

 **Processing '22**

# ZBORNİK RADOVA

**35. Međunarodni kongres  
o procesnoj industriji**

**Holiday Inn, Beograd**

**1–3. jun 2022.**



**SET**  
SAMIT ENERGETIKE TREBINJE



# ZBORNİK RADOVA

---

pisanih za 35. Međunarodni kongres o procesnoj industriji  
PROCESING '22



2022

**ZBORNİK RADOVA**  
**pisanih za 35. Međunarodni kongres o procesnoj industriji**  
**PROCESING '22**  
Holiday Inn, Beograd

**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 Dušan Todorović, dipl. inž.  
Prof. dr Miroslav Stanojević, dipl. inž.  
Prof. dr Aleksandar Jovović, dipl. inž.

**Tiraž**  
150 primeraka

**CD umnožava**  
Paragon, Beograd

**ISBN**  
978-86-85535-12-3

**Godina izdavanja**  
2022.



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

621(082)(0.034.2)

66.01(082)(0.034.2)

МЕЂУНАРОДНИ конгрес о процесној индустрији ПРОЦЕСИНГ (35 ; 2022 ; Београд)

Zbornik radova [pisanih za] 35. Međunarodni kongres o procesnoj industriji, PROCESING '22, 1-3. jun 2022, Beograd [Elektronski izvor] / [organizator Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Društvo za procesnu tehniku] ; [urednici Dušan Todorović, Miroslav Stanojević, Aleksandar Jovović]. - Beograd : Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Društvo za procesnu tehniku, 2022 (Beograd : Paragon). - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemska zahteva: Nisu navedeni. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Tiraž 150. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-85535-12-3

a) Mašinstvo -- Zbornici б) Процесна индустрија -- Зборници

COBISS.SR-ID 78806281

Održavanje 35. 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
- DEPARTMAN ZA ENERGETIKU I PROCESNU TEHNIKU FAKULTETA TEHNIČKIH NAUKA UNIVERZITETA U NOVOM SADU, NOVI SAD
- FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA UNIVERZITETA U BEOGRADU, BEOGRAD

**35. Procesing se održava uz podršku**



Ministarstvo rudarstva i  
energetike  
Republike Srbije



Privredna komora Srbije  
Beograd



Inženjerska komora Srbije  
Beograd

**Sponzori**



Indija



Beograd



Beograd



Beograd



Beograd



Beograd



Subotica



Beograd



Beograd



Mionica



Ruma



Beograd

## MEĐUNARODNI NAUČNI ODBOR

- Dr Ivan Božić** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*  
**Dr Mirko Dobrnjac** *Mašinski fakultet Banja Luka, BiH*  
**Dr Damir Đaković** *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*  
**Dr Maja Đolić** *Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*  
**Dr Mladen Đurić** *Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd*  
**Dr Srbislav Genić** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*  
**Dr Milan Gojak** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*  
**Dr Zvonimir Guzović** *Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Hrvatska*
- Dr Jelena Janevski** *Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš*  
**Dr Rade Karamarković** *Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo, Kraljevo*  
**Dr Nikola Karličić** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*  
**Dr Mirjana Kijevčanin** *Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*  
**Dr Miroslav Kljajić** *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*  
**Dr Atanas Kočov** *Univerziteta Skopje, Mašinski fakultet, Severna Makedonija*  
**Dr Dejan Krčmar** *Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad*
- Dr Čedo Lalović** *Akademija strukovnih studija Šumadija – Odsek Aranđelovac*  
**Dr Dorin Lelea** *University Politehnica Timisoara, Rumunija*  
**Dr Stefan Mandić-Rajčević** *University of Milan, Italija*  
**Dr Ljiljana Medić-Pejić** *Universidad Politécnica de Madrid Madrid, Španija*  
**Dr Sanda Midžić-Kurtagić** *Univerzitet u Sarajevu, Mašinski fakultet, Sarajevo, BiH*  
**Dr Sanja Milivojević** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*  
**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*  
**Dr Nataša Petrović** *Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd*  
**Dr Dejan Radić** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd*  
**Dr Ivona Radović** *Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*  
**Dr Niko Samec** *Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet, Slovenija*  
**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 Dušan Todorović** *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd (predsednik)*  
**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, Srbija*

## ORGANIZACIONI ODBOR

<b>Dr Miroslav Stanojević</b>	<i>Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd (predsednik)</i>
<b>Dr Aleksandar Petrović</b>	<i>Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd</i>
<b>Dr Miloš Ivošević</b>	<i>Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd</i>
<b>Dr Gorica Ivaniš</b>	<i>Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd</i>
<b>Jelena Jolić</b>	<i>Beo čista energija, Beograd</i>
<b>Dr Jelena Ruso</b>	<i>Fakultet organizacionih nauka Univerziteta u Beogradu, Beograd</i>
<b>Dr Milica Karanac</b>	<i>Envico doo, Beograd</i>
<b>Dr Marta Trninić</b>	<i>Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd – Odsek Beogradska politehnika, Beograd</i>
<b>Branislav Todorović</b>	<i>Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd</i>
<b>Milan Travica</b>	<i>Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd</i>
<b>Aleksandar Branković</b>	<i>SET Trebinje, Bosna i Hercegovina</i>
<b>Jelena Salević</b>	<i>SMEITS, Beograd</i>
<b>Vladan Galebović</b>	<i>SMEITS, Beograd</i>

## POČASNI ODBOR

<b>Prof. dr Bratislav Blagojević</b>	<i>predsednik SMEITS-a</i>
<b>Prof. dr Vladimir Popović</b>	<i>dekan Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu</i>
<b>Prof. dr Petar Uskoković</b>	<i>dekan Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu</i>
<b>Prof. dr Milan Martić</b>	<i>dekan Fakulteta organizacionih nauka Univerziteta u Beogradu</i>
<b>Prof. dr Srđan Kolaković</b>	<i>dekan Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu</i>
<b>Prof. dr Martin Bogner</b>	<i>Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu</i>
<b>Prof. dr Goran Jankeš</b>	<i>Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu</i>
<b>Prof. dr Snežana Pajović</b>	<i>Institut za nuklearne nauke "Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju – Univerzitet u Beogradu</i>
<b>Marica Mijajlović</b>	<i>Inženjerska komora Srbije, Beograd</i>
<b>Vladimir Milovanović</b>	<i>Beo čista energija, Beograd</i>
<b>Aleksandar Branković</b>	<i>SET Trebinje</i>
<b>Bratislav Sadžaković</b>	<i>GasTeh, Indija</i>
<b>Dušan Durković</b>	<i>Grundfos Srbija, Beograd</i>
<b>Jovanka Jovanović</b>	<i>Robert Bosch, Beograd</i>
<b>Bojan Sretenović</b>	<i>Ovex inženjering, Beograd</i>
<b>Čaba Kern</b>	<i>Cim Gas, Subotica</i>
<b>Mario Mrkonjić-Detmers</b>	<i>APIS Centar, Beograd</i>
<b>Nemanja Tubić</b>	<i>Wilo Beograd, Beograd</i>
<b>Aleksandar Klevernić</b>	<i>Vupis, Ruma</i>
<b>Dejan Margetić</b>	<i>Vodavoda, Mionica</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

*Od preko 50 radova prijavljenih za ovogodišnji Procesing, za izlaganje je prihvaćeno 47 radova autora iz zemlje i inostranstva.*

*Zbornik celih radova će u režimu slobodnog pristupa biti objavljen na sajtu [www.izdanja.smeits.rs](http://www.izdanja.smeits.rs). Kao integralni dokument biće dostupan na sajtu [www.smeits.rs](http://www.smeits.rs)*

*Međunarodni karakter Procesinga '22 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 '22 obuhvata osnovne procesne operacije – mehaničke, hidromehaničke, toplotne, difuzione, hemijske i biohemijske, kao i procesna postrojenja i opremu (aparate i mašine).*

*Program Procesinga '22 obuhvata oblasti: procesne tehnologije; projektovanje, izgradnja, eksploatacija i održavanje procesnih postrojenja; 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; modelovanje i optimizacija procesnih i termoenergetskih postrojenja; merenja i upravljanje u procesnoj industriji; menadžment kvaliteta i standardizacija u organizacijama.*

*Osim izlaganja radova, program Procesinga '22 obuhvata i dva okrugla stola na sledeće teme:*

- Nova domaća zakonska regulativa u oblasti opreme pod pritiskom.*
- Savremeni postupci termičkog tretmana otpada. Iskustva u primeni biomase kao goriva.*

*Procesing '22 organizuje Društvo za procesnu tehniku pri SMEITS-u, a u Naučnom i Organizacionom odboru prisutni su predstavnici svih Mašinskih fakulteta u Srbiji kao i Tehnoloških i drugih fakulteta u okviru kojih je oblast procesne tehnike zastupljena u nastavi.*

*Pomoć u organizovanju Procesinga '22 dali su članovi Katedre za procesnu tehniku Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu i mnogih drugih fakulteta iz Srbije.*

*Ovogodišnji skup završava se posetom novom Centru za upravljanje otpadom u Vinči.*

*U Beogradu  
juni 2022.*



# SADRŽAJ

## Procesne tehnologije

1. ISPITIVANJE MEŠLJIVOSTI SA VODOM  
METANOLA KAO PETROHEMIKALIJE  
Matilda LAZIĆ, Dragan HALAS, Duško SALEMOVIĆ, Aleksandar DEDIĆ . . . . . 13
2. KONTROLISANO OTPUŠTANJE KOFEINA IZ TRODIMENZIONIH MREŽA  
NA BAZI POLI(METAKRILNE KISELINE) I KAZEINA – ISPITIVANJE UTICAJA  
KONCENTRACIJE KOFEINA NA PROCES OTPUŠTANJA  
Maja D. MARKOVIĆ, Rada V. PJANOVIĆ,  
Pavle M. SPASOJEVIĆ, Sanja I. SAVIĆ, Vesna V. PANIĆ . . . . . 19
3. ISPITIVANJE ANTIMIKROBNIH SVOJSTAVA  
NEKIH BIĐINELI-AZO PIRIDONSKIH BOJA  
Julijana TADIĆ, Ivana GAZIKALOVIĆ, Jelena LAĐAREVIĆ,  
Aleksandra MAŠULOVIĆ, Milica SVETOZAREVIĆ,  
Slavica POROBIĆ, Dušan MIJIN . . . . . 25
4. PROUČAVANJE A-CIJANOSTILBENA KAO  
POTENCIJALNIH MOLEKULSKIH PREKIDAČA METODOM  
LINEARNE KORELACIJE ENERGIJE SOLVATACIJE  
Anita LAZIĆ, Nemanja TRIŠOVIĆ, Nataša VALENTIĆ . . . . . 29
5. ISPITIVANJE ANTIOKSIDATIVNE AKTIVNOSTI AZO BOJA  
NA BAZI 6-HIDROKSI-4-METIL-2-PIRIDONA  
Aleksandra MAŠULOVIĆ, Jelena LAĐAREVIĆ, Julijana TADIĆ,  
Vanja VERUŠEVSKI, Luka MATOVIĆ,  
Milica SVETOZAREVIĆ, Dušan MIJIN . . . . . 37
6. KOMPOZITNI MATERIJALI NA BAZI NEZASIĆENIH POLIESTARSKIH SMOLA  
DOBIJENIH IZ BIOOBNOVLJIVIH IZVORA I OTPADNE KAFE  
Olga PANTIĆ, Vesna PANIĆ, Sanja SAVIĆ, Maja MARKOVIĆ,  
Melina KALAGASIDIS KRUŠIĆ, Pavle SPASOJEVIĆ . . . . . 41
7. TERMIČKA OBRADA PREHRAMBENIH PROIZVODA POMOĆU  
UHT (ULTRA HIGH TEMPERATURE) TEHNOLOGIJE U FABRICI POLIMARK  
Lazar MANDIĆ . . . . . 49
8. UTICAJ ČUVANJA U KONTROLISANOJ ATMOSFERI  
NA KVALITET PLODOVA JABUKE  
Snežana M. STEVANOVIĆ, Dragan MARKOVIĆ,  
Uroš MILOVANČEVIĆ, Milena OTOVIĆ . . . . . 55

## Projektovanje, izgradnja, eksploatacija i održavanje procesnih postrojenja

9. DODATNA ZAŠTITA OD KOROZIJE KULA ZA HLAĐENJE VODE  
Nemanja STOJANOVIĆ, Mirko DIMITRIJEVIĆ, Martin BOGNER . . . . . 61
10. ANALIZA I PRORAČUN GMRS I PRIMARNE GASNE DISTRIBUTIVNE MREŽE  
U URBANOJ SREDINI – STUDIJA SLUČAJA KUČEVO  
Aleksandar MADŽAREVIĆ, Pavle JANKOVIĆ . . . . . 67
11. OSNOVNI ASPEKTI ODRŽAVANJA, EKSPLOATACIJE  
I PROJEKTOVANJA NAFTOVODA  
Jasna TOLMAČ, Slavica PRVULOVIĆ,  
Saša JOVANOVIĆ, Milan MARKOVIĆ . . . . . 89

12.	ANALIZA KORELACIJA ZA PRORAČUN KOEFICIJENTA TRENJA ZA FORMIRANJE NUMERIČKOG MODELA ZA PRORAČUN PADA PRITISKA ZA SLUČAJ PNEUMATSKOG TRANSPORTA LETEĆEG PEPELA LIGNITA U TERMOENERGETSKIM POSTROJENJIMA Nikola KARLIČIĆ, Marko OBRADOVIĆ, Dušan TODOROVIĆ, Milan M. PETROVIĆ, Dejan RADIĆ, Aleksandar JOVOVIĆ . . . . .	99
13.	UTICAJ SADRŽAJA VLAGE U DRVNOJ SEČKI NA GUBITKE SA DIMNIM GASOVIMA I EFIKASNOST KOTLA Marko OBRADOVIĆ, Nikola KARLIČIĆ, Dušan TODOROVIĆ, Dejan RADIĆ, Aleksandar JOVOVIĆ . . . . .	101
14.	FAKTOR SAGOREVANJA I NJEGOVA PRIMENA U PROCENI OTPORNOSTI NA POŽAR Ivan ARANĐELOVIĆ, Branislav GAJIĆ, Filip JEKIĆ . . . . .	103
15.	OTPORNOST PREMA POŽARU NOSEĆE KONSTRUKCIJE OBJEKTA KOTLARNICA NA ČVRSTO GORIVO Marko SAVANOVIĆ, Ivan ARANĐELOVIĆ, Nikola TANASIĆ, Radenko RAJIĆ . . . . .	107
16.	GLAVNO PROVETRAVANJE JAMA PODZEMNIH RUDNIKA UGLJA U SRBIJI Dejan DRAMLIĆ, Vladica RISTIĆ, Dragan ZLATANOVIĆ, Duško ĐUKANOVIĆ . . . . .	113
17.	ZNAČAJNO POVEĆANJE INDEKSA TROŠKOVA PROCESNIH POSTROJENJA I OPREME TOKOM 2021. Srbislav GENIĆ, Branislav JAČIMOVIĆ, Vladislav STANKOVIĆ, Branislav GAJIĆ . . . . .	115
18.	POVEĆAN HIDRAULIČKI OTPOR U CEVIMA JEDNOPROTOČNOG PARNOG KOTLA USLED ZAPRLJANJA: STUDIJA SLUČAJA NA PARNOM BLOKU SNAGE 650 MWE NA LIGNIT Vladimir D. STEVANOVIĆ, Sanja MILIVOJEVIĆ, Milan M. PETROVIĆ, Milica ILIĆ . . . . .	117
19.	INVESTIGATION OF THERMAL AND DIMENSIONAL BEHAVIOR OF 3D PRINTED MATERIALS USING THERMAL IMAGING AND 3D SCANNING Zorana GOLUBOVIĆ, Milan TRAVICA, Isaak TRAJKOVIĆ, Aleksandar PETROVIĆ, Nenad MITROVIĆ . . . . .	131

### **Inženjerstvo životne sredine i održivi razvoj u procesnoj industriji**

20.	MAGNEZIJUM I HIPERTENZIJA U PROCESNOJ INDUSTRIJI Nikolina BANJANIN . . . . .	133
21.	UPOTREBA MIKROREAKTORSKIH SISTEMA U PROCESIMA PREČIŠĆAVANJA OTPADNE VODE Ana DAJIĆ, Marina MIHAJLOVIĆ, Milica SVETOZAREVIĆ . . . . .	137
22.	IMOBILIZACIJA PEROKSIDAZE IZ KROMPIROVIH LJUSKI U OBLIKU UMREŽENIH ENZIMSKIH AGREGATA ZA „ZELENU“ RAZGRADNJU ANTRAHINONSKE BOJE Milica SVETOZAREVIĆ, Nataša ŠEKULJICA, Ana DAJIĆ, Marina MIHAJLOVIĆ, Zorica KNEŽEVIĆ-JUGOVIĆ, Dušan MIJIN . . . . .	141
23.	BIOSORPCIJA NIKLA IZ OTPADNIH VODA KORIŠĆENJEM EGZOPLOISAHARIDA IZOLOVANOG IZ BAKTERIJSKOG SOJA KLEBSIELLA OXYTOCA J7 Verica LJUBIĆ, Jovana PERENDIJA, Slobodan CVETKOVIĆ, Mina POPOVIĆ . . . . .	147

24. PRIPREMA KOMPANIJE ELIXIR GROUP ZA UVOĐENJE PREKOGRANIČNOG MEHANIZMA ZA PRILAGOĐAVANJE UGLJENIKA NA GRANICAMA (CBAM)  
Alija SALKUNIĆ, Nikola BELOBABA, Bajro SALKUNIĆ,  
Ljiljana STANOJEVIĆ, Slavica BOGDANOVIĆ . . . . . 155

### **Energetska efikasnost u procesnoj industriji**

25. UTICAJ RADNIH FLUIDA ZA ORC NA EFIKASNOST  
KOMBINOVANOG SISTEMA INTEGRISANOG SA GORIVOM ČELIJOM,  
GASNOM TURBINOM, ORGANSKIM RANKINOVIM CIKLUSOM  
I PARNOM TURBINOM  
Nurdin ČEHAJIĆ, Jasmin FEJZIĆ . . . . . 165
26. MOGUĆNOSTI UŠTEDE VODE I ISKORIŠTENJA  
OTPADNE TOPLOTE IZ PROCESA ODMULJIVANJA  
I ODSOLJAVANJA INDUSTRIJSKIH PARNIH KOTLOVA  
Jasmin FEJZIĆ, Indira BULJUBAŠIĆ, Nurdin ČEHAJIĆ . . . . . 183
27. POTENCIJAL KOGENERATIVNIH POSTROJENJA  
NA BIOMASU U POSTIZANJU KLIMATSKE NEUTRALNOSTI  
BIH DO 2050.GODINE  
Azrudin HUSIKA, Nurin ZEČEVIĆ, Ejub DŽAFEROVIĆ . . . . . 195
28. METODOLOGIJA AEROAKUSTIČNE ANALIZE  
TROKRAKE H-DARIJUS VETROTURBINE  
Boško RAŠUO, Marta TRNINIĆ, Mirko DINULOVIĆ . . . . . 205
29. EKSPERIMENTALNA I CFD ANALIZA TURBULATORA  
U OBLIKU OPRUGE KOD KOTLOVA NA BIOMASU  
Đorđe A. NOVČIĆ, Miloš V. NIKOLIĆ, Dušan M. TODOROVIĆ,  
Rade M. KARAMARKOVIĆ, Marko O. Obradović . . . . . 215
30. PRODAJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ KOGENERACIONIH POSTROJENJA, NA  
ORGANIZOVANIM TRŽIŠTIMA  
U JUGOISTOČNOJ EVROPI  
Zorana BOŽIĆ, Dušan DOBROMIROV . . . . . 217

### **Procesi i postrojenja u pripremi i prečišćavanju vode u procesnoj industriji**

31. DEFINSANJE POTROŠNJE VAZDUHA U PROCESU BIOLOŠKE OBRADE  
SANITARNIH OTPADNIH VODA U SEKVENCIJALNOM ŠARŽNOM  
REAKTORU (SBR) NA PRIMERU POSTROJENJA KAPACITETA 1000 ES  
Ognjen ĐORĐEVIĆ, Nikola KARLIČIĆ, Miroslav STANOJEVIĆ . . . . . 219
32. PRIMENA KOMPOZITNOG GRAĐEVINSKOG OTPADA  
U PREČIŠĆAVANJU INDUSTRIJSKIH OTPADNIH VODA  
Ivana JELIĆ, Dragi ANTONIJEVIĆ,  
Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ, Slavko DIMOVIĆ . . . . . 225
33. KVALITET OTPADNIH VODA MLEKARA  
NA TERITORIJI CENTRALNE SRBIJE  
Radmila LIŠANIN, Čedo LALOVIĆ . . . . . 227

### **Modelovanje i optimizacija procesnih i termoenergetskih postrojenja**

34. MODELIRANJE SAGOREVANJA PREDMEŠANOG CH<sub>4</sub>/VAZDUH PLAMENA  
PRI RAZLIČITIM TURBULENTNIM REŽIMIMA STRUJANJA  
Andrijana STOJANOVIĆ, Srđan BELOŠEVIĆ, Nenad CRNOMARKOVIĆ,  
Ivan TOMANOVIĆ, Aleksandar MILIĆEVIĆ . . . . . 237

35. PIROLIZA STABLJIKE KUKURUZA U ŠARŽNOM REAKTORU:  
UTICAJ PARAMETARA PROCESA NA PRODUKTE  
Biljana MILJKOVIĆ . . . . . 239

### **Merenja i upravljanje u procesnoj industriji**

36. ZAKONSKA REGULATIVA I STANDARDIZACIJA  
U OBLASTI MERENJA PRIRODNOG GASA  
Mileva CVETKOVIĆ . . . . . 255
37. ISPITIVANJE OTPORNOSTI PREMA POŽARU  
POŽARNO OTPORNIH KLAPNI  
Aleksandar KIJANOVIĆ,  
Milica MIRKOVIĆ MARJANOVIĆ, Snežana ILIĆ . . . . . 257

### **Menadžment kvaliteta i standardizacija u organizacijama**

38. MODEL OPTIMANOG UPRAVLJANJA INTEGRISANIM KVALITETOM  
U PROCESNOJ INDUSTRIJI  
Mitar BIJELIĆ, Biljana MILANOVIĆ, Zdravko BIJELIĆ . . . . . 259
39. ODNOS MENADŽMENTA KVALITETA I BLOKČEJN TEHNOLOGIJE  
U LANCIMA SNABDEVANJA  
Andrej POPADIĆ, Mladen ĐURIĆ, Luka POPADIĆ . . . . . 261
40. ANALIZA STANDARDA ISO 30405 ZA REGRUTACIJU KADROVA  
I NJEGOV ZNAČAJ U POSLOVANJU ORGANIZACIJA  
Milica STOJILJKOVIĆ, Mladen ĐURIĆ, Jelena RUSO . . . . . 285
41. PRELED STANDARDA ZA KOMPANIJE IZ  
PREHRAMBENE INDUSTRIJE I NJIHOV LANAC SNABDEVANJA  
Milena TOKIĆ, Mladen ĐURIĆ . . . . . 295
42. PRELED STANDARDA ZA MENADŽMENT LJUDSKIH RESURSA,  
UZ ANALIZU METRIKE KOJA SE KORISTI U NJIMA  
Valentina MARKOVIĆ, Mladen ĐURIĆ . . . . . 309

### **Oglasni deo**

# UPOTREBA MIKROREAKTORSKIH SISTEMA U PROCESIMA PREČIŠĆAVANJA OTPADNE VODE

## THE USE OF MICROREACTOR SYSTEMS IN WASTEWATER TREATMENT PROCESSES

Ana DAJIĆ\*, Marina MIHAJLOVIĆ, Milica SVETOZAREVIĆ,

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, Beograd

*Porast industrijske aktivnosti za posledicu ima sve veću potrošnju vode a samim tim i sve veće količine otpadne vode opterećene značajnim količinama zagađujućih materija. U vreme kada je zaštita životne sredine aktuelna tema, tehnike prečišćavanja se neprestano unapređuju. Relativno nov koncept prerade otpadne vode uključuje tretmane u mikroreaktorskim sistemima kao atraktivnu alternativu standardnim procesima prečišćavanja. Kako postoji veliki broj različitih tipova mikroreaktorskih sistema i veliki broj metoda uklanjanja zagađujućih materija, otvaraju se nove mogućnosti primene različitih tretmana obrade. U radu je dat pregled tretmana industrijskih otpadnih voda koje je moguće primeniti u mikroreaktorskim sistemima.*

**Ključne reči:** *Prečišćavanje, zaštita životne sredine, mikroreaktorski sistemi*

*The increase in industrial activity results in increasing water consumption and increasing amounts of wastewater burdened with significant amounts of pollutants. Environmental protection has become an important topic and wastewater treatment techniques are constantly being improved. A relatively new concept includes treatments in microreactor systems as an attractive alternative to standard processes. Large number of different types of microreactor systems and large number of methods for removing pollutants opens up, new possibilities for the application of different treatment types. The paper gives an overview of industrial wastewater treatments that could be applied in microreactor systems with their advantages over classical processes.*

**Key words:** *Purification, environmental protection, microreactor systems*

### 1 Uvod

Industrijske otpadne vode uglavnom sadrže boje i međuproizvode za bojenje, pesticide, farmaceutske proizvode, aromatična organska jedinjenja, rastvarače itd. koji mogu biti stabilna jedinjenja te njihovo uklanjanje često nije jednostavan proces. Postrojenja za prečišćavanje industrijskih otpadnih voda su obično složena, sastavljena od više procesa – od fizičkih do bioloških. U vreme kada je zaštita životne sredine aktuelna tema, tehnike prečišćavanja se neprestano unapređuju. Relativno nov koncept obrade uključuje tretmane u mikroreaktorskim sistemima kao atraktivnu alternativu standardnim procesima prečišćavanja. Inovativnost tretmana otpadne industrijske vode, koja je tema ovog rada, ogleda se u tome što se teži razdvajanju tretmana i primeni specifičnih postupaka kojima je moguće efikasno rešiti problem zagađenja.

### 2 Mikroreaktorski sistemi

Upotreba mikroreaktorskih sistema za procese prečišćavanja otpadne industrijske vode nije uobičajena za ove svrhe iako postoje brojne prednosti njihove primene koje će u radu biti prikazane. Smanjenje dimenzija reaktorskih sistema pruža mnoge prednosti u odnosu na konvencionalne reaktore standardnih dimenzija. Mikroreaktore karakteriše veliki odnos površine i zapremine što omogućava brži i efikasniji prenos mase i toplote uz bolju kontrolu parametara procesa.

Mikroreaktori su reaktorski sistemi izgrađeni od mikrokanala dimenzija 10-500  $\mu\text{l}$  sa odnosom površine i zapremine od 10.000 do 50.000  $\text{m}^2/\text{m}^3$ . Mikroreaktori mogu biti izrađeni u obliku čipa

---

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



(slika 1) ili pločica sa urezanim kanalima (slika2) a mogu se izraditi kao kapilarini većih dimenzija. Reaktori u obliku pločica se prave od stakla, silikona, poli-dimetilsiloksana ili poli-metil-metakrilata. Reaktori u obliku kapilara izrađuje se od nerđajućeg čelika ili hemijski otpornih polimera visokih performansi.



Slika 1. Mikroreaktori u obliku pločica



Slika 2. Cevni mikroreaktori

### 3 Pregled tretmana otpadne industrijske vode u mikroreaktorskim sistemima

Otpadne industrijske vode zbog svog sadržaja predstavljaju značajan problem koji je neophodno što pre rešiti na efikasan način. Primena mikroreaktorskih sistema pruža nove mogućnosti za postizanje željenog cilja kao što je prikazano u daljem tekstu.

Istraživanje Guihua Dong i saradnika o mogućnosti primene unapređenih procesa oksidacije u mikroreaktorskih sistema dalo je zaključke o razvoju, mogućnostima i izazovima sa kojima se proces susreće ukoliko se izvodi u sistemima ove vrste [1]. Unapređeni oksidativni procesi se uobičajeno primenjuju u tehnikama uklanjanja zagađujućih materija iz vode. Predmetni rad se bavi primenom ovih procesa u mikroreaktorskim sistemima. Primena mikroreaktorskih sistema AOP potvrđuje da mikrofluidna tehnologija poboljšava prenos mase i efikasnost tretmana a smanjuje potrošnju energije i hemikalija pa samim tim i ukupnu cenu tehnološkog procesa. Dok je tehnologija mikrostrukturnih reaktora još u fazi razvoja, ovaj rad nudi uvid u buduća istraživanja i mogućnosti razvoja unapređenih procesa oksidacije u mikroreaktorskim sistemima. Uopšteno govoreći, pri projektovanju AOP mikroreaktorskih sistema trebalo bi voditi računa o materijalima, tehnikama izrade i konfiguraciji mikrokanala odnosno odnosu dimenzija i debljini zidova reaktora. Karakteristike koje omogućavaju efikasan prenos mase, kontrolisanu brzinu protoka i dovoljnu količinu kiseonika neophodnog za oksidaciju važni su parametri o kojima je potrebno voditi računa. Kada je reč o elektrohemijским mikroreaktorima, njihove dimenzije bi trebalo optimizovati tako da glavne reakcione zone ne budu udaljene od elektroda. Pored toga, dimenzije komora u mikroreaktoru trebalo bi minimizovati. Sisteme koji se projektuju za izvođenje gasno tečnih AOP (kao što su ozoniziranje i plazma-fazni procesi) trebalo bi projektovati na način da imaju što veću međufaznu površinu što se može postići dodavanjem hidroporne ispune. Zaključeno je da mikroreaktorski sistemi sa svojim velikim unutrašnjim specifičnim površinama i minimalnom potrošnjom energije prevazilaze mnoge nedostatke konvencionalnih reaktora koji se uobičajeno koriste za fotolitička, elektrohemijiska Fentonova i ozonska prečišćavanja otpadne komunalne i industrijske vode.

Jedan od važnih problema za koji još uvek nije pronađeno efikasno rešenje je i uklanjanje teških metala iz otpadne industrijske vode. Tako na primer šestovalentni joni hroma predstavljaju opasnost po životni sistem a rezultat su eksploatacije mineralnih resursa, ljudskih i industrijskih aktivnosti.



Teški metal visoke toksičnosti nalazi se u otpadnim vodama iz industrije kao posledica štampanja, bojenja, metalurgije, rudarstva itd. Od svih jona hroma koji se u otpadnoj vodi mogu naći najopasniji je šestovalentni koji je pored toga što je kancerogen, mutagen je i opasan po ljude životinje i životnu sredinu. Metode koje se uobičajeno koriste za uklanjanje ove zagađujuće materije iz vode uključuju hemijsku precipitaciju, jonsku izmenu, membransko odvajanje i elektrolizu. Inovativna metoda uklanjanja jona hroma iz industrijske vode predstavljena je u radu Mehdi Sattari-Najafabadi i Mohsen Nasr Esfahany: „A liquid-liquid microreactor for the intensification of hexavalent chromium removal from wastewaters” [2]. U ovom radu prikazana je mogućnost uklanjanja šestovalentnih jona hroma iz sintetisane otpadne vode u cevnom mikroreaktoru sa „slug flow” tokom. Reakciona smeša sastojala se od vodene i organske faze a mikroreaktorski sistem bio je sastavljen od špric pumpi, kružnog mikrokanala spoljašnjeg prečnika 0,7 mm i T miksera. Primenjeni kapilarni mikroreaktori bili su unutrašnjeg prečnika  $0,41 \pm 0,01$ ;  $0,73 \pm 0,01$  i  $1,03 \pm 0,05$  mm. Izdvajanje hroma je bilo poboljšano smanjenjem prečnika mikrokanala pri konstantnoj ukupnoj brzini strujanja. Zaključak primenjenog istraživanja je da je uklanjanje šestovalentnog hroma iz otpadnih voda značajno olakšano u mikroreaktorskom sistemu primenom „slug flow” uz dodatak čestica silicijum dioksida. Izvođenje tehnološkog postupka prečišćavanja na ovaj način dovodi do očuvanja životne sredine i značajnog smanjenja toškova procesa prečišćavanja.

Podzemna voda koja se prilikom ekstrakcije podzemnog gasa i nafte ekstrahuje naziva se „proizvedena voda”. Za većinu naftnih polja u svetu, zapreminski odnos izvučene mešavine je 3:1 u korist vode. Mikroreaktorske sisteme je moguće primeniti i u procesima uklanjanja organskih zagađujućih materija iz „proizvedene vode” sa gasnih polja. Istraživanja Sadegh Ebadija i saradnika prikazanih u radu „COD removal from gasfield produced water using photoelectrocatalysis process on coil type microreactor” [3] bavila su se katalitičkim i fotokatalitičkim procesima prečišćavanja „proizvedene vode” u mikroreaktorskom sistemu. Primenjen je poseban tip reaktora sa visokim odnosom površine i zapremine kako bi se proces poboljšao u što većoj meri. „Proizvedena voda” analizirana je pomoću GC-MS i rezultati su pokazali da se u ovoj otpadnoj vodi nalazi više od 50 organskih materija te su hemijska potrošnja kiseonika i ukupne rastvorene materije bili fokus istraživanja. Glavni cilj bio je pronalaženje odgovarajućeg procesa prečišćavanja pomoću koga bi kvalitet prečišćene „proizvedene vode” bilo moguće dovesti na nivo koji odgovara kvalitetu vode za potrebe poljoprivrednog navodnjavanja. Zaključeno je da je korišćenjem mikroreaktorskog sistema koji je bio predmet istraživanja moguće smanjiti pH vrednost „proizvedene vode” od alkalne do kisele sredine. Zaključeno je da efikasnost smanjenje HPK vrednosti za 77,87% ili 81% u zavisnosti od primenjenih uslova.

Otpadne vode tekstilne industrije predstavljaju ozbiljan problem u očuvanju životne sredine i neprestano se koncipiraju nove tehnike i unapređuju postojeće. Istraživanje Amirreza Talaiekhosani i saradnika se takođe bavi ovom temom u radu „Combination of  $\text{TiO}_2$  microreactor and electroflotation for organic pollutant removal from textile dyeing industry wastewater” [4]. Fotokatalitička degradacija boja je tehnika koja se često koristi u procesima razgradnje organskih zagađujućih materija u otpadnim vodama za razliku od kombinacije fotokatalitičke aktivnosti  $\text{TiO}_2$  i elektroflotacije primenjene u predmetnom istraživanju. U istraživanju je primenjeno pet vrsta mikroreaktorskih sistema i uspeh izvedenih reakcija smanjenja HPK vrednosti tretirane otpadne vode iz tekstilne industrije su upoređeni. Korišćeni mikroreaktorski sistemi su: Florescent, Florescent/ $\text{TiO}_2$ , UV, UV/ $\text{TiO}_2$  and UV/ $\text{TiO}_2$ /Elektroflotacija. Primena sistema UV, UV/ $\text{TiO}_2$  and UV/ $\text{TiO}_2$ /Elektroflotacija uspešno smanjuje HPK vrednost nakon tretmana otpadne vode tekstilne industrije i to najveću efikasnost nakon 60 minuta trajanja reakcije. Postignuti uspesi smanjenja HPK vrednosti su 91,5, 97,0 i 97,5% respektivno. Zaključeno je da korišćenje kombinacije UV/ $\text{TiO}_2$ /Elektroflotacija može značajno doprineti uspehu smanjenja HPK vrednosti i da je ova kombinacija predstavlja metodu koja obećava.

Istraživanje grupe autora Milice Svetozarević [5] za cilj je imao da smanji jaz između procesa projektovanih na inovativan način korišćenjem mikroreaktorskih sistema i enzimskih tehnologija koje se uobičajeno koriste. U ovom istraživanju korišćen je otpad od prerade soje i krompira kao izvor enzima peroksidaze u slobodnom i imobilisanom obliku za biorazgradnju boje iz otpadne vode tekstilne industrije koja je sadržala visoke koncentracije boje. Pokazano je da je prečišćavanje ove vrste

otpadne vode u mikroreaktorskom sistemu moguće izvesti sa velikim uspehom korišćenjem mikroreaktora prečnika 0,5 mm i dužine 6 m. Visoka efikasnost biorazgradnje od 95 i 76% postignuta je primenom peroksidaze iz soje i krompira za samo 3 minuta trajanja reakcije. Zaključeno je da jeftini agroindustrijski materijali koji se koriste kao izvor enzima povećavaju potencijalnu upotrebu enzima u industrijskom obimu. Implementacija mikroreaktora za biorazgradnju boje pokazala se izvodljivom tehnologijom kojom je moguće ostvariti visoki procenat biorazgradnje u kratkom vremenskom periodu.

Istraživanje grupe autora Dajić i saradnici [6] za cilj je imalo ispitivanje mogućnosti uklanjanja boje iz simulirane otpadne vode iz tekstilne industrije opterećene reaktivnom bojom kao zagađujućom materijom. Korišćeno sredstvo za obezbojavanje nije bašpreporučeno koristiti zbog svoje štetnosti ali je otpadna voda uspešno prečišćena u mikroreaktorskom sistemu na način da se njen kvalitet dovede na nivo da je takvu vodu moguće direktno ispustiti u vodoprijemnike. Prečišćavanje iste vode u šaržnim sistemima nije bilo moguće izvesti sa istim uspehom i tako dobijena prečišćena otpadna voda trebalo bi da se tretira dodatnim tehnološkim postupcima pre ispuštanja u vodoprijemnike. Izvođenje procesa u mikroreaktorskim sistemima dalo je značajno bolje rezultate prečišćavanja uzimajući u obzir bilo koju kombinaciju prečnika i dužine mikroreaktorskog sistema, molarnog odnosa i brzine proticanja reakcione smeše u odnosu na šaržni sistem.

#### 4 Zaključak

Izvođenje tehnoloških procesa u mikroreaktorskim sistemima je još uvek novina koja se istražuje. Smatra se da su mikroreaktorski sistemi kontaktori nove generacije koji obezbeđuju veliku međufaznu površinu i karakterišu ih procesi sa visokim koeficijentima prenosa mase te su reakcije koje se odvijaju u sistemima ove vrste daleko uspešniji od procesa koji se odvijaju u šaržnim sistemima. Prikazane su mogućnosti primene različitih vrsta mikroreaktorskih sistema i mogućnosti primene različitih postupaka prečišćavanja (od AOP do bioloških) u njima uz zaključak da se reakcije u mikroreaktorskim sistemima odvijaju sa više uspeha u odnosu na uobičajeno korišćene šaržne sisteme.

#### 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 451-03-68/2022-14/200287 i 451-03-68/2022-14/200135.

#### 6 References

- [1] Dong G., Chen B., Liu B., Hounjet L.J., Cao Y., Stoyanov S.R., Yang M., Zhang B., Advanced oxidation processes in microreactors for water and wastewater treatment: Development, challenges, and opportunities, *Water Research*, Volume 211, 2022, 118047, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118047>.
- [2] Sattari-Najafabadi M., Nasr Esfahany M., A liquid-liquid microreactor for the intensification of hexavalent chromium removal from wastewaters, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 9, Issue 6, 2021, 106543, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106543>.
- [3] Ebadi S., Ghasemipannah K., Alaie E., Rashidi A., Khataee A., COD removal from gasfield produced water using photoelectrocatalysis process on coil type microreactor, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volume 98, 2021, Pages 262-269, ISSN 1226-086X, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.045>.
- [4] Talaiekhosani A., Mosayebi M. R., Fulazzaky M. A., Eskandari Z., Sanayee R., Combination of TiO<sub>2</sub> microreactor and electroflotation for organic pollutant removal from textile dyeing industry wastewater, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 59, Issue 2, 2020, Pages 549-563, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.052>, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820300533>)
- [5] Svetozarević M., Šekuljica N., Onjia A., Barać N., Mihajlović M., Knežević-Jugović Z., Mijin D., Biodegradation of synthetic dyes by free and cross-linked peroxidase in microfluidic reactor, *Environmental Technology & Innovation*, Volume 26, 2022, 102373, ISSN 2352-1864, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102373>.
- [6] Dajić, A., Mihajlović, M., Mandić-Rajčević, S., Mijin D., Jovanović M., Jovanović J., Improvement of the Textile Industry Wastewater Decolorization Process Using Capillary Microreactor Technology, *International Journal of Environmental Research* (2019), 13: 213- 222, (ISSN: 1735-6865; IF(2018)=1,488; 180/251 *Environmental Science*; doi: 10.1007/s41742-018-0162-3).