

Primjena LED izvora zračenja u obradi otpadnih voda

Jović, Nikol

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:305372>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Nikol Jović

PRIMJENA LED IZVORA ZRAČENJA U OBRADI OTPADNIH VODA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Vanja Kosar

Članovi ispitnog povjerenstva:

izv. prof. dr. sc. Vanja Kosar

dr. sc. Marina Duplančić

doc. dr. sc. Zvonimir Katančić

Zagreb, rujan 2022.

Ovaj rad je izrađen u sklopu projekta Hrvatske zaklade za znanost (HrZZ) pod nazivom „Intenzifikacija fotokatalitičkih i katalitičkih procesa za obradu otpadnih voda i otpadnih plinova“ (eng. „Intensification of photocatalytic and catalytic processes for treatment of waste water and waste gases“), IN-PhotoCa (IP-2018-01-8669).
voditeljica: prof. dr. sc. Vesna Tomašić



SAŽETAK

Otpadne vode predstavljaju jednu od najvećih opasnosti za zdravlje ljudi i okoliša, zbog čega je razvijen niz različitih postupaka njezine obrade. Konvencionalni postupci obrade otpadnih voda obuhvaćaju kemijske, fizikalne i biološke postupke, no u posljednje vrijeme, zahvaljujući svojoj učinkovitosti, sve se više primjenjuju napredni oksidacijski procesi. Heterogena fotokataliza jedna je od najučinkovitijih metoda razgradnje organskih onečišćenja u vodi, a kao izvori zračenja u provedbi ovoga postupka obrade koriste se Sunčevo zračenje, konvencionalne UV lampe, a u posljednje vrijeme sve češće LED diode. U ovome je radu ispitivana ovisnost intenziteta zračenja UV-A LED modula o naponu izvora na različitim udaljenostima LED modula od uzorka otpadne vode (2 i 3 cm), kao i za različite snage modula (20 i 30 W). Eksperimentalni rezultati pokazali su da intenzitet zračenja LED modula eksponencijalno raste s naponom.

Ključne riječi: otpadne vode, napredni oksidacijski procesi, heterogena fotokataliza, LED izvori zračenja

SUMMARY

Wastewater poses one of the greatest threats to human and environmental health, necessitating the development of various wastewater treatment processes. Traditional wastewater treatment methods include physical, chemical, and biological processes, but recently advanced oxidation processes have been increasingly used due to their high effectiveness. Heterogeneous photocatalysis is considered one of the most efficient wastewater treatment methods. Various light sources are used in the application of this treatment method, including solar radiation and conventional UV lamps, and more recently light-emitting diodes (LED). In this work, the functional relationship between irradiance and voltage of UV-A LED modules is investigated. The experiment was conducted with different distances from the wastewater sample (2 and 3 cm) and with different LED module intensities (20 and 30 W). The experimental results showed an exponential function plot between irradiance and voltage.

Key words: wastewaters, advanced oxidation processes, heterogenous photocatalysis, LED

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. TEORIJSKI DIO | 2 |
| 2.1 OTPADNE VODE | 2 |
| 2.1.1 Industrijske otpadne vode | 3 |
| 2.2 POSTUPCI OBRADNE OTPADNIH VODA | 4 |
| 2.3 NAPREDNI OKSIDACIJSKI PROCESI..... | 8 |
| 2.4 HETEROGENA FOTOKATALIZA..... | 9 |
| 2.5 IZVORI ZRAČENJA | 12 |
| 2.5.1. Prirodni izvori zračenja (Sunčevo zračenje)..... | 13 |
| 2.5.2. Umjetni izvori zračenja..... | 13 |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO..... | 16 |
| 3.1 Provedba eksperimenta..... | 17 |
| 4. REZULTATI I RASPRAVA | 20 |
| 5. ZAKLJUČAK | 25 |
| 6. LITERATURA..... | 26 |

1. UVOD

Gotovo tijekom cijele povijesti čovječanstva onečišćenje okoliša nije se smatralo ozbiljnim problemom s obzirom na malobrojnost ljudske populacije, a samim time i dostatnost te dostupnost prirodnih resursa. Međutim, nagao porast svjetske populacije doveo je do onečišćenja okoliša, čije su negativne posljedice na zdravlje ljudi sve uočljivije. Tako je procijenjeno da je onečišćenje okoliša uzrokom čak više od jedne četvrtine broja smrtnih slučajeva u svijetu.¹

Onečišćenje voda predstavlja jednu od najvećih prijetnji zdravlju ljudi i okoliša, ali i industrijskom i ekonomskom razvoju. Voda zauzima 71% Zemljine površine, no 95.6 % njezine ukupne količine sadržano je u oceanima, zbog čega je samo jedan njezin manji dio dostupan čovjeku za direktnu uporabu. Brojne ljudske aktivnosti poput nagle urbanizacije, rudarskih aktivnosti, povećanog korištenja kemikalija u poljoprivredi, lošeg upravljanja okolišem te odlaganja otpada rezultiraju onečišćenjem voda, odnosno smanjenjem njihove kakvoće.¹

Onečišćenja prisutna u vodi akumuliraju se i koncentriraju u hranidbenim lancima, a različitim biokemijskim procesima može im se još i povećati toksičnost. Osim toga, patogenim mikroorganizmima onečišćena voda izvor je mnogih bolesti, pri čemu su najviše pogođene zemlje u razvoju. Procjenjuje se da čak 900 milijuna ljudi u svijetu nema pristup čistoj vodi, od čega 2.5 milijuna nema pristup sanitarnom sustavu.¹

Iz tog razloga iznimno je važno primijeniti različite strategije kako bi se onečišćenje smanjilo na najmanju moguću mjeru. Osim same primjene, razvoja i poboljšanja različitih metoda obrade otpadnih voda, potrebno je smanjiti unos onečišćujućih tvari u vodu, primjerice, smanjiti korištenje umjetnih gnojiva u poljoprivredi, primijeniti zelene tehnologije u industriji, bolje upravljati otpadom i sl.²

U posljednje vrijeme, zbog porasta potreba za pitkom vodom, ali i pojave sve toksičnijih onečišćujućih tvari u otpadnoj vodi, javila se potreba za razvojem naprednijih, učinkovitijih i financijski prihvatljivijih metoda obrade otpadnih voda. Jedna od takvih modernijih metoda jesu napredni oksidacijski procesi. Ovi su se procesi pokazali učinkovitima u razgradnji mnogih organskih spojeva poput pesticida, surfaktanata, bojila, farmaceutika, fenola i sl. Najveća je prednost naprednih oksidacijskih procesa nad tradicionalnim postupcima obrade njihova mogućnost potpune razgradnje onečišćenja, što ih čini ekološki iznimno prihvatljivima.³

2. TEORIJSKI DIO

2.1 OTPADNE VODE

Prema Zakonu o vodama otpadne se vode prema njihovu porijeklu dijele na:

- Industrijske i druge otpadne vode – otpadne vode nastale unošenjem, ispuštanjem ili odlaganjem opasnih ili drugih onečišćujućih tvari u vode kao rezultat gospodarske ili druge poslovne djelatnosti
- Komunalne otpadne vode – otpadne vode nastale unošenjem, ispuštanjem ili odlaganjem opasnih ili drugih onečišćujućih tvari u vode u kućanstvima, javnim ustanovama, ugostiteljskim objektima
- Oborinske vode – otpadne vode nastale interakcijom oborinskih voda te opasnih ili drugih onečišćujućih tvari s urbanih površina, cestovnih i željezničkih prometnica, zračnih, morskih i riječnih luka te površina u krugu industrijskih postrojenja i benzinskih crpki ⁴

Kvaliteta otpadne vode određena je njezinim fizikalnim, kemijskim i biološkim svojstvima. Fizikalna svojstva vode obuhvaćaju njezin miris, boju, turbiditet i temperaturu te ukupni udio suspendirane i/ili otopljene čvrste tvari, pri čemu čvrsta tvar može biti organskog (hlapivi spojevi) i anorganskog (nehlapivi spojevi) porijekla. Kemijska se pak svojstva očituju kroz prisutnost organskih i anorganskih spojeva u vodi. Neki od najčešćih organskih spojeva prisutnih u otpadnoj vodi jesu proteini, ugljikohidrati, lipidi, fenoli, surfaktanti i pesticidi, pri čemu su parametri poput BPK (biokemijska potrošnja kisika), KPK (kemijska potrošnja kisika) te TOC (ukupni organski ugljik) mjera njihove koncentracije. Prisutnost anorganskih tvari poput kiselina, lužina, soli i teških metala povezana je sa svojstvima kao što su pH, salinitet, aciditet, alkalitet te tvrdoća vode. Biološka svojstva otpadnih voda određena su prisustvom biološkog materijala, odnosno virusa, bakterija, praživotinja i algi. Ovisno o koncentraciji onečišćujućih tvari otpadne se vode dijele na jako, srednje i slabo onečišćene. Također, za industrijske otpadne vode općenito je karakterističan širi spektar vrsta i koncentracija onečišćujućih tvari od onoga koji se očekuje za komunalne otpadne vode.⁵

Brojne su negativne posljedice koje različite onečišćujuće tvari ostavljaju na vodeni okoliš, pa će tako organske tvari prisutne u vodi procesom biooksidacije trošiti kisik prijeko potreban za rast i razvoj brojnih vodenih organizama. Također, mnoge su organske i anorganske tvari toksične, primjerice pesticidi i teški metali. Prisutnost kiselina, lužina i soli može značajno promijeniti pH vode. Lakohlapivi organski spojevi poput toluena i benzena mogu dospjeti u

atmosferu te tako narušiti javno zdravlje. Farmaceutici prisutni u vodi rezultiraju razvojem patogena otpornih na antibiotike te narušavaju zdravlje ljudi. Suspendirane čvrste čestice uzrokuju obojenje i замуćenost vode, što pak smanjuje prodor zraka svjetlosti te posljedično fotosintetsku aktivnost vodenih organizama, a njihovo taloženje na dno i stvaranje sedimenta smanjuje aktivnost bentičkih organizama. Površinski aktivne tvari smanjuju prijenos kisika kroz vodu, organske tvari poput fenola i ulja stvaraju površinske filmove, a nitrati i fosfati uzrokuju eutrofikaciju, odnosno intenzivan rast modrozelenih algi, pri čemu one prekriju površinu vode te na taj način onemogućuju prodor zraka svjetlosti i prijenos kisika kroz vodu, a uz to proizvode i toksine opasne po ljudsko zdravlje. Virus, praživotinje i bakterije prisutne u otpadnoj vodi opasne su po javno zdravlje obzirom na bolesti kojima su uzrok, primjerice hepatitisu (virusna bolest) i koleri (bakterijska bolest).⁶

2.1.1 Industrijske otpadne vode

Prema Uredbi o okolišnoj dozvoli neke od djelatnosti koje mogu prouzročiti emisije kojima se onečišćuju tlo, zrak, voda i more jesu:

- Energetika: izgaranje goriva u postrojenjima ukupne ulazne toplinske snage 50 MW i više, rafinerije mineralnih ulja i plinova, proizvodnja koksa, uplinjavanje ili ukapljivanje
- Proizvodnja i prerada metala: prženje i sinteriranje metalnih ruda, proizvodnja sirovog željeza ili čelika, prerada neobojenih metala, prerada obojenih metala, površinska obrada metala
- Industrija minerala: proizvodnja cementa, vapna i magnezijevog oksida, proizvodnja azbesta ili izrada proizvoda na bazi azbesta, proizvodnja stakla, taljenje mineralnih tvari, izrada keramičkih proizvoda pečenjem
- Kemijska industrija: proizvodnja organskih kemikalija (jednostavnih ugljikovodika, ugljikovodika koji sadrže kisik, ugljikovodika koji sadrže sumpor, ugljikovodika koji sadrže dušik, ugljikovodika koji sadrže fosfor, halogenih ugljikovodika, organometalnih spojeva, plastičnih materijala, sintetske gume, bojila i pigmenata, površinski aktivnih tvari i surfaktanata), proizvodnja anorganskih spojeva (plinova, kiselina, baza, soli, nemetala, metalnih oksida ili drugih anorganskih spojeva), proizvodnja umjetnih gnojiva na bazi fosfora, dušika ili kalija, proizvodnja sredstava za zaštitu bilja ili biocida, proizvodnja farmaceutskih proizvoda, proizvodnja eksploziva

- Gospodarenje otpadom: zbrinjavanje ili uporaba opasnog otpada, zbrinjavanje ili obrada otpada u postrojenjima za spaljivanje otpada, zbrinjavanje neopasnog otpada, uporaba ili spoj uporabe i odlaganja neopasnog otpada, odlaganje otpada na odlagališta, privremeno skladištenje opasnog otpada, podzemno skladištenje opasnog otpada
- Druge djelatnosti: drvna industrija, industrija papira i kartona, bojanje tekstila, štavljenje kože, obrada i prerada sirovina životinskog i/ili biljnog porijekla, intenzivni uzgoj peradi i svinja, površinska obrada tvari, predmeta ili proizvoda u kojima se koriste organska otapala, proizvodnja ugljika, hvatanje CO₂ iz struje otpadnih plinova ⁴

Prema istom pravilniku, tijekom navedenih djelatnosti najčešće onečišćujuće tvari koje se emitiraju u vodeni okoliš jesu sljedeće tvari: organohalogeni spojevi i tvari koje mogu stvarati takve spojeve u vodenom okolišu, organofosfori spojevi, organokositreni spojevi, postojani ugljikovodici i postojane organske otrovne tvari koje se akumuliraju u živim organizmima, cijanidi, metali i njihovi spojevi, arsen i njegovi spojevi, biocidi i proizvodi za zaštitu bilja, suspendirani materijali, tvari koje doprinose eutrofikaciji (posebno nitrati i fosfati), tvari koje negativno utječu na ravnotežu kisika.⁷

2.2 POSTUPCI OBRADNE OTPADNIH VODA

Ovisno o porijeklu, namjeni i kemijskom sastavu otpadne vode te zakonskim propisima primjenjuju se različiti postupci obrade otpadnih voda.⁸

Pri obradi otpadnih voda najčešće se primjenjuju fizikalni, kemijski, fizikalno-kemijski, biološki te kombinirani postupci obrade.^{8,9} Također, rad konvencionalnog postrojenja za obradu otpadnih voda obuhvaća primarni, sekundarni i tercijarni stupanj obrade. Primarni stupanj obrade obuhvaća filtraciju, centrifugiranje, sedimentaciju, koagulaciju i flotaciju, biološka obrada najčešći je postupak sekundarnog stupnja, dok tercijarni stupanj podrazumijeva oksidaciju, precipitaciju, reverznu osmozu, elektrolizu te elektrodijalizu. Uz konvencionalne postupke obrade, pri obradi otpadnih voda sve se češće primjenjuju i napredni oksidacijski procesi, ionska izmjena, ultra- i nanofiltracija, adsorpcija/biosorpcija te napredni biološki postupci primjenom algi, bakterija i gljivica.⁹

Fizikalni procesi obrade otpadnih voda podrazumijevaju primjenu mehaničkih sila za uklanjanje onečišćujućih tvari, a primjenjuju se u slučajevima jačeg onečišćenja vode. Prije svih ostalih procesa obrade najprije se od otpadne vode odvaja kruti otpad, pijesak, kamenje,

šljunak i drvo primjenom pjeskolova te rešetki različitih dimenzija. Filtracija se primjenjuje za odvajanje suspendiranih krutih čestica, masti i ulja upotrebom filtarskih sredstava poput membrana s promjerom pora 0,1 – 0,5 mm. Za odvajanje čestica veličine do 1 mm primjenjuje se centrifugiranje, pri čemu se vrtnjom u uređaju za centrifugiranje, tj. djelovanjem centrifugalne sile, krute čestice odvajaju temeljem razlike u gustoći.⁹ Sedimentacija, odnosno odvajanje suspendiranih čestica gravitacijskim taloženjem odvija se u sedimentacijskim bazenima (taložnicima), tj. razbistrivačima ili ugušćivačima (ovisno je li cilj dobivanje bistre otopine ili ugušćene suspenzije).⁸ Sedimentacija je relativno jeftin postupak pročišćavanja, a njezinom primjenom moguće je ukloniti do 60% suspendiranih čestica.⁹ Flotacijom se uklanjaju suspendirane čestice na način da se u suspenziju uvode mjehurići plina koji se prilipe za čvrste čestice tvoreći tako aglomerate gustoće manje od gustoće vode, što dovodi do njihovog putovanja prema površini vode, odakle se uklanjaju zgrtačem.⁸

U posljednje vrijeme dolazi do razvoja novih tehnologija koje mogu odvojiti i čestice manjih dimenzija, primjerice membranske tehnologije. Ovisno o promjeru čestica koje se mogu ukloniti, membranske tehnologije dijele se na mikrofiltraciju, ultrafiltraciju, nanofiltraciju te reverznu osmozu.⁹

Tablica 1. Membranski procesi ⁹

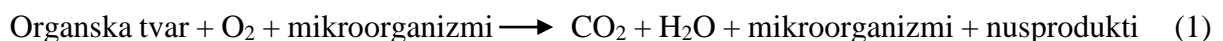
| Membranski proces | Transmembranski tlak (kPa) | Veličina pora (nm) | Komponente koje se uklanjaju |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---|
| Mikrofiltracija | 100-200 | 100-1000 | Suspendirane čestice, bakterije |
| Ultrafiltracija | 200-1000 | 1-100 | Makromolekule, virusi, proteini |
| Nanofiltracija | 1000-3000 | 0,5-5 | Mikročestice, bivalentni ioni |
| Reverzna osmoza | 3500-10000 | < 1 | Monovalentni ioni, magnezijevi i kalcijevi ioni |

Koagulacija se smatra najvažnijim postupkom obrade otpadnih voda. To je fizikalno-kemijski proces kojim raspršene koloidne čestice (veličine do 1 μm) dodatkom koagulanta

prelaze u aglomerate, nakon čega se mogu ukloniti sedimentacijom, flotacijom ili filtracijom.⁸ Kao koagulanti se upotrebljavaju stipsa, škrob, željezni minerali, aluminijske soli te silicijev dioksid.⁹

Kemijski postupci obrade otpadne vode uključuju različite kemijske transformacije onečišćujućih tvari te su uvijek združeni s fizikalnim i biološkim postupcima. Nedostatak kemijskih postupaka jest taj što njihovom primjenom najčešće dolazi do povećanja koncentracije otopljene tvari. Neutralizacija je postupak prilagodbe pH vrijednosti vode dodatkom kiselina ili baza, a najčešće prethodi precipitaciji. Precipitacija je postupak uklanjanja otopljenih onečišćujućih tvari smanjenjem njihove topljivosti te posljedično stvaranjem krutog precipitata. Topljivost se može smanjiti dodatkom kemijskih reagensa, smanjenjem temperature otopine ili pak podešavanjem pH vrijednosti. Ovim se postupkom uspješno uklanjaju metalni ioni, organske onečišćujuće tvari te fosfati. Ionskom izmjenom opasni ioni sadržani u otpadnoj vodi zamjenjuju se neopasnim ionima, a proces se odvija na ionskim izmjenjivačima, prirodnim ili umjetnim smolama s aktivnim mjestima na površini. Proces je reverzibilan te zahtijeva mali utrošak energije, no primjenjiv je samo za niske koncentracije onečišćujuće tvari. Reakcije oksidacije i redukcije često su korišteni postupci obrade otpadnih voda. Klorirani ugljikovodici i pesticidi uspješno se uklanjaju iz vode za piće oksidacijom pomoću ozona ili vodikova peroksida, dok se teški metali moraju reducirati kako bi ih se moglo prevesti u lako topive sulfide. Elektrodijaliza podrazumijeva prolazak iona topivih u vodi kroz ion-selektivne polupropusne membrane protjecanjem električne struje. Membrane mogu biti kationski ili anionski izmjenjivači te se mogu spajati paralelno ili serijski. Ova metoda upotrebljava se za dobivanje pitke iz slane vode. Dezinfekcija se primjenjuje s ciljem smanjenja broja mikroorganizama u vodi kako bi se ona mogla dalje koristiti kao voda za piće, kupanje, navodnjavanje i sl. Kao dezinfekcijska sredstva primjenjuju se različiti fizikalni i kemijski agensi, primjerice toplina, svjetlost, radijacija te oksidirajuća sredstva, od kojih se najčešće primjenjuje klor.⁹

Biološki procesi obrade otpadnih voda dijele se na aerobne i anaerobne te procese bioremedijacije. Pri aerobnim procesima aerobni mikroorganizmi pomoću otopljenog kisika procesom biooksidacije razgrađuju biorazgradive organske tvari do ugljikova dioksida i vode (jed. 1).



Parametri koji utječu na odvijanje procesa jesu temperatura, vrijeme zadržavanja, dostupnost kisika te biološka aktivnost mikroorganizama. Dodatkom određenih spojeva nužnih za rast i razvoj mikroorganizama može se povećati brzina procesa. Na ovaj se način iz otpadne vode uspješno mogu ukloniti fosfati, nitrati, hlapivi organski spojevi te suspendirani i otopljeni organski spojevi. Nedostatak ovoga procesa jest nastanak velike količine biokrutina, što pak zahtijeva dodatnu obradu i zbrinjavanje. Također, aerobna obrada otpadne vode provodi se u sustavima s aktivnim muljem ili biološkom filtracijom. Sustavi s aktivnim muljem sastoje se od sljedećih komponenti: bioreaktora (aeracijskog bazena), aktivnog mulja, sustava za aeraciju i miješanje, spremnika za sedimentaciju te povratnog mulja.⁹ Pri biološkoj filtraciji aerobni mikroorganizmi imobilizirani su na površini inertnog materijala koji ispunjava biološki filter. Raspršivanjem otpadne vode preko punila filtra kisik i organski spojevi prodiru u sloj mikroorganizama te dolazi do biološke razgradnje organske tvari. Trošenjem susstrata stvara se sloj biomase debljine i do nekoliko mm.⁸ U slučaju anaerobne razgradnje (anaerobne digestije) anaerobni i fakultativno anaerobni mikroorganizmi razgrađuju kompleksne organske spojeve u odsustvu kisika, što rezultira nastajanjem bioplina, odnosno metana, sumporovodika, amonijaka i dušika. To je dobro poznata, energetske učinkovita tehnika za obradu otpadnih voda, a obično se primjenjuje u slučaju visokog organskog opterećenja vode kao prethodnica aerobnim procesima. Njezinom primjenom dobivaju se korisni produkti poput bioplina te različitih spojeva koji se mogu koristiti kao gnojiva. Nekoliko je prednosti anaerobne digestije nad aerobnom razgradnjom. Primjerice, pri anaerobnoj digestiji potrebno je manje hranjivih tvari za rast biomase, nastaje manje mulja, koji za daljnju obradu zahtijeva samo sušenje, reaktor u kojima se odvija proces manjih je dimenzija, a uz sve to, proces bez dovoda kisika odvija se brže od procesa s kisikom. Osim aerobnim i anaerobnim procesima, onečišćujuće tvari u otpadnoj vodi mogu se razgraditi i procesima bioremedijacije. Bioremedijacija je biološki proces obrade koji onečišćujuće tvari u okolišu pretvara u manje opasne spojeve uz pomoć živih organizama, a dijeli se na mikrobnu bioremedijaciju, mikoremedijaciju i fitoremedijaciju. Mikrobna bioremedijacija podrazumijeva razgradnju opasnih tvari pomoću metaboličkog sustava mikroorganizama, u mikoremedijaciji probavni enzimi gljiva razgrađuju onečišćujuće tvari, dok se fitoremedijacijom onečišćujuće tvari ekstrahiraju iz otpadne vode ili onečišćenoga tla uz pomoć korijenskog sustava biljaka. Bioremedijacija može se odvijati u aerobnim i anaerobnim uvjetima te *in situ* i *ex situ*. Kao i svi ostali biološki procesi obrade, bioremedijacija je proces koji ne zahtijeva velik utrošak energije niti upotrebu kemikalija, što je čini izvrsnim odabirom u smislu ekološke učinkovitosti.⁹

2.3 NAPREDNI OKSIDACIJSKI PROCESI

Zbog povećanih zahtjeva za ekološkom održivošću te zaštitom okoliša posljednjih nekoliko desetljeća dolazi do razvoja novijih, naprednijih, učinkovitijih i čistijih tehnologija za obradu otpadnih voda.¹⁰ Jedna od takvih tehnologija jesu napredni oksidacijski procesi.

Napredni oksidacijski procesi su postupci obrade otpadnih voda u kojima se pri atmosferskom tlaku i sobnoj temperaturi razgrađuju onečišćujuće tvari u vodi pomoću visoko reaktivnih vrsta, odnosno jakih oksidansa, najčešće hidroksil radikala¹¹

Tablica 2. Najčešće korišteni oksidansi i njihovi oksidacijski potencijali¹²

| Oksidans | Oksidacijski potencijal (V) |
|--|-----------------------------|
| OH [·] | 2,80 |
| O ₃ | 2,07 |
| SO ₄ ²⁻ | 2,01 |
| MnO ₄ ²⁻ | 1,77 |
| H ₂ O ₂ | 1,77 |
| ClO ₂ | 1,57 |
| Cl ₂ | 1,36 |
| Cr ₂ O ₇ ²⁻ | 1,23 |
| O ₂ | 1,23 |

Zahvaljujući svojoj neselektivnosti te visokom oksidacijskom potencijalu, napredni oksidacijski procesi, za razliku od tradicionalnih postupaka obrade, učinkovitije i brže razgrađuju i uklanjaju nečistoće iz otpadne vode. Također, tijekom njihove primjene ne dolazi do stvaranja sekundarnog otpada, primjerice mulja, kao što je to slučaj s kemijskim, fizikalnim i biološkim postupcima.⁷ Tim se postupcima nečistoće samo odvajaju od glavne struje otpadne vode i koncentriraju u otpadnoj struji, dok se naprednim oksidacijskim procesima nečistoće uklanjaju razgradnjom, odnosno njihovom mineralizacijom u neopasne produkte. Primjena naprednih oksidacijskih procesa izrazito je široka obzirom na mogućnost razgradnje velikog broja različitih spojeva u širokom rasponu koncentracija, pa se tako napredni oksidacijski procesi primjenjuju i u svrhu predobrade vode za ostale procese, primjerice za uklanjanje spojeva toksičnih za mikroorganizme ključne za provedbu postupaka biološke obrade ili pak za uklanjanje tvari koje ometaju membransku filtraciju.¹³ Osim za obradu otpadnih voda,

primjenjuju se i za remedijaciju tla, a u posljednje vrijeme i u organskim sintezama, medicinskim postupcima te za proizvodnju energije.¹²

Tablica 3. Podjela naprednih oksidacijskih procesa ¹⁴

| Procesi s ozonom | Procesi s UV zračenjem | Katalitički procesi | Elektrokemijski procesi | Fizički procesi |
|---|----------------------------------|---------------------|--------------------------------------|--|
| O ₃ | UV/H ₂ O ₂ | Fenton procesi | BDD elektrode | Elektrohidraulično pražnjenje (plazma) |
| O ₃ /H ₂ O ₂ | UV/O ₃ | Foto-Fenton | Elektrode prevučene SnO ₂ | Ultrazvuk (UZV) |
| | UV/Cl ₂ | | Elektrode prevučene | Mikrovalovi |
| O ₃ /katalizator | UV/PDS | UV/katalizator | PbO ₂ | Elektronski snop |
| | | | TiO ₂ elektrode | |

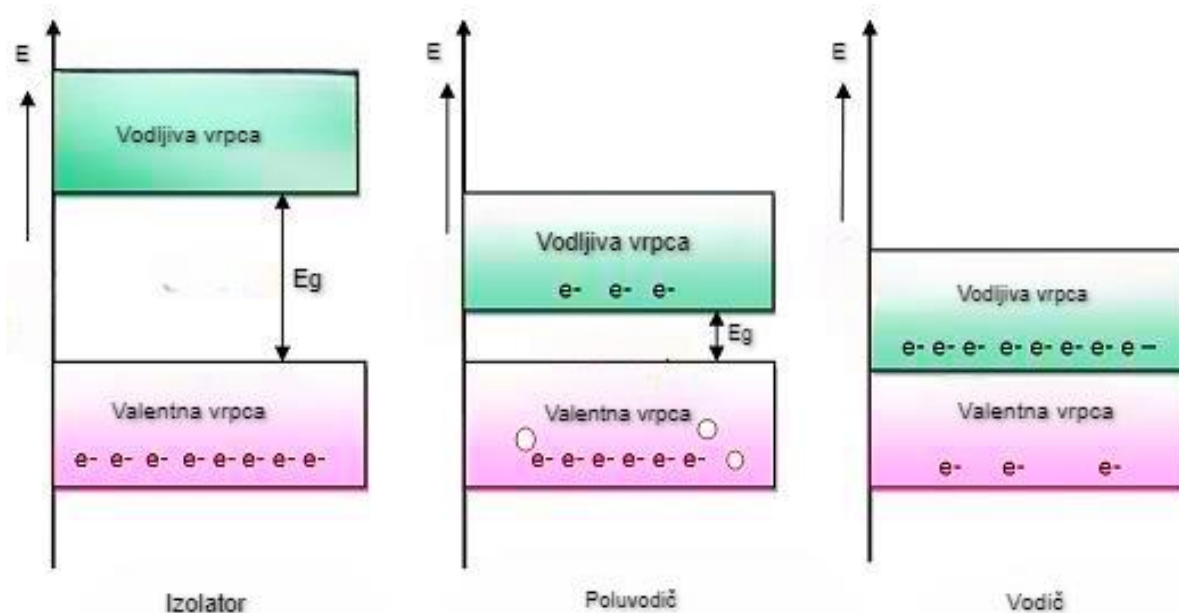
2.4 HETEROGENA FOTOKATALIZA

Među svim trenutno dostupnim naprednim oksidacijskim procesima heterogena fotokataliza najučinkovitija je metoda uklanjanja nečistoća iz otpadne vode. Fotokataliza je proces u kojemu se organske nečistoće te patogeni organizmi u vodi uklanjaju uz pomoć fotokatalizatora, najčešće poluvodiča, koji apsorbira energiju zračenja te uzrokuje stvaranje jakih oksidansa koji dalje oksidiraju organsku materiju i na taj je način razgrađuju.¹⁵ Ovisno o agregatnom stanju reaktanata, fotokataliza se dijeli na homogenu i heterogenu. Pri homogenoj fotokatalizi reaktant i fotokatalizator nalaze se u istoj fazi, dok su u heterogenoj katalizi reaktant i katalizator u različitim fazama.¹⁶

Interes za heterogenu fotokatalizu pojavio se 1972. godine, kada su Fujishima i Honda otkrili fotokemijsku razgradnju vode na vodik i kisik u prisutnosti TiO₂. Otada se taj fenomen intenzivnije istražuje, a u posljednje vrijeme najviše se pažnje posvećuje primjeni poluvodičkih materijala kao katalizatora u svrhu uklanjanja organskih i anorganskih tvari iz kapljeviti i plinoviti sustava s primjenom u zaštiti okoliša, pripravi pitke vode, industriji i medicini. Ovim se postupkom uspješno uklanjaju organske tvari poput pesticida, bojila, hormona, organskih

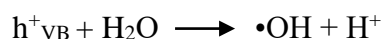
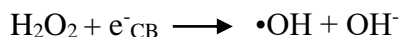
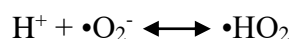
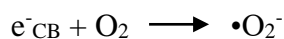
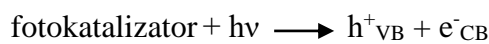
kiselina, sirove nafte, zatim biološki materijal, odnosno mikroorganizmi, uključujući viruse i mikroorganizme otporne na klor, a osim toga i anorganski spojevi poput dušikovih oksida (NO_x).¹⁷

Razlika u energiji između valentne i vodljive vrpce nekog materijala naziva se energijom zabranjene zone (E_g), a ovisno o iznosu te energije, materijali se dijele na vodiče, poluvodiče i izolatore. Poluvodiče karakterizira vrijednost $E_g < 1,5 - 3,0 \text{ eV}$.¹⁶ Valentna vrpca najčešće im je popunjena, dok im je vodljiva vrpca djelomično ili potpuno prazna.¹⁹



Slika 1. Elektronska struktura izolatora, poluvodiča i vodiča²⁰

Mehanizam fotokatalize obuhvaća nekoliko međukoraka. Fotokataliza započinje osvjetljavanjem površine poluvodiča svjetlošću energije veće od energije zabranjene zone, što dovodi do pobuđivanja elektrona iz valentne vrpce (VB) te njihovog prelaska u vodljivu vrpcu (CB). Nakon što su svi elektroni prešli u vodljivu vrpcu (e^-_{CB}), u valentnoj se vrpici stvara pozitivno nabijena šupljina. (h^+_{VB}).¹⁹ Šupljina u valentnoj vrpici ima snažno oksidirajuće djelovanje, dok se elektroni u vodljivoj vrpici ponašaju kao snažni reducensi.²⁰ Pobuđeni elektroni u valentnoj vrpici reagiraju s kisikom, reducirajući ga u superoksidni radikal ($\bullet\text{O}_2^-$). On se dalje transformira u hidroperoksilni radikal ($\bullet\text{HO}_2$), nakon čega se iz njega stvara vodikov peroksid, koji se dalje reducira dajući hidroksilni radikal ($\bullet\text{OH}$) te on naposljetku oksidira organske nečistoće do ugljikovog dioksida i vode. Usporedno s tim, hidroksilni radikali nastaju i oksidacijom vode šupljinama u valentnoj vrpici.^{19, 20}



Mehanizam heterogene fotokatalize općenito se svodi na sljedeće korake:

1. Prijenos molekula reaktanata iz tekuće faze do površine fotokatalizatora
2. Adsorpcija molekula reaktanata na površinu fotokatalizatora
3. Reakcija adsorbiranih reaktanata na površini fotokatalizatora
4. Desorpcija produkata s površine fotokatalizatora
5. Uklanjanje produkata s međufazne površine natrag u tekuću fazu²⁰

Kao fotokatalizatori se koriste mnoge tvari, primjerice ZnS, CdS, ZnO, Fe₂O₃, Cr₂O₂, WO₃, SnO₂, ZrO₂, tantalat, niobijevi oksidi, lantanoidi, TiO₂/SiO₂, a najčešće od svih koristi se TiO₂ zahvaljujući svojoj stabilnosti u raznim uvjetima, širokoj dostupnosti te jednostavnoj pripremi u laboratorijskim uvjetima.²¹

Obzirom na različitost faza u kojima se nalaze sudionici heterogene fotokatalitičke reakcije (nečistoća – tekuća faza, katalizator – čvrsta faza, fotoni svjetlosti – čestice bez mase), odabir fotokatalitičkog reaktora zahtjevan je zadatak koji zahtijeva interdisciplinarni pristup. Fotokatalitički reaktori dijele se prema sljedećim karakteristikama:

1. Prema izvoru svjetlosti:
 - Prema valnoj duljini: UV, VIS
 - Prema vrsti izvora: s prirodnim izvorom svjetlosti, s umjetnim izvorom svjetlosti (konvencionalne lampe, LED)
2. Prema katalizatoru:
 - Prema vrsti katalizatora: katalizatori na bazi TiO₂, katalizatori na bazi drugih materijala
 - Prema stanju katalizatora: reaktori s imobiliziranim slojem katalizatora, reaktori sa suspendiranim katalizatorom

- Prema veličini čestica katalizatora: s mikrometarskim česticama, s nanometarskim česticama
3. Prema tipu reaktora:
- Kotlasti reaktor, protočnokotlasti reaktor, kotlasti reaktor s dotokom, cijevni reaktor²²

Prednosti heterogene fotokatalize nad ostalim naprednim oksidacijskim procesima brojne su. Primjerice, tom je metodom moguće u potpunosti razgraditi teško razgradive organske spojeve, čak i u izrazito niskim koncentracijama (ppb vrijednostima) u svega nekoliko sati, pri čemu neće doći do stvaranja toksičnih nusprodukata, kao što su policiklički ugljikovodici. Osim toga, katalizatori koji se upotrebljavaju u te svrhe niskih su troškova, široko su dostupni te lako prilagodljivi različitim reaktorskim sustavima.²¹

2.5 IZVORI ZRAČENJA

Učinkovitost osvjetljenja površine katalizatora predstavlja najveće ograničenje pri provedbi fotokatalitičkih reakcija, stoga je pravilan izbor izvora svjetlosti od velike važnosti za provedbu ovoga procesa.²³ Različiti fotokatalizatori imaju različite sposobnosti apsorpcije svjetlosti, pa tako vrijednost energije zabranjene zone najčešće korištenih fotokatalizatora odgovara energiji fotona s UV dijela spektra Sunčeva zračenja. Iznimka su jedino CdS i WO₃, koji apsorbiraju fotone s vidljivog dijela spektra, no uz određene modifikacije to su u mogućnosti ostvariti i ostali fotokatalizatori.²⁴

Tablica 4. Vrijednosti energije zabranjene zone različitih fotokatalizatora¹⁷

| FOTOKATALIZATOR | E _g (300 K) / eV |
|--------------------------------|-----------------------------|
| ZnS | 3,54 |
| SnO ₂ | 3,60 |
| TiO ₂ | 3,20 |
| ZnO | 3,03 |
| WO ₃ | 2,60 |
| CdS | 2,42 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,20 |
| CdO | 2,10 |
| Cu ₂ O | 2,10 |
| CdSe | 1,70 |
| AlSb | 1,58 |
| CdTe | 1,56 |
| GaAs | 1,42 |

2.5.1. Prirodni izvori zračenja (Sunčevo zračenje)

Sunčevo zračenje glavni je izvor sve energije, odnosno prirodne svjetlosti na Zemlji. Infracrveno zračenje pokriva otprilike 52% spektra Sunčevog elektromagnetskog zračenja, 43% zauzima vidljivi dio spektra, dok 5% spektra pokriva UV zračenje.²⁵ Troškovi korištenja Sunčevog zračenja kao izvora svjetlosti u fotokatalizi niži su od troškova primjene umjetnih izvora, no za veću učinkovitost fotokatalize potrebno je ugraditi kompleksne solarne sustave, čiji troškovi često premašuju troškove umjetnih izvora zračenja. Osim niske učinkovitosti, Sunčevo zračenje nije jednako dostupno na svim lokacijama na svijetu, stoga nije univerzalno primjenjivo kao izvor zračenja pri fotokatalizi.²⁴

2.5.2. Umjetni izvori zračenja

Velik je broj različitih umjetnih izvora zračenja koji stvaraju UV zračenje, uzimajući u obzir da najveći dio materijala koji se koriste kao fotokatalizatori apsorbira upravo ultraljubičasti dio spektra Sunčeva zračenja. Fotokatalitičke reakcije obično se izvode koristeći UV-A (315 – 400 nm) i UV-B zrake (280 – 315 nm), dok se UV-C zrake (200 – 280 nm) obično izostavljaju iz primjene obzirom da ih blokiraju razni filtri, kao i sam materijal fotoreaktora, a uz to su i jako štetne za vid.²⁶

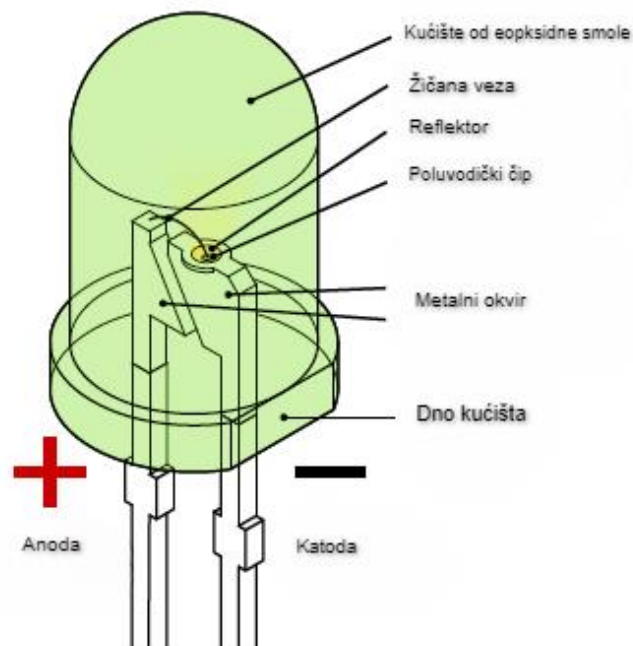
UV lampe

U svrhu heterogene fotokatalize najčešće primjenjivane konvencionalne UV lampe jesu nisko-, srednje- i visokotlačne živine te ksenonove lampe.²⁶ Niskotlačne živine lampe rade pri tlaku od otprilike 1 Pa te emitiraju UV zrake valne duljine 185,0 – 253,7 nm, a prave se od taljenog kvarca ili mekog stakla, koji mogu izdržati nisku radnu temperaturu lampe (< 50 °C). Srednjetačne živine lampe rade pri tlaku od 100 kPa, emitiraju UV zrake valne duljine 250 – 600 nm, a njihova radna temperatura iznosi 500 – 950 °C te se stoga izrađuju od materijala otpornijih na visoke temperature. Zahvaljujući svojem velikom intenzitetu zračenja, ove su lampe u mogućnosti ukloniti patogene mikroorganizme iz vode u iznimno kratkom vremenu, no nedostatak im je kratak vijek trajanja (maksimalno 5000 h).²⁷ Osim prema radnom tlaku, živine lampe mogu se podijeliti i obzirom na valnu duljinu UV zračenja koje emitiraju, pa se tako dijele na crna svjetla i germicidne lampe. Crna svjetla emitiraju dugovalne UV zrake, za razliku od germicidnih lampi koje emitiraju kratkovalno UV zračenje. Germicidne lampe koriste se pri dezinfekciji vode obzirom da kratkovalno UV zračenje sadrži energiju dostatnu za uništenje DNA patogena prisutnih u vodi.^{24,28} Unatoč njihovoj širokoj primjeni, konvencionalne UV lampe imaju brojne nedostatke poput kratkog vijeka trajanja (< 12000 h),

krhkosti izrade, toksičnosti žive koju sadržavaju te energetske neučinkovitosti, stoga se u posljednje vrijeme primjenjuju napredniji izvori zračenja, primjerice LED.²⁷

Svjetleće diode (LED izvori zračenja)

Svjetleće diode (LED) izvori su zračenja koji za svoj rad koriste anorganski poluvodič koji se sastoji od dva sloja, pozitivno nabijenog p-sloja (s pozitivno nabijenom šupljinom) te negativno nabijenog n-sloja (s elektronima), koji služe za stvaranje fotona. Spajanjem poluvodiča na izvor napona dolazi do izbacivanja elektrona i šupljine iz n-, odnosno p-sloja te njihove rekombinacije, što rezultira oslobađanjem energije u obliku fotona. Valna duljina emitirane svjetlosti ovisit će o energiji zabranjene zone poluvodiča, pa se tako osim UV zraka može proizvesti i vidljiva svjetlost. Intenzitet nastale svjetlosti izravno je ovisan o naponu, a energija fotona ovisi o valnoj duljini emitiranog zračenja.²⁴ Kao poluvodiči u svjetlećim diodama najčešće se koriste materijali kao što je aluminijev nitrid (AlN), galijev nitrid (GaN) te njihove legure.²⁸



Slika 2. Sastavni dijelovi LED modula²⁹

LED izvori zračenja u posljednje se vrijeme sve više primjenjuju, pa tako LED-ovi koji emitiraju bijelu svjetlost imaju najširu primjenu kada je u pitanju općenito osvjetljavanje, dok se UV LED-ovi primjenjuju za, primjerice, dezinfekciju vode, heterogenu fotokatalizu, fototerapiju, forenzičku analizu i sl.²⁴ Razlog sve veće primjene LED-a leži u nizu njegovih

prednosti nad konvencionalnim izvorima zračenja. LED izvori zračenja energetski su učinkovitiji, odnosno transformiraju veću količinu električne energije u svjetlosnu energiju nego što su to u mogućnosti konvencionalne lampe. Malih su dimenzija, što ih čini praktičnijima za širu primjenu, imaju dulji vijek trajanja (stotine tisuća sati), uži spektar emitirane svjetlosti energije bliže energiji zabranjene zone fotokatalizatora te manji kut emitiranja, zahvaljujući čemu se postiže prostorno homogeno osvjetljavanje.²³

Primjena LED izvora zračenja u svrhu heterogene fotokatalize započela je nekoliko godina nakon početka njihove šire primjene kao alternativnih izvora svjetlosti u drugim područjima. Obzirom da je riječ o još uvijek novom i neistraženom području, u praktičnoj primjeni i dalje pretežu konvencionalne lampe, no zahvaljujući svojim brojnim prednostima LED izvori zračenja u budućnosti će postati najzastupljeniji izvor zračenja.²⁴

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu određivana je ovisnost intenziteta zračenja o naponu izvora na različitim udaljenostima izvora od uzorka te za njegove različite snage. U svrhu ovoga ispitivanja upotrijebljen je uzorak vodovodne vode, razdijeljen u dvije staklene posude volumena 200, odnosno 300 ml.



Slika 3. Uzorci vodovodne vode

Također, pri ispitivanjima su kao izvori zračenja korištena četiri UV-A LED modula - dva od 30 W (označena kao 31 i 32) te dva od 20 W (označena kao 21 i 22), spojena na izvor napona (DC POWER SUPPLY, UNI-T UTP 3303). Intenzitet zračenja mjereno je pomoću radiometra (UVP UVX Radiometer).



Slika 4. Eksperimentalni sustav

3.1 Provedba eksperimenta

Eksperiment je proveden na način da se najprije ispitivala ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 2 cm od uzorka, posebno za prvi LED modul od 30 W (31), drugi od 30 W (32), prvi od 20 W (21) te drugi od 20 W (22). Mjerenja su obavljena dva puta te su za grafički prikaz uzete srednje vrijednosti dobivenih rezultata ispitivanja. Isti postupak primijenjen je i za ispitivanje ovisnosti intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 3 cm od uzorka. Udaljenosti 2, odnosno 3 cm simulacija su realnih eksperimenata u reaktorima (posudama od 200, odnosno 300 ml).

Tablica 5. Mjerenje obavljeno na udaljenosti 2 cm za modul 31

| Napon | Intenzitet (1) | Intenzitet (2) | Srednja vrijednost |
|-------|----------------|----------------|--------------------|
| 31,0 | 1,98 | 1,78 | 1,88 |
| 31,1 | 3,34 | 2,86 | 3,10 |
| 31,2 | 4,03 | 3,95 | 3,99 |
| 31,3 | 6,24 | 4,61 | 5,43 |
| 31,4 | 8,18 | 6,37 | 7,28 |
| 31,5 | 10,05 | 8,93 | 9,49 |
| 31,6 | 12,06 | 11,19 | 11,63 |
| 31,7 | 16,91 | 18,54 | 17,73 |
| 31,8 | > 20 | > 20 | > 20 |
| 31,9 | > 20 | > 20 | > 20 |
| 32,0 | > 20 | > 20 | > 20 |

Tablica 6. Mjerenje obavljeno na udaljenosti 2 cm za modul 32

| Napon | Intenzitet (1) | Intenzitet (2) | Srednja vrijednost |
|-------|----------------|----------------|--------------------|
| 31,0 | 2,71 | 2,72 | 2,72 |
| 31,1 | 3,14 | 3,74 | 3,44 |
| 31,2 | 4,02 | 5,13 | 4,58 |
| 31,3 | 6,97 | 6,57 | 6,77 |
| 31,4 | 7,41 | 8,14 | 7,78 |
| 31,5 | 10,78 | 10,33 | 10,56 |
| 31,6 | 13,56 | 14,69 | 14,13 |
| 31,7 | 19,94 | 20,00 | 19,97 |
| 31,8 | > 20 | > 20 | > 20 |
| 31,9 | > 20 | > 20 | > 20 |
| 32,0 | > 20 | > 20 | > 20 |

Tablica 7. Mjerenje obavljeno na udaljenosti 2 cm za modul 21

| Napon | Intenzitet (1) | Intenzitet (2) | Srednja vrijednost |
|-------|----------------|----------------|--------------------|
| 31,0 | 2,09 | 1,36 | 1,73 |
| 31,1 | 3,00 | 1,81 | 2,41 |
| 31,2 | 4,67 | 2,08 | 3,38 |
| 31,3 | 5,66 | 2,94 | 4,30 |
| 31,4 | 8,69 | 4,42 | 6,56 |
| 31,5 | 11,02 | 5,50 | 8,26 |
| 31,6 | 16,01 | 7,83 | 11,92 |
| 31,7 | 18,10 | 10,92 | 14,51 |
| 31,8 | > 20 | 13,42 | > 20 |
| 31,9 | > 20 | 16,34 | > 20 |
| 32,0 | > 20 | > 20 | > 20 |

Tablica 8. Mjerenje obavljeno na udaljenosti 2 cm za modul 22

| Napon | Intenzitet (1) | Intenzitet (2) | Srednja vrijednost |
|-------|----------------|----------------|--------------------|
| 31,0 | 2,36 | 1,46 | 1,91 |
| 31,1 | 3,25 | 2,37 | 2,81 |
| 31,2 | 4,67 | 2,80 | 3,735 |
| 31,3 | 5,67 | 3,72 | 4,695 |
| 31,4 | 8,36 | 4,95 | 6,655 |
| 31,5 | 11,24 | 8,02 | 9,63 |
| 31,6 | 13,53 | 9,81 | 11,67 |
| 31,7 | 16,98 | 12,75 | 14,865 |
| 31,8 | > 20 | 17,02 | > 20 |
| 31,9 | > 20 | > 20 | > 20 |
| 32,0 | > 20 | > 20 | > 20 |

Tablica 9. Mjerenje obavljeno na udaljenosti 3 cm za modul 31

| Napon | Intenzitet (1) | Intenzitet (2) | Srednja vrijednost |
|-------|----------------|----------------|--------------------|
| 31,0 | 1,07 | 0,89 | 0,98 |
| 31,1 | 1,64 | 1,47 | 1,56 |
| 31,2 | 1,97 | 1,81 | 1,89 |
| 31,3 | 2,55 | 2,83 | 2,69 |
| 31,4 | 4,01 | 3,81 | 3,91 |
| 31,5 | 5,67 | 5,26 | 5,47 |
| 31,6 | 7,35 | 6,83 | 7,09 |
| 31,7 | 10,16 | 9,40 | 9,78 |
| 31,8 | 13,13 | 10,37 | 11,75 |
| 31,9 | 16,83 | 14,03 | 15,43 |
| 32,0 | > 20 | 18,48 | > 20 |

Tablica 10. Mjerenje obavljeno na udaljenosti 3 cm za modul 32

| Napon | Intenzitet (1) | Intenzitet (2) | Srednja vrijednost |
|-------|----------------|----------------|--------------------|
| 31,0 | 1,34 | 0,99 | 1,17 |
| 31,1 | 1,62 | 1,53 | 1,58 |
| 31,2 | 2,75 | 2,01 | 2,38 |
| 31,3 | 2,92 | 2,96 | 2,94 |
| 31,4 | 4,69 | 4,15 | 4,42 |
| 31,5 | 5,48 | 4,86 | 5,17 |
| 31,6 | 7,39 | 7,67 | 7,53 |
| 31,7 | 10,21 | 8,71 | 9,46 |
| 31,8 | 13,26 | 12,86 | 13,06 |
| 31,9 | 18,43 | 15,64 | 17,04 |
| 32,0 | > 20 | 18,32 | > 20 |

Tablica 11. Mjerenje obavljeno na udaljenosti 3 cm za modul 21

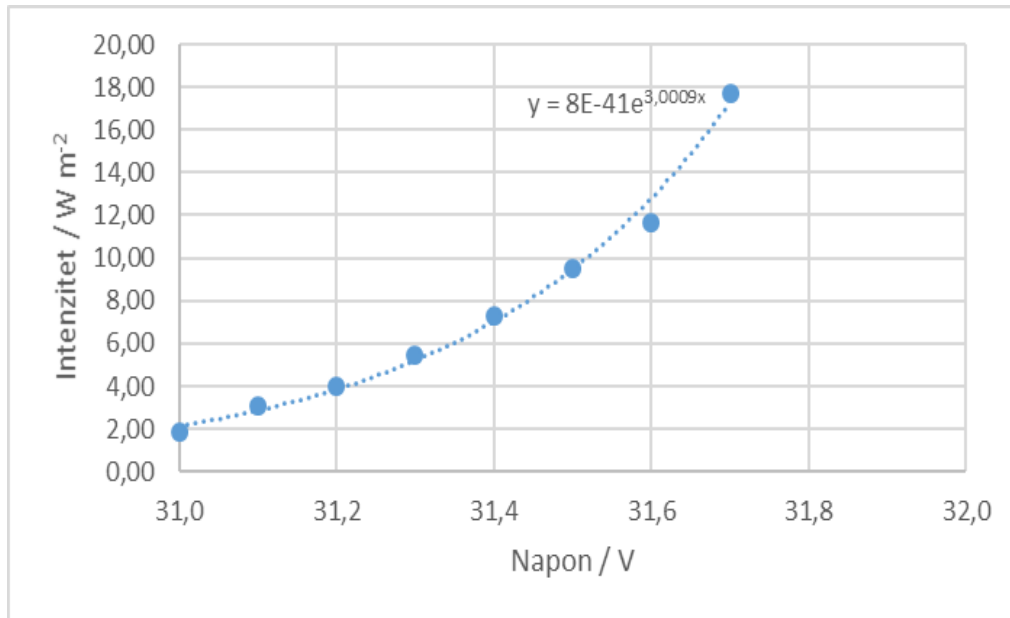
| Napon | Intenzitet (1) | Intenzitet (2) | Srednja vrijednost |
|-------|----------------|----------------|--------------------|
| 31,0 | 0,80 | 0,41 | 0,61 |
| 31,1 | 1,07 | 0,70 | 0,89 |
| 31,2 | 1,22 | 1,00 | 1,11 |
| 31,3 | 2,17 | 1,54 | 1,86 |
| 31,4 | 2,83 | 2,63 | 2,73 |
| 31,5 | 3,44 | 3,03 | 3,24 |
| 31,6 | 4,92 | 4,25 | 4,59 |
| 31,7 | 6,44 | 6,01 | 6,23 |
| 31,8 | 7,33 | 8,88 | 8,11 |
| 31,9 | 9,54 | 10,06 | 9,80 |
| 32,0 | 13,25 | 12,97 | 13,11 |

Tablica 12. Mjerenje obavljeno na udaljenosti 3 cm za modul 22

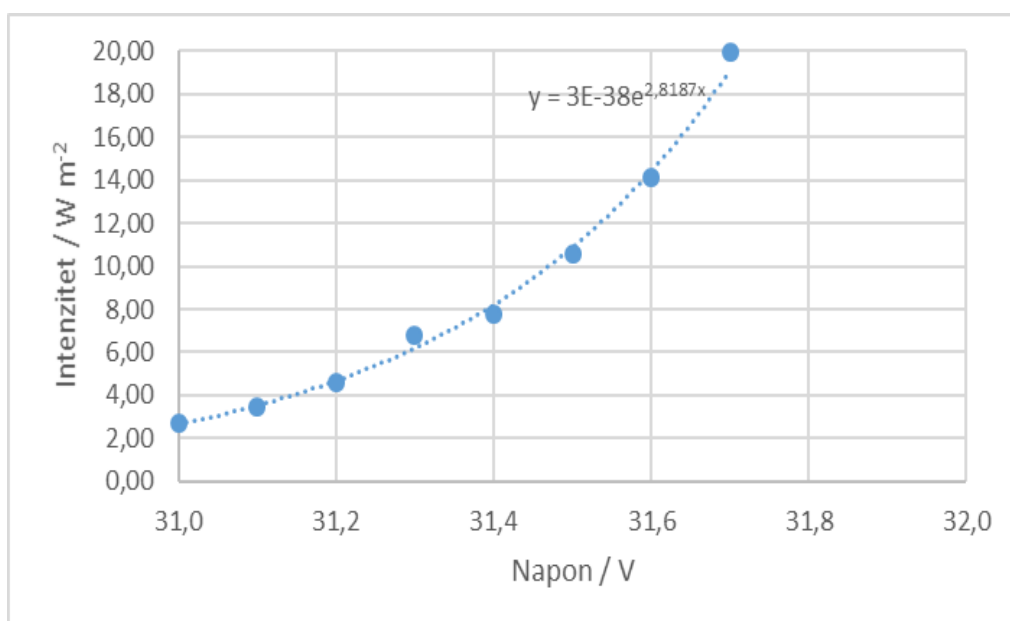
| Napon | Intenzitet (1) | Intenzitet (2) | Srednja vrijednost |
|-------|----------------|----------------|--------------------|
| 31,0 | 0,67 | 0,74 | 0,71 |
| 31,1 | 0,93 | 0,94 | 0,94 |
| 31,2 | 1,45 | 1,26 | 1,36 |
| 31,3 | 1,99 | 1,96 | 1,98 |
| 31,4 | 3,01 | 2,28 | 2,65 |
| 31,5 | 3,33 | 3,44 | 3,39 |
| 31,6 | 4,99 | 4,45 | 4,72 |
| 31,7 | 6,97 | 6,32 | 6,65 |
| 31,8 | 7,71 | 6,80 | 7,26 |
| 31,9 | 11,08 | 9,54 | 10,31 |
| 32,0 | 13,01 | 13,01 | 13,01 |

4. REZULTATI I RASPRAVA

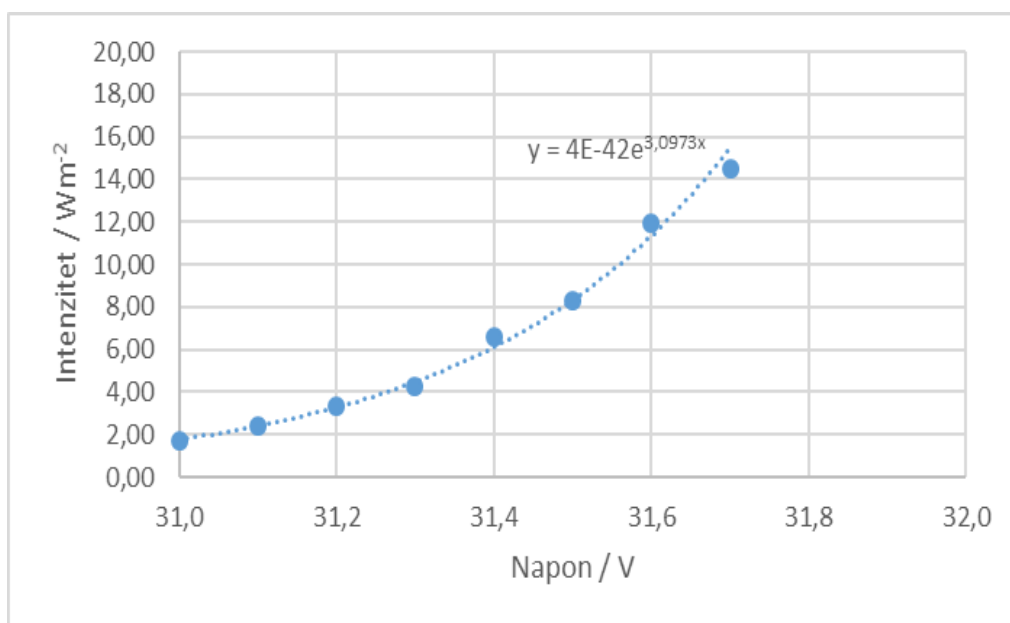
Postupkom iz poglavlja 3.1 dobiveni su dijagrami ovisnosti intenziteta zračenja o naponu.



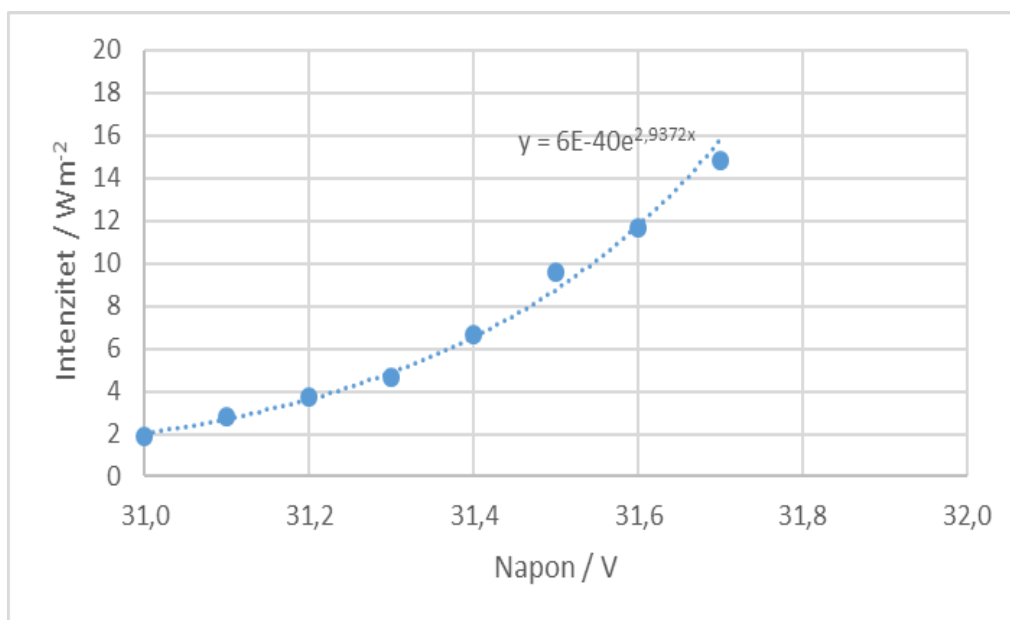
Slika 5. Ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 2 cm od uzorka;
LED modul 31



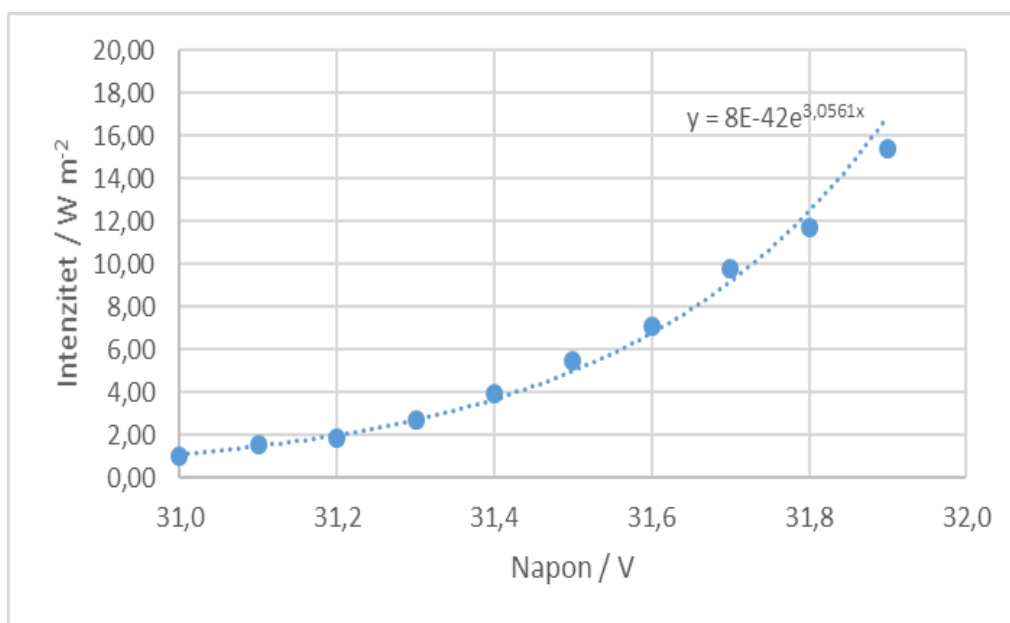
Slika 6. Ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 2 cm od uzorka;
LED modul 32



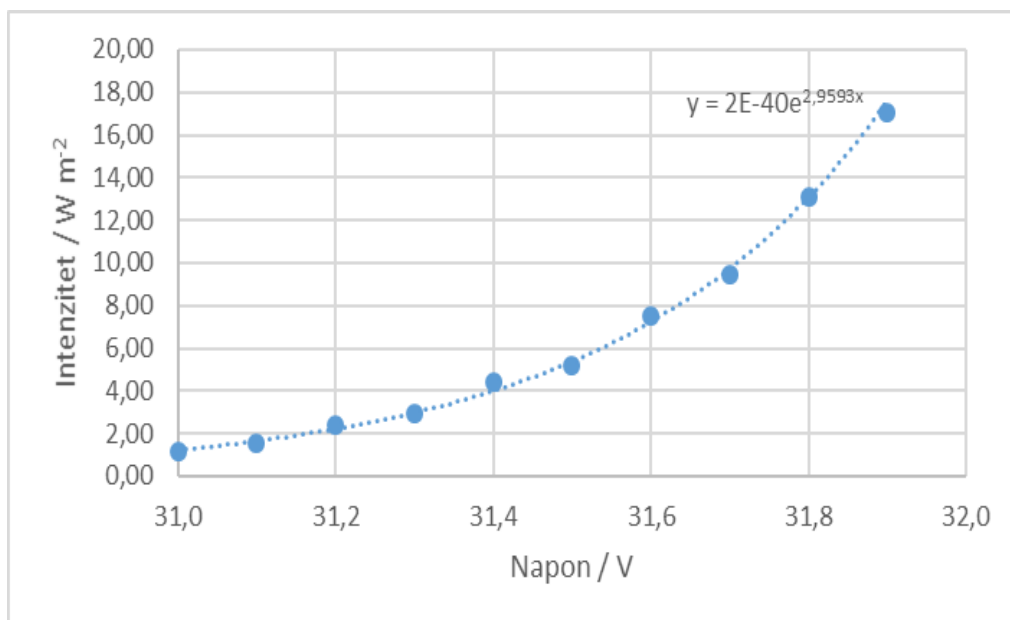
Slika 7. Ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 2 cm od uzorka;
LED modul 21



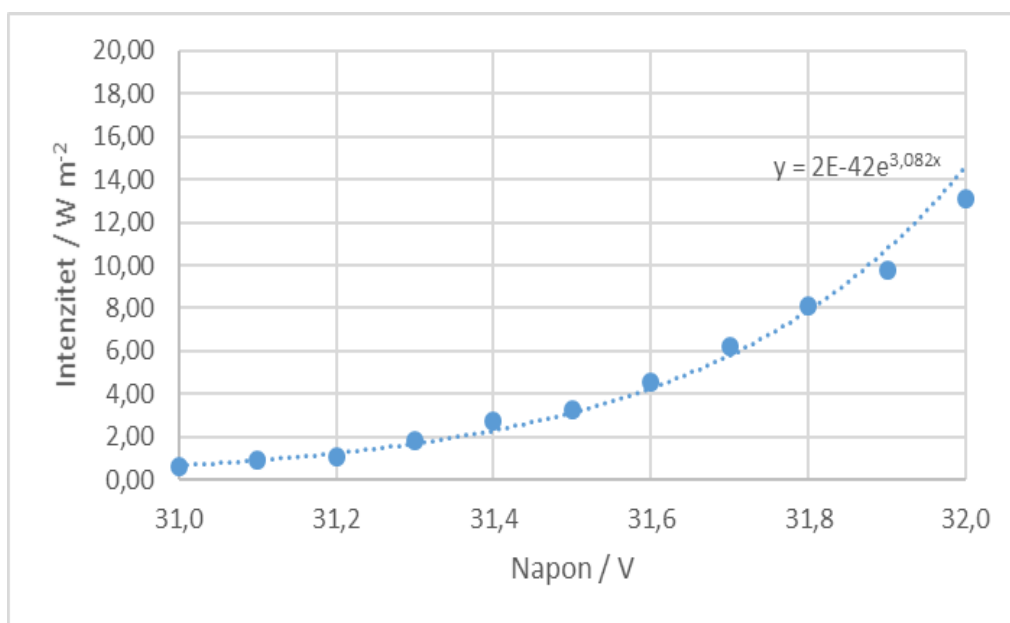
Slika 8. Ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 2 cm od uzorka;
LED modul 22



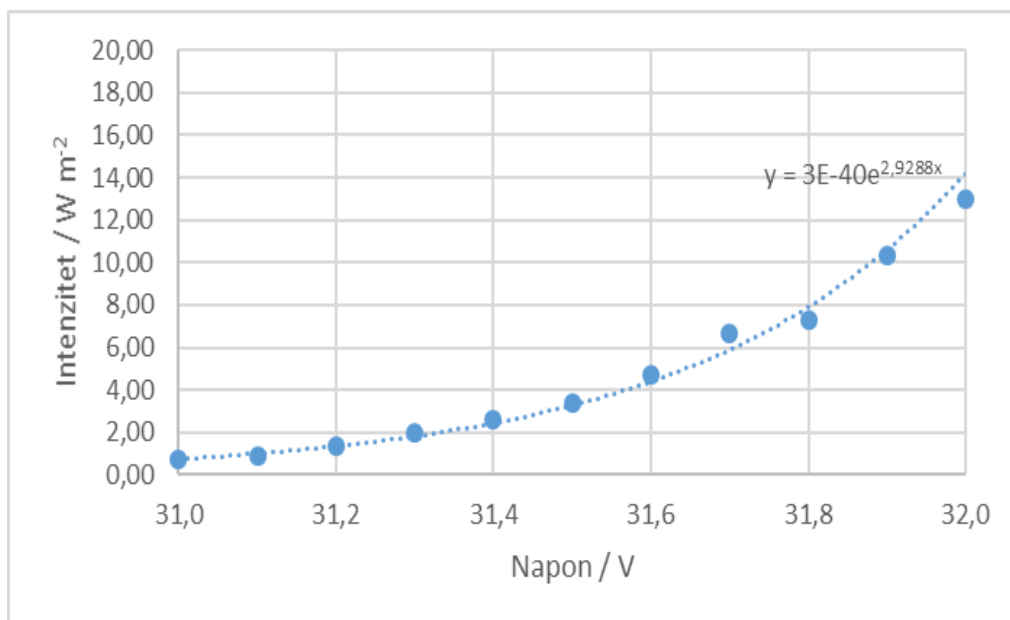
Slika 9. Ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 3 cm od uzorka; LED modul 31



Slika 10. Ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 3 cm od uzorka; LED modul 32



Slika 11. Ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 3 cm od uzorka; LED modul 21



Slika 12. Ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 3 cm od uzorka; LED modul 22

Iz priloženih grafičkih prikaza uočljiva je eksponencijalna ovisnost intenziteta zračenja UV-A LED modula o njegovu naponu. Razlog tomu je činjenica da su svjetleće diode strujom, a ne naponom upravljani uređaji. Naime, za svjetleće diode ne vrijedi Ohmov zakon (jed. 2), što znači da ovisnost električne struje o naponu nije linearna. U ovom slučaju riječ je o eksponencijalnoj ovisnosti (jed. 3), pri čemu su I_0 i k konstante, čije su vrijednosti za komercijalno dostupne LED module pri sobnoj temperaturi $I_0 = 3,2 \mu A$ te $k = 3,64 V^{-1}$. Intenzitet svjetlosti proporcionalan je svjetlosnom fluksu (jed. 4), pri čemu je E intenzitet zračenja [Wm^{-2}], Φ svjetlosni fluks [W], a A osvijetljena površina. Svjetlosni fluks direktno je proporcionalan električnoj struji, a obzirom na eksponencijalnu ovisnost električne struje o naponu, zaključujemo da je intenzitet zračenja LED modula eksponencijalno ovisan o njegovu naponu, što potvrđuju i eksperimentalni rezultati.³⁰

$$I = U/R \quad (2)$$

$$I = I_0 \cdot e^{k \cdot U} \quad (3)$$

$$E = \Phi/A \quad (4)$$

Za praktičnu primjenu korisno je područje linearne ovisnosti. Na različitim udaljenostima izvora zračenja od uzorka te za različite snage izvora zračenja područje linearnosti bit će omeđeno različitim naponima, što je također razvidno iz priloženih dijagrama.

Iz dobivenih eksponencijalnih funkcija za svaki pojedini slučaj mogu se odrediti ovisnosti intenziteta zračenja o naponu izvan područja mjerenja, što je posebno važno u slučajevima kada nije bilo moguće radiometrom izmjeriti intenzitet (tablica 5.-10.).

Također, iz grafičkih je prikaza uočljivo kako za iste vrijednosti napona te udaljenosti od uzorka LED moduli veće snage daju veće vrijednosti intenziteta zračenja nego oni manje snage. Osim toga, vidljivo je kako se intenzitet zračenja smanjuje s udaljenošću od uzorka pri istim vrijednostima snage i napona LED modula.

5. ZAKLJUČAK

U ovome je radu ispitivana ovisnost intenziteta zračenja UV-A LED modula o njegovu naponu za različite snage UV-A LED modula (30 i 20 W) te za njegove različite udaljenosti od uzorka (2 i 3 cm).

Na temelju mjernih rezultata doneseni su sljedeći zaključci:

1. Intenzitet zračenja UV-A LED modula eksponencijalno raste s njegovim naponom.
2. LED moduli veće snage postižu veći intenzitet zračenja pri istoj udaljenosti od uzorka i istoj vrijednosti napona nego oni manje snage.
3. Intenzitet zračenja pri istim vrijednostima snage i napona LED modula smanjuje se s povećanjem udaljenosti od uzorka.
4. Iz dobivenih funkcijskih eksponencijalnih ovisnosti mogu se proračunati vrijednosti intenziteta zračenja neovisno o eksperimentalno izmjerenim vrijednostima.

6. LITERATURA

1. Ajibade, F.O., Adelodun, B., Lasisi, K. H., Fadare, O. O., Ajibade, T. F., Nwogwu, N. A., Sulaymon, I. D., Ugya, A. Y., Wang, H. C., Wang, A., Environmental pollution and their socioeconomic impacts u: Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants, Woodpress Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 2021., str. 321-354.
2. Chityala, S., Jayachandran, D., Prabhu, A. A., Dasu, V. V., Current status of toxic wastewater control strategies u: Emerging Technologies in Environmental Bioremediation, Elsevier, 2020., str. 277.
3. Sadeghpour, P., Jalilnejad, E., Ghasemzadeh, K., Achievements in ultraviolet irradiation and in advanced oxidation technologies for wastewater and water treatment u: Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes, Elsevier, 2020. str. 2.
4. Zakon o vodama, NN 66/2019
5. Liu, D. H. F., Liptak, B. G., Environmental Engineers' Handbook 2nd Edition, CRC Press LLC., 1997., str. 519-523.
6. Englande., A. J., Krenkel, P., Wastewater Treatment and Water Reclamation u: Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), Academic Press, 2003, str. 641-643.
7. Uredba o okolišnoj dozvoli, NN 8/2014
8. Briški, F., Zaštita okoliša – interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2013., str. 34-35, 40-46.
9. Smarte Anekwe, I. M., Adedeji J., Okiemute Akpasi, S., Lewis Kiambi, S., Available Technologies for Wastewater Treatment, IntechOpen, 2022., str. 2-14.
10. Titchou, F E., Zazou, H., Afanga, H., El Gaayda, J., Ait Akbour, R., Nidheesh, P. V., Hamdani, M., Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 169 (2021) 108631.
11. Horáková, M., Klementová, Š., Kříž, P., Balakrishna, S. K., Špatenka, P., Golovko, O., Hájková, P., Exnar, P., The synergistic effect of advanced oxidation processes to eliminate resistant chemical compounds, Surface & Coatings Technology 241 (2014) 154-158.

12. M'Arimi, M. M., Mecha, C. A., Kiprop, A. K., Ramkat, R., Recent trends in applications of advanced oxidation processes (AOPs) in bioenergy production: Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 121 (2020) 109669.
13. Coha, M., Farinelli, G., Tirafferi, A., Minella, M., Vione, D., Review: Advanced oxidation processes in the removal of organic substances from produced water: Potential, configurations, and research needs, *Chemical Engineering Journal* 414 (2021) 128668.
14. Miklos, D. B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K. G., Drewes, J. E., Hübner, U., Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment - A critical review, *Water Research* 139 (2018), 118-131.
15. Basavarajappa, P. S., Patil, S. B., Ganganagappa, N., Reddy, K. R., Raghu, A. V., Reddy, C. V., Recent progress in metal-doped TiO₂, non-metal doped/codoped TiO₂ and TiO₂ nanostructured hybrids for enhanced photocatalysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 7764-7778.
16. Ameta R., Solanki, M. S., Benjamin, S., Ameta S. C., *Photocatalysis u: Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*, 2018., str. 136.
17. Omo Ibadon, A., Fitzpatrick, P. Review: Heterogeneous Photocatalysis: Recent Advances and Applications, *Catalysts* (2013) 189-218.
18. Byrne, C., Subramanian, G., Pillai, S. C., Recent Advances in Photocatalysis for Environmental Applications, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6 (2018) 3531-3555.
19. Srikanth, B., Goutham R., Badri Narayan, R., Ramprasath, A., Gopinath, G. P., Sankaranarayanan, A. R., Recent advancements in supporting materials for immobilised photocatalytic applications in waste water treatment, *Journal of Environmental Management* 200 (2017) 60-78.
20. <https://i.stack.imgur.com/EIGpk.png> (pristup 28. 8. 2022.)
21. Singh, S., Kumar, V., Singh, Dhanjal, D., Datta, S., Kaur, S., Romero, R., Singh J., Degradation of pesticides in wastewater using heterogeneous photocatalysis u: Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants, 2021., str. 165.
22. Kanmani, S., Sundar, K. P., Progression of Photocatalytic reactors and it's comparison: A Review, *Chemical Engineering Research and Design* 154 (2019) 135-150.

23. Baturira, M., da Costa, F., Araujo, A. L. P., Padrão, S. P., Bonaventura, R. A. R., Dias, M. M., Lopes, J. C. B., Vilar, V. J. P., Effect of Catalyst Coated Surface, Illumination Mechanism and Light Source in Heterogeneous TiO₂ Photocatalysis using a Mili-Photoreactor for n-Decane Oxidation at Gas Phase, *Chemical Engineering Journal* 366 (2019) 560-568.
24. Tokode, O., Prabhu, R., Lawton, L.A., Robertson, P.K.J., UV LED Sources for Heterogeneous Photocatalysis u: *Environmental Photochemistry Part III. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 35. Springer, 2014, str. 159-179.
25. Francis, A., Shanmuga Priya, S., Harish Kumar, S., Sudhakar, K., Tahir, Muhammad, A review on recent developments in solar photoreactors for carbon dioxide conversion to fuels, *Journal of CO₂ Utilization* 47 (2021) 101515.
26. Bayarri, B., Abellán, M. N., Giménez, J., Esplugas, S., Study of the wavelength effect in the photolysis and heterogeneous photocatalysis, *Catalysis Today*, 129 (2007) 231-239.
27. Koutchma, T., *Basic Principles of UV Light Generation u: Food Plant Safety*, Elsevier, 2014., str. 3-6.
28. Rajkhowa, S., Heat, solar pasteurization, and ultraviolet radiation treatment for removal of waterborne pathogens u: *Waterborne Patogens*, Elsevier, 2020., str. 181–182.
29. <https://mevihub.com/wp-content/uploads/2021/03/BUTTON.png> (pristup 1. 9. 2022.)
30. Lenk, R., Lenk, C., *Practical Lighting Design With LEDs*, Wiley-IEEE Press; 1st edition, 2011., str. 35, 51-52.

ŽIVOTOPIS

Nikol Jović [REDACTED] Osnovnoškolsko obrazovanje (2004.-2012.) završila je u Osnovnoj školi Nikole Tesle u Gračacu, nakon čega svoje srednjoškolsko obrazovanje (2012.-2016.) stječe u Klasičnoj gimnaziji Ivana Pavla II. u Zadru te 2018. godine upisuje preddiplomski studij Ekoinženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu.