



Osnovano 1960.

voda I SANITARNA TEHNIKA

ČASOPIS UDRUŽENJA ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO • BEOGRAD

**SVETSKI DAN VODA
WORLD WATER DAY**

MART 22 MARCH



**WATER
AND SANITARY
TECHNOLOGY**

ASSOCIATION FOR WATER
TECHNOLOGY AND SANITARY
ENGINEERING - BELGRADE

godina XLVIII
januar-februar
broj 1

YU ISSN 0350 - 5049
UDK 628 + 624 + 626

**Za izdavača****Representative of the Publisher**

Boris Mičić, dipl. ing.

Predsednik Upravnog odbora Udruženja
Chairman, Association's Board of Directors**Glavni i odgovorni urednik:****Editor-in-chief**

Prof. dr Slobodan Petković, dipl. ing.

**Redakcioni odbor:****Editorial Board**

Prof. dr Marko Ivetić, dipl. ing.

Prof. dr Mile Klačnja, dipl. ing.

Prof. dr Božo Dalmacija, dipl. ing.

Vladimir Taušanović, dipl. ing.

Momčilo Bikicki, dipl. ing.,

Dragana Milovanović, dipl. ing.

Prof. dr Ljubinka Rajaković, dipl. ing.

Prof. dr Rada Petrović, dipl. ing.

Dr Predag Uskoković, dipl. ing.

Prim. dr Tanja Knežević

Dr Nebojša Veljković, dipl. ing.

**Urednici:****Editors**

Miodrag Milovanović, dipl. ing.

Branislav Kujundžić, dipl. ing.

**Saradnici iz inostranstva:****International Associates**

Dr Branislav Petruševski - Holandija

Ivica Budiša, dipl. ing. - Austrija

Nikola Milojević, dipl. ing. - Nemačka

Dr Uroš Kranjc, dipl. ing. - Slovenija

**Redaktor poslovnih informacija****Business Information Editor**

Tomislav Slavković, dipl. ing.

**Redakcija / Office****UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE I
SANITARNO INŽENJERSTVO**

11000 BEOGRAD, Terazije 23/II/203

Tel: 011/244-22-28 • Fax: 011/244-11-93

011/344 89 04

office@utvsi.com • www.utvsi.com

YU ISSN 0350-5049
UDK 628 + 624 + 626**voda****I SANITARNA TEHNIKA**ČASOPIS UDRUŽENJA ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO • BEOGRAD
MAGAZINE OF THE ASSOCIATION FOR WATER TECHNOLOGY AND SANITARY ENGINEERING • BELGRADE

broj 1/2018

SADRŽAJ

CONTENTS

PERSPEKTIVA PRIMENE EVROPSKE DIREKTIVE O PREČIŠĆAVANJU KOMUNALNIH
OTPADNIH VODA U SRBIJI
PERSPECTIVE ON IMPLEMENTATION OF THE EU URBAN WASTE WATER TREATMENT
DIRECTIVE IN SERBIA

- Nebojša VELJKOVIĆ, Zorana PETROVIĆ, Aleksandar ŠOTIĆ,
Violeta CIBULIĆ 5

ISPITIVANJE SORPCIONE KINETIKE HLOROVANIH FENOLA NA ALUVIJALNOM
NANOSU REKE DUNAV
INVESTIGATION OF CHLORINATED PHENOLS SORPTION KINETICS ON THE ALLUVIAL
SEDIMENT OF THE DANUBE RIVER

- Tamara APOSTOLOVIĆ, Jelena TRIČKOVIĆ, Marijana KRAGULJ
ISAKOVSKI, Aleksandra TUBIĆ, Božo DALMACIJA, Jasmina AGBABA 17

MIKROBNE GORIVNE ČELIJE: ODRŽIVA TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU ENERGIJE I
PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA
MICROBIAL FUEL CELL: SUSTAINABLE TECHNOLOGY FOR SIMULTANEOUS ENERGY PRODUCTION
AND WASTEWATER TREATMENT

- Miroslava M. VARNIČIĆ, Milica N. SENTIĆ, Mina Z. POPOVIĆ,
Jovana M. PERENDIJA, Milka M. VIDOVIĆ 27

ANALIZA I ASPEKTI PRIMENE BIOSORBENATA ZA UKLANJANJE JONA OLOVA IZ VODE
ANALYSIS AND ASPECTS OF THE APPLICATION OF BIOSORBENTS FOR REMOVING IONS
OF LEAD FROM WATER

- Ljiljana M. BABINCEV 39

HIDROGEOHEMJSKA ISTRAŽIVANJA U JUGOISTOČNOM BANATU NA TERITORIJI
REPUBLIKE SRBIJE
HYDROGEOCHEMICAL INVESTIGATION OF SOUTH-EASTERN BANAT, A PART
OF REPUBLIC OF SERBIA

- Saša ROGAN, Milica SENTIĆ, Milka VIDOVIĆ, Gordana TANASJEVIĆ,
Ivana CAREVIĆ 47

POSLOVNO-TEHNIČKE INFORMACIJE
TECHNICAL AND BUSINESS INFORMATION 55

OSAMNAESTA MEĐUNARODNA KONFERENCIJA

VODOVODNI I KANALIZACIONI SISTEMI, JAHORINA 2018 58



YU ISSN 0350-5049
UDK 628 + 624 + 626



IZDAVAČ

UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽINERSTVO

11000 BEOGRAD, Terazije 23/II/203

TEL: (+381 11)244 222 8; 344 89 04

FAX: (+381 11)244 11 93

E-mail: office@utvsi.com

Web: www.utvsi.com

PUBLISHER

ASSOCIATION FOR WATER TECHNOLOGY AND SANITARY ENGINEERING

11000 BEOGRAD, Terazije 23/II/203

TEL: (+381 11)244 222 8; 344 89 04

FAX: (+381 11)244 11 93

E-mail: office@utvsi.com

Web: www.utvsi.com

Radove slati na e-mail Udruzenja:
office@utvsi.com

*Please send your paper via e-mail to
office@utvsi.com*

Grafička priprema i korice

Design, cover page and page layout

Zoran Dimić, Beograd

Slika na koricama

Cover page image

<https://investorplace.com/wp-content/uploads/2017/03/world-water-day-6.jpg>

Štampa

Printed by

Planeta Print, Beograd

CIP - Каталогизacija у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

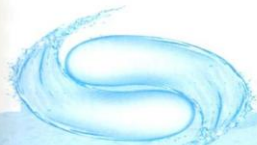
628

VODA i sanitarna tehnika : časopis
Udruženja za tehnologiju vode = Water and
sanitary technology : magazine of the
Association for water technology and sanitary
engineering / glavni urednik Slobodan
Petković. - God. 1, br. 1 (1971)- . -
Beograd : Udruženje za tehnologiju vode i
sanitarno inženjerstvo, 1971- (Beograd :
Planeta print). - 30 cm

Dvomesечно

ISSN 0350-5049 = Voda i sanitarna tehnika

YU ISSN 0350-5049
UDK 628 + 624 + 626



MIKROBNE GORIVNE ČELIJE: ODRŽIVA TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU ENERGIJE I PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

MICROBIAL FUEL CELL: SUSTAINABLE TECHNOLOGY FOR SIMULTANEOUS ENERGY PRODUCTION AND WASTEWATER TREATMENT

REZIME

Energija je osnovni pokretač ekonomskog rasta i od vitalnog je značaja za opstanak modernog društva. Budući ekonomski rast zavisi od dugoročne dostupnosti energije iz izvora koji su pristupačni i ekološki prihvatljivi. Mikrobne gorivne ćelije (MFC – microbial fuel cell) mogu predstavljati potpuno novi pristup u prečišćavanju otpadnih voda uz proizvodnju održive čiste energije. MFC je elektrohemijski uređaj koji koristi bakterije za proizvodnju električne energije iz biorazgradivih organskih supstrata. Bakterije dobijaju energiju potrebnu za metabolizam prenosom elektrona sa donora elektrona, kao što su glukoza ili acetat, do akceptora elektrona, kao što je kiseonik. Prednosti korišćenja mikrobne gorivne ćelije u prečišćavanju otpadnih voda su sledeće: čist postupak, bezbedan i bez buke, niske emisije i visoka efikasnost uz direktnu proizvodnju energije. Predmet ovog rada je detaljni pristup u pregledu mikrobnih gorivnih ćelija, principa rada, vrste mikroorganizama kao i njihova potencijalna primena.

Ključne reči: mikrobne gorivne ćelije, proizvodnja energije, prečišćavanje otpadnih voda, životna sredina

ABSTRACT

Energy is the main driver of economic growth and it is of vital significance for the modern society survival. Future economic growth is dependent of the long-term availability of energy from the sustainable and ecologically accepted sources. Microbial fuel cell (MFC) is a new approach to the wastewater treatment with the simultaneous energy production. MFC is an electrochemical device that uses bacteria to generate electricity from biodegradation of organic substrates. Bacteria obtain the energy required for metabolism by electron transfer from an electron donor, such as glucose or acetate, to an electron acceptor, such as oxygen. The application of a microbial fuel cell for the treatment of wastewater has many advantages: the process is clean, safe, noise-free, the emissions are low, and the efficiency is high with direct energy production. The subject of this review paper is a detailed development of microbial fuel cells, working principle, types of used microorganisms, as well as potential application.

Key words: microbial fuel cell, sustainable energy production, wastewater treatment, environment

UVOD

Biogorivna ćelija (BFC) predstavlja značajnu tehnologiju u proizvodnji električne energije koristeći organske materije. Kao biokatalizator za elektrohemijsku reakciju mogu poslužiti mikroorganizmi ili redoks enzimi izolovani za tu svrhu, te imamo dve vrste biogorivnih ćelija: mikrobne (MFC) i enzimске gorivne ćelije (EFC) [1]. Detaljna proučavanja ovakvih sistema su dovela do otkrića mikroorganizama koji obezbeđuju energiju za svoj razvoj, oksidujući organska jedinjenja do ugljen-dioksida uz direktan prenos elektrona do površine elektrode. Mikrobne gorivne ćelije koje koriste elektrohemijski aktivne vrste mikroorganizama ne zahtevaju prisustvo posrednika tj. medijatora. Uloga posrednika je prenos elektrona od ćelije mikroorganizama do površine elektrode. Ovakve

INTRODUCTION

Biofuel Cell (BFC) is a significant technology for energy production using organic matter. Microorganisms or redox enzymes isolated for this purpose can be used as biocatalysts for electrochemical reactions occurring in the fuel cell. There are two types of biofuel cells based on the biocatalyst used: microbial (MFC) and enzymatic fuel cell (EFC) [1]. Detailed studies of such systems have led to the discovery of microorganisms that obtain energy for their growth oxidizing organic compounds to carbon dioxide with a direct transfer of the electrons to the electrode surface. Microbial fuel cells that employ electrochemically active species of microorganisms do not require the presence of mediators. The role of mediators is to transfer the electrons from the microorganism to the electrode surface. These fuel cells based on direct

Dr Miroslava M. Varničić¹, Dr Milica N. Sentić¹, Dr Mina Z. Popović¹, Jovana M. Perendija¹, Dr Milka M. Vidović¹

¹ Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Centar za ekologiju i tehnnoekonomiku, Njegoševa 12, 11001 Beograd, Srbija

¹ University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, Center of Ecology and Technoeconomics, Njegoševa 12, 11001 Belgrade, Serbia



gorivne ćelije koje koriste direktan prenos, su mnogo efikasnije i imaju veću komercijalnu upotrebu od onih koje zahtevaju prisustvo posrednika. Direktna upotreba ovih sistema je jos uvek u fazi ispitivanja [2].

Ovakvi mikrobn sistemi imaju prvenstveno značaj za proizvodnju električne energije na održiv način. Razne otpadne vode mogu poslužiti kao supstrat za mikroorganizme. Ovakve vode sadrže organska jedinjenja neophodna za rast i razvoj mikroorganizama. Najveći značaj primene mikrobne gorivne ćelije je u tome što može istovremeno vršiti i prečišćavanje otpadnih voda i dobijanje električne energije. Na taj način rešavaju se dva ekološki prihvatljiva problema [1-3].

Cilj ovog rada je detaljno prikazivanje i objašnjenje ove značajne tehnologije, njen princip rada kao i potencijalna primena, sa osvrtom na vrste mikroorganizama i mehanizme produkcije elektrona u gorivnoj ćeliji. Akcenat je stavljen na obnovljive otpadne biomase dobijene uglavnom iz otpadnih voda.

MIKROBNE GORIVNE ĆELIJE

Otkriće da se bakterije mogu koristiti za proizvodnju električne energije iz obnovljive otpadne biomase izazvalo je veliku pažnju jos od 1950tih [1]. U poslednjoj deceniji je povećan interes za tehnologije mikrobne gorive ćelije (MFC), čime je istaknuto mesto zauzeo *Geobacter sulfurreducens* KN400, bakterijski soj sposoban za proizvodnju struje kao jedan od 50 najvažnijih pronalazaka u 2009 godini (Time Magazine). Prvi praktični uređaji koji koriste energiju iz MFC tehnologije pojavili su se 2008 [4]. Meteorološke bove sposobne za merenje temperature vazduha, pritiska, relativne vlage, temperature vode i za prenos podataka u realnom vremenu putem radiofrekvencijske telemetrije isključivo se snabdevaju energijom iz mikrobne gorivne ćelije. Ove mikrobne gorivne ćelije generišu struju putem mikrobiološke oksidacije organskih materija iz podloge u morskim sedimentima sparenim tako da redukuju kiseonik iz gornjeg sloja vodene kolone. Elektroni se generišu iz metabolizma prirodno prisutnih mikroorganizama u morskim sedimentima, pri čemu ove sedimentne mikrobne gorivne ćelije ne zahtevaju egzogene (dodate) mikroorganizme.

Mikroorganizmi u MFC koriste svu potrebnu energiju i ugljenik za ćeljski rast iz oksidacije složenih organskih materijala pa se kao takva MFC tehnologija smatra samoodrživa. Sve dok su uslovi pogodni za proizvodnju struje, pomoću mikroorganizama povezanih sa anodom, MFC ima potencijal za proizvodnju električne energije na neodređeno vreme [5].

Ograničavajući faktor za opštu primenu mikrobnih gorivnih ćelija je visoka cena materijala, kao što

electron transfer are more efficient and have more commercial potential use than those that require the presence of an mediator. The commercial application of these devices is still in the testing phase [2].

The importance of such microbial systems is primarily for the electrical energy production on a sustainable manner. Various wastewaters can be used as a substrate for the microorganisms in the fuel cell. Such waters contain organic compounds necessary for the growth and development of microorganisms. At the end, the greatest importance of the microbial fuel cell is simultaneously application: for the wastewater treatment and electrical energy generation. In this way, two main ecological problems are solved [1-3].

The aim of this paper is detailed review of this important technology. Working principles, its potential application, as well as different types of the microorganisms and the mechanisms of electron transfer in the microbial fuel cell will be presented. The focus was on renewable waste biomass obtained mainly from wastewater.

MICROBIAL FUEL CELL

The discovery that bacteria can be used to produce electricity from renewable biomass has been attracting a lot of attention since the 1950s [1]. In the last decade, interest in the microbial fuel cell technology (MFC) has increased, where *Geobacter sulfurreducens* KN400, bacteria capable of producing electricity, is reported as one of the 50 most important inventions in 2009 (Time Magazine). The first practical devices that use energy from MFC technology have been announced in 2008 [4]. Meteorological buoy capable of measuring the air temperature, pressure, relative humidity, water temperatures and real-time data transmission via radio frequency telemetry are exclusively supplied by energy from the microbial fuel cell. These microbial fuel cells generate electricity by microbiological oxidation of organic matter from the marine sediments coupled to reduce oxygen from the upper layer of the water column. The electrons are generated from the metabolism of naturally occurring microorganisms in marine sediments, whereby these sedimentary microbial fuel cells do not require exogenous (added) microorganisms.

Microorganisms in MFC utilize all the necessary energy and carbon source for cell growth from the oxidation of complex organic materials, thus MFC technology is considered sustainable. As long as the conditions are suitable for microorganisms' growth, MFC has the potential to produce electricity continuously [5].

A limiting factor for the practical application of microbial fuel cells is the high cost of materials, such as Nafion membranes that are commonly used in laboratories as protons exchange membranes i.e. as electrolyte. Nowadays it has been reported that in

su Nafion membrane koje se obično koriste u laboratorijama kao membrane za razmenu protona. Sada se radi na proizvodnji mikrobnih gorivnih ćelija sa nižom cenom primenom zemljanih posuda koje se koriste u Indiji. Uklanjanjem membrane za razmenu protona i korišćenjem zemljanih posuda uz mrežaste katode od nerđajućeg čelika i anode od grafitne ploče, mogu se proizvesti mikrobne gorivne ćelije za samo 1 \$. U ovom sistemu se koristi kanalizacioni mulj kao početni inokulum, a izvode se istraživanja u kojima se kao izvor ugljenika koristi acetat [5].

Princip Rada Gorivne Ćelije

Konvencionalna gorivna ćelija predstavlja elektrohemijski spreg koji proizvodi električnu energiju na osnovu spontane oksido-redukcijske reakcije. Njen mehanizam je takav da se dve polureakcije dotične oksido-redukcijske reakcije odigravaju prostorno odvojeno na elektrodama (redukcija se odvija na katodi koja se naziva katoda, a oksidacija na anodi). One su razdvojene čvrstim ili tečnim elektrolitima, koji nose naelektrisane čestice između te dve elektrode. Veoma često se koriste različiti katalizatori, da bi se reakcije na elektrodama ubrzale. Na primer, u klasičnoj gorivnoj ćeliji kao što je PEM (polimerna membrana) gorivni spreg, baziran na polimernoj polupropustljivoj membrani kao elektrolitu, platina je vrlo efikasan katalizator koja se koristi za reakcije oksidacije vodonika i redukcije kiseonika.

Mikrobna gorivna ćelija je vrsta elektrohemijske gorivne ćelije koja pretvara hemijsku energiju u električnu energiju upotrebom mikroorganizama. Tipična mikrobna gorivna ćelija se pravi kao sistem u kome su anodni i katodni deo razdvojeni polimernom membranom za razmenu protona (PEM) sa bakterijskom kulturom u anodnom delu, kao što je prikazano na Slici 1. Bakterija koristi hranjivu podlogu, odnosno, oksiduje organska jedinjenja kao što su glukoza, acetati ili otpadna voda i pri tome produkuje elektrone i protone. Pošto je polimerna membrana propustljiva samo za protone, oni putuju ka katodi, dok elektroni teku kroz spoljašnje električno kolo stvarajući električnu energiju. Zatim, protoni i elektroni reaguju na katodi redukujući kiseonik do vode [6].

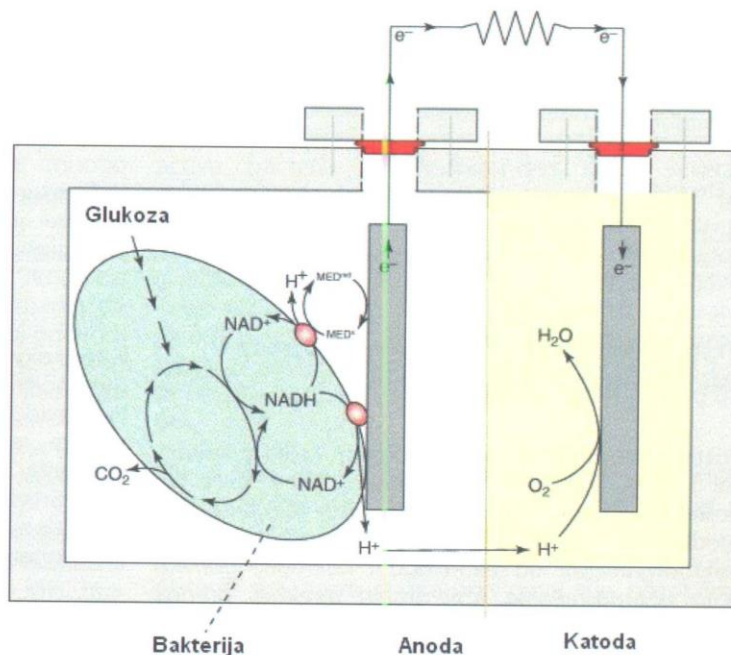
Reakcije koja se odvijaju na anodi kao što su na primer oksidacija glukoze ili acetatne kiseline i na katodi gde je tipična reakcija redukcije kiseonika, mogu se predstaviti sledećim jednačinama:

In India it is possible to decrease the costs of microbial fuel cells production by using earthen vessels. By removing the proton exchange membrane and using earthen vessels together with stainless steel cathodes and an anode from a graphite, microbial fuel cells can be produced for only 1 \$. In this system, sewage sludge is employed as initial inoculum and acetate is used as a source of carbon [5].

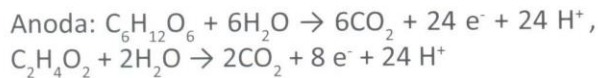
Working Principle

Fuel cell is type of electrochemical cell that generates electrical energy from spontaneous redox reaction. Two half cell reactions are taking place separately at the electrodes (anode is electrode where oxidation takes place, while cathode is electrode where reduction takes place). They are separated by a solid or liquid electrolyte that carries electrically charged particles between the two electrodes. A catalyst is often used to speed up the reactions at the electrodes. For example, in the polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell, platinum is used as efficient catalyst for hydrogen oxidation and oxygen reduction reactions.

Microbial Fuel Cell (MFC) is an electrochemical device that converts chemical energy to electrical energy using the catalytic actions of microorganisms. The typical MFC are designed as a system with anode and cathode compartment separated by a proton exchange membrane (PEM) with bacteria in the anode compartment, as shown in Figure 1. Bacteria oxidize substrate (organic compounds) such as glucose, acetate or wastewater generating electrons and protons. Protons permeate across the polymer



Slika 1. Mikrobna gorivna ćelija [7]
Figure 1. Microbial fuel cell [7]



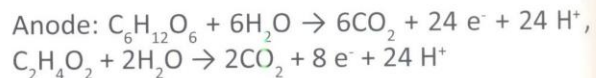
Biorazgradive organske materije $\rightarrow \text{CO}_2 + \text{e}^- + \text{H}^+$
(anaerobni uslovi)



Ukoliko prilikom rada ćelije dodje do migracije kiseonika iz katodnog dela u anodni, reakcija na anodi se inhibira i proizvodnja energije staje. Prema tome, odgovarajući dizajn gorivne ćelije kao i efikasano odvajanje anodnog dela gde bakterije rastu i katodnog dela gde se odvija redukcija kiseonika, su neophodni. U Tabeli 1 prikazane su osnovne komponente MFC kao i odgovarajući materijali.

electrolyte to the cathode, while the electrons flow through an external circuit and produce electric power. At the cathode side, electrons and protons are reacting with oxygen generation water [6].

The redox reactions that are taking place at the anode such as oxidation of glucose, acetate or biodegradable organics and at the cathode oxidation of oxygen can be presented with following equations:



Biodegradable organics $\rightarrow \text{CO}_2 + \text{e}^- + \text{H}^+$ (anaerobic conditions)



Tabela 1. Osnovne komponente mikrobne gorivne ćelije

Komponenta	Materijali	Napomene
Anoda	Grafit, grafitni filc, ugljenični papir, ugljenično predivo, Pt, Pt crna, staklasti umreženi ugljenik	Neophodno
Katoda	Grafit, grafitni filc, ugljenični papir, ugljenično predivo, Pt, Pt crna, staklasti umreženi ugljenik	Neophodno
Anodna komora	Staklo, polikarbonat, pleksiglas	Neophodno
Katodna komora	Staklo, polikarbonat, pleksiglas	Opciono
Sistem za razmenu protona (elektrolit)	Membrana za razmenu protona: Nafion, Ultrex, polietilen, poli (stiren-kodivinilbenzen); solni most, porcelanska pregrada ili potpuni elektrolit	Neophodno
Katalizator	Pt, MnO_2 , Fe^{3+} , polianilin, elektronski medijator imobilisan na anodi	Opciono

Table 1. The basic components of microbial fuel cell

Component	Materials	Comments
Anode	Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon fiber, Pt, Pt black, glass cross-linked carbon	Necessary
Cathode	Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon fiber, Pt, Pt black, glass cross-linked carbon	Necessary
Anode compartment	Glass, polycarbonate, plexiglass	Necessary
Cathode compartment	Glass, polycarbonate, plexiglass	Optional
Electrolyte	Membrane for proton exchange (PEM): Nafion, Ultrex; polyethylene, poly (styrene-co-divinylbenzene); salt bridge, porcelain separator or solid electrolyte	Necessary
Catalyst	Pt, MnO_2 , Fe^{3+} , Polyaniline, redox mediator immobilized at the anode	Optional

Vrste mikroorganizama koje se koriste u mikrobim gorivnim ćelijama

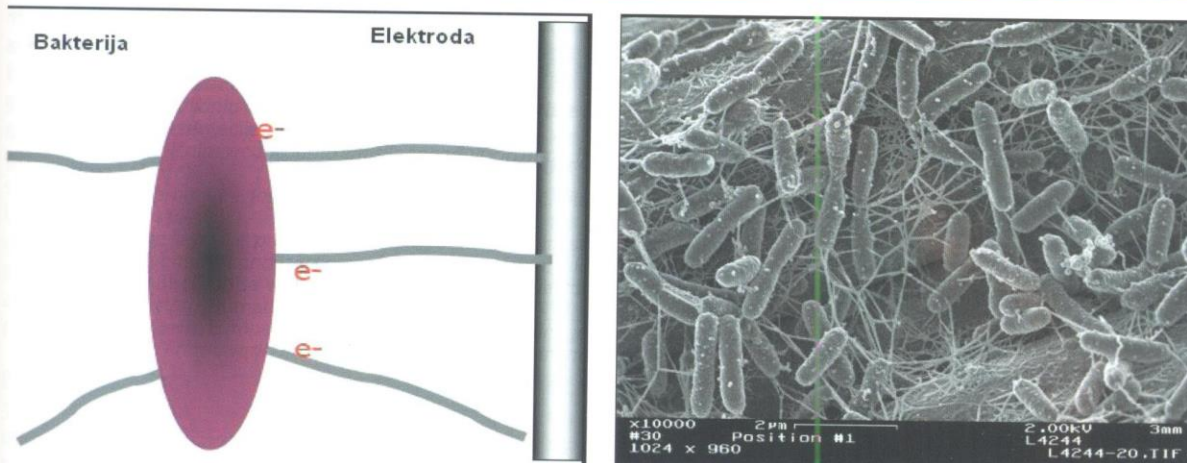
Postoje dva tipa mikrobim gorivnih ćelija u kojima se koriste bakterije: *mikrobne gorivne ćelije sa posrednikom* odnosno ćelije koje zahtevaju prisustvo medijatora koji omogućuje prenos elektrona od mikroorganizma do elektrode i *mikrobne gorivne ćelije bez posrednika*, koje imaju direktan prenos elektrona [7]. Medijatori mogu biti jedinjenja kao što su: tionin, metil violet, neutralno toluidin crveno itd.

Vrste bakterija koji se koriste u mikrobnoj gorivnoj ćeliji bez posrednika su bakterije koje su elektrohemijski

If the oxygen from the cathode side migrates to the anode, it will inhibit the oxidation reaction and the production of electricity. Thus, the pragmatic system must be design to keep the bacteria efficiently separated from oxygen (anaerobic anode compartment and cathode compartment where the reduction of oxygen takes place). In Table 1, the basic components of MFC are presented.

Types of microorganisms used in microbial fuel cells

There are two types of microbial fuel cell that use



Slika 2. Prenos elektrona između bakterije i elektrode [9]
Figure 2. Electron transport between bacteria cell and electrode [9]

aktivne i to je razlog zbog kojeg ne zahtevaju prisustvo posrednika. Bakterije koje se koriste u ovim gorivnim ćelijama pripadaju onim vrstama koje mogu direktno prenositi elektrone do elektrode (Slika 2). Neke vrste bakterija koje su elektrohemijski aktivne su: *Shewanella putrefaciens*, *Aeromonas hydrophila*. Takođe, bakterije koje redukuju metale pripadaju familiji *Geobacteraceae*, *Desulfuromonadaceae*, *Desulfobulbaceae* i imaju sposobnost da direktno prenesu elektrone do elektrode. Nekoliko pripadnika ovih familija bakterija, kao što su *Geobacter sulfurreducens*, *Geobacter metallireducens*, *Geopsychrobacter electrodiphilus*, *Desulfuromonas acetoxidans* i *Desulfobulbus propionicus* se uspešno koriste kao čiste kulture za proizvodnju električne struje [7, 8]. Takođe neke vrste bakterija koje imaju pile, končaste izraštaje na spoljašnjoj membrani, su sposobne za ovaj prenos elektrona putem svojih pila.

Prednost mikrobne gorivne ćelije koja ne koristi prisustvo medijatora je u tome što je mnogo efikasnija, jer prisustvo posrednika može biti toksično za mikroorganizme. Takođe, ovakvi sistemi su mnogo stabilniji i daju mogućnost proizvodnje energije iz otpadnih voda [9]. Jedan od najšire ispitivanih mikroorganizama sposobnih da proizvode struju velike gustine u mikrobnoj gorivnoj ćeliji je *G. sulfurreducens*. Ovaj organizam je postao model za mikrobne procese u MFC, bilo kao čista kultura ili u smeši sa drugim mikroorganizmima. *G. sulfurreducens* pripada klasi mikroorganizama koji se nazivaju elektricigeni (izraz koji se koristi za opisivanje mikroorganizama koji konzervišu energiju potrebnu za rast pomoću potpune oksidacije organskih supstanci u ugljendioksid uz direktan prenos elektrona do anode u MFC). Primena elektricigena u MFC ima mnoge prednosti kao što su: visoka efektivnost zbog potpune oksidacije organskih supstrata uz prenos elektrona na elektrodu, dugoročna stabilnost povezana sa očuvanjem energije za održanje i rast iz transfera elektrona i direktni prenos elektrona do

bacteria: biofuel cells that require the addition of a mediator - artificial electron shuttles which transfers electrons from microbial cells to electrodes, so-called *mediator microbial fuel cells* and microbial fuel cells that generate energy without the presence of mediator, based on direct electron exchange, so-called *mediator-less microbial fuel cells* [7]. Mediators are compounds such as: thionine, methyl viologen, neutral red etc.

The types of bacteria that are used in mediator-less MFC are electrochemically active and that is the reason why they do not require presence of mediator. Bacteria in mediator-less MFC are capable to directly exchange electrons with electrode (Figure 2). For example, the electrochemically active bacteria belong to the family: *Shewanella putrefaciens*, *Aeromonas hydrophila*. Also, the metal-reducing bacteria such as: *Geobacteraceae*, *Desulfuromonadaceae*, *Desulfobulbaceae* can be used as electrochemically active bacteria in mediator-less MFC. Several members of these bacterial families, such as *Geobacter sulfurreducens*, *Geobacter metallireducens*, *Geopsychrobacter electrodiphilus*, *Desulfuromonas acetoxidans* and *Desulfobulbus propionicus*, have been successfully used as pure culture to generate electrical current [7,8]. Additionally, there are some types of bacteria with pili that are also capable for direct electron exchange with electrode by using its pili.

The advantage of a mediator-less microbial fuel cells is higher efficiency because the presence of a mediator can be toxic to microorganisms and the performance of such system is low. Additionally, such systems are more stable and gave the possibility of energy production from wastewater [9]. One of the most widely studied microorganisms capable of producing high current density in the microbial fuel cell is *G. Sulfurreducens*. This organism has become a model for microbial processes in MFC,



anode što izbacuje potrebu za dodatkom egzogenih ili za elektronskim posrednicima [5].

Pregled ispitivanih MFC sistema sa različitim anodama sa mikroorganizmima, kao i različiti supstrati su prikazani u Tabeli 2 [1].

either as a pure culture or in a mixture with other microorganisms. *G. sulfurreducens* belongs to the class of microorganisms called bioelectrics (the term used to describe microorganisms that conserve the energy required for growth by the complete oxidation of organic substances into carbon dioxide

Tabeli 2. Mikrobne gorivne ćelije sa različitim anodama, mikroorganizmima i performansama [1]

Substrat	Anoda	Bakterijska vrsta	Maksimalna gustina snage / mW m^{-2}
Glukoza	Ugljenični papir	<i>Geobacter SPP</i>	40.3 ± 3.9
Acetat	Ugljenični papir	<i>G. sulfurreducens</i>	48 ± 0.3
Laktat	Ugljenični papir	<i>Geobacter SPP</i>	52 ± 4.7
Etanol	Ugljenični papir	<i>Betaproteo bacterium</i>	40 ± 2
Cistenin	Ugljenični papir	Gammaproteo and shewanellaaffinis (KMM3586)	36
Morski sedimenti	Grafit	<i>Deltaproteo bacterium</i>	14
Morski sediment	Nekorodirajući grafit	<i>Desulfomonas SPP</i>	25.4 do 26.6
Kanalizacioni mulj	Grafit sa Mn^{4+}	<i>Esherichia coli</i>	91
Kanalizacioni mulj	Grafit sa neutral crveno	<i>Esherichia coli</i>	152
Kanalizacioni mulj	Platina i polianilneko modifikovani	<i>Esherichia coli</i>	6000
Glukoza	Kompozitna elektroda (Grafit/PTFE)	<i>Esherichia coli</i>	760
Laktoza	Karbon tretiran Teflonom	Elektrohemijski aktivna bakterija	15.2
Celuloza	Nekvasivi karbon	Cellulose degrading bacteria	188

Table 2. Microbial fuel cells with various anodes, microorganisms and their performances

Substrate	Anode	Bacteria	Maximal power density / mW m^{-2}
Glucose	Carbon paper	<i>Geobacter SPP</i>	40.3 ± 3.9
Acetate	Carbon paper	<i>G. sulfurreducens</i>	48 ± 0.3
Lactate	Carbon paper	<i>Geobacter SPP</i>	52 ± 4.7
Ethanol	Carbon paper	<i>Betaproteo bacterium</i>	40 ± 2
Cystenin	Carbon paper	Gammaproteo and shewanellaaffinis (KMM3586)	36
Marine sediment	Graphite	<i>Deltaproteo bacterium</i>	14
Marine sediment	Noncorroding graphite	<i>Desulfomonas SPP</i>	25.4 do 26.6
Sewage sludge	Graphite sa Mn^{4+}	<i>Esherichia coli</i>	91
Sewage sludge	Graphite with neutral red	<i>Esherichia coli</i>	152
Sewage sludge	Platinum and polyanilineco-modified	<i>Esherichia coli</i>	6000
Glucose	Composite electrode (graohite/PTFE)	<i>Esherichia coli</i>	760
Lactose	Teflon treated carbon fiber paper	Electrochemically active bacteria	15.2
Cellulose	Non-wet-ptof carbon paper	<i>Cellulose degrading bacteria</i>	188

Mehanizam produkcije i prenosa elektrona u mikrobnjoj gorivnoj ćeliji

U najosnovnijem obliku, mikrobnja gorivna ćelija je uređaj koji koristi mikroorganizme za generisanje električne struje putem oksidacije organskih materijala. Mikroorganizmi u MFC metabolišu organske supstrate i prenose ekstracelularne elektrone do površine elektrode. Oksidacijom organskih materijala oslobađaju se i elektroni i protoni

with direct transfer of electrons to anodes in MFCs). The utilization of electrochemically active bacteria in MFC has many advantages: high efficiency due to complete oxidation of organic substrates with transferring electrons to the electrode, long-term stability associated with conservation of energy for maintenance and growth from electrons transfer and direct transfer of electrons to anode which eliminates the need for the addition of external compound or mediator [5].

iz supstrata koji se oksidiše. Elektroni se prenose na anodu, a zatim na katodu kroz električnu mrežu. Električna struja se generiše na način sličan hemijskoj gorivoj ćeliji, s tom razlikom što mikroorganizmi deluju kao katalizator na površini anode. Katalizatori generalno povećavaju brzinu reakcije bez promene stanja ili primanja energije iz reakcija koje kataliziraju. Uzimajući ovo u obzir, mikroorganizmi u mikrobnoj gorivoj ćeliji nisu pravi katalizatori jer dobijaju energiju iz oksidacije supstrata koja je potrebna za njihov rast i time proizvode određeni gubitak energije.

Biološke oksidacije koje se dešavaju u bakteriji (Slika 3) predstavljaju metabolički put odnosno seriju uzastopnih reakcija oksidacije supstrata kojima se obezbeđuje potrebna energija za ćeliju i tako se vrši prenos elektrona i protona sa supstrata na krajnji akceptor. Ovaj prenos se vrši sa jedinjenja višeg redoks potencijala na jedinjenje nižeg redoks potencijala preko odgovarajućih enzimskih kompleksa smeštenih u ćelijskoj membrani (Slika 4) [10]. Dalje se elektroni prenose na elektrodu tj. anodu, odakle se putem spoljašnjeg kola stvarajući struju koju iskorišćava potrošač, transportuju do katode. Protoni prolaze kroz elektrolit koji je u ovom slučaju membrana i dolaze do katode. Na katodi, kiseonik, koji se snabdeva iz vazduha, reaguje sa elektronima i jonima vodonika obrazujući vodu.



Slika 3. Biološke oksidacije [10]

Bakterije koriste različite metaboličke puteve za prenos elektrona u zavisnosti od operativnih parametara mikrobne gorivne ćelije. Prenos se vrši kroz tri glavna enzimska kompleksa: NADH (nikotin adenin dinukleotid) dehidrogenaza, ubihinon oksidoreduktaza, citohrom oksidaza [11]. Upotrebu ovog metabološkog puta su istraživali Kim i grupa autora (2004) [12]. Bakterija oksiduje dato gorivo odnosno hranljive materije (glukozu ili otpadne vode) i korišćenjem tih elektrohemijskih enzimskih kompleksa prenosi elektrone od glukoze (ili drugog organskog jedinjenja) kao davalaca elektrona ka anodi kao krajnjeg primalaca elektrona.

Enzimski kompleksi za prenos elektrona

NAD je najvažniji koenzim koji učestvuje u reakcijama

The overview of different microbial fuel cells with anode types, microorganisms and substrates are presented in Table 2.

Mechanisms of electron production and transfer in microbial fuel cell

In general, microbial fuel cell is a device that uses microorganisms to generate electrical energy through the oxidation of organic compounds. Microorganisms in MFC metabolize organic substrates and transfer the extracellular electrons to the surface of the electrode. By substrate oxidation, electrons and protons are together released from the reactions. The electrons are transferred from the bacteria to the anode and then through the external circuit to the cathode. The electric current is generated in a similar manner to the classical fuel cell, with the difference that in MFC microorganisms act as a catalyst at the anode side. Catalysts generally increase the rate of reaction without changing the state or receiving the energy from the catalysed reactions. Taking this into account, microorganisms in the microbial fuel cell are not real catalysts because they obtain energy from the oxidation of the substrate required for their growth and thus produce a certain energy loss.

Biological oxidations in the bacteria cell (Figure 3) represent a metabolic pathway or series of successive substrate oxidation reactions to provide the necessary energy for the bacteria cell as well as transferring electrons and protons from the substrate to the final acceptor. This transfer is carried out from the compounds of higher redox potential to the compound of lower redox potential, through the corresponding enzyme complexes located in the cell membrane (Figure 4) [10]. Further, electrons are transferred to the electrode, i.e. anode, from where they are transferred through the external circuit to the cathode. The protons pass through the electrolyte, which is in this case polymer membrane, and reach cathode side. On the cathode, oxygen, supplied from the air, reacts with electrons and hydrogen ions (protons), forming water.

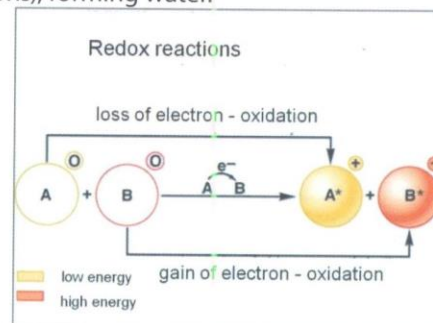


Figure 3. Biological oxidations [10]

Different metabolic pathways for transferring electrons are used by bacteria, depending on the



dehidrogenovanja. U ovom procesu on se iz svog oksidovanog oblika NAD^+ redukuje u redukovan oblik NADH. NAD prenosi hidronijum jon sastavljen od protona i dva elektrona, dok se drugi proton sa molekula vodonika odvodi u reakcionu sredinu. NADH najčešće predaje svoj vodonik flavin proteinima u lancu disanja, ali može da redukuje i druga jedinjenja (piruvat u laktat).

Flavin enzimi (FAD, FMN) koji takođe reverzibilno primaju i otpuštaju atom vodonika se dele na dve osnovne grupe:

1. Prave flavin dehidrogenaze (koje neposredno oksidišu supstrat i označavaju se Fp spec.)
2. Flavin enzime prenosioc elektrona, koji ne oksidišu direktno supstrat već koenzime drugih enzima (označavaju se kao Fp et.)

Ubihinon ili koenzim Q pripada koenzimima aromatične strukture i ima ulogu prenosioca elektrona sa flavin enzima na sistem citohroma. Citohrom oksidaze su po strukturi hromoproteini i razlikuju se po vrsti prostetične grupe i po strukturi proteinske komponente. Dele se na tri osnovne grupe A, B i C. Grupa A sadrži kao prostetičnu grupu citohemin. Grupa B sadrži hem (feroprotoporfirin). Grupa C sadrži citohemin C. Tačan mehanizam delovanja citohroma nije rasvetljen, ali je sigurno da se otpuštanjem ili primanjem jednog elektrona menja valenca gvožđa u prostetičnoj grupi. U redosledu prenošenja elektrona sa jednog prenosioca na drugi, svaki citohrom ima svoje tačno definisano mesto koje zavisi od redoks potencijala [10].

Pogonska sila za prenos elektrona je razlika u redox potencijalu enzimskih kompleksa tokom prenosa elektrona u bakteriji, koja čini da elektroni idu tačno tim putem (od molekula velike energije do molekula

operational parameters of MFC. Electrons and concomitantly protons can be transported through three main enzyme complexes: NADH (nicotinamide adenine dinucleotide) dehydrogenase, ubiquinone oxidoreductase, cytochrome oxidase [11]. The use of this pathway was investigated by Kim et al (2004) [12]. Bacteria oxidize fuel (glucose or wastewater) and use these enzymatic complexes to transfer electrons from glucose (or other organic compound), as donors of an electrons to the anode, as the final acceptor of the electrons.

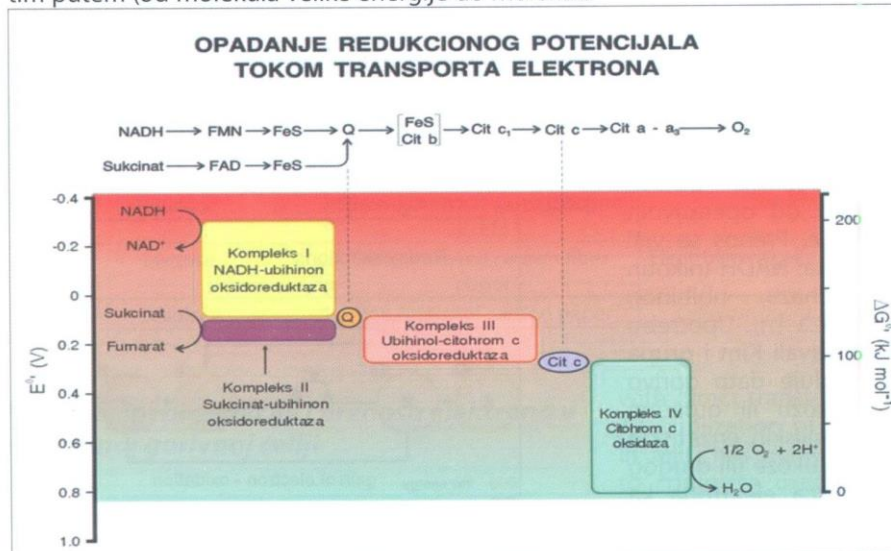
Enzyme complexes inside the bacteria cells for the electron transfers

NAD is the most important coenzyme involved in the dehydrogenation reactions. During this reaction, NADH, the oxidized form, is reduced to NAD^+ , the reduced form of NADH. NAD transfers the hydrogen ion composed of protons and two electrons, while the second proton from hydrogen molecules is taken to the reaction medium. In general, NADH passes its hydrogen to flavin protein in the respiratory electron transport chain; however it can also reduce the other compounds (e.g. pyruvate to lactate).

Flavin enzymes (FAD, FMN) also reversibly receive and release a hydrogen atom, and are divided into two basic groups:

1. Flavin dehydrogenase (which directly oxidizes the substrate and are labelled as Fp. spec.)
2. Flavin enzyme transducers of electrons, which do not directly oxidize the substrate, but the coenzyme of other enzymes (labeled as Fp. et.).

Ubiquinone or coenzyme Q belongs to the coenzymes with aromatic structure and has the role to transfer electrons between flavin enzymes and cytochrome complex. The cytochrome oxidases are chromoproteins and differ by type of prosthetic group and by structure of the protein component. They are divided into three basic groups A, B and C. Group A contains as a prosthetic group cytochrome a. Group B contains heme (feroprotoporfirin). Group C contains cytochrome c. The exact mechanism of action of cytochrome is not clarified, but it is certain that by releasing or receiving one electron, the iron valence in the prosthetic group changes. In the respiratory transport



Slika 4. Prenos elektrona u bakterijskoj ćeliji od NADH dehidrogenaze do citohrom oksidaze

Figure 4. Electron transport chain in the bacteria cell from NADH to cytochrome oxidases

manje energije). Tokom ovog prenosa elektrona, bakterija proizvodi za sebe energiju u obliku ATP. Ova energija u bakteriji se javlja na osnovu razlike u elektrohemijском potencijalu duž ćelijske membrane (Slika 4).

POTENCIJALNA PRIMENA MFCA

Korišćenje anode kao krajnjeg akceptora elektrona pomoću bakterija dovelo je do mogućnosti širokog spektra primene. Jedno od najaktivnijih područja istraživanja mikrobnih gorivnih ćelija je proizvodnja energije iz otpadnih voda gde se kombinuje oksidacija organskih ili neorganskih jedinjenja [3]. Studije pokazuju da bilo koje biorazgradljivo jedinjenje može biti izvor energije u mikrobnj gorivnoj ćeliji. Najviše su ispitivani acetati, glukoza, skrob, celuloza, pšenična slama, piridin, fenol, p-nitrofenol i složene smeše kao što su komunalne otpadne vode, otpad iz proizvodnje piva, efluent iz deponija, smeše masnih kiselina i naftni zagadivači (Slika 5).

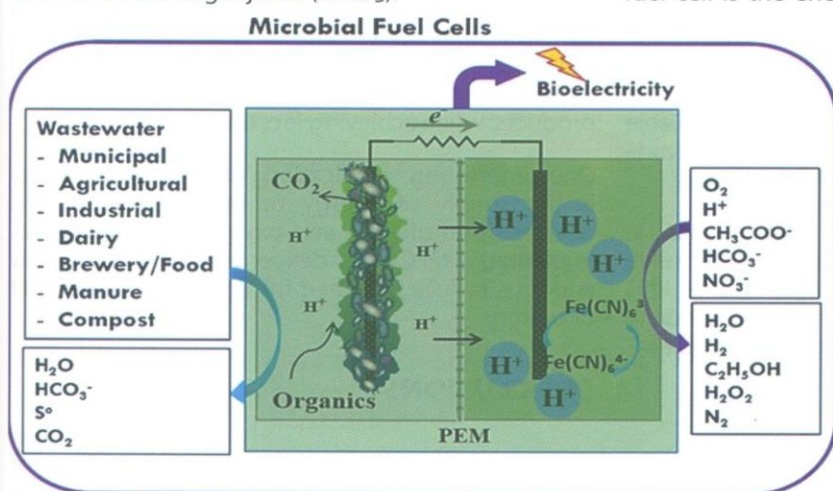
chain, every compound has its own exact location that depends on the redox potential [10].

Underlying force for electron transfer is difference in redox potential of enzyme complexes during electron transfer in bacteria that make electrons go exactly this way from a high-energy molecule (the donor) to a lower-energy molecule. During that electron transport bacteria produce energy in form of ATP for itself. That energy generation in bacteria occurs due to the electrochemical potential gradient difference across membrane that is created during that electron transport in enzyme complexes (Figure 4).

POTENTIAL APPLICATION OF MICROBIAL FUEL CELLS

The use of anode as end acceptor of electrons by bacteria has led to a wide range of applications. One of the most active application of microbial fuel cell is the energy production from wastewater,

where oxidation of organic or inorganic compounds is combined [3]. Studies show that any biodegradable compound can be a source of energy in a microbial fuel cell. The most commonly used compounds are acetates, glucose, starch, cellulose, wheat straw, pyridine, phenol, p-nitrophenol and complex mixtures such as municipal wastewater, beer waste, effluent from landfills, fatty acid mixtures and petroleum contaminants (Figure 5).



Slika 5. Mikrobna gorivna ćelija za prečišćavanje otpadnih voda [3]

Figure 5. Microbial fuel cell for wastewater treatment [3]

Prednost ovih sistema u odnosu na konvencionalne sisteme za prečišćavanje otpadnih voda je što se generiše manje otpadne biomase i nema potrebe za intenzivnom aeracijom. Međutim, primena mikrobnih gorivnih ćelija velikih razmera za tretman otpadnih voda je još uvek suočena sa problemima prebacivanja sa laboratorijskih na industrijske dimenzije i malom brzinom razgradnje supstrata.

Sposobnost mikrobne zajednice u mikrobnim gorivnim ćelijama da razgradjuje širok spektar ekoloških zagadivača može biti vrednija od proizvodnje električne energije, posebno kada MFC tehnologija može da se koristi za ekološku remedijaciju in situ. Ispitivanja sa *Geobacter* vrstama su pokazala da MFC tehnologije mogu biti važne u anaerobnoj razgradnji naftnih komponenti i procednih voda deponija koje odlaze u

The advantage of these systems in comparison to the conventional wastewater treatment systems is that less waste biomass is generated and there is no need for intensive aeration. However, the application of large-scale microbial fuel cells for wastewater treatment is still limited by scaling up issues from laboratory to industrial dimension, and low rate of substrates decomposition.

The ability of the microbial community in microbial fuel cells to degrade a wide range of environmental pollutants may be more valuable than electricity generation, especially when MFC technology can be used for environmental remediation in situ. Studies with *Geobacter species* have shown that MFC technologies can be important in the anaerobic decomposition of petroleum components and industrial wastewaters that go into groundwater. Oxidation of the pollutant is associated with the reduction of Fe (III). The redox process can be enhanced by the addition of a Fe (III) chelator or a redox mediator that causes an increase in electron



podzemne vode. Oksidacija zagađivača je povezana sa redukcijom Fe (III). Oksido redukcioni proces se mogu pojačati dodatkom Fe (III) helatora ili redoks medijatora koji izazivaju povećanje transfera elektrona između ćelija i nerastvornih Fe (III) oksida. Zagađivači se često zadržavaju u prirodi zbog nedostatka odgovarajućih akceptora elektrona, a dodavanje helatora ili redoks medijatora ili drugih akceptora elektrona u zemljište nije izvodljivo. Čiste kulture *Geobacter metallireducens* su u mogućnosti da oksidišu benzoat i toluen pomoću elektrode kao krajnjeg akceptora elektrona. Postavljanje elektrode u zemljišta kontaminirana ugljovodoničnim kontaminantima ubrzavaju razgradnju toluena, benzena i naftalina [5]. Korišćenje elektrode kao akceptora elektrona u zemljištu je pogodno i sa aspekta što se mikroorganizmi odgovorni za razgradnju lokalizuju zajedno sa kontaminantom na grafitnoj anodi. Nakon postavljanja elektroda može se osigurati kontinualni dugoročni elektronski rezervoar za razgradnju štetnih zagađivača sredine. U ovakvom sistemu proizvodnja struje pomoću mikroorganizama je irelevantna u odnosu na povećanje brzine bioremedijacije.

Pored toga, ispitivanja su pokazala da mikrobne gorivne ćelije mogu imati potencijal u uklanjanju inhibitora fermentacije koji se akumuliraju u procesnoj vodi tokom prerade celulozne biomase. Uklanjanje inhibitora omogućava povećanje prinosa proizvoda fermentacije, uz dobijanje manje količine energije.

Jedna neobična primena MFC tehnologija je snabdevanje energijom ugrađenih medicinskih uređaja uz korišćenje glukoze i kiseonika iz krvi. Ugrađeni MFC mogu davati energiju neodređeno vreme i time smanjiti potrebu za zamenom baterija [5].

ZAKLJUČAK

Mikrobne gorivne ćelije su elektrohemijski spregovi za pretvaranje hemijske energije u električnu energiju uz prisustvo mikroorganizama kao katalizatora. U ovakvom sistemu, elektrohemijski aktivne bakterije koje su smestene u anodnom delu, koriste organska jedinjenja iz otpadnih voda kao supstrate razlažući ih do CO_2 , H_2O i toplotu u procesu oksidacije. Istovremeno se vrši i prenos elektrona i protona sa bakterijske ćelije do anode, a zatim se oni dalje transportuju različitim putevima do katode gde reaguju sa kiseonikom obrazujući vodu. Pokazalo se da mikrobne gorivne ćelije imaju višestruku primenu, gde je najznačajnija nova tehnologija za prečišćavanje otpadnih voda uz istovremenu proizvodnju električne energije na održiv način.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan uz podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Republike Srbije (projekat OI 176018).

transfer between cells and insoluble Fe (III) oxides. Pollutants are often kept in the nature due to the lack of suitable electrons acceptors, and the addition of chelator or redox mediator or other electron acceptor in the earth is not feasible. Pure cultures of *Geobacter metallireducens* are able to oxidize benzoate and toluene by electrode as the final electron acceptor. Placing the electrode in soil contaminated with hydrocarbon accelerates the decomposition of toluene, benzene and naphthalene [5]. The use of the electrode as an acceptor of electrons in soil is advantageous because the microorganisms responsible for the decomposition are localized together with the contaminant on the graphite anode. After placing the electrodes, a continuous long-term electronic tank can be provided for decomposing harmful pollutants of the environment. In this system, the production of electricity by microorganisms is irrelevant in comparison to the increased rate of bioremediation.

In addition, studies have shown that microbial fuel cells may have the potential to remove fermentation inhibitors that accumulate in process water during the processing of cellulose biomass. Removal of inhibitors allows increasing the yield of fermentation products, while achieving less energy.

One interesting application of MFC technology is the supply of energy to implantable medical devices using glucose and oxygen from the blood. Implantable MFCs can deliver energy continuously and thus reduce the need for constant replacement of battery [5].

CONCLUSIONS

Microbial fuel cells are electrochemical device that convert chemical energy into electrical energy in the presence of microorganisms as catalysts. In such system, electrochemically active bacteria that are located in the anode compartment are using organic compounds from wastewater as substrates, decomposing them to CO_2 , H_2O and heat in the oxidation processes. At the same time, the transfer of electrons and protons from the bacterial cell to the anode is carried out. Further they are transported in different ways to the cathode, where they react with oxygen to form water. It has been shown that microbial fuel cells have different applications, where the most important is the new technology for wastewater treatment while simultaneously producing electricity on a sustainable manner.

ACKNOWLEDMENTS

This work was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia (project No. OI 176018).

REFERENCE / REFERENCES

1. M. Rahimnejad, A. Adhami, S. Darvari, A. Zirepour, S.-E. Oh, Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review, *Alexandria Engineering Journal*, 2015, 54, 745-756
2. D. R. Lovley, Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches, *Current opinion in biotechnology*, 2006, 17, 327-332
3. V. G. Gude, Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview, *Journal of Cleaner Production*, 2016, 122, 287-307
4. L. M. Tender, S. A. Gray, E. Groveman, D. A. Lowy, P. Kauffman, J. Melhado, R. C. Tyce, D. Flynn, R. Petrecca, J. Dobarro, The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy, *Journal of Power Sources*, 2008, 179, 571-575
5. A. E. Franks, K. P. Nevin, Microbial Fuel Cells: A Current Review, *Energies*, 2010, 3, 899-919
6. R. M. Allen, H. P. Bennetto, Microbial Fuel-Cells - Electricity Production from Carbohydrates, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1993, 39/40, 26-40
7. H. Liu, B. Logan, Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell (MFC) in the absence of a proton exchange membrane, *Environ. Sci. Technol.*, 2004, 38, 4040-4046
8. G.T. Kim et al., Bacterial community structure, compartmentalization and activity in a microbial fuel cell, *Journal of applied Microbiology* 2006, 101, 698-710
9. B. E. Logan, J. M. Regan; Hydrogen and electricity production using microbial fuel cell-based technologies, Penn State University
10. S.Šiler, Biohemija, knjiga, Univerzitet u Beogradu, TMF, ISBN 86-7401-224-8
11. K. Rabaey, W. Verstraete, Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation, *Trends in Biotechnology*, 2005, 23, 291-298
12. B.H. Kim et al., Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel-cell-type electrochemical cell, *App. Microbiol Biotechnol*, 2004, 63, 672-681