseg primene Kanbana je dosta širi od ostalih agilnih metodologija, koje su svoju primenu dosad uglavnom bazirale u IT industriji. Kanban i njegovi koncepti se primenjuje u finansijskim kompanijama, zdravstvu, mašinskoj i automobilskoj industriji, marketing agencijama i softverskim kompanijama (Digite, 2022).

Primena Kanbana je poželjna u ljudskim resursima, obrazovanju, medijskim i produkcijskim kućama itd (Senapathi i Grogan, 2020).

Definicija toka rada je fundamentalni koncept Kanban-a, podrazumeva razumevanje toka rada i načina njegovog funkcionisanja između svih članova Kanban sistema. Minimalna definicija toka rada pretpostavlja da su svi članovi Kanban sistema definisali jedinice vrednosti (radne stavke) koje se kreću kroz kompaniju, tj kroz tokove rada, tačke početka i završetka rada i jedno ili više međustanja kroz koje radne stavke prolaze (Saltz i Heckman, 2020). Od momenta ulaska u sistem i započinjanja rada do završetka radne stavke se često nazivaju kao rad u toku (work in progress - WIP).

Bitno je definisati i kontrolne strukture koje će usmeravati WIP, eksplicitne politike kojih će se svi zaposleni pridržavati i koji će uticati na konačni kvalitet proizvedenog artikla ili usluge, kao i očekivani nivo usluge koji predstavlja prognozu koliko vremena treba posvetiti radnoj stavki od početka do kraja realizacije. Vizuelizacija definicije toka rada se naziva Kanban tabla (Digite, 2022).

Osnovni mehanizam vizuelizacije Kanbana se realizuje preko Kanban table. U zavisnosti od kompanije i njenog cilja, vrste posla, tima, broja zaposlenih i složenosti radnog okruženja i sredine sekcije na Kanban tabli se menjaju. Radne stavke treba da prolaze kroz određeni tok rada koji će ih provesti kroz sve segmente posla i obrade vrednosti da bi na kraju kreirale proizvod ili uslugu (Kantool, 2022). Primer jedne Kanban table i mehanizama povlačenja zadataka po sekcijama i njihovo uključivanje u rad je prikazano na slici 11.



Slika 11. Primer Kanban table u praksi (Kanban University, 2021)

Prema Bjeladinović, 2021, česte sekcije na Kanban tabli su:

- Backlog;
- Spremni zadaci;
- Kodiranje – zadaci na kojima se trenutno radi;
- Testiranje - zadaci koji se trenutno testiraju;
- Odobravanje – zadaci koji čekaju odobrenje za puštanje u produkciju;
- Završeni zadaci – zadaci koji su pušteni u rad.

Ukoliko se prilikom izrade rada, zadatak (task) na bilo kojoj od ovih sekcija ne izvrši, on dobija status „Work In Progress - WIP“. Baždarenje se često koristi za WIP parametre i vrši se povećavanje ili smanjivanje za svaku od sekcija.

5.3 Osnovni koncepti metodologije Crystal Clear sa fokusom na obezbeđivanje kvaliteta

Alistair Cockburn, američki informatičar i jedan od autora „Agile Manifesto“ je 1990-ih godina na molbu kompanije IBM napravio porodicu metodologija pod nazivom Crystal. Crystal predstavlja agilnu metodologiju koja se sastoji od više metoda Clear, Red, Sapphire i druge koje se između sebe razlikuju i koriste se u različitim situacijama u kompaniji (Cockburn, 2004). Ova porodica metoda je veoma fleksibilna i ima pristup koji je usmeren uvažavanje specifičnosti i razlika svakog projekata. Crystal karakterišu sledeća svojstva (Cook, 2022):

- Timski rad – tim kao celina treba da donosi odluke i rešava zadatke;
- Komunikacija – neophodna je pravovremena i efikasna komunikacija direktno tj. licem u lice ili indirektno;
- Jednostavnost – jednostavnost dokumentacije, dizajna proizvoda, sistema programiranja, oglašavanja i mehanizama komunikacije su podrazumevane u Crystal metodologijama;
- Refleksija podrazumeva:
 - o Odgovaranje i tačno izveštavanje
 - o Rezonovanje – zdravorazumsko objašnjenje svake radnje koju član tima preuzima
 - o Rekonstrukciju po potrebi
- Česta podešavanja;

- Poboljšavanja procesa – uključuje kontinualno poboljšavanje povratnih informacija, komunikacije, podešavanja, delova projekta i drugo.

Od izuzetnog značaja u ovim metodama su dve stvari (Chang, 2010):

- Tim je efikasniji ukoliko sam upravlja svojim poslom i projektom;
- Svaki projekat ima svoju posebnost i specifičnost i treba da implementira različite strategije i tehnike.

Prema Alistair Cockburn-u, 2004 treba da se rukovodimo željama i zahtevima klijenta, a ne na onim što je nekad praviljeno ili u čemu postoji stručnost.

Fokus Crystal metoda je (Cockburn, 2004):

1. Uključivanje ljudi;
2. Interakcija između timova;
3. Komunikacija;
4. Veština ljudi koji rade;
5. Talenat ljudi koji rade;
6. Komunikacija između timova.

Alistair Cockburn je formirao različite Crystal metode vodeći računa o sledeće tri dimenzije:

1. Veličina tima;
2. Kritičnost;
3. Prioritet projekta.

Metodu koju razmatramo i koja je najpopularnija iz ove porodice metoda je Crystal Clear. Ovu metodu karakterišu timovi koji imaju do šest, ali je moguće i osam članova okrenuta je ka ljudima, a ne ka procesima i artefaktima i cena ugovora o radu sa klijentom treba da bude fiksna, ne zahteva mnogo dokumentacije i usmerena je na sigurnost i bezbednost projekta.

Crystal porodica metoda predviđa osam uloga na projektu (Cockburn, 2004):

1. Sponzor;
2. Tim;
3. Koordinator;
4. Biznis ekspert i Ambasador korisnik;
5. Vodeći dizajner;
6. Dizajner-programer;
7. Tester;
8. Pisac.

Od ovih osam uloga metoda Crystal Clear razdvaja četiri kao esencijalne (izvršni sponzor, ambasador korisnik, vodeći dizajner i dizajner-programer) i te osobe ne bi trebalo da obavljaju druge uloge na projektu osim navedenih. Ključna razlika Crystal Clear u odnosu na ostale metode ove porodice je u tome što u ovoj metodi postoji samo jedan tim (Cook, 2022).

Sve Crystal metodologije karakteriše (Chang, 2010):

- Prilagodljivost;
- Jednostavnost i lakoća upotrebe;
- Akcenat na ljudima koji učestvuju u projektu;

Način realizacije jednog projekta koristeći Crystal Clear metodu podrazumeva podelu ukupnog posla na celine (Cook, 2022):

1. Projektni ciklus;
2. Ciklus isporuke;
3. Ciklus iteracije;
4. Radna nedelja;
5. Period integracije;
6. Radni dan;
7. Epizoda.

5.4 Osnovni koncepti metodologije Extreme Programming (XP) sa fokusom na obezbeđivanje kvaliteta

Namena XP je uglavnom usmerena na izrade projekata i aplikacija uz pomoć malih timova u uslovima, zahtevima i okruženju koje se često menja. Ukoliko bi se koristile konvencionalne (tradicionalne) metodologije ne bi se moglo odgovoriti na zahteve i održati standarde rada koje su neophodne za takve metode (Bjeladinović, 2021). Za takve situacije je najpoželjnije bilo koristiti XP metodu. Prilikom razvoja XP dozvoljava mogućnost dodavanja novih zahteva projekta kao i programiranje novih funkcionalnosti kad se za to ukaže potreba, a kod kojim se programira je jednostavan i jasan. Još jedna od glavnih karakteristika je redovna komunikacija sa klijentom i sa timom programera.

Životni ciklus razvoja softvera u XP metodologiji je (Beck, 2000):

1. Istraživanje;
2. Planiranje;
3. Iteracije do nove distribucije;
4. Proizvodnja;
5. Održavanje i umiranje;

Ključne prakse XP su (Beck, 2000):

1. Planiranje;
2. Jednostavna realizacija;
3. Metafora;
4. Jednostavno projektovanje;
5. Stalno testiranje;
6. Refaktorisanje;
7. Programiranje u parovima;
8. Kolektivno vlasništvo;
9. Stalna integracija;
10. 40-časovna radna nedelja;
11. Stalno prisustvo korisnika;
12. Standardno kodiranje.

XP ključne vrednosti su (AgileAlliance, 2022):

- Jednostavnost - usmerava biznis da pravi što jednostavniji sistem u skladu sa potrebama i željama korisnika, piše kod koji je lak i jednostavan za razmevanje, održavanje i potencijalno poboljšavanje;
- Komunikacija – odražava se u poboljšanoj saradnji, čestom promenom parova u programiranju u parovima, javnim prezentacijama, kratkim standup sastancima, usmenoj komunikaciji i razgovoru, a manje na dokumentaciji;
- Povratne informacije – kreiraju se automatizovani funkcionalni testovi koji pružaju programerima informacije o njihovom napretku i radu;
- Hrabrost – neophodna je da bi se uradila prava stvar za dobrobit projekta uprkos pritiscima drugih strana.

Iako Ekstremnog programiranje ima mnoštvo praksi i vrednosti koje usmeravaju rad celog tim i pristup kompanije kao celine, ova metodologija nema fiksno definisane specifične uloge ljudi u tim timovima. Ipak u literaturi se najčešće definišu četiri uloge i vezuju za Ekstremno programiranje (Beck, 2000; AgileAlliance, 2022):

- Kupac – definiše i usmerava poslovne odluke projekta, određuje šta sistem treba da radi i koje su mu karakteristike, pošto će on sam koristiti taj sistem kasnije;
- Programer – bavi se programiranjem i razvijanjem funkcionalnih jedinica projekta;
- Tragač – prati progres i rad tima, identifikuje mesta za poboljšanje, upoređuje ih sa metrikama koje su relevantne za dati projekat, analizira automatizovane testove i poredi ih. Najčešće jedan od programera preuzima aktivnu ulogu tragača;

- Trener – bitnu ulogu u definisanju nedeljnih i kvartalnih ciklusa ima trener. On određuje i rukovodi svim bitnijim sastancima iako uobičajeno nema tehničko relevantno programersko znanje, on je upoznat sa svim praksama Ekstremnog programiranja i može da rukovodi timom na efikasan način, po potrebi on ili neki od developera može da predlaže i „spike“ što označava kratak vremenski okvir u kojem će se istraživati određeni nedovoljno definisani aspekt projekta.

Pored brojnih prednosti XP ima dosta nedostataka. Zbog postojanja mogućnosti da klijent utiče na promene zahteva projekta, dolazi do toga da se izaziva nestabilnost zahteva koji znatno otežavaju i usporavaju izradu projekta. Ponekad ovo dovodi do konflikta između projekatara i klijenta, a kompromis koji potom usledi često nije dokumentovan što predstavlja problem (Bjeladinović, 2021).

6 Sumarni pregled obezbeđivanje kvaliteta u posmatranim agilnim metodologijama

Obezbeđivanje kvaliteta poseduje ključno mesto u svakom projektu. Obezbeđivanje kvaliteta je integrisano unutar svake od agilnih metodologija, od njenih uloga, artefakata, pa do mehanizama i tehnika. Ono je ugrađeno u nju, ali manifestuje se kroz različite prakse, odnosno radnje, tehnike i aktivnosti koje poseduje svaka od agilnih metodologija. Neophodno je definisati i izdvojiti ta mesta u svakoj agilnoj metodologiji. Ovo se razlikuje od tradicionalnih metodologija koje najčešće imaju odvojeno odeljenje koje se bavi obezbeđivanjem kvaliteta (Watt, 2022).

Ukoliko se vodimo ISO 9000:2015 definicijom obezbeđivanja kvaliteta, fokusiramo se na obezbeđivanju uverenosti u to da su ispunjeni različiti zahtevi kvaliteta.

Shvaćeno je da su neke od praksi prisutne u svakoj od agilnih metodologija detaljno planiranje svih faza projekta, timski rad i učestali timski sastanci, automatizovano testiranje koda, prisustvo klijenta prilikom izrade softvera, eksplicitne radne politike, generalno testiranje gotovih rešenja i demonstriranje gotovih proizvoda stakeholderima (Beck, 2000; Beck, 2003; Cockburn, 2004; Sharma i Bawa, 2020).

Ovo indirektno proizilazi iz Agile Manifesto principa koje svaka agilna metodologija mora da poseduje. Smatra se da su ove metodologije toliko zastupljene, jer njihova primena dovodi do boljih efekata obezbeđivanja kvaliteta i zato se primenjuju u brojnim radnim organizacijama i zamenjuju tradicionalne sve više.

Detaljno planiranje svih faza projekta je prvi korak ka obezbeđivanju kvaliteta jednog projekta. Bez ove prakse ne bi mogli da se isplaniraju adekvatni vremenski okviri kojih bi svi učesnici projekta trebalo da se pridržavaju, što bi potencijalno ugrozilo uspeh projekta (Schwaber i Sutherland, 2017). Ovo sve smanjuje verovatnoću nastanka previda ili greške i time loše utiče na krajnji kvalitet gotovog proizvoda ili usluge. Jasan, precizan i detaljan plan omogućava bolju komunikaciju i saradnju između članova tima i pruža strukturiran okvir za svaku fazu koji će omogućiti adekvatniju analizu trenda potencijalnih problema, a zatim identifikaciju, analizu i poboljšavanje procesa radi otklanjanja loših praksi i ponašanja (Kanbantool, 2022).

Timski rad i učestali timski sastanci su takođe od ključne važnosti za obezbeđivanje kvaliteta. U svim agilnim metodologijama se naglašava važnost učestale, efektivne saradnje multifunkcionalnih timova, koji radeći zajedno, rešavaju nastale probleme, poboljšavaju procese i pružaju adekvatne pravovremene povratne informacije jedni drugima (Cockburn, 2004; Cook, 2022). Bitna uloga sastanaka je u tome što promovisu komunikaciju i saradnju, ali njihov pravi značaj je u ranom identifikovanju i rešavanju potencijalnih problema projekta (Kanban University, 2021).

Automatizovano testiranje koda je postalo radni standard u svetu programiranja i proširilo se na sve oblasti koje zahtevaju softversku podršku i usluge, u brojnim industrijama, kao što su marketinška, finansijska, automobilska i procesna industrija. Ovo podrazumeva upotrebu i korišćenje specijalizovanih softverskih alata za automatizovano testiranje koda i omogućenih funkcionalnosti u kodu prilikom razvijanja koda, ali pre ugrađivanja inkrementa u gotovo softversko rešenje (Beck, 2003). Ova praksa je značajna da bi se povećao stepen sigurnosti u ispravnost proizvoda i uverenost da ispunjava zahteve kvaliteta i korisnika. Automatizovano testiranje pomaže ranoj detekciji grešaka

u fazi razvoja, skraćuje vreme koje bi bilo potrebno razvojnom timu za svakodnevno manuelno testiranje koda i štedi resurse kompanije.

Prisustvo i uključenost klijenata prilikom izrade softvera doprinosi kvalitetu projekta, jer redovnim proveravanjem ispunjenosti klijentskih zahteva i očekivanja dobija se mogućnost stvaranja kontrolisanog okvira realizacije projekta, a njegove povratne informacije razvojni tim može da uporedi sa svojim tumačenjima u pogledu željenog proizvoda i predupredi potencijalne nesporazume koji mogu dovesti do nezadovoljavajućeg rešenja (Beck, 2000). Najčešće razvojni tim ima prvi duži sastanak sa klijentom gde se definišu zahtevi i želje klijenta u pogledu projekta, a u kasnijim fazama uglavnom se samo prati razvoj proizvoda i validiraju zahtevi u odnosu na predstavljene inkremente projekta (Loannis i Panagiotis, 2007).

Eksplisitne radne politike daju jasne smernice u pogledu toga kako treba raditi, koje standarde i tehničke propise treba poštovati, kao i koji rezultati se očekuju, Eksplisitne radne politike usmeravaju ponašanje članova tima ka istom cilju, tiču se politika i kodeksa ponašanja zaposlenih (Wysocki i McGary, 2003). One takođe olakšavaju identifikaciju odstupanja od plana i pomažu sprečavanju nastanka grešaka i obezbeđuju da krajnji proizvod bude visokog kvaliteta (Heagney, 2011).

Generalno ili opšte testiranje uključuje sveobuhvatno finalno testiranje gotovog proizvoda kako bi se verifikovalo i validiralo da li ispunjava sve zahteve i da li sve radi u skladu sa specifikacijama (Beck, 2003).

Demonstriranje gotovog proizvoda stakeholderima omogućava da se dobijaju povratne informacije vezane za upotrebljivost, funkcionalnost, izgled kao i željene karakteristike proizvoda. Ove povratne informacije se mogu koristiti u svrhe potencijalnih budućih korekcija, podešavanja i narednih generacija proizvoda.

Može se primetiti da su sve prakse od velikog značaja za realizaciju obezbeđivanja kvaliteta projekta. U agilnim metodologijama ključno mesto idalje poseduju postavljeni standardi i tehnički propisi. Oni idalje imaju centralnu, vitalnu ulogu u svakom projektu i svakoj industriji, kao i u tradicionalnom projektnom menadžmentu. One predstavljaju kostur i imaju fundamentalnu ulogu u svakom projektu i neophodan su preduslov pre započinjanja bilo kakvog poslovnog poduhvata.

Agilne metodologije predstavljaju moderan način i pristup upravljanju projektima, koji uz pomoć korišćenja i praćenja standarda i tehničkih propisa, koristi najbolje radne prakse kako bi isporučio najbolje rezultate, povećao produktivnost, efikasnost i kvalitet i omogućio potencijalno snižavanje troškova i nastanku ušteta u kompaniji.

7 Pregled najznačajnijih standarda kao modela obezbeđivanja kvaliteta (QA) u agilnim metodologijama i procesnoj industriji

Primenu tradicionalnih i agilnih metodologija u procesnoj industriji prate brojni standardi kojih se radne organizacije moraju pridržavati. Takođe standardi su od ključne važnosti, jer pružaju okvir i smernice za obezbeđivanje konzistentnosti, bezbednosti, efikasnosti, efektivnosti i naravno što je za nas najvažnije, kvaliteta proizvoda i usluga kompanije. Među brojnim standardima koji su važni za regulisanje i primenu agilnih metodologija u procesnoj industriji izdvojili smo najvažnije.

ISO 9000:2015 je serija standarda koja sadrži zahteve pomoću kojih se može uspostaviti sistem menadžmenta kvaliteta. Ona sadrži ključne koncepte i principe menadžmenta kvaliteta koji se mogu primeniti u brojnim industrijama i organizacijama (ISO 9000:2015).

ISO 9013:2017 je standard koji pruža geometrijske specifikacije proizvoda i dozvoljene tolerancije kvaliteta radi klasifikacije rezanja različitih materijala plamenom, plazmom i laserima i najčešće se koristi u mašinskoj industriji (ISO 9013:2017).

ISO 10204:2017 specificira metode za plamenu atomsku apsorpcionu spektrometriju radi utvrđivanja masenog udela magnezijuma u rudama gvožđa (ISO 10204:2017).

EN 1090 je standard koji se bavi utvrđivanjem tehničkih zahteva za različite čelične konstrukcije. Određuje zahteve za izvođenje radova korišćenjem čelika radi pravljenja konstrukcija ili njihovog korišćenja u svrhe kreiranja novih fabrikovanih elemenata (EN 1090).

PAS 2060 je objavljen od strane Britanske institucija za standarde (BSI) 2010. godine i ažuriran je 2014. godine. Ovaj standard omogućava organizacijama da demonstriraju da su njihove tvrdnje o

neutralnosti ugljenika verodostojne i verifikovane kako bi se povećalo poverenje kupaca (PAS 2060). Pruža smernice o tome kako kvantifikovati, smanjiti i regulisati emisije štetnih gasova na određenom poslu. Ovo uključuje aktivnosti za regulisanje i upravljanje razvojem i specifikacijama vezano za proizvode, usluge, postrojenja, projekte i događaje.

ISO 14000 uspostavlja kriterijume za sistem za upravljanje i menadžment životne sredine. On predstavlja okvir koji kompanija ili organizacija može da prati kako bi uspostavila efikasan sistem za upravljanje životnom sredinom. Dizajniran je za bilo koju vrstu organizacije, bez obzira na njenu aktivnost, delatnost ili sektor. Pruža uverenost zaposlenima i menadžmentu kompanije kao i ostalim zainteresovanim stranama da se uticaj kompanije na životnu sredinu meri, tretira, prati i poboljšava (ISO 14000).

ISO 22300:2021 predstavlja seriju standarda namenjenu za utvrđivanja termina i definicija vezanih za bezbednost i otpornost (ISO 22300:2021).

ISO 25000 je serija međunarodnih standarda za evaluaciju kvaliteta softverskih proizvoda. Standard definiše zahteve za kvalitet i evaluaciju sistema i softvera, poznat je i kao SquaRE model (eng. Systems and software Quality Requirements and Evaluation). On obezbeđuje okvir za procenu kvaliteta softverskih proizvoda u različitim oblastima kao što su funkcionalnost, upotrebljivost, performanse, bezbednost i mogućnost održavanja (ISO25000, 2022). Standard ima za cilj da pomogne organizacijama da procene kvalitet svojih softverskih proizvoda i usluga, utvrde ciljeve kvaliteta, identifikuju probleme kvaliteta i prate i unapređuju kvalitet tokom vremena. Takođe se može koristiti za uspostavljanje zajedničkog razumevanja kvaliteta softvera među zainteresovanim stranama i pružanje osnove za donošenje informisanih odluka o softverskim proizvodima i uslugama (ISO 25000).

ISO/IEC 27000 predstavlja seriju standard koje se odnose na sistem menadžmenta bezbednosti informacija. Služi za obezbeđivanje poverljivosti informacija koje su namenjene zainteresovanim stranama tako što formira i postavlja odgovarajuće mehanizme zaštite informacija (ISO 27000).

ISO 37000:2021 podrazumeva standarde koji pružaju okvir za uspostavljanje i implementaciju efektivnih politika i praksi sa ciljem poboljšanja upravljanja. Ovo se postiže usmeravanjem radnji i aktivnosti upravnih tela i rukovodećih grupa kako da ispunjavaju svoje odgovornosti i obaveze, tako da bi organizacije kojima upravljaju mogle da ispune svoju misiju i viziju (ISO 37000:2021).

ISO 45001:2018 je standard koji obezbeđuje i pomaže uspostavljanju, primeni, održavanju i unapređvanju sistema za upravljanje zdravljem i bezbednošću na radu. Pomaže organizacijama da identifikuju i kontrolišu rizike vezane za zdravlje i bezbednost na radu i da se pridržavaju zakonskih i podzakonskih akata (ISO 45001:2018).

ISO 50001 je standard namenjan za uspostavljanje sistema menadžmenta energijom. Ona poštuje PDCA ciklus (Plan-Do-Check-Act) i uključuje zahteve za energetske politiku, planiranje, implementaciju, praćenje, merenje, procenu usaglašenosti i stalno poboljšanje u okvirima jedne organizacije (ISO 50001).

8 Zaključak

Agilne metodologije nude pristup i mogućnost kontinualnog poboljšanja procesa koji je posebno važan u brojnim procesnim industrijama. Razbijanjem projekta na manje delove kojima se lakše upravlja, agilni timovi mogu brže da reaguju na promene i izvrše neophodna prilagođavanja kako bi optimizovali proizvodne procese. Iterativna priroda agilnog razvoja omogućava timovima da stalno procenjuju i poboljšavaju industrijske procese, što može dovesti do veće efikasnosti i većeg kvaliteta proizvedenih proizvoda.

U procesnim industrijama, gde su proizvodni procesi složeni i često uključuju opasne materijale, bezbednost ljudi i opasnost po životnu sredinu imaju krucijalna mesta u razmatranju i planiranju svih projekata. Koristeći agilne metodologije, timovi mogu efikasnije da se fokusiraju, identifikuju i reše potencijalne bezbednosne probleme u ranim fazama životnog ciklusa projekta. Pored ovoga, agilne metodologije mogu da pomognu u smanjenju negativnih uticaja na životnu sredinu poboljšanjem energetske efikasnosti, smanjenjem otpada i minimiziranjem upotrebe opasnih materijala.

Na primer u hemijskoj industriji upotreba agilnih metodologija može dovesti do poboljšane kontrole kvaliteta i konzistentnosti u razvijenim proizvodima, kao i do smanjene varijabilnosti u proizvodnom procesu. Kontinuiranim ocenjivanjem, čestim verifikacijama i validacijama i optimizacijom procesa proizvodnje, moguće je identifikovati i rešiti probleme u ranijim fazama projekta. Ovo ne samo da poboljšava kvalitet proizvoda, već i povećava efikasnost i smanjuje škart.

U industriji za proizvodnju nafte i gasa, agilne metodologije se mogu koristiti za optimizaciju procesa bušenja, što rezultira skraćenim vremenom bušenja, povećanom bezbednošću i smanjenim negativnim uticajem na životnu sredinu. Ovo dovodi do boljeg donošenja odluka i efikasnijeg i efektivnijeg proizvodnog procesa.

Pored ovih industrija, potencijali i moguće primene agilnih metodologija u brojnim procesnim industrijama su veliki.

Na početku objašnjeni su pojam kvaliteta, sistema, sistema kvaliteta i sistema menadžmenta kvaliteta, a naposljetku i menadžment kvaliteta kao i njegovi procesi. Naveden je primer sistem menadžmenta kvaliteta koji je implementiran od strane kompanije IBM. Najviše pažnje u ovom poglavlju je posvećeno objašnjavanju ključnih koncepata obezbeđivanja kvaliteta i njegove primene u organizacionom kontekstu, kao i principa i načina sprovođenja odgovarajućih QA programa, odnosno uvođenje QA sistema u kompanijske i industrijske okvire. Na kraju ovog dela objašnjeno je kako funkcioniše obezbeđivanje kvaliteta u savremenim organizacijama i uočili smo da svaki od organizacionih nivoa ima svoje aktivnosti i obaveze po pitanju obezbeđivanja kvaliteta. Najviši nivoi su se bavili posmatranjem kvaliteta na makroplanu i definisanjem politika kvaliteta, priručnika kvaliteta, a niži uglavnom treninzima, obukama i definisanjem standardnih operativnih procedura za radnu organizaciju.

Naredno poglavlje je posvećeno tradicionalnom projektnom menadžmentu i njegovom definisanju, nabrojane su različite metode tradicionalnog pristupa za upravljanje projektima sa fokusom na vodopad metod. Navedene su faze životnog ciklusa projekta u tradicionalnom projektnom menadžmentu, povezanost i preklapanja njihovih procesa. Takođe su nabrojana ograničenja i načini usaglašavanja tri činioca (ograničenja) radi cilja postizanja željenog kvaliteta celokupnog projekta.

Navedene su najpopularnije agilne metodologije, definisani su Agile Manifesto principi i maksime agilnog razvoja i objašnjen je njihov značaj, izdvojene su razlike između agilnih metodologija i tradicionalnog projektnog menadžmenta (vodopad metod). Ustanovili smo na osnovu literature da se idalje primenjuju vodopad metod i da su brojni veliki inženjerski poduhvati izvedeni korišćenjem tradicionalnog pristupa (Huverova brana i prokop Panamskog kanala), međutim ustanovljeno je da ukoliko dođe do greške u njima postupak rada mora da se vraća na početak, što je velika razlika od agilnih metodologija. Uočeno je da u odnosu na vodopad metod agilne metodologije pružaju fleksibilan i brz odgovor na promene klijentskih zahteva.

Dat je detaljan opis funkcionisanja svake od četiri odabrane agilne metodologije (Scrum, Kanban, Crystal Clear, XP) sa naglaskom na brojne prakse, aktivnosti i mesta gde se obezbeđuje kvalitet. Ustanovili smo kroz pregled literature da agilne metodologije imaju ugrađeno obezbeđivanje kvaliteta u svojim praksama i principima, što se razlikuje od tradicionalnih metodologija koje najčešće imaju odvojeno odeljenje koje se bavi obezbeđivanjem kvaliteta.

Pruženi su sumarni pregled i predstavljen je način kako se obezbeđuje kvalitet u izdvojenim agilnim metodologijama (Scrum, Kanban, Crystal Clear i Extreme Programming - XP), preko izdvojenih praksi koje se mogu pronaći u svakoj od njih. Shvaćeno je da su sve prakse od velikog značaja za uspešnu realizaciju obezbeđivanja kvaliteta projekta, uzevši u obzir njihovu integrisanost u svaku od metodologija. Ustanovljeno je da uz njihovu odgovarajuću primenu, u skladu sa standardima i uz pridržavanje tehničkih propisa, mogu da se postignu veliki poslovni rezultati u svakoj industriji i organizaciji.

Na kraju su izdvojeni najvažniji standardi koji bi trebalo da služe kao modeli za obezbeđivanje kvaliteta, koji se upotrebljavaju u procesnoj industriji i koriste u radu sa agilnim metodologijama.

Cilj ovog rada je bio da prikaže načine kako se agilne metodologije mogu efikasno koristiti u svrsi obezbeđivanja kvaliteta i poboljšanja proizvodnih procesa i krajnjih proizvoda u procesnim

industrijama. Pokrili smo šest ključnih tematskih celina kroz poglavlja u radu da bismo ovo demonstrirali. Rad je imao za cilj da istakne jedinstvene prednosti korišćenja agilnih metodologija u procesnoj industriji, posebno u kontekstu obezbeđivanja kvaliteta. Ove prednosti uključuju mogućnosti brzog i fleksibilnog prilagođavanja promenama u proizvodnim procesima i ostvarivanje kontinualnih poboljšanja i optimizacija procesa kako bi se maksimizirao kvalitet i smanjio otpad. Dat je sveobuhvatan uvid u način kako se agilne metodologije mogu koristiti za unapređivanje poslovanja, proizvodnih procesa i kvaliteta u procesnoj industriji, što na kraju dovodi do poboljšanog kvaliteta proizvoda, bezbednosti i uticaja na životnu sredinu. Predmet daljih istraživanja bi moglo da bude utvrđivanje i navođenje svih praksi preko kojih se obezbeđuje kvalitet u agilnim metodologijama i koje od njih dovode procentualno do najvećeg obezbeđivanja kvaliteta u organizacijskim okvirima kako bi se odredio prioritet (važnost) i redosled njihovog uspostavljanja, radi adekvatnijeg upravljanja projektnim budžetom i kontrolisanim upravljanjem projektnih aktivnosti u brojnim procesnim industrijama.

9 Literatura

- [1] **AgileAlliance.com.** Agile Manifesto. Pristupano: Mart 22, 2023. sa <https://www.agilealliance.org/agile101/12-principles-behind-the-agile-manifesto/>
- [2] **AgileAlliance.com.** Experiences and usage of Agile Methods. Pristupano: Mart 23, 2023 sa [https://www.agilealliance.org/glossary/xp/#q=~\(infinite~false~filters~\(postType~\(~'post~'aa_book~'aa_event_session~'aa_experience_report~'aa_glossary~'aa_research_paper~'aa_video\)~tags~\(~'xp\)\)~searchTerm~'~sort~false~sortDirection~'asc~page~1](https://www.agilealliance.org/glossary/xp/#q=~(infinite~false~filters~(postType~(~'post~'aa_book~'aa_event_session~'aa_experience_report~'aa_glossary~'aa_research_paper~'aa_video)~tags~(~'xp))~searchTerm~'~sort~false~sortDirection~'asc~page~1)
- [3] **Atlassian.com.** Scrum Artifacts. Pristupano: April 15, 2023. sa <https://www.atlassian.com/agile/scrum/artifacts>
- [4] **Beck K.** Extreme Programming Explained: Embrace Change. 2nd Edition. Boston, The United States of America: Addison-Wesley. 2000.
- [5] **Beck K.** Test Driven Development: By Example. 1st Edition. Boston, The United States of America: Addison-Wesley. 2003.
- [6] **Bhasin S.** Quality Assurance in Agile –A study towards achieving excellence. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Conference paper: 17-19. 2012.
- [7] **Bjeladinović S.** Agilne metode za razvoj softvera; prezentacija katedre za Informacione sisteme; predmet Projektovanje informacionih sistema. Beograd, Srbija. 2021.
- [8] **Born G.** Process Management to Quality Improvement: The Way to Design, Document and Re-engineer Business Systems. Wiley. New Jersey. The United States of America. 1994.
- [9] **Chang M.** Agile and Crystal Clear with Library IT Innovations. Maryland, The United States of America: University of Maryland, Baltimore County. 2010.
- [10] **Cockburn A.** Crystal clear a human-powered methodology for small teams. Boston, The United States of America: Addison-Wesley Professional. pp. 73-78, 80-109. 2004.
- [11] **Conforto E.C.** Can Agile Project Management Be Adopted by Industries Other than Software Development?. Project Management Journal. Volume 45, Issue 3. 2016.
- [12] **Cook S.** Three Levels Of Strategy: Key Differences Explained. Pristupano: Mart 22, 2023. sa <https://www.businessbecause.com/news/insights/8073/three-levels-of-strategy#:~:text=Strategic%20decision%20making%20within%20any,level%20strategy%2C%20and%20functional%20strategy>
- [13] **Digite.com.** What is Kanban?. Pristupano: April 3, 2023. sa <https://www.digite.com/kanban/what-is-kanban/#:~:text=It%20all%20started%20in%20the,every%20stage%20of%20production%20optimally>
- [14] **Durivage M. A.** Practical Engineering, Process, and Reliability Statistics. ASQ Quality Press. Milwaukee, Wisconsin, The United States of America. 2022.
- [15] **Edgar H. Schein.** Organizational Culture and Leadership 4th Edition. California, The United States of America. 2010.
- [16] **Filipović J., Đurić M.** Osnove kvaliteta. Fakultet organizacionih nauka. Beograd, Srbija. 2009.
- [17] **Forbes.** Project Management Triangle. Pristupano: April 4, 2023. sa <https://www.forbes.com/advisor/business/project-management-triangle/>
- [18] **Hador B. B.** Three levels of organizational social capital and their connection to performance. Journal of Management Development. 2017. [ISSN: 0262-1711]
- [19] **Heagney J.** Fundamentals of Project Management. 4th Edition. New York, United States of America: Amacom. 2011.
- [20] **Hiltzik M.** Colossus: The Turbulent, Thrilling Saga of the Building of Hoover Dam. 2011.

- [21] **International Scrum Institute.** The Scrum Framework Training Book Third Edition. Bern, Switzerland: International Scrum Institute. pp. 32-63. 2011.
- [22] **ISO 9000:2015.** Quality management systems — Fundamentals and vocabulary. 2015, International Organization for Standardization. Pristupano: Mart 14, 2023. sa <https://www.iso.org/standard/45481.html>
- [23] **ISO 9013:2017.** Thermal cutting — Classification of thermal cuts — Geometrical product specification and quality tolerances. 2017, International Organization for Standardization. Pristupano: Mart 15, 2023. sa <https://www.iso.org/standard/60321.html>
- [24] **ISO 10204:2017.** Iron ores — Determination of magnesium — Flame atomic absorption spectrometric method. 2017, International Organization for Standardization. Pristupano: Mart 14, 2023. sa <https://www.iso.org/standard/71883.html>
- [25] **EN 1090.** Fabrication and assembly of steel and aluminium structures. Pristupano: Mart 14, 2023. sa <http://www.standardquality.org/en-1090-standard-quality>
- [26] **PAS 2060.** Carbon Neutrality Standard and Certification. Pristupano: Mart 16, 2023. sa <https://www.bsigroup.com/en-GB/pas-2060-carbon-neutrality/>
- [27] **ISO 14000.** Reduction of companys' adverse impact on the environment. Pristupano: Mart 17, 2023. sa <https://www.investopedia.com/terms/i/iso-14000.asp>
- [28] **ISO 22300:2021.** Security and resilience — Vocabulary. 2021, International Organization for Standardization. Pristupano: Mart 14, 2023. sa <https://www.iso.org/standard/77008.html>
- [29] **ISO 25000.** SQuaRE (System and Software Quality Requirements and Evaluation). Pristupano: Mart 15, 2023. sa <https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards>
- [30] **ISO/IEC 27000.** Series of information security management. Pristupano: Mart 12, 2023. sa <https://www.itgovernance.co.uk/iso27000-family>
- [31] **ISO 37000:2021.** Governance of organizations — Guidance. 2021, International Organization for Standardization. Pristupano: Mart 15, 2023. sa <https://www.iso.org/standard/65036.html>
- [32] **ISO 45001:2018.** Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. 2018, International Organization for Standardization. Pristupano: Mart 15, 2023. sa <https://www.iso.org/standard/63787.html>
- [33] **ISO 50001.** Energy management. International Organization for Standardization. Pristupano: Mart 14, 2023. sa <https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html>
- [34] **Joseph M. Juran i Joseph Defeo.** Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence 6th Edition. McGraw-Hill Professional Pub. New York, The United States of America. 2010.
- [35] **Kanban University.** The Official Guide to the Kanban Method. Mayrhofen, Austria: Kanban University. 2021.
- [36] **Kanbantool.com.** Kanban Guide and practice manual. Pristupano: Mart 11, 2023. sa <https://kanbantool.com/kanban-guide/kanban-history>
- [37] **Kieffer G., Stoker R., Nally D.** The Knowledge and Skills of the Successful QA/QC Manager. Maryland, PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology. 1998.
- [38] **Laybourn E.** Introduction to Scrum. American Journal of Software Engineering and Applications. 2013.
- [39] **Loannis S.G., Panagiotis S.** Agile Software Development Quality Assurance. Pennsylvania, The United States of America: Information science reference. pp. 106-221. 2007.
- [40] **Mark A. Fryman.** Quality and Process Improvement 1st Edition. Cengage Learning. Boston, Massachusetts, The United States of America. 2001.
- [41] **McCullough D.** The Path Between the Seas: The Creation of the Panama Canal, 1870-1914. Simon & Schuster. New York, United States of America. 1987.
- [42] **Mikonowicz A.** Manufacturing Quality Assurance Guidelines. International Quality Assurance Forum. Proposals for Manufacturing QA Guideline and QA Rating Methodology. 2011.
- [43] **Muthucumar A.** The future of collaborative technology within Scrum/Agile practices. Toronto, Canada: Faculty of Information, University of Toronto. 2021.
- [44] **Palmquist M., Lapham S., Miller M.A., Chick S., Ipek T.O.** Parallel worlds: Agile and waterfall differences and similarities. Pennsylvania, The United States of America: Carnegie Mellon University. Software Engineering Institute. 2013.
- [45] **Papadopoulos G.** Moving from traditional to agile software development methodologies also on large, distributed projects. Conference paper: International Conference on Strategic Innovative Marketing, IC-SIM 2014. Madrid, Spain. 2014.
- [46] **Petrović D.** Teorija upravljanja projektima. Beograd, Srbija: Fakultet organizacionih nauka. 2014.
- [47] **Pharmaguideline.com.** Safety and quality assurance guidelines. Pristupano: Februar 16, 2023. <https://www.pharmaguideline.com/p/sop-for-quality-assurance.html>

- [48] **Ponder S.** The importance of a successful Quality Assurance (QA) program from a research manager's perspective. National Library of Medicine. National Center for Biotechnology information corresponding to Quality Assurance Standards. 2002.
- [49] **Praeg C. P., Spath D.** Quality Management for IT Services - Perspectives on Business and Process Performance. Business Science Reference. New York, The United States of America. pp. 76-90. 2011.
- [50] **Radenković, B., Despotović Zrakić, M., Bogdanović, Z., Barać, D., i Labus, A.,** Elektronsko poslovanje, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, Srbija. 2015.
- [51] **Rose K.** Project Quality Management, Third Edition: Why, What and How Third edition. J. Ross Publishing. Florida. The United States of America. 2022.
- [52] **Rothman J.** Agile Managers: The Essence of Leadership. Cutter Business Technology Journal. 2009.
- [53] **Russell R.J.** Quality Assurance. Practical research guide. Dublin, Ireland: Trinity College Dublin. 2011.
- [54] **Saini N., Chhabra I.** Agile Methodologies A Performance Analysis to Enhance Software Quality. Boca Raton, Florida, The United States of America: CRS Press. 1st Edition. pp. 118-175. 2020.
- [55] **Saltz J., Heckman R.** Exploring Which Agile Principles Students Internalize When Using a Kanban Process Methodology. Journal of Information Systems Education (JISE). Volume 31 Issue 1. pp. 51-60. 2020.
- [56] **Sambasivam G.** eXtreme Programming (XP). Article. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 1. 2022
- [57] **Schwaber K., Sutherland J.** The Scrum Guide. Agile Alliance and Scrum Guide.org. 2020.
- [58] **Schwaber K., Sutherland J.** The Scrum Guide. Agile Alliance and Scrum Guide.org. 2017.
- [59] **Senapathi M., Drury-Grogan M.L.** Systems Thinking Approach to Implementing Kanban: A case study. Journal of Software: Evolution and Process. 2020.
- [60] **Sharma A., Bawa R.K.** Identification and integration of security activities for secure agile development. International Journal of Information Technology. 14(2). 2020.
- [61] **Sirikrai S.** Quality Assurance: Choices and Changes. The First International Conference on LSS for Higher Education. 2013.
- [62] **Sutherland J.** Scrum Handbook, Jeff Sutherland. Scrum Training Institute. 2010.
- [63] **Vacanti D.S.** The Kanban Guide. Practical Guide. Creative Commons. 2020
- [64] **Vidal A., Marle F.** Managing Complex, High Risk Projects. Chapter: Limits of Traditional Project Management Approaches When Facing Complexity. Springer. pp. 53-74. 2016.
- [65] **WHO/UNEP/VKI.** Analytical Quality Assurance and Control. World Health Organization, Geneva. 1997.
- [66] **Watt A.** Project Management. 2nd Edition. The Open University of Hong Kong. 2022.
- [67] **Wysocki R., McGary R.** Effective Project Management. 3rd Edition. New Jersey, United States of America: Wiley. 2003.

POBOLJŠAVANJE KVALITETA ZASNOVANO NA OPTIMIZACIJI I AUTOMATIZACIJI POSLOVNIH PROCESA

QUALITY IMPROVEMENT BASED ON OPTIMIZATION AND AUTOMATION OF BUSINESS PROCESSES

Marko PANTIĆ, Mladen ĐURIĆ*, Jelena RUSO
Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.355>

Kompanije koje isporučuju proizvode i usluge često nemaju jasnu sliku o procesima koji se odvijaju unutar njih. Takav pristup dovodi do ograničenja rasta kompanije, a mogućnost za pojavu neusaglašenosti znatno raste. Veliki broj organizacija funkcioniše bez bilo kakvog sektora, odeljenja ili zaposlenog koji se bavi procesima i sistemima menadžmenta u celini. Uzrok takve pojave jeste nerazvijena svest o procesnom menadžmentu i konceptu kvaliteta kao osnovnom delovanju u kompanijama. Stoga, u ovom radu biće izvršena analiza koja će prikazati uticaj optimizacije i automatizacije poslovnih procesa na poboljšavanje kvaliteta. Zatim, pregledom literature, biće generisan operativni model gde će se utvrditi njegov uticaj na povećanje brzine poslovnih procesa i smanjenje varijacija, grešaka u procesu i troškova poslovanja.

Ključne reči: *poboljšanje kvaliteta; optimizacija procesa; automatizacija procesa*

Companies that deliver products and services do not usually have a clear picture of the processes within the company itself. Such an approach leads to a situation in which the company's growth is limited and the possibility of non-compliance increases significantly. In addition, a large number of organizations function without any sector, department, or at least an employee dealing with processes and management systems as a whole. The cause of such a phenomenon is an underdeveloped awareness of process management and the concept of quality as a company's primary activity. Therefore, in this paper, an analysis will be performed to show the impact of optimization and automation of business processes on quality improvement. Then, by reviewing the literature, an operational model will be generated to determine its impact on increasing the speed of business processes and reducing variations, process errors, and business costs.

Key words: *quality improvement; process optimization; process automation*

1 Uvod

U međunarodnom tržišnom okruženju, koje se karakteriše povećanjem broja konkurenata i intenziviranjem konkurentskih napora na svim nivoima i u svim domenima, kvalitet prema Rakita (2005) predstavlja jedan od tri ključna elementa na kojima se zasniva stvaranje uspešne marke i renoMEA na tržištu, zajedno sa diferenciranošću proizvoda i komuniciranjem sa potrošačima. Prema Kotleru (2010), kvalitet je stepen sposobnosti određene marke za izvršenje njenih funkcija. Prema Demingu (1996), kvalitet predstavlja višedimenzionalnu kategoriju – za preduzeće je kvalitet obezbeđivanje opstanka na tržištu, a za izvršno rukovodstvo fabrike kvalitet predstavlja proizvodnju planiranog broja artikala prema zacrtanoj tehničkoj specifikaciji. Juran (1996) smatra da je kvalitet kategorija koja se meri od strane kupaca i to sa aspekta osobina proizvoda i odsustva nedostataka. Kvalitet se u današnje vreme može podvesti pod oblast koja je mnogo više od jednostavne tehničke definicije i koja obuhvata više različitih pristupa: tehnički, tržišni i upravljački. U tom smislu, kvalitet predstavlja skup svih osobina i karakteristika proizvoda koji se odnose na zadovoljenje definisane ili izražene potrebe, dok se poboljšavanje kvaliteta po Filipoviću i Đuriću (2010) može definisati kao deo menadžmenta kvaliteta usredsređen na povećanje sposobnosti da se ispunjavaju zahtevi kvaliteta.

* Corresponding author, e-mail: djuric.mladen@fon.bg.ac.rs

Optimizacija i automatizacija poslovnih procesa kao krajnji cilj predstavljaju koncepte koje u velikoj meri utiču na poboljšanje kvaliteta u organizaciji i kao takvi predstavljaju aktivnosti koje svaka organizacija treba da sagleda i proceni svoj razvitak u tom pravcu. Preduslov za tako nešto su detaljno identifikovani i mapirani procesi u kompaniji. Stoga, cilj rada biće pregled konceptata poboljšanja kvaliteta i prikaz nastanka i razvoja analize poslovnih procesa. Uz to, cilj je da se kroz istraživanje i prikupljanje informacija izvrši analiza koja će prikazati uticaje koje na poboljšavanje kvaliteta imaju optimizacija i potencijalna automatizacija poslovnih procesa. Krajnji cilj rada biće generisanje modela koji integriše uticaje koje na poboljšanje kvaliteta u organizaciji imaju optimizacija i automatizacija poslovnih procesa. U ovom radu, korišćena je metoda prikupljanja podataka. Željena pojava se posmatra, sa beleženjem zapažanja koja su predmet istraživanja.

U skladu sa temom istraživanja i definisanim ciljem, definisane su i osnovne tj. opšte hipoteze koje se žele potvrditi ovim radom:

- X0 - optimizacija i automatizacija poslovnih procesa utiču na poboljšavanje kvaliteta u organizaciji
- X1 - primena kreiranog generisanog modela uticaće na povećanje brzine poslovnih procesa, smanjenje varijacija i grešaka u procesu i smanjivanje troškova poslovanja

U prvom poglavlju govori se osnovnim konceptima menadžmenta kvaliteta sa posebnim fokusom na koncept "Poboljšavanje kvaliteta" gde je detaljno objašnjeno šta taj koncept predstavlja i šta donosi svakoj organizaciji. Tokom drugog poglavlja više reči je bilo o temi procesnog menadžmenta i na koji način upravljanje poslovnim procesima omogućava kompanijama da efikasnije preduzimaju aktivnosti koje će uskladiti sa željenim rezultatom. Na koji način optimizacija procesa povećava kompanijsku efikasnost, biće predstavljeno u trećem poglavlju. U sledećem poglavlju govori se o robotskoj automatizaciji procesa i na koji način je RPA (eng. *Robotic process automation*) postala jedna od glavnih tema vezanih za poslovanje i šira ekonomska pitanja. Naprednim razvojem tehnologije, otkriva se poslovni svet koji sve više uklanja tradicionalne radničke uloge u zamenu za sve više automatizovanih poslovnih procesa. Poslednji deo rada prikazuje kreirani operativni model koji predstavlja rezultat istraživanja u prethodnim oblastima kao i njegovu konkretnu primenu u kompaniji „XY“.

2 Osnovni koncepti menadžmenta kvaliteta

Kvalitet je oduvek prisutan u procesu proizvodnje još od vremena drevnih civilizacija. Međutim, veća pažnja se počela posvećivati pitanju kvaliteta tek sa industrijskom revolucijom, od osamdesetih godina devetnaestog veka. Kvalitet je počeo da se izučava kao fenomen, a prvi ozbiljni rezultati u ovoj oblasti su ostvareni neposredno posle Prvog svetskog rata, kada se počelo sa primenom matematičkih modela u izučavanju kvaliteta. Kvalitet se danas posmatra kao višedimenzionalna kategorija, koja je mnogo više od tehničkog shvatanja fenomena. Prema standard ISO 9000, kvalitet je "nivo do kojeg skup svojsvtvenih karakteristika entiteta (proizvoda, process, sistem) ispunjava zahteve" (ISO, 2015). Prema istom standardu ISO (2015), kvalitet proizvoda i usluga podrazumeva ne samo predviđene funkcije i performance, već kako njihovu vrednost i korist doživljava korisnik i ostale interesne strane. Da bi se pružila vrednost za sve interesne i zainteresovane strane i realizovali rezultati, potrebno je upravljanje međusobno delujućih procesa i resursa a tu ulogu ima sistem menadžmenta kvaliteta (SMK). SMK je onaj deo sistema menadžmenta organizacije koji se usredsređuje na ostvarivanje rezultata u vezi sa ciljevima kvaliteta, koji se stara o tome da se na odgovarajući način zadovolje potrebe, očekivanja i zahtevi korisnika (Filipović i Đurić, 2009). Menadžment kvaliteta čine "koordinisane aktivnosti za vođenje organizacije u odnosu na kvalitet i upravljanje njome u tom smislu" (ISO, 2015) i obuhvata četiri procesa: planiranje kvaliteta, upravljanje kvalitetom, poboljšavanje kvaliteta i obezbeđivanje kvaliteta.

2.1 Pregled osnovnih modela poboljšavanja kvaliteta

Poboljšavanje kvaliteta je strukturirani pristup vrednovanju performansi sistema i procesa, a zatim utvrđivanju potrebnih poboljšanja kako u funkcionalnom tako i u operativnom smislu. Uspešni napori se oslanjaju na rutinsko prikupljanje i analizu podataka. Plan poboljšavanja kvaliteta opisuje

tekući ili kontinuirani proces kroz koji zainteresovane strane u organizaciji mogu pratiti i procenjivati inicijative i rezultate. Prema ISO (2015), poboljšavanje kvaliteta je “deo menadžmenta kvaliteta usredsređen na podizanje sposobnosti da se ispunjavaju zahtevi kvaliteta”.

2.1.1 Kaizen

Prema Filipoviću i Đuriću (2009) Kaizen je filozofija koja se odnosi na sve aspekte poslovanja. Strategija Kaizena je nazvana "najvažnijim konceptom u japanskom menadžmentu-ključem japanskog poslovnog uspeha". Pod poboljšavanjem kvaliteta se na Zapadu uglavnom smatraju aktivnosti usmerene na poboljšavanje kvaliteta proizvoda. Organizacija sa istinskim kaizen načinom razmišljanja je ona koja se uvek trudi da poboljša ono što radi, na svakom nivou. Svi dele zajedničko uverenje da je glavni deo njihove uloge u poslu poboljšanje ne samo onoga što rade kao pojedinci, već i ono što organizacija radi u celini (Tisbury, 2013). Prema Alukal (2006), kaizen timovi imaju tendenciju da budu multikvalifikovani, obučeni i višestruko funkcionalni. Svaki član prolazi obuku o kaizen i timskom radu, uključujući osnovnu izgradnju konsenzusa i rešavanje sukoba, tehnike rešavanja problema.

2.1.2 Lean Six Sigma

Prema IHI (2022) *Lean* je pristup koji izbacuje višak i poboljšava efikasnost poslovnih procesa tako da svaki rad ili aktivnost dodaju vrednost. Da bi *Lean* principi bili dobro prihvaćeni od strane zaposlenih, menadžeri prvo moraju raditi na stvaranju kompanijske kulture koja dobro reaguje na *Lean* razmišljanje. George (2004) definiše *Lean Six Sigma* kao disciplinu ukoja je naučila iz prošlih grešaka. A jedna od grešaka koje su napravile prethodne metodologije unapređenja bila je ignorisanje podrške menadžmenta. Prema Asefeso (2012) *Six Sigma* nastoji poboljšati kvalitet izlaznih rezultata procesa identifikovanjem i uklanjanjem uzroka nedostataka (grešaka) i minimiziranjem varijabilnosti u proizvodnim i poslovnim procesima. Koristi skup metoda upravljanja kvalitetom, uključujući statističke metode, i stvara posebnu infrastrukturu ljudi unutar organizacije („Crni pojasevi“, „Zeleni pojasevi“ itd.) koji su stručnjaci za ove metode. Uloga profesionalca Six Sigme je da kvantifikuje performanse procesa (kratkoročne i dugoročne mogućnosti) i da uspostavi pravu strategiju za postizanje utvrđenog cilja učinka.

3 Upravljanje poslovnim procesima

Poreklo BPM (eng. Business Process Management) ima dva primarna intelektualna korena. Prvi je rad Stjuarta (1996) o statističkoj kontroli procesa, što je dovelo do modernog pokreta kvaliteta. Ovim radom se nastojalo smanjiti varijacije u učinku rada pažljivim merenjem rezultata i korišćenjem statističkih tehnika da bi se izolirali „osnovni uzroci“ problema sa učinkom - uzroka koji bi se zatim mogli otkloniti. Prema Hamer-u (2015), mnogo važniji od detalja gornjih i donjih graničnih kontrola ili bezbroj drugih analitičkih alata koji su deo kvalitetnog naoružanja jesu konceptualni principi koji su u osnovi ovog rada: osnovna pretpostavka da su operacije od kritičnog značaja i da zaslužuju ozbiljnu pažnju i upravljanje; upotreba metrika performansi za utvrđivanje da li se posao obavlja zadovoljavajuće ili ne; fokusiranje na teške podatke, a ne na mišljenje, kako bi se izolirali uzroci poteškoća u performansama; koncept okrivljavanja procesa, a ne ljudi, da su nedostaci performansi ukorenjeni u objektivnim problemima koji se mogu prepoznati i rešiti. Koncept stalnog poboljšanja, po Haringtonu (1994), je rešavanje jednog skupa problema samo kupuje organizaciji ulaznicu za rešavanje sledećeg kruga.

Softver za upravljanje poslovnim procesima, koji se naziva i BPM softver, BPM platforma ili BPM alat, je svaki softver koji podržava kompaniju da upravlja svojim poslovnim procesima. Softver treba da omogući decentralizovanu dokumentaciju procesa, da bude kompatibilan sa jedinstvenom IT infrastrukturom i da bude dovoljno prilagodljiv za nestručne krajnje korisnike. Uz to, mora imati mogućnost da podrži uvođenje nivoa automatizacije poslovnih procesa. Pravi softver za upravljanje poslovnim procesima, implementiran na pravi način, može zadovoljiti i premašiti zahteve bilo kog posla. To je zato što je BPM softver posebno dizajniran da podrži kontinuirani proces poboljšanja, stvarajući petlju pozitivnih povratnih informacija za celo preduzeće kao što navodi Mericade (2020).

3.1 Mapiranje poslovnih procesa

Mapiranje procesa pruža vizualizaciju toka podataka od početka do kraja, dok identifikuje procesne praznine i uska grla (Cobos Muñoz et al., 2020). Prema Microsoft (2020), mapiranje procesa olakšava okupljanje timova i razumevanje članova timova šta je njihova uloga i na koji način njihov rad utiče na ostale članove projektnog tima, sve u cilju što boljeg krajnjeg rezultata. Kada imate moć da vizuelno prikažete i razumete neki proces od početka do kraja, brzo će se pojaviti oblasti u kojima možete da unapredite efikasnost. Osnovni simboli za mapiranje procesa se mogu videti u radu Amanda Athuraliya (2020), dok neki od korisnih primera mapiranja procesa su prikazani kod Lucid-Chart (2020).

4 Optimizacija poslovnih procesa

Optimizacija procesa je disciplina prilagođavanja procesa radi optimizacije određenog skupa parametara bez kršenja nekoliko ograničenja. Najčešći ciljevi su minimiziranje troškova i maksimizacija efikasnosti. Ovo je jedan od glavnih kvantitativnih alata u industrijskom odlučivanju, dok se optimizacija poslovnih procesa može definisati kao praksa povećanja organizacione efikasnosti unapređivanjem procesa. Niderman (2011) navodi da je planiranje od ključne važnosti da bi kompanija na najbolji način iskoristila uložene napore za optimizaciju poslovnog procesa. U nastavku su koraci za sprovođenje plana optimizacije procesa. Korak 1: Identifikacija procesa Kompanija treba da izabere problematičan proces koji želi da optimizuje, a zatim da definiše svrhu i ciljeve. Korak 2: Analiza procesa Kompanija treba da odgovori na pitanje da li proces ispunjava željene ciljeve. Korak 3: Prijava Kada se kompanija jednom reši nepotrebnih elemenata, biće u prilici da automatizuje revidirani postupak u novom obliku. Korak 4: Monitoring Kompanija treba da uradi monitoring mikro i makro performansi procesa i da uradi "fina podešavanja" dok ne dobije željene rezultate (Russo, 2019).

4.1 Alati za optimizaciju procesa

Služeći se „Lean“ alatima i različitim aplikativnim rešenjima za optimizaciju procesa, danas je neophodno skoro svakoj modernoj kompaniji ukoliko teži da bude bar jedan korak ispred svoje konkurencije. Ideja je da se procesi u poslovnom okruženju učine što efikasnijim, takoreći da se do što veće zarade dođe upotrebom što manje resursa. U nastavku će biti više reči o konkretnim alatima iz seta „Lean“ alata: A3, Gemba, Kanban i 5S.

A3 predstavlja alat za planiranje i primenu koji je kratak, sažet i grafički prikaz celokupnog procesa na kojem se treba raditi. Prema Shook (2008) A3 je poput rezimea koji se može prilagoditi rasporedom, stilom i naglaskom u skladu sa osobom koja traži posao i vrstom posla koji se traži na jednoj stranici. Cela svrha i poenta **Gemba alata** je da su problemi u poslovnom procesu neretko lako vidljivi, a najbolje poboljšanje dolazi od odlaska na „pravo mesto“, gde lideri mogu sami da vide stanje u procesu (Socconini, 2019). Od lidera, menadžera i supervizora očekuje se da posmatraju i razumeju proces, dok bi takođe trebalo da podstakne veću komunikaciju, transparentnost i poverenje između nižeg nivoa zaposlenih i rukovodstva. **Kanban** je izuzetna vizuelna metoda upravljanja tokom rada koja je popularna među „Lean“ timovima. Omogućava timovima i kompanijama transparentnost, metriku i fokus koji su im potrebni za praksu kontinuiranog usavršavanja. Prema Turner (2019) Kanban je jednostavan softver koji se odnosi na rad sa belom tablom i navođenje zadataka za tim koji koristi različite kartice. Timovi i menadžeri mogu da nabroje sve zadatke iz zaostalih predmeta u delu obaveza na tabli i da izaberu zadatke na koje treba trenutno biti usredsređeni. Ovo je jednostavan način za vizuelizaciju zadataka koji su kompletni i zadataka koji su još uvek u toku. Prema Kato (2011) Često je najjednostavnije rešenje najbolje rešenje. U mnogim slučajevima kada pojedinci ne mogu da vide potencijal poboljšanja, dobra je ideja započeti sa osnovama, kao što je **5S**. Ovaj koncept se odnosi na pet japanskih reči koje počinju slovom S (seiri, seiton, seiso, seiketsu i shitsuke). Alat 5S je definisan kao metodologija koja rezultira radnim mestom koje je sigurno i dobro organizovano kako bi pomoglo smanjenju troškova i optimizaciji produktivnosti. Dizajniran je da

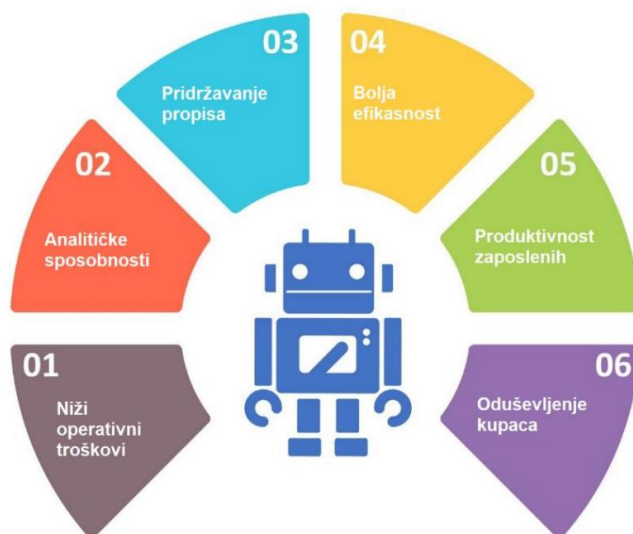
pomogne u stvaranju kvalitetnog radnog okruženja, kako fizičkog, tako i mentalnog. Filozofija 5S primenjuje se u bilo kom radnom području pogodnom za vizuelnu kontrolu.

5 Automatizacija poslovnih procesa

Automatizacija poslovnih procesa se prvenstveno manifestuje kontinuiranim uvođenjem naprednih informacionih i komunikacionih rešenja po pitanju unapređenja postojećih poslovnih procesa. Primarni razlog automatizacije je zasnovan na potrebi za poboljšanjem operativne efikasnosti. Boulton (2018) opisuje i robotsku automatizaciju procesa (RAP) kao „primenu tehnologije vođenu poslovnom logikom i strukturiranim ulazima, usmerenu na automatizaciju poslovnog procesa“, i da „sredstva koja automatizacija robotizovanih procesa pruža preduzeću mogu koristiti ista preduzeća za konfigurisanje softvera, ili robot, koji sam prikuplja i tumači aplikacije za obradu radnji, podataka, transakcija, odgovora i komunikaciju sa ostatkom sistema.“ Boulton (2018) ovde navodi kao primer automatizacije obrade u bankarstvu, gde nekoliko instaliranih „robota“, zapravo softvera koji se automatski pokreće sa centralnih servera banke, obrađuje nekoliko procesa i milione zahteva godišnje, što se u perspektivi radnika upoređuje sa stotinama novih zaposlenih velikim sredstvima koje bi se trošile na zapošljavanje. Ispod je nekoliko rutinskih zadataka koji se mogu efikasno automatizovati pomoću RAP.

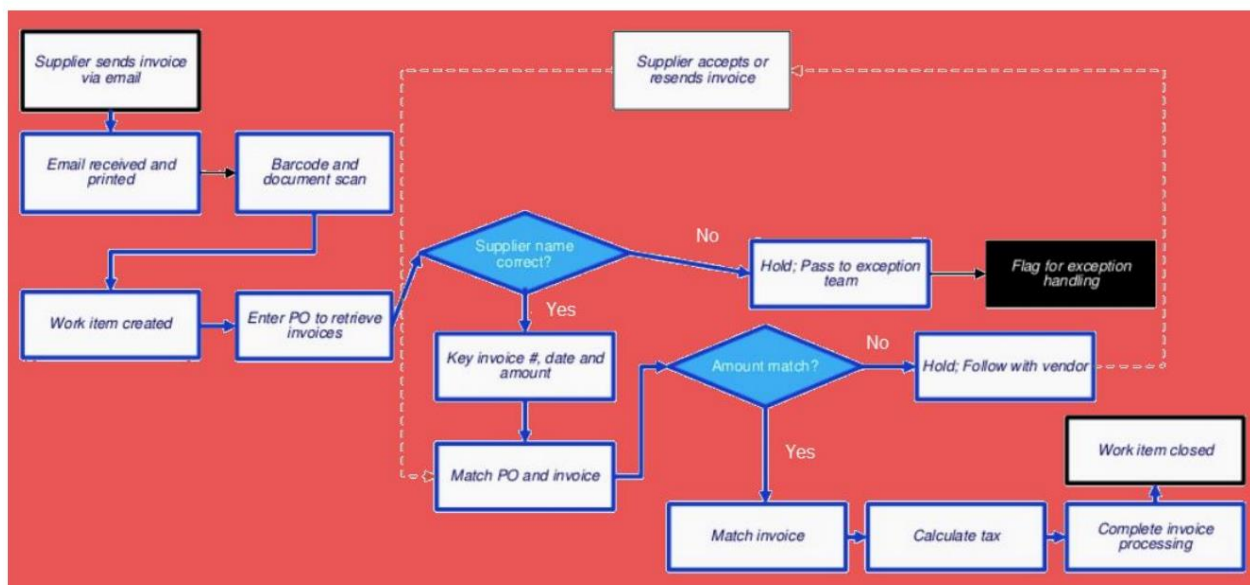
- „backoffice“ unos podataka,
- „kopiraj-zalepi“ podatke,
- premeštanje datoteka i direktorijuma,
- otvaranje e-pošte i generisanje automatizovanih odgovora putem e-pošte,
- prijavljivanje i odjava iz aplikacija.

Na slici 1. prikazane su prednosti robotske automatizacije procesa.



Slika 1 Prednosti robotske automatizacije process (Blockchainsimplified, 2019)

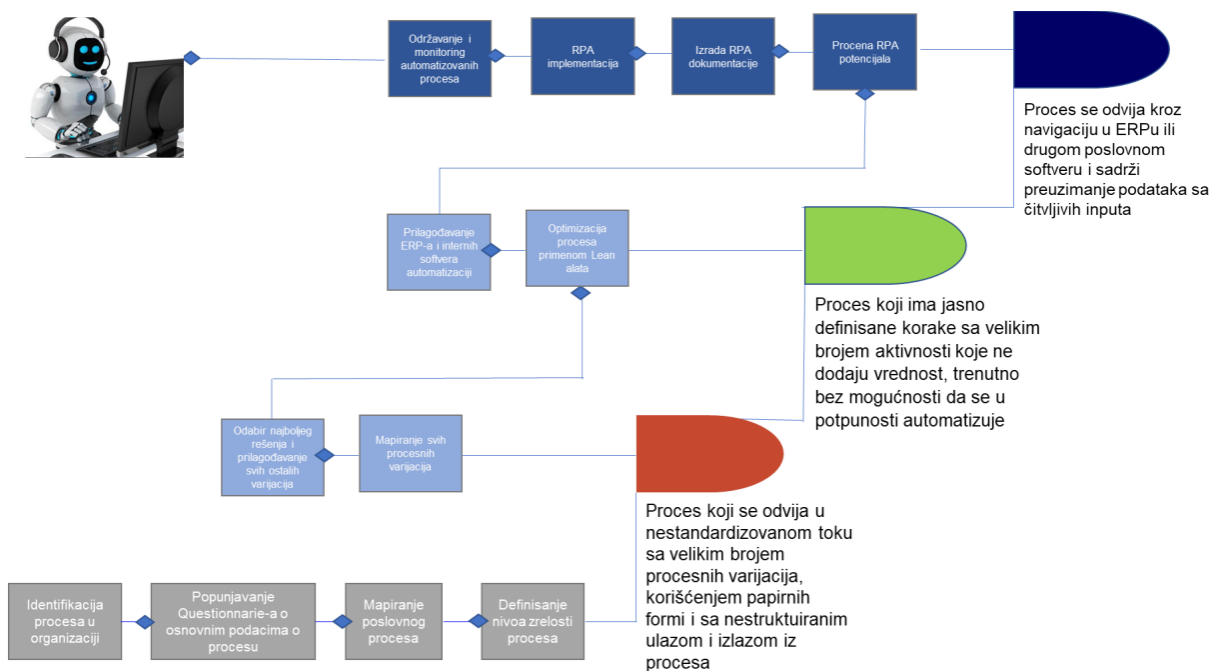
RAP osigurava da zadaci ne sadrže greške i da povećavaju efikasnost i pojednostavljuju poslovne procese. Primena RAP značajno skraćuje vreme obrade bilo kog zadatka. Takođe, kao što je prethodno pomenuto, RAP ne zamenjuje već postojeći sistemski softver. Zapravo se lako integriše sa sistemom i komunicira sa drugim sistemima radi izvođenja procesa automatizacije. Dakle, to je jeftina primena i koristan posao za kompaniju. Za razliku od čoveka, RPA može biti programiran da funkcioniše 24 sata dnevno, 7 dana u nedelji za razne zadatke i različite vremenske zone. Na slici 2 je prikazan RAP na primeru obrade fakture kao poslovnog procesa.



Slika 2. RPA na primeru obrade fakture kao poslovnog procesa (Guru99, 2020)

6 Operativni model za poboljšanje kvaliteta kroz optimizaciju i automatizaciju poslovnih procesa

Operativni model koji je prikazan na slici 3, rezultat je analize i istraživanja u oblasti procesnog menadžmenta, istraživanja u oblasti optimizacije poslovnih procesa i korišćenju različitih alata i metodologija, kao i istraživanjem u oblasti automatizacije poslovnih procesa sa fokusom na inovativnu tehnologiju Robotske procesne automatizacije. Kao prvi korak u operativnom modelu, potrebno je izvršiti identifikaciju procesa koji postoje u organizaciji. Jako je bitan nivo hijerarhije, odnosno jasna kategorizacija šta u određenoj kompaniji predstavlja proces, šta predstavlja sub-proces a šta predstavljaju pojedinačne aktivnosti.



Slika 3 Operativni model za poboljšanje kvaliteta kroz optimizaciju i automatizaciju poslovnih procesa

Prema Živković i Glogovac (2015) strukturu organizacionog sistema čini skup međusobno povezanih podsistema objedinjenih zajedničkom svrhom postojanja organizacionog sistema. Proces je

niz aktivnosti izvedenih za dizajniranje, proizvodnju ili isporuku robe ili usluge internom ili eksternom kupcu. Pojedinačni koraci koje treba preduzeti da bi se posao obavio (ili određeni zadaci koji se obavljaju) povezuju se kako bi se formirali procesi, a procesi se povezuju kako bi se stvorili tokovi vrednosti, način na koji isporučujete vrednost svojim kupcima. Proces ima tri primarne komponente: ulaze, aktivnosti i izlaze. Ulazi u proces mogu biti verbalni (telefonski pozivi i lični zahtevi), elektronski (porudžbine, izveštaji, preuzimanja, zahtevi e-poštom, itd.), fizički (npr. Izveštaji i obrasci u papirnoj kopiji, servisni delovi, oprema, uzorci za analizu itd.), ili ljudski (ljudi koji traže uslugu). Izlazi procesa su obično proizvod (roba, usluga ili informacija) koji zahteva kupac procesa. Dokumentovanje ulaznih podataka procesa, aktivnosti i rezultata služi u razne svrhe. Prvo, formalno i delimično definisanje zahteva i očekivanja kupaca je neophodno kako bi se osiguralo da su izlazni procesi pravilno dizajnirani i isporučeni. Drugo, po Martinu (2013), razumevanje i dokumentovanje ulaznih podataka i aktivnosti neophodno je da bi se identifikovale i eliminisale rasipne aktivnosti koje dodaju trošak, sporu isporuku, narušavaju kvalitet, stvaraju nepotreban rizik i frustriraju zaposlene, kupce i druge zainteresovane strane. Konačno, procesna dokumentacija je takođe neophodna za obuku radnika u procesu, merenje performansi procesa i služi kao temelj kontinuiranog poboljšanja. Na slici 4, prikazana je forma upitnika za jasnu identifikaciju procesa.

Vlasnik procesa	SME	Sektor	Odgovoran

AHT	Broj transakcija (mesečno)

Trenutni nivo automatizacije	
------------------------------	--

FTE	
-----	--

Slika 4 Forma upitnika za jasnu identifikaciju procesa

Kao što je već navedeno prvi korak same metodologije je definisanje liste procesa zajedno za rukovodiocima odeljenja. Nak.on definisanja svih procesa pristupa se popunjavanju upitnika koji bi trebao da bliže opiše identifikovane procese. Prvi deo pitanja odnosi se na osnovne procesne metrike i osnovne podatke o procesu kao što su: ko je vlasnik procesa i koliko zaposlenih izvršava konkretan proces? Tom prilikom koristi se pojam FTE odnosno (eng. Full Time Employee) koji je karakterističan termin u IT industriji i predstavlja broj zaposlenih izvršilaca na konkretnom procesu. U nastavku upitnika koristi se SIPOC koji predstavlja vrlo jednostavnu, ali moćnu metodu koja ne zahteva mnogo tehničke usavršenosti. SIPOC je skraćenica od dobavljači-ulazi-procesi-izlazi-kupci. Kao što preporučuju Lean principi (Plenkeaviz, 2010), jako je bitno uključiti sve zainteresovane strane u procesu i tretirati ih ih kao produžetak svog poslovanja. Izlaz iz SIPOC modeliranja može se vizuelizovati pomoću grafičkih modela. U skraćenoj verziji SIPOC-a koja se primenjuje u operativnom modelu potrebno je odgovoriti na sledeća pitanja koja bliže opisuju ulaz u proces:

- Šta predstavlja ulaz u proces?
- Ko je isporučilac ulaza u proces?
- Da li je ulaz u proces u čitljivom formatu?
- Da li je ulaz u proces standardizovan?
- Da li input dolazi u serijama?

U identifikaciji izlaza iz procesa potrebno je odgovoriti na sledeća pitanja:

- Šta je izlaz iz procesa?
- Ko je primalac izlaza?

Nakon jasne identifikacije ulaza i izlaza iz procesa potrebno je identifikovati sve aplikacije koje se koriste u samom procesu kao što je prikazano na slici 5.

Aplikacije koje se koriste u procesu	Tačan naziv	Verzija	Stabilnost aplikacije (koliko često je aplikacija nije u mogućnosti da se koristi)
Da li se koristi Citrix ili remote desktop?			
Koliko često se aplikacije menjaju u procesu?			
Da li postoji neki definisani period kada neka od aplikacija nije dostupna (održavanje i sl.)			
Aplikacija			
Period nedostupnosti			

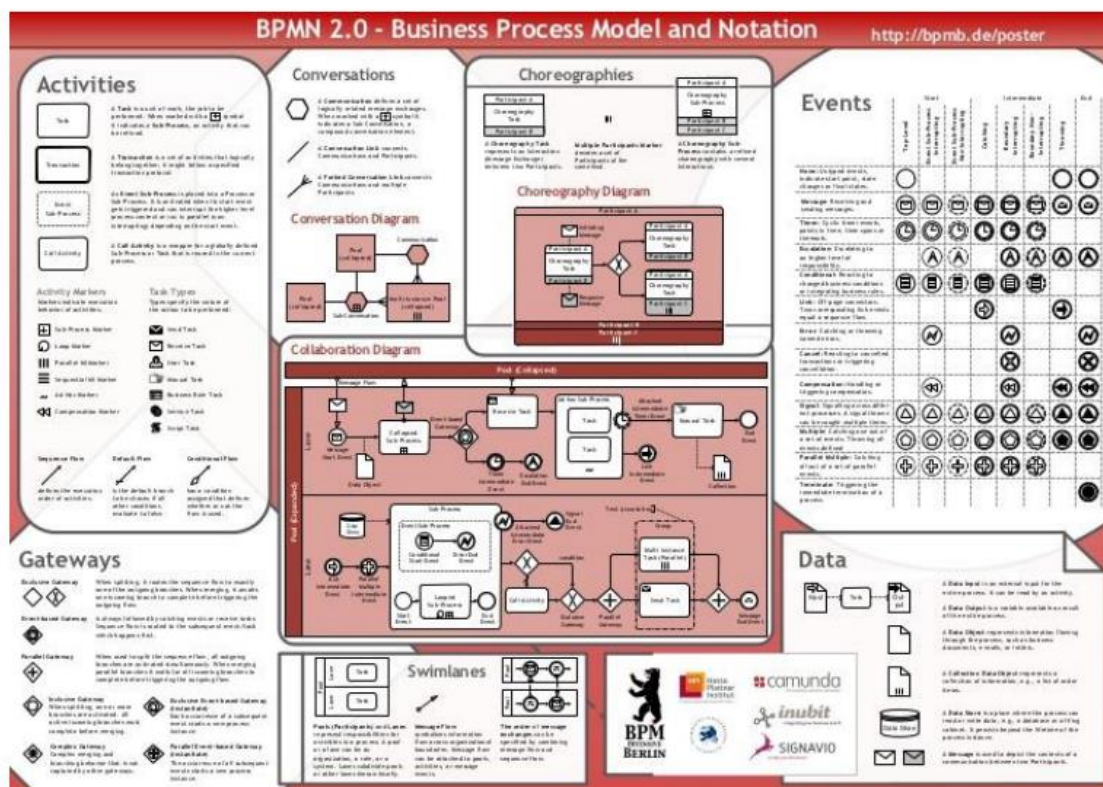
Slika 5 Identifikacija aplikacija koje se koriste u samom procesu

Nakon detaljnog upoznavanja sa procesom pristupa se detaljnom mapiranju procesa. Koncept mapiranja koristi se za opisivanje, u dijagramima toka i pratećem tekstu, svakog vitalnog koraka u poslovnim procesima. Kako Hunt (1996) navodi, mapiranje procesa je odličan alat za upravljanje procesima koji možete koristiti za bolje razumevanje vaših trenutnih procesa i za uklanjanje ili pojednostavljanje onih koji zahtevaju promene. Konger (2011) objašnjava da je osnovna tehnika koja se koristi u mapiranju procesa intervjuisanje vlasnika procesa i izvršilaca.

Po Kongeru (2011), dobijanje podrške i saradnje iz više funkcija zahteva pažljivo otkrivanje i učešće zainteresovanih strana. Veća je verovatnoća da će projekat za unapređenje procesa koji pruža dovoljnu inkluzivnost u celoj organizaciji biti uspešan od projekta koji nije previše inkluzivan. Kako se procesi identifikuju, treba identifikovati i vlasnika procesa. Vlasnik procesa je osoba odgovorna za proces kao donositelj ukupne odluke u slučaju spora vezanog za proces. Softveri koji se mogu

koristiti za mapiranje poslovnog procesa su: Microsoft Visio, Bizagi, draw.io, IBM Blueworks, LucidChart, ConceptDraw Diagram, Cacao, VisualParadigm Online itd (Aston, 2020).

Neophodno je poznavati sve potrebne artefakte u mapiranju poslovnog procesa, odnosno prilagoditi ga standardu BPMN 2.0 (eng. Business process modeling and Notation). BPMN je postao de facto standard za dijagrame poslovnih procesa. Namenjen je direktnoj upotrebi zainteresovanim stranimama koje dizajniraju, upravljaju i realizuju poslovne procese, istovremeno mapiranjem procesa prema BPMN-u omogućava se da se dijagrami prevode u komponente softverskog procesa. BPMN ima jednostavan zapis sličan dijagramu toka koji je nezavisan o bilo kom određenom okruženju implementacije (BPMN, 2020).



Slika 6 BPMN model (Slideshare, 2020)

Nakon detaljnog mapiranja procesa pristupa se određivanju nivoa zrelosti procesa koji utvrđuje dalje aktivnosti koje će voditi proces: Nakon početne identifikacije i analize, proces može da se kategoriše u jednu od sledeće 3 kategorije:

- crveni proces – proces koji se odvija u nestandardizovanom toku sa velikim brojem procesnih varijacija, korišćenjem papirnih formi i sa nestruktuiranim ulazom i izlazom iz procesa,
- zeleni proces - Standardizovan proces pogodan za optimizaciju – proces koji ima jasno definisane korake sa velikim brojem aktivnosti koje ne dodaju vrednost, trenutno bez mogućnosti da se u potpunosti automatizuje,
- plavi proces - proces pogodan za automatizaciju – Proces se odvija kroz navigaciju u ERPu ili drugom poslovnom softveru i sadrži preuzimanje podataka sa čitljivih inputa.

Takođe, aktivnosti u okviru procesa je moguće podeliti na:

- Aktivnosti koje dodaju vrednost kupcu
- Aktivnosti koje dodaju vrednost za poslovanje
- Aktivnosti koje ne dodaju vrednost

6.1 Koraci u automatizaciji procesa

Prvi korak u daljoj analizi jeste click-by-click mapiranje procesa gde se mapira svaka moguća aktivnost i detaljno mapira svaki klik koji postoji u samom procesu. Tom prilikom potrebno je kreirati jasnu mapu procesa koja sadrži sliku svakog procesnog koraka koji se odvija u procesu zajedno sa

vremenom koje je potrebno za obavljanje aktivnosti. Drugi korak je provera tehničke izvodljivosti implementacije kao i finansijska kalkulacija automatizacije procesa. Jasna finansijska kalkulacija predstavlja osnovu daljih koraka sa aspekta automatizacije procesa. Glavni faktori koji određuju troškove robotizacije su standardizacija i složenost procesa. Treći korak odnosi se na stabilnost. Postavlja se pitanja da li se proces ili uključeni sistemi često menjaju. Ako se menjaju biće potrebno veće održavanje i ponovni rad. Prilikom računanja opravdanosti RAP investicije koristi se termin ROI (eng. Return on Investments). Mnogo je aspekata koje treba uzeti u obzir prilikom proračuna ROI (povraćaja ulaganja) za projekat primene RAP. Da bi se utvrdio trošak robotske automatizacije procesa, uzimaju se u obzir softver, ljudi i elementi infrastrukture. Za potrebe kalkulatora uzima se u obzir samo ušteda radne snage, ostale RAP koristi koje proizilaze iz kvaliteta i brzine obrade nisu uključene (ether-solutions, internet izvor).

Parametri koje treba uzeti u obzir prilikom izračunavanja povratka investicije: Radno okruženje: • broj dana u godini, • vikendi u toku godine, • godišnji odmori u toku godine, • broj dana za edukaciju, • broj dana bolovanja u toku godine. Podaci o procesu: • broj zaposlenih na konkretnom procesu, • godišnja plata zaposlenih na procesu. A sve kako bi dobili parametar efektivnog radnog vremena operatera. Investicioni troškovi: • troškovi razvoja robota, • troškovi licence, • % iskorišćenosti robota. Četvrti korak je prikupljanje relevantne procesne dokumentacije i kreiranje detaljne procesne dokumentacije. Nakon prikupljanja detaljne dokumentacije pristupa se razvoju robota. Neki od najpoznatijih procesnih softvera koji se mogu koristiti za razvoj skripte u primeni operativnog modela su (Al, 2020): • UiPath, • BluePrism, • Glant, • Automation Anywhere, • Celaton inSTREAM i drugi. Zatim sledi šesti korak implementacije. Tokom ove faze robot koji je razvijen konvertuje se u proizvodne standarde, uključujući primenu obimnog rukovanja greškama, optimizaciju performansi, praćenje KPI-ja, parametrizaciju i druge detalje. U sedmom koraku vrši se interno testiranje. U fazi internog testiranja svrha je verifikacija tj. da robot efikasno izvodi postupak i da li je otporan na greške ili neočekivane situacije. Zatim u osmom koraku, proces prolazi kroz formalno testiranje prihvaćenosti korisnika. Ako prođe test slučajeve, proces se premešta u proizvodnju. Na kraju, poslednji korak je održavanje i monitoring robota i primopredaja u postprodukciju. Nakon što se proces pusti u proizvodnju, ovo predstavlja fazu kada se robot pažljivo nadgleda da li ima grešaka ili nedostataka. Takođe ova faza koristi se za dovršenje bilo koje tehničke dokumentacije i ažuriranje operativnog priručnika vezanog za proces.

7 Primena operativnog modela u kompaniji „XY“

Kompanija „XY“ koja se bavi trgovinom na veliko delova za mobilne telefone odlučila je da primeni kreirani operativni model kako bi pre svega definisala poslovne procese i upravljala svojim procesima i pokušala da ih optimizuje i ukoliko je to moguće automatizuje kako bi se time uticalo na poboljšavanje kvaliteta u organizaciji. Kompanija „XY“ zapošljava 135 ljudi koji su podeljeni u 4 osnovna sektora: Prodaja, Razvoj i grafički dizajn proizvoda, Nabavka i Logistika. Predominantan deo porudžbina kupaca se primi putem Interneta, dok se prodaja u manjoj meri realizuje telefonskim putem - radom „Call – center“-a, odnosno neposrednim kontaktom zaposlenih – u Showroom-u. Prodajom ključnim kupcima se u najvećoj meri upravlja ličnim kontaktom nadležnog komercijaliste (lična poseta, telefonski kontakt...). Na prodaju ostalim kupcima (što ne isključuje i ključne) se redovno utiče alatima digitalnog marketinga, npr. Viber porukama, elektronskom poštom (newsletter), bannerima i slider-ima na web-portal. Prodaja se redovno zajednički sagledava na nedeljnom nivou (nedeljni sastanak), gde se razmatra stepen ostvarenja plana kao i eventualni problemi i otežavajuće okolnosti u radu. Skoro u potpunosti, roba za dalju prodaju se nabavlja u Kini. Robu za dalju prodaju nabavljaju agenti nabavke kroz korespondenciju sa ino-dobavljačima. Ukupan broj dobavljača u Kini je preko 100, od kojih glavninu čine dobavljači futrola (30), slušalica i zvučnika (17), zaštite za ekran - folije i stakla (7), punjača (6), držača (7), baterija (7), kablova i adaptera (4). Posebno značajni su ino-dobavljači premijum brendova za mobilne uređaje (5), odnosno opreme za računare (1). Poslovni podaci o komitentima (za zakonito poslovanje neophodni, npr. zvanični naziv komitenta iz registra APR ili drugog odgovarajućeg državnog registra, adresa, PIB, MB...) se čuvaju u poslovnoj aplikaciji

Calculus, dok se dodatni, od posrednog interesa zaposlovanje, npr. ocena tržišnog potencijala, procena dubine uticaja konkurencije, detalji poslovnih dogovora kontrolisano čuvaju u zaštićenim bazama podataka ovlašćenih zaposlenih u odnosnim službama, a prema odluci menadžmenta. Kao prvi korak u primeni modela izvršena je identifikacija procesa koji se odvijaju u kompaniji u sektoru prodaje kao osnovnom sektoru koji generiše profit. Sektor prodaje u kompaniji podeljen je na 3 odeljenja: Showroom prodaja, Call centar prodaja i terenska komercijala. Kao „pilot“ proces kojim će se testirati i ispitati efikasnost kreiranog modela izabran je proces procesuiranja porudžbina i fakturisanja koji se obavlja u sektoru Prodaja u okviru odeljenja Call centar. Kako bi se proces jasno definisao popunjen je upitnik koji je definisan operativnim modelom.

Vlasnik procesa	SME	Sektor	Odgovoran
Fakturista	Koordinator za poslovni razvoj	Prodaja	Rukovodilac odeljenja CC i Showroom

AHT	Broj transakcija (mesečno)
15 minuta	10.000

Trenutni nivo automatizacije	Srednji
------------------------------	---------

FTE	14
-----	----

Slika 7 Forma upitnika za jasnu identifikaciju procesa – opis identifikovanih procesa na primeru kompanije „XY“

Nakon jasne identifikacije procesnih parametara pristupilo se mapiranju poslovnog procesa. Za mapiranje poslovnog procesa koristio se softver „Bizagi“ koji predstavlja jedan od najpriznatijih softvera za procesno mapiranje odnosno modeliranje poslovnih procesa. Ključni procesni indikator kojim se meri uspešnost poslovnog procesa jeste % uspešno procesuiranih porudžbina koji je pre primene operativnog modela iznosio 85%. Nakon detaljne identifikacije poslovnog procesa i kreiranja mape procesa, proces je kategorisan kao zeleni proces - Standardizovan proces pogodan za optimizaciju – proces koji ima jasno definisane korake sa velikim brojem aktivnosti koje ne dodaju vrednost, trenutno bez mogućnosti da se u potpunosti automatizuje. Prilikom detaljnog mapiranja identifikovani su određeni rizici u trenutnom načinu procesnog toka: • rizik od nenaplate usluge, • gubitak važnih informacija, • pogrešno fakturisanje, • povećanje troškova, • loše upravljanje resursima, • kašnjenje pošiljke. S obzirom da je proces kategorisan kao zeleni proces prema operativnom modelu bilo je potrebno izvršiti detaljan VSM (eng. Value Stream Mapping) na postojeću procesnu šemu. U nastavku na slici 8 je prikazana mapa poslovnog procesa sa primenom VSM-a.

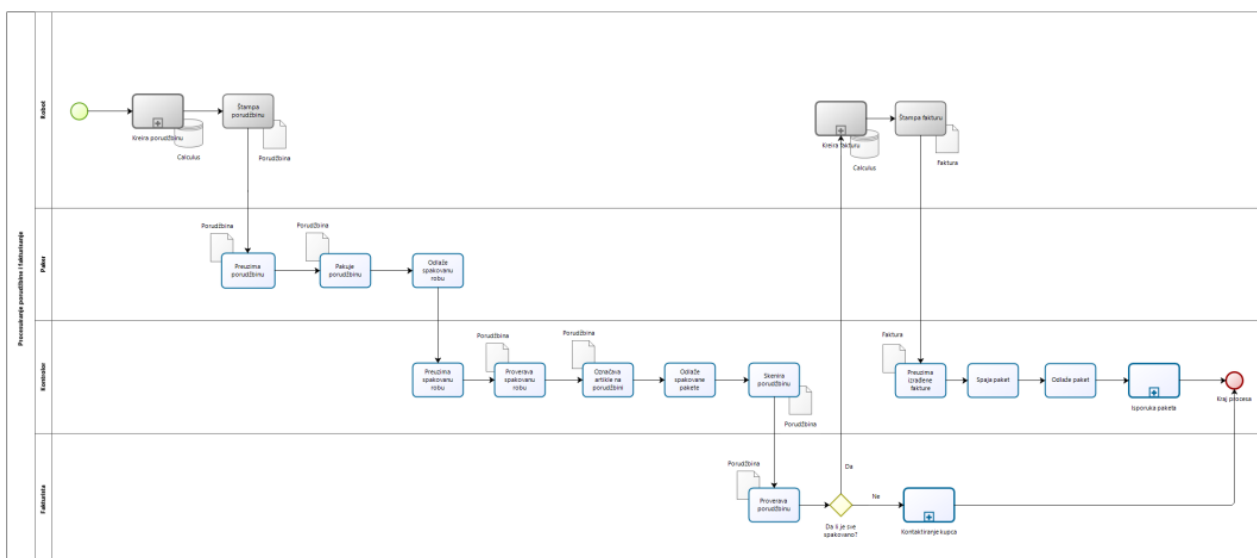
U definisanoj mapi procesa zelenom su označene aktivnosti koje dodaju vrednost za kupca, plavom su označene aktivnosti koje dodaju vrednost poslovanju dok su crvenom bojom označene aktivnosti koje ne dodaju nikakvu vrednost u trenutnom procesu i potrebno ih je eliminisati. Čak 50% aktivnosti u procesu označene su kao aktivnosti koje ne dodaju nikakvu vrednost što čini ovaj proces dosta neefikasnim i stvara mogućnosti za pojavu greške i znatno produžava trajanje procesa što

Optimizacijom procesa do koje se došlo primenom alata Lean-a (Gemba walk, VSM) stekli su se uslovi da proces pređe u sledeći nivo zrelosti gde je po operativnom modelu bilo potrebno proceniti potencijal procesa za automatizaciju i ukoliko je moguće automatizovati svi mogući delovi procesa kako bi se time uticalo na dodatno smanjenje vremena koje je potrebno za procesuiranje porudžbina i fakturisanje, a što bi dodatno dovelo do poboljšanja samog procesa kroz eliminaciju grešaka koje su posledica ljudskog faktora u procesu. Delovi procesa koji su označeni kao pogodni za automatizaciju bili su kreiranje porudžbine od strane radnika u delu Štampa i kreiranje fakture koje je izvršavano od strane Faktuirste.

Detaljnim click-by-click mapiranjem podprocesa utvrđeno je da su svi koraci u definisanim podprocesima u potpunosti pogodni za RPA automatizaciju jer predstavljaju navigaciju u kompanijskom poslovnim softveru Calculus12 i sačinjeni su od manuelnih i repetitivnih koraka koje je moguće replicirati RPA automatizacijom. Kao sledeći korak u operativnom modelu bilo je potrebno proveriti tehničku izvodljivost same automatizacije i inicijalno oceniti finansijsku kalkulaciju same automatizacije ovih delova procesa. Zbog velikog broja ponavljanja procesa u toku dana bilo je potrebno pripremiti dve virtualne mašine na kojima je bilo potrebno instalirati sledeće softvere: Na tim mašinama bili su potrebni sledeći softveri: • Windows 10, • .NET Framework 4.7, • Microsoft Office, • Notepad++, • PDF Reader, • Calculus12

Obezbeđeni su svi pristupi koji su bili potrebni čime je potvrđena tehnička izvodljivost same robotske automatizacije. Trenutni proces operativno se izvršavao od strane 3 operatera u odeljenju Štampe i 4 operatera koji rade na kreiranju faktura. Na osnovu procene kompleksnosti procesa procenjeno je da je za izvršavanje definisanih podprocesa bilo potrebno implementirati 2 robota odnosno omogućiti 2 robot licence. Procenjeno vreme razvoj robota je iznosilo 45h. U finansijskoj kalkulaciji procenjeno je da bi povrat investicije bio moguć za nepunih 4 meseca što bi u značilo da bi povrat investicije (ROI) za projektovani period od 3 godine iznosio 241.86%.

Sledeći korak prema operativnom modelu bilo je kreiranje detaljne dokumentacije koja će služiti programerima za razvoj robota. Kreirana je celokupna standardna operativna procedura kao priprema za razvoj robota, nakon čega je bilo moguće ući u razvoj samog robotskog rešenja. U velikom broju softvera za robotsku procesnu automatizaciju, menadžment kompanije „XY“ odlučio se za razvoj procesa u UiPath platformi. UiPath predstavlja kompaniju koja je jedan od lidera u oblasti robotske procesne automatizacije. Razvoj robota trajao je 2 nedelje, nakon čega su oba podprocesa ušla u fazu internog testiranja gde se validiralo da robot efikasno izvodi postupak. Prolazak kroz fazu internog testiranja omogućio je da proces uđe u fazu UAT-a koja je trajala dodatne dve nedelje u kome su roboti prošli kroz sve test slučajeve nakon čega su pušteni u produkciju. Novi proces procesuiranja porudžbina i fakturisanja je nakon primene alata za optimizaciju i robotskom automatizacijom podprocesa pogodnih za automatizaciju stekao sledeći oblik na slici 10.



Slika 10 Mapa poslovnog procesa Procesuiranje porudžbine i fakturisanje – Automatizovan proces

Detaljnijom primenom kreiranog operativnog modela na procesu Procesuiranja porudžbina i fakturisanja, menadžment kompanije „XY“ je eliminacijom nepotrebnih koraka u procesu primenom alata za optimizaciju i automatizacijom delova procesa čime se uticalo na smanjivanje mogućnosti za pojavu greške uticajem ljudskog faktora u delovima kreiranja porudžbine i faktura uspeo da % uspešno procesuiranih porudžbina podigne sa 85% na 98%. Pored znatnog povećanja % uspešno procesuiranih porudžbina smanjen je broj aktivnosti u procesu koji se izvršavaju od strane zaposlenih sa inicijalnih 37 aktivnosti na 14 aktivnosti što predstavlja smanjenje od 62%. Zaposlenima je preostalo da izvršavaju samo aktivnosti koje dodaju vrednost poslovanju kompanije poput pakovanja i isporuke same porudžbine. Broj zaposlenih je sa 14, koliko ih je bilo pre primene operativnog modela smanjen na 7, čime se postigla ušteda u resursima od 50% dok je vreme potrebno za procesuiranje porudžbine i fakturisanje sa početnih 15 minuta, optimizacijom procesa smanjeno na 8, dok se dodatnom automatizacijom procesa smanjilo na 6 minuta za jednu porudžbinu što predstavlja smanjenje od 60%. Nakon provere validnosti operativnog modela na procesu Procesuiranja porudžbina i fakturisanja i izuzetnih rezultata koji su postignuti projektom, menadžment kompanije „XY“ odlučio je da primeni operativni model na sve procese u kompaniji.

8 Zaključak

Istraživanjem domaće i strane literature u oblasti poboljšavanja kvaliteta, procesnog menadžmenta, optimizacije i automatizacije poslovnih procesa generisao se operativni model čijom se primenom u kompaniji „XY“ došlo do zaključaka kojim se usvajaju opšte hipoteze ovog rada. Primena definisanog operativnog modela znatno će uticati na poboljšavanje kvaliteta u organizaciji nezavisno na kom nivou zrelosti se procesi u organizaciji nalaze. Svaki korak u primeni operativnog modela dovodi do značajnog poboljšanja kvaliteta u organizaciji koji vodi ka tome da procesi budu u potpunosti automatizovani što će dovesti do:

- višeg nivoa kvaliteta procesa,
- usaglašenosti procesa sa propisima i standardima,
- povećane brzine izvršavanja procesa,
- fleksibilnijih procesa sa smanjenim troškovima,
- povećane efikasnosti digitalizacijom i proverom procesnih parametara,
- povećanog zadovoljstva zaposlenih i smanjenja fluktuacije u kompanije

Svakako, benefiti od primene modela mogu se podeliti u dve kategorije:

- opipljive koristi u smislu potencijalne uštede vremena / novca
- nematerijalne ili teže kvantifikovane koristi kao što su:
 - kvalitet - manje grešaka u procesu i pouzdanost,
 - povećano zadovoljstvo korisnika zbog manje grešaka i brzih procesa,
 - transparentnost - sposobnost analiziranja i sticanja uvida,
 - skalabilnost - lakše rukovanje u periodima povećanog rada dodeljivanjem više robota,
 - vreme za tržište - brzina robota smanjuje vreme izvršavanja što dovodi do bržeg izlaska na tržište

Procesi koji se nalaze na najnižem nivou zrelosti mogu se vremenom podići do potpuno automatizovanih procesa sa potpunim praćenjem procesnih parametara što predstavlja glavni efekat primene definisanog operativnog modela. Stalnom primenom operativnog modela utiče se na primenu Kaizen kulture u organizaciji odnosno dolazi se do malih inkrementalnih promena kroz stalnu primenu. Rezimirajući rezultate istraživanja i primene generisanog modela u praksi može se konstatovati da:

- upravljanje poslovnim procesima utiče na svest menadžmenta o nivou zrelosti procesa kroz mapiranje procesa i proveru procesnih parametara,
- optimizacija i automatizacija poslovnih procesa utiču na poboljšavanje kvaliteta u organizaciji,
- primena generisanog modela utiče na povećanje brzine poslovnih procesa, smanjenje varijacija i grešaka u procesu i smanjivanje troškova poslovanja.

9 References

- [1] *** AI (2020). Top 55 RPA Software Tools & Vendors 2020: Complete list. Preuzeto sa <https://research.aimultiple.com/rpa-tools/>. (Pristupljeno 28.08.2020.)
- [2] **Alukal, G., Manos A.** (2006). Lean Kaizen. A simplified Approach to Process Improvements. ASQ Quality press, Milwaukee
- [3] **Amanda, A.** (2020). The easy guide to process mapping. Preuzeto sa <https://creately.com/blog/diagrams/process-mapping-guide/>. (Pristupljeno 07.09.2020.)
- [4] **Asefeso A.** (2012). Lean Six Sigma (Cost Reduction Strategies). AA Global Sourcing Ltd
- [5] **Aston, B.** (2020). The best flowchart Software of 2020. Preuzeto sa <https://thedigitalprojectmanager.com/flowchart-software/>. (Pristupljeno 29.08.2020.)
- [6] *** Blockchainsimplified, (2019). How is RPA reforming business processes?. Preuzeto sa <https://blockchainsimplified.com/blog/how-is-rpa-robotic-process-automation-reforming-business-processes/>. (Pristupljeno 11.09.2020.)
- [7] **Boulton, C.** (2018). What is RPA? A revolution in business process automation. Preuzeto sa <https://www.cio.com/article/3236451/what-is-rpa-robotic-process-automation-explained.html> (Pristupljeno 04.09.2020.)
- [8] BPMN, (2020). Business Proces model and notation. Preuzeto sa <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/About-BPMN/>. (Pristupljeno 30.08.2020.)
- [9] **Filipović, J., & Đurić, M.** (2009). Osnove kvaliteta. Fakultet organizacionih nauka, Beograd
- [10] **George, M., Rowland, D., & Kastle, B.** (2004). What is Lean Six Sigma.
- [11] *** Guru99, (2020). Robotic Process Automation Tutorial. Preuzeto sa “<https://www.guru99.com/robotic-process-automation-tutorial.html>”. (Pristupljeno 11.09.2020.)
- [12] **Hunt, V.D.** (1996). Process Mapping: How to Reengineer Your Business Processes. John Wiley & Sons
- [13] *** IHI, (2022). Going Lean in Health Care. Preuzeto Sa <http://www.ihl.org/resources/Pages/IHIWhitePapers/GoingLeaninHealthCare.asp> x. (Pristupljeno 03.09.2022)
- [14] *** ISO, (2015). ISO 9000: 2015, Sistemi menadžmenta kvalitetom. Osnove i rečnik, I izdanje. Institut za standardizaciju Srbije
- [15] **Kato, I., & Smalley A.** (2011). Toyota Kaizen Methods. CRC Press, New York.
- [16] **Kotler, P., & Armstrong, G.** (2010). Principles of marketing. Pearson education
- [17] *** LucidChart (2020). Business process map template. Preuzeto sa <https://www.lucidchart.com/pages/templates/process-map/business-process-map-template>. (Pristupljeno 07.09.2020.)
- [18] **Martin, K., & Osterling M.** (2013). Metrics-Based Process Mapping: Identifying and Eliminating Waste in Office and Service processes. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton
- [19] *** Mericade, (2020). Business process management. Preuzeto sa <http://www.mericade.com/BusinessProcessManagement>. (Pristupljeno 08.09.2020.)
- [20] *** Microsoft, (2020). Kako mapiranje procesa pomaže uspeh vašeg poslovanja. Preuzeto sa sa <https://www.microsoft.com/sr-latn-rs/microsoft-365/business-insights-ideas/resources/succeed-with-process-mapping>. (Pristupljeno 08.09.2020.)
- [21] **Rakita, B.** (2005). Međunarodni marketing. Centar za izdavačku delatnost Ekonomskog fakulteta.
- [22] **Russo, A.** (2019). What is Business Proces Management. Preuzeto sa <https://www.outsystems.com/blog/posts/business-process-management/>. (Pristupljeno 08.09.2020.)
- [23] **Shook, J.** (2008). Managing to Lean. Lean Enterprise Intitute, Cambridge Center
- [24] *** Slideshare, (2020). BPMN 2.0 Poster. Preuzeto sa <https://www.slideshare.net/signavio/bpmn-20-poster>. (Pristupljeno 07.09.2020.)
- [25] **Socconini, L., Reato, C.** (2019). Lean and Six Sigma Management System. Marge Books
- [26] **Tisbury I.** (2013). Your 60 Minutes Lean Business – Kaizen Mindset.
- [27] **Živković, N. & Glogovac, M.** (2015). Upravljanje kvalitetom. Fakultet organizacionih nauka, Beograd

РАЗВОЈ МЕЂУНАРОДНИХ СТАНДАРДА ЗА САРАДЊУ ИЗМЕЂУ УНИВЕРЗИТЕТСКИХ И ПОСЛОВНИХ ОРГАНИЗАЦИЈА

DEVELOPMENT OF INTERNATIONAL STANDARDS FOR UNIVERSITY-BUSINESS COLLABORATION

Mladen ĐURIĆ*,

University of Belgrade, Faculty of organizational sciences, Belgrade

<https://doi.org/10.24094/ptk.023.371>

Сарадња између академског и пословног света одувек је била тема која је привлачила пажњу обе ове стране, али већ и само непостојање значајнијих међународних или глобалних стандарда, који би је на одговарајући начин уредили, сведочи о чињеници да њен потенцијал још увек остаје недовољно искоришћен. У Међународној организацији за стандардизацију (ISO), у оквиру једног од активнијих техничких комитета „ISO/TC 286 Collaborative business relationship management”, релативно недавно, у марту 2022. године, оформљена је посебна радна група, са циљем да се бави развојем првог, условно речено, глобалног стандарда, којим би се дефинисале смернице за сарадњу између организација које су у склопу универзитета и свих оних осталих, привредних и непривредних, које су ван самих универзитета. Република Србија, односно њени представници – у име Института за стандардизацију Србије, представља једну од првих држава учесница у овом процесу који, организационо и административно, предводе стручњаци из Кине и Велике Британије, делегирани од стране кинеских и британских националних тела за стандардизацију. Осим упознавања са самим током предметног процеса, у овом раду/предавању по позиву, биће представљене и основне карактеристике садржаја актуелне верзије, тј. тренутног нацрта стандарда „ISO 44006 Collaborative business relationship management — Guidelines for university-business collaboration”. Овај стандард би, према садашњим плановима, требало да буде објављен у току 2025. године и да служи као својеврсан скуп препорука, намењен универзитетским и пословним организацијама, као и свим другим интересним и заинтересованим странама, о томе како већ постојећих 12 принципа за менаџмент добрих пословних односа, могу да примене како би побољшавали своје капацитете за међусобну сарадњу.

Кључне речи: *стандард; сарадња између универзитетских и пословних организација; развој стандарда; ISO/TC 286/WG 4; ISO 44006*

Collaboration between academic and business organizations has always been a topic that attracted the attention of both sides, but the mere absence of significant international or global standards that would regulate this area implies that its potential still hasn't been sufficiently used. In the International Organization for Standardization (ISO), within one of the more active technical committees - ISO/TC 286 Collaborative business relationship management, relatively recently, in March 2022, a special working group was formed, with the aim to develop the first potentially global standard with the guidelines for cooperation between organizations that are part of the universities and all the others, commercial and non-commercial, that are external to the universities. The Republic of Serbia, i.e. its representatives - on behalf of the Institute for Standardization of Serbia, represents one of the first countries participating in this process, which is organizationally and administratively led by experts from China and the UK, delegated by the Chinese and British standardization bodies. This invited paper/lecture provides both overview of the current state and trends regarding university-business collaboration (UBC) standardization process, as well as the basic characteristics of the current, draft version of the document entitled "ISO 44006 Collaborative

* Corresponding author, e-mail: djuricm@fon.bg.ac.rs

business relationship management — Guidelines for university-business collaboration". According to the current plans, this standard should be published in 2025 and should serve as a guide for universities, businesses, and other stakeholders in using the already existing 12 principles of collaborative business relationships to improve their capability in university-business collaboration.

Key words: standards; university-business collaboration; standards development; ISO/TC 286/WG 4; ISO 44006

1 Увод

Када је реч о односима између универзитета, са свом својом пратећом инфраструктуром и организацијама, са једне стране, и компанија, предузећа, привредних друштава, целих грана, индустрија, и уопште, било којих организација које не припадају самом универзитету – може се поћи од констатације да је, услед природе ових односа, то одувек била и остаје тема која привлачи пажњу обеју страна.

Међутим, уз изузетно висок ниво капацитета за сарадњу између ове две стране, посматрани однос у себи има и „ушивену“ предодређеност за различите проблеме који могу настати на поменутој релацији, међу којима се, у последње време, све јасније уочава и непостојање значајнијих међународних или глобалних стандарда, који би је на одговарајући начин уредили. Овај рад је посвећен делимичном расветљавању актуелног стања ствари, закономерности и могућих будућих трендова на том пољу.

У њему ће, након расветљавања главних веза и односа између универзитета и привреде, нарочито из угла менаџмента квалитета, бити извршен преглед актуелних процеса развоја међународних (ISO) стандарда за сарадњу између универзитетских и пословних организација – припрема за овај процес и почетак рада, досадашњи ток процеса са неким од главних питања/недоумица, уз разматрање места и улоге експерата из разних земаља учесница и посматрача, укључујући и представнике Републике Србије.

Затим, биће извршен приказ досадашњих резултата рада на развоју будућег стандарда са смерницама за предметну сарадњу.

На самом крају, ова студија ће обухватити и пројекције даљег тока посматраног процеса, и његових могућих последица и ефеката.

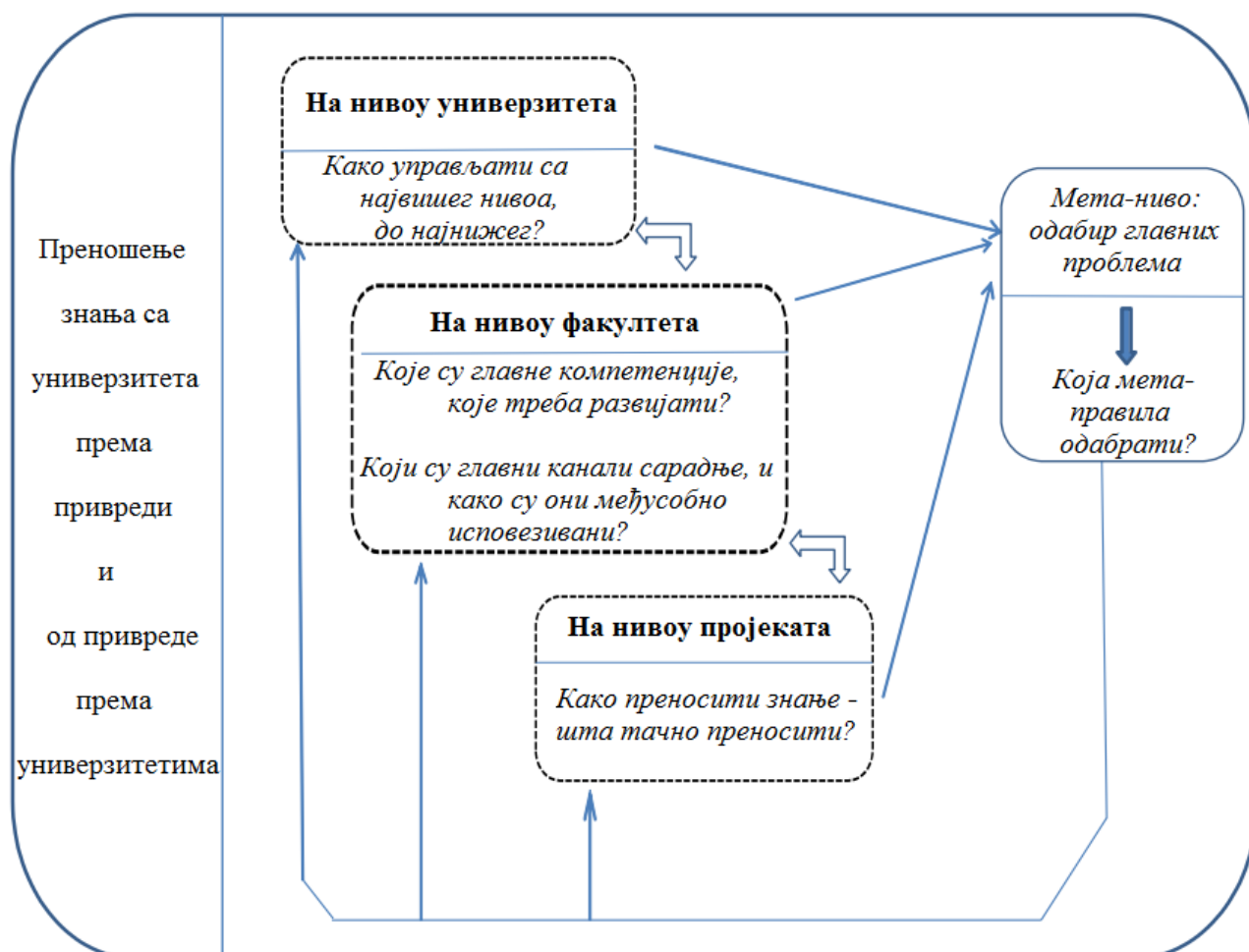
2 Преглед значајних фактора у односу између универзитетских и пословних организација, из угла менаџмента квалитета

Како Alexander et al. (2020) наводе, преношење знања на релацији између универзитета и компанија представља значајан извор креирања опште користи, добробити и благостања за све партнере – па ипак, бројне препреке, чак и на самим универзитетима, често ограничавају могућности реализације у пракси, онога што у теорији изгледа не само могуће, већ и веома једноставно остварљиво. Те препреке, на првом месту односе се управо на одсуство потребних механизма менаџмента квалитета – одговарајућих стандарда, протокола и процедура којима би била регулисана ова сарадња.

Наиме, према овим ауторима, понекада непостојање формалних правила и политика, на самим универзитетима, намењених системском утврђивању приоритета између интересних страна при доношењу одлука; а понекад непоштовање истих, када постоје – главни су фактори који утичу на ограничавање оперативне ефективности приликом овакве сарадње, спречавају међуорганизацијско стварање знања и ометају процесе организационог учења.

Анализирајући главне утицајне факторе на преношење знања између универзитета и привреде, међу којима препознају димензије контекста, организација и стејкхолдера, аутори изграђују модел приказан на слици 1.; који је у потпуности у складу са оним о чему говори и Siebert (2020), када наводи да су, међу мноштвом фактора, у овоме пресудна три, која се односе на:

1. обезбеђивање kvaliteta, tj. stvaranje међусобног поверења и кредибилитета, високог нивоа поузданости, па чак и осећаја заједничког сазревања у односу између партнерских организација са универзитета и из привреде;
2. утврђивање приоритета међу истраживачким и пословним интересовањима, као и оптималног нивоа легислативе и стандардизације, tj. нормативних правила регулације предметне сарадње;
3. развој комуникације и канала којима се међусобно и динамички повезују интересовања и очекивања обеју страна, реагујући на промене у окружењима.



Слика 1. Сарадња између универзитетских и привредних организација, из угла менаџмента знања (извор: Alexander et al., 2020)

Још један значајан, међу мноштвом разлога који сарадњу између универзитетских и пословних организација чини увек атрактивном темом за обе стране, односи се и на омогућавање стварања и примене иновација – не само у погледу нових производа и услуга (тј. у домену ужег, економског утицаја), већ и непосредног утицаја на шири друштвено-еколошки амбијент (Bürger & Fiates, 2021).

У том светлу, Djuric et al. (2019) предлажу развој модела индикатора којима би се овај утицај пратио и мерио, па чак и на појединачном нивоу – не само оних ређих, веома етаблираних научника, него и многобројних припадника научно-истраживачке заједнице; у свом истраживању, које се односило на примену развијеног модела, доказују да постоје значајне разлике у измереном учинку (тј. „перформансама“) на том плану, између научника и истраживача потврђеног српског порекла који живе и раде у Републици Србији и региону, у односу на оне у дијаспори, а битан фактор који производи предметну разлику јесу управо стандарди и процеси који се односе на менаџмент њиховог рада (Djuric et al, 2020).

Непостојање адекватних међународних, али и других значајнијих стандарда (као и модела, уопште), који би је на одговарајући начин уредили, сведочи о чињеници да капацитети још увек остају ни изблиза довољно искоришћени (Worasinchai et al, 2008). Стварање тзв. „мета-правила“ (као што се види на слици 1.), која почињу са нивоа наднационалног законодавства и стандардизације, преносе се на национално, регионално и локално, последично утиче на понашање актера током ове сарадање; на страни академског света, како на нивоима универзитета, тако и на нивоима факултета – са својим одсецима/департманима/катедрама, али и појединачних пројеката кроз које се ово садејство у пракси и остварује.

3 Процес развоја међународних (ISO) стандарда за сарадњу између универзитетских и пословних организација

3.1 Припрема процеса и почетак рада

У Међународној организацији за стандардизацију, надлежност за ове процесе додељена је једном од активнијих техничких комитета – „ISO/TC 286 Collaborative business relationship management”. Овај комитет постоји већ 10 година, укључује експерте из 31 државе (17 у статусу „учесника“, а 14 у статусу „посматрача“), и до сада је, кроз његов рад, развијено 6 међународних стандарда (ISO, 2023).

У табели 1. извршен је приказ држава из којих као представници долазе експерти који учествују у процесу, уз називе и акрониме самих институција, тј. националних тела за стандардизацију, које формално-правно заступају државе у овом процесу.

Табела 1. Државе-учеснице и посматрачи у процесима рада ISO/TC 286 (извор: ISO, 2023)

Учесници		Посматрачи	
Држава	Национално тело	Држава	Национално тело
Аустрија	<i>Austrian Standards International – Standardisation and Innovation (A.S.I.)</i>	Аргентина	<i>Argentine Standardization and Certification Institute (IRAM)</i>
Канада	<i>The Standards Council of Canada (SCC)</i>	Куба	<i>Cuban National Bureau of Standards (NC)</i>
Кина	<i>Standardization Administration of China (SAC)</i>	Чешка	<i>Czech Office for Standards, Metrology and Testing (UNMZ)</i>
Грчка	<i>National Quality Infrastructure System - Autonomous Operational Unit for Standardization (NQIS/ELOT)</i>	Естонија	<i>Estonian Centre for Standardisation and Accreditation (EVS)</i>
Индија	<i>Bureau of Indian Standards (BIS)</i>	Финска	<i>Finnish Standards Association (SFS)</i>
Италија	<i>Italian National Standards Body (UNI)</i>	Француска	<i>French Standardization Association (AFNOR)</i>
Јужна Кореја	<i>Korean Agency for Technology and Standards (KATS)</i>	Немачка	<i>German Institute for Standardization (DIN)</i>

<i>Учесници</i>		<i>Посматрачи</i>	
<i>Држава</i>	<i>Национално тело</i>	<i>Држава</i>	<i>Национално тело</i>
Пакистан	<i>Pakistan Standards and Quality Control Authority (PSQCA)</i>	Иран	<i>Iran National Standards Organization (INSO)</i>
Португал	<i>Portuguese Institute of Quality (IPQ)</i>	Јапан	<i>Japanese Industrial Standards Committee (JISC)</i>
Румунија	<i>Romanian Standards Association (ASRO)</i>	Кенија	<i>Kenya Bureau of Standards (KEBS)</i>
Русија	<i>Federal Agency on Technical Regulating and Metrology (GOST R)</i>	Холандија	<i>Royal Netherlands Standardization Institute (NEN)</i>
Саудијска Арабија	<i>Saudi Standards, Metrology and Quality Organization (SASO)</i>	Нови Зеланд	<i>New Zealand Standards Organisation (NZSO)</i>
Србија	<i>Institute for Standardization of Serbia (ISS)</i>	Шпанија	<i>Spanish Association for Standardization (UNE)</i>
Шведска	<i>Swedish Institute for Standards (SIS)</i>	Тајланд	<i>Thai Industrial Standards Institute (TISI)</i>
Уганда	<i>Uganda National Bureau of Standards (UNBS)</i>		
УК	<i>British Standards Institution (BSI)</i>		
САД	<i>American National Standards Institute (ANSI)</i>		

Управо у склопу овог техничког комитета, релативно недавно, у марту 2022. године, оформљена је посебна радна група, која носи ознаку „ISO/TC 286/WG 4“ (радна група 4, у склопу овог техничког комитета), са циљем да се бави развојем првог, условно речено, глобалног стандарда, којим би биле дефинисане смернице за сарадњу између организација које су у склопу универзитета и свих оних осталих, привредних и непривредних, које су ван самих универзитета (ISO/TC 286а, 2022).

Наиме, у оквирима „ISO/TC 286 – Collaborative business relationship management“ још током 2020. и 2021. разматран је нови предлог за почетак неке врсте рада на прилагођавању постојећих смерница о сарадњи између (било којих) пословних партнера, за потребе уређивања односа између универзитета и привреде. Дана 12. фебруара 2022. године, Међународна организација за стандардизацију (ISO) одобрава нови предмет рада, са пројектном ознаком „ISO/TS 44006“, да би 18. марта 2022. било коначно одобрено формирање поменуте радне групе, која тада започиње са радом на развоју првог међународног стандарда у области „University-Business Collaboration“ (Јао, 2021) – тј. сарадње између универзитетских и пословних организација.

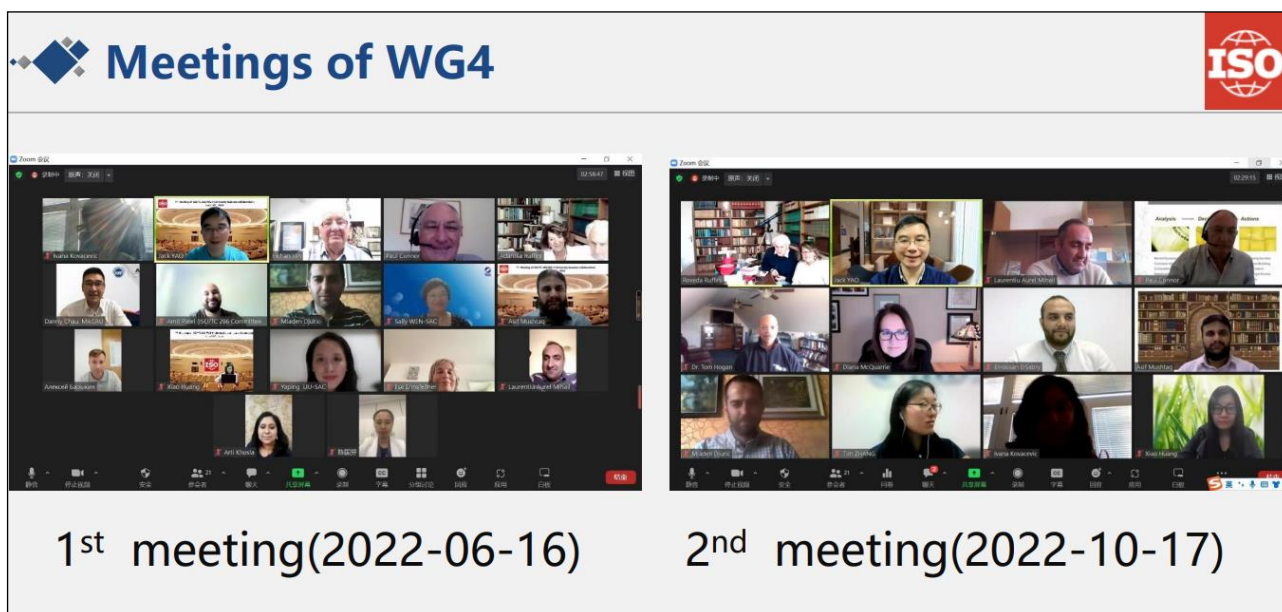
Република Србија, односно њени представници (међу којима и аутор овог рада) – у име Института за стандардизацију Србије, представља једну од првих држава учесница у овом процесу који, организационо и административно, предводе стручњаци из Кине и Велике Британије, делегирани од стране кинеског (SAC) и британског (BSI) националног тела за стандардизацију.

Британски институт за стандардизацију, још од оснивања техничког комитета „ISO/TC 286 – Collaborative business relationship management“ 2013. године има надлежност за његово вођење, па самим тим и „кровну“ одговорност у односу на овај процес – за који је, сам по себи, оперативна надлежност додељена Кини. Како кинески ауторитети из области стандардизације наводе (China Standardization Press, 2022), Кина већ дуго ради на побољшавању веза и односа између својих универзитета и компанија; управо на њену иницијативу је започет рад на активностима међународне стандардизације из ове области у ISO, уз подршку већине држава учесница, приказаних у табели 1.

3.2 Преглед досадашњег тока рада и неких од главних питања/недоумица

С обзиром на то да се, од почетка „пандемијског периода“ (грубо говорећи, од првог квартала 2020. године), у Међународној организацији за стандардизацију, као и у великом броју других организација, углавном прешло на тзв. „онлајн“ рад, то је умногоме олакшало ток овог процеса, пошто је он у великој мери географски дистрибуиран.

Међутим, чак и за такве услове онлајн рада, који су упростили могућности састајања без физичког присуства – у односу на остале групе у ISO, овај технички комитет, тј. ова радна група 4 у њему (ISO/TC 286/WG 4) – имала је и динамику и интензитет рада, на изузетно високом нивоу. До сада, одржана су чак три пленарна, онлајн заседања: у јуну, октобру и децембру 2022. године (кадрови са прва два приказани су на слици 2.), праћена константним оперативним активностима/радом на тзв. “ISO/IEC OSD” платформи.



Слика 2. Прва два онлајн заседања радне групе у ISO за развој стандарда намењених сарадњи између универзитетских и пословних организација (извор: ISO/TC 286а, 2022)

Међу бројним питањима, проблемима, дилемама и недоумицама, које су обележиле већ и сам почетак овог рада, нарочито се истичу оне везане за:

- **доношење иницијалне одлуке** – о томе да ли је, уопште, потребно развијати нови, засебни стандард (или, чак, више њих) на ову тему, или је довољно „покрити“ је у форми додатка неком од већ постојећих стандарда, који се односе на сарадњу између различитих страна у пословању;
- **одабир одговарајуће метафоре** – која би, на најбољи могући начин, осликала и описала поменути однос; у том светлу, у самом почетку су разматране четири формулације, које у оригиналу гласе: (1) „University-Business Collaboration“, (2) „University-Business Cooperation“, (3) „University-Industry Collaboration“ и (4) „University-Industry Cooperation“; као најподеснија, одабрана је наведена под (1);

- **адекватно дефинисање „University-Business Collaboration“** (превод на српски је додатно питање, у овом тренутку се користи иста формулација као у овом раду, од наслова па надаље) – које би требало да одрази и у први план стави управо главна поља ове сарадње (као што су заједнички програми, обуке, размена знања, могућност запошљавања дипломаца, студентске праксе итд.);
- **развој оптималног, холистичког модела** – сарадње између универзитетских и пословних организација; где, у самом старту, ни за један од понуђених модела није био наведен одговарајући извор, осим када је реч о општим принципима за сарадњу између различитих страна у пословању, које су наведене у једном од раније већ објављених стандарда, о чему ће тек бити речи.

Даље у раду, биће размотрени још неки од сличних елемената, на нивоу садржаја будућег стандарда, чији је развој тренутно у току, у склопу поменуте радне групе у ISO.

3.3 Кратак преглед садржаја прве радне верзије будућег стандарда ISO/TS 44006

Дакле, циљ у првој фази рада је развој првог стандарда са смерницама, које се односе на сарадњу ентитета у склопу универзитета, са онима ван њега. Овај документ, у својој тренутној, радној верзији, носи ознаку и назив "ISO/TS 44006 Collaborative business relationship management — Guidelines for university-business collaboration" (TS – заправо значи да је реч о техничкој спецификацији, енг. „technical specification“) и требало би, према садашњим плановима, да буде објављен у периоду 2024/2025. године, те да служи као својеврсан скуп препорука, намењен универзитетским и пословним организацијама, као и свим другим интересним и заинтересованим странама, о томе како већ постојећих, раније дефинисаних 12 принципа за менаџмент добрих пословних односа, могу да примене како би побољшавали своје капацитете за међусобну сарадњу.

Очекује се да, кроз процесе стандардизације сарадње универзитета и пословних организација, у значајној мери буде остварен допринос и испуњавању четири од 17 добро познатих, општих циљева одрживог развоја, што се односи на следеће: „квалитетно образовање“ – SDG 4, „достојанствен рад и економски раст“ – SDG 8, „индустрија, иновације и инфраструктура“ – SDG 9, и „партнерством до (остварења) циљева“ – SDG 17 (Yao, 2021).

Оно што је већ познато, с обзиром на то да овај стандард неће садржати захтеве (него смернице, тј. препоруке), јесте да он неће бити устројен према тзв. „Annex SL“ структури, као и да не би требало да буде сертификационог карактера. Садржај овог стандарда, судећи према његовим првим радним верзијама, требало би да буде следећи (ISO/TC 286b, 2022):

1. Предмет и подручје примене (у оригиналу, енг. „Scope“);
2. Нормативне референце („Normative references“);
3. Термини и дефиниције („Terms and definitions“);
4. Структура овог документа („Structure of this document“);
5. Примењивање принципа менаџмента односа између универзитетских и пословних организација („Implementation of the principles of university and business relationships management“);
 - 5.1 Менаџмент односа („Relationship management“);
 - 5.2 Визије и вредности („Visions and values“);
 - 5.3 Пословни циљеви („Business objectives“);
 - 5.4 Заједничко лидерство/лидерство у сарадњи („Collaborative leadership“);
 - 5.5 Управљање са највишег нивоа и процеси („Governance and processes“);
 - 5.6 Компетентности и понашање у сарадњи („Collaborative competence and behavior“);
 - 5.7 Поверење и посвећеност заједничким користима („Trust and commitment to mutual benefit“);
 - 5.8 Стварање вредности („Value creation“);
 - 5.9 Делење информација и знања („Information and knowledge sharing“);

- 5.10 Менаџмент ризика („Risk management“);
- 5.11 Оцењивање и оптимизација односа („Relationship assessment and optimization“)
- 5.12 Излазна стратегија/стратегија завршетка односа („Exit strategy“);
- 6. Прилог А – Врсте сарадње између универзитетских и пословних организација („Annex A – Types of university business collaboration“).

Да би се разумело како ће овај документ функционисати, као кључне су неопходне две ствари: прва – упознатост са већ постојећих, 12 општих принципа за сарадњу између различитих страна у пословању (односно, принципа за успешан менаџмента пословних односа приликом сарадње), који су дефинисани стандардом, тј. документом под називом и ознаком „ISO/TR 44000:2019 Principles for successful collaborative business relationship management“ (TR – заправо значи да је реч о техничком извештају, енг. „technical report“); друга – разумевање саме структуре и начина организације будућег стандарда.

Први фактор је утицао на структуру вероватно главног поглавља 5. где и по садржају видимо да су целине које га чине 5.1 – 5.12 управо ови принципи, с тим да се овде јављају уз тумачење значења у контексту односа између универзитетских и пословних организација, док је други описан у поглављу 4. где нам се појашњава како ће ово тумачење бити вршено. Наиме, за сваки од ових 12 принципа (у целинама 5.1 – 5.12), даје се тумачење путем одговора на три главна питања:

- **шта** представља сврху датог принципа;
- **зашто** је значајан за однос између универзитетских и пословних организација;
- **како** би требало да буде примењен.

Размотрићемо, у најкраћим цртама, како ово функционише на једном, одабраном примеру – 5.12 Излазна стратегија/стратегија завршетка односа („Exit strategy“).

- **Шта?** Излазна стратегија представља стратешки договор по питању завршетка односа за једну или више страна у оквиру сарадње између универзитетских и пословних организација (даље у овом примеру, биће коришћен акроним „UBC“). Излазна стратегија може да наступи након или, чак, пре завршетка заједничког UBC пројекта. Она може да буде различита, у зависности од природе и циљева универзитетских и пословних организација.
- **Зашто?** Излазна стратегија за UBC не би требало да се доживљава као нешто што је негативно. Заједничка стратегија изласка из UBC може да утиче на повећавање узајамног разумевања, смањивање неизвесности и повећавање ефикасности сарадње између универзитетских и пословних организација. Разумевање правила и разлога за завршетак односа може да утиче на повећавање транспарентности, уверености и поверења приликом учествовања у UBC односу, што може да доводи до активнијег учествовања свих страна у овој сарадњи.
- **Како?** (1) *Формулисањем излазне стратегије за UBC*, која би углавном требало да обухвата: информације, укључујући преношење знања и заштиту података; имовину, укључујући права на интелектуалну својину, дозволе, опрему, просторије; ресурсе, укључујући финансије, људство и технологију; интересне стране, укључујући њихову сигурност, безбедност, континуитет пословања; специфичне процесе и правила завршетка односа, као што су провере, пословни процеси, документи који се користе током сарадње. (2) *Покретањем излазне стратегије*, које се заснива на вредновању целокупног UBC односа, са аспеката учинака, ризика и пословних прилика. Ово треба да укључује краткорочне и дугорочне циљеве UBC односа, ресурсе, потенцијалне снаге, компетентности и континуитет, као и финансије, са финансијским ефектима UBC односа. У складу са резултатима оваквог вредновања, доносиоци одлука у универзитетским и пословним организацијама треба да одлучују да ли да изађу из односа или не, према претходно утврђеним процесима и правилима завршетка односа. Обе (или све) стране треба да обезбеђују да су сви аспекти договорене излазне стратегије остварени,

као и да се процес спроводи са узајамним поштовањем. (3) *Процењивањем излазне стратегије*, коју би требало да спроводе обе (или све) стране у посматраном UBC односу, и у вези са самим процесом, и у вези са његовим ефектима. На основу свеобухватног и темељног вредновања, треба процењивати могућност да се овај UBC однос и у будућности настави.

За крај овог дела, у табели 2. је дат сажети приказ садржаја прилога стандарду, у коме се за примену ових 12 принципа препоручују четири главне области сарадње између универзитетских и пословних организација, од којих свака може даље да се детаљно разврста.

Табела 2. *Области и врсте сарадње између универзитетских и пословних организација* (извор: ISO/TC 286b, 2022)

Област сарадње	Врста сарадње
Образовање	Заједничко пројектовање наставних програма (курукулума)
	Заједничка реализација наставних програма (нпр. гостујућа предавања)
	Мобилност студената (нпр. студентске праксе, прихватање студената)
	Програми дуалног образовања (нпр. делимично теоријски, делимично практични)
	Доживотно образовање за запослене (нпр. образовање за руководиоце, обуке компанијама и стручни курсеви)
Истраживања	Заједничко истраживање и развој (укључујући заједничке пројекте из фондова за истраживања)
	Консалтинг компанијама (укључујући уговорна истраживања)
	Мобилност запослених (нпр. повремена мобилност људи из академског света према пословним организацијама и обрнуто)
Валоризација	Добијање лиценци/патентирање
	Академско предузетништво (нпр. спин-оф компаније)
	Студентско предузетништво (нпр. старт-ап компаније)
Менаџмент	Управљање са највишег нивоа (нпр. учествовање људи из академског света у бордовима компанија и људи из компанија у универзитетским одборима)
	Заједнички ресурси (нпр. инфраструктура, особље, опрема)
	Пословна подршка (нпр. задужбинарство, спонзорства, стипендије)

4 Закључак

Међу најзначајнијим питањима, када је реч о сарадњи између универзитетских и пословних организација, посматраној из угла менаџмента квалитета и стандардизације, истиче се проблематика избора и/или развоја адекватног модела који се користи за ову комплексну сарадњу, тј. разумевање начина на које би она могла најбоље да функционише, на којим принципима да се заснива, које области и врсте сарадње да обухвата.

Развоју модела може да се приступи из различитих полазних тачака, а преглед литературе указује да то могу бити, примера ради, иновације и истраживачко-развојни пројекти (Neves et al, 2021; Baleeiro Passos et al. 2023), шири економско-политички контекст сарадње

(Nsanzumuhire & Groot, 2020) или место и улога малих и средњих предузећа у њој (Pereira & Franco, 2023).

Чини се да управо ова проблематика, у пару са проблемима у вези са постизањем консензуса у погледу дефинисања главних концепата, представља и главну препреку у просецу развоја посматраног стандарда, која можда и неће тако лако бити отклоњена (што се може нарочито испољити у самој примени).

То укључује и нека суштинска питања, на која током процеса развоја стандарда, иако су разматрана, нису дати јасни одговори – примера ради, како се дошло до примарне, прве радне дефиниције “University-Business Collaboration”, и који су извори за њу коришћени? То, такође, укључује и нека више формална питања – попут недоумица у вези са самом терминологијом, које је, чини се, лакше отклонити, барем код оригиналних термина, на енглеском језику.

Важно је истаћи, што се тиче актуелних информација и предвиђања у погледу даљег тока посматраног процеса стандардизације сарадње између универзитетских и пословних организација, да би ствари требало да иду у правцу развоја не само овог једног, већ и читаве серије стандарда, како то неретко и бива када је реч о ISO стандардима.

Овом у прилог иде одлука која је донета током прошлогодишњих заседања техничког комитета ISO/TC 286/WG 4, уз учешће представника Републике Србије (тј. Института за стандардизацију Србије), да се започне са новим, паралелним пројектом под називом и ознаком „ISO/PWI 44009 Collaborative business relationship management – University and business collaboration (UBC) – Vocabulary“. Ово се, дакле, односи на развој још једног стандарда, који би требало да пружи засебан речник појмова за област сарадње између универзитетских и пословних организација, што би требало да започне у току текуће, 2023. године (ISO/TC 286с.)

Још неки од потенцијалних будућих праваца, како је најављено током ових заседања, могли би да се односе на даље ширење ове серије стандарда, што би укључивало индикаторе за мерење учинка у области сарадње између универзитетских и пословних организација, процедуре за мерења у статистичке сврхе, као и најширег радног оквира за ову сарадњу, што је, по мишљењу аутора овог рада (који је уједно и члан ISO/TC 286/WG 4), могло бити решавано на самог почетку представљеног процеса.

5 Референце

- [1] **Alexander, A., Martin, D.P., Manolchev, C., Miller, K.** University–industry collaboration: using meta-rules to overcome barriers to knowledge transfer. *The Journal of Technology Transfer* 45, pp. 371–392 (2020).
- [2] **Baleeiro Passos, J., Valle Enrique, D., Costa Dutra, C., Schwengber ten Caten, C.** University industry collaboration process: a systematic review of literature. *International Journal of Innovation Science* 15(3), pp. 479-506. (2023)
- [3] **Bürger, R., Fiates, G.G.S.** Fundamental elements of university-industry interaction from a grounded theory approach. *Innovation & Management Review, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print*. <https://doi.org/10.1108/INMR-08-2021-0156> (2021)
- [4] **China Standardization Press.** *ISO/TS on university business collaboration to be developed – China Standardization* 2022-02-25. Preuzeto sa: <http://www.cspress.cn/News/98.html> (Pristupljeno: 29.05.2023.) (2022)
- [5] **Djuric, M., Filipovic, J., Komazec, S.** Reshaping the Future of Social Metrology: Utilizing Quality Indicators to Develop Complexity-Based Scientific Human and Social Capital Measurement Model. *Social Indicators Research*, 148(2), pp. 535-567 (2019)
- [6] **Djuric, M., Dobrota, M., Filipovic, J.** Complexity-based quality indicators for human and social capital in science and research: the case of Serbian Homeland versus Diaspora. *Scientometrics*, 124(1), pp. 303-328 (2020)
- [7] **ISO/TC 286a.** “Collaborative business relationship management” – Report from WG 4 (University-business collaboration). Document ISO/TC 286 – N 175 – Meeting/WG report. International Organization for Standardization (2022)

- [8] **ISO/TC 286b.** *ISO/TS 44006 WD1.0 with tracks after disposition on comments (2022-10-17). Document ISO/TC 286/WG 4 – N 23 – Meeting/ Working documents for discussion.* International Organization for Standardization (2022)
- [9] **ISO/TC 286c.** *Draft Report of the 3rd Web meeting of ISO/TC 286/WG4 (2022-12-16). Document ISO/TC 286/WG 4 – N 36 – Meeting/ Draft report.* International Organization for Standardization (2022)
- [10] **ISO.** *ISO/TC 286 – Collaborative business relationship management.* Preuzeto sa: <https://www.iso.org/committee/4935033.html> (Pristupljeno: 28.06.2023.) (2023)
- [11] **Neves, A. R., Costa, J., & Reis, J.** Using a Systematic Literature Review to Build a Framework for University-Industry Linkages using Open Innovation. *Procedia Computer Science*, 181, pp. 23–33. (2021)
- [12] **Nsanzumuhire, S. U., & Groot, W.** Context perspective on University-Industry Collaboration processes: A systematic review of literature. *Journal of Cleaner Production*, 258, pp. 120861. (2020)
- [13] **Pereira, R. & Franco, M.** University-firm cooperation: how do small and medium-sized enterprises become involved with the university? *European Business Review*, 35(4), pp. 534-564. (2023)
- [14] **Siebert, M.** *3 factors for a successful university-business collaboration.* Preuzeto sa: <https://www.elsevier.com/connect/3-factors-for-a-successful-university-business-collaboration> (Pristupljeno 12.05.2023.). (2020).
- [15] **Worasinchai, L., Ribière, V. M., Aurélie Bechina Arntzen, A.** Working knowledge, the university-industry linkage in Thailand: concepts and issues. *VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems* 38(4), pp. 507–524. (2008)
- [16] **Yao, J.** *Brief Introduction of ISO/TS 44006 Collaborative business relationship management — Guidelines for university business collaboration. Document ISO/TC 286 – Brief Intro.* International Organization for Standardization (2022)

TEORETSKI ASPEKTI I PRAKTIČNA ISKUSTVA KORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASA U POSTROJENJIMA ZA PROIZVODNJU ENERGIJE NA BALKANU

THEORETICAL ASPECTS AND PRACTICAL EXPERIENCE WITH LANDFILL GAS TO ENERGY SYSTEMS IN BALKANS

Georgios KONIARIS¹, Branislav TODOROVIĆ^{*2}, Vladislav STANKOVIĆ³

¹ Vioenergia S.A., Volos, Greece

² Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Serbia

³ 4ENG doxa, Belgrade, Serbia

Upotreba deponijskog gasa u energetskim sistemima je uobičajena u Evropi i svetu u okviru zemalja i oblasti gde postoje značajne količine čvrstog komunalnog otpada na deponijama, sa ciljem da se iskoristi njegova energetska vrednost. Prvi deo rada daje pregled teorijskih aspekata, uključujući koristi za životnu sredinu, uz analizu potencijala proizvodnje energije iz deponijskog gasa u Evropi. Sumirane su aktivnosti i planovi u Evropi vezani za pretvaranje deponijskog gasa u energiju, sa posebnim osvrtom na Balkan. Prikazani su dostupni konkretni podaci za sisteme koji rade u toj oblasti. U nastavku se razmatraju objavljene vrednosti i rezultati iskorišćenja deponijskog gasa Grčkoj i Srbiji. Naglasak je na takvom postrojenju koje funkcioniše u Volosu, Grčka, uz nekoliko korisnih zapažanja iz prakse. Iskustvo stečeno tokom godina neprekidnog rada je predstavljeno kao smernice za buduće projektovanje i eksploataciju sličnih sistema.

Ključne reči: *Pretvaranje deponijskog gasa u energiju, gradski čvrsti otpad, zaštita životne sredine*

Landfill gas to energy systems are common in Europe and the World in countries and areas that have significant amounts of municipal solid waste in landfills and try to utilise its energy value. The first part of the paper provides a review of theoretical aspects, including benefits for the environment, with analysis of energy production potential in Europe. Landfill gas to energy activities and plans in Europe are summarised, with the reflection on Balkans. Available specific data are presented for systems in operation in that area. Published figures and results of landfill gas to energy systems in Greece and Serbia are further discussed. Emphasize is given to such system in operation in Volos, with some useful observations from practice. Experience gained from years of constant operation is presented as guidelines for future design and exploitation of similar systems.

Key words: *Landfill gas to energy; municipal solid waste; environmental protection*

1 Introduction

1.1 Landfill gas (LFG) conversion to energy - concept and basics

Before the concept of LFG to energy, landfill gas that was generated through the slow decomposition of solid waste had been let to escape into the atmosphere, adding greatly to greenhouse gas emissions and local air pollution. Nowadays landfills cooperate with local governments and various stakeholders to develop landfill gas-to energy (LFGTE) projects that capture LFG gas and convert it to electricity and heat, thus utilizing otherwise harmful source of waste in a form of useful renewable (i.e. green) energy. It should be emphasized that every landfill has a specific waste composition, depending on the region for municipal solid waste (MSW) collection, thus varying the LFG production (which also changes over time).

* Corresponding author, e-mail: bt.emit.group@gmail.com

In the legislation of most countries there is a hierarchy of waste management, assuming the order of priorities in the practice of waste management. The hierarchy dictates that the options for waste treatment should be considered in the following order: prevention of waste generation, reducing waste at the source of its generation, reuse, recycling, waste treatment (physical and biological, or some form of conversion to obtain energy) and waste disposal at landfills as the least desirable option. The ultimate goal is to reduce the amount of deposited waste as much as possible, so disposal is used only if no other option is possible.

When the waste is deposited in a landfill, a long-term process of decomposition of biodegradable components begins with the help of bacteria that can be aerobic (survive only in the presence of oxygen) and anaerobic (they do not need oxygen to survive, some species even die out in oxygenic conditions). In the beginning, a certain amount of oxygen is present, which is consumed by aerobic bacteria for the decomposition of waste, whereby carbon dioxide is released to the greatest extent as a product of that process. After a certain time, conditions arise in which aerobic bacteria cannot survive, so they are replaced by anaerobic bacteria, which break down waste through metabolic processes without the presence of oxygen, during which methane is released. Average main components of LFG are 35% to 60% methane (CH₄) and 40% to 55% carbon dioxide (CO₂). The mutual relationship of these gases depends on the duration of aerobic conditions. In significantly smaller quantities, the following gases can be produced as a product of waste disintegration: nitrogen, oxygen, ammonia, sulfides, hydrogen, carbon monoxide and NMOC (non-methane organic compounds) such as trichloroethylene, benzene and vinyl chloride. In rare situations, the presence of some substances in the waste can cause their evaporation or reaction with other substances to produce some of the mentioned gases. Caution is required at any rate regarding the LFG content since there are possible serious issues, e.g. oxygen can make the mixture flammable and in some occasion explosive, hydrogen sulfide is very corrosive and lethal, etc.

The formation of mentioned gases cannot be prevented because existing landfills will not disappear. On the contrary, there will be more landfills (at least for a significant number of years more), and the only way to cancel the harmful impact of landfill gases is to extract or store them so that they are not emitted into the atmosphere, and then use them as a source of energy. Typical LFG energy recovery operations include the following types of system components:

- Heat exchangers
- Process chillers
- Engines
- Gas compressors
- Gas turbines
- Electrical generators
- Boilers

Landfill gas is most often used to generate electricity. In theory, turbines are used for large amounts of waste, while microturbines, fuel cells or internal combustion piston engines are used for smaller volumes of gas. Landfill gas is used in each of the mentioned devices as a fuel, the combustion of which releases heat. The heat energy is transferred to the fluid which under pressure moves the blades inside the device, thus obtaining mechanical energy which is then converted into electrical energy in the generator. A system of this type can be directly connected to the electrical grid, which supplies energy to several consumers, or it can be made for the needs of specific industrial users or household areas.

1.2 Benefits for the environment - overview

Carbon dioxide and methane are greenhouse gases which are also a product of natural processes, so their presence in a certain concentration is desirable and necessary because it enables the accumulation of heat in the atmosphere. The problem arises when, due to many anthropogenic activities including landfilling, there is a significant increase in the concentration of these gases, where an excessive amount of heat accumulates, resulting in a global temperature rise and melting of glaciers. Methane is app. 20 times more aggressive greenhouse gas than carbon dioxide and moreover it is very flammable. So it makes it easier the landfill to catch fire and such fires in land-

fills usually release toxic gasses and mainly dioxins. It should also be noted that in the circumstances of the increased concentration of carbon dioxide, this gas dissolves to a greater extent in the oceans, which acidifies them and thus directly threatens the flora and fauna in them. In addition, methane can be toxic in higher concentrations. For all the reasons mentioned above, landfills represent a major environmental problem.

LFG recovery contributes to climate mitigation by reducing GHG emissions in two ways:

- Methane collection and utilization
- Substitution of fossil fuels for energy production

Additionally, LFG purification can also capture some amount of NMOC components

Process industry and manufacturing utilize production methods that create goods by combining supplies, ingredients or raw materials using a specific technological process, formula or recipe. Process systems are commonly used in a number of industries that produce large quantities of goods, e.g. refineries, food and drinks, distilleries, chemical and pharmaceutical production and many others. In conjunction with plain mechanical operations involving cutting, drilling, grinding, bending, etc., process industry systems often handle a thermal or chemical conversion, involving heat, pressure and chemical reactions. Such processes require energy supply, which in some cases can be quite significant. Therefore, LFG conversion to energy systems are indirectly beneficial to process industry in general.

European Union members, United States, China and a number of other countries globally are putting a lot of efforts to enhance national resilience and security. Critical Infrastructure Protection (CIP) and Critical Infrastructure Resilience (CIR) play an important role in these activities due to wide ranging of issues and unknown threats to area of operation of CI and its influence to related human activity (e.g. energy, transportation, public health, water networks, cybersecurity, and many other interconnected segments). Several of those areas are directly connected to climate changes mitigation and environmental protection. Resilience offers the capability to better review how systems may continually adjust to changing information, relationships, goals, threats, and other factors in order to adapt in the face of change and uncertainty – particularly those potential changes that could yield negative outcomes. Improvements in the sector of energy and interrelated segments can be notably achieved with the broader use of LFG conversion to energy systems. [1]

2 Objectives

2.1 *Techno-economic aspects of systems for LFG utilization*

Most of the energy in LFG comes from methane, making it usable for energy production providing that the minimum concentration of methane is app. 35% (depending on utilization method). In addition to the production of electricity, gas from waste can be used in industry or households to run machines and produce thermal energy in boilers and furnaces.

Landfill gas can also be used in the trigenerative process, which is a system of connected devices in which, with the help of gas as the only fuel, three forms of energy are simultaneously obtained: electrical, thermal and cooling. Device combinations can be different, one of the possible options is to use a gas engine and a generator to produce electricity, and at the same time, the heat exchanger uses exhaust gases and water that cools the heated gas engine to obtain thermal energy. A cooling device is also connected to these two devices.

If industrial waste is stored in a landfill near a factory facility, landfill gas generated from waste from the factory itself can be used in processes within the facility itself as fuel - costs will be lower, and the air will be cleaner.

By additional purification, which reduces the share of carbon dioxide, nitrogen and hydrogen, and increases the share of methane up to 70%, biogas is obtained, which is a cost-effective fuel with high energy value. It has been established that 1 m³ of biogas contains the same amount of energy as 0.65 m³ of natural gas, whereby the burning of this fuel converts methane into carbon dioxide, which directly reduces the negative impact on the greenhouse effect, because methane has a more negative impact on the mentioned problem, so increasing the concentration of this gas is less desirable.

Planning and application of LFG conversion to energy systems requires meticulous preparation and careful planning in order to have a profitable plant. Yearly profit of such systems is directly influenced by operating costs. Although it directly depends on the selected technology and landfill layout, the following should be estimated [2]:

- Fixed operating costs, which are not influenced by the volume of LFG production, are directly dependent in a certain percentage on the selected electro-mechanical equipment (i.e. needs for regular maintenance, number of operational hours between services, etc.) and the size of initial network of wells and collecting pipes
- Variable operating costs, which are directly dependent on the LFG production volume and generated electricity, are in the same time directly influenced by the way of LFG quality control, handling of purification and operation of equipment in order to reduce possible malfunctions and incidents

2.2 Technical and non-technical elements of LFG plant design and operation

The successful use of technology is subject to numerous conditions linked to different goals, subject areas and methods in the respective fields (e.g. in power plant technology, automobile technology, refrigeration technology, computer technology or construction). [3] On the other hand, the success of technical companies and plants is related to the balance of technical and non-technical elements. E.g. excellent technical innovation might fail in the segment of user demands, social acceptance or high price. In case of LFG plants it is essential to have a firm agreement with competent authorities, responsible for waste collection and management, regarding mid and long term plans with specific landfill, as well as the understanding with stakeholders (in particular those in the vicinity of the plant) in order to utilize all by-products (e.g. heat or cooling energy). There is an undisputed need to utilize LFG as a source of renewable energy to mitigate the climate changes and cover various environmental issues. However, almost all landfills are different in various aspects and the combination of technical and non-technical elements of such power production also influence the work of a landfill operator and the functioning of the local community. This poses new challenges in detailed planning of LFG energy systems which needs addressing the economic, technical, social and environmental factors. [4]

In technical sense, energy from waste is obtained from those landfills whose conditions have been adapted so that the production of landfill gas is intensified. It is known that high temperature, humidity, the presence of oxygen, the newer organic waste and the greater amount of it have a favorable effect on the creation of carbon dioxide and methane, so it is desirable to ensure the mentioned conditions. Optimal conditions are calculated for each landfill according to the composition, amount of waste and climatic conditions on the ground, i.e. temperature and the required amount of moisture for maximum bacterial activity. The waste should be stored in a depression in the ground and covered with a thick layer of material to reduce the possibility of emitting gases into the atmosphere. LFG is collected from perforated pipes placed in vertical wells in the landfill body. The dimensions and the overall design of the well are also something that must be carefully calculated depending on the terrain on which the landfill is located and the amount of waste that will be disposed there.

Through the system of horizontal and vertical pipes that are placed inside the waste, gases that are the product of metabolic processes of bacteria are extracted by vacuum. After that, using a system of pipes above the surface, these gases are collected in some form of a gas collector. The gases are then taken to primary treatment, which includes several devices in which the landfill gas is purified from residual soil particles and moisture. Secondary treatment consists of a series of procedures that additionally remove moisture (if necessary), cool the gas, compress it and remove specific gases present in lower concentrations such as nitrogen, oxygen, ammonia, hydrogen, carbon monoxide, sulfides and some organic compounds. Which procedures will take place in this part of the process depends on the purpose and composition of the landfill gas. LFG prepared in such way is fed to the electric energy generation segment, as mentioned in the introduction.

3 Methods

3.1 Potential of energy production from LFG in Europe

“According to the EU’s waste hierarchy, landfilling is the least preferable option and should be limited to the necessary minimum. In 2018, 24% of all municipal waste generated in the EU was landfilled. This can have dangerous effects on human health and on the environment. The Landfill Directive sets out strict operational requirements for landfill sites with the objective to protect both human health and the environment. To support the EU’s transition to the circular economy, the Landfill Directive also:

- Introduces restrictions on landfilling of all waste that is suitable for recycling or other material or energy recovery from 2030
- Limits the share of municipal waste landfilled to 10% by 2035
- Introduces rules on calculating the attainment of municipal waste targets and requires EU countries to put in place an effective quality control and traceability system for municipal waste landfilled” [5]

However, there are still landfills in Europe, either in operation or closed, but with significant amounts of accumulated municipal solid waste. From those, many use LFG for energy production or have potential for its use in the future. A trend for energy production from LFG in EU is presented in the following figure. Generally the energy production from landfill gas in European Union is reduced because most of the EU countries try to reduce the amount of the municipal solid wastes which are going to landfills.

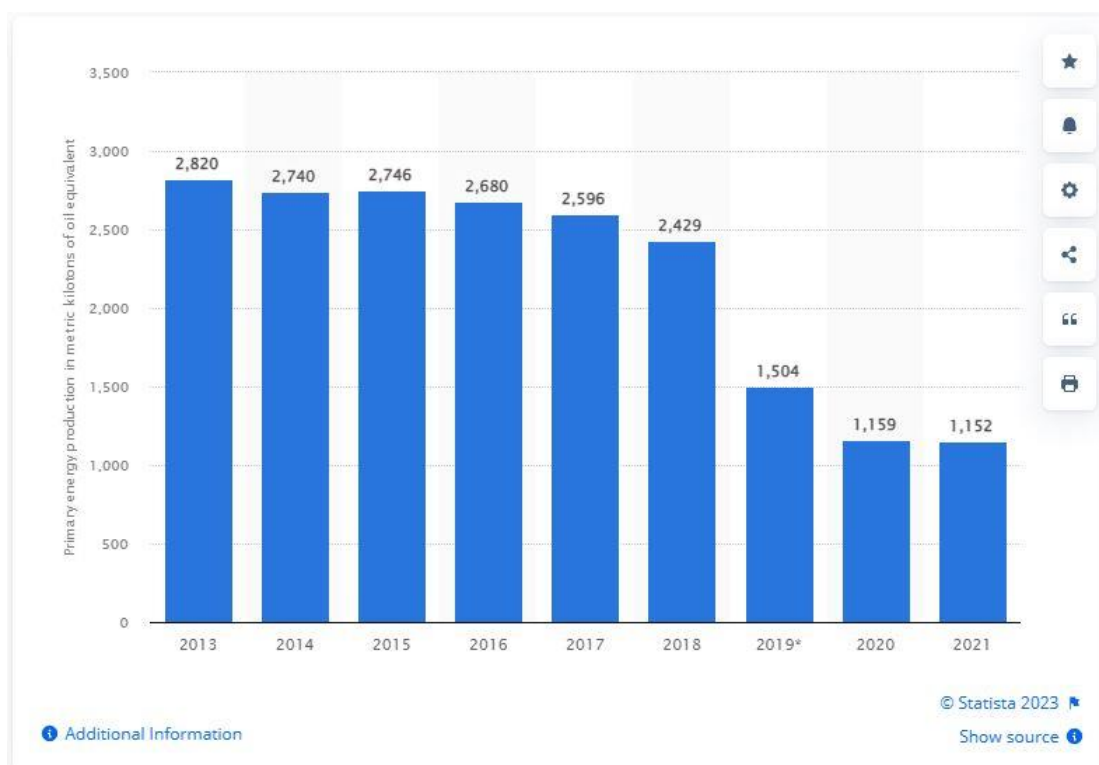


Figure 1: Primary energy production from landfill gas in the European Union (EU) from 2013 to 2021 (in metric kilotons of oil equivalent) [6]

3.2 Methods for estimation of extraction capacity and utilization of LFG

There are several software tools that can be used for estimation of generated LFG quantities at a specific landfill and the percentage of LFG that can be captured, extracted and used for energy production. Most popular tools are the Landfill Gas Emissions Model (LandGEM), Ukraine Landfill Gas Model (Ukraine_LFG_Model) and IPCC GHG Inventory Software (IPCC in short), developed as part of an IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme and its Technical Sup-

port Unit located at IGES in Hayama, Japan. They are in general based on the first order decay equations which utilise the correlation between generated LFG and the amount of placed MSW (volume or mass), taking also into consideration the composition of waste and the timeframe of its placement. Additional possibilities to improve results rely on introduction of additional parameters like climate characteristics at the specific location, way of organising and handling the landfill (e.g. cover), etc.

For example, LandGEM is an automated estimation tool with a Microsoft Excel interface that can be used to estimate emission rates for total landfill gas, methane, carbon dioxide, nonmethane organic compounds, and individual air pollutants from municipal solid waste landfills. The LandGEM model application is based on input data of landfill opening year, closure year (current or estimated in the future), design capacity, methane generation rate, potential methane generation capacity and waste acceptance rate. [7]

4 Results

4.1 *Published results from designed LFG plans*

CROATIA

A power plant generating electrical power from landfill gas is located at the Jakuševac Landfill and operated by ZGOS branch of the Zagreb Holding. From January until December 2019 the amount of electric energy produced and placed on the market was 19.091 MWh (the average energy consumption of around 6.360 households over a period of 12 months). The Gas facility has been expanded in 2019. by building a fourth generator- mE Jakuševac 2 (GP4) with a power of 1,2 MWeI.

Another plant was built in Viškov near Rijeka, which has been operating permanently since the end of January 2017. It has a capacity of 1.2 MW and can produce over 6,000 MWh of electricity per year.

GREECE

The largest is Ano Liosia Landfill Biogas Power Plant with 23.5MW: Sanitary Landfill 1 is equipped with 11 Deutz DEUTZ TBG 620 V16 engines (1.26MW declared capacity) and Sanitary Landfill 2 is equipped with 4 GE Power GE Jenbacher JGC 620 engines (2.74MW declared capacity). The power plant utilizes amounts of LFG of the order of 88 million cubic meters of biogas per year. The net production of electricity from the installation, which replaces production from conventional fuels, amounts to 150,000 MWh per year.

Another excellent example from Greece is Volos power plant, located at Magnisia landfill, with estimated waste capacity of 110.000 t/year. The total installed capacity of the LFG plant at Volos landfill is equal to 1,25 MW (2 lean-burn gas engines of 625 kWe each). The mean annual energy production is around 4.400 MWh. From an economic point of view, there is a financial gain by selling the generated electrical energy to the power grid, making the plant profitable after the 8th year of operation. The mean annual gross revenue of the plant from 2008 until 2020 is app. 500.000€.

4.2 *Volos plant - observations from practice*

A sanitary landfill produces LFG at least for ten to twenty years after the closure of the landfill, but the biggest amount of the LFG is produced during the first ten years. Gas wells in Magnisia sanitary landfill are app. 10 years old. Most of them are producing less than 5m³/h LFG, having app. 38% to 40% methane. On the other hand, ten new gas wells were constructed during last year with the production of LFG of more than 15m³/h and having app. 48% methane.

On average 3 persons are needed for the proper operation of the plant.

Automatic LFG-air mixing with feedback from the engine is very valuable for stable operation. In the beginning of the operation the plant did not have mixing unit suitable for LFG and the results were very poor.



Figure 2: Overview of the Ano Liosia Landfill Biogas Power Plant

Installed lean-burn gas engines operate properly with the concentration of methane of 45% or more in LFG, and the observed minimum is app. 42% of methane. Cylinders of the engine are checked annually and engines are regularly serviced app. every two years.

Installed gas engines are very robust, but can be influenced by LFG corrosion potential. Therefore the moisture removal in gas pretreatment and additional filtering is a must. Siloxanes, a component of LFG, forms hard deposits of silica on pistons, valves and valve seats. In Volos plant silica deposits are the biggest problem because the engines often need the overhaul every two years. Illustrative example is provided in Figure 3.



Figure 3: Example of damaged and replaced pistons due to impurities in LFG and silica deposits

4.3 Main guidelines for future design and exploitation

Good cover of landfill (impermeable to a high degree) is very important for a proper operation of LFG to energy systems, not only to reduce the loss of gas, but also to ensure the constant flow and reduce variations in LFG composition as much as possible.

LFG composition should be checked manually at wellheads, e.g. once per day, and the flow adjusted in accordance to the percentage of methane. This must take place whenever the weather conditions allow.

For very large landfills, or in cases with significant difference and fluctuations in methane content from different wells, it would be advisable to have a mixing tank at the end of the gas pipeline network before feeding the LFG to energy systems.

Though gas turbines seem as a better techno-economical solution for LFG power plants on large landfills, they are more sensitive than gas engines. For that reason, CHP or standard reciprocating gas engine-generator sets would be a more robust and reliable solution.

In order to achieve better flexibility in operation and system redundancy, it is advisable to install several smaller gas engines instead of one large engine despite bigger investment costs.

5 Conclusions

The technological progress we are witnessing in previous decades has resulted in a consumer society in which a large selection of products is available on a daily basis at an increasingly affordable price. Although people are constantly working to improve the quality of products, it seems as if the parallel financial goal is to reduce their lifespan and boost financial turnaround. The overall result is that the amount of waste per person is higher than ever before. Current tendency that combines elevated awareness regarding environment and climate is to reduce the total amount of municipal solid waste produced. Still, there are landfills where LFG could be efficiently used for energy production.

Presented results from existing LFG to energy systems in several locations in the region confirm that similar technology should be applied in more locations. Elements from operation of such system that exists in Volos provide some useful observations from practice that should be considered both for design of new facilities and for its future exploitation.

6 References

- [1] **Todorovic, B. et al.**, 'Chapter 22 - Contribution to Enhancement of Critical Infrastructure Resilience in Serbia, Resilience and Risk - Methods and Application in Environment, Cyber and Social Domains', in Linkov, I. and Palma-Oliveira, J.M. (eds.), *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Resilience-Based Approaches to Critical Infrastructure Safeguarding*, ISBN 978-94-024-1122-5 (HB), Azores, Portugal, 26–29 June 2016, pp. 531-551
- [2] **Genić S., Jaćimović B., Mitić S., Kolendić P.**, Economic analyzes for the needs of process engineering, *Serbian Union of Mechanical and Electrical Engineering (SMEITS)*, Belgrade, Serbia, 2014.
- [3] **Banse, G., Grunwald, A.**, Coherence and Diversity in the Engineering Sciences, *In Handbook of the Philosophy of Science, Philosophy of Technology and Engineering Sciences*, North-Holland, 2009, pp. 155-184. ISSN 18789846, ISBN 9780444516671
- [4] **Taskin, J., Sayedus, S.**, *Hybrid renewable energy sources power systems*, 2020, pp. 179-214. 2020 DOI: 10.1016/B978-0-12-821724-5.00010-6.
- [5] **European Commission (EC)**, Landfill waste. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/landfill-waste_en
- [6] **Fernandez, L.**, Energy, *Energy & Environment*, Statista, 2023. <https://www.statista.com/statistics/863329/landfill-gas-energy-production-in-the-european-union-eu/>
EPA, *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, USA, 2005.

OGLASNI DEO



УНИВЕРЗИТЕТ
У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ
ФАКУЛТЕТ

UNIVERZITET
U BEOGRADU
MAŠINSKI
FAKULTET

UNIVERSITY OF
BELGRADE
FACULTY OF
MECHANICAL ENGINEERING

<http://www.mas.bg.ac.rs>



АТС

01-312

**ЛАБОРАТОРИЈА
ЗА ИСПИТИВАЊЕ
ISO/IEC 17025**

**ЛАБОРАТОРИЈА ЗА
ПРОЦЕСНУ ТЕХНИКУ, ЕНЕРГЕТСКУ
ЕФИКАСНОСТ И
ЗАШТИТУ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**

Краљице Марије 16, 11000 Београд

Руководилац лабораторије:
проф. др Дејан Радић
Контакт телефон: 011-3370-366

Лабораторија за процесну технику, енергетску ефикасност и заштиту животне средине је акредитована лабораторија за испитивање која послује у оквиру Машинског факултета у Београду. Акредитована лабораторија је као независна организациона структура произашла из искуства стечених испитивањима који су чланови Катедре за процесну технику Машинског факултета у Београду обављали у оквиру научно-истраживачког рада и сарадње са привредним организацијама.

У оквиру Лабораторије за процесну технику, енергетску ефикасност и заштиту животне средине тренутно ради 13 запослених, специјализованих у области ма процесног инжењерства, енергетске ефикасности и заштите животне средине.

Обим акредитације обухвата:

- физичко-хемијска испитивања емисије прашкастих материја и гасовитих загађујућих материја у ваздух и
- термотехничка испитивања котловских постројења и размењивача топлоте у циљу доказивања њихових перформанси.

Лабораторије за процесну технику, енергетску ефикасност и заштиту животне средине редовно прати све измене законске регулативе и интензивно усвајања нових (EN, ISO...) стандарда у нашој земљи и у складу са тим води рачуна о правременом ажурирању обима акредитације и набавци одговарајуће мерне опреме која омогућава примену прикладних метода испитивања које задовољавају потребе корисника и органа управе.

Посебно треба истаћи да Лабораторија, за све акредитоване методе физичко-хемијских испитивања емисије загађујућих материја у ваздух, испуњава захтеве стандарда SRPS ISO/IEC 17025:2006 али и стандарда SRPS CEN/TS 15675 и да поседује овлашћење надлежног Министарства за ова мерења (Дозвола за мерење емисије из стационарних извора загађења број 353-01-00359/2015-17 од 16.03.2015.).

Детаљан обим акредитације Лабораторије за процесну технику, енергетску ефикасност и заштиту животне се може погледати на сајту Акредитационог тела Србије (<http://www.registar.ats.rs/>), под акредитационим бројем 01-312.

Pioneering for You

wilo

Wilo pumpe i pumpni sistemi za otpadnu vodu

Efikasno. Pouzdano. Kvalitetno.

Primena u industriji, komunalnim preduzećima, PPOV



Wilo pumpe i sistemi za otpadne vode i mehanizmi za mešanje sa uronjivim motorom. Savladavaju velike izazove i dugoročno obezbeđuju vrhunski kvalitet u tretmanu otpadnih voda.



Wilo-EMU FA:

- Pumpanje otpadne vode sa ili bez čvrstih materija
- Mogućnost suve i mokre ugradnje
- Veliki, slobodni sferni prolaz
- Visoka efikasnost i kvalitet zahvaljujući motorima IE3 generacije



Wilo-EMU TR:

- Energetski optimizovano mešanje i obrtanje aktivnog mulja
- Stvaranje brzine protoka u kanalima za kružnu cirkulaciju
- Visoka efikasnost i kvalitet zahvaljujući motorima IE3/IE4 generacije

***više informacija o proizvodima kompanije Wilo na www.wilo.rs**

Bosch industrijski kotlovi i postrojenja

Kompetencija i poverenje



Bosch Industriekessel je u svetskim razmerama renomirani proizvođač toplotnih i vrelovodnih kotlova, parnih kotlova, kotlovskih sistema i opreme za kotlarnice.

Počevši od našeg osnivanja 1865. godine, specijalizovani smo za industrijsku kotlogradnju, te našim klijentima možemo ponuditi sveobuhvatni specijalizovani Know-how. Merila našeg proizvodnog programa i naših servisnih usluga su snaga inovacija, svest o kvalitetu proizvoda i efikasnost.

Više od 100.000 isporučenih kotlovskih sistema u više od 140 zemalja, dokaz su visoke pouzdanosti naših industrijskih kotlova. Naša kotlovska postrojenja možete naći gotovo u svakoj grani industrije - između ostalog i u industriji pića, prehrambenoj industriji, industriji građevinskog materijala, hemijskoj industriji, tekstilnoj industriji i industriji papira i td. Globalne kompanije kao što su Coca Cola, BASF, Siemens, Ytong, Michelin, Heineken, Carlsberg, Nestle ili Esso, poklonile su poverenje našim inovativnim parnim i vrelovodnim kotlovskim postrojenjima.

 **Kazantrade**

Kazantrade Solution d.o.o.
Studentski trg 10/4
11000 Beograd
www.kazantrade.hu
Mail: dejan.dotlic@kazantrade.rs

<https://www.bosch-thermotechnology.com/global/en/commercial-industrial/home/>

 **BOSCH**
Tehnologija za život

Nova generacija Grundfos CR pumpi

REŠENJA KOJA POMERAJU GRANICE

Nova Grundfos CR pumpa pomera granice višestepenih pumpi.

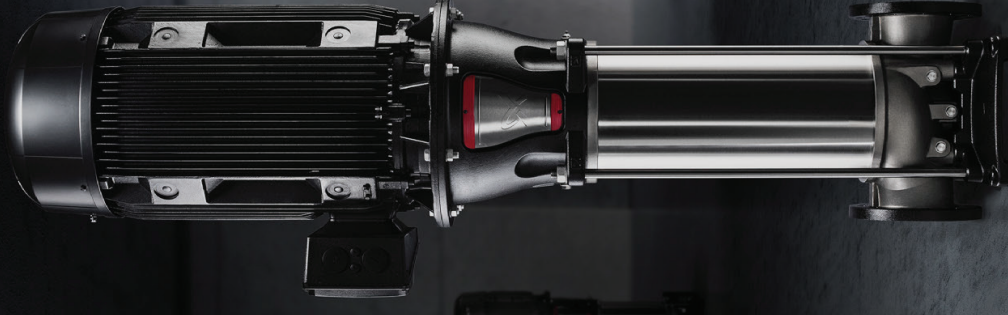
Grundfos CR pumpa ima maksimalno poboljšanu energetsku efikasnost, a maksimalni radni pritisak na standardnim pumpama je povećan na 40 bara. Sa svojim novim veličinama protoka do 320 m³/h, Grundfos CR otvara čitav novi svet mogućnosti za inline vertikalne višestepene pumpe.

Pogledajte više o Grundfos CR pumpama na www.grundfos.rs/cr

Grundfos Srbija d.o.o.
Omladinskih brigada 90v
11070 Novi Beograd
+381112258740

Possibility in every drop

GRUNDFOS





Made in Germany



MEMBRANSKA MERILA RF1

KOMERCIJALNA I INDUSTRIJSKA MERILA PROTOKA GASA

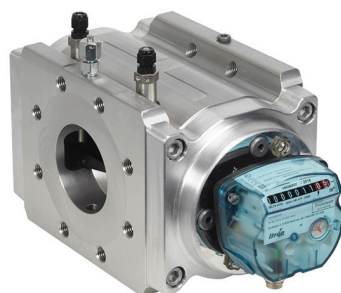


TURBINSKA MERILA FLUXI 200/TZ



1991 30 2021

godina sa vama

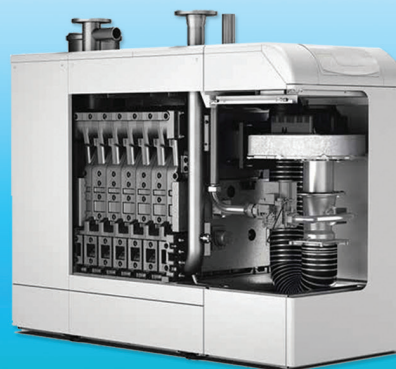


ROTACIONA MERILA DELTA SE

Made in Italy



GASNI KOTLOVI ZA DOMAĆINSTVA I INDUSTRIJU



CIM GAS d.o.o. Put Jovana Mikića 56 24000 Subotica

T: 024/621-000 E: office@cimgas.rs W: www.cimgas.rs



ElixirZorka

Dobro za zemlju



elixirgroup.rs



ElixirFondacija

Na dobrobit
zajednice



elixirgroup.rs