

SRPSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU VODA

54. konferencija o aktuelnim temama korišćenja i zaštite voda

VODA 2025

The 54th Annual Conference of the Serbian Water Pollution Control Society

WATER 2025

Conference Proceedings



Kopaonik, 16. – 18. jun 2025.



www.sdzv.org.rs

SRPSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU VODA

SERBIAN WATER POLLUTION CONTROL SOCIETY



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

II

IZDAVAČ (PUBLISHER):

Srpsko društvo za zaštitu voda, Kneza Miloša 9/1, Beograd, Srbija
Tel/Faks: (011) 32 31 630

PROGRAMSKI ODBOR (PROGRAMME COMMITTEE):

Prof. dr Branislav ĐORĐEVIĆ, dipl.inž.građ, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
Prof. dr Božo DALMACIJA, dipl.hem, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno matematički fakultet
Dr Momir PAUNOVIĆ, naučni savetnik, dipl.biol, Univerzitet u Beogradu - Institut za biološka istraživanja „Siniša Stanković“
Dr. Bela CSÁNYI, dipl.biol, Mađarska akademija nauka, Centar za ekološka istraživanja, Institut za istraživanje Dunava, Budimpešta-Mađarska
Prof. dr Peter KALINKOV, dipl.inž.građ, Univerzitet za arhitekturu, građevinarstvo i geodeziju, Sofija-Bugarska
Prof. dr Valentina SLAVEVSKA STAMENKOVIĆ, dipl.biol, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Svetog Kirila i Metodija, Skopje-S.Makedonija
Prof. Dr. Goran SEKULIĆ, dipl.inž.građ, Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Podgorica-Crna Gora
Prof. dr Violeta CIBULIĆ, dipl.hem, Univerzitet „Union“ Beograd
Prof. dr Slavka STANKOVIĆ, dipl.inž.tehnol, Univerzitet u Beogradu – Tehnološko metalurški fakultet,

UREDNIK (EDITOR): Dr Aleksandar ĐUKIĆ, dipl.građ.inž, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

RECENZENTI (Reviewers):

Dr Zorana NAUNOVIĆ, dipl.inž.tehnol, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
Dr Aleksandar ĐUKIĆ, dipl. građ.inž, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
Dr Božica VASILJEVIĆ, dipl.biol, Univerzitet u Beogradu – Institut za biološka istraživanja „Siniša Stanković“
Dr Maja RAKOVIĆ, dipl.biol, Univerzitet u Beogradu – Institut za biološka istraživanja „Siniša Stanković“

Svi radovi su publikovani pod CC-BY licencom. Svi radovi u ovom zborniku radova su recenzirani. Stavovi izneti u ovoj publikaciji ne odražavaju nužno i stavove izdavača, urednika ili programskog odbora.

TIRAŽ (Print run): 150 primeraka

ŠTAMPA: "Akademska izdanja", Zemun, 2025

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

502.51(082)
556.11(082)
628.3(082)
628.1(082)

ГОДИШЊА конференција о актуелним проблемима коришћења и заштите

вода (54 ; 2025 ; Копаноник)

Voda 2025 : zbornik radova 54. godišnje konferencije o aktuelnim problemima

korišćenja i zaštite voda = Water 2025 : conference proceedings 54th Annual
Conference of the Serbian Water Pollution Control Society, Kopaonik, 16. – 18. jun
2025. / [urednik, editor Aleksandar Đukić]. - Beograd : Srpsko društvo za zaštitu voda,

2025 (Zemun : Akademska izdanja). - X, 396 str. : ilustr. ; 24 cm

Tiraž 150. - Str. X: Predgovor / Aleksandar Đukić. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.
ISBN 978-86-82674-02-3

a) Воде -- Зборници b) Отпадне воде -- Зборници v) Снабдевање водом -- Зборници
COBISS.SR-ID 170171913

SRPSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU VODA

ZBORNIK RADOVA

**54. GODIŠNJE KONFERENCIJE O AKTUELNIM TEMAMA
KORIŠĆENJA I ZAŠTITE VODA**

VODA 2025

*54TH ANNUAL CONFERENCE OF THE
SERBIAN WATER POLLUTION CONTROL SOCIETY
"WATER 2025"
CONFERENCE PROCEEDINGS*

Kopaonik, 16. – 18. jun 2025.

ORGANIZATOR KONFERENCIJE (*CONFERENCE ORGANISERS*):

Srpsko društvo za zaštitu voda (Beograd),

uz podršku

Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije i
Inženjerske komore Srbije

ORGANIZACIONI ODBOR KONFERENCIJE (*ORGANIZING COMMITTEE*):

PREDSEDNIK: Dr Momir PAUNOVIĆ, dipl.biol, Univerzitet u Beogradu - Institut za
biološka istraživanja „Siniša Stanković“ Beograd

SEKRETAR: Suzana VASIĆ, Srpsko društvo za zaštitu voda, Beograd

ČLANOVI: Dr Branko MILJANOVIĆ, dipl.biol, Univerzitet u Novom Sadu,
Prirodno matematički fakultet
Dr Aleksandar ĐUKIĆ, dipl.građ.inž, Univerzitet u Beogradu –
Građevinski fakultet
Dr Maja RAKOVIĆ, dipl. biol, Univerzitet u Beogradu - Institut za
biološka istraživanja „Siniša Stanković“ Beograd Beograd
Slavica ŽIVKOVIĆ, Srpsko društvo za zaštitu voda, Beograd

ODRŽAVANJE KONFERENCIJE SU POMOGLI (*SPONSORED BY*):

- Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije
- Inženjerska komora Srbije

Slika na koricama: slika generisana veštačkom inteligencijom (ChatBot GPT) na temu „Zaštita
voda 2025“

AKTIVACIJA PERSULFATA BIOUGLJEM: OPTIMIZACIJA DOZE ZA EFIKASNU RAZGRADNJU LINDANA U VODI

Tajana Simetić, Tijana Marjanović Srebro, Jasmina Anojić,
Tamara Apostolović, Nina Đukanović, Sanja Mutić,
Jelena Molnar Jazić, Jelena Beljin

Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za hemiju, biohemiju i zaštitu životne sredine, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, 21000, Srbija, email: tajana.djurkic@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0923-7034, 0009-0006-9886-6516, 0000-0002-2750-1994, 0000-0002-0614-2611, 0009-0008-2746-4522, 0000-0003-3659-0455, 0000-0002-8696-7647, 0000-0001-9269-4377

REZIME

U ovom radu ispitana je razgradnja lindana (100 µg/L) primenom biougolja dobijenog pirolizom biomase drveta (0,2 g/L) kao katalizatora za aktivaciju kalijum persulfata (PS). Eksperimenti su sprovedeni pri različitim koncentracijama PS (0,5–9,0 mM) i pH 7,0 ± 0,2. Optimalna doza PS iznosila je 3,0 mM, pri čemu je postignuta efikasnost razgradnje veća od 90%. Dalje povećanje koncentracije PS nije značajno poboljšalo razgradnju. Najveći deo reakcije odvija se u prvih nekoliko sati, a ravnoteža se uspostavlja nakon 4 sata. Dobijeni rezultati potvrđuju da biougallj efikasno aktivira PS i ukazuju na njegov potencijal za tretman voda kontaminiranih organskim mikropolutantima.

KLJUČNE REČI: biougallj, persulfat, unapređeni oksidacioni procesi, lindan

ACTIVATION OF PERSULFATE BY BIOCHAR: DOSAGE OPTIMIZATION FOR EFFECTIVE LINDANE DEGRADATION IN WATER

ABSTRACT

This study investigated the degradation of lindane (100 µg/L) using biochar derived from wood (0.2 g/L) as a catalyst for potassium persulfate (PS) activation. The experiments were conducted at different PS concentrations (0.5–9.0 mM) and pH 7.0 ± 0.2. The optimal PS dosage was 3.0 mM, achieving over 90% degradation. Further increases in PS concentration did not significantly improve degradation. The majority of the reaction takes place in the first few hours, with equilibrium reached after 4 hours. The results confirm that biochar effectively activates PS and highlight its potential for treating water contaminated with organic micropollutants.

KEY WORDS: biochar, persulfate, advanced oxidation processes, lindane

UVOD

Pesticidi igraju ključnu ulogu u poljoprivredi, jer obezbeđuju zaštitu useva i povećanje prinosa. Međutim, njihova nepravilna ili prekomerna upotreba može imati ozbiljne posledice po životnu sredinu i ljudsko zdravlje, naročito prilikom zagađenja vodenih resursa (Navarro i sar., 2024). Među različitim grupama pesticida, organohlorni pesticidi (eng. *Organochlorine pesticides*, OCPs) su posebno problematični zbog svoje visoke toksičnosti, hemijske stabilnosti i sposobnosti bioakumulacije.

Lindan pripada grupi OCPs. Decenijama se intenzivno koristio u poljoprivredi i industriji. Iako je njegova proizvodnja i upotreba zabranjena u mnogim zemljama zbog potvrđenih kancerogenih i teratogenih efekata (Keshu i sar., 2024), on i dalje perzistira u životnoj sredini, posebno u površinskim i podzemnim vodama, usled svoje hemijske stabilnosti i dugog vremena razgradnje (Wacławek i sar., 2019). Stoga je neophodno razvijati efikasne metode za uklanjanje lindana iz zagađenih voda.

U poslednje vreme, biougalj (eng. *Biochar*, BC) koji se proizvodi pirolizom biomase, istražuje se kao potencijalni katalizator u unapređenim oksidacionim procesima (eng. *Advanced oxidation processes*, AOPs). Njegova velika specifična površina, mikroporozna struktura i prisustvo funkcionalnih grupa omogućavaju mu da aktivira persulfat (PS) i generiše sulfatne radikale ($\text{SO}_4^{\bullet-}$), koji su efikasni u razgradnji organskih mikropolutanata u vodi. Ovi radikali pokazuju veću stabilnost i širi pH opseg delovanja u poređenju sa hidroksilnim radikalima ($\text{HO}^{\bullet}$), koji se tipično koriste u konvencionalnim AOPs procesima (Afshar i sar., 2024).

Količina PS direktno utiče na efikasnost razgradnje organskih mikropolutanata u u sistemu u kom se biougalj primenjuje kao katalizator u unapređenim oksidacionim procesima (eng. *biochar-assisted advanced oxidation processes*, BC-AOPs). Prethodna istraživanja sugerisu da biougalj dobijen iz različitih izvora, može efikasno delovati kao katalizator u oksidacionim procesima (Shan i sar., 2020), ali ova primena još uvek nije dovoljno istražena.

Da bi se postigla optimalna efikasnost razgradnje, neophodno je odabrati i odgovarajuću koncentraciju PS u skladu sa specifičnim eksperimentalnim uslovima. Na primer, istraživanja su pokazala da blago povećanje koncentracije PS može poboljšati razgradnju mikropolutanata, ali prekomerna količina PS ne vodi nužno daljem povećanju efikasnosti procesa (Huang i sar., 2022). Ovaj efekat se objašnjava ograničenim brojem aktivnih mesta na površini biougla, zbog čega višak PS može reagovati sa već formiranim aktivnim vrstama, pri čemu mogu nastati slabije reaktivna jedinjenja, što dovodi do smanjenja ukupne oksidacione moći sistema. Stoga je optimizacija doze PS ključna za postizanje maksimalne efikasnosti razgradnje perzistentnih zagađujućih jedinjenja u vodi.

Na osnovu svega navedenog, cilj ovog istraživanja je ispitivanje efikasnosti aktivacije PS biougljem koji je dobijen pirolizom biomase drveta za razgradnju lindana u vodi, uz

optimizaciju doze PS kako bi se postigla maksimalna oksidaciona moć sistema. Ovaj pristup potencijalo može doprineti razvoju ekonomski prihvatljivih i održivih metoda za efikasnije uklanjanje perzistentnih jedinjenja iz životne sredine.

MATERIJALI I METODE

HEMIKALIJE I REAGENSI

U eksperimentima je korišćen standard lindana Pestanal® (CAS br. 58-89-9, Fluka), koji je služio kao model supstanca, početne koncentracije 100 µg/L. Kao oksidant korišćen je kalijum persulfat visoke čistoće (ACS reagens, CAS br. 7727-21-1, Sigma Aldrich), dok je natrijum tiosulfat pentahidrat (CAS br. 10102-17-7, Sigma Aldrich) korišćen za neutralizaciju preostalih oksidacionih vrsta nakon završetka reakcije. Organski rastvarači korišćeni u istraživanju su metanol (CAS No. 67-56-1, J.T. Baker®) i heksan (CAS No. 110-54-3, J.T. Baker®).

Eksperimenti su sprovedeni sa biougljem dobijenim pirolizom biomase drveta na 700 °C koji je korišćen kao heterogeni katalizator za aktivaciju persulfata i razgradnju lindana.

DIZAJN EKSPERIMENTA

Eksperimenti vezani za razgradnju lindana sprovedeni su sa 10 mg biougla (BC), dispergovanog u 50 mL dejonizovane vode, čime je postignuta koncentracija biougla od 0,2 g/L. Početna koncentracija lindana bila je 100 µg/L, a pH vrednost vode $7,0 \pm 0,2$. U vodeni matriks dodat je PS u različitim koncentracijama (0,5–9,0 mM). Nakon toga, suspenzija je neprekidno mešana brzinom od 180 obrtaja u minuti. Uzorci su uzimani u vremenskim intervalima od 0,5h do 48h, a reakcija je zaustavljena dodatkom 0,01 M natrijum tiosulfata pentahidrata. Nakon toga, uzorci su filtrirani kroz celuložno-nitratni filter papir (0,45 µm, Sartorius, SAD), podvrgnuti tečno-tečnoj ekstrakciji sa heksanom i analizirani gasnom hromatografijom sa masenim detektorom (GC/MS, Agilent Technologies 7890A Gas Chromatograph/5975C Mass Spectrometer, Santa Clara, CA, USA), koristeći kapilarnu kolonu DB-5MS (30 m x 0.25 µm x 0.25 µm, J&W Scientific, Santa Clara, CA, USA).

EFIKASNOST RAZGRADNJE LINDANA

Efikasnost razgradnje lindana (%) u vodi u BC-AOPs sistemu izračunata je prema jednačini 1:

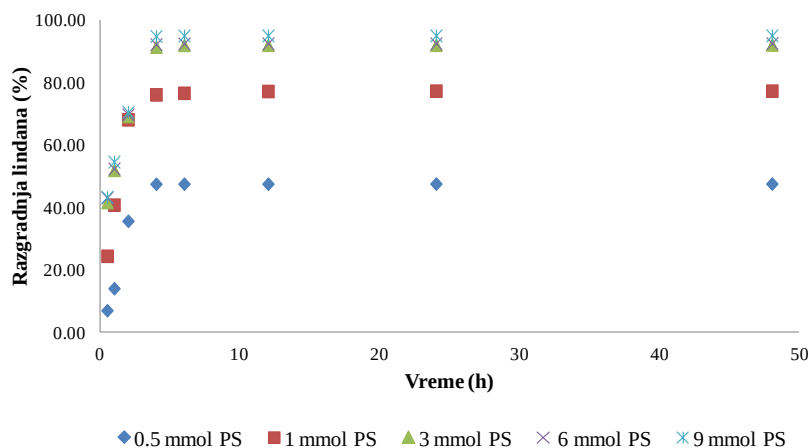
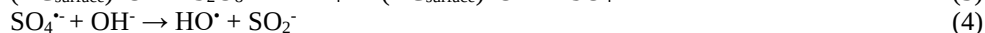
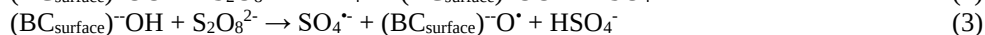
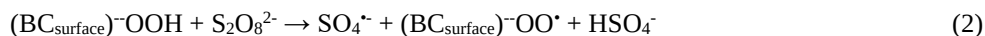
$$\text{Razgradnja lindana (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100 \quad (1)$$

gde je C_0 početna koncentracija lindana pre tretmana, a C_e koncentracija lindana nakon tretmana.

REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 1 prikazani su rezultati razgradnje lindana (100 µg/L) u prisustvu biouglja (0,2 g/L) kao katalizatora, pri različitim koncentracijama PS (0,5–9,0 mM). Na osnovu dobijenih rezultata, jasno se uočava da je razgradnja lindana najintenzivnija tokom prvih nekoliko sati reakcije, kada je koncentracija reaktivnih vrsta najviša. Nakon toga, proces se postepeno usporava i dostiže ravnotežno stanje, pri čemu se koncentracija lindana stabilizuje. U skladu sa tim, maksimalna efikasnost razgradnje postiže se nakon 4 sata, kada se uspostavi ravnoteža. Dodatno produžavanje vremena reakcije ne doprinosi značajnijem povećanju efikasnosti uklanjanja lindana iz vode.

Funkcionalne grupe na površini biouglja koje sadrže kiseonik, posebno karbonilne i hidroksilne grupe, mogu delovati kao aktivna mesta za prenos elektrona, čime značajno doprinose aktivaciji PS. Tokom ovog procesa dolazi do generisanja sulfatnih radikala ($\text{SO}_4^{\bullet-}$) na površini biouglja, pri čemu se aktivacija PS može opisati sledećim reakcijama (Ahmad i sar., 2022):



Slika 1. Uticaj koncentracije kalijum persulfata na razgradnju lindana (100 µg/L) u prisustvu biouglja dobijenog pirolizom biomase drveta (0,2 g/L)

Figure 1. Effect of potassium persulfate concentration on the degradation of lindane (100 µg/L) in the presence of biochar obtained by pyrolysis of wood biomass (0.2 g/L)

Poznato je da razgradnja organskih mikropolutanata u AOPs zavisi od primenjene koncentracije oksidanta. Rezultati prikazani na slici 1 jasno ukazuju na zavisnost efikasnosti razgradnje lindana (100 µg/L) od koncentracije PS u prisustvu biouglja

(0,2 g/L) kao katalizatora. Pri nižim koncentracijama PS (0,5 i 1,0 mM) razgradnja je spora i ograničena (do oko 50%), što sugerise da generacija reaktivnih oksidacionih vrsta nije dovoljna za efikasnu razgradnju lindana.

Povećanjem koncentracije PS na 3,0 mM postiže se značajno poboljšanje, pri čemu je efikasnost razgradnje veća od 90%, što ukazuje na uspešnu aktivaciju persulfata pomoću biouglja i formiranje dovoljne količine reaktivnih oksidacionih vrsta za razgradnju ciljanog jedinjenja. Ovaj rezultat naglašava ulogu biouglja kao heterogenog katalizatora koji efikasno aktivira PS, verovatno putem površinskih funkcionalnih grupa poput karbonilnih i hidroksilnih grupa, koje olakšavaju raskidanje peroksidne veze u PS molekulu i generišu $\text{SO}_4^{\cdot-}$ radikale.

Dalje povećanje koncentracije PS na 6,0 i 9,0 mM ne dovodi do proporcionalnog poboljšanja efikasnosti, što sugerise da je sistem dostigao zasićenost i da dodatna količina PS ne doprinosi značajnijem poboljšanju. U uslovima viška oksidanta, PS može delovati kao „hvatač“ slobodnih radikala, stupajući u reakcije sa $\text{SO}_4^{\cdot-}$ i formirajući manje reaktivne vrste, poput peroksidisulfatnog radikala ($\text{S}_2\text{O}_8^{\cdot-}$), što može smanjiti ukupnu efikasnost procesa (Miserli i sar., 2022):



Navedena zapažanja su u skladu sa rezultatima Huang i sar. (2022), gde je za aktivaciju PS prilikom uklanjanja lindana korišćen biouglj modifikovan azotom sa nano nulavalentim gvožđem (*eng. N-doped biochar-loaded nanoscale zero-valent iron*, Fe@N-BC). Autori su pokazali da je pri početnoj koncentraciji lindana od 10 mg/L, dozi katalizatora od 1,25 g/L i koncentraciji PS od 4,0 mM postignuta potpuna razgradnja u roku od 60 minuta, bez podešavanja pH vrednosti, a da je povećanje doze PS na 6 mM samo blago poboljšalo razgradnju lindana.

ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja pokazuju da biouglj dobijen pirolizom biomase drveta (0,2 g/L) uspešno aktivira kalijum persulfat (PS), omogućavajući efikasnu razgradnju lindana (100 µg/L). Optimalna koncentracija PS iznosi 3,0 mM, pri kojoj se postiže efikasnost razgradnje veća od 90%, dok dalje povećanje koncentracije PS ne dovodi do značajnog poboljšanja. Ovi zaključci važe za laboratorijske uslove eksperimenta, pri pH $7,0 \pm 0,2$ i specifičnim eksperimentalnim parametrima (koncentracija lindana, doza biouglja i način mešanja). Potencijalni uticaj složenijih matriksa realnih uzoraka vode nije ispitan. Dalja istraživanja treba da obuhvate primenu ovog procesa na realnim uzorcima vode sa prisustvom organskih materija i drugih organskih mikropolutanata.

Zahvalnica

Ovo istraživanje sprovedeno je uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije, #10810, Sustainable solutions in environmental chemistry: exploring biochar potential-EnviroChar

LITERATURA

- Afshar, M., Mofatteh, S., Biochar for a sustainable future: Environmentally friendly production and diverse applications, *Results in Engineering* 23 (2024) 102433.
- Ahmad, A., Priyadarshini, M., Yadav, S., Ghangrekar, M. M., Surampalli, R. Y., The potential of biochar-based catalysts in advanced treatment technologies for efficacious removal of persistent organic pollutants from wastewater: A review, *Chemical Engineering Research and Design* 187 (2022) 470–496.
- Huang, P., Zhang, C., Wang, J., Tang, H., Sun., Enhancement of persulfate activation by Fe-biochar composites: Synergism of Fe and N-doped biochar, *Applied Catalysis B: Environmental* 303 (2022) 120926.
- Keshu, M., Rani, U., Shanker, U., Synthesis and characterization of novel guar gum based waste material derived nanocomposite for effective removal of hexabromocyclododecane and lindane, *International Journal of Biological Macromolecules* 268 (2024) 131535.
- Miserli, K., Kogola, D., Paraschoudi, I., Konstantinou, I., Activation of persulfate by biochar for the degradation of phenolic compounds in aqueous systems, *Chemical Engineering Journal Advances* 9 (2022) 100201.
- Navarro, I., de la Torre, A., Sanz, P., Abrantes, N., Campos, I., Alaoui, A., Christ, F., Alcon, F., Contreras, J., Glavan, M., Pasković, I., Polić Pasković, M., Nørgaard, T., Mandrioli, D., Sgargi, D., Hofman, J., Aparicio, V., Baldi, I., Bureau, M., Vested, A., Martínez, M. Á., Assessing pesticide residues occurrence and risks in water systems: A Pan-European and Argentina perspective, *Water Research* 254 (2024) 121419.
- Shan, R., Han, J., Gu, J., Yuan, H., Luo, B., Chen, Y., A review of recent developments in catalytic applications of biochar-based materials, *Resources, Conservation and Recycling* 162 (2020) 105036.
- Wacławek, S., Silvestri, D., Hrabak, P., Padil, V.V.T., Torres-Mendieta, R., Wacławek, M., Cerník, M., Dionysiou, D.D., Chemical oxidation and reduction of hexachlorocyclohexanes: A review, *Water Research* 162 (2019) 302-319.