



11. MEMORIJALNI NAUČNI SKUP IZ ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE

„DOCENT DR MILENA DALMACIJA“

zajedno sa

**1. PROLEĆNOM ŠKOLOM UNAPREĐENIH TRETMANA
OTPADNIH VODA - SMARTWATERTWIN**

KNJIGA RADOVA

**01-04.04.2024.
Novi Sad**



Organizatori



Univerzitet u Novom Sadu

Prirodno-matematički fakultet



Departman za hemiju, biohemiju i zaštitu
životne sredine

Fondacija "Docent dr Milena Dalmacija"



SmartWaterTwin HE Project



Podrška Pokrajinskog sekretarijata za visoko obrazovanje i naučnoistraživačku
delatnost AP Vojvodine, RS



KNJIGA RADOVA

IZDAVAČ
GLAVNI UREDNIK

**11. Memorijalni naučni skup iz zaštite životne sredine
„Docent dr Milena Dalmacija”
Prirodno-matematički fakultet, UNS
dr Đurđa Kerkez, dr Dunja Rađenović,
dr Dragana Tomašević Pilipović**

CIP - Каталогизација у публикацији

Библиотеке Матице српске, Нови Сад

502.17(082)

МЕМОРИЈАЛНИ научни skup из заштите животне средине "Доцент др Милена Далмација" (11 ; 2024 ; Нови Сад)

Knjiga radova [Elektronski izvor] / 11. Memorijalni naučni skup iz zaštite životne sredine "Docent dr Milena Dalmacija" zajedno sa 1. prolećnom školom unapređenih tretmana otpadnih voda - SmartWaterTwin, 01. - 04. 04. 2024, Novi Sad ; [glavni urednik Đurđa Kerkez, Dunja Rađenović, Dragana Tomašević Pilipović]. - Novi Sad : Prirodno-matematički fakultet, 2024. - 1 elektronski optički disk (CD ROM) ; 12 cm

Nasl. sa naslovnog ekrana. - Tiraž 100. - Bibliografija uz svaki rad.

ISBN 978-86-7031-664-5

**1. Пролећна школа унапређених третмана отпадних вода - SmartWaterTwin (1 ; 2024 ; Нови Сад)
а) Животна средина -- Заштита -- Зборници**

COBISS.SR-ID 141598729



Naučni odbor:

- dr Miladin Gligorić, redovni profesor u penziji, Tehnološki fakultet Zvornik, Univerzitet u Istočnom Sarajevu
- dr Jasmina Agbaba, redovna profesorka, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Srđan Rončević, redovni profesor, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Dragan Radnović, redovni profesor, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Dušan Mrđa, redovni profesor, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Milena Bečelić-Tomin, redovna profesorka, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Miljana Prica, redovna profesorka, FTN, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Snežana Maletić, redovna profesorka, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Dejan Krčmar, redovni profesor PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Aleksandra Tubić, redovna profesorka PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Vladimir Beškovski, redovni profesor, Hemijski fakultet, Univerzitet u Beogradu
- dr Nataša Đurišić Mladenović, vanredna profesorka, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu

Organizacioni odbor:

- dr Đurđa Kerkez, vanredna profesorka, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Dragana Tomašević Pilipović, vanredna profesorka, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Anita Leovac Maćerak, docentkinja, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Vesna Pešić, docentkinja PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Nataša Slijepčević, naučna saradnica, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Nataša Duduković, asistentkinja sa doktoratom, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Dunja Rađenović, naučna saradnica, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Jasmina Nikić, naučna saradnica, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Tijana Marjanović, istraživač saradnica, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Jovana Pešić, istraživač saradnica, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- dr Slaven Tenodi, asistent, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
- Nada Popsavin, stručna saradnica za odnose sa javnošću, PMF, Univerzitet u Novom Sadu

Sadržaj

Sekcija: Voda (V)

V-1. Nataša Đurišić-Mladenović, Igor Antić, Jelena Živančev: *Konvencionalni i napredni analitički pristupi pri određivanju prisustva organskih mikropolutanata u uzorcima iz životne sredine (Predavanje po pozivu - Laureati)*

V-2. Tajana Simetić: *Degradacija organskih zagađujućih materija u vodi: poređenje UV/H₂O₂, UV/S₂O₈²⁻- i UV/H₂O₅- procesa (Predavanje po pozivu - Laureati)*

V-3. Katarina Tošić, Sara Mijaković, Anđela Mitrović Rajić, Jasmina Grbović Novaković, Nenad Filipović, Vladimir Rajić, Bojana Paskas Mamula: *Primena ultrazvučnog tretmana u poboljšanju sorpcionih svojstava prirodne rude pirofilit*

V-4. Dragana Lukić, Vesna Vasić, Nenad Popov, Ivana Čabarkapa: *Biosorpcija teških metala ljušturama invazivnih rakova *faxonius limosus*: efikasnost i potencijal*

V-5. Nebojša Vasiljević, Sanja Panić, Mirjana Petronijević, Slavko Smiljanić, Zoran Petrović, Jelena Živančev, Nataša Đurišić-Mladenović: *Mogućnosti primene katalizatora na bazi hidrouglja za aktivaciju persulfata u cilju eliminacije organskih mikropolutanata - kratki pregled*

V-6. Milica Mišić, Aleksandar Jovanović, Mladen Bugarčić: *Modelovanje disperzije azotnih jedinjenja u površinskim vodama prilikom akcidentnih situacija*

V-7. Ivana Jevtić, Sandra Jakšić: *Primena direktne fotolize za uklanjanje mikotoksina iz vodene sredine*

V-8. Marija Šobić, Mirjana Petronijević, Sanja Panić, Nataša Đurišić-Mladenović: *Uklanjanje farmaceutski aktivnih jedinjenja iz vode primenom imobilisane lakaze*

V-9. Nataša Sarap, Marija Janković, Stefana Dejković: *Zaštita životne sredine - značaj monitoringa radioaktivnosti*

V-10. Marija Janković, Nataša Sarap, Bojan Janković, Ivana Jelić, Milica Ćurčić, Stefana Dejković, Maja Rajković, Marija Šljivić-Ivanović: *Značaj merenja tricijuma u vodenom matriksu*

Sekcija: Sediment (S)

S-1. Vladimir Beškoski: *(Bio)razgradnja "večnih hemikalija"- izazov per- i poliflurovanih jedinjenja (Predavanje po pozivu - Laureati)*

S-2. Anđelić M., Slijepčević N., Rađenović D., Tenodi S., Krčmar D., Pejin Đ., Tomašević Pilipović D: *Potencijal fosfogipsa za stabilizaciju/solidifikaciju rečnog sedimenta*

S-3. Panta Krstić: *Sediment kao građevinski materijal*

Sekcija: Vazduh (Vaz)

Vaz-1. Danka Kostadinović, Marina Jovanović, Vukman Bakić: *Uticaj zelenog krova na koncentraciju suspendovanih čestica i azot dioksida (Predavanje po pozivu - Laureati)*

Vaz-2. Nenad Popov, Milica Živkov Baloš, Sandra Jakšić, Miloš Pelić, Nataša Varga, Stefan Đorđievski, Srđan Rončević: *Skladištenje ugljen-dioksida primenom tehnike ubrzane karbonizacije*

Vaz-3. Maja Rajković, Ivana Jelić, Marija Janković, Marija Šljivić-Ivanović: *Softverski alati za procenu koncentracija zagađujućih materija u vazduhu poreklom iz saobraćaja*

Vaz-4. Isidora Lazić, Sofija Forkapić, Jovana Knežević Radić, Jan Hansman, Danijel Velimirović: *Poređenje metoda merenja radona u boravišnom prostoru na teritoriji Novog Sada*

Sekcija: Otpad (O)

O-1. Teodora Cvanić: *Primena vodenog sistema micelarne ekstrakcije za izolovanje bioaktivnih jedinjenja iz kore rogata dinje*

O-2. Jelena Dimitrijević, Sanja Jevtić, Marija Koprivica, Aleksandar Marinković, Marija Simić, Jelena Petrović: *Imobilisana otpadna ovsena slama kao efikasan adsorbent jona bakra*

O-3. Tijana Adamov, Mladenka Novaković, Ivana Mihajlović, Maja Petrović: *Procena potencijala kontaminacije procednih voda selektovanih deponija komunalnog otpada u AP Vojvodina*

Sekcija: Održivi razvoj (OR)

OR-1. Anđela Mitrović Rajić, Katarina Tošić, Sara Mijaković, Sanja Milošević Govedarović, Ana Vujačić Nikezić, Bojana Paskaš Mamula, Jasmina Grbović Novaković: *Mehanohemijska i termička modifikacija pirofilita za primenu u elektrohemijskim senzorima i membranama (Predavanje po pozivu - Laureati)*

OR-2. Milica Ćurčić, Jelena Dinić, Slavko Dimović: *Očuvanje životne sredine i resursa kao nacionalni interes Republike Srbije*

Sekcija: Zemljište (Z)

Z-1. Dušan Rakić, Zita Šereš, Igor Antić, Maja Buljovčić, Jelena Živančev, Nataša Đurišić-Mladenović: *Ispitivanje efikasnosti ekstrakcione metode za analizu zemljišta na prisustvo zagađujućih supstanci koje izazivaju zabrinutost*

MOGUĆNOSTI PRIMENE KATALIZATORA NA BAZI HIDROUGLJA ZA AKTIVACIJU PERSULFATA U CILJU ELIMINACIJE ORGANSKIH MIKROPOLUTANATA - KRATKI PREGLED

Nebojša Vasiljević^{1,2}, Sanja Panić², Mirjana Petronijević², Slavko Smiljanić¹, Zoran Petrović¹, Jelena Živančev², Nataša Đurišić-Mladenović²

¹Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet, Karakaj 34a, 75400 Zvornik, Bosna i Hercegovina, nebojsa.vasiljevic@tfzv.ues.rs.ba

²Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1, 21102 Novi Sad, Srbija

Izvod

Pojava različitih postojanih i mobilnih organskih mikropolutanata u otpadnim vodama, postavlja novi zadatak pred postojeće postupke tretmana otpadnih vode i uvodi potrebu za dizajniranjem novih naprednih kvaternernih procesa. Primena naprednih oksidacionih procesa zasnovanih na persulfatima pokazala se uspešnom u razgradnji različitih organskih zagađujućih jedinjenja, uključujući farmaceutske aktivne supstance, pesticide trenutno u upotrebi, organohlorne jedinjenja, fenol, itd. Proces se zasniva na generisanju sulfatnih radikala visoke reaktivnosti iz peroksimonosulfata (PMS) i peroksidisulfata (PDS) različitim metodama, uključujući upotrebu ultrazvuka, prelaznih metala, katalizatora na bazi ugljenika i dr. Rad daje kratak pregled primene katalizatora na bazi hidrouglja, ugljeničnog materijala dobijenog hidrotermalnom karbonizacijom biomase, u okviru metode aktivacije persulfata radi uklanjanja određenih postojanih mikropolutanata iz vode.

Ključne reči: postojani kontaminanti, napredni oksidacioni procesi, sulfatni radikali, hidrouglj, heterogeni katalizator

Uvod

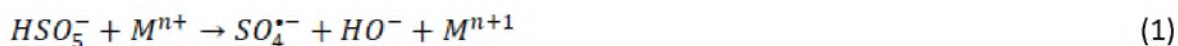
Zbog različitih ljudskih aktivnosti, mnoge zagađujuće supstance se nalaze u otpadnim vodama, te nakon njihovog ispuštanja dospevaju u prirodne izvore [1, 2]. Među brojnim zagađujućim supstancama u otpadnim vodama, posebnu pažnju privlače postojana i/ili mobilna jedinjenja, poput pesticida trenutno u upotrebi, organohlornih jedinjenja, farmaceutske aktivne supstance, itd., predstavljajući pretnju po javno zdravlje i organizme u prirodi [3, 4, 5]. Zbog toga postoji potreba za efikasnim i ekološki prihvatljivim metodama za tretiranje voda u kojima su prisutni ovi kontaminanti.

Glaze i saradnici su 1987. godine osmislili napredni oksidacioni proces (Advanced Oxidation Process – AOP), koji se zasniva na *in situ* generisanju snažnog oksidansa poput hidroksil radikala ($\cdot\text{OH}$) za razgradnju organskih i postojanih zagađujućih supstanci [6]. Do danas, AOP procesi su znatno napredovali, tako da se razne reaktivne vrste kiseonika (ROS) $\text{O}_2^{\cdot-}$, RO_2^{\cdot} , O_2^{2-} , $^1\text{O}_2$, $\text{CO}_3^{\cdot-}$ ili $\text{SO}_4^{\cdot-}$ mogu koristiti za razgradnju organskih kontaminanata [7], [8]. Pri AOP procesima, kao proizvodi nastaju ugljen dioksid (CO_2), voda (H_2O) i bezopasna neorganska jedinjenja [7, 9].

Zbog lakše separacije i regeneracije katalizatora, jednostavnijeg tehnološkog postupka, kao i mogućnosti primene u širem pH opsegu (pH 2–9), za dobijanje ROS se u poslednje vreme primenjuju različiti heterogeni katalizatori [10]. U ovom radu dat je pregled primene hidrouglja u formulaciji heterogenih katalizatora za aktivaciju persulfatnog radikala, koji se potom može koristiti za uklanjanje određenih organskih kontaminanata iz vode.

Persulfatni oksidacioni procesi

Sulfatni radikali nastaju aktivacijom peroksimonosulfata (PMS) i peroksidisulfata (PDS) [11]. PMS i PDS su stabilni na sobnoj temperaturi, zbog čega su potrebne različite metode za njihovu aktivaciju. Niskovalentni prelazni metalni joni (Ag^+ , Fe^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} i dr.) mogu aktivirati PMS/PDS, pri čemu se proizvodi $\text{SO}_4^{\bullet-}$ (Jednačine 1-2) putem jednostranog prenosa elektrona [12].



U heterogenom sistemu u kome je gvožđe nanešeno na čvrsti materijal, Fe^{2+} joni se generišu na površini čvrstog materijala kako bi se aktivirao persulfat [13]. Nultovalentno gvožđe (zero valent iron - ZVI, Fe^0) se široko koristi kao izvor Fe^{2+} jer može kontinuirano oslobađati Fe^{2+} jone u rastvor [13, 14].

Materijali sa visokim sadržajem ugljenika se mogu koristiti kao persulfatni aktivatori [15]. Ovi materijali se obično koriste kao donori elektrona za PMS/PDS kako bi podstakli formiranje sulfatnih radikala (Jednačine 3-5).



Hidrougalj kao katalizator za persulfatnu aktivaciju

Katalitičko dejstvo različitih vrsta ugljeničnog materijala obnovljivog porekla (biougalj, hidrougalj) na aktivaciju persulfata je tema koja u poslednje vreme privlači pažnju istraživača, s obzirom da se radi eko-prihvatljivim i jeftinim biomaterijalima. Pod biougljem i hidrougljem se podrazumeva materijal koji nastaje termohemijskom konverzijom biomase, i to prvenstveno u anoksičnim pirolitičkim procesima. Biougalj nastaje u uslovima konvencionalne (suve) pirolize, dok hidrougalj nastaje u hidrotermalnim procesima (u vodenoj suspenziji pod podkritičkim ili nadkritičnim parametrima vode); razlike u fizičko-hemijskim karakteristikama potiču od sirovine i uslova izvođenja pirolize, a pregled najvažnijih se može naći u radu [16]. U nastavku je dat pregled upotrebe hidrouglja za aktivaciju persulfata i njegova primena u razgradnji kontaminanata koji izazivaju zabrinutost. Zhang i saradnici ispitivali su mogućnosti hidrouglja i biouglja za aktivaciju PDS-a i poredili rezultate dobijene pri razgradnji hlorovanog herbicida atrazina (ATZ) [17]. Bez prisustva PDS-a u sistemu, hidrougalj je uklonio manje ATZ-a nego pirolitički biougalj, dok je u prisustvu PDS-a, uklanjanje ATZ-a značajno veće sa hidrougljem nego sa biougljem. Nakon dodatka PDS-a, huminske supstance prisutne u hidrouglju doprinose većoj proizvodnji $^1\text{O}_2$ što dalje doprinosi razgradnji ATZ-a [17].

Ispitivano je katalitičko dejstvo hidrouglja dobijenog iz različitog otpada od hrane (zelena salata, taro i kora lubenice) na različitim temperaturama (180 – 240 °C) [18]. Performanse ovih materijala ispitane su kroz adsorpciju i katalitičku degradaciju uz pomoć PMS-a 2,4-dihlorofenoksi sirćetne kiseline (2,4-D), koja se primenjuje kao herbicid. Hidrougalj dobijen iz zelene salate je pokazao visok stepen hemisorpcije 2,4-D-a zahvaljujući svojoj mezoporoznoj strukturi i velikom broju C–O funkcionalnih grupa. Hidrougalj dobijen iz taroa pokazao je katalitičku sposobnost zbog prisustva visoko grafitizovanog ugljenika i povećane količine

ketonskih (C=O) grupa, što olakšava aktivaciju PMS-a. Hidrougalj dobijen iz kore lubenice je pokazao inhibiciju aktivacije PMS-a zbog prisustva rastvorenog organskog materijala [18].

Hidrougalj sa dodatkom metala

Aktivaciju persulfata poroznim hidrougljem na koga je raspršeno nano multivalentno gvožđe (nZVI) su opisali Cao i saradnici [19]. Hidrougalj je ostvario visok procenat razgradnje fenola (99,7%), a za degradaciju fenola su zaslužni singletni kiseonik ($^1\text{O}_2$) i slobodni radikali ($\text{SO}_4^{\bullet-}$, $^{\bullet}\text{OH}$, i $\text{O}_2^{\bullet-}$). Dobijeni sistem se može primenjivati u širokom pH (3,0–9,0) i temperaturnom opsegu (25–55 °C), a primenjeni hidrougalj ima mogućnost regeneracije i visoku toleranciju na koegzistirajuće supstance u vodi [19]. Sistem koji se sastoji od hidrouglja od drveta topole modifikovan gvožđem i PMS-a je korišćen za određivanje efikasnosti uklanjanja dihlorodifeniltrihloretana (DDT) [20]. Efikasnost uklanjanja DDT-a može dostići 88,62% za 240 min pod optimalnim uslovima. Analizom uticaja ovog sistema na adsorpciju i degradaciju DDT-a, utvrđeno je da postoji sledeći redosled uticaja: aktivne supstance za indirektnu degradaciju (60,95%) > direktna degradacija (10,13%) > adsorpcija (17,54%). Među aktivnim supstancama za indirektnu degradaciju, $\text{SO}_4^{\bullet-}$, $^{\bullet}\text{OH}$, $\text{O}_2^{\bullet-}$ i $^1\text{O}_2$ su činili 27,56%, 15,74%, 5,33% i 12,32%, redom [20].

U radu Li-a i saradnika [21], sintetisani su katalizatori hidrotermalnom karbonizacijom pirinčane ljuske impregnirane kobaltom. Kompozit je pokazao izuzetnu efikasnost u aktiviranju PMS-a za degradaciju antiepileptika karbamazepina (CBZ), jer je za 60 minuta uklonio 95,78% CBZ-a. $\text{SO}_4^{\bullet-}$ i $\text{O}_2^{\bullet-}$ su se pokazali kao dominantne reaktivne vrste u procesu degradacije CBZ-a [21]. Kompoziti kobalta i gvožđa sa hidrougljem sintetisani hidrotermalnim postupkom se mogu koristiti za degradaciju organohlorinih industrijski važnih jedinjenja monohlorobenzena (MCB) i p-hloroanilina (PCA) [22]. U sistemu kompozit/PMS, funkcionalne grupe na površini kompozita (C-OH i C=O) i Fe/Co ciklusi imali su ključnu ulogu u aktivaciji PMS-a, dok su za razgradnju MCB i PCA zaslužne radikalske vrste ($\text{SO}_4^{\bullet-}$ i $^{\bullet}\text{OH}$) i ne-radikali ($^1\text{O}_2$, Fe (IV)/Co (IV) i transfer elektrona na površini kompozita) [22]. Kobalt-ferit (CoFe_2O_4) i Co/Al slojeviti dvostruki hidroksidi (Co/Al-LDH) su impregnirani na hidrougalj od bambusa kako bi se aktivirao PMS za razgradnju antibiotika ciprofloksacina (CIP) [23]. Dobijeni kompozit je pokazao visoku efikasnost aktivacije PMS-a i ultra-brzo uklanjanje CIP-a (91,50% za 10 min), u poređenju sa hidrougljem bez modifikacije (6,26%), CoFe_2O_4 (26,32%) ili Co/Al-LDH (40,10%) [23].

Hidrougalj dopiran heteroatomima

Katalizatori na bazi hidrouglja bez prisutnog metala (tzv. "metal-free" katalizatori) privlače sve veće interesovanje u naprednim oksidacionim procesima za degradaciju organskih mikropolutanata u vodi. U istraživanju Dinga i saradnika, sintetisan je N-dopirani kompozitni hidrougalj koristeći montmorilonit i otpadnu slamu trske bogatu azotom. Dobijeni kompozit posedovao je izvanredne performanse aktivacije PMS-a za potpunu razgradnju herbicida hinkloraka (QC). Slobodni radikali ($^{\bullet}\text{OH}$, $\text{SO}_4^{\bullet-}$, i $\text{O}_2^{\bullet-}$) i ne-radikalske vrste ($^1\text{O}_2$) su učestvovali u procesu razgradnje QC-a [24].

Azotom dopirani hidrougalj pripremljen iz četinarske biomase je korišćen u karbokatalizi za aktivaciju PMS-a radi razgradnje postojećih jedinjenja koje ometaju rad endokrinih žlezda (tzv. endokrinih disruptora) [25]. Azotno dopiranje deluje kao regulator koncentracija i tipova perzistentih slobodnih radikala na površini hidrouglja, što pospešuje transfer elektrona i oksidativnu degradaciju kontaminanata. Takođe, grafitni azot indukuje stvaranje slobodnih radikala iz strukturnih defekata za oksidaciju pomoću radikala [25].

Hidrougalj ko-dopiran metalom i heteroatomom

Qu i saradnici su sintetisali hidrougalj od poljoprivrednog otpada bambusovih izdanaka na kome su ko-dopirani gvožđe i azot [26]. Optimizacijom procesnih parametara za sistem Fe-N-hidrougalj/PMS i merenjem efikasnosti degradacije fenola, utvrđeno je da ona iznosi 100% za 60 minuta, što je znatno više u odnosu na slučaj u kome hidrougalj nije ko-dopiran gvožđem i azotom (43,6 %). Prisustvo C=C dvostrukih veza i pirolnog N u strukturi hidrouglja pogoduju stvaranju reaktivnih vrsta kiseonika, a brojni defekti ugljenične strukture i piridinski N doprinose poboljšanju transfera elektrona. Pored toga, gvožđe doprinosi aktivaciji persulfata [26]. Katalitičko dejstvo hidrouglja, modifikovanog sa gvožđem i azotom, proučavano je pri aktivaciji PMS-a i PDS-a u cilju razgradnje antibiotika tetraciklin hidrohlorida (TC) [27]. Sistemi Fe-N-hidrougalj/PMS i Fe-N-hidrougalj/PDS su razgradili oko 80% TC-a za 120 minuta i pokazali su se boljim od onih koji su modifikovani samo gvožđem ili samo azotom. Aktivacija PMS-a rezultat je prisustva Fe^{3+} jona, dok su za aktivaciju PDS-a uglavnom zaslužni Fe^{2+} joni [27].

Hidrougalj poreklom iz bambusa i ko-dopiran gvožđem i azotom nije samo ostvario izuzetnu efikasnost u oksidativnoj degradaciji različitih aromatičnih kontaminanata, već je takođe imao visoku trajnost i stabilnost u aktivaciji PMS-a [28]. U poređenju sa kontrolnim katalizatorima koji sadrže azot (N-C) ili nanočestice gvožđa (Fe-C) u strukturi hidrouglja, Fe-N konfiguracija u hidrouglju je istovremeno poboljšala stepen grafitizacije i delovala kao "baza" za konstrukciju stabilne strukture [28].

Zaključak

U ovom radu dat je kratak pregled katalizatora na bazi hidrouglja koji se koriste za persulfatni oksidativni tretman otpadne vode u kojoj su prisutni različiti organski mikropolutanti. Nakon aktivacije persulfata u prisustvu katalizatora, radikalski ($\text{SO}_4^{\bullet-}$, $^{\bullet}\text{OH}$ i $\text{O}_2^{\bullet-}$) i ne-radikalski ($^1\text{O}_2$ i prenos elektrona na površini) procesi doprinose razgradnji polutanata. Radi postizanja efikasnije razgradnje zagađujućih supstanci, modifikacija hidrouglja je moguća dopiranjem metalom ili heteroatomom, ili ko-dopiranjem metalom i heteroatomom. Kao metalni modifikator, najčešće se koristi gvožđe, dok je najčešće korišćeni heteroatom za modifikaciju azot. Ko-dopiranjem metalom i heteroatomom se postižu najbolji rezultati, pre svega zbog sinergijskog efekta: prisustvo pirolnog N u strukturi katalizatora doprinosi stvaranju reaktivnih vrsta kiseonika, brojni strukturni defekti i piridinski N doprinose poboljšanju transfera elektrona, dok prisustvo metala doprinosi stvaranju sulfatnog radikala. Katalizatori na bazi hidrouglja se mogu primenjivati u širokom opsegu početnog pH (3,0–11,0), i pored visoke efikasnosti razgradnje organskih mikropolutanata karakterišu se i visokom tolerancijom na koegzistirajuće supstance prisutne u vodi.

Zahvalnica: Autori rada se zahvaljuju na finansijskoj podršci Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (evidencioni brojevi 451-03-66/2024-03/200134 i 451-03-65/2024-03/200134), kao i Horizon Europe TwiNSol-CECs projektu finansiranom u okviru Horizon Europe programa pod brojem ugovora 101059867.

Literatura

- [1] Ibrahim, A. O., Adegoke, K. A., Adegoke, R. O., Wahab Y. A. A., Oyelami V. B., & Adesina M. O. (2021). Adsorptive removal of different pollutants using metal-organic framework adsorbents. *Journal of Molecular Liquids*, 333, 115593.

- [2] Kurian, M. (2021). Advanced oxidation processes and nanomaterials - a review. *Cleaner Engineering and Technology*, 2, 100090.
- [3] Liu, J. L., & Wong, M. H. (2013). Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): A review on environmental contamination in China. *Environment International*, 59, 208–224.
- [4] Sandoval, M. A., Calzadilla, W., Vidal, J., Brillas, E., & Salazar-González R. (2024). Contaminants of emerging concern: Occurrence, analytical techniques, and removal with electrochemical advanced oxidation processes with special emphasis in Latin America. *Environmental Pollution*, 345, 123397.
- [5] Shao B., Shen, L., Liu, L., Tang, L., Tan, X., Wang, D., Zeng, W., Wu, T., Pan, Y. Zhang, X., Ge, L., He, M. (2023). Disinfection byproducts formation from emerging organic micropollutants during chlorine-based disinfection processes. *Chemical Engineering Journal*, 455, 140476.
- [6] Glaze, W. H., Kang, J. W., & Chapin, D. H. (1987). The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Ozone: Science & Engineering*, 9(4), 335-352.
- [7] Kumari, P., & Kumar, A. (2023). ADVANCED OXIDATION PROCESS: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant. *Results in Surfaces and Interfaces*, 11, 100122.
- [8] Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577-2641.
- [9] Yin, J., & Zhang, X. (2020). Technologies for bHRPs and risk control. In *High-Risk Pollutants in Wastewater*. Elsevier.
- [10] Nair, D. S., & Kurian, M. (2017). Heterogeneous catalytic oxidation of persistent chlorinated organics over cobalt substituted zinc ferrite nanoparticles at mild conditions: Reaction kinetics and catalyst reusability studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 964–974.
- [11] Tian, K., Hu, L., Li, L., Zheng, Q., Xin, Y., & Zhang, G. (2022). Recent advances in persulfate-based advanced oxidation processes for organic wastewater treatment. *Chinese Chemical Letters*, 33(10), 4461–4477.
- [12] Anipsitakis, G. P., & Dionysiou, D. D. (2004). Radical generation by the interaction of transition metals with common oxidants. *Environmental Science & Technology*, 38(13), 3705-3712.
- [13] Hu, L., Wang, P., Liu, G., Zheng, Q., & Zhang G. (2020). Catalytic degradation of p-nitrophenol by magnetically recoverable Fe₃O₄ as a persulfate activator under microwave irradiation. *Chemosphere*, 240, 124977.
- [14] Rastogi, A., Al-Abed, S. R., & Dionysiou, D. D. (2009). Sulfate radical-based ferrous–peroxymonosulfate oxidative system for PCBs degradation in aqueous and sediment systems. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 85(3–4), 171–179.
- [15] Gasim, M. F., Lim, J. W., Low, S. C., Lin, K. Y. A., & Da Oh, W. (2022). Can biochar and hydrochar be used as sustainable catalyst for persulfate activation?. *Chemosphere*, 287, 132458.
- [16] Adamović, A., Petronijević, M., Panić, S., Cvetković, D., Antić, A., Petrović, Z., & Đurišić-Mladenović, N. (2023). Biochar & hydrochar as adsorbents for the removal of contaminants of emerging concern from wastewater. *Advanced Technologies*, 12, 57–74.

- [17]Zhang, L., Wang, K., Yu, L., Luo, K., Guo, S., Chen, H., Li, X., Chen, Y., Yu, X., Qian, Y., Liu, Y., & Xue, G. (2021). Why does sludge-based hydrochar activate peroxydisulfate to remove atrazine more efficiently than pyrochar?. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 299, 120663.
- [18]Liu, Y., Sun, Y., Wan, Z., Jing, F., Li, Z., Chen, J., & Tsang, D.C.W. (2021). Tailored design of food waste hydrochar for efficient adsorption and catalytic degradation of refractory organic contaminant. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127482.
- [19]Cao, B., Qu, J. Bian, W., Hu, Q., Fu, X., Zhang, G., Zhang, Y., Tao, Y., Jiang, Z., & Zhang, Y. (2024). Porous hydrochar loaded nZVI as an efficient catalyst to activate persulfate for phenol degradation: Performance and mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 444, 141221.
- [20]Dang, M., Chen, D., Lu, P., & Xu, G. (2022). Enhanced degradation of DDT using a novel iron-assisted hydrochar catalyst combined with peroxymonosulfate: Experiment and mechanism analysis. *Chemosphere*, 307, 135893.
- [21]Li, Y., Zhang, S., Qin, Y., Yao, C., An, Q., Xiao, Z., & Zhai, S. (2022). Preparation of cobalt/hydrochar using the intrinsic features of rice hulls for dynamic carbamazepine degradation via efficient PMS activation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108659.
- [22]Yang, L., Wei, Z., Guo, Z., Chen, M., Yan, J., Qian, L., Han, L., Li, J., & Gu, M. (2023). Significant roles of surface functional groups and Fe/Co redox reactions on peroxymonosulfate activation by hydrochar-supported cobalt ferrite for simultaneous degradation of monochlorobenzene and p-chloroaniline. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130588.
- [23]Zhang, J., Xie, J. F., Yang, J. C. E., Li, D., Bin Zhong, L., & Zheng, Y. M. (2023). Ultra-fast degradation of ciprofloxacin by the peroxymonosulfate activation using a Co/Al-LDH decorated magnetic hydrochar: Structural design, catalytic performance and synergistic effects. *Chemical Engineering Journal*, 477, 146961.
- [24]Ding, C., Ye, C., Zhu, W., Zeng, G., Yao, G., Ouyang, Y., Rong, J., Tao, Y., Liu, X., & Deng, Y. (2023). Engineered hydrochar from waste reed straw for peroxymonosulfate activation to degrade quinclorac and improve solanaceae plants growth. *Journal of Environmental Management*, 347, 119090.
- [25]Yu, J., Zhu, Z., Zhang, H., Shen, X., Qiu, Y., Yin, D., & Wang, S. (2020). Persistent free radicals on N-doped hydrochar for degradation of endocrine disrupting compounds. *Chemical Engineering Journal*, 398, 125538.
- [26]Qu, J., Li, K., Wang, Q., Tong, W., Zhang, G., Hu, Q., Tao, Y., Jiang, Z., & Zhang, Y. (2024). Enhanced degradation of organic contaminant with bamboo shoot skin-based Fe/N co-doped porous hydrochar via persulfate activation. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140881.
- [27]Song, N., Wang, Y., Li, Y., Liu, Y., Wang, Q., & Wang, T. (2024). The activation mechanism of peroxymonosulfate and peroxydisulfate by modified hydrochar: Based on the multiple active sites formed by N and Fe. *Environmental Pollution*, 341, 122981.
- [28]Yu, J., Zhu, Z., Zhang, H., Qiu, Y., & Yin, D. (2022). Fe–nitrogen–doped carbon with dual active sites for efficient degradation of aromatic pollutants via peroxymonosulfate activation. *Chemical Engineering Journal*, 427, 130898.