

Sveučilište u Zagrebu

**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Alan Rodić i Tomislav Gačić

**ISPITIVANJE UTJECAJA KAMENCA NA INTENZITET UV ZRAČENJA U  
REAKTORU ZA DEZINFEKCIJU PITKE VODE**

Zagreb, 2010.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo Katedre za ekologiju i tehnologiju voda, pri Zavodu za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pod vodstvom doc.dr.sc. Davora Ljubasa i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2009/2010.

## POPIS OZNAKA I KRATICA

$E_0, E_1$	[J]	energetski nivoi različitih orbitala nekog elementa
$h$	[J·s]	Planckova konstanta, $6.626 \times 10^{-34}$
$\nu$	[s <sup>-1</sup> ]	frekvencija titranja
$P(T)$	[W/m <sup>2</sup> ]	energija odzračena u polukuglu pri temperaturi T
$s$	[W·cm <sup>-2</sup> ]	Stefan-Boltzmannova konstanta, $5,6703 \cdot 10^{-12}$
$T$	[K]	apsolutna temperatura tvari (materije)
$D$	[J/m <sup>2</sup> ]	doza UV zračenja
$I$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzitet UV zračenja
$t$	[s]	vrijeme izloženosti UV zračenju
$P$	[-]	propusnost
$A$	[cm <sup>-1</sup> ]	koeficijent apsorpcije
$b$	[m]	duljina puta zračenja
$N_0$	[-]	broj atoma u osnovnom nepobuđenom stanju
$\bar{x}$	[-]	aritmetička sredina
$\sigma$	[-]	standardna devijacija

UV	—	Ultraljubičasto (eng. Ultraviolet)
e	—	Oznaka za subatomske čestice, elektron
AAS	—	Atomska apsorpcijska spektrofotometrija

# SADRŽAJ

1	UVOD .....	1
2	TEORIJSKE OSNOVE UV TEHNOLOGIJE .....	2
2.1	Ultraljubičasto (UV) zračenje.....	2
2.1.1	Općenito .....	2
2.1.2	Primjena UV zračenja.....	3
2.2	Tehnologija UV zračenja.....	4
2.2.1	Niskotlačne živine lampe .....	5
2.2.2	Srednjetačne živine lampe.....	7
2.2.3	Problemi UV tehnologije .....	8
2.3	Dezinfekcija UV zračenjem .....	10
2.3.1	Općenito .....	10
2.3.2	Doze UV zračenja .....	11
3	OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA .....	13
4	MJERNA OPREMA I METODE .....	14
4.1	Reaktor za dezinfekciju vode UV zračenjem.....	15
4.2	Uređaj za mjerenje intenziteta zračenja .....	18
4.3	Provjera mjerne osjetljivosti uređaja za mjerenje intenziteta zračenja .....	19
4.4	Utvrđivanje početne vrijednosti intenziteta zračenja .....	21
4.5	Praćenje intenziteta zračenja i korekcija protoka vode .....	22
4.6	Atomski apsorpcijski spektrofotometar.....	24
5	MJERENJA I REZULTATI .....	27
5.1	Rezultati utvrđivanja mjerne osjetljivosti uređaja za mjerenje intenziteta zračenja.....	27
5.2	Rezultat utvrđivanja početne vrijednosti intenziteta zračenja .....	29
5.3	Rezultati mjerenja intenziteta zračenja tijekom 48 dana, uz protok od 0,11 L/min.....	30

5.4	Rezultati mjerenja intenziteta zračenja tijekom 59 dana, uz protok od 1,3 L/min .....	31
5.5	Usporedba intenziteta zračenja nakon 48 dana prvog i drugog perioda mjerenja.....	32
5.6	Rezultati određivanja mase precipitata kamenca, sa kvarcnog uložka UV reaktora .....	33
6	RASPRAVA .....	35
6.1	Mjerna osjetljivost uređaja za mjerenje intenziteta zračenja .....	35
6.2	Početna vrijednost intenziteta zračenja.....	35
6.3	Odnos između intenziteta zračenja i mase precipitata kamenca.....	35
7	ZAKLJUČAK .....	37
8	ZAHVALA .....	38
9	LITERATURA.....	39
10	SAŽETAK .....	41
11	SUMMARY .....	42

## POPIS SLIKA

Slika 1. Uobičajeni spektar zračenja niskotlačnih živinih lampi, [1] .....	6
Slika 2. Uobičajeni spektar zračenja srednjetačnih živinih lampi, [1] .....	8
Slika 3. Spektar zračenja srednjetačne širokopolasne Hg lampe, [1] .....	8
Slika 4. Propusnost UV zračenja različitih materijala, [1].....	9
Slika 5. Prikaz spektra elektromagnetskih valova s istaknutim ultraljubičastim i vidljivim dijelom .....	10
Slika 6. Reaktor za dezinfekciju pitke vode, tvrtke Ekološki sistemi d.o.o. ....	14
Slika 7. Prikaz reaktora .....	15
Slika 8. Shematski prikaz reaktora sa izvorom zračenja u osi cilindra, [1].....	17
Slika 9. Shematski prikaz reaktora sa izvorom zračenja na stijenci cilindra, [1] .....	17
Slika 10. UV VIS Radiometer RM 21 i pripadajući osjetnik UV RMC .....	18
Slika 11. Prikaz postupka provjere mjerne osjetljivosti uređaja za mjerenje intenziteta zračenja, u koracima .....	20
Slika 12. Prikaz odabranih karakterističnih područja mjerenja na kvarcnom ulošku UV reaktora .....	20
Slika 13. Model mjerne linije kojom su vršena ispitivanja u laboratoriju .....	22
Slika 14. Atomski apsorpcijski spektrofotometar AA-6800 tvrtke SHIMADZU .....	25
Slika 16. Histogramski prikaz omjera vrijednosti intenziteta zračenja izmjerenih kroz sloj zraka sa onima izmjerenim kroz sloj vode, uz različite koncentracije precipitata kamenca.....	28
Slika 15. Histogramski prikaz usporedbe intenziteta zračenja UV lampe, za dva različita medija, uz različite koncentracije precipitata kamenca .....	28
Slika 17. Krivulja promjene intenziteta zračenja prilikom puštanja reaktora u pogon ....	29
Slika 18. Dijagramski prikaz vrijednosti intenziteta zračenja tijekom 48 dana pri protoku ~0,11 L/min.....	30
Slika 19. Dijagramski prikaz vrijednosti intenziteta zračenja tijekom 59 dana pri protoku ~1,3 L/min, s oznakom 48. dana .....	31
Slika 20. Histogramski prikaz smanjenja intenziteta zračenja tijekom 48 dana za različite periode mjerenja, odnosno za različite protoke vode .....	32
Slika 21. Histogramski prikaz količine precipitiranih karbonata i ukupne mase precipitata kamenca otopljenog sa površine kvarcnog uloška UV reaktora .....	34

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati mjerenja intenziteta zračenja UV lampe na udaljenosti 2,4 cm kroz zrak .....	27
Tablica 2. Rezultati mjerenja intenziteta zračenja UV lampe na udaljenosti 2,4 cm kroz vodu .....	27
Tablica 3. Rezultati analize precipitata kamenca sa kvarcnog uloška UV reaktora, nakon završetka prvog perioda mjerenja .....	33
Tablica 4. Rezultati analize precipitata kamenca sa kvarcnog uloška UV reaktora, nakon završetka drugog perioda mjerenja .....	33

---

## 1 UVOD

Voda je sastavni dio svega života na planeti Zemlji. Ne postoji ni jedno živo biće, biljka ili životinja u tijelu koje nema vode, što svjedoči o vodi kao uzroku, uvjetu postanka i opstanka života na Zemlji.

Najznačajniji izvor pitke vode predstavljaju podzemne vode, međutim, za vodoopskrbu je osim upotrebljive količine podzemnih voda, potrebno i da kvaliteta istih bude odgovarajuća.

Uz fizičko, kemijsko i radiološko zagađenje, često se u prisutnosti patogenih mikroorganizama, koji nisu autohtoni u vodonosniku, javlja mogućnost mikrobiološkog zagađenja. Bakterije i virusi, te ostali patogeni mikroorganizmi predstavljaju čestu pojavu u gradskim i prigradskim vodonosnicima zbog čega je vodu prije upotrebe za piće, potrebno dezinficirati. [1-4]

Dezinfekcija vode za piće provodi se s namjerom uništenja patogenih uzročnika ispod infekcijske doze. Uz biocidno djelovanje svakako treba imati na umu i reakcije dezinficijensa s ostalim tvarima prisutnim u vodi, jer mogu nastati zdravstveno upitni nusprodukti. U tom se smislu, uz dobro poznate metode dezinfekcije klorom i klornim supstancama, pozitivno ističu dezinfekcijska svojstva ultraljubičastog (u daljnjem tekstu UV) zračenja o kojima će u ovom radu biti više riječi. [1-5]

Danas je u Europi, dezinfekcija UV zračenjem prisutna u preko tri tisuće ustanova za obradu i pripremu pitke vode. Nove tehnologije primjene UV zračenja, za pripremu vode za piće, svakodnevno se razvijaju. Cilj tehnološkog napretka jest poboljšanje učinkovitosti sustava i smanjenje investicijskih i pogonskih troškova. [1,2]

Zbog nepovoljnog utjecaja na učinkovitost, a time i na pogonske troškove, tvrda voda, odnosno stvaranje kamenca u takvih voda predstavlja jedan od najznačajnijih problema u sustavima za pripremu vode. Iz istog razloga, nisu iznimka ni sustavi za dezinfekciju UV zračenjem. Naime zbog same konstrukcije reaktora i pripadnih UV svjetiljki, a o kojima će kasnije biti više riječi, naslage kamenca djeluju na smanjenje intenziteta UV zračenja, čime direktno utječu na valjanost dezinfekcije, a time i na već spomenutu učinkovitost uređaja.



---

## 2 TEORIJSKE OSNOVE UV TEHNOLOGIJE

### 2.1 Ultraljubičasto (UV) zračenje

#### 2.1.1 Općenito

Svaka tvar na temperaturi iznad apsolutne nule emitira elektromagnetske valove. Valovi nastaju kao posljedica titranja elektrona oko jezgre atoma. Promjene u titranjima elektrona manifestiraju se različitim oblicima energije. Valovi se opisuju s nekoliko veličina, od kojih su najznačajnije frekvencija, amplituda, valna duljina i brzina.

Ultraljubičasto (UV) zračenje je emisija (odašiljanje) elektromagnetskih valova sa valnom duljinom manjom od vidljivog dijela spektra i većom od X-zračenja. Ultraljubičasto zračenje se obično dijeli na UVA (400–315 nm) ili dugovalno, UVB (315–280 nm) ili srednjevalno, UVC (280–200 nm) ili kratkovalno (biocidno) i VUV (200–100 nm) ili vakuumsko. [1-4]

Smatra se da je zračenje posljedica aktiviranja elektrona između dvije orbitale nekog elementa; povratak elektrona s višeg na niži, početni energetski nivo praćen je emisijom svjetlosti, odnosno zračenjem. Kvantitativni oblik može se izraziti Planckovom jednadžbom prikazanom jednadžbom (1) [1]:

$$E_1 - E_0 = h \cdot \nu \quad (1)$$

gdje je,

$E_1$  i  $E_0$  – energetski nivoi različitih orbitala nekog elementa, [J]

$h$  – Planckova konstanta,  $6.626 \times 10^{-34}$ , [J·s]

$\nu$  – frekvencija titranja, [ $s^{-1}$ ]

Toplinska aktivacija tvari (materije), pruža sredstvo za proizvodnju svjetlosti (zračenja). Naime, prema modelu crnog tijela, energija zračenja ovisi o temperaturi tvari i kvantificira se pomoću Stefan-Boltzmannovog zakona, prikazanog izrazom (2) [1]:

$$P(T) = s \cdot T^4 \quad (2)$$

gdje je,

$P(T)$  – energija odzračena u polukuglu ( $2\pi$ -prostorni kut) pri temperaturi  $T$ , [ $W/m^2$ ]

$s$  – Stefan-Boltzmannova konstanta, [ $5,6703 \cdot 10^{-12} W cm^{-2}$ ]

$T$  – apsolutna temperatura tvari (materije), [K]

---

Intenzitet zračenja ovisi i o valnoj duljini elektromagnetskih valova koju želimo proizvesti. Zračenje manjih valnih duljina emitira više energije nego ono, većih valnih duljina.

### **2.1.2 Primjena UV zračenja**

Primjene UV zračenja orijentirane su na različite valne duljine, budući da se uz različite valne duljine javljaju različita svojstva zračenja. Slijedi kratki pregled najčešćih primjena UV zračenja s obzirom na valnu duljinu [1-3]:

- 230-400 nm - Optički osjetnici, razni mjerni instrumenti
- 230-365 nm - UV-ID, praćenje oznaka, barkodovi
- 240-280 nm - Dezinfekcija, dekontaminacija površina
- 250-300 nm - Forenzička analiza
- 270-300 nm - Analiza proteina, sekvenciranje DNA
- 300-365 nm - Otvrđivanje polimera
- 350-370 nm - Uništavanje insekata

Obzirom na temu ovog rada, promatrat će se područje valnih duljina u kojem zračenje pokazuje biocidni karakter.

Već je u 19. stoljeću, ustanovljeno da sunčeva svjetlost djeluje antibakterijski, no tek su kasnija istraživanja pokazala da antibakterijski učinak sunčeve svjetlosti ne dolazi od vidljive, već od nevidljive svjetlosti, odnosno zračenja valnih duljina od 300 – 400 nm. Daljnjim razvojem tehnologije, utvrđeno je da se najbolji biocidni rezultati postižu upravo UVC (kratkovalnim) zračenjem pri valnoj duljini od 254 nm. [1,2,6]

Najveći dio UVB i UVC zračenja, dozračenog od Sunca, upija ozon onemogućavajući tako dopiranje do površine Zemlje. Stoga, praktična upotreba UVC zračenja u svrhu dezinfekcije ovisi o umjetnim izvorima ultraljubičastog zračenja, a čiji najčešći izvor su UV lampe sa živinim lukom. [1,2]

---

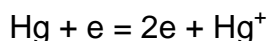
## 2.2 Tehnologija UV zračenja

Aktivacija (odnosno ionizacija) atoma žive elektronima, odnosno električnim izbojima, danas je daleko najviše korištena tehnologija u proizvodnji UV zračenja primjenjivog za dezinfekciju vode. Tehnologija UV zračenja, može se prema vrsti najčešće korištenih živinih lampi podijeliti na četiri osnovne skupine [1,2]:

- niskotlačne
- srednjetlačne
- visokotlačne
- specijalne

Od navedenih osnovnih skupina najčešće korištenih lampi, od primarnog su interesa, vezano na temu ovog rada, upravo niskotlačne i srednjetlačne živine lampe, koje će shodno tome, dalje biti detaljnije obrađene.

Najjednostavnije objašnjenje nastajanja, odnosno proizvodnje zračenja, općenito se može dati promatranjem ionizacije atomarne žive, a koja je rezultat prijenosa kinetičke energije od elektrona na atome žive, prilikom neelastičnog sudara: [1]



U teoriji je odnos količine ioniziranih atoma žive proporcionalan gustoći elektrona u struji izboja. Također, može doći i do elektron-ion rekombinacije (suprotan proces, ali jednakobrojan procesu ionizacije) što dovodi do rekonstrukcije atomarne žive.

Često se uz inertni plin dodaje i određena, mala količina drugog plina što daje smjesu čija energija ionizacije je niža od energije ionizacije konstituenta. Takva smjesa naziva se Penning smjesa. Cijeli proces ionizacije sastoji se od niza koraka, pri čemu je potrebna prisutnost Penning smjese, posebice prilikom pokretanja lampe: [1]

Reakcija, rezultat koje je emisija svjetlosti, odnosno zračenje, odgovara sljedećem odnosu: [1]



Proizvedeno zračenje sastoji se od kontinuirane, nejednolike distribucije jednobojnih komponenti (jedna valna duljina), različitih valnih duljina i smjera, ovisno o odabranoj tehnologiji UV lampe. [1,2,6,7]

Uz samu lampu neophodna oprema su tzv. predspojni uređaji. Oni prvenstveno služe za ograničavanje struje i osiguravanja dovoljnog napona za početak izboja u plinu. U

---

tom smislu razlikujemo starter i prigušnicu. Funkcija startera je da osigura dovoljno zagrijavanje elektroda radi emisije elektrona i dovoljno jako električno polje između elektroda, da ionizira plinsko punjenje radi početnog izboja. Prigušnica služi za ograničavanje struje, a može biti magnetska ili elektronička. [1,2]

## **2.2.1 Niskotlačne živine lampe**

### 2.2.1.1 Općenito

Jedan od glavnih razloga česte primjene žive u tehnologiji UV lampi, jest živina karakteristika najlakše hlapljivog metalnog elementa čija se aktivacija (ionizacija), u plinovitoj fazi, odvija pri temperaturama prihvatljivim za konstrukciju lampe. U tijelu lampe, nalazi se živa čiji parcijalni tlak iznosi otprilike 1 Pa ( $10^{-5}$  bar) što odgovara tlaku isparavanja pri optimalnoj temperaturi stjenke lampe od oko 40 °C [1,2]. Takve temperature ne zahtijevaju upotrebu specijalnih termostabilnih materijala kao što je slučaj kod mnogih drugih tehnologija.

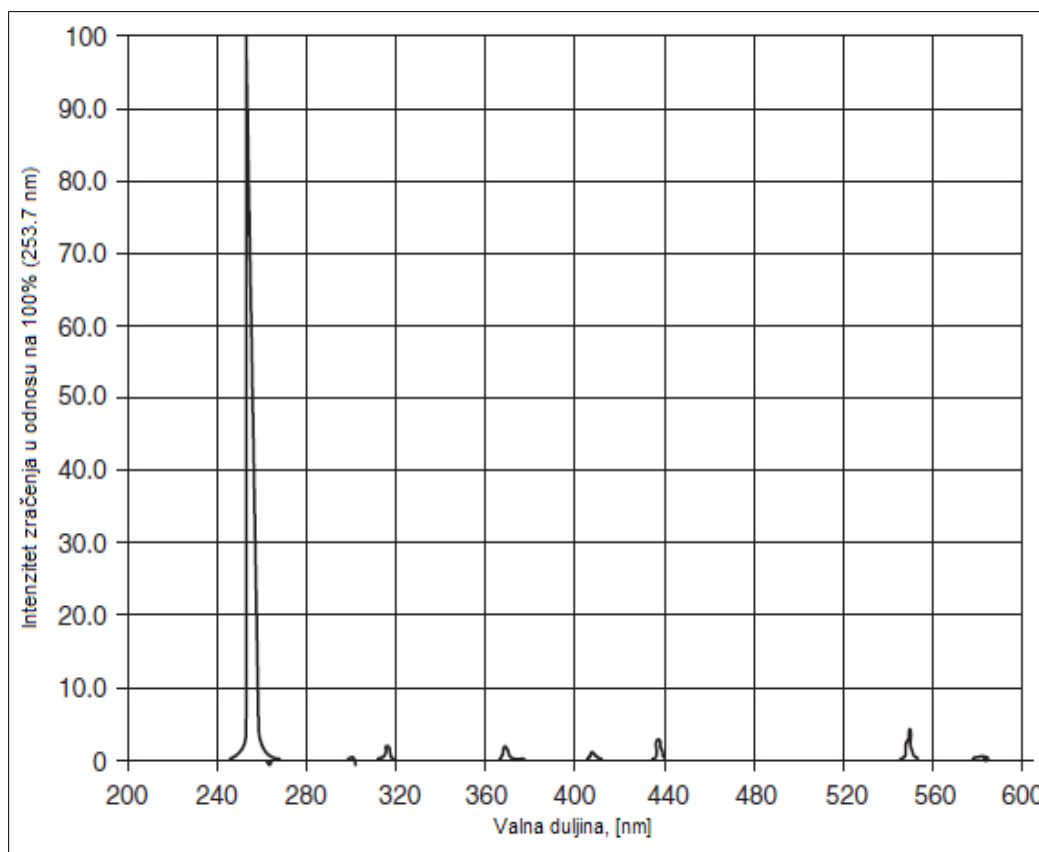
Princip stvaranja UV zračenja temelji se na procesu aktivacije elektrona žive pomoću električnog luka (izboja). Živine žarulje spadaju u skupinu žarulja na izboj; svjetlost generiraju električnim izbojem u živinim parama, između elektroda. [1-4,6]

### 2.2.1.2 Utjecajni faktori

- Temperatura - temperatura izvan tijela lampe, ima direktan utjecaj na emisiju UV zračenja. Naime sama temperatura ima ograničen utjecaj, ali direktno utječe na ravnotežni tlak pare žive na unutarnjoj stjenici tijela lampe. Ukoliko je temperatura preniska, para žive se hladi i djelomično kondenzira, čime se smanjuje intenzitet zračenja. Ako je previsoka, tlak pare žive raste, ali se zbog porasta tzv. efekta samo-absorpcije sukladno smanjuje, što opet uzrokuje smanjenje intenziteta zračenja. [1,2]
- Vijek trajanja - Tijekom početnih 100 do 200 sati rada, pojavljuje se inicijalni pad intenziteta zračenja. Nakon tog perioda, sljedećih nekoliko mjeseci, intenzitet se ustaljuje. Uzroci starenja su solarizacija unutarnje stjenke tijela lampe i zatamnjenje iste zbog naslaga produkata oksidacije elektroda. U normalnim uvjetima korištenja, vijek trajanja lampe iznosi najmanje godinu dana. [1,2]

### 2.2.1.3 Spektar zračenja niskotlačne živine lampe

Uobičajeni spektar zračenja niskotlačnih živinih žarulja, prikazan je na slici 1 [1]. Spektar je, nazovimo, linijskog, odnosno zrakastog tipa; zračenje je koncentrirano oko nekoliko definiranih vrijednosti valnih duljina, a zračenje se naziva monokromatskim. Najvažnije zračenje je ono pri valnim duljinama od 253.7 nm. Valne duljine od oko 300 nm i više, mogu se zanemariti, obzirom da pripadno zračenje ne pokazuje dezinfekcijski karakter pa nema primjenu u dezinfekciji vode [1-4]. Zračenje valne duljine 253.7 nm, predstavlja 90% od ukupnog intenziteta UV zračenja i direktno utječe na dezinfekciju.



Slika 1. Uobičajeni spektar zračenja niskotlačnih živinih lampi, [1]

---

## 2.2.2 Srednjetlačne živine lampe

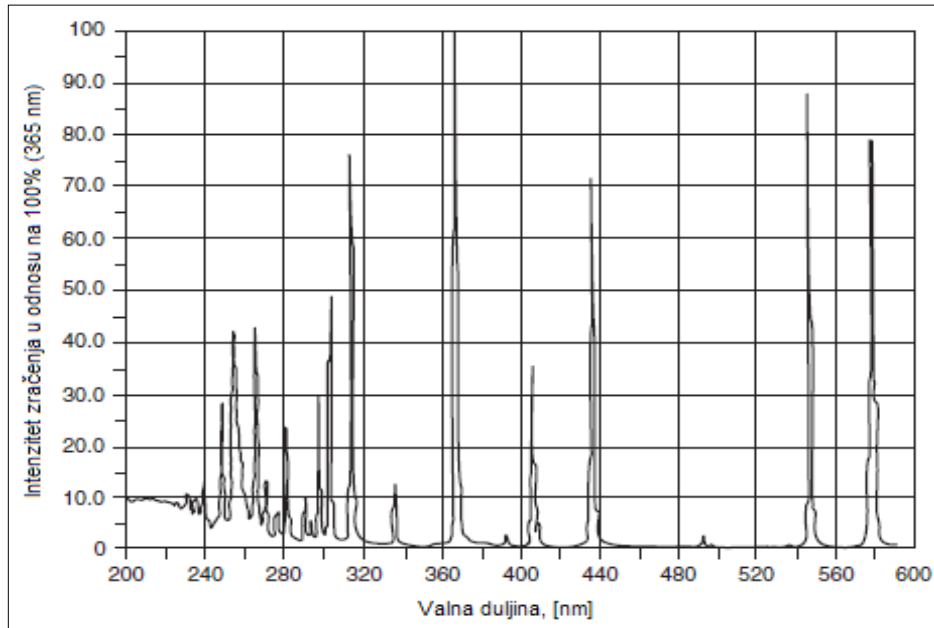
### 2.2.2.1 Općenito

Srednjetlačne živine lampe za proizvodnju UV zračenja, karakterizira apsolutni tlak plina, u tijelu lampe tijekom rada, koji se javlja u rasponu od  $10^4$  do  $10^6$  Pa (0,1 do 10 bar) [1,2]. Pri normalnim radnim uvjetima u ravnotežnom toplinskom stanju, u srednjetlačnoj živinoj lampi, sva je živa gotovo konstantno u parovitom obliku. Srednjetlačne živine lampe temelje se na zračenju plazme pri temperaturama u tijelu lampe od 5000 K do 7000 K. Najniža temperatura koju je moguće postići na tijelu lampe, današnjom tehnologijom, iznosi oko 400 °C. Ipak u normalnim radnim uvjetima, temperatura tijela lampe iznosi otprilike od 600 °C do 800 °C [1,2]. Zbog izrazito visokih temperatura u lampi, kvarcni uložak, po mogućnosti ventiliran, nužan je kao bi spriječio izravni kontakt između vode i površine lampe. Osim toga, u središnjoj osi lampe temperatura iznosi oko 6000 K, dok na površini stijenke iznosi oko 1000 K, zbog čega unutar lampe, postoji radijalna temperaturna distribucija. [1-3,6]

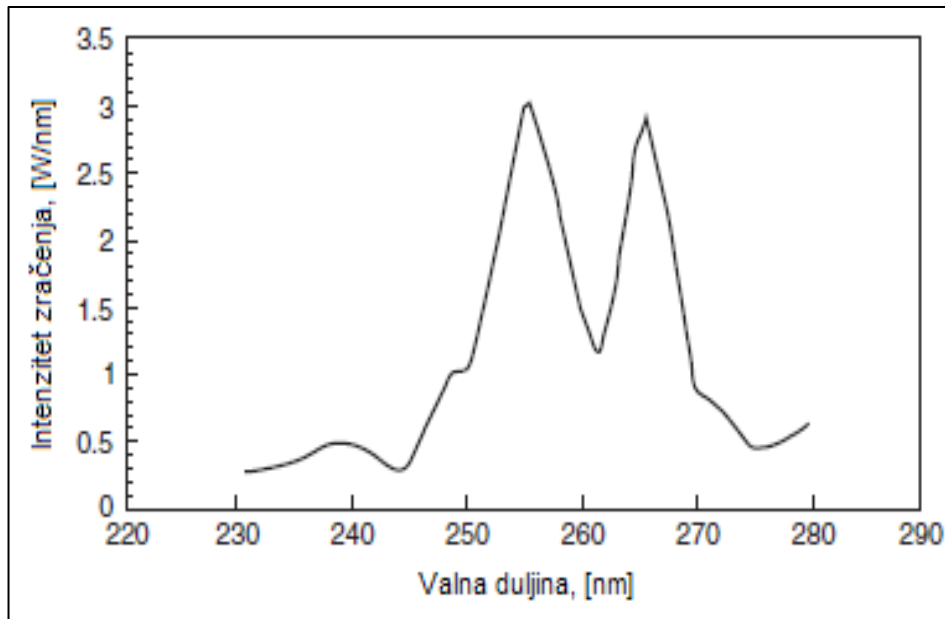
### 2.2.2.2 Spektar zračenja srednjetlačne živine lampe

Zračenje srednjetlačne živine lampe sastoji se od zračenja niza valnih duljina ultraljubičastog, vidljivog i infracrvenog dijela spektra. Ovisno o sastavu mješavine, prisutnosti elemenata u tragovima i svojstvima električnog izvora, zračenje u UV dijelu spektra, srednjetlačnih živinih lampi može se modificirati u, na primjer, širokopojasno ili viševalno zračenje.

Dijagram na slici 2 zorno prikazuje kako je zračenje srednjetlačnih živinih lampi polikromatsko, odnosno sastoji se od niza valnih duljina od kojih je samo dio od interesa za dezinfekcijsku upotrebu. Ipak promjenom sastava mješavine i svojstava električnog izvora promatrano se zračenje može modificirati u oblik povoljniji za dezinfekcijsku primjenu. Modifikaciju u tzv. širokopojasno zračenje razvio je Berson [1], čime je široki spektar sveo na UVC područje i time postigao optimizaciju dezinfekcijskog djelovanja. Primjer širokopojasnog zračenja prikazan je na slici 3. [1,2,6]



Slika 2. Uobičajeni spektar zračenja srednjetačnih živinih lampi, [1]



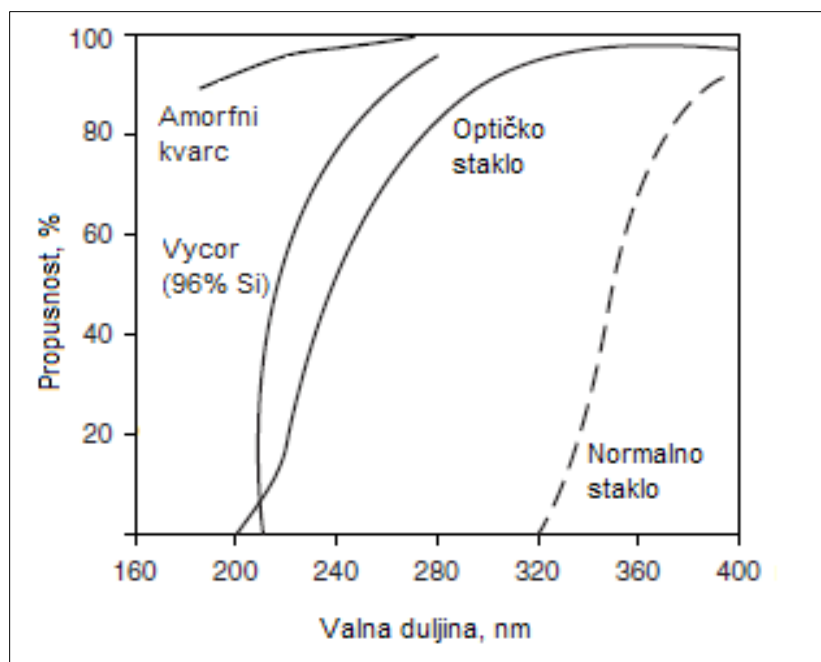
Slika 3. Spektar zračenja srednjetačne širokopojasne Hg lampe, [1]

## 2.2.3 Problemi UV tehnologije

### 2.2.3.1 Materijali UV lampi

Stijenke UV lampi najčešće su izrađene od kvarcnog stakla ( $\text{SiO}_2$ ), obzirom da je kvarcno staklo propusno za UVC i UVB zračenje te otporno na brze promjene temperature [1-4]. Ipak, kvarc je podložan gubitku propusnosti uslijed dugotrajne

izloženosti UV zračenju, što je uzrok pojave starenja stijenki lampe. Stoga se u posljednje vrijeme istražuju drugi potencijalno pogodni materijali od kojih treba spomenuti politetrafluoroetilen (Teflon™) [1]. Naime, Teflon™ je također propustan za UV zračenje, ali za valne duljine UVA dijela spektra, što isključuje primjenu istog za dezinfekciju. Na slici 4, prikazana je propusnost raznih materijala u ovisnosti o valnoj duljini UV zračenja. [1,6]



Slika 4. Propusnost UV zračenja različitih materijala, [1]

#### 2.2.3.2 Precipitacija (taloženje) kamenca

Kamenac, odnosno kalcijevi i magnezijevi silikati su u vodi slabo topive soli, a njihova se topivost smanjuje povišenjem temperature. Kada se u otopini neke soli postigne granica topivosti, dolazi do precipitacije kristala kao krute faze [8,9]. Netopiva sol taloži se, stvarajući krutu naslagu soli na stijenkama kvarcnog uloška UV lampe. [1,2]

Precipitacija kamenca na stijenkama lampe smanjuje propusnost za UV zraka, čime se umanjuje dezinfekcijsko djelovanje. Proizvođači lampi preporučaju redovito praćenje intenziteta zračenja i čišćenje kamenca. Očito je da kamenac utječe i na učinkovitost uređaja, što u slučaju velikih postrojenja znači značajne troškove za pogon i održavanje. Odnos između protoka vode, precipitacije kamenca i intenziteta zračenja nije jasno definiran i postoji opravdana potreba njegovog utvrđivanja što je i glavni cilj ovog rada.

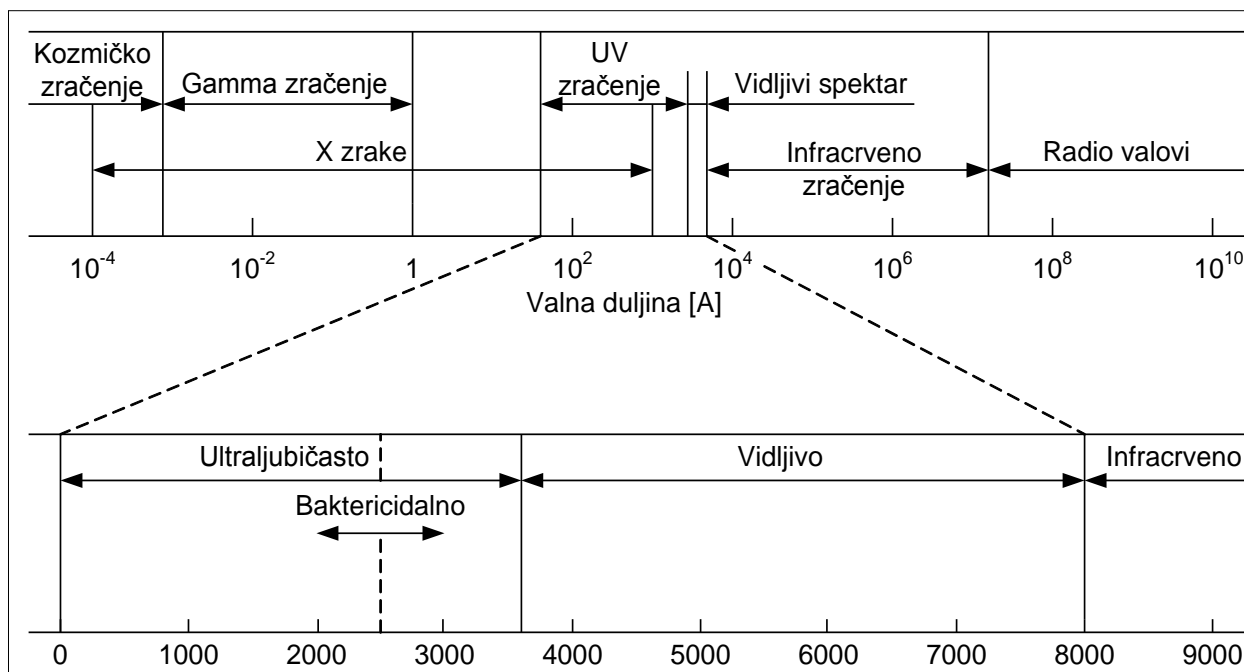


## 2.3 Dezinfekcija UV zračenjem

### 2.3.1 Općenito

Voda, zrak i prehrambeni proizvodi mogu se dezinficirati ultraljubičastim zračenjem. Takva vrsta zračenja uništava bakterije, bakterijske spore, plijesan, viruse i ostale mikroorganizme. Zračenje pri valnoj duljini od otprilike 254 nm probija stjenku stanice i apsorbira se u stanici, odnosno molekulama DNA i RNA te razorno djeluje na strukturu molekule, sprječavajući daljnju replikaciju stanice. [1,2]

Slika 5 prikazuje elektromagnetski spektar sa istaknutim područjem ultraljubičastog zračenja u rasponu od 30 Å do 3650 Å (3nm-365nm). Biocidni efekt se postiže korištenjem zračenja valnih duljina u rasponu od 2000 Å do 2950 Å (200nm-295nm) pri čemu se optimalni učinak postiže u rasponu od 2500 Å do 2700 Å (250nm-270nm). Ostale valne duljine spadaju u UVA područje koje se proteže od 320nm do 365nm. [1-4]



Slika 5. Prikaz spektra elektromagnetskih valova s istaknutim ultraljubičastim i vidljivim dijelom

---

### 2.3.2 Doze UV zračenja

U teoriji je doza UV zračenja definirana umnoškom intenziteta UV zračenja ( $I$ ) i vremena ( $t$ ) tijekom kojeg je mikroorganizam izložen UV zračenju [2,8,9]:

$$D = I \cdot t \quad (3)$$

gdje je,

$D$  – doza UV zračenja, [ $J/m^2$  ili  $mJ/cm^2$ ]

$I$  – intenzitet UV zračenja, [ $W/m^2$  ili  $mW/cm^2$ ]

$t$  – vrijeme izloženosti UV zračenju, [s]

Upotreba gore navedenog izraza uključuje pretpostavku da je intenzitet UV zračenja jednoliko raspoređen po volumenu reaktora te da je profil brzine u cijelom reaktoru jednoličan. Međutim, u realnoj situaciji te pretpostavke ne vrijede, s obzirom da ni intenzitet zračenja, ni profil brzine nisu jednolični. Stoga, može se govoriti o distribuciji „isporučenih“ doza UV zračenja, unutar reaktora, kao posljedici distribucije intenziteta zračenja i distribucije vremenske izloženosti, odnosno duljine boravka mikroorganizma. Kao rezultat distribucije doza UV zračenja, doza kojoj je izložen mikroorganizam, tijekom prolaska kroz reaktor, funkcija je trajektorije njegova puta. Naime, trajektorijom puta definirani su intenzitet UV zračenja koji djeluje na mikroorganizam i vrijeme izloženosti istom. [2,8-10]

Distribucija intenziteta zračenja, unutar reaktora, funkcija je izravnih i neizravnih utjecaja vode. Pod izravnim utjecajem podrazumijevaju se karakteristike kvalitete vode koje fizički smanjuju mogućnost prodiranja UV zračenja, od izvora (UV lampe) do mikroorganizma. Indirektni utjecaj vode odnosi se primarno na skupljanje ili precipitaciju nečistoća. Precipitacija kamenca na kvarcnom ulošku reaktora smanjuje propusnost uloška, a time i emisiju UV zračenja od UV lampe na vodu.

Distribucija duljine boravka, unutar reaktora, rezultat je distribucije profila brzina unutar reaktora, za razliku od jedinstvenog, jednoličnog profila brzina čija pojava je vezana samo uz teoretske, idealne uvjete strujanja. Na profil brzine strujanja u reaktoru, ne utječe samo protok, već i cjelokupna geometrija unutrašnjosti reaktora.

Zajednički utjecaj distribucije intenziteta zračenja i distribucije duljine boravka unutar reaktora, razlog je zbog kojeg nije moguće direktno koristiti gore prikazani izraz za precizni izračun doze UV zračenja. [1,2,10]

---

Iako se zajednički utjecaj distribucije intenziteta zračenja i duljine boravka može opisivati kompleksnim matematičkim modelima, trenutno je, za ocjenu dezinfekcijskog djelovanja UV sustava, ipak najpouzdanije ispitivanje metodom biodozimetrije. Spomenuta metoda može se opisati kao postupak mjerenja i procjene doze zračenja u organizama koji su to isto zračenje netom apsorbirali. Dakle riječ je o uzorkovanju vode nakon prolaska kroz reaktor i vršenju ispitivanja na istoj.

Ispitivanja apsorbiranih doza u sustavima za dezinfekciju vode UV zračenjem, provode se prvenstveno s ciljem utvrđivanja razine dezinfekcijskog djelovanja. S obzirom da se razina dezinfekcijskog djelovanja opisuje upravo dozom UV zračenja, postoje norme i propisi za minimalne vrijednosti doza UV zračenja, koje je potrebno „isporučiti“ za ostvarivanje dezinfekcijskog efekta.

Minimalno potrebna doza UV zračenja za dezinfekciju vode, ovisi dakako o vrsti i količini mikroorganizama koji se očekuju u tretiranoj vodi, no postoje i opći naputci koji vrijede za većinu gradskih vodovodnih voda, odnosno za najčešće pojavne oblike mikroorganizama. U Austriji je primjerice, zakonom propisana minimalna doza UV zračenja i iznosi  $450 \text{ J/m}^2$  [1]. U ostalim zemljama EU postoje različite preporuke no vrijednosti se kreću u bliskom rasponu vrijednosti od 160 do  $400 \text{ J/m}^2$ . [1,2,9-12]

---

### 3 OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

Tehnologija dezinfekcije pitke vode pomoću UV zračenja ima svoje prednosti, ali i nedostatke. Osnovna prednost svakako je izostanak unošenja dodatnih kemikalija u pitku vodu i shodno tome, izostanak štetnih dezinfekcijskih nusprodukata. Što se pak nedostataka tiče, valja napomenuti da su sustavi za dezinfekciju UV zračenjem podložni promjenama intenziteta zračenja unutar reaktora, a time i na oscilacije u dezinfekcijskom učinku što može dovesti do preživljavanja patogenih organizama. Naime, intenzitet zračenja ovisi dakako o karakteristikama UV lampe, ali i o propusnosti kvarcnog uložka UV reaktora. Stoga su i opći i specifični ciljevi ovog rada usmjereni na pokušaj istraživanja i rješavanja ili ublažavanja nedostataka UV tehnologije u slučaju primjene za dezinfekciju vode.

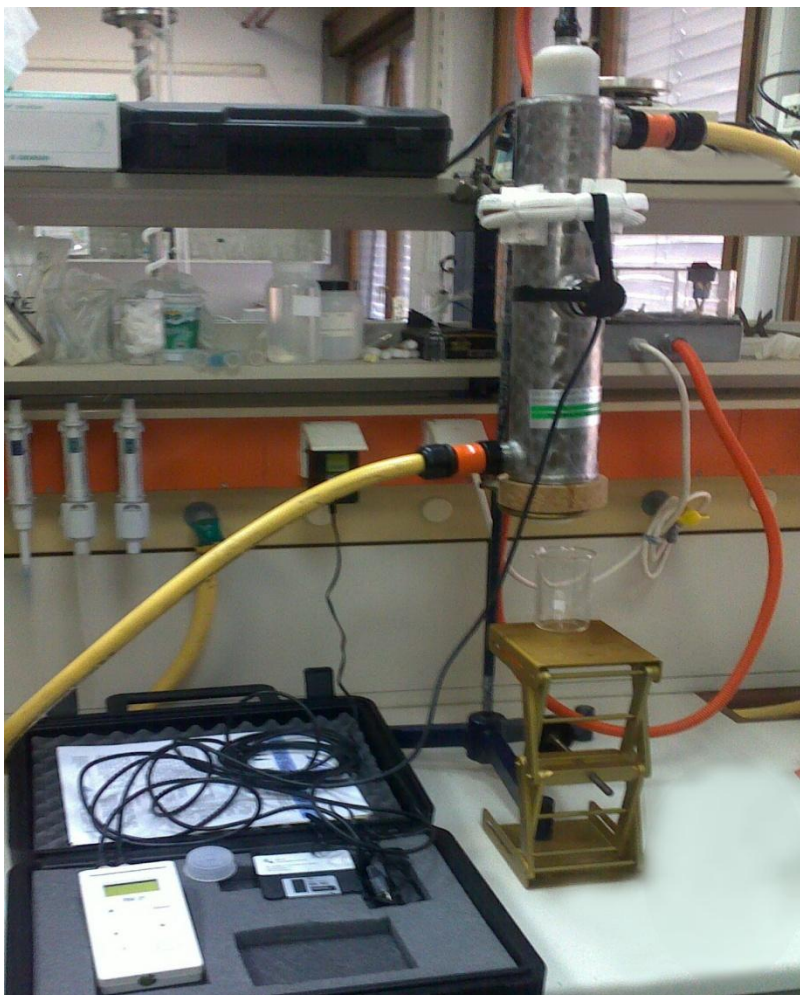
Kao opći ciljevi ovog rada, mogu se, izdvojiti povećanje sigurnosti rada UV reaktora za dezinfekciju vode i definiranje parametara potrebnih za predviđanje vremena rada UV reaktora, između dva čišćenja naslaga kamenca i drugih taloga iz vode, nastalih na stjenkama kvarcnog uložka UV reaktora.

Specifični ciljevi rada usmjereni su na utvrđivanje hidrauličkih parametara UV reaktora (protok, brzine strujanja) za specifičnu, zagrebačku pitku vodu, pri kojima dolazi do intenzivnije precipitacije kamenca na stjenkama UV reaktora specifične izvedbe. Shodno tome, cilj je i olakšati odluku budućim projektantima sustava opskrbe pitkom vodom, u vezi s odabirom primjerenih veličina UV reaktora.

## 4 MJERNA OPREMA I METODE

Mjerna oprema, korištena prilikom ispitivanja, sastoji se od sljedećih uređaja:

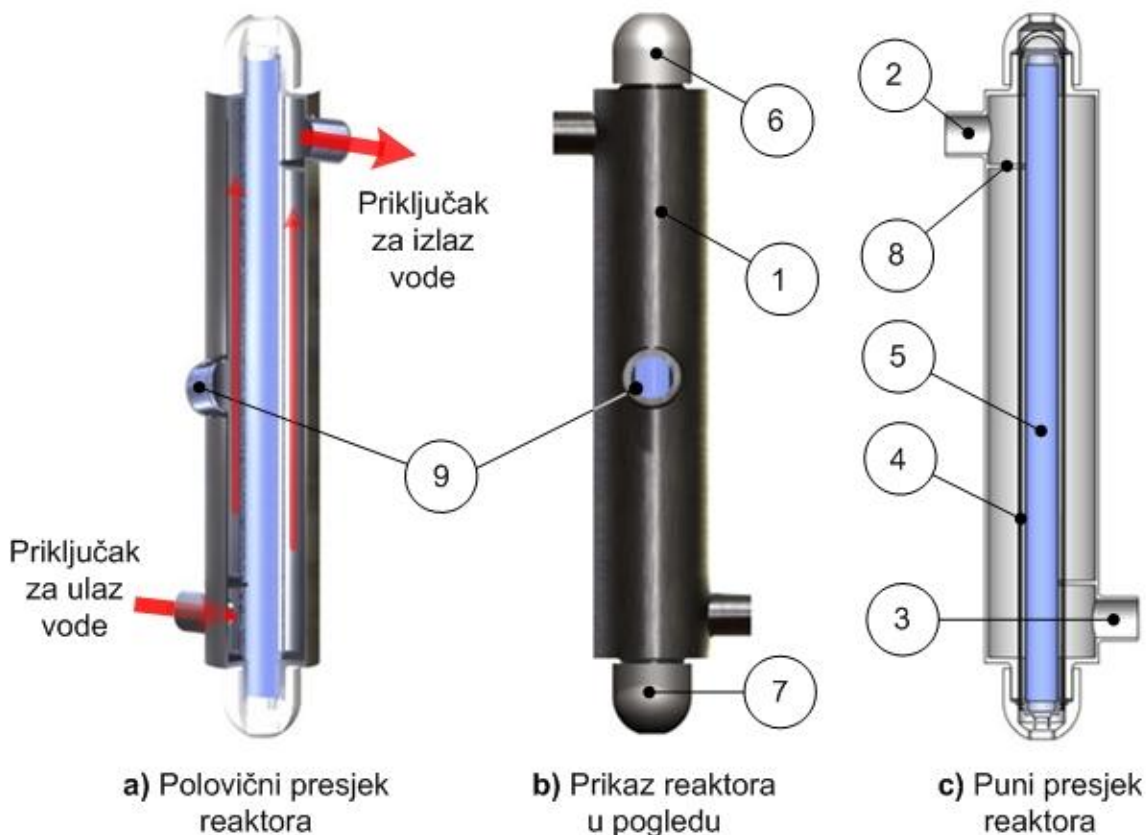
- reaktor za dezinfekciju vode UV zračenjem tvrtke Ekološki sistemi d.o.o. s ugrađenom niskotlačnom živinom UV lampom (TÜV 15W/G15 T8) tvrtke Philips
- uređaj za mjerenje intenziteta zračenja (UV-VIS Radiometer RM21) tvrtke Dr.Gröbel UV-Elektronik GmbH
- atomski apsorpcijski spektrofotometar (AA-6800) tvrtke SHIMADZU
- Menzura od 1000 mL (odmjerne posuđe „A“ klase)
- kronometar
- termostatirajuća kupka tvrtke Petrotest



Slika 6. Reaktor za dezinfekciju pitke vode, tvrtke Ekološki sistemi d.o.o., spojen na gradski vodovod s instaliranim osjetnikom uređaja za mjerenje intenziteta zračenja UV VIS Radiometer RM 21 tvrtke Dr.Gröbel UV – Elektronik GmbH

## 4.1 Reaktor za dezinfekciju vode UV zračenjem

UV reaktor kojim je provedeno ispitivanje, ustupljen je na korištenje od strane proizvođača, tvrtke Ekološki sistemi d.o.o. Kao što je prikazano na slici 7, uređaj se sastoji se od cilindričnog metalnog kućišta (1) s priključcima za ulaz (2) i izlaz (3) vode unutar kojeg je smješten uložak od kvarcnog stakla (4). U ulošku se nalazi izvor UV zračenja (5), odnosno UV lampa tvrtke Philips sa pripadajućim predspojnim uređajima. Na krajevima reaktora nalaze se čeonu brtveći poklopci (6) i (7) koji sprječavaju kontakt između lampe (s pripadajućim električnim napajanjem) i kruga vode u reaktoru. U kućištu reaktora, između kvarcnog uložka i stijenke kućišta, ugrađeni su deflektori (8) koji osiguravaju prolaz vode po cijelom volumenu reaktora, a na oplati kućišta nalazi se kontrolno okno (9) izrađeno od kvarcnog stakla kako bi se omogućilo mjerenje intenziteta zračenja. Reaktor je crijevima spojen na gradsku vodovodnu mrežu i na sustav odvodnje.



Slika 7. Prikaz reaktora;  
a) u polovičnom presjeku; b) u pogledu; c) u punom presjeku

---

Obzirom na prirodu elektromagnetskog zračenja koja podrazumijeva apsorpciju, refleksiju i propuštanje dozračene energije, geometrija sustava itekako utječe na prilike u samom sustavu. Prilikom projektiranja reaktora, potrebno je obratiti pažnju na samu konstrukciju, kako bi se osigurala što bolja apsorpcija u vodi koju želimo ozračiti. Za postizanje što bolje apsorpcije, energije dozračene vodi, potrebno je spriječiti propuštanje i refleksiju iste. Svaki dio volumena reaktora, koji prilikom prolaska ispunjava voda, mora biti dovoljno ozračen, odnosno ne smije biti dijelova u sjeni.

U industrijskim sustavima gdje se radi o većim protocima, a shodno i većim dimenzijama reaktora, ugrađen je sustav od više lampi, raspodijeljenih u određenom geometrijskom uzorku i to na način da zajedno ozračuju čitav volumen reaktora. Za manje se sustave (kućanstva, javne ustanove) koriste uglavnom jednostavnije cilindrične konstrukcije s jednom lampom. Takvi su sustavi relativno dobro istraženi i dostupni na tržištu. [1,2]

#### *Beer-Lambertov zakon*

Zračenje UV lampe na sloj vode u reaktoru, razmatra se kao točkasti izvor zračenja, apsorbiranog u vodi prema Beer-Lambertovom zakonu. Navedeni zakon opisuje logaritamsku ovisnost između propusnosti zračenja  $P$  kroz neku tvar i produkta koeficijenta apsorpcije  $a$  i debljine sloja  $d$ , kroz koji zračenje prođe. Analitički prikaz za kanalni tip reaktora, dan je u izrazu (4) [1,2,10]:

$$P = \frac{I}{I_0} = 10^{-A \cdot b} \quad (4)$$

gdje je,

$P$  – propusnost

$I_0$  – intenzitet zračenja izvora, [W/m<sup>2</sup>]

$I$  – intenzitet zračenja nakon prolaska kroz sloj debljine  $d$ , [W/m<sup>2</sup>]

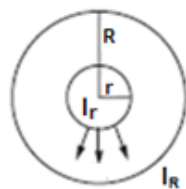
$A$  – koeficijent apsorpcije

$b$  – duljina puta zračenja, [m]

Ipak, za različite geometrije reaktora, postoje razlike u analitičkom izrazu za propusnost. Izrazi za najčešće tipove geometrije UV reaktora, odnosno cilindrične UV reaktore dani su izrazima (5) i (6). [1,11]

---

*Cilindrični reaktori (zračenje iznutra prema van):*



**Slika 8. Shematski prikaz reaktora sa izvorom zračenja u osi cilindra, [1]**

$$P = \frac{I_R}{I_r} = 10^{-A \cdot (R-r)} \quad (5)$$

gdje je,

$I_R$  – intenzitet zračenja izvora na udaljenosti  $r$  od osi cilindra,  $[W/m^2]$

$I_r$  – intenzitet zračenja nakon prolaska kroz medij na udaljenosti  $r_1$  od osi cilindra,  $[W/m^2]$

*Cilindrični reaktori (zračenje izvana prema unutra):*



**Slika 9. Shematski prikaz reaktora sa izvorom zračenja na stijenci cilindra, [1]**

$$P = \frac{I_r}{I_R} = \frac{R}{r} \cdot 10^{-A \cdot (R-r)} \quad (6)$$

gdje je,

$I_R$  – Intenzitet zračenja izvora na udaljenosti  $R$  od osi cilindra,  $[W/m^2]$

$I_r$  – Intenzitet zračenja nakon prolaska kroz medij na udaljenosti  $r$  od osi cilindra,  $[W/m^2]$

Na slici 8, dan je grafički prikaz Beer-Lambertovog zakona, prema kojem se intenzitet zračenja smanjuje eksponencijalno, od izvora prema stijenci reaktora. [1,13]

Prema opisanom zakonu, intenzitet koji je izmjeren u provedenom ispitivanju predstavlja umanjenu vrijednost obzirom da se između osjetnika i izvora zračenja nalazio stupac vode. Kvantifikacija intenziteta zračenja u izvoru (UV lampi) nije potrebna



---

obzirom da može biti isključivo veća od izmjerene vrijednosti na osjetniku. S takvom je pretpostavkom provedeno mjerenje pri čemu je zadovoljen efekt dezinfekcije i na samom osjetniku.

## 4.2 Uređaj za mjerenje intenziteta zračenja

UV-VIS radiometer RM 21 i pripadajući osjetnik RM UVC tvrtke Dr.Gröbel UV-Elektronik GmbH, prikazani na slici 10, predstavljaju precizni dvokanalni prijenosni uređaj za mjerenje intenziteta i doza zračenja. Intenziteti različitih dijelova elektromagnetnog spektra mogu se mjeriti različitim osjetnicima, a za potrebe ispitivanja odabran je osjetnik za mjerenje u UVC dijelu spektra sa slijedećim karakteristikama:

- Rezolucija:  $0.01 \text{ mW/cm}^2$  ( $0.1 \text{ W/m}^2$ )
- Max mjereni intenzitet zračenja :  $< 200 \text{ mW/cm}^2$  ( $20 \text{ W/m}^2$ )
- Spektralna osjetljivost: UVC 200-280 nm

Osjetljivost osjetnika u području UVC dijela spektra, od osobite je važnosti obzirom da se preko 90% zračenja, proizvedenog niskotlačnom živinom lampom, emitira upravo u tom dijelu spektra. [1,2,13]



Slika 10. UV VIS Radiometer RM 21 i pripadajući osjetnik UV RMC tvrtke Dr. Gröbel UV-Elektronik GmbH

---

### 4.3 Provjera mjerne osjetljivosti uređaja za mjerenje intenziteta zračenja

Postupak je proveden s ciljem utvrđivanja mjerne osjetljivosti uređaja za mjerenje intenziteta zračenja (UV-VIS Radiometar RM 21). Navedeni uređaj služi za mjerenje intenziteta zračenja različitih izvora i u raznim uvjetima rada. Obzirom da smo navedeni instrument odlučili koristiti za praćenje pojave koja nije uobičajena u svakodnevnoj laboratorijskoj primjeni, bilo je potrebno kvalitativno ispitati odnos između mjerene fizikalne veličine (intenzitet UVC zračenja) i one veličine koja uzrokuje primjetnu promjenu iste (količina precipitata kamenca).

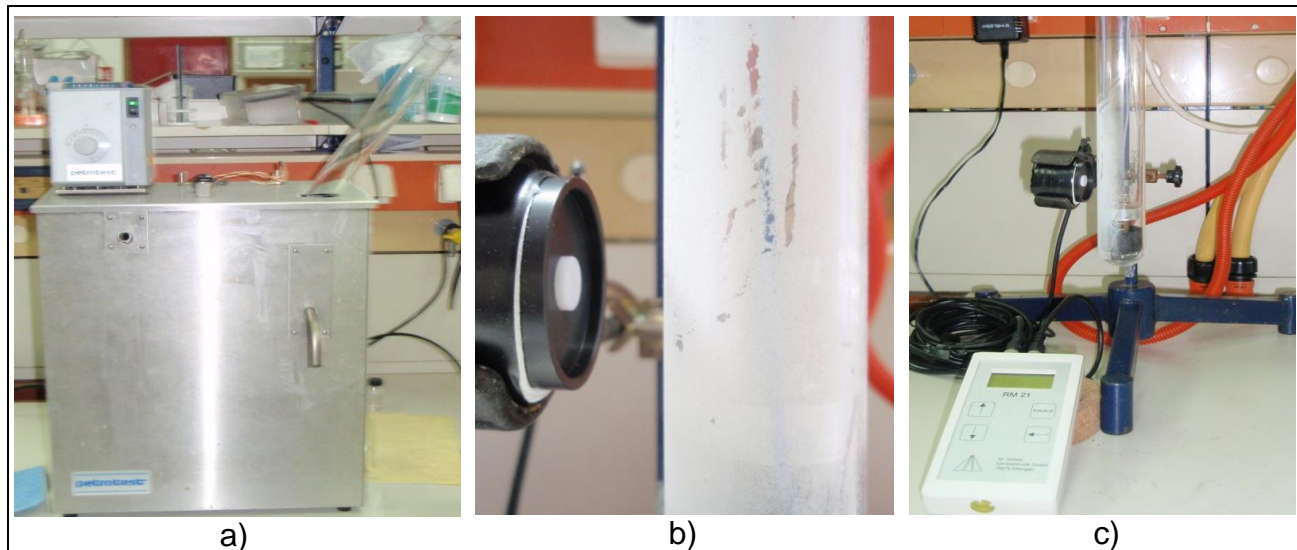
U konkretnom slučaju, svrha postupka bila je određivanje reda veličine promjene intenziteta zračenja izvora (UV lampe) u ovisnosti o količini precipitata kamenca na kvarcnom ulošku UV reaktora.

Analizom rezultata mjerenja dobivene su vrijednosti koje omogućavaju planiranje daljnjeg ispitivanja. Naime utvrđeni odnos promjene intenziteta zračenja u ovisnosti o debljini precipitata kamenca, omogućavao je da prema izmjerenim vrijednostima tijekom ispitivanja na UV reaktoru utvrdimo da li tendencija promjene mjerenih veličina odgovara pretpostavljenim (ili očekivanim) promjenama.

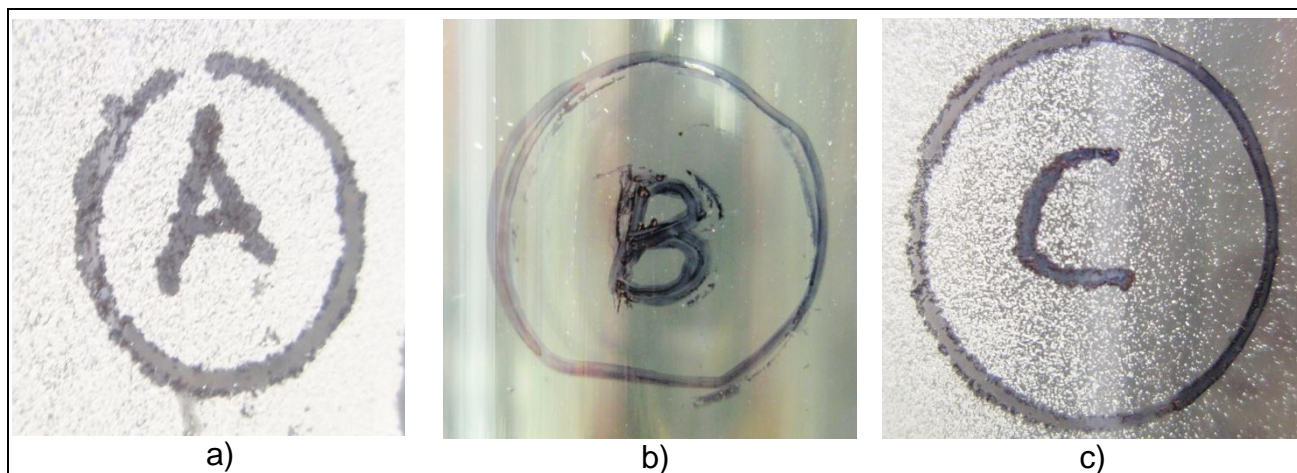
#### *Opis postupka:*

Taloženje kamenca inhibirano je uz pomoć hidrostatičnu kupku tvrtke Petrotest kao što to prikazuje slika 11a. U kupku je umetnut kvarcni uložak iz UV reaktora. Kupka je opremljena pumpom za cirkulaciju vode i grijačem za zagrijavanje vode. Na uložak je, dakle, uz pomoć pumpe nastrojavana voda zagrijana grijačem na 60 °C, pri čemu je precipitacija kamenca znatno ubrzana. Nakon postupka u termostatičnoj kupki, na kvarcnom ulošku stvoren je uočljivi sloj precipitata i to najveće koncentracije na strani direktno nastrojavanoj vodom. Na strani suprotnoj od one nastrojavane, koncentracija precipitata bila je znatno manja. Nastali kamenac prikazan je na slici 11b. S obzirom da je koncentracija nastalog precipitata nejednolika je raspoređena po površini uložka odabrana su tri karakteristična područja, prikazana na slici 12, za koja će biti provedena mjerenja. Kvarcni uložak sa stvorenim precipitatom učvršćen je stalkom, kao što prikazuje slika 11c i uz njega je na pomični mehanizam postavljen osjetnik uređaja za mjerenje intenziteta zračenja RM UVC sa pripadajućim radiometrom.

U kvarcni uložak je umetnuta UV lampa iz UV reaktora. Pomični mehanizam omogućavao je precizno radijalno podešavanje udaljenosti osjetnika od izvora zračenja, odnosno UV lampe. Mjerenje je provedeno sa dva različita medija između osjetnika i površine kvarcnog uložka; sa zrakom i sa vodom. Sloj vode, debljine 2,4 cm (jednak onom u UV reaktoru), simuliran je umetanjem dviju kiveta od kvarcnog stakla ispunjenih vodom.



Slika 11. Prikaz postupka provjere mjerne osjetljivosti uređaja za mjerenje intenziteta zračenja, u koracima; a) Termostatirajuća kupka s uronjenim uloškom; b) Umjetno stvoren precipitat i instalirani osjetnik intenziteta zračenja; c) Instalacija uložka, UV lampe u ulošku, osjetnika i uređaja za mjerenje intenziteta zračenja



Slika 12. Prikaz odabranih karakterističnih područja mjerenja na kvarcnom ulošku UV reaktora; a) područje s kvalitativno najvećom koncentracijom precipitata; b) područje bez precipitata; c) područje sa kvalitativno odabranom, srednjom koncentracijom precipitata kamenca

---

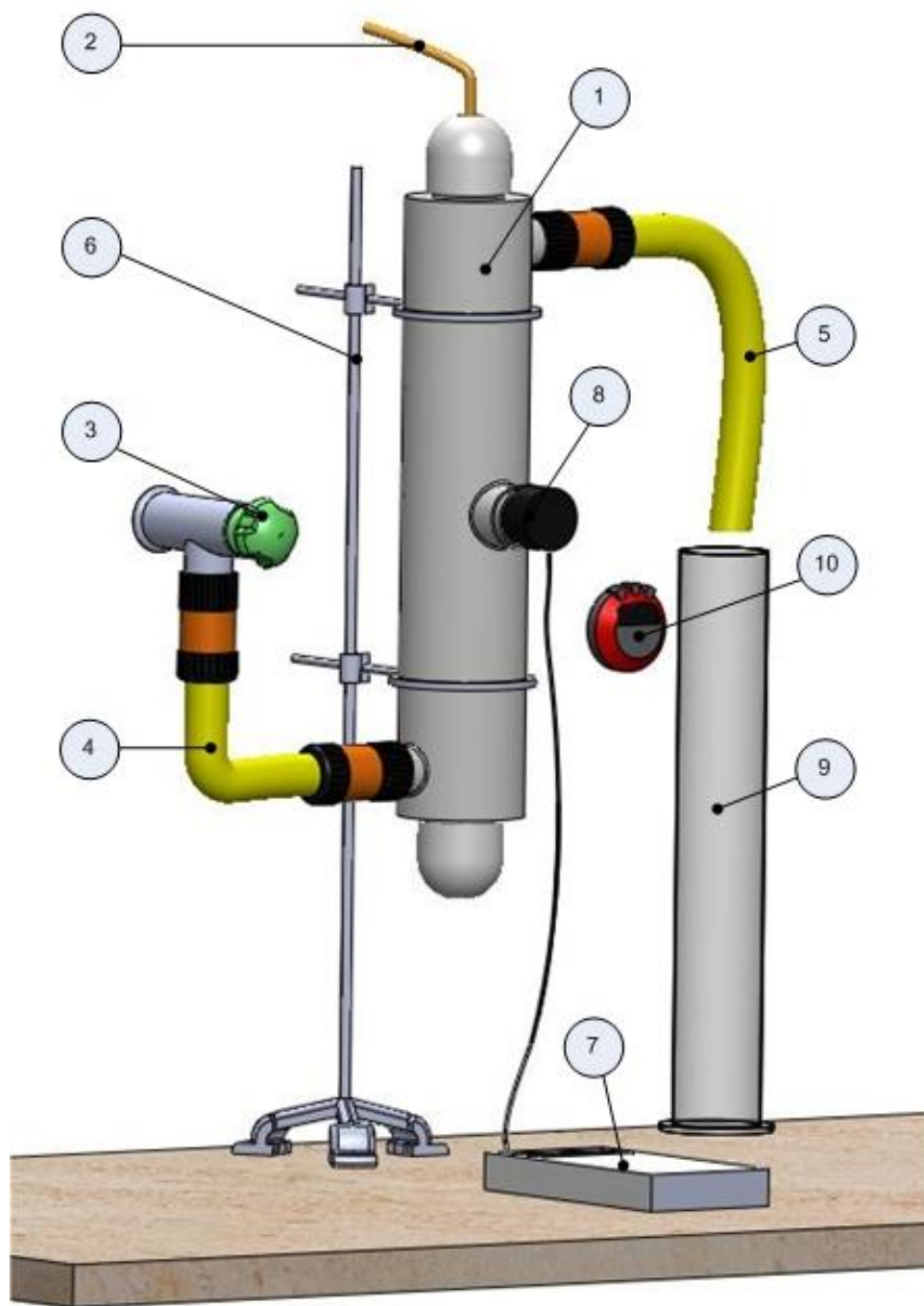
#### **4.4 Utvrđivanje početne vrijednosti intenziteta zračenja**

UV lampa u reaktoru, nakon uključivanja ne zrači nazivnim intenzitetom, ni karakterističnom spektralnom raspodjelom valnih duljina već zahtjeva vrijeme „zagrijavanja“. Kako bi se utvrdila početna vrijednost, potrebno je mjeriti intenzitet zračenja od uključivanja reaktora do uspostavljanja stacionarne vrijednosti. Intenzitet zračenja mjeren je uređajem za mjerenje intenziteta zračenja UV-VIS radiometar RM 21 i pripadajućim osjetnikom RM UVC.

Na reaktoru se nalazi kontrolno stakalce od kvarcnog stakla namijenjeno za kontrolu intenziteta zračenja. Na tom mjestu prisloni se UV osjetnik u kojem fotodetektor pod utjecajem UV zračenja proizvodi električnu struju. Ta se struja u elektroničkom uređaju pretvara u električni signal koji se zatim prikazuje na ekranu kao intenzitet zračenja u odabranim mjernim jedinicama.

## 4.5 Praćenje intenziteta zračenja i korekcija protoka vode

Na slici 13, prikazan je model mjerne linije s označenim pojedinim komponentama linije. Model je izrađen po uzoru na mjernu liniju instaliranu u laboratoriju kojom su izvršena potrebna mjerenja.



Slika 13. Model mjerne linije kojom su vršena ispitivanja u laboratoriju

---

Prikazana mjerna linija sastoji se od sljedećih komponenti:

- 1 – Reaktor za dezinfekciju vode UV zračenjem
- 2 – Priključak lampe na elektroničke predspojne uređaje i električni izvor
- 3 – Priključak na gradski vodovodni sustav
- 4 – Crijevo za dovod vode u reaktor
- 5 – Crijevo za odvodnju vode iz reaktora
- 6 – Stalak s podesivim nosačima
- 7 – UV-VIS radiometar RM 21
- 8 – UV RMC osjetnik intenziteta zračenja
- 9 – Menzura klase A, zapremine 1000 mL
- 10 – Kronometar

*Opis mjerenja:*

Mjerni postupak proveden je kroz dva vremenska perioda sa karakterističnim protokom vode u reaktoru:

- **Prvi period** - praćenje intenziteta zračenja tijekom 48 dana, uz odabrani protok od ~0,11 L/min (~6,6 L/h). Mjerenje je provedeno tijekom 48 dana uz približno konstantan protok. Nakon isteka prvog perioda mjerenja slijedi obrada podataka, izrada dijagrama i analiza rezultata te određivanje mase nastalog precipitata kamenca metodom atomske apsorpcijske spektrofotometrije.
- **Drugi period** - praćenje intenziteta zračenja tijekom 59 dana, uz odabrani protok od ~1,3 L/min (~78 L/h). Dakle, mjerenje je nastavljeno uz povećani protok, tijekom narednih 59 dana, nakon kojih je uslijedila obrada podataka, izrada dijagrama i analiza rezultata te određivanje mase precipitata kamenca kao i u prvom dijelu ispitivanja.

Prije svakog mjerenja obavljene su pripremne radnje, što podrazumijeva čišćenje kontrolnog okna, mjerenje trenutnog protoka vode te instalaciju radiometra i pripadajućeg osjetnika. U vremenu između mjerenja vršena je redovita korekcija protoka s ciljem održavanja približno konstantnih uvjeta u reaktoru. Tijekom cijelog postupka mjerenja korištena je zagrebačka vodovodna voda poznate kvalitete. [14]

---

## 4.6 Atomski apsorpcijski spektrofotometar

Atomska apsorpcijska spektrofotometrija predstavlja jednu od najčešće primjenjivanih metoda za određivanje koncentracije elemenata u uzorku. Ova metoda se zasniva na mjerenju smanjenja intenziteta monokromatskog zračenja pri njegovom prolasku kroz atomsku paru uzorka. Naime, prilikom prolaska svjetlosti karakteristične valne dužine kroz uzorak, doći će do određene apsorpcije od strane slobodnih atoma elementa, čiji sadržaj se određuje. Kao izvor zračenja služi lampa sa šupljom katodom koja emitira intenzivno monokromatsko zračenje. Kao detektor se koristi fotomultiplikator, a kao indikatorski uređaj pisač ili računalo. [15]

Princip rada atomskog apsorpcijskog spektrofotometra je vrlo jednostavan. U atomizatoru se uzorak razlaže, nastaje atomska para koja apsorbira određenu količinu svjetlosti, što smanjuje intenzitet karakteristične valne duljine svjetlosti emitirane iz izvora zračenja. Smanjenje intenziteta svjetlosti uslijed apsorpcije od strane atoma analiziranog uzorka odvija se u skladu sa Beer - Lambertovim zakonom, prikazanim u izrazu (7) [13,15]:

$$I_p = I_0 \cdot 10^{-A \cdot b \cdot N_0} \quad (7)$$

$I_p$  - intenzitet zračenja nakon prolaska kroz atomsku paru, [W/m<sup>2</sup>]

$I_0$  - početni intenzitet zračenja, [W/m<sup>2</sup>]

$N_0$  - broj atoma u osnovnom nepobuđenom stanju, [-]

$b$  - dužina puta zračenja, [m]

$A$  - koeficijent apsorpcije, [cm<sup>-1</sup>]

Kako su eksperimentalni uvjeti konstantni, broj atoma proporcionalan je koncentraciji elementa u uzorku, odnosno količina apsorbirane svjetlosti direktno je proporcionalna koncentraciji ispitivanog elementa. [15]

Opisanu metodu koristili smo kako bismo odredili masu kalcija i magnezija u precipitatu, odnosno masu precipitata kamenca na kvarcnom ulošku UV reaktora, nakon svakog perioda mjerenja intenziteta zračenja.

Korišten je atomski apsorpcijski spektrofotometar (AAS) AA-6800 tvrtke SHIMADZU, prikazan na slici 14.

---

*Opis postupka:*

Iz 75%-tne fosforne kiseline, pripremljeno je 500 mL 5%-tne otopine. Pripremljena otopina podijeljena je u dvije posude sa odmjerenih 250 mL otopine u svakoj. U prvu posudu s pripremljenom otopinom, uronjen je kvarcni uložak na kojem se nalazio precipitat kamenca i to na način da je površina uložka, prekrivena precipitatom kamenca, potpuno uronjena u otopinu. Tako uronjeni uložak ostavljen je da odstoji do trenutka kada se precipitat više nije mogao vidjeti golim okom. Uložak je zatim izvađen iz otopine i ispran sa demineraliziranom vodom. Otopina je pretočena u staklenu posudu i začepljena.

Otopina iz druge posude namijenjena je za tzv. slijepu probu. Naime, industrijski proizvedene kiseline često sadrže nečistoće, među kojima i ione kalcija i magnezija. Kako bi se precizno odredila količina, samo onih iona kalcija i magnezija koji potiču iz precipitata kamenca na ulošku, potrebno je odrediti količinu onih, koji su kao nečistoće već sadržani u samoj kiselini, odnosno pripremljenoj 5%-tnoj otopini kiseline.

Metodom atomske apsorpcijske spektrofotometrije, prvo je provedena analiza slijepe probe, odnosno određena je koncentracija iona kalcija i magnezija koji su u vidu nečistoća sadržani u pripremljenoj 5%-tnoj otopini fosforne kiseline.



**Slika 14. Atomski apsorpcijski spektrofotometar AA-6800 tvrtke SHIMADZU**



---

Zatim je istom metodom, određena koncentracija istih iona u otopini u kojoj je otopljen precipitat kamenca. Nadalje je uz poznate koncentracije iona kalcija i magnezija te poznati volumen otopine, jednostavnim proračunom prema izrazima (8) do (15) izračunata masa karbonata, a u formi kojih ioni kalcija i magnezija tvore precipitat kamenca. [15]

*Proračun mase kalcijevog karbonata [16]:*

$$\frac{m(\text{CaCO}_3)}{m(\text{Ca}^{2+})} = \frac{M(\text{CaCO}_3)}{M(\text{Ca}^{2+})}, \quad (8)$$

$$M(\text{CaCO}_3) = M(\text{Ca}) + M(\text{C}) + 3 \cdot M(\text{O}), \quad (9)$$

$$m(\text{CaCO}_3) = m(\text{Ca}^{2+}) \cdot \frac{M(\text{CaCO}_3)}{M(\text{Ca}^{2+})} \quad (10)$$

gdje je,

$m$  – masa, [μg]

$M$  – molekularna masa, [g]

*Proračun mase magnezijevog karbonata [16]:*

$$\frac{m(\text{MgCO}_3)}{m(\text{Mg}^{2+})} = \frac{M(\text{MgCO}_3)}{M(\text{Mg}^{2+})}, \quad (11)$$

$$M(\text{MgCO}_3) = M(\text{Mg}) + M(\text{C}) + 3 \cdot M(\text{O}), \quad (12)$$

$$m(\text{MgCO}_3) = m(\text{Mg}^{2+}) \cdot \frac{M(\text{MgCO}_3)}{M(\text{Mg}^{2+})} \quad (13)$$

gdje je,

$m$  – masa, [μg]

$M$  – molekularna masa, [g]

Ukupna masa nataloženog precipitata na kvarcnom ulošku, jednaka je zbroju mase kalcijevog karbonata i mase magnezijevog karbonata prema izrazu (14).

$$m_{\text{kamenac}} = m(\text{CaCO}_3) + m(\text{MgCO}_3) \quad (14)$$

gdje je,

$m$  – masa, [μg]

Postupak mjerenja na AAS-u i pripadajući proračun mase karbonata, proveden je dva puta i to po završetku svakog perioda mjerenja intenziteta zračenja u reaktoru.

## 5 MJERENJA I REZULTATI

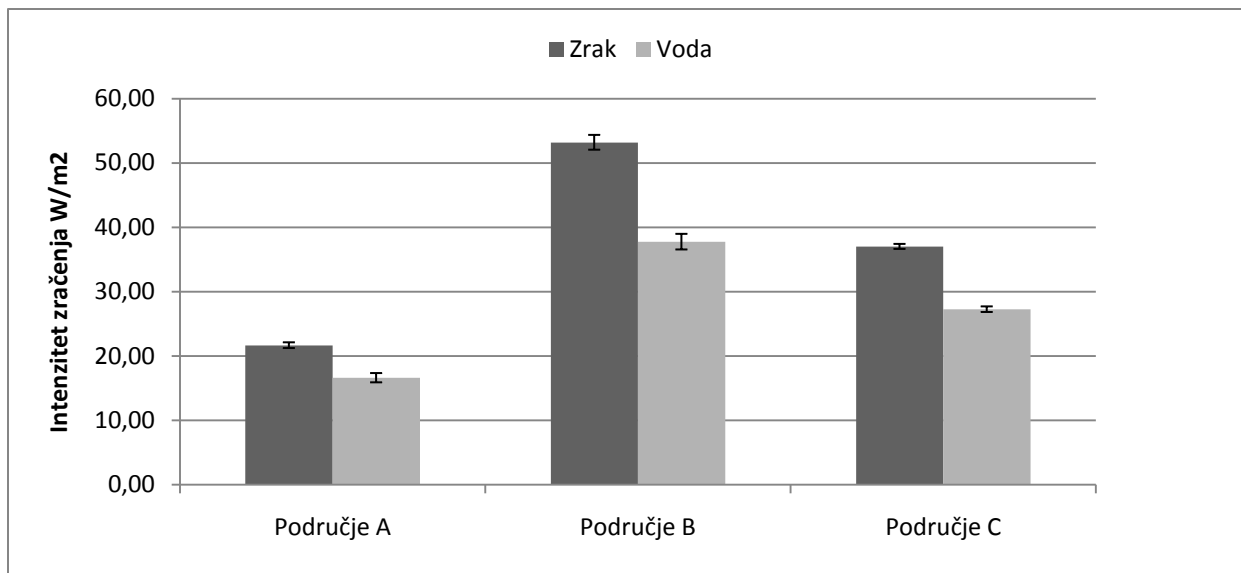
### 5.1 Rezultati utvrđivanja mjerne osjetljivosti uređaja za mjerenje intenziteta zračenja

Tablica 1. Rezultati mjerenja intenziteta zračenja UV lampe na udaljenosti 2,4 cm kroz zrak

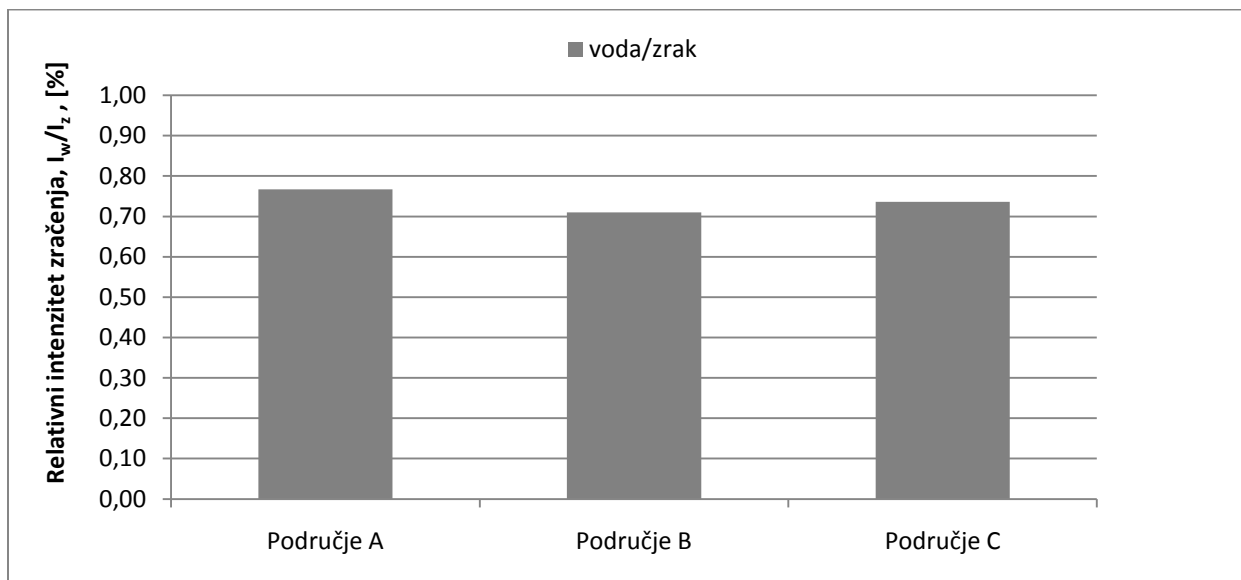
Radni medij u okolini izvora zračenja - ZRAK	Područje A W/m <sup>2</sup>	Područje B W/m <sup>2</sup>	Područje C W/m <sup>2</sup>
1	21,36	52,05	36,64
2	22,18	53,24	37,01
3	21,47	54,35	37,42
$\bar{x}$	<b>21,67</b>	<b>53,21</b>	<b>37,02</b>
$\sigma$	<b>0,45</b>	<b>1,15</b>	<b>0,39</b>

Tablica 2. Rezultati mjerenja intenziteta zračenja UV lampe na udaljenosti 2,4 cm kroz vodu

Radni medij u okolini izvora zračenja - VODA	Područje A W/m <sup>2</sup>	Područje B W/m <sup>2</sup>	Područje C W/m <sup>2</sup>
1	17,43	38,82	27,75
2	16,35	38,03	27,13
3	16,06	36,44	26,91
$\bar{x}$	<b>16,61</b>	<b>37,76</b>	<b>27,26</b>
$\sigma$	<b>0,72</b>	<b>1,21</b>	<b>0,44</b>

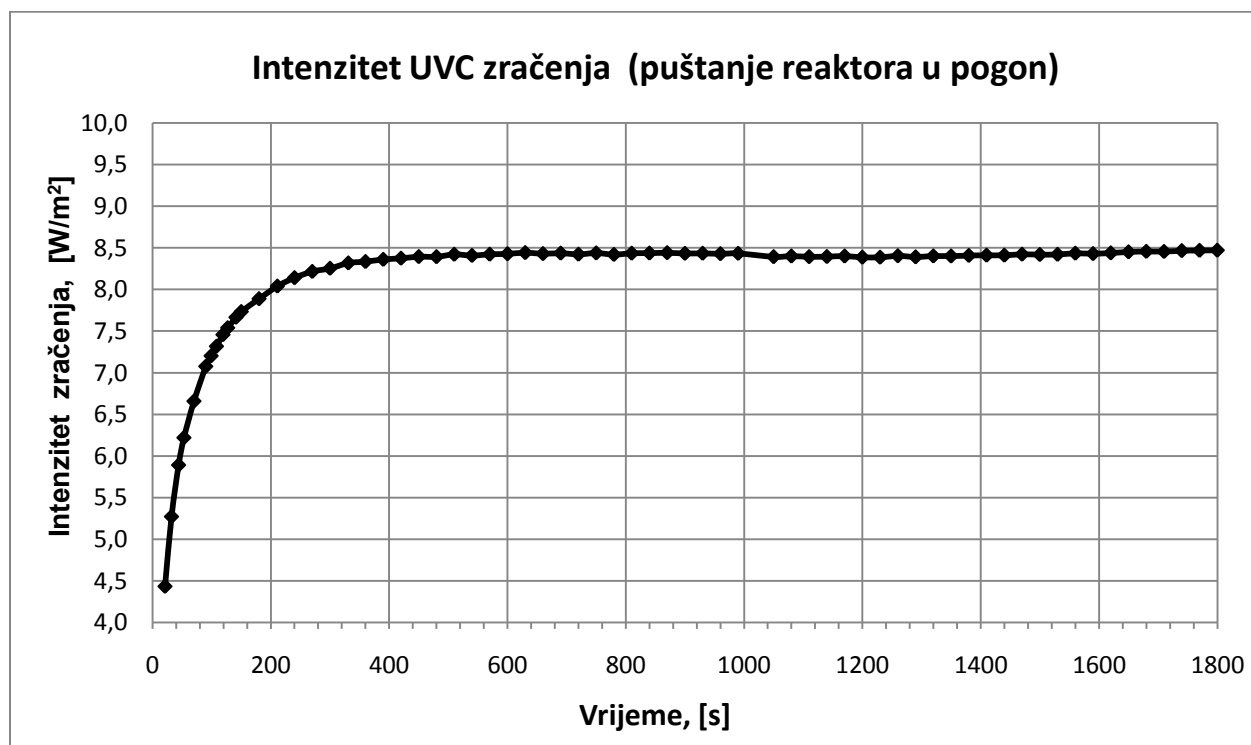


Slika 15. Histogramski prikaz usporedbe intenziteta zračenja UV lampe, za dva različita medija, uz različite koncentracije precipitata kamenca s prikazanom standardnom devijacijom rezultata mjerenja



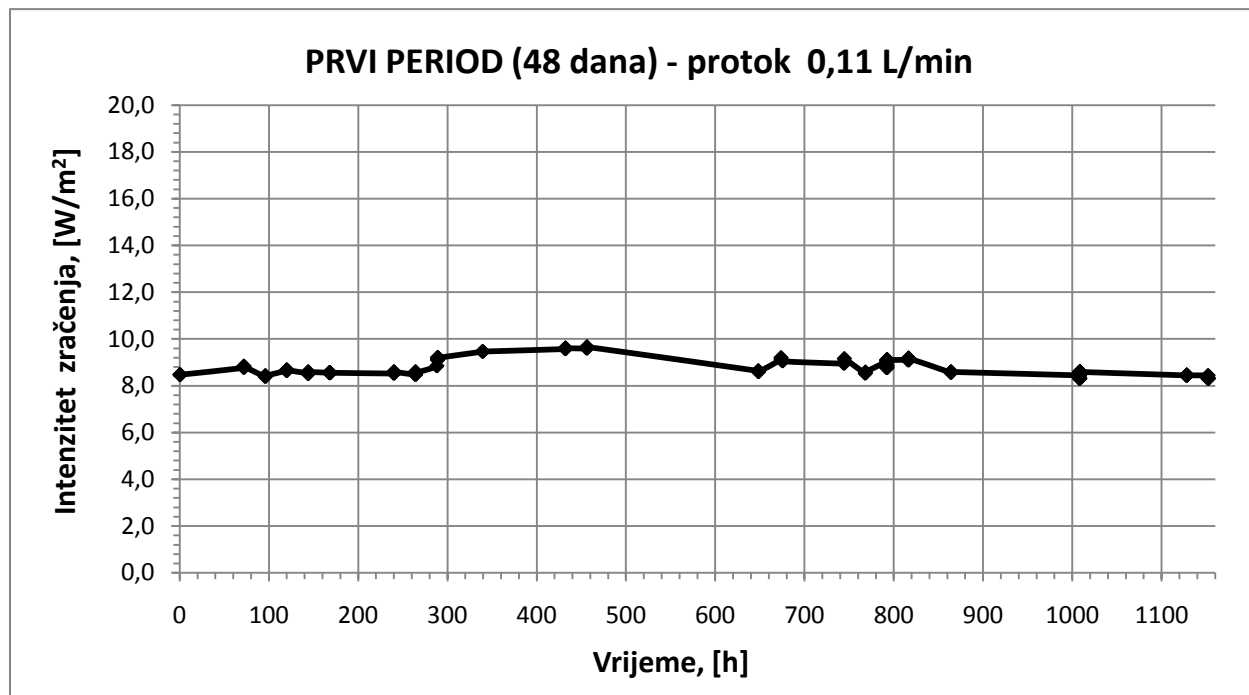
Slika 16. Histogramski prikaz omjera vrijednosti intenziteta zračenja izmjerenih kroz sloj zraka sa onima izmjerenim kroz sloj vode, uz različite koncentracije precipitata kamenca

## 5.2 Rezultat utvrđivanja početne vrijednosti intenziteta zračenja



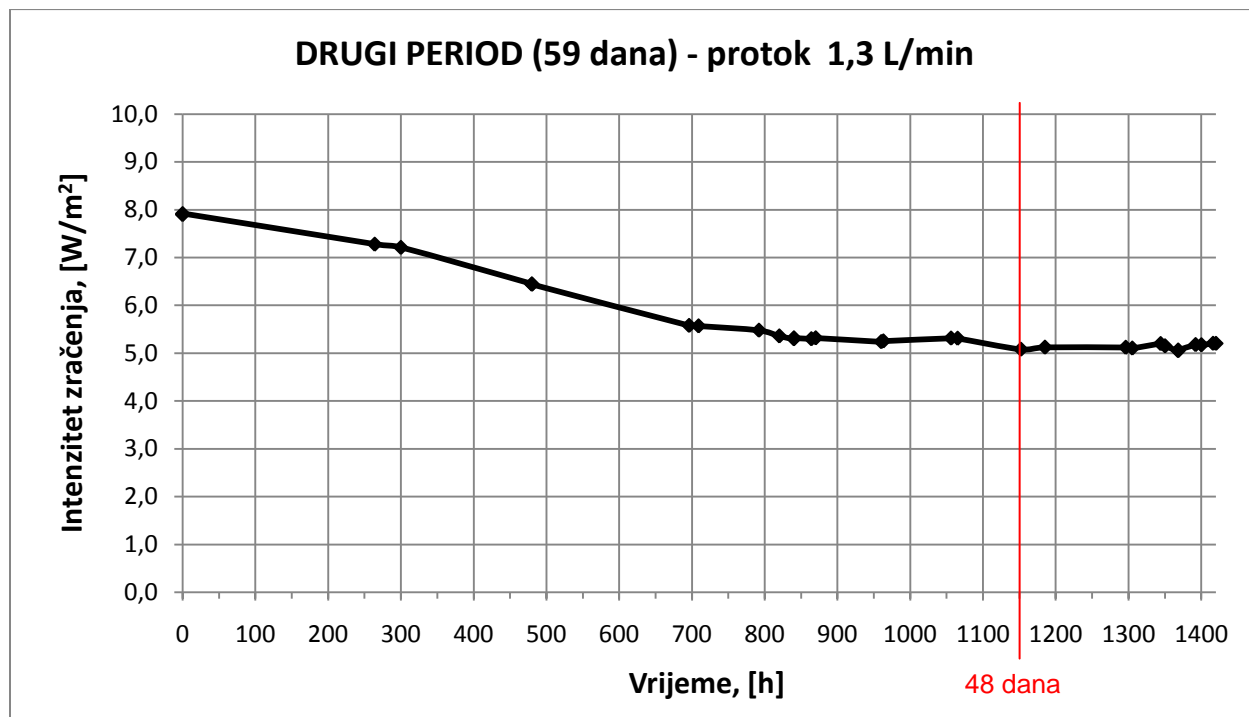
Slika 17. Krivulja promjene intenziteta zračenja prilikom puštanja reaktora u pogon

### 5.3 Rezultati mjerenja intenziteta zračenja tijekom 48 dana, uz protok od 0,11 L/min



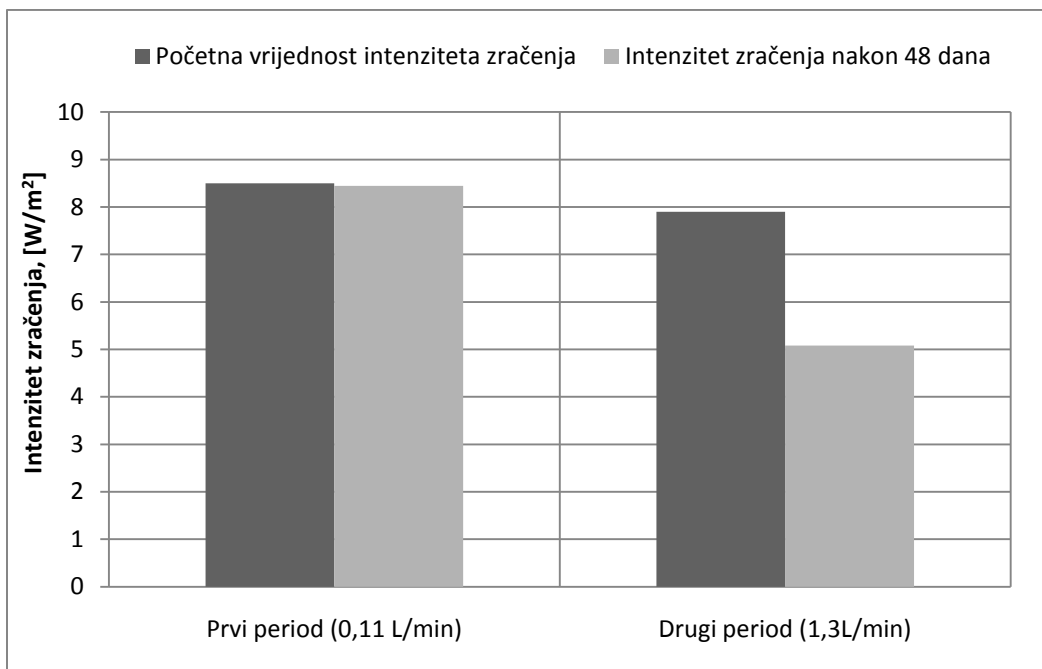
Slika 18. Dijagramski prikaz vrijednosti intenziteta zračenja tijekom 48 dana pri protoku  $\sim 0,11$  L/min

## 5.4 Rezultati mjerenja intenziteta zračenja tijekom 59 dana, uz protok od 1,3 L/min



Slika 19. Dijagramski prikaz vrijednosti intenziteta zračenja tijekom 59 dana pri protoku ~1,3 L/min, s oznakom 48. dana radi usporedbe intenziteta zračenja s prethodnim mjerenjem

## 5.5 Usporedba intenziteta zračenja nakon 48 dana prvog i drugog perioda mjerenja



Slika 20. Histogramski prikaz smanjenja intenziteta zračenja tijekom 48 dana za različite periode mjerenja, odnosno za različite protoke vode

## 5.6 Rezultati određivanja mase precipitata kamenca, sa kvarcnog uloška UV reaktora

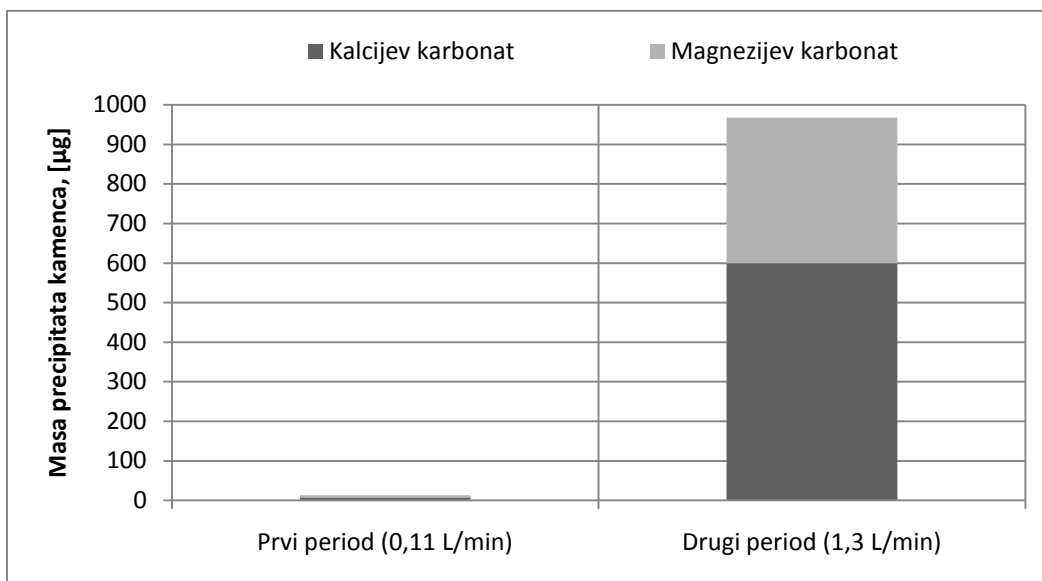
Tablica 3. Rezultati analize precipitata kamenca sa kvarcnog uloška UV reaktora, nakon završetka prvog perioda mjerenja

Naziv	Oznaka	Iznos
Koncentracija iona kalcija u otopini	$\gamma(\text{Ca}^{2+})$	0,0116 $\mu\text{g/mL}$
Masa iona kalcija u 250 mL otopine	$m(\text{Ca}^{2+})$	2,90 $\mu\text{g}$
Masa kalcijevog karbonata	$m(\text{CaCO}_3)$	7,24 $\mu\text{g}$
Koncentracija iona magnezija u otopini	$\gamma(\text{Mg}^{2+})$	0,0071 $\mu\text{g/mL}$
Masa iona magnezija u otopini	$m(\text{Mg}^{2+})$	1,78 $\mu\text{g}$
Masa magnezijevog karbonata	$m(\text{MgCO}_3)$	6,16 $\mu\text{g}$
<b>Ukupna masa precipitata kamenca</b>	<b><math>m_{\text{kamenac}}</math></b>	<b>13,400 <math>\mu\text{g}</math></b>

Tablica 4. Rezultati analize precipitata kamenca sa kvarcnog uloška UV reaktora, nakon završetka drugog perioda mjerenja

Naziv	Oznaka	Iznos
Koncentracija iona kalcija u otopini	$\gamma(\text{Ca}^{2+})$	0,9610 $\mu\text{g/mL}$
Masa iona kalcija u 250 mL otopine	$m(\text{Ca}^{2+})$	240,25 $\mu\text{g}$
Masa kalcijevog karbonata	$m(\text{CaCO}_3)$	599,97 $\mu\text{g}$
Koncentracija iona magnezija u otopini	$\gamma(\text{Mg}^{2+})$	0,4238 $\mu\text{g/mL}$
Masa iona magnezija u otopini	$m(\text{Mg}^{2+})$	105,95 $\mu\text{g}$
Masa magnezijevog karbonata	$m(\text{MgCO}_3)$	367,60 $\mu\text{g}$
<b>Ukupna masa precipitata kamenca</b>	<b><math>m_{\text{kamenac}}</math></b>	<b>967,568 <math>\mu\text{g}</math></b>





**Slika 21. Histogramski prikaz količine precipitiranih karbonata i ukupne mase precipitata kamenca otopljenog sa površine kvarcnog uložka UV reaktora**

---

## 6 RASPRAVA

### 6.1 Mjerna osjetljivost uređaja za mjerenje intenziteta zračenja

Mjerenjem intenziteta zračenja UV lampe, na udaljenosti od 2,4 cm uz zrak kao okolni medij, kroz područje B na kvarcnom staklu, dakle područje bez precipitata kamenca, utvrđena je prosječna vrijednost intenziteta zračenja od  $53,21 \text{ W/m}^2$ . Istim mjerenjem provedenim kroz stupac vode, debljine 2,4 cm, dobivena je prosječna vrijednost intenziteta zračenja od  $37,76 \text{ W/m}^2$ , što je gotovo 30% manje u odnosu na zrak. Zatim su provedena mjerenja na području A i C, te je također primijećeno smanjenje od oko 30% kao što to prikazuje slika 16. Rezultati prikazani u tablici 1 i tablici 2, potvrđuju Beer-Lambertov zakon prema kojem bi omjer intenziteta zračenja kroz zrak i vodu, za sva tri područja, trebao biti otprilike isti. Nadalje je prema dobivenim podacima izračunata je maksimalna očekivana vrijednost intenziteta zračenja za UV reaktor, a prema Beer-Lambertovom zakonu. Naime, sloj vode u reaktoru je debljine 7 cm, prema čemu je očekivana vrijednost na osjetniku reaktora maksimalno  $18 \text{ W/m}^2$ .

### 6.2 Početna vrijednost intenziteta zračenja

Početna vrijednost intenziteta zračenja utvrđena je analizom mjerenja, provedenog u 66 vremenskih trenutaka, ukupnog trajanja od 30 minuta. Iz slike 17, moguće je zaključiti da se kvazistacionarna vrijednost intenziteta zračenja uspostavlja nakon otprilike 600 sekundi (10 min) i iznosi približno  $8,5 \text{ W/m}^2$ .

### 6.3 Odnos između intenziteta zračenja i mase precipitata kamenca

Protok je, u prvom periodu mjerenja, odabran tako da približno predstavlja potrošnju vode po osobi u domaćinstvu i iznosi otprilike 160 L/dan ( $0,11 \text{ L/min}$ ). Tijekom perioda od 48 dana, izvršena su mjerenja intenziteta zračenja u više od 120 vremenskih trenutaka i provedena je analiza rezultata.

Rezultati mjerenja, prikazani na slici 18, nisu pokazali značajnije smanjenje vrijednosti intenziteta zračenja, ali su uočene oscilacije u mjerenim vrijednostima tijekom promatranog perioda. Naime, takve oscilacije mogu se pripisati dnevnim oscilacijama u protoku vode, s obzirom da je reaktor bio direktno spojen na zagrebački vodovodni sustav.

---

Količina precipitata kamenca na kvarcnom ulošku, nakon promatranog perioda, nije bila vizualno uočljiva. Daljnjom analizom pripremljene otopine precipitata sa kvarcnog uloška UV lampe, metodom atomske apsorpcijske spektrofotometrije, utvrđeno je da se neznatna količina precipitata ipak formirala, kao što je prikazano u tablici 3. Ovakav rezultat vjerojatno je posljedica odabranog protoka vode, čija vrijednost je bila nedostatna da u promatranom periodu od 48 dana, izazove znatniju precipitaciju kamenca na stijenkama kvarcnog uloška. Kao rezultat prvog perioda mjerenja, donesena je odluka o povećanju protoka s ciljem da se postigne značajnija precipitacija kamenca.

U drugom periodu mjerenja, odabran je protok, gotovo 12 puta veći od prethodnog, s ciljem ubrzavanja procesa precipitacije kamenca. Izvršena su mjerenja intenziteta zračenja u 26 vremenskih trenutaka i provedena je analiza rezultata.

Rezultati mjerenja, prikazani na slici 19, pokazuju primjetno smanjenje intenziteta zračenja. Nakon 30 dana (720 sati), intenzitet zračenja smanjen je za više od 30%. Tijekom narednih dana, tendencija smanjivanja vrijednosti intenziteta zračenja se nastavlja. Po isteku 48. dana, što je vremenski period jednak prvom periodu mjerenja, vrijednost intenziteta iznosi gotovo 40% manje od početno utvrđene vrijednosti. Usporedba intenziteta zračenja za oba perioda mjerenja, odnosno za oba protoka prikazana je na slici 20.

Narednih 11 dana, nije bilo značajnijih promjena intenziteta zračenja. Količina nastalog precipitata kamenca, nakon završenog perioda mjerenja, bila je vizualno jedva uočljiva, no daljnjom analizom, metodom atomske apsorpcijske spektrofotometrije, dobiveni su rezultati, prikazani u tablici 4, koji pokazuju da je masa nastalog precipitata višestruko veća. Odnos nastalih količina precipitata kamenca po završetku svakog perioda mjerenja prikazan je na slici 21.

Dobiveni rezultati pokazuju kako veličina protoka ima utjecaja na proces precipitacije kamenca. Funkcionalnu vezu između dviju veličina nemoguće je ustanoviti u ovoj fazi ispitivanja, zbog očitog nedostatka eksperimentalnih podataka. No rezultati pokazuju da je povećanje protoka od gotovo 12 puta, praćeno povećanjem mase precipitata i to za više od sedamdeset puta.

---

## 7 ZAKLJUČAK

Ispitivanjem utjecaja precipitata kamenca na intenzitet zračenja u sustavima za dezinfekciju vode UV zračenjem, utvrđeno je da postoji međusobna ovisnost pojavnih veličina. Međusobni odnos određen je značajnim smanjenjem intenziteta zračenja sa povećanjem količine precipitata na stjenkama kvarcnog uložka UV reaktora. Shodno tome se i biocidno djelovanje UV lampe, odnosno UV reaktora, smanjuje.

Analizom rezultata ispitivanja, utvrđene su sljedeće ovisnosti:

- pri protoku vode kroz reaktor u iznosu od  $\sim 6,6$  L/h, teoretska (izračunata) brzina strujanja vode kroz reaktor iznosila je  $\sim 1,7$  m/h. Nakon 48 dana, izmjerena je neznatna količina precipitata kamenca na stjenkama reaktora. Tijekom promatranog vremena, nije uočeno smanjenje intenziteta UV zračenja
- povećanjem protoka za gotovo 12 puta, dakle na  $\sim 78$  L/h, teoretska brzina protjecanja vode kroz reaktor iznosila je  $\sim 20,8$  m/h. Nakon jednakog vremenskog razdoblja od 48 dana, izmjerena je više od 70 puta veća količina precipitata kamenca, a intenzitet zračenja smanjen je za gotovo 40%.
- nedvojbeno se može zaključiti da povećanje protoka vode kroz UV reaktor uvjetuje veću brzinu precipitacije kamenca na kvarcnom uložku UV reaktora.

Također se može zaključiti, da je zbog nedostatka eksperimentalnih podataka (uslijed vremenskih ograničenja za provođenje ispitivanja) nemoguće definirati funkcijsku ovisnost među mjerenim veličinama te je potrebno izvršiti daljnja mjerenja intenziteta zračenja, pri još nekoliko odabranih, različitih, protoka vode. Zatim je potrebno analizirati rezultate, usporediti ih sa prethodnim mjerenjima te tada utvrditi eventualnu funkcijsku vezu između mjerenih veličina.

Ipak saznanja o ubrzanom procesu precipitacije kamenca pri povećanom protoku moguće je primijeniti prilikom projektiranja UV reaktora. Naime povećanjem volumena reaktora, smanjuje se prosječna brzina strujanja vode kroz reaktor, a postiže se i veća doza zračenja uslijed duljeg izlaganja istom.

Shodno navedenom, preporuča se prilikom projektiranja UV reaktora, povećati poprečni presjek reaktora kako bi se smanjenjem brzine strujanja vode, utjecalo na dinamiku precipitacije kamenca, vodeći pritom računa da sav volumen reaktora, kojim struji voda, mora primiti dovoljnu dozu zračenja za postizanje kvalitetnog dezinfekcijskog učinka.

---

## 8 ZAHVALA

Zahvaljujemo mentoru doc.dr.sc. Davoru Ljubasu na ukazanom povjerenju i pruženoj podršci tijekom izrade ovog rada.

---

## 9 LITERATURA

- [1] Masschelein J. W., *Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation*, Lewis Publisher, Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 2002.
- [2] Black & Weatch, *White's Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants*, 5th Ed., A John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2010.
- [3] Parsons S.A., Jefferson B., *Introduction to portable water treatment processes*, Blackwell Publishing, Oxford, 2006.
- [4] Ryer D. A., *Light Measurement Handbook*, International Light, Inc., Newburyport, 1997.
- [5] Dobrović S., Juretić H., Ljubas D., *Kemijskom ili/i fizikalnom dezinfekcijom do mikrobiološki ispravne pitke vode?. Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji/* Beslić A., Ban D. (ur.) - Sveti Martin na Muri, 11.-15.11.'09: Revelin d.o.o., 2009. 147-150.
- [6] Kolch A.; Sprengel H., *New Design Criteria for UV-Disinfection Systems Regarding Municipal Waste Discharges. Disinfection '98: The Latest Trends in Wastewater Disinfection: Chlorination vs. UV Disinfection*. Water Environment Federation, 1998: 1-10.
- [7] Murov S.L.; Carmichael I.; Hug G.L., *Handbook of Photochemistry*, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, Basel, Hong Kong, 1993.
- [8] Kurita, *Handbook of Water Treatment, 2nd English Edition*, Kurita Water Industries LTD., Japan, 1999.
- [9] Wait I.W., Johnston C.T., Blatchley III E.R., *The influence of oxidation reduction potential and water treatment processes on quartz lamp sleeve fouling in ultraviolet disinfection reactors*. Water Research, 41, 2007, 2427–2436.
- [10] Darby J., Heath M., Jacangelo J., Loge F., Swaim P., Tchobanglous G., *Comparison of UV Irradiation to Chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance*, Water Environment Research Foundation, 1995.

- 
- [11] Hijnen W.A.M., Beerendonk E.F., Medema G.J., *Inactivation Credit of UV radiation for Viruses, Bacteria and Protozoan (oo)cysts in water: A Review*. Water Research, 40, 2006, 3-22.
- [12] Sehnaoui K., Gehr R., *Fouling of UV lamp sleeves: Exploring inconsistencies in the role of iron*, 1st UV World Congress, International Ultraviolet Association (IUVA), Washington DC, June, 2001.
- [13] Darby J., Emerick R., Loge F., Tchobanglous G., *The Effect of Upstream Treatment Processes on UV Disinfection Performance*, Water Environment Research Foundation, 1999.
- [14] Dragojević D., Mihovec-Grdić M., Bizjak S., Vujanić B., *Vodoopskrba grada Zagreba 1878.-1998.*, Vodoopskrba i odvodnja, Zagreb, 1998.
- [15] Skoog A.D., West M.D., Holler F.J., *Fundamentals of Analytical Chemistry, 7<sup>th</sup> Edition*, Saunders College Publishing, Fort Worth, Philadelphia, San Diego, New York, Orlando, Austin, San Antonio, Toronto, Montreal, London, Sydney, Tokyo, 1996.
- [16] Filipović I., Lipanović S., *Opća i anorganska kemija, II. dio, kemijski elementi i njihovi spojevi*, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

---

## 10 SAŽETAK

**Autori:** Alan Rodić (Dobri dol 54, Zagreb) i Tomislav Gačić (Črešnjevec 29h, Zagreb)

**Naslov rada:** Ispitivanje utjecaja kamenca na intenzitet UV zračenja u reaktoru za dezinfekciju pitke vode

Za kvalitetan dezinfekcijski učinak UV zračenja u sustavima za dezinfekciju vode za piće, potrebno je postići zadovoljavajući intenzitet zračenja unutar reaktora. Intenzitet zračenja nije stacionarnog karaktera, već se zbog promjene protoka vode i precipitacije kamenca na stijenkama lampe, tijekom vremena mijenja, odnosno smanjuje. Shodno tome se i biocidno djelovanje UV lampe, odnosno reaktora, smanjuje. Kako je odnos između precipitacije kamenca i intenziteta zračenja relativno nepoznatog karaktera i rijetko se spominje u kontekstu znanstvenih istraživanja, a predstavlja informaciju koja svakako može pridonijeti razvoju UV sustava, izazov je koji smo odlučili istražiti.

U laboratoriju je instaliran reaktor za dezinfekciju vode UV zračenjem te su u sklopu ispitivanja provedena četiri mjerna postupka.

Prvim postupkom određivala se mjerna osjetljivost uređaja za mjerenje intenziteta zračenja s ciljem utvrđivanja referentnih okvira, unutar kojih je moguće očekivati vrijednosti prilikom izvođenja mjernih postupaka. Postupak je proveden i kako bismo lakše uočili eventualne pogreške mjerenja.

Drugi postupak mjerenja proveden je s ciljem utvrđivanja nazivnog intenziteta zračenja niskotlačne živine lampe. Taj je podatak potreban, s obzirom da predstavlja referentnu vrijednost prema kojoj se analiziraju svi sljedeći rezultati mjerenja.

Treći dio mjerenja, odnosi se na mjerenje intenziteta zračenja tijekom dva perioda tijekom kojih su korišteni različiti protoci vode kroz reaktor s ciljem uvjetovanja različitih brzina precipitacije kamenca na kvarcnom ulošku UV reaktora.

Nakon svakog od spomenutih perioda mjerenja, provedeno je određivanje mase kamenca nataloženog na kvarcni uložak, metodom atomske apsorpcijske spektrofotometrije.

Dobiveni rezultati daju osnovu za donošenje zaključaka o odnosu između intenziteta zračenja i precipitacije kamenca u sustavima za dezinfekciju vode UV zračenjem.

**Ključne riječi:** UV zračenje, UV dezinfekcija, precipitacija kamenca, UV reaktor



---

## 11 SUMMARY

**Authors:** Alan Rodić (Dobri dol 54, Zagreb) i Tomislav Gačić (Črešnjevec 29h, Zagreb)

**Title:** Evaluation of lime scale effect on the UV irradiation intensity in the UV disinfection reactors

For an adequate disinfection efficiency of UV irradiation in potable water disinfection systems, it is essential to achieve a satisfactory intensity of irradiation inside the reactor. The intensity of irradiation is not constant; on the contrary it is liable to diminishment, due to changes in the flow of water and precipitation of lime scale on the walls of the UV lamp. The germicidal effect of the UV lamp, that is, of the reactor, diminishes accordingly. The connection between the precipitation of the lime scale and the intensity of the irradiation is rather unrelated and is rarely mentioned in scientific research, although it represents valuable information which can vastly contribute to development of the UV systems. That was the challenge we decided to confront.

The UV reactor for water disinfection was installed in the laboratory and four testing procedures were conducted for the purposes of this research.

The purpose of the first test was to determine the sensitivity of the measurement device in order to establish the referral range in which we could expect the values of the experimental results. This procedure was also conducted in order to recognise possible mistakes.

The other procedure was performed with the goal to establish the nominal irradiation intensity of the low-pressure Hg UV lamp. That information was necessary to provide the referral value in comparison to which all the other results were analysed.

The third part concerns the irradiation intensity measurement in two tests with different flows, in order to achieve different precipitation dynamics on the quartz sleeve.

After every above-mentioned test, the quantity of the lime scale was determined using the AAS method.

The given results provide the basis for forming a conclusion about the relation between the UV irradiation and the precipitation dynamics of lime scale in UV water disinfection system.

**Key words:** UV irradiation, UV disinfection, lime scale precipitation, UV reactor