

**FOTOKATALITIČKI TRETMAN KOMUNALNE OTPADNE VODU U CILJU UKLANJANJA NESTEROIDNIH ANTIINFLAMATORNIH LEKOVA (NSAIL)****PHOTOCATALYTIC TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATER FOR DEGRADATION OF NON-STEROIDAL ANTI-INFLAMATORY DRUGS (NSAIDs)**Marko Bogdanić, Ivana Mihajlović, Mladenka Novaković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – INŽENJERSTVO ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE**

**Kratak sadržaj** – U okviru ovog rada proučavano je prisustvo nesteroidnih anti-inflamatornih lekova u životnoj sredini i komunalnoj otpadnoj vodi, njihova fizičko-hemijska svojstva i mogućnosti njihovog uklanjanja, sa akcentom na fotokatalitičkim postupcima. Za potrebe rada izveden je eksperiment na uzorku komunalne otpadne vode, u okviru kog je analiziran uticaj pH vrednosti, mase fotokatalizatora i koncentracije odabranih farmaceutika – ibuprofena, ketoprofena, diklofenaka i naproksena, a zatim je izveden i eksperiment uklanjanja navedenih nesteroidnih antiinflatamatornih lekova iz komunalne vode.

**Ključne reči:** Farmaceutici, Nesteroidni antiinflatamatorni lekovi, Fotokataliza, Komunalna otpadna voda

**Abstract** – In this paper, the presence of non-steroidal anti-inflammatory drugs in the environment and municipal wastewater, their physico-chemical properties and the possibilities of their removal, with an emphasis on photocatalytic processes, were studied. For the purposes of the paper, an experiment was carried out on a distilled water sample, in which the influence of pH value, mass of photocatalyst and concentration of selected pharmaceuticals - ibuprofen, ketoprofen, diclofenac and naproxen was analyzed, and then an experiment was carried out to remove the mentioned non-steroidal anti-inflammatory drugs from municipal water.

**Keywords:** Pharmaceuticals, Non-steroidal anti-inflammatory drugs, Photocatalysis, Municipal wastewater

**1. UVOD**

Potrebe tretmana komunalnih voda menjaju se razvojem nauke, tehnologije i ljudskog društva. Konvencionalni tretmani, kao osnovni tretmani komunalnih otpadnih voda, ne odolevaju pritisku savremenog načina života i često zahtevaju dopunski tretman koji može odgovoriti potrebama kvaliteta prečišćenih voda koje se ispuštaju u recipijente.

Polutanti u tragovima su najveći izazov za ovakve tretmane, a njihova optimizacija zahteva iscrpna istraživanja i

veliki broj eksperimentalno i empirijski sakupljenih informacija, kako bi se na najbolji način prilagodili postavljenim zahtevima. Farmaceutici predstavljaju široku grupu jedinjenja, različitih svojstava i struktura, koji su prisutni u životnoj sredini, kao posledica konstantne konzumacije i nedovoljne degradacije u postrojenjima za tretman voda.

Komunalne otpadne vode, koje sadrže farmaceutike, se nedovoljno prečišćene ispuštaju u površinske vode, što može biti opasno po životinjske i biljne akvatične vrste. Osim toga, kako se vodozahvat vode za piće sprovodi najčešće iz površinskih voda, farmaceutici mogu pronaći svoj put do mreže za vodosnabdevanje i na taj način se konstantno unositi u organizam i predstavljati prikrivenu opasnost, koja u minimalnim dozama može izazvati hronične zdravstvene probleme. Cilj istraživanja jeste detaljna analiza fotokatalitičke degradacije, kao postupka za uklanjanje nesteroidnih antiinflatamatornih lekova, uz pregled postojeće literature i predstavljanje drugih tehnika koje mogu biti podjednako adekvatne i prilagođene uklanjanju ove vrste polutanata iz vode. Kako bi se mogao odrediti potencijal predloženog tretmana za uklanjanje ibuprofena, diklofenaka, naproksena i ketoprofena iz komunalne otpadne vode, za potrebe istraživanja je korišćen realan uzorak. Analiza dobijenih rezultata i mogućnosti za dalje istraživanje navedeni su u zaključnom razmatranju ovog rada.

**2. NSAIL U KOMUNALNIM OTPADNIM VODAMA**

Nesteroidni antiinflatamatorni lekovi, NSAIL (eng. *non-steroidal anti-inflammatory drugs*, NSAIDs) predstavljaju klasu lekova, koji pokazuju analgetička, antipiretička i antiinflatamatorna dejstva. Ekskrecija NSAIL i njihovih metabolita je veliki izvor zagađenja vode [1]. NSAIL pripadaju emergentnim supstancama, i najčešće upotrebljavanim farmaceuticima u ljudskoj i veterinarskoj medicini. Farmaceutici su, uopšteno, veliki i hemijski kompleksni molekuli. Ova grupa jedinjenja ne predstavlja homogenu grupu komponenata, već se oni međusobno razlikuju prema molekulske masi, strukturi, funkcijama i formi [2]. Poslednjih decenija, povećao se interes za prisustvo farmaceutika i proizvoda za ličnu negu (eng. *pharmaceuticals and personal care products*, PPCPs) u vodenoj sredini.

NSAIL i produkti njihove transformacije detektuju se u otpadnim vodama u koncentracijama opsega  $\mu\text{g l}^{-1}$  i  $\text{ng l}^{-1}$ . Trenutno NSAIL nisu regulisani zakonom, ali njihova

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila dr Ivana Mihajlović, vanr. prof.**

važnost je istaknuta Direktivom 2013/39/EU, listom prioriternih supstanci, koju dalje prati implementacija Odluke (EU) 2015/495 [3]. Budući da konvencionalni procesi tretmana otpadnih voda nisu dovoljno efikasni za eliminaciju različitih PPCP zbog njihove male biorazgradljivosti, ove komponente se pojavljuju u efluentima postrojenja za tretman komunalnih voda i ispuštaju se u površinske vode [4]. Lipofilna priroda komponente može biti značajna za procenu efikasnosti njenog uklanjanja tokom tretmana. Eliminacija kontaminanata sorpcijom na suspendovanom materijalu, dešava se tokom primarnog i sekundarnog tretmana otpadne vode (sedimentacija, koagulacija i/ili flokulacija).

### 3. TRETMAN VODA OPTEREĆENIH NSAIL

Većina postrojenja za tretman otpadnih voda, PPOV (eng. *Wastewater treatment plants*, WWTPs) nisu dizajnirana za uklanjanje organskih kontaminanata u tragovima. Kapacitet PPOV za uklanjanje NSAIL zavisi najviše od biološke faze tretmana, gde se uklanjaju predominantno sorpcijom na suspendovanim česticama i biološkom degradacijom [5]. Komunalna voda je glavni način dospevanja lekova i njihovih metabolita u životnu sredinu [6]. Najznačajnije metode za uklanjanje NSAIL iz vode su koagulacija i sedimentacija, biodegradacija, fototransformacija, hlorinacija i ozonizacija [7].

Mnogi unapređeni procesi oksidacije (eng. *Advanced oxidation processes*, AOPs), poput UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ozon, Fenton i poluprovodničke fotokatalize su proučavani za efektivnu degradaciju organskih polutanata. Glavna prednost unapređenih procesa oksidacije su efektivna razgradnja polutanta u vodenom rastvoru sa *in-situ* visoko reaktivnim hidroksil radikalima (OH). Da bi se unapređeni procesi oksidacije koristili u procesima tretmana otpadne vode na industrijskom nivou, neophodno je da budu ekonomski povoljni i ekološki održivi [8].

### 4. PRIMENA FOTOKATALIZATORA U UKLANJANJU NSAIL

Fotokataliza se, kao unapređeni proces oksidacije, koristi zbog svojih prednosti kao što su jednostavne operacije, visoke efikasnosti i niske cene [9]. Fotokatalizase može primenjivati uz solarnu energiju da oksiduje ili redukuje kontaminante stimulisanjem transfera elektrona poluprovodničkog katalizatora [10].

Heterogena fotokataliza je obećavajući proces unapređene oksidacije, za uklanjanje širokog spektra mikropolutanata, zbog svoje mogućnosti da razgradi organske supstance do neopasnih produkata [11].

U odnosu na druge postupke, poput bioloških tretmana, hemijske oksidacije, adsorpcije na aktivnom uglju, ozonizacije i slično, fotokataliza ima nekoliko prednosti. Pre svega, hemijska oksidacija je tehnologija koja je pogodna samo za degradaciju polutanata koji postoje u visokim koncentracijama, bez postizanja potpunog uklanjanja organskih polutanata. Nedostaci koji se vezuju za proces heterogene fotokatalize su tehnološka ograničenja, nedostatak zakonskih regulativa koje ograničavaju ispuštanje specifičnih kontaminanata u komunalne vode i niska efikasnost u poređenju sa već utvrđenim metodama za uklanjanje polutanta, koje se

koriste u određenim industrijama. Iako je veoma efektivna metoda za inaktivaciju patogena i degradaciju emergentnih polutanata u tretmanu komunalne otpadne vode, nije kompetitivna sa konsolidovanim tehnologijama, poput ozona, zbog tehnoloških ograničenja [12].

### 5. MATERIJALI I METODE

U postupku fotokatalitičke razgradnje farmaceutika u realnom uzorku otpadne vode primenom nanostrukturne mešavine cink oksida i indijum oksida, ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> korišćeni su Sigma Aldrich standardi analiziranih farmaceutskih jedinjenja: diklofenak (≥98,5% čistoće), naproksen (≥99,9% čistoće), ibuprofen (≥99,3% čistoće), ketoprofen (≥98,0% čistoće)

Početni prekursori su ZnO i In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, proizvođača Sigma Aldrich, čistoće 99,9% i veličine čestica ≤1 μm. Za pripremu uzoraka i standardnih rastvora korišćeni su metanol i acetonitril, proizvođača Sigma Aldrich. U postupku fotokatalitičke razgradnje korišćena je nanostrukturna mešavina ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, koja je sintetisana mehanometrijskom metodom, u tri koraka: ZnO i In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> su mleveni u avanu 10 minuta, u molarnom odnosu 2:1; samleveni prekursori su zagrevani u peći tokom 2 h, na 700 °C; ZnO i In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> su ponovo mleveni 10 minuta. Odmereno je 40 mg sintetisanog nanomaterijala, ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, na analitičkoj vagi, u erlenmajer zapremine 100 ml. Korišćena koncentracija farmaceutika iznosila je 5 mg l<sup>-1</sup> (od standardnog rastvora koncentracije 200 mg l<sup>-1</sup>, formiran je rastvor dodatkom 20 mg u 100 ml acetonitrila ili metanola).

U eksperimentu su korišćeni realni uzorci otpadne vode, kako bi se utvrdila efikasnost razgradnje odabranih farmaceutika nakon utvrđenih optimalnih parametara (uticaj mase fotokatalizatora, uticaj pH vrednosti i uticaj početne koncentracije farmaceutika). Uzorci komunalne otpadne vode spajkovani su sa 5 mg l<sup>-1</sup> farmaceutske mešavine.

Pripremljeni uzorak postavljen je na magnetnu mešalicu i tretiran UV zracima. Vreme trajanja fotokatalitičkog procesa je 60 minuta. Alikvoti tretiranog uzorka su uzimani u određenim vremenskim intervalima (5, 10, 20, 30, 40, 50 i 60 minuta), nakon čega su filtrirani kroz 0,45 membranske filtere (*HROMAFIL® Xtra PES*, 0,45 μm, proizvođač *Macherey-Nagel*) i 1 ml uzorka se prenosilo u vijale za HPLC. Analiza uzoraka nakon fotokatalize sprovedena je na uređaju za tečnu hromatografiju visokih performansi sa DAD detektorom (*Agilent Technologies*). Formirane su kalibracione krive farmaceutika u opsegu 1-10 mg l<sup>-1</sup>.

Parametri metode:

1. Mobilne faze: odnos 50:50 (acetonitril: 50 mM kalijum dihidrogen fosfat);
2. Protok mobilnih faza: 1 ml min<sup>-1</sup>;
3. Zapremina injektovanog uzorka: 20 μL;
4. Temperatura kolone: 25°C (tip kolone Zorbax Extend C18 (dužina 150 mm; unutrašnji prečnik 4,6 mm; veličina čestica: 5 μm));
5. Maksimalne talasne dužine: diklofenak, ibuprofen, naproksen i ketoprofen na talasnim dužinama 276 nm, 220 nm, 230 nm i 258 nm i
6. Vreme trajanja analize je 10 min.

## 6. REZULTATI I DISKUSIJA

### 6.1. Uticaj pH na uklanjanje NSAID pomoću fotokatalizatora ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Uočeno je da je na kiseloj pH; 5 i 6.25 – uklanjanje ketoprofena bilo intezivno i da se već u prvih 10 minuta uklonio skoro u potpunosti. Pri višim pH vrednostima, u baznoj sredini, uklanjanje ketoprofena je nešto sporije, ali i dalje vrlo brzo i efikasno. Prema literaturnim podacima, pK<sub>a</sub> ketoprofena je oko 4.7, što znači da u baznoj sredini uglavnom postoji u svojoj anjonskoj formi [4]. Prilikom ispitivanja uticaja pH vrednosti na fotokatalitičku degradaciju naproksena najbolji rezultat postignut je na pH 6.25. pK<sub>a</sub> naproksena iznosi 4.15, što znači da su eksperimenti izvođeni samo iznad ove vrednosti, kada je on prisutan u anjonskom obliku [13]. Pri pH vrednosti 6.25 razgradnja diklofenaka je najefikasnija, i već u prvih 20 minuta dolazi do njegove potpune razgradnje. Budući da je razgradnja na sve tri analizirane pH vrednosti veoma slična, može se zaključiti da pH nema značajnog uticaja na uklanjanje diklofenaka pomoću upotrebljivanog nanokompozita. Prema literaturnim podacima, razgradnji diklofenaka pogoduje kisela sredina u odnosu na baznu [14]. Ibuprofen se najbrže razgradio na pH 6.25, međutim nije zabeležen značajan uticaj pH vrednosti na degradaciju ibuprofena fotokatalitičkim putem. Prema literaturi, pK<sub>a</sub> vrednost ibuprofena je oko 5 [15, 16], što znači da je negativno naelektrisan u regionu blizu neutralne pH, što rezultuje u privlačenju elektrostatičkih sila između nanostrukturne mešavine i povećava adsorpciju i procenat fotodegradacije [16].

### 6.2. Uticaj mase fotokatalizatora na uklanjanje NSAID

Eksperimentalno određivanje uticaja mase fotokatalizatora ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na uklanjanje odabranih NSAID je sprovedeno sa 10 mg, 20 mg, 40 mg i 60 mg fotokatalizatora, na pH vrednosti 6.25 i uz koncentraciju farmaceutika 5mg l<sup>-1</sup>. Ustanovljena je eksponencijalna zavisnost brzine razgradnje ketoprofena i mase fotokatalizatora, pri čemu se najveća brzina razgradnje zabeležena za 20 mg ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, zbog čega se može zaključiti da bi to bila optimalna masa fotokatalizatora u ovom slučaju. Najveći deo ketoprofena razgrađen je već u prvih 5 minuta fotokatalize, uz 20 mg fotokatalizatora Uočeno je da su konstante razgradnje naproksena pri upotrebi 10 mg i 20 mg fotokatalizatora veoma približne (0,043 min<sup>-1</sup> i 0,041 min<sup>-1</sup>, respektivno), ali obe vrednosti su veoma male i ukazuju da se svakog minuta razgradi svega oko 4% prisutne koncentracije farmaceutika. Primetno najmanju vrednost ima konstanta razgradnje pri 60 mg fotokatalizatora (0,019 min<sup>-1</sup>). Uticaj mase fotokatalizatora na uklanjanje diklofenaka pokazao je da se najbolji rezultat postiže uz upotrebu 40 mg fotokatalizatora. Primećena je veoma spora razgradnja ibuprofena, gde se nakon 60 minuta degradilo tek oko 60% od prvobitne koncentracije. Priloženi rezultati ukazuju na to da masa upotrebljenog fotokatalizatora neće imati značajan uticaj na razgradnju ibuprofena.

### 6.3. Uticaj početne koncentracije NSAID

Ispitivanje uticaja početne koncentracije NSAID je ispitivano pri odbranim koncentracijama nivoima farmaceutika od 2 do 10 mg l<sup>-1</sup>, uz masu fotokatalizatora od 40 mg i pH

6.25. Zabeležena je intezivna razgradnja ketoprofena pri koncentraciji od 2 - 4 mg l<sup>-1</sup>. Daljim porastom koncentracije opada efikasnost razgradnje ketoprofena. Nakon 60 minuta, oko 15% naproksena je razgrađeno primenom najviše koncentracije. Nezavidan rezultat postignut je i sa početnom koncentracijom od 8 mg l<sup>-1</sup>, dok pri nižim analiziranim koncentracijama uočeni su zadovoljavajući nivoi uklanjanja (oko 90%). Uočena je veoma efikasna razgradnja diklofenaka pri svim testiranim inicijalnim koncentracijama. Najbolji rezultat postignut je sa inicijalnom koncentracijom od 4 mg l<sup>-1</sup>, pri kojoj je diklofenak u potpunosti uklonjen u prvih 20 minuta eksperimenta. Pri analizi uticaja početne koncentracije ibuprofena, može se uočiti da nakon 60 minuta ni pri jednoj koncentraciji nije postignuto potpuno uklanjanje ovog farmaceutika. Pri koncentraciji 5 mg l<sup>-1</sup> postignuto je najbolje uklanjanje (65%). Najmanje efikasno uklanjanje je postignuto pri koncentraciji od 10 mg l<sup>-1</sup>.

### 6.4. Uklanjanje NSAID iz komunalne otpadne vode

Uklanjanje odabranih NSAID iz komunalne otpadne vode je ispitivano pri početnoj koncentraciji farmaceutika od 5 mg l<sup>-1</sup> u mešavini, uz koncentraciju fotokatalizatora od 0,4 mg ml<sup>-1</sup>. U okviru eksperimentalnih ispitivanja moguće je razmatrati sinergetski uticaj komponenata u analiziranom sistemu. Prisutnost različitih jona u komunalnoj vodi može značajno uticati na efikasnost uklanjanja selektovanih NSAID. Hemijske komponente u sastavu vode imaju inhibitorski efekat na proces degradacije ukoliko dospeju u blizinu poluprovodnika. Kvalitativno ispitivanje prečišćavane komunalne vode nije izvršeno u okviru ovog rada, stoga se ne može odrediti koja vrsta supstanci može potencijalno inhibirati ili ubrzati ovaj postupak. Fotokatalitička degradacija ibuprofena u komunalnoj vodi je značajno smanjena u odnosu na eksperimente prilikom kojih je ispitivan uticaj različitih faktora na fotokatalitički tretman odabranih NSAID. Nakon 60 minuta eksperimenta uklonjeno je tek oko 10% inicijalne koncentracije ibuprofena. Može se zaključiti da ova metoda zahteva pojedine modifikacije kako bi se prilagodila uklanjanju ibuprofena iz komunalne vode u kojoj su prisutni i drugi analizirani NSAID. Ketoprofen i diklofenak su u potpunosti degradirani nakon 30 minuta, dok je naproksen degradiran najvećom brzinom u prvih 20 minuta fotokatalitičkog procesa.

## 7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Rezultati eksperimenta pokazali su veoma efikasno uklanjanje ketoprofena, naproksena i diklofenaka, jer su se sva tri farmaceutika uspešno uklonila već u prvoj polovini izvedenog eksperimenta (30 minuta). Ibuprofen je pokazao izuzetnu perzistentnost ka fotokatalitičkoj razgradnji, i nakon 60 minuta eksperimenta uklonjeno je svega oko 10%. Na osnovu literaturnih podataka, može se pretpostaviti da je došlo do međusobne kompeticije izabranih farmaceutika, kao da i prisustvo drugih hemijskih jedinjenja i jona značajno usporava razgradnju ibuprofena. Nije moguće sa sigurnošću utvrditi koji mehanizam je sprečio uklanjanje ibuprofena, budući da izvedeni eksperiment nije uključivao fizičko-hemijsku analizu (prisustvo jona i drugih značajnih parametara) uzorka komunalne vode.

Nadogradnja istraživanja ovim podacima pružila bi jasniju sliku o procesima koji se odvijaju, a time i dala mogućnost za unapređenje i modifikaciju korišćenog postupka. Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da nanokompozit ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> predstavlja adekvatan fotokatalizator za uklanjanje nesteroidnih antiinflamatornih lekova i da postoji osnov za razmatranje njegove upotrebe za eliminaciju širokog spektra farmaceutskih jedinjenja iz vodenih medijuma.

## 8. LITERATURA

- [1] R. B. Arthur, J. L. Bonin, L. P. Ardill, E. J. Rourk, H. H. Patterson, E. A. Stemmler, "Photocatalytic Degradation of Ibuprofen over BiOCl Nanosheets with Identification of Intermediates", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 35, pp. 1-9, 2018.
- [2] V. L. Cunningham "Characteristics of Pharmaceuticals Related to Environmental Fate", Berlin, Springer, 2008.
- [3] S. Murgolo, I. S. Moreira, C. Piccirillo, P. M. L. Castro, G. Ventrella, C. Coccozza, G. Mascolo, "Photocatalytic Degradation of Diclofenac by Hydroxyapatite-TiO<sub>2</sub> Compsite Material: Identification of Transformation Products and Assessment of Toxicity", *Materials*, Vol. 11, pp. 1-16, 2018.
- [4] L. Djouadi, H. Khalaf, H. Boukhatem, H. Boutoumi, A. Kezzime, A. J. Santaballa, M. Canle, "Degradation of aqueous ketoprofen by heterogeneous photocatalysis using Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/TiO<sub>3</sub>-Montmorillonite nanocomposites under simulated solar irradiation", *Applied Clay Science*, Vol. 166, pp. 27-37, 2018.
- [5] L. D. Nghiem, A. I. Schäfer, M. Elimelech, "Pharmaceutical Retention Mechanisms by Nanofiltration Membranes", *Environmental Science & Technology*, Vol. 39, pp. 7698-7705, 2005.
- [6] A. S. Stasinakis, G. Gatidou, "Micropollutants and Aquatic Environment", London, IWA Publishing, 2019.
- [7] E. M. Cuerda-Correa, J. R. Domínguez-Vargas, D. J. Olivares-Marín, J. B. De Heredia, "On the use of carbon blacks as potential low-cost adsorbents for the removal of non-steriodal anti-inflammatory drugs from river water", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 177, pp. 1046-1053, 2010.
- [8] K. S. Varma, R. J. Tayade, K. J. Shah, P. A. Joshi, A. D. Shuklka, V. G. Gandhi, "Photocatalytic degradation of pharamceutical and pesticide compounds (PPCs) using doped TiO<sub>2</sub> nanomaterials: A review", *Water-Energy Nexus*, Vol. 3, pp. 46-61, 2020.
- [9] X. Zheng, Y. Li, J. Yang, S. Cui, "Z-Scheme heterojunction Ag/NH<sub>2</sub>-MIL-125(Ti)/CdS with enhanced photocatalytic activity for ketoprofen degradation: Mechanism and intermediates", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 422, pp. 130105, 2021.
- [10] Z. Long, Q. Li, T. Wie, G. Yhang, Z. Ren, "Historical development and prospects of photocatalysts for pollutant removal in water", *Journal of Hazardous Materials*, Vol 395, pp. 122599, 2020.
- [11] M. A. Barros, M. J. Sampaio, A. R. Ribeiro, C. G. Silva, A. M. T. Silva, J. L. Faria, "Interactions of pharmaceutical compounds in water matrices under visible-driven photocatalysis", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 9, pp. 104747, 2020.
- [12] G. Iervolino, I. Zammit, V. Vaiano, L. Rizzo, "Limitations and Prospects for Wastewater Treatment by UV and Visible-Light-Active Heterogeneous Photocatalysis: A Critical Review", *Topics in Current Chemistry*, Vol. 378, pp. 1-40, 2020.
- [13] C. Regmi, Y. K. Kshetri, R. P. Pandey, S. W. Lee, "Visible-light-driven S and W co-doped dendritic BiVO<sub>4</sub> for efficient photocatalytic degradation of naproxen and its mechanistic analysis", *Molecular Catalysis*, Vol. 453, pp. 149-160, 2020.
- [14] E. Mugunthan, M. B. Saidutta, P. E. Jagadeeshbabu, "Photocatalytic Degradation of Diclofenac using TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> Mixed Oxide Catalysts", *Environmental Technology*, Vol. 40, pp. 1-26, 2017.
- [15] M. Tanveer, G. T. Guyer, G. Abbas, "Photocatalytic degradation of ibuprofen in water using TiO<sub>2</sub> and ZnO under artificial UV and solar irradiation", *Water Environment Research*, Vol. 91, pp. 822-829, 2019.
- [16] M. I. Pratiwi, N. Afifah, R. Saleh, "Fe-doped ZnO Nanoparticles in Solution. Infulence of pH, Dissolution, Aggregation and Disaggregation effects", *Journal of Colloid Science and Biotechnology*, Vol. 3, pp. 75-84, 2017.

### Kratka biografija:



Marko Bogdanić rođen je u Novom Sadu, 1997. god. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2020. godine iz oblasti Inženjerstva zaštite životne sredine.



Mladenka Novaković je odbranila 2021. doktorsku disertaciju na Fakultetu tehničkih nauka. Trenutno je zaposlena na Fakultetu tehničkih nauka u zvanju asistenta sa doktoratom.



Ivana Mihajlović rođena je u Boru 1984. godine. Od 2020. god. vanredni profesor je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na katedri za Inženjerstvo zaštite životne sredine.