



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 Beškoski, 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 Mačerak, 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/H₂O₂/S₂O₈²⁻ procesa (Predavanje po pozivu - Laureati)*

V-3. Katarina Tošić, Sara Mijaković, Anđela Mitrović Rajić, Jasmina Grbović Novaković, Nenad Filipović, Vladimir Rajić, Bojana Paskaš 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 rogate 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*

UKLANJANJE FARMACEUTSKI AKTIVNIH JEDINJENJA IZ VODE PRIMENOM IMOBILISANE LAKAZE

Marija Šobić, Mirjana Petronijević, Sanja Panić, Nataša Đurišić-Mladenović

*Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad
sobicmarija@gmail.com*

Izvod

Kontaminacija vode zagađujućim supstancama kao što su farmaceutski aktivna jedinjenja, pesticidi, teški metali, mikroplastika i dr., predstavlja potencijalnu pretnju za ekosisteme i i zdravlje, te je neophodno razvojati efikasna rešenja za prečišćavanje voda, naročito otpadnih voda. Jedno od mogućih rešenja je primena biokatalitičkih procesa baziranih na primeni enzima (oksidoreduktaza) kao "zelenih" tehnologija prečišćavanja. U ovom radu prikazan je potencijal primene lakaze, enzima iz grupe oksidoreduktaza, u postupcima prečišćavanja vode, analizirajući metode imobilizacije, nosače, mehanizam delovanja i efekte na uklanjanje farmaceutski aktivnih jedinjenja. Razmotrene su prednosti upotrebe imobilizovane lakaze u odnosu na njenu slobodnu formu sa namerom da se istraže putevi za njeno šire korišćenje i napredak u "zelenim" metodama prečišćavanja vode.

Ključne reči: enzim, lakaza, imobilizacija, farmaceutski aktivna jedinjenja, vode

Uvod

Organski mikropolutanti poput farmaceutski aktivnih jedinjenja su se poslednjih godina nametnuli kao globalni ekološki izazov zbog prisustva u vodnim resursima u tragovima, predstavljajući opasnost za ekosisteme i zdravlje ljudi. Anksiolitici, poput benzodiazepina koji se koriste za tretman anksioznosti i nesanice, identifikovani su u otpadnim vodama, sa zabeleženim koncentracijama između 3 i 87 ng/l u Nemačkoj i Španiji [1, 2]. Naproksen i diklofenak, lekovi koji se koriste za ublažavanje bola, upale i groznice, otkriveni su u rečnim i otpadnim vodama [3]. Globalne koncentracije naproksena u rekama variraju u koncentracijama od 0,04 do 32 µg/l [4], dok su nivoi diklofenaka u holandskim otpadnim vodama dostigli koncentraciju do 0,280 µg/l [5]. U blizini bolničkih postrojenja, koncentracije citostatika, u otpadnim vodama izmerene su u koncentracijama između 0,02 i 0,025 µg/L [6], što ukazuje da postojeće metode nisu efikasne u uklanjanju ovih mikropolutanata iz otpadnih voda [7]. Koncentracije aspirina u otpadnim vodama razlikuju se geografski, krećući se od 0,4–0,7 µg/l u Indiji [8] do 7,3 µg/l u Japanu [9]. Ketoprofen je pronađen u koncentracijama od 0,16 ng/l u Italiji [10] do 260 µg/l u Indiji [8]. Koncentracija ibuprofena u vodenim tokovima varira od 3,5 do 2200 mg/l [11,12].

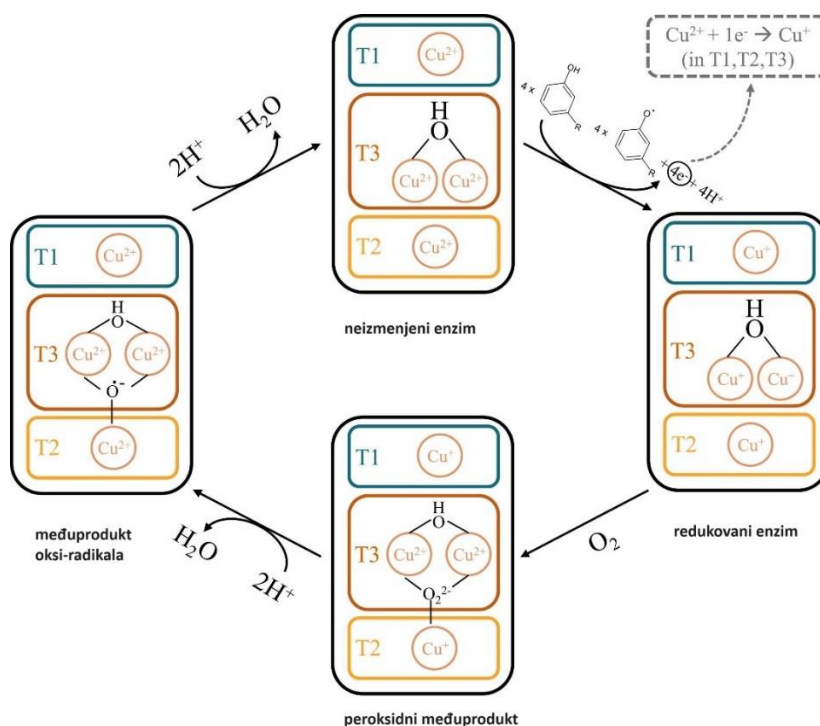
Metode uklanjanja mikropolutanata obuhvataju unapređene oksidacione procese, membransku filtraciju, adsorpciju, biološku obradu, fotokatalizu, elektrohemijske metode i dr, pružajući različite pristupe za suočavanje sa izazovom mikropolutanata, od fizičkog uklanjanja do hemijske razgradnje. Međutim, česti nedostaci ovih metoda za uklanjanje mikropolutanata su zagušenje filtracionih membrana, stvaranje štetnih sporednih proizvoda i ograničena efikasnost adsorpcije [13,14]. Upotreba enzima lakaze, koja spada u grupu oksidoreduktaza, predstavlja alternativni, ekološki održiv pristup uklanjanja mikropolutanata zahvaljujući smanjenim energetskim potrebama i blagim operativnim uslovima [15]. Ipak, ograničenja povezana sa fizičkom stabilnošću i ponovnom upotrebom lakaze ističu potrebu za njenom imobilizacijom kao strategiji za poboljšanje njenih performansi i praktične primenljivosti [16]. Tehnike kao što su adsorpcija,

enkapsulacija ili kovalentno vezivanje pokazale su se kao efikasni načini za unapređenje stabilnosti, a samim tim i efikasnosti enzima u uklanjanju zagađujućih supstanci [17].

Struktura lakaza i njihov mehanizam delovanja

Do danas je identifikovano preko 100 različitih vrsta lakaza, koje se kategorizuju kao dimerni ili trimerni glikoproteini, sa molekulskom masom u rasponu od 50 do 130 kDa [18]. Ovi enzimi svoju katalitičku aktivnost duguju prisustvu bakarnih atoma, raspoređenih unutar tri specifična bakarna centra zvana Tip-1 (T1), Tip-2 (T2), i Tip-3 (T3). T1 centar, koji sadrži jedan Cu atom, odgovoran je za oksidaciju supstrata i daje enzimu karakterističnu plavu boju, dok T2 i T3 centri formiraju trinuklearni klaster koji igra ključnu ulogu u redukciji kiseonika u vodi [19].

Mehanizam delovanja lakaza obuhvata nekoliko koraka (Slika 1), počevši od oduzimanja elektrona supstratu na T1 mestu, što dovodi do redukcije Cu^{2+} u Cu^{+} [20]. Nakon oksidacije četiri molekula supstrata, enzim postaje redukovani. U sledećem koraku, Cu^{+} joni na T2 i T3 mestima redukuju molekularni kiseonik u vodi prelazeći u peroksidni međuprodukt i međuprodukt oksi-radikala, nakon čega se enzim regeneriše.



Slika 1. Šematski prikaz mehanizma delovanja lakaze [20]

Imobilizacija lakaze

Iako lakaza u slobodnoj formi (nadalje u tekstu slobodna lakaza) može imati visoku aktivnost, ograničenja u pogledu njene separacije i mogućnosti ponovnog korišćenja mogu uzrokovati smanjenje aktivnosti tokom kontinualnih procesa, što dovodi do povećanja operativnih troškova [21]. Kao rešenje ovih izazova, tehnike imobilizacije predstavljaju prevladavajući pristup. Fiksiranje lakaze na stabilne čvrste nosače značajno unapređuje njihovu sposobnost očuvanja aktivnosti i otpornosti na promenljive operativne uslove, kao što su promene temperature, pH vrednosti i izloženost hemijskim agensima [22]. Prilikom imobilizacije od suštinskog značaja su izbor tehnike, materijal nosača i početna aktivnost enzima [23].

Metode imobilizacije mogu se razvrstati u dve osnovne kategorije koje uključuju fizičke i hemijske veze. Glavna razlika između ove dve kategorije leži u načinu povezivanja enzima sa nosačem. Fizička imobilizacija omogućava zadržavanje aktivnosti enzima uz minimalnu promenu njegove konformacije, oslanjajući se na slabe intermolekulske sile kao što su vodonične veze, jonske i hidrofobne interakcije. Ovoj kategoriji pripadaju metode: adsorpcija i metoda „zarobljavanja“ (eng. entrapment) [24]. Nasuprot tome, hemijska imobilizacija uključuje formiranje čvrstih kovalentnih veza između enzima i nosača, zasnivajući se na interakcijama između funkcionalnih grupa nosača i enzima (primarno $-NH_2$, $-SH$ i $-OH$ grupe). Ova metoda obećava duže zadržavanje enzima na nosaču, ali i veću otpornost na promene operativnih uslova, čime se favorizuje za industrijsku upotrebu, posebno u tretmanu otpadnih voda [25]. Generalno, očekuje se da hemijska imobilizacija minimizira otpuštanje enzima i unapredi mogućnosti njegove ponovne upotrebe [26]. Kovalentno vezivanje i umrežavanje enzima (eng. cross-linking) pripadaju ovoj kategoriji.

Uklanjanje farmaceutski aktivnih jedinjenja iz vodenih sistema primenom lakaze

Uklanjanje farmaceutski aktivnih supstanci poput analgetika, antibiotika i antiepileptika pomoću enzima poput lakaza privlači značajnu pažnju. Lakaza dobijena iz *Yersinia enterocolitica* pokazala je potpunu biotransformaciju aspirina u roku od 24 h pri pH 9,0 [27]. Al-sareji i sar. [28] su zabeležili 72% uklanjanja aspirina nakon 6 sati enzimskog tretmana lakazom iz *Trametes versicolor*. Lakaza iz *Trametes versicolor* uklonila je oko 70% ketoprofena [28] i ibuprofena [29], što ukazuje na značajnu efikasnost lakaze u uklanjanju analgetika iz vode.

Lakaza se pokazala kao važan biokatalizator za uklanjanje različitih antibiotika, ali uz promenjivu stopu uklanjanja koja zavisi od specifičnih strukturnih karakteristika antibiotika i upotrebe medijatora. Primena sistema lakaza-medijator povećala je efikasnost uklanjanja antibiotika, ali je istovremeno povećala ekotoksičnost usled nastanka produkata degradacije [30]. Sulfonamidni antibiotici nisu efikasno uklonjeni samom lakazom, ali su pokazali bolje rezultate uz korišćenje lakaza-medijatora. Takođe, značajne stope uklanjanja amoksicilina (96,6%) i ampicilina (88,6%), kao i degradacija penicilina G, penicilina V, kloksacilina i oksacilina sa stopama od 53,5% do 93,9% korišćenjem lakaza-medijatora, pokazuju efikasnost lakaze iz *Trametes versicolor* [31]. Lakaza iz *Bacillus subtilis*, proizvedena u *Escherichia coli*, ostvarila je potpuno uklanjanje ampicilina za samo dva sata [32], dok je lakaza iz *Bacillus amyloliquefaciens*, takođe proizvedena u *E. coli*, efikasno uklonila antibiotike poput tetraciklina, doksiciklina i tigeciklina sa efikasnošću uklanjanja od 86,1%, 96,5%, i 81,0%, redom. Proces degradacije tetraciklina uključivao je složene biohemijske reakcije, kao što su otvaranje aromatičnog prstena, epimerizacija, demetilacija, deaminacija, dehidrogenacija i hidroksilacija, pokazujući raznolikost metaboličkih puteva aktiviranih prisustvom lakaze. Dodatno, lakaza iz *Trametes versicolor* pokazala je visok nivo efikasnosti u degradaciji trimetoprima, postićući 95% uklanjanje ovog leka pri koncentraciji od 5 mg/l u roku od 48 sati, čime se ističe njen potencijal u obradi širokog spektra antibiotskih kontaminanata u vodenim sredinama [33].

Zaključak

Lakaze dobijene iz bakterija ili gljivica pokazuju značajnu sposobnost za efikasno uklanjanje antibiotika kao što su penicilini, fluorokinoloni i tetraciklini, čak i bez prisustva redoks medijatora. Ključni aspekt ovog procesa razgradnje leži u otvaranju aromatičnih prstenova prisutnih u molekulima antibiotika, dok stepen razgradnje varira zavisno od specifične strukture svakog antibiotika i prisustva grupa koje učestvuju u prenosu elektrona. Lakaze su se pokazale kao

efikasne na temperaturama 35 - 45°C i unutar širokog raspona pH vrednosti (4 - 9), što znači da su sposobne da deluju u različitim uslovima. Upotreba sistema lakaza-medijator, koji uključuju medijatore kao što su siringaldazin ili hidroksibenzotriazol dovodi do poboljšane efikasnosti uklanjanja.

Pregled rezultata korišćenja lakaza za uklanjanje farmaceutski aktivnih supstanci iz voda potvrđuju njihov značaj u tretmanu otpadnih voda, naglašavajući potrebu za daljim istraživanjima i razvojem ove oblasti kako bi se poboljšala primena u realnim uslovima. Primena imobilisane lakaze predstavlja ekološki prihvatljivo rešenje u zaštiti voda, ističući važnost „zelenih“ tehnologija u očuvanju životne sredine i suočavanju sa izazovima zagađenja.

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] Ternes, T., Bonerz, M., Schmidt, T. (2001). Determination of neutral pharmaceuticals in wastewater and rivers by liquid chromatography–electrospray tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 938, 175–185.
- [2] Huerta-Fontela, M., Galceran, M.T., Ventura, F. (2011). Occurrence and removal of pharmaceuticals and hormones through drinking water treatment. *Water Research*, 45, 1432–1442.
- [3] Van den Brandhof, E.-J., Montforts, M. (2010). Fish embryo toxicity of carbamazepine, diclofenac, and metoprolol. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, 1862–1866.
- [4] Wojcieszynska, D., Guzik, U. (2020). Naproxen in the environment: Its occurrence, toxicity to non-target organisms and biodegradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 1849–1857.
- [5] Mons, M.N., Genderen, J. V., van Dijk-Looijaard, A.M. (2000). Inventory on the presence of pharmaceuticals in Dutch water. *KIWA Onderzoek en Advies*.
- [6] Martín, J., Camacho-Muñoz, D., Santos, J.L., Aparicio, I., Alonso, E. (2014). Occurrence and ecotoxicological risk assessment of 14 cytostatic drugs in wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 225, 1896.
- [7] Santana-Viera, S., Hernández-Arencia, P., Sosa-Ferrera, Z., Santana-Rodríguez, J.J. (2019). Simultaneous and systematic analysis of cytostatic drugs in wastewater samples by ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography B*, 1110–1111, 124–132.
- [8] Praveenkumarreddy, Y., Vimalkumar, K., Ramaswamy, B. R., Kumar, V., Singhal, R.K., Basu, H., Gopal, C.M., Vandana, K.E., Bhat, K., Udayashankar, H.N. i saradnici (2021). Assessment of nonsteroidal anti-inflammatory drugs from selected wastewater treatment plants of Southwestern India. *Emerging Contaminants*, 7, 43–51.
- [9] Nakada, N., Tanishima, T., Shinohara, H., Kiri, K., Takada, H. (2006). Pharmaceutical chemicals and endocrine disruptors in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment. *Water Research*, 40(17), 3297–3303.
- [10] Papagiannaki, D., Morgillo, S., Bocina, G., Calza, P., Binetti, R. (2021). Occurrence and human health risk assessment of pharmaceuticals and hormones in drinking water sources in the metropolitan area of Turin in Italy. *Toxics*, 9, 88.

- [11] Huppert, N., Würtele, M., Hahn, H.H. (1998). Determination of the plasticizer N-butylbenzenesulfonamide and the pharmaceutical Ibuprofen in wastewater using solid phase microextraction [SPME]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 362, 529–536.
- [12] Fang, T.H., Nan, F.-H., Chin, T.S., Feng, H.M. (2012). The occurrence and distribution of pharmaceutical compounds in the effluents of a major sewage treatment plant in Northern Taiwan and the receiving coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 1435–1444.
- [13] Sichel, C., Garcia, C., Andre, K. (2011). Feasibility studies: UV/chlorine advanced oxidation treatment for the removal of emerging contaminants. *Water Research*, 45, 6371–6380.
- [14] Nielsen, L., Biggs, M.J., Skinner, W., Bandosz, T.J. (2014). The effects of activated carbon surface features on the reactive adsorption of carbamazepine and sulfamethoxazole. *Carbon*, 80, 419–432.
- [15] Ji, C., Hou, J., Chen, V. (2016). Cross-linked carbon nanotubes-based biocatalytic membranes for micro-pollutants degradation: performance, stability, and regeneration. *Journal of Membrane Science*, 520, 869–880.
- [16] Mokhtar, A., Nishioka, T., Matsumoto, H., Kitada, S., Ryuno, N., Okobira, T. (2019). Novel biodegradation system for bisphenol A using laccase-immobilized hollow fiber membranes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 737–744.
- [17] de Cazes, M., Belleville, M.P., Petit, E., Llorca, M., Rodríguez Mozaz, S., de Gunzburg, J., Barcelo, D., Sanchez Marcano, J. (2014). Design and optimization of an enzymatic membrane reactor for tetracycline degradation. *Catalysis Today*, 236, 146–152.
- [18] Morozova, O.V., Shumakovich, G.P., Shleev, S.V., Yarepolov, Ya.I. (2007). Laccase-mediator systems and their applications: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 43, 523–535.
- [19] Debnath, R., Saha, T. (2020). An insight into the production strategies and applications of the ligninolytic enzyme laccase from bacteria and fungi. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 26, 101645.
- [20] Martin, E., Dubessay, P., Record, E., Audonnet, F., Michaud, P. (2024). Recent advances in laccase activity assays: A crucial challenge for applications on complex substrates. *Enzyme and Microbial Technology*, 173, 110373.
- [21] Masjoudi, M., Golgoli, M., Ghobadi Nejad, Z., Sadeghzadeh, S., Borghei, S. M. (2021). Pharmaceuticals removal by immobilized laccase on polyvinylidene fluoride nanocomposite with multi-walled carbon nanotubes. *Chemosphere*, 263, 128043.
- [22] Shakerian, F., Zhao, J., Li, S.P. (2020). Recent development in the application of immobilized oxidative enzymes for bioremediation of hazardous micropollutants - A review. *Chemosphere*, 239, Article 124716.
- [23] Yavaşer, R., Karagözler, A.A. (2021). Laccase immobilized polyacrylamide-alginate cryogel: A candidate for treatment of effluents. *Process Biochemistry*, 101, 137–146.
- [24] Zhou, W., Zhang, W., Cai, Y. (2021). Laccase immobilization for water purification: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 403, 126272.
- [25] Wahab, R.A., Elias, N., Abdullah, F., Ghoshal, S.K. (2020). On the taught new tricks of enzymes immobilization: An all-inclusive overview. *Reactive and Functional Polymers*, 152, 104613.
- [26] Zdart, J., Meyer, A.S., Jesionowski, T., Pinelo, M. (2018). Developments in support materials for immobilization of oxidoreductases: A comprehensive review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 258, 1–20.
- [27] Singh, D., Rawat, S., Waseem, M., Gupta, S., Lynn, A., Nitin, M., Ramchiary, N., Sharma, K.K. (2016). Molecular modeling and simulation studies of recombinant laccase from Yersinia

- enterocolitica suggests significant role in the biotransformation of non-steroidal anti-inflammatory drugs. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 469, 306–312.
- [28] Al-sareji, O.J., Meiczniger, M., Salman, J.M., Al-Juboori, R.A., Hashim, K.S., Somogyi, V., Jakab, M. (2023). Ketoprofen and aspirin removal by laccase immobilized on date stones. *Chemosphere*, 311, 137133.
- [29] Zhang, J., Cai, Q., Chen, J., Lu, Y., Ren, X., Lio, Q., Wen, L., Mateen, M. (2022). Enhanced removal of ibuprofen in water using dynamic dialysis of laccase catalysis. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102791.
- [30] Alharbi, S.K., Nghiem, L.D., van de Merwe, J.P., Leusch, F.D.L., Asif, M.B., Hai, F.I., Price, W.E. (2019). Degradation of diclofenac, trimethoprim, carbamazepine, and sulfamethoxazole by laccase from *Trametes versicolor*: Transformation products and toxicity of treated effluent. *Biocatalysis and Biotransformation*, 37, 399–408.
- [31] Becker, D., Giustina, S.V.D., Rodriguez-Mozaz, S., Schoevaart, R., Barceló, D., de Cazes, M., Belleville, M.P., Sanchez-Marcano, J., de Gunzburg, J., Couillerot, O. i saradnici (2016). Removal of antibiotics in wastewater by enzymatic treatment with fungal laccase—Degradation of compounds does not always eliminate toxicity. *Bioresource Technology*, 219, 500–509.
- [32] Zhang, C., You, S., Zhang, J., Qi, W., Su, R., He, Z. (2020). An effective in-situ method for laccase immobilization: Excellent activity, effective antibiotic removal rate and low potential ecological risk for degradation products. *Bioresource Technology*, 308, 123271.
- [33] Alharbi, S.K., Nghiem, L.D., van de Merwe, J.P., Leusch, F.D.L., Asif, M.B., Hai, F.I., Price, W.E. (2019). Degradation of diclofenac, trimethoprim, carbamazepine, and sulfamethoxazole by laccase from *Trametes versicolor*: Transformation products and toxicity of treated effluent. *Biocatalysis and Biotransformation*, 37(4), 399–408.