

UV-led izvori zračenja u fotokatalizi

V. Kosar* i N. Jović

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Trg Marka Marulića 19,
10 000 Zagreb

Ovo djelo je dano na korištenje pod
Creative Commons Attribution 4.0
International License



Sažetak

Fotokataliza je jedna od najperspektivnijih naprednih oksidacijskih metoda razgradnje organskih onečišćivala u vodenim otopenama. Kao izvori zračenja upotrebljavaju se umjetni i prirodni izvori odnosno Sunčevo zračenje. Eksperimentalno su izmjereni intenziteti zračenja različitih UV-A LED modula različitih snaga (20 i 30 W) ovisno o naponu izvora na različitim udaljenostima od površine modelne otopine (2 i 3 cm). Dobiveni rezultati pokazuju eksponencijalnu ovisnost intenziteta UV zračenja o naponu izvora napajanja.

Ključne riječi

Otpadne vode, napredni oksidacijski procesi, heterogena fotokataliza, LED izvori zračenja

1. Uvod

1.1. Postupci obrade otpadnih voda

Ovisno o podrijetlu, namjeni i kemijskom sastavu otpadnih voda primjenjuju se različiti postupci pročišćavanja otpadnih voda, uzimajući u obzir zakonske propise Republike Hrvatske i regulative propisane zakonima Europske unije. U pročišćavanju otpadnih voda najčešće se primjenjuju fizikalni, kemijski, fizikalno-kemijski, biološki te kombinirani procesi.¹ Rad konvencionalnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda također uključuje primarni, sekundarni i tercijarni stupanj pročišćavanja. Primarna obrada uključuje filtraciju, centrifugiranje, sedimentaciju, koagulaciju i flotaciju. Biološka obrada je najčešći sekundarni stupanj procesa, dok tercijarni stupanj uključuje oksidaciju, taloženje, reverznu osmozu, elektrolizu i elektrodijalizu. Uz konvencionalne postupke pročišćavanja, sve se više primjenjuju napredni procesi oksidacije, ionske izmjene, ultra- i nanofiltracija, adsorpcija/biosorpcija i napredni biološki procesi koji rabe alge, bakterije, gljivice i alge.

Nedavno su razvijene nove tehnologije za odvajanje čestica manjih dimenzija, npr. membranske tehnologije (tablica 1). Ovisno o promjeru čestica koje se uklanjaju, membranske tehnologije dijele se na mikrofiltraciju, ultrafiltraciju, nanofiltraciju i reverznu osmozu.¹

Koagulacija se smatra najvažnijim fizikalno-kemijskim procesom obrade otpadnih voda. Dodatkom koagulant, raspršene koloidne čestice (veličine do 1 µm) prelaze u aglomerate, nakon čega se mogu ukloniti sedimentacijom, flotacijom ili filtracijom. Najčešće se kao koagulant upotrebljavaju škrob, aluminijeve soli te silicijev dioksid.¹

Procesi kemijske obrade otpadnih voda uključuju različite kemijske pretvorbe onečišćujućih tvari i uvijek se provode

Tablica 1 – Membranski procesi¹

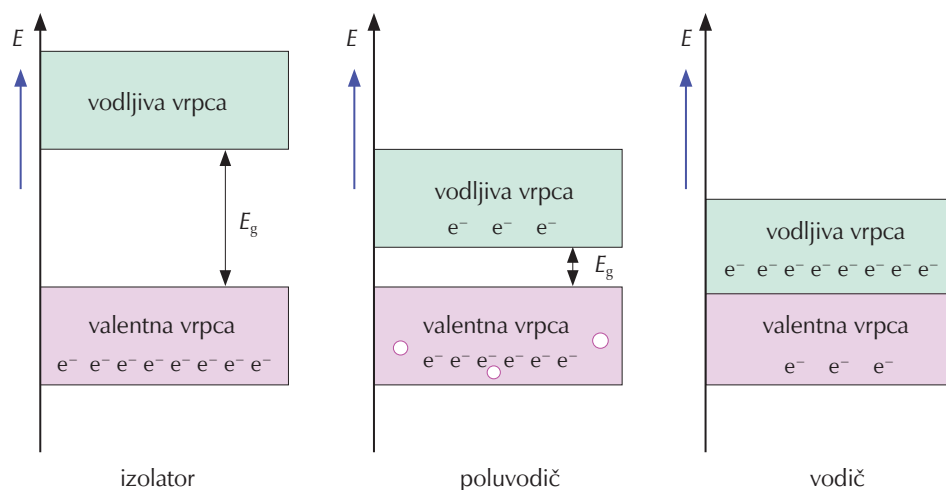
Table 1 – Membrane processes¹

Membranski proces	Trans-membranski 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 – 10 000	< 1	monovalentni ioni, magnezijevi i kalcijevi ioni

istodobno s fizikalnim i biološkim metodama. Nedostatak kemijskih procesa je što njihova primjena obično dovodi do povećanja koncentracije štetnih otopljenih tvari.

Biološki procesi pročišćavanja otpadnih voda dijele se na anaerobne i aerobne procese. U aerobnim procesima, aerobni mikroorganizmi rabe otopljeni kisik za razgradnju biorazgradivih organskih tvari na ugljikov dioksid i vodu kroz proces biooksidacije. Parametri koji utječu na proces su temperatura, vrijeme zadržavanja, dostupnost kisika i biološka aktivnost mikroorganizama. Aditivi koji su nužni za rast i razvoj mikroorganizama mogu povećati brzinu procesa. Na taj način se iz otpadnih voda mogu uspješno ukloniti fosfati, nitrati, hlapljivi organski spojevi kao i suspendirani i otopljeni organski spojevi. Nedostatak tog procesa je nastajanje velikih količina aktivnog mulja koji zahtijeva dodatnu obradu i zbrinjavanje. Aerobna obrada otpadnih voda također se provodi u sustavima s aktivnim muljem ili biološkim filtrima. Zbog povećanih zahtjeva za

* Autor za dopisivanje: izv. prof. dr. sc. Vanja Kosar
E-pošta: vkosar@fkit.unizg.hr



Slika 1 – Elektronska struktura izolatora, poluvodiča i vodiča

Fig. 1 – Electronic structure of insulators, semiconductors, and conductors

ekološkom održivošću i zaštitom okoliša, posljednjih desetljeća razvijene su novije, naprednije, učinkovitije i čišće tehnologije za pročišćavanje otpadnih voda.²

1.2. Heterogena fotokataliza

Od svih trenutačno dostupnih naprednih oksidacijskih procesa, heterogena fotokataliza je najučinkovitija metoda za uklanjanje onečišćujućih tvari iz otpadne vode. Fotokataliza je proces u kojem se organska onečišćenja i patogeni organizmi iz vode uklanjaju pomoću fotokatalizatora, najčešće poluvodiča, koji apsorbira energiju zračenja i generira stvaranje jakih oksidansa koji dalje oksidiraju i time razgrađuju organske tvari.³ Fotokataliza se dijeli na homogenu i heterogenu, ovisno o agregatnom stanju reaktanata. Kod homogene fotokatalize reaktant i fotokatalizator su u istoj fazi, dok su kod heterogene katalize u različitim fazama.⁴

Zanimanje za heterogenu fotokatalizu javilo se 1972. godine kad su Fujishima i Honda otkrili fotokemijsku razgradnju vode na vodik i kisik u prisutnosti TiO_2 . Nedavno je upotreba poluvodičkih materijala kao katalizatora za uklanjanje organskih i anorganskih tvari iz tekućih i plinovitih sustava s primjenom u zaštiti okoliša, obradi pitke vode, industriji i medicini dobila

veliku pozornost. Taj proces uspješno uklanja organske tvari kao što su pesticidi, boje, hormoni, organske kiseline, sirova nafta, biološki materijal ili mikroorganizmi, uključujući viruse i mikroorganizme otporne na klor, kao i anorganske spojeve kao što su dušikovi oksidi (NO_x).⁵

Energetska razlika između valentnog i vodljivog pojasa materijala naziva se energija zabranjene zone (E_g), a ovisno o razini te energije materijali se kategoriziraju kao vodiči, poluvodiči i izolatori. Poluvodiče karakterizira E_g vrijednost $< 1,5 - 3,0 \text{ eV}$.⁴ Njihov valentni pojas obično je ispunjen, dok im je vodljivi pojas djelomično ili potpuno prazan (slika 1).⁶

Mehanizam fotokatalitičke reakcije sastoji se od nekoliko međukoraka. Fotokataliza počinje ozračivanjem površine poluvodiča svjetlom čija je energija veća od energije zabranjene zone, čime se pobuđuju elektroni iz valentne vrpce (VB) i prenose ih u vodljivu vrpcu (CB). Nakon što su svi elektroni prešli u vodljivu vrpcu (e-CB), pozitivno nabijena šupljina ($h+VB$) stvara se u valentnoj vrpici.⁷ Šupljine u valentnoj vrpici imaju snažan oksidacijski učinak, dok elektroni u vodljivoj vrpici djeluju kao jako redukcijsko sredstvo. Pobuđeni elektroni u valentnom pojasu reagiraju s kisikom i reduciraju ga u superoksidni radikal ($-\text{O}_2^-$). On se dalje pretvara u hidroperoksidni radikal ($-\text{HO}_2$), pri čemu nastaje vodikov peroksid, koji se dalje reducira u hidroksilni radikal ($-\text{OH}$), koji konačno oksidira organske nečistoće u ugljikov dioksid i vodu. Usporedno, hidroksilni radikali također nastaju oksidacijom vode kroz šupljine u valentnom pojasu.⁷ Mehanizam heterogene fotokatalize općenito se svodi na sljedeće korake:

1. prijenos molekula reaktanata iz tekuće faze do površine fotokatalizatora,
2. adsorpciju molekula reaktanata na površinu fotokatalizatora,
3. reakciju adsorbiranih reaktanata na površini fotokatalizatora,
4. desorpciju produkata s površine fotokatalizatora i
5. uklanjanje produkata s međufazne površine natrag u tekuću fazu.

Brojne spojeve nalazimo kao fotokatalizatore, npr. ZnS , CdS , ZnO , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , WO_3 , SnO_2 , ZrO_2 , tantal, niobijski oksidi, lantanidi, $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, s tim da se TiO_2 najčešće upotrebljava zbog svoje stabilnosti, široke dostupnosti i lakoće proizvodnje u laboratorijskim uvjetima.⁸ S obzirom na raznolikost faza u kojima se nalaze reaktanti heterogene fotokatalitičke reakcije odabir fotokatalitičkog reaktora zahtjevan je zadatak koji zahtijeva interdisciplinarni pristup. Fotokatalitički reaktori kategorizirani su prema sljedećim karakteristikama:

1. Izvoru svjetlosti:

- prema valnoj duljini: UV, VIS,
- prema vrsti izvora: s prirodnim izvorom svjetlosti (sunce), s umjetnim izvorom svjetlosti (konvencionalne lampe, LED).

2. Vrsti katalizatora:

- prema vrsti katalizatora: katalizatori na bazi TiO_2 , katalizatori na bazi drugih materijala,
- prema agregatnom stanju katalizatora: reaktori s imobiliziranim slojem katalizatora, reaktori sa suspendiranim katalizatorom,
- prema veličini čestica katalizatora: mikrometarskim ili nanometarskim veličina.

3. Tipu reaktora:

- kotlasti reaktor, protočno kotlasti reaktor, kotlasti reaktor s dotokom, cijevni reaktor, anularni reaktor.⁹

Prednosti heterogene fotokatalize u odnosu na druge napredne oksidacijske procese su brojne. Na primjer, postojani organski spojevi mogu se tom metodom potpuno razgraditi u samo nekoliko sati, čak i pri iznimno niskim koncentracijama (ppb), bez stvaranja toksičnih nusproizvoda kao što su policiklički ugljikovodici. Osim toga, katalizatori koji se upotrebljavaju su jeftini, široko dostupni i lako prilagodljivi različitim reaktorskim sustavima.⁸

1.3. Izvor zračenja

Učinkovitost osvijetljavanja površine katalizatora glavno je ograničenje pri vođenju fotokatalitičkih reakcija, pa je za provedbu tog procesa od velike važnosti pravilan izbor izvora svjetlosti.¹⁰ Različiti fotokatalizatori imaju različite sposobnosti apsorpcije svjetlosti, pa vrijednosti energije zabranjene zone upotrijebljenih fotokatalizatora odgovaraju energiji fotona iz UV dijela spektra Sunčeva zračenja.

Tablica 2 – Energije zabranjene zone različitih fotokatalizatora⁵
Table 2 – Band gap energies of different photocatalysts⁵

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_2O_3	2,20
CdO	2,10
Cu_2O	2,10
CdSe	1,70
AlSb	1,58
CdTe	1,56
GaAs	1,42

Jedina iznimka su CdS i WO_3 koji apsorbiraju fotone iz vidljivog dijela spektra, no uz određene modifikacije to mogu postići i drugi fotokatalizatori.¹¹

1.3.1. Prirodni izvori zračenja

Sunčevo zračenje glavni je izvor energije i prirodne svjetlosti na Zemlji. Infracrveno zračenje pokriva oko 52 % spektra Sunčeva elektromagnetskog zračenja, 43 % je vidljivi dio spektra, dok 5 % spektra čini ultraljubičasto (UV) zračenje.¹² Cijena uporabe Sunčeva zračenja kao izvora svjetlosti u fotokatalizi niža je od cijene uporabe umjetnih izvora, no za veću učinkovitost fotokatalize potrebno je instalirati složene solarne sustave čija cijena često premašuje onu umjetnih izvora zračenja. Osim niske učinkovitosti, Sunčevo zračenje nije jednako dostupno u svim dijelovima svijeta, zbog čega se ne može univerzalno rabiti kao izvor zračenja za fotokatalizu.¹¹

1.3.2. Umjetni izvori zračenja

Postoji velik broj različitih umjetnih izvora zračenja koji emitiraju UV zračenje, ali treba napomenuti da većina materijala koji se upotrebljavaju kao fotokatalizatori apsorbiraju upravo ultraljubičasti dio spektra Sunčeva zračenja. Fotokatalitičke reakcije obično se provode s UV-A (315 – 400 nm) i UV-B zrakama (280 – 315 nm), dok se UV-C zrake (200 – 280 nm) uglavnom danas ne upotrebljavaju jer ih blokiraju različiti filtri kao i sam materijal fotoreaktora te također predstavljaju opasnost za ljudski vid.¹³ UV-A spektar posebno je zanimljiv s obzirom na to da su valne duljine najbliže vidljivom spektru te što je poznato da Sunčev spektar zračenja sadrži 5 % UV-A zračenja.

UV lampe

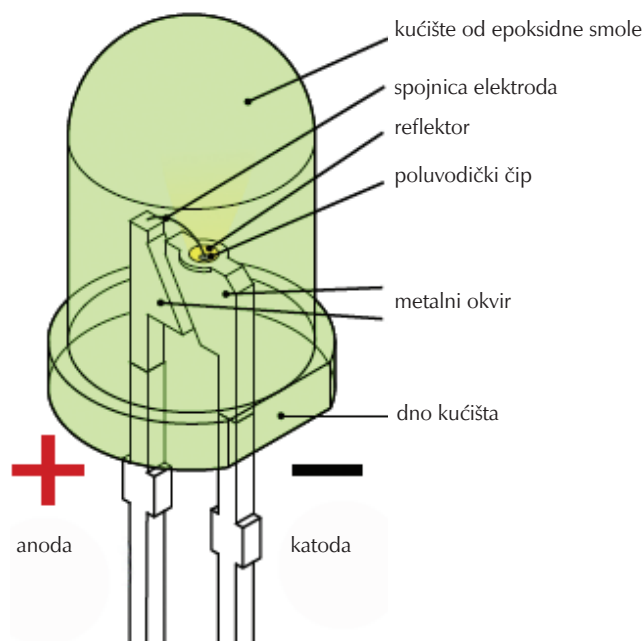
Najčešće upotrebljavane konvencionalne UV žarulje za heterogenu fotokatalizu su živine i ksenonske žarulje niskog, srednjeg i visokog tlaka.¹³ Živine žarulje niskog tlaka rade pri tlaku od oko 1 Pa i emitiraju UV zrake valne duljine od 185,0 do 253,7 nm. Izrađene su od kvarcnog stakla ili mekog stakla koje može podnijeti niske radne temperature (< 50 °C). Srednjotlačne živine žarulje rade pri tlaku od 100 kPa, emitiraju UV zrake valne duljine 250 – 600 nm i radne temperature 500 – 950 °C, te su stoga izrađene od materijala koji mogu podnijeti više temperature. Zahvaljujući visokom intenzitetu zračenja, te žarulje mogu u iznimno kratkom vremenu ukloniti iz vode patogene mikroorganizme, no nedostatak im je kratak radni vijek (najviše 5000 h).¹³ Osim prema radnom tlaku, živine žarulje možemo klasificirati i prema valnoj duljini UV zračenja koje emitiraju, a to su crna svjetlost i germicidne žarulje. Žarulje crnog svjetla emitiraju dugovalno UV zračenje, dok germicidne žarulje emitiraju kratkovalno UV zračenje. Germicidne žarulje upotrebljavaju se pri dezinfekciji vode, budući da kratkovalno UV zračenje sadrži dovoljno energije da uništi DNK patogena prisutnih u vodi.¹⁴ Unatoč širokoj upotrebi, konvencionalne UV žarulje imaju brojne nedostatke, poput kratkog vijeka trajanja (< 12 000 h), krhke konstrukcije, toksičnosti žive koju sadrže i manjka energet-

ske učinkovitosti. Zbog toga se u zadnje vrijeme kao napredniji izvori zračenja sve više upotrebljavaju LED diode.¹⁵

Svjetleće diode (LED izvori zračenja)

Svjetleće diode (LED) su izvori zračenja koji rabe anorganski poluvodič koji se sastoji od dvaju slojeva, pozitivno nabijenog *p*-sloja (s pozitivno nabijenom rupom) i negativno nabijenog *n*-sloja (s elektronima), koji se upotrebljavaju za generiranje fotona. Kad je poluvodič spojen na izvor napona, elektroni i šupljine izbacuju se iz *n*- odnosno *p*-sloja i rekombiniraju, što rezultira oslobađanjem energije u obliku fotona. Valna duljina emitirane svjetlosti ovisi o energiji zabranjenog pojasa poluvodiča, tako da se uz UV svjetlost može generirati i vidljiva svjetlost. Intenzitet generirane svjetlosti izravno ovisi o naponu, a energija fotona ovisi o valnoj duljini emitiranog zračenja.¹⁵ Najčešće upotrebljavani poluvodiči u svjetlećim diodama su materijali kao što su aluminijev nitrid (AlN), galijev nitrid (GaN) i njihove legure.

LED izvori zračenja u posljednje se vrijeme sve više upotrebljavaju, tako da LED diode koje emitiraju bijelu svjetlost imaju najširu primjenu u općoj rasvjeti, dok se UV LED upotrebljavaju, primjerice, za dezinfekciju vode, heterogenu fotokatalizu, fototerapiju, forenzičke analize itd.¹¹ Razlog sve veće upotrebe LED dioda leži u nizu prednosti u odnosu na konvencionalne izvore zračenja. LED izvori zračenja energetski su učinkovitiji, odnosno pretvaraju veću količinu električne energije u svjetlosnu energiju od klasičnih svjetiljki. Maleni su, što ih čini praktičnijim za širu primjenu, imaju dulji životni vijek (stotine tisuća sati), uži spektar emitirane svjetlosne energije bliži energiji zabranjenog pojasa fotokatalizatora i manji kut emisije, čime se postiže prostorno homogeno osvjetljenje (slika 2).



Slika 2 – Sastavni dijelovi LED diode¹⁶
Fig. 2 – Components of LED diodes¹⁶

Primjena LED izvora zračenja u svrhu heterogene fotokatalize započela je nekoliko godina nakon njihove šire upotrebe kao alternativnih izvora svjetlosti u drugim područjima. Budući da je to još uvijek novo i neistraženo područje, konvencionalne svjetiljke još uvijek prevladavaju u praktičnoj primjeni, no zahvaljujući brojnim prednostima, LED izvori zračenja bit će najčešći izvor zračenja u budućnosti.

2. Eksperimentalni dio

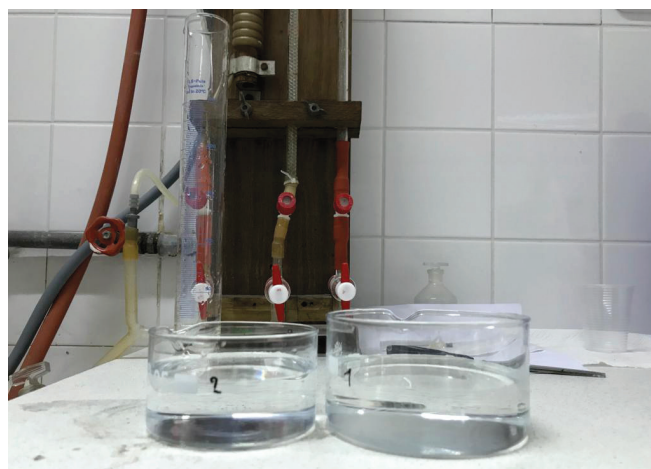
Eksperimentalno je određena ovisnost intenziteta zračenja o naponu izvora na različitim udaljenostima LED modula od uzorka otopine. U tablici 3 prikazani su početni uvjeti provedenih eksperimenata.

Tablica 3 – Početni uvjeti eksperimenta

Table 3 – Initial conditions of the experiment

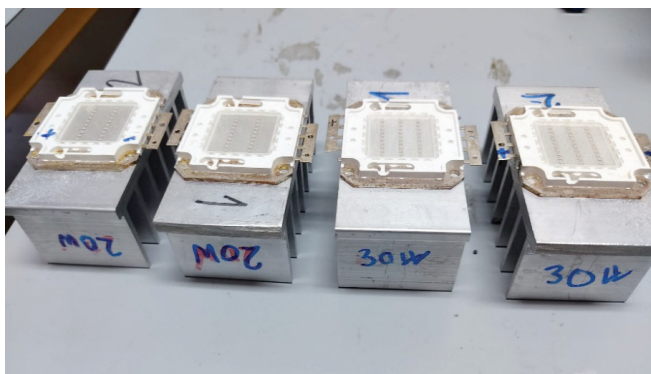
Snaga UVA-LED izvora /W	20	30
Volumen uzorka /ml	100	
Volumen kristalizerke /ml	200	300
Udaljenost površine uzorka od LED modula /cm	2	3

U svrhu ovog ispitivanja upotrijebljen je uzorak vodovodne vode grada Zagreba (100 ml), razdijeljen u dvije staklene posude volumena 200 i 300 ml (slika 3). Time se postiže različita udaljenost LED diode od površine (2 odnosno 3 cm).



Slika 3 – Kristalizerke volumena 200 ml (2) i 300 ml (1)
Fig. 3 – Crystallisers with a volume of 200 ml (2) and 300 ml (1)

Isto tako, pri ispitivanjima su kao izvori zračenja upotrijebljena četiri UV-A LED modula (slika 4) – dva snage 20 W (označena kao 21 i 22) te dva snage 30 W (označena kao 31 i 32).



Slika 4 – UVA-LED moduli snage 20 i 30 W

Fig. 4 – UVA LED modules with 20 and 30 W output

Svaki od navedenih LED modula spojen je na izvor napona (DC POWER SUPPLY, UNI-T UTP 3303). Intenzitet zračenja mjeren je pomoću radiometra (UVP UVX Radiometer), slika 5.



Slika 5 – Eksperimentalni sustav

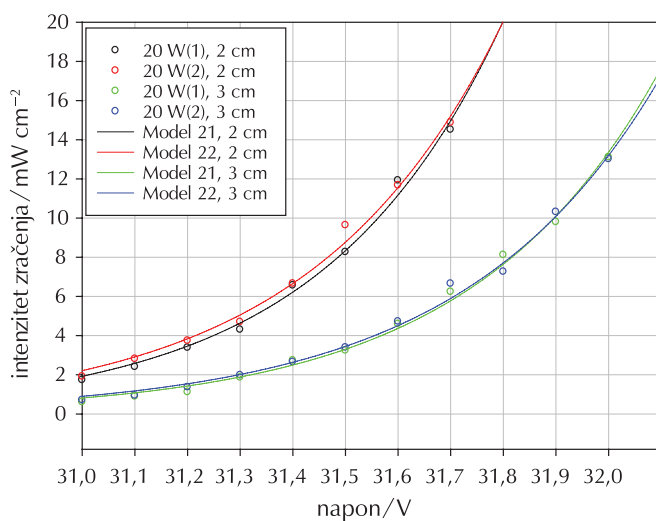
Fig. 5 – Experimental system

Eksperiment je proveden tako da se najprije ispitivala ovisnost intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 2 cm od UVA senzora, posebno za LED module snage 20 W (oznake 21 i 22) te 30 W (31 i 32). Pretpostavka je da se LED moduli iste nazivne snage ne bi trebali znatno razlikovati po svojem intenzitetu zračenja, što će se eksperimentalno i potvrditi. Mjerenja su obavljena

dva puta te su za grafički prikaz uzete srednje vrijednosti dobivenih rezultata. Ista procedura primijenjena je i za ispitivanje ovisnosti intenziteta zračenja o naponu za udaljenost izvora zračenja 3 cm od UVA senzora. Udaljenosti 2, odnosno 3 cm simulacija su realnih eksperimenata u reaktorima (kristalizerkama od 200, odnosno 300 ml, slika 3).

3. Rezultati i rasprava

Iz priloženih grafičkih prikaza (slike 6 i 7) 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 (jedn. 1), što znači da ovisnost električne struje o naponu nije linearna. U tom slučaju riječ je o eksponencijalnoj ovisnosti (jedn. 2), pri čemu su I_0 i k konstante, čije su vrijednosti za komercijalno dostupne LED module pri sobnoj temperaturi $I_0 = 3,2 \mu\text{A}$ te $k = 3,64 \text{ V}^{-1}$. Intenzitet svjetlosti proporcionalan je svjetlosnom toku (jedn. 3), pri čemu je E intenzitet zračenja [Wm^{-2}], Φ svjetlosni tok [W], a A osvijetljena površina [m^2].



Slika 6 – Ovisnost intenziteta zračenja LED modula snage 20 W o naponu

Fig. 6 – Dependence of the radiation intensity of a 20 W LED module on the voltage

Treba naglasiti da je najveći mogući intenzitet koji može izmjeriti dostupni radiometar 20 mW cm^{-2} .

Tablica 4 – Koeficijenti eksponencijalne funkcije ovisnosti intenziteta zračenja o naponu za udaljenost led modula od senzora 2 cm

Table 4 – Coefficients of the exponential function of the dependence of the radiation intensity on the voltage for a distance of the LED module from the sensor of 2 cm

Koeficijenti jedn. 4	20 W (1)	20 W (2)	30 W (1)	30 W (2)
$E_0 / \text{mW cm}^{-2}$	$7,39 \cdot 10^{-40}$	$1,82 \cdot 10^{-36}$	$1,51 \cdot 10^{-40}$	$1,08 \cdot 10^{-39}$
k_E / V^{-1}	2,93	2,76	2,98	2,92

Ako je svjetlosni tok direktno proporcionalan električnoj struji, a električna struja u LED modulu zavisi eksponencijalno od napona (što je često slučaj zbog diodnih izvora svjetlosti), tad je i intenzitet zračenja LED modula eksponencijalno ovisan o njegovom naponu. To znači da mala promjena napona može dovesti do znatne promjene u intenzitetu zračenja LED-a (jedn. 4), što potvrđuju i eksperimentalni rezultati.¹⁷

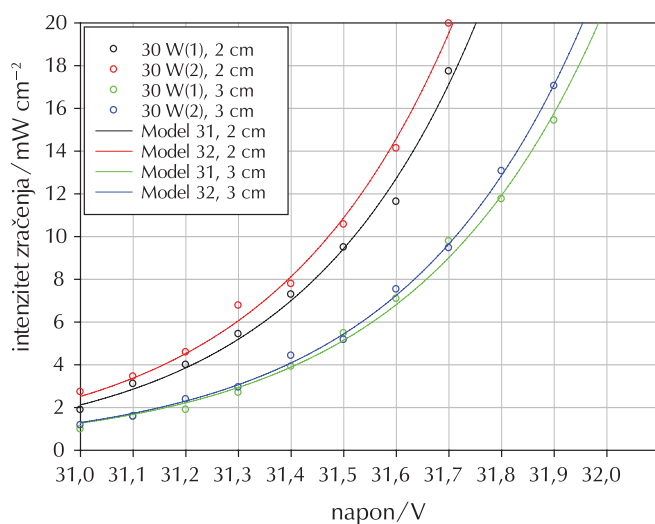
$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

$$I = I_0 \cdot e^{k \cdot U} \quad (2)$$

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$$

$$E = E_0 \cdot e^{k_E \cdot U} \quad (4)$$

Za praktičnu primjenu koristi se 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 vidljivo iz priloženih grafova. 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 kad nije bilo moguće radiometrom izmjeriti intenzitet. Također, iz grafičkih je prikaza uočljivo da 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 da se intenzitet zračenja smanjuje s udaljenošću od uzorka pri istim vrijednostima snage i napona LED modula. To zapažanje je posebno važno prilikom dizajna i izvedbe fotoreaktora jer može znatno utjecati na brzinu fotokatalitičkog procesa neovisno o tome je li izvor UV lampa ili UV LED dioda.



Slika 7 – Ovisnost intenziteta zračenja LED modula snage 30 W o naponu

Fig. 7 – Dependence of the radiation intensity of a 30 W LED module on the voltage

4. Zaključak

U ovom je radu ispitivana ovisnost intenziteta zračenja UV-A LED modula o njegovu naponu za različite snage (20 i 30 W) te za njegove različite udaljenosti od površine uzorka (2 i 3 cm). Na temelju dobivenih rezultata uočeno je da intenzitet zračenja UV-A LED modula eksponencijalno raste s naponom izvora. LED moduli veće snage postižu veći intenzitet zračenja pri istoj udaljenosti od uzorka i istoj vrijednosti napona nego oni manje snage. Intenzitet zračenja pri istim vrijednostima snage i napona LED modula smanjuje se s povećanjem udaljenosti od uzorka. Iz dobivenih eksponencijalnih funkcijskih ovisnosti intenziteta zračenja o naponu na izvoru mogu se predvidjeti vrijednosti intenziteta zračenja izvan eksperimentalno izmjerenih područja. U budućim istraživanjima sa sličnim sustavima treba obratiti pažnju i na promjenu intenziteta zračenja LED modula tijekom vremena, isto tako i na znatno zagrijavanje tijekom duljih razdoblja mjerenja.

Tablica 5 – Koeficijenti eksponencijalne funkcije ovisnosti intenziteta zračenja o naponu za udaljenost led modula od senzora 3 cm

Table 5 – Coefficients of the exponential function of the dependence of the radiation intensity on the voltage for a distance of the LED module from the sensor of 3 cm

Koeficijenti jedn. 4	20 W (1)	20 W (2)	30 W (1)	30 W (2)
$E_0/\text{mW cm}^{-2}$	$1,90 \cdot 10^{-38}$	$6,76 \cdot 10^{-37}$	$2,50 \cdot 10^{-38}$	$3,69 \cdot 10^{-39}$
k_E/V^{-1}	2,79	2,68	2,80	2,86

Popis kratica i simbola

List of abbreviations and symbols

E	– intenzitet zračenja, mW cm^{-2} – radiation intensity, mW cm^{-2}
E_g	– energija zabranjene zone, mV – band gap energy, mV
I	– električna struja, A – electric current, A
k_E	– konstanta jedn. (4), V^{-1} – constant of eq. (4), V^{-1}
P	– tlak, Pa – pressure, Pa
U	– napon, V – voltage, V
V	– volumen, ml – volume, ml
Φ	– svjetlosni tok, W – luminous flux, W

Literatura

References

1. I. M. Smarte Anekwe, J. Adedeyi, S. Okiemute Akpasi, S. Lewis Kiambi, M. Ince (ur.), Available Technologies for Waste-water Treatment, IntechOpen Limited, London, 2022., str. 2–14, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.103661>.
2. F. E. Titchou, H. Zazou, H. Afanga, J. El Gaayda, R. Ait Akbour, P. V. Nidheesh, M. Hamdani, Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes, Chem. Eng. Process. – Process Intens. **169** (2021) 108631, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108631>.
3. P. S. Basavarajappa, S. B. Patil, N. Ganganagappa, K.R. Reddy, A. V. Raghu, C. V. Reddy, Recent progress in metal-doped TiO_2 , non-metal doped/codoped TiO_2 and TiO_2 nanostructured hybrids for enhanced photocatalysis, Int. J. Hydrogen Energy **45** (2020) 7764–7778, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.241>.
4. R. Ameta, M. S. Solanki, S. Benjamin, S. C. Ameta (ur.), Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment, Elsevier Inc., Amsterdam, 2018., str. 135–175, doi: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00384-4>.
5. A. O. Ibhadon, P. Fitzpatrick, Heterogeneous photocatalysis: Recent advances and applications, Catalysts **3** (1) (2013) 189–218, doi: <https://doi.org/10.3390/catal3010189>.
6. C. Byrne, G. Subramanian, S. C. Pillai, Recent advances in photocatalysis for environmental applications, J. Environ. Chem. Eng. **6** (2018) 3531–3555, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.080>.
7. B. Srikanth, R. Goutham, R. Badri Narayan, A. Ramprasath, G. P. Gopinath, A. R. Sankaranarayanan, Recent advancements in supporting materials for immobilised photocatalytic applications in waste water treatment, J. Environ. Manage. **200** (2017) 60–78, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.063>.
8. S. Singh, P. K. Mishra, S. N. Upadhyay, Recent developments in photocatalytic degradation of insecticides and pesticides, Rev. Chem. Eng. **39** (2021) 225–270, doi: <https://doi.org/10.1515/revce-2020-0074>.
9. S. Kanmani, K. P. Sundar, Progression of photocatalytic reactors and it's comparison: A Review, Chem. Eng. Res. Design **154** (2019) 135–150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.11.035>.
10. M. Batuir, F. da Costa, A. L. P. Araujo, S. P. Padrão, R. A. R. Bonaventura, M. M. Dias, J. C. B. Lopes, V. J. P. Vilar, Effect of catalyst coated surface, illumination mechanism and light source in heterogeneous TiO_2 photocatalysis using a mili-photoreactor for *n*-decane oxidation at gas phase, Chem. Eng. J. **366** (2019) 560–568, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.122>.
11. O. Tokode, R. Prabhu, L. A. Lawton, P. K. J. Robertson, UV LED Sources for Heterogeneous Photocatalysis in the Handbook of Environmental Chemistry Part III, vol 35. Springer Nature, Berlin, 2014., str. 159–179, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46795-4>.
12. A. Francis, S. S. Priya, S. H. Kumar, K. Sudhakar, M. Tahir, A review on recent developments in solar photoreactors for carbon dioxide conversion to fuels, J. CO_2 Util. **47** (2021) 101515, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101515>.
13. B. Bayarri, M. N. Abellán, J. Giménez, S. Esplugas, Study of the wavelength effect in the photolysis and heterogeneous photocatalysis, Catal. Today **129** (2007) 231–239, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.08.006>.
14. B. M. da Costa Filho, A. L. P. Araujo, S. P. Padrão, R. A. R. Boaventura, M. M. Dias, J. C. B. Lopes, V. J. P. Vilar, Effect of catalyst coated surface, illumination mechanism and light source in heterogeneous TiO_2 photocatalysis using a mili-photoreactor for *n*-decane oxidation at gas phase, J. Chem. Eng. **366** (2019) 560–568, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.122>.
15. W. Jo, R. Tayade, New Generation Energy-Efficient Light Source for Photocatalysis: LEDs for Environmental Applications, Ind. Eng. Chem. Res. **53** (2014) 2073–2084, doi: <https://doi.org/10.1021/ie404176g>.
16. URL: <https://mevihub.com/wp-content/uploads/2021/03/BUTTON.png> (pristup 20. 01. 2024.)
17. R. Lenk, C. Lenk, Practical Lighting Design With LEDs, Wiley-IEEE Press; 2nd edition, 2017., str. 35, 51–52, doi: <https://doi.org/10.1002/9781119165347>.

SUMMARY

UV-led Radiation Sources in Photocatalysis

Vanja Kosar and Nikol Jović*

Photocatalysis is one of the most promising advanced oxidation methods for the degradation of organic pollutants in aqueous solutions. Artificial and natural sources, especially solar radiation, are used as radiation sources. The radiation intensities of different UV-A LED modules of different power (20 and 30 W) were measured experimentally as a function of the source voltage at different distances from the surface of the model solution (2 and 3 cm). The results obtained show an exponential dependence of the UV radiation intensity on the voltage of the power source.

Keywords

Wastewater, advanced oxidation processes, heterogeneous photocatalysis, LED radiation sources

*University of Zagreb Faculty of Chemical
Engineering and Technology, Trg Marka
Marulića 19, 10 000 Zagreb, Croatia*

*Professional paper
Received February 7, 2025
Accepted September 18, 2025*