



UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO
ASSOCIATION FOR WATER TECHNOLOGY AND SANITARY ENGINEERING

UDRUŽENJE VODOVODA I KANALIZACIJE SRBIJE
WATERWORKS AND SEWERAGE ASSOCIATION OF SERBIA

INSTITUT ZA HEMIJU, TEHNOLOGIJU I METALURGIJU
INSTITUTE OF CHEMISTRY, TECHNOLOGY AND METALLURGY

u saradnji sa
in cooperation with

PRIVREDNOM KOMOROM SRBIJE
CHAMBER OF COMMERCE AND INDUSTRY OF SERBIA

GRADOM KRAGUJEVAC
CITY OF KRAGUJEVAC

i
and

JKP VODOVOD I KANALIZACIJA KRAGUJEVAC
PUBLIC COMMUNAL COMPANY
WATERWORKS AND SEWERAGE KRAGUJEVAC

KONFERENCIJA
**OTPADNE VODE,
KOMUNALNI ČVRSTI OTPAD
I OPASAN OTPAD**

*CONFERENCE
WASTE WATERS,
MUNICIPAL SOLID WASTES
AND HAZARDOUS WASTES*



02 – 04. april 2019. godine KRAGUJEVAC – Hotel Šumarice
2nd – 4th April 2019 KRAGUJEVAC – Hotel Šumarice

UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO
ASSOCIATION FOR WATER TECHNOLOGY AND SANITARY ENGINEERING

UDRUŽENJE VODOVODA I KANALIZACIJE SRBIJE
WATERWORKS AND SEWERAGE ASSOCIATION OF SERBIA

INSTITUT ZA HEMIJU, TEHNOLOGIJU I METALURGIJU
INSTITUTE OF CHEMISTRY, TECHNOLOGY AND METALLURGY

*u saradnji sa
in cooperation with*

PRIVREDNOM KOMOROM SRBIJE
CHAMBER OF COMMERCE AND INDUSTRY OF SERBIA

GRADOM KRAGUJEVAC
CITY OF KRAGUJEVAC

*i
and*

JKP VODOVOD I KANALIZACIJA KRAGUJEVAC
PUBLIC COMMUNAL COMPANY
WATERWORKS AND SEWERAGE KRAGUJEVAC

Konferencija

**OTPADNE VODE, KOMUNALNI ČVRSTI OTPAD
I OPASAN OTPAD**

Conference

**WASTE WATERS, MUNICIPAL SOLID WASTES
AND HAZARDOUS WASTES**

02–04. april 2019. godine KRAGUJEVAC – Hotel Šumarice
2nd–4th April 2019 KRAGUJEVAC – Hotel Šumarice

Izdavač
UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE
I SANITARNO INŽENJERSTVO
Beograd, Terazije 23/II/203

Za izdavača
Predsednik U.O. Udruženja
Predrag Bogdanović, dipl.inž.grad.

ORGANIZACIONI ODBOR
ORGANIZING COMMITTEE
Anđa Marjanović, dipl.inž.tehn., predsednik

IZVRŠNO - REDAKCIONI ODBOR
EXECUTIVE - EDITORIAL COMMITTEE

Prof. dr Zagorka Tamaš, dipl.hem., predsednik
Prof. dr Milena Bečelić – Tomin, dipl.hem.
Dr Milka Vidović, dipl.inž.tehnol.
Doc. dr Vladana Rajaković – Ognjanović, dipl.inž.tehnol.
Prof. dr Goran Vujić, dipl.inž.maš.
Prof. dr Gordana Stefanović, dipl.inž.tehnol.
Doc. dr Hristina Stevanović Čarapina, dipl.inž.tehnol.
Gordana Perović, dipl.inž.tehnol.
Zoran Marinković, dipl.inž.grad.
Dr Vladimir Pavićević, dipl.inž.tehnol.
Boris Mičić, dipl.inž.maš.

Tiraž
200 primeraka

ISBN-978-86-82931-86-7

Kompjuterska priprema
Zoran Dimić, Beograd

Štampa
PLANETA PRINT d.o.o.
Beograd

Godina izdavanja
2019.

СРР - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд

628.3/.4(082)
502/504(082)

КОНФЕРЕНЦИЈА Отпадне воде, комунални чврсти отпад и опасан отпад (49 ; 2019 ; Крагујевац)

Konferencija Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, 02-04. april 2019. godine Kragujevac / [organizatori] Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo ... [et al.] = Conference Waste Waters, Municipal Solid Wastes and Hazardous Wastes, 2nd-4th April 2019 Kragujevac / [organized by] Association for Water Technology and Sanitary Engineering ... [et al.]. - Beograd : Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, 2019 (Beograd : Planeta Print). - 218 str. : ilustr. ; 25 cm

"... Udruženje ... organizuje 49. konferenciju 'Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad'". -> Predgovor. - Tiraž 200. - Bibliografija uz većinu radova. - Abstracts.

ISBN 978-86-82931-86-7

1. Удружење за технологију воде и санитарно инжењерство (Београд)
а) Отпадне воде - Зборници б) Отпадне материје - Зборници в) Опасне материје - Зборници д) Животна средина - Заштита - Зборници
COBISS.SR-ID 275058444

ORGANIZATORI KONFERENCIJE

UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO
ASSOCIATION FOR WATER TECHNOLOGY AND SANITARY ENGINEERING

UDRUŽENJE VODOVODA I KANALIZACIJE SRBIJE
WATERWORKS AND SEWERAGE ASSOCIATION OF SERBIA

INSTITUT ZA HEMIJU, TEHNOLOGIJU I METALURGIJU
INSTITUTE OF CHEMISTRY, TECHNOLOGY AND METALLURGY

u saradnji sa
in cooperation with

PRIVREDNOM KOMOROM SRBIJE
CHAMBER OF COMMERCE AND INDUSTRY OF SERBIA

GRADOM KRAGUJEVAC
CITY OF KRAGUJEVAC

i
and

JKP VODOVOD I KANALIZACIJA KRAGUJEVAC
PUBLIC COMMUNAL COMPANY
WATERWORKS AND SEWERAGE KRAGUJEVAC

POD POKROVITELJSTVOM UNDER THE PATRONAGE OF

MINISTARSTVO ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE
REPUBLIKE SRBIJE
MINISTRY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION REPUBLIC OF SERBIA

MINISTARSTVO POLJOPRIVREDE, ŠUMARSTVA I VODOPRIVREDE
REPUBLIKE SRBIJE
MINISTRY OF AGRICULTURE, FORESTRY AND WATER MANAGEMENT
REPUBLIC OF SERBIA

MINISTARSTVO PROSVETE, NAUKE I TEHNOLOŠKOG RAZVOJA
REPUBLIKE SRBIJE
MINISTRY OF EDUCATION, SCIENCE AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT
REPUBLIC OF SERBIA

SADRŽAJ

A. OTPADNE VODE WASTE WATERS

1. STANDARDI KVALITETA OSTATAKA (MULJA) NAKON
PREČIŠAVANJA GRADSKIH
OTPADNIH VODA
*QUALITY STANDARDS FOR RESIDUES (SLUDGE) AFTER URBAN
WASTEWATER TREATMENT*
**Milena Bečelić-Tomin, Božo Dalmacija, Vesna Pešić, Dejan Krčmar,
Đurđa Kerkez, Anita Leovac Mačerak..... 3**

2. KRUŽNA EKONOMIJA I PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA
CIRCULAR ECONOMY AND WASTEWATER TREATMENT
Dragan B. Milićević, Denisa Đorđević..... 10

3. ZNAČAJ ANALIZE PRITISAKA I UTICAJA I PROCENE RIZIKA
ISPUŠTANJA OTPADNIH VODA
*SIGNIFICANCE OF THE PRESSURE AND IMPACT ANALYSIS AND
ASSESSMENT OF THE RISK OF WASTE WATER DISCHARGE*
**Vesna Pešić, Milena Bečelić-Tomin, Božo Dalmacija, Dejan Krčmar,
Đurđa Kerkez 17**

4. UKLANJANJE TEŠKIH METALA IZ OTPADNE VODE
ELEKTROKOAGULACIJOM
*REMOVAL OF HEAVY METALS FROM WASTEWATER BY
ELECTROCOAGULATION*
Vladana N. Rajaković-Ognjanović..... 24

5. SOFTVER ZA UPRAVLJANJE LABORATORIJSKIM PROCESIMA U JKP
BEOGRADSKI VODOVOD I KANALIZACIJA
*SOFTWARE FOR MANAGING LABORATORY PROCESSES IN PUC
BELGRADE WATERWORKS AND SEWERAGE*
Jelena Vukić, Jovana Mirosavljević 30

6. KONTROLA KVALITETA ANALIZE ANJONA U OTPADNIM
VODAMA
QUALITY CONTROL OF THE ANALYSIS ANIONS IN WASTEWATER
Darko Petrović, Zlatko Striković, Tatjana Komadinić 34

7. PROBLEMATIKA USAGLAŠAVANJA ROKOVA ZA DOSTIZANJE
GRANIČNIH VREDNOSTI EMISIJE OTPADNIH VODA
*THE PROBLEMS FOR HARMONIZATION OF DEADLINES FOR
ACHIEVING LIMIT VALUES OF WASTE WATER EMISSIONS*
Branimir Kostić, Marija Ilić 39

8. DUGOROČNO REŠENJE TRETMAŃA PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH
VODA PROCESA POVRŠINSKE ZAŠTITE MATERIJALA
*LONG-TERM SOLUTION OF WASTEWATER TREATMENT OF
PROCESS FOR MATERIALS SURFACE PROTECTION*
Aleksandar M. Đorđević, Dragana Marković 44

9. SPECIFIČNO ZAGAĐENJE POVRŠINSKIH VODA IZ TRETMAŃA
KOMUNALNIH OTPADNIH VODA U EVROPSKOJ UNIJI
*SPECIFIC CONTAMINATION OF SURFACE WATERS FROM URBAN
WASTE WATER TREATMENT IN EUROPEan UNION*
Vladimir Pavićević, Nebojša Veljković, Ana Popović 49

10. KARAKTERIZACIJA KOMUNALNIH OTPADNIH VODA GRADSKIH
IZLIVA NA TERITORIJI NOVOG SADA
*CHARACTERIZATION OF MUNICIPAL WASTEWATERS FROM SEWER
DRAINAGE SYSTEM IN THE TERRITORY OF NOVI SAD*
**Anita Leovac Maćerak, Milena Bećelić-Tomin, Đurđa Kerkez, Dejan
Krčmar, Vesna Pešić, Marko Grgić, Aleksandra Kulić Mandić,
Božo Dalmacija** 54

11. SANACIJA MALIH OVALNIH PROFILA U KANALIZACIONOJ MREŽI
U PRAGU
*REINSTATEMENT OF SMALL EGG-SHAPED PROFILES
IN THE PRAGUE SEWAGE SYSTEM*
Michaela Stehlíková 59

13. POSTROJENJE ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA GRADA KRUŠEVCA
WASTEWATER TREATMENT PLANT OF THE CITY OF KRUŠEVAC
Milutin Tasić, Miroslav Milosavljević..... 66
13. POSTROJENJE ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA „BUTILA“ SARAJEVO
THE WASTE WATER TREATMENT PLANT „BUTILA“ SARAJEVO
Ahmed Busuladžić, Aljoša Dizdarević..... 71
14. UKLANJANJE AZOTA I FOSFORA IZ OTPADNIH VODA
REMOVAL OF NITROGEN AND PHOSPHORUS FROM WASTEWATER
Danica Krivokapić..... 76
15. PREGLED RIZIKA I ŠTETNOSTI PO OSOBLJE U KONTAKTU SA OTPADNOM VODOM IZ KANALIZACIONOG SISTEMA
REVIEW OF OCCUPATIONAL RISKS AND HAZARDS FOR WORKERS IN CONTACT WITH RAW SEWAGE WATER
Maja Sremački, Ivana Mihajlović, Maja Petrović, Jovana Bondžić, Bojana Stanić, Mirjana Vojinović Miloradov 81
16. KRUŽNA EKONOMIJA – OTPADNA VODA OD OTPADA DO RESURSA
CIRCULAR ECONOMY - WASTEWATER FROM WASTE TO RESOURCE
Denisa Đorđević , Dragan B. Milićević..... 86
17. PRAŽNENJE I PONOVO PUŠTANJE U RAD ANAEROBNOG DIGESTORA NA PPOV U SUBOTICI
CLEANING AND RE-COMMISSIONING AN ANAEROBIC DIGESTER ON THE WWTP IN SUBOTICA
Isić Biljana..... 91
18. UTICAJ TEHNOLOŠKE VODE IZ KONDICIONIRANJA PIJAĆE VODE NA KVALITET DIGESTOVANOG-STABILIZOVANOG MULJA
THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL WASTEWATER FROM THE CONDITIONING OF DRINKING WATER ON THE QUALITY OF THE DIGESTED-STABILIZED SLUDGE
Gelert Gligor, Vjekoslav Kezić..... 94
19. UPRAVLJANJE OTPADNIM MULJEM OD PROCESA PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA NA CPPOV „CVETOJEVAC“
WASTE SLUDGE MANAGMENT FROM WASTEWATER TREATMENT PROCESS IN CW_wTP “CVETOJEVAC”
Jelena Bekonja-Milošević, Aleksandra Marinković-Radulović..... 99

20. REVITALIZACIJA LINIJE GASA I PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA C.P.P.O.V. "CVETOJEVAC"
 REVITALIZATION OF THE GAS LINE AND PRODUCTION OF ELECTRICITY ON C.W.W.T.P. "CVETOJEVAC"
Ivan Bogdanović, Dragan Kočet, Vladimir Stevanović..... 104
21. MOGUĆNOST DEHIDRATACIJE MULJA U SOILTAIN DW TUBAMA I SKLADIŠTENJE POD KONTROLISANIM USLOVIMA DO KONACNE DISPOZICIJE
 POSSIBLE USE OF SOILTAIN DW TUBES FOR SLUDGE DEWATERING AND CONTAINEMENT IN A CONTROLLED MANNER TILL PERMANENT DISPOSAL
Marija Bakrač, Gordana Perović, Markus Wilke..... 109
22. NOVA MODIFIKOVANA SINTEZA BIO-ADSORBENSA: POROZNIH MIKROSFERA AMINO-MODIFIKOVANOG LIGNINA
 NEW TAILORED SYNTHESIS OF A NOVEL BIO-ADSORBENT: AMINO-MODIFIED LIGNIN BASED HOLLOW MICROSPHERES
Ana Popović, Jelena Rusmirović, Maja Đolić, Zlate Veličković, Aleksandar Marinković, Vladimir Pavićević..... 114
23. SORPCIJA PESTICIDA LINURONA IZ VODENOG RASTVORA PRIMENOM AKTIVNOG UGLJA PRIPREMLJENOG OD OTPADA OD KAFE
 SORPTION OF LINURON PESTICIDE FROM AQUEOUS SOLUTION USING ACTIVATED CHARCOAL PREPARED FROM COFFEE WASTE
Mihajlović Ivana, Hgeig Ali, Novaković Mladenka, Petrović Maja, Obrovski Boris, Sremački Maja, Vojinović Miloradov Mirjana..... 119
24. UKLANJANJE EMERGENTNOG IBUPROFENA IZ VODENOG RASTVORA PRIMENOM NANOMATERIJALA ZnO/In₂O₃
 REMOVAL OF EMERGING IBUPROFEN FROM AQUEOUS SOLUTION BY NANOMATERIAL OF ZnO / In₂O₃
Novaković Mladenka, Štrbac Dragana, Petrović Maja, Bežanović Veselin, Mihajlović Ivana, Štrbac Goran, Vojinović Miloradov Mirjana 124
25. ANTIMIKROBNO DEJSTVO PRIRODNOG ZEOLITA AKTIVIRANOG JONIMA METALA SREBRA, BAKRA I CINKA
 ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF NATURAL ZEOLITE ACTIVATED BY SILVER, COPPER AND ZINK IONS
Maja Đolić, Ljiljana Janković-Mandić, Aleksandar Jovanović, Aleksandar Marinković, Vladimir Pavićević, Vladana Rajaković-Ognjanović..... 129

B. KOMUNALNI ČVRSTI OTPAD MUNICIPAL SOLID WASTES

1. EDUKACIJA RADNIKA NA DEPONIJU U OBLASTI ZDRAVLJA I
BEZBEDNOSTI NA RADU, KAO I PROFESIONALNOM
OSPOSOBLJAVANJU
*HEALTH AND SAFETY, AND PROFESSIONAL EDUCATION PROGRAM
FOR LANDFILL'S WORKER*
Bojana Tot, Miodrag Živancev, Dušan Milovanović, Goran Vujić 137
2. ZAŠTITA LJUDSKOG ZDRAVLJA I UPRAVLJANJE OTPADOM
PROTECTION OF HUMAN HEALTH AND WASTE MANAGEMENT
**Nemanja Stanisavljević, Svjetlana Vujović, Nikolina Tosić,
Bojan Batinić, Dejan Ubavin, Goran Vujić 144**
3. CIRKULARNA EKONOMIJA KAO NOVI KONCEPT ZAŠTITE
ŽIVOTNE SREDINE
*CIRCULAR ECONOMY AS A NEW CONCEPT OF ENVIRONMENTAL
PROTECTION*
Aleksandra Vučinić 145
4. TGVS – SEPARACIJA OTPADA I NJEGOVO ISKORIŠĆENJE
TGVS – WASTE SEPARATION AND UTILISATION
Slobodan Arandelović, Ivan Čiča 151
5. POTENCIJALI ZA RECIKLAŽU OTPADNIH MATERIJALA IZ
KOMUNALNOG ČVRSTOG OTPADA
*POTENTIALS FOR THE RECYCLING OF WASTE MATERIALS FROM
MUNICIPAL SOLID WASTE*
Brankica Luković, Vahid Ibrulj, Ljiljana Plečević 154
6. MOGUĆNOSTI POSTOJEĆIH KAPACITETA ZA SANITARNO
ODLAGANJE KOMUNALNOG OTPADA U KIKINDI I LAPOVU U
CILJU SPROVOĐENJA ODLUKE VLADE REPUBLIKE SRBIJE
*POSSIBILITIES OF EXISTING CAPACITIES FOR SANITARY DISPOSAL
OF MUNICIPAL WASTE IN KIKINDA AND LAPOVO AIMED AT
IMPLEMENTING THE REPUBLIC OF SERBIA GOVERNMENT'S
DECISION*
**Aleksandra Simić, Bojan Marković, Dimitrije Marinković,
Gordana Perović 158**

7. PRIKAZ DOSADAŠNJIH PROJEKTNIH AKTIVNOSTI NA EPC
UGOVORU O IZGRADNJI NOVE I SANACIJI POSTOJEĆE DEPONIJE
VINČA U BEOGRADU
*REVIEW OF PROJECT ACTIVITIES AT EPC CONTRACT FOR
CONSTRUCTION OF NEW LANDFILL AND REMEDIATION OF AN
EXISTING LANDFILL IN VINCA – BELGRADE*
Zoran Marinković..... 163
8. MONITORING PODZEMNIH VODA U ZONI "REGIONALNE
SANITARNE KOMUNALNE DEPONIJE PIROT"
*MONITORING OF GROUNDWATER IN THE AREA "REGIONAL
SANITARY MUNICIPAL LANDFILL PIROT"*
Milovan Rakijaš..... 170
9. SAVREMENE TEHNIKE KONTROLE KVALITETA PODZEMNIH
VODA U ZONI REGIONALNE DEPONIJE U PIROTU
*MODERN TECHNIQUES OF GROUNDWATER QUALITY CONTROL IN
THE REGIONAL LANDFILL AREA IN PIROT*
Nenad Đorđević..... 175
10. MONITORING PODZEMNIH VODA I ZEMLJIŠTA NA NEUREĐENOJ
KOMUNALNOJ DEPONIJI
*MONITORING OF GROUNDWATER AND SOIL AT UNREGULATED
MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL*
**Slaven Tenodi, Dejan Krčmar, Srđan Rončević, Kristiana Zrnić,
Tamara Apostolović, Božo Dalmacija**..... 180

C. OPASAN OTPAD **HAZARDOUS WASTES**

1. UPRAVLJANJE KONTAMINIRANIM SEDIMENTIMA – POLITIKA
ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE I ZAKONODAVSTVO
*CONTAMINATED SEDIMENT MANAGEMENT –ENVIRONMENTAL
POLICY AND LEGISLATION*
Hristina Stevanović Čarapina 187
2. REMEDIJACIONI POTENCIJAL UGLJENIČNIH LOW-COST
MATERIJALA DOBIJENIH HIDROTERMALNOM KARBONIZACIJOM
OTPADNE BIOMASE
*REMEDICATION POTENTIAL OF LOW-COST CARBON MATERIALS
DERIVED BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION OF WASTE
BIOMASS*
**Snežana Maletić, Marijana Kragulj Isakovski, Srđan Rončević,
Marija Mihajlović, Jelena Petrović, Jasmina Agbaba**..... 193

3. **EFIKASNOST STABILIZACIJE MULJA ZAOSTALOG NAKON
TRETMANA OTPADNIH VODA UZ UPOTREBU ZEOLITA, KREČA I
LETEĆEG PEPELA**
*STABILIZATION EFFICIENCY OF THE SLUDGE AS A RESIDUE AFTER
WASTEWATER TREATMENT WITH THE USE OF ZEOLITE, LIME AND
FLY ASH*
**Durda Kerkez, Milena Bečelić-Tomin, Dragana Tomašević Pilipović,
Nataša Slijepčević, Anita Leovac Maćerak, Božo Dalmacija 200**
4. **PRIMENA NANOMATERIJALA ZA STABILIZACIJU
KONTAMINIRANOG SEDIMENTA BEGEJA**
*APPLICATION OF NANOMATERIAL FOR STABILIZATION OF
CONTAMINATED BEGEJ SEDIMENT*
**Nataša Slijepčević, Dragana Tomašević Pilipović, Đurđa Kerkez,
Jovana Jokić, Milena Bečelić-Tomin, Božo Dalmacija 205**
5. **MID-MIX® - TEHNOLOGIJA ZA TRETMAN OTPADNIH MULJEVA**
MID-MIX® - TECHNOLOGY FOR TREATMENT OF WASTE SLUDGES
Slobodan Arandelović, Ivan Čiča 210
6. **UPRAVLJANJE PCB OPREMOM I OTPADOM U
ELEKTROENERGETSKIM POSTROJENJIMA**
*MANAGEMENT OF PCB EQUIPMENT AND WASTE IN ELECTRIC
POWER FACILITIES*
Bojan Ranković, Branka Marinković, Nebojša Tomašević 214

REMEDIJACIONI POTENCIJAL UGLJENIČNIH LOW-COST MATERIJALA DOBIJENIH HIDROTERMALNOM KARBONIZACIJOM OTPADNE BIOMASE

dr Snežana Maletić¹, dr Marijana Kragulj Isakovski¹, dr Srđan Rončević¹,
dr Marija Mihajlović², dr Jelena Petrović², dr Jasmina Agbaba¹

¹Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet

²Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina

e-mail: snezana.maletic@dh.uns.ac.rs

Rezime

U cilju razvoja održivih metoda sekvestracije organskih polutanata u sedimentu primenom ugljeničnih „low-cost“ materijala, biomase rezanca šećerne repe (R) i miskantusa (M) su konvertovane hidrotermalnom karbonizacijom na tri temperature (180°C, 200°C, 220°C). Kao predstavnici perzistentnih organskih polutanata izabrani su pentahlorbenzen (PeCB), heksahlorbenzen (HCB). Šaržni testovi imobilizacije organskih polutanata u sedimentu sprovedeni su primenom tri doze produkovanih materijala (1%, 5% i 10%), kao i ispitivanjem efekta starenja dobijenih smeša nakon tri vremena uravnoteženja (14, 90 i 180 dana). Dobijeni rezultati pokazali su da potencijal primene produkovanih hidročadi značajno zavisi od (1) strukture polazne biomase, (2) procesnih uslova konverzije biomase i (3) fizičko-hemijskih osobina polutanata.

Ključne reči: remedijacija, hidročad, sediment, perzistentni polutanti

REMEDICATION POTENTIAL OF LOW-COST CARBON MATERIALS DERIVED BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION OF WASTE BIOMASS

Abstract

In order to develop sustainable methods for the sequestration of organic pollutants in sediment using carbon low-cost materials, sugar beet (R) and miscanthus (M) biomass were converted by hydrothermal carbonization at three temperatures (180°C, 200°C, 220°C). Pentachlorobenzene (PeCB), hexachlorobenzene (HCB) were selected as representatives of persistent organic pollutants. Batch immobilization tests of organic pollutants in sediment were carried out using three doses of the materials produced (1%, 5% and 10%). The effect of aging the resulting mixtures was also tested after 14, 90 and 180 days. The obtained results showed that the remediation potential of the produced hydrochars significantly depends on (1) the structure of the starting biomass, (2) the process conditions for the conversion of biomass, and (3) the physico-chemical properties of the pollutants.

Key words: remediation, hydrochar, sediment, persistent pollutants

UVOD

Akumulacija štetnih i perzistentnih organskih materija u sedimentu je od krucijalnog značaja za životnu sredinu. Remedijacija ovakvog sedimenta i dalje predstavlja tehnološki izazov. Unapređenje remedijacionih tehnologija kontaminiranih lokaliteta za sedimente kontaminirane organskim kontaminantima, u cilju iznalaženja tehničkog rešenja za njihovo prečišćavanje je od ključnog značaja. U toku proteklih nekoliko godina u velikoj meri ispitivana je uloga koju ugljenikom bogati sorbenti dobijeni iz otpadne biomase imaju na sudbinu organskih kontaminanata, kao i na koji način oni mogu biti iskorišćeni za svrhe remedijacije.

S obzirom da poljoprivredna proizvodnja predstavlja važan ekonomski sektor u Republici Srbiji, a naročito u AP Vojvodini, količina nastale otpadne biomase je značajna (oko 13 miliona t/godini). Biomasa je jedan od najperspektivnijih sekundarnih sirovina u svetu, može se primenjivati u različite svrhe npr., za proizvodnju goriva, za svrhu prečišćavanja otpadnih voda remedijaciju sedimenta/zemljišta i sl. Direktna upotreba otpadne biomase je problematična sa više aspekata (efikasnost, konzistencija, stabilnost idr.), pa se biomasa u zavisnosti od njene namene konvertuje u različite produkte kao što su: čađ, ugalj, aktivni ugalj, biočađ i hidročađ. Navedeni produkti predstavljaju rezultat termohemijske konverzije biomase. Proces termohemijske konverzije podrazumevaju primenu: sagorevanja, karbonizacije, pirolize, torefrakcije, gasifikacije i hidrotermalne karbonizacije (HTC).

Tokom HTC upotrebljena sirovina se podvrgava seriji reakcija koje uključuju hidrolizu, dehidraciju, dekarboksilaciju, aromatizaciju i kondenzaciju, pri čemu se dobijaju proizvodi u čvrstom (hidročađ), tečnom (procesna voda) i gasovitom stanju [1]. Komponente lignocelulozne biomase (lignin, celuloza i hemiceluloza) pri HTC uslovima postaju manje stabilne usled čega dolazi do njihove delimične hidrolize. Pored toga, istovremeno sa formiranjem hidročađi, organske komponente razgrađuju na manje, nestabilne fragmente koji se repolimerizuju u uljne komponente sadržane u procesnoj vodi [2]. Dobijena hidročađ je hidrofobna, porozna, sa visokim sadržajem ugljenika i manjim sadržajem kiseonika i vodonika u odnosu na polaznu biomasu [3]. Zahvaljujući svojim fizičko-hemijskim karakteristikama, mogućnost primene hidročađi je velika [1]. Pored korišćenja za proizvodnju toplotne i električne energije, hidročađ se do sada primenjivala za poboljšavanje kvaliteta zemljišta, kao adsorbent, katalizator, za skladištenje energije, sirovina za pelet i dr. [4]. Pored ovoga hidročađi mogu da nađu potencijalnu primenu u remedijaciji zemljišta ili sedimenta zagađenih organskim polutantima. Dodavanje sorbentnog materijala (kao što je hidročađ) u sediment ili zemljište utiče na smanjenje transporta zagađujućih materija [5] putem kombinacije efekta difuzije [6] i sorpcije [7]. Dodatak sorbent materijala može biti ekonomično rešenje za remedijaciju ukoliko je sorbent dostupan u dovoljnim količinama pri niskoj ceni. Međutim, hidročađi mogu pokazati različito ponašanje prilikom remedijacije kontaminiranog zemljišta/sedimenta zbog razlike u fizičko-hemijskim osobinama koje su prvenstveno posledica primene različite polazne biomase i različitih operativnih uslova pripreme hidročađi [8].

U skladu sa nevedenom problematikom ciljevi ovog rada je ispitivanje uticaja polazne biomase i temperature pripreme hidročadi na mogućnosti njene primene kao imobilizacionog agensa u rmedijacione svrhe.

MATERIJAL I METODE

Odabir i priprema geosorbenta. Kao model geosorbenta korišćen je sediment koji je uzorkovan sa lokaliteta Jegričke. Vlažan sediment je nakon uzorkovanja sušen na vazduhu u mraku. Zatim je homogenizovan i prosejan kroz sito promera < 2 mm. Spajkovan je metanolnom smešom pentahlorbenzene (PeCB) i heksahlorbenzena (HCB), a zatim je ostavljen dve nedelje na vazduhu.

Analitičke metode. Analiza PeCB i HCB podrazumevala je primenu tačno-tečne ekstrakcije heksanom na sledeći način: određena zapremina uzorka ekstrahovana je sa 2 ml heksana. Zatim je 0,5 ml ekstrakta preneto u vijal za GC analizu i analizirano primenom gasne hromatografije sa detektorom sa zahvatom elektrona (Agilent Technologies, 6890N).

Produkcija hidročadi. Sinteza svih hidročadi podrazumevala je primenu procedure hidrotermalne karbonizacije na sledeći način: za hidrotermalnu karbonizaciju rezanca šećerne repe i miskantusa korišćen je autoklav zapremine 2000 ml (Deutsch i Neumann, model 10253, proizveden u Nemačkoj). 250 g odgovarajuće biomase mešano je sa 1250 ml destilovane vode, kako bi se obezbedio maseni odnos 1:5. Mešavine su u reaktorima zagrevane brzinom od 2°C/min do 180, 200 i 220°C i zatim na zadatim reakcionim temperaturama održavane tokom 1h, u tri različita ciklusa. Nakon reakcionog perioda, autoklav je ohlađen do sobne temperature (20±0,5°C), zaostali gas je ispušten iz sistema i čvrsti i tečni proizvodi su sakupljeni. Hidročadi su odvojeni od procesnih voda. Hidročadi su ispirane destilovanom vodom nekoliko puta, a potom sušene na 105°C u sušnici tokom 24 h i skladištene u papirne kese do dalje karakterizacije i primene. Na ovaj način su dobijeni materijali koji su označeni kao hidročadi (HTC) i to za rezanac šećerne repe HTC_R 180, 200 i 220°C i za miskantus HTC_M 180, 200 i 220°C.

Ispitivanje stabilizacije/imobilizacijeorganskih polutanata u sedimentu sa odabranim ugljeničnim materijalima. U cilju stabilizacije/imobilizacije odabranih jedinjenja u sediment su aplikovani pripremljeni ugljenični agensi (hidročadi i biougljevi pripremljeni od istih biomasa) u tri različite doze 1%, 5% i 10%. Na početku eksperimenta utvrđeno je nulto stanje bez dodatka sorpcionih agenasa u cilju procene stepena rizika zagađenog sedimenta. Takođe, je praćen uticaj starenja sedimenta sa ugljeničnim agensima u cilju procene uticaja na dalju sekvencijaciju ili deorspciju posmatranih jedinjenja. Uticaj starenja procenjen je nakon 14 dana, 90 dana i 180 dana od dodatka sorpcionih agenasa. U staklene vijale od 40 ml odmereno je po 1 g spajkovanog suvog sedimenta, dodavani su agensi u određenom odnosu i dodato je po 20 ml rastvora HgCl₂ koncentracije 300 mg/l. Ovako pripremljene probe su ostavljene nevedeni vremenski period da stare u mraku uz svakodnevno mešanje. Nakon isteka propisanog vremenakog perioda (14, 90 i 180 dana) u vijale je odmeravana određena masa čvrstog CaCl₂ i 0,2 g XAD-4 makroporozne smole u cilju desorcpcije odabranih jedinjenja sa sedimenta i procene njihove biodostupnosti.

Test fitotoksičnosti. Ispitivanje fitotoksičnosti odabranih polutanata u tretiranom i netretiranom sedimentu određeno je u prisustvu biljke kukuruza (*Zea mays*) Modifikovana metodologija za test fitotoksičnosti preuzeta je od Coulon et al., (2010) [9]. U svaki sud od 100 ml, dodato je oko 8 g suvog sedimenta i 5 semena kukuruza. Probe su ostavljene u mraku, na 25°C da prokljaju (14 dana). Sve probe su redovno zalivane. Nakon 10 dana određen je broj prokljalih semena za svaku vrstu posebno. Rezidualna koncentracija u sedimentu, kao i usvojena količina organskih jedinjenja u nastaloj biomasi, određena je prema gore navedenim metodama.

REZULTATI I DISKUSIJA

Procena biodostupnosti odabranih organskih polutanata u zagađenom sediment. Početna koncentracija pentahlorbenzena i heksahlorbenzena u sedimentu nakon dve nedelje starenja iznosila je redom: 1180 µg/kg i 1140 µg/kg. Procena biodostupne frakcije vršena je jednostepenom desorpcijom ovih jedinjenja u prisustvu XAD-4 smole. Rezultati ukupno desorbovane količine pentahlorbenzena i heksahlorbenzena pokazali su da se veliki udeo prisutnih jedinjenja u sedimentu nalazi u domenu brzo desorbujuće organske materije (69,9% i 65,6% redom). Oslobođanje sa sorbenta je kontrolisano karakteristikama sorbata i sorbenta. Glavne osobine sedimenta koje utiču na oslobađanje polutanata su sadržaj organske materije i gline.

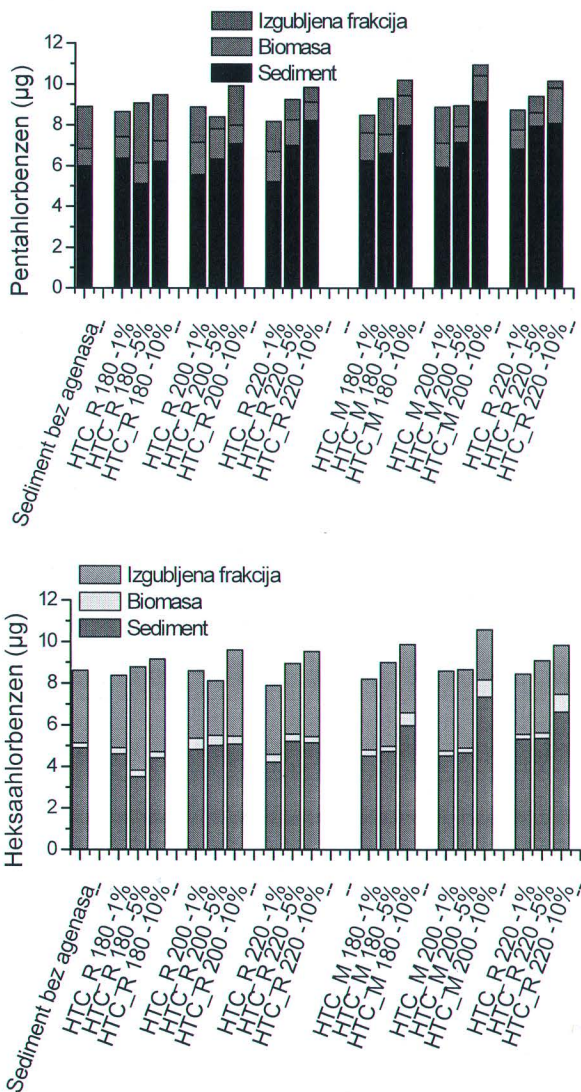
Uticaoj dodatka hidročađi na sekvestraciju odabranih organskih polutanata u sedimentu. Dodatak hidročađi proizvedene od šećernih rezanaca HTC_R 180 za sve primenjene doze, kao i za HTC_R 200 i HTC_R 220 pri dozi manjoj od 10% u prvih dve nedelje dovode do povećanja biodostupnosti pentahlorbenzena (tabela 1). Daljim starenjem smeša dolazi do sekvestracije pentahlorbenzena u smešama, pri čemu veća doza hidročađi dovodi i do veće sekvestracije pentahlorbenzena. Dodatno, sa porastom temperature hidrotermalne karbonizacije do 200°C povećava se efikasnost dobijene hidročađi za sekvestraciju pentahlorbenzena. Nasuprot ovome dodatak hidročađi produkovane od miskantusa samo je u slučaju doze od 1% za HTC_M 180 doveo do trenutnog povećanja biodostupne frakcije pentahlorbenzena. Takođe, u slučaju hidročađi miskantusa proizvedene na temperaturama 200°C i 220°C već pri dozi od 5% i nakon prvog posmatranog vremena uravnoteženja postignuto je maksimalno smanjenje biodostupne frakcije pentahlorbenzena.

Uticao temperature produkovane hidročađi dobijene od šećernih rezanaca kao i njihove primenjene doze na smanjenje biodostupne frakcije heksahlorbenzena uočljiv je jedino nakon 14 dana starenja smeše. Nakon 14 dana starenja može se videti da sa povećanjem temperature produkovane hidročađi kao i da sa povećanjem primenjene doze dolazi do opadanja biodostupne frakcije do 35,6%. Dalje starenje smeša za sve primenjene HTC i sve primenjene doze dovodi do daljeg smanjenja biodostupne frkacije heksahlorbenzena do 22,8%. U slučaju dodatka hidročađi dobijene od biomase miskantusa, takođe, sa porastom temperature pripreme hidročađi kao i sa porastom primenjene doze dolazi do opadanja biodostupne frakcije heksahlorbenzena. Takođe, u slučaju HTC_M daljim starenjem smeša dolazi do smanjenja biodostupne frakcije heksahlorbenzena, s tim da je najveće smanjenje postignuto za HTC_M 220 pri dozi od 10% gde je biodostupna frakcija smanjena na 15,6%.

Tabela 1. Uticaj dodatka hidročadi na sekvestraciju PeCB i HCB u sedimentu
Table 1. Effect of hydrochar amendment on sequestration PeCB and HCB in sediment

Sorbenti	% agensa	Pentahlorbenzen %			Heksahlorbenzen %		
		14 dana	90 dana	180 dana	14 dana	90 dana	180 dana
Sediment bez dodatka materijala	0	62,7	57	55,3	62,1	59,2	59,5
HTC_R 180	1	71,9	55,6	49,9	62,6	46,2	37,3
	5	69,0	52,3	39,6	59,2	35,8	35,9
	10	64,9	45,6	27,3	47,6	31,5	27,1
HTC_R 200	1	86,4	57,6	47,9	75,2	46,1	34,5
	5	69,2	53,0	27,6	56,7	35,4	31,6
	10	53,3	35,6	25,4	49,9	35,1	26,3
HTC_R 220	1	71,1	52,8	49,3	38,6	35,4	36,1
	5	49,2	34,9	24,2	35,8	26,1	24,8
	10	48,6	25,6	25,3	35,6	26,1	22,8
HTC_M180	1	86,4	51,1	39,0	63,3	33,0	28,5
	5	51,5	31,8	27,6	50,6	27,0	25,2
	10	33,4	25,5	17,4	33,2	26,9	24,0
HTC_M 200	1	45,8	39,3	36,4	54,0	34,3	29,2
	5	35,3	34,9	35,4	32,6	30,9	26,7
	10	33,9	32,6	33,2	25,3	19,6	19,6
HTC_M 220	1	51,0	36,8	34,5	39,4	24,9	23,9
	5	35,2	32,1	31,8	26,5	23,5	22,5
	10	29,8	29,9	30,6	20,6	20,0	15,6

Ispitivanje fitotoksičnosti kontaminiranog sedimenta sa i bez dodatka sorbenata. Hidročadi dobijene od rezanaca šećerne repe pokazali su izuzetnu toksičnost na seme kukuruza gde je samo u dve probe došlo do klijanja po jednog zrna kukuruza. Ovo može biti posledica nastajanja potencijalno toksičnih jedinjenja prilikom proizvodjenja hidročadi. S druge strane primena hidročadi dobijene od miskantusa je pokazala značajno bolje rezultate, gde je sa porastom temperature produkcije hidročadi i povećanjem primenjene doze dolazi do povećanja procenta klijavosti. U skladu sa dobijenim rezultatima testovi fitoekstrakcije (slika 1) da je najveći deo PeCB i HCB zadržan u samom sedimentu, a da je pri tome od strane biljaka usvojena relativno mala količina ovih jedinjenja.



Slika 1. Apsolutna koncentracija PeCB i HCB u sedimentu i biomasi nakon testova fitotoksičnosti
Figure 1. Absolute PeCB and HCB concentration in sediment and biomass after phytotoxicity test

Dodatno, sa povećanjem doze sorbenta raste udeo jedinjenja koji se zadržava u sedimentu što je u skladu sa rezultatima dobijenim ispitivanjem biodostupnosti dobijenih smeša. Tzv. izgubljena frakcija jedinjenja je izračunata kao razlika ukupne apsolutne količine jedinjenja u probi i dobijene finalne apsolutne količine u biomasi i sedimentu nakon uklanjanja biomase. Pri čemu se deo ove frakcije povećava sa

povećanjem doze materijala, što je najverovatnije posledica činjenice da planarni molekuli kao što su posmatrana jedinjenja imaju tendenciju da penetriraju u pore hidročadi gde se ireverzibilno vezuju π - π vezama za oba zida pora, čime se smanjuje heksan ekstrahibilna frakcija ovog jedinjenja [9-11] respectively; primarily tri-, tetra- and pentachlorinated congeners.

ZAKLJUČAK

Razumevanje adsorpcije organskih molekula na adsorbentima je esencijalno za pronalaženje konvencionalnog načina za potencijalnu primenu novih materijala u zaštiti životne sredine, pored ostalog i za njihovu primenu kao agenasa za sekvestraciju i stabilizaciju odabranih polutanata u sedimentu/zemljištu. U pogledu primene hidročadi kao agenasa za sekvestraciju pentahlorbenzena i heksahlorbenzena u sedimentu može se zaključiti da dodatak svih pripremljenih sorbenata dovodi do smanjenja desorpcije datih jedinjenja, a samim tim se smanjuje i ekološki rizik ispitivanih jedinjenja, što je od ključnih faktora za njihovu praktičnu primenu u remedijacione svrhe. Pokazano je da sa porastom temperature hidrotermalne karbonizacije adsorbenti pokazuju veću efikasnost u pogledu sekvestracije i smanjenja biodostupnosti ispitivanih jedinjenja. Dodatno, pokazano je da hidročađ dobijena od biomase miskantusa značajno bolje adsorbuje ispitivana jedinjenja.

Zahvalnost: Istraživanja su finansirana od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj (Projekti TR37004, III43005 i TR 31003).

LITERATURA

1. Z. Liu, A. Quek, S. Kent Hoekman, R. Balasubramanian, *Fuel*. 103, 943 (2013).
2. S. Román, J.M.V. Nabais, C. Laginhas, B. Ledesma, J.F. González, *Fuel Process. Technol.* 103, 78 (2012).
3. M.T. Reza, B. Wirth, U. Lüder, M. Werner, *Bioresour. Technol.* 169, 352 (2014).
4. A. Kruse, A. Funke, M.-M. Titirici, *Curr. Opin. Chem. Biol.* 17, 515 (2013).
5. M. Ahmad, A.U. Rajapaksha, J.E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, M. Vithanage, S.S. Lee, Y.S. Ok, *Chemosphere*. 99, 19 (2014).
6. J. Fang, L. Zhan, Y.S. Ok, B. Gao, *J. Ind. Eng. Chem.* 57, 15 (2018).
7. Y. Chai, X. Qiu, J.W. Davis, R.A. Budinsky, M.J. Bartels, S.A. Saghir, *Chemosphere*. 69, 1204 (2007).
8. H.S. Kambo, A. Dutta, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45, 359 (2015).
9. F. Coulon, M. Al Awadi, W. Cowie, D. Mardlin, S. Pollard, C. Cunningham, G. Risdon, P. Arthur, K.T. Semple, G.I. Paton, *Environ. Pollut.* 158, 3032 (2010).
10. G.K. Vasilyeva, E.R. Strijakova, S.N. Nikolaeva, A.T. Lebedev, P.J. Shea, *Environ. Pollut.* 158, 770 (2010).
11. G. Cornelissen, O. Gustafsson, T.D. Bucheli, M.T. O. Jonker, A.A. Koelmans, P.C.M. Van Noort, *Environmental Sci. Technol.* 39, 6881 (2005).