



Matej Čehovin¹, Alojz Medic²

Stručni rad

DOI: 10.5937/VIK25093C

PRIMENA OZONA I UV ZRAČENJA ZA PRIPREMU PIJAČE VODE MALIH VODOVODA – PRIMER IZ PRAKSE

Rezime: Oksidacija i dezinfekcija vode ozonom vrlo je efikasna, mada u malim i seoskim vodovodima ne baš često zastupljena, prvenstveno zbog ekonomskih razloga i relativno zahtevnih tehničkih karakteristika primene ove tehnologije. Dezinfekcija UV zracima, kroz više od 3 decenije primene, potvrđena je kao efikasna i relativno ekonomična metoda, ali se generalno ne može primeniti kao jedini stepen pripreme pijaće vode. U ovom radu se, na praktičnom primeru, diskutuje o primeni ozona i UV zračenja za pripremu vode za piće u malim i seoskim vodovodima u Republici Sloveniji.

Ključne reči: dezinfekcija, oksidacija, ozon, pijaća voda, UV

DRINKING WATER TREATMENT WITH OZONE AND UV FOR SMALL WATER SUPPLY SYSTEMS – PRACTICAL EXAMPLE

Abstract: Oxidation and disinfection of water with ozone is very effective, although it is not very common in small and rural waterworks, primarily due to economic reasons and the relatively demanding technical characteristics of the application of this technology. Disinfection with UV light has been confirmed as an effective and relatively economical method through more than 3 decades of application, but generally cannot be applied as the only stage of drinking water treatment. This paper discusses practical example of the application of ozone and UV radiation for drinking water treatment in small and rural waterworks in the Republic of Slovenia.

Key Words: Disinfection, drinking water, oxidation, ozone, UV

1. Uvod – glavne karakteristike i uloga ozona i UV zraka za pripremu pijaće vode

Ozon je sveprisutan u prirodi i tehnici. Generalno je najpoznatiji zbog uloge u Zemljinoj stratosferi zbog zaštite protiv UV (UV-C i UV-B) zraka na površini planete, a njegovo javljanje u troposferi (na površini planete), zbog njegovih karakteristika smatra se izrazito nepovoljnim za životnu sredinu. U hemijskom smislu, ozon se sastoji od tri atoma kiseonika (O₃) i alotropija je uobičajenog kiseonika sa dva atoma (O₂). Između praktično primenljivim sredstvima za pripremu pijaće vode, ozon je najsnažnije pojedinačno sredstvo za oksidaciju [1, 2]. Upoređenje tih potencijala oksidacije predstavljeno je u tabeli 1. Za pripremu pijaće vode, ozon se najčešće koristi kao sredstvo za oksidaciju organskih materija (uklanjanje TOC-a, naj-

¹ MAK CMC tehnologija vode d.o.o, Ljubljana, Slovenija, Matej.Cehovin@mak-cmc.si, ORCID: 0000-0001-5665-735X

² MAK CMC tehnologija vode d.o.o, Ljubljana, Slovenija, Alojz.Medic@mak-cmc.si



značajnije prethodnica AOX-a kod sledstvene primene hlora), Fe (gvožđa) i Mn (mangana), uklanjanje boje, nepovoljnih mirisa i ukusa, poboljšanje koagulacije i flokulacije itd. Također je vrlo efikasna i česta primena ozona za dezinfekciju pijaće vode, posebno površinske [1, 2].

Karakteristike ozona u vodenim rastvorima, u zavisnosti o fizičko-hemijskim parametrima (posebno pH u alkalnom području), su stvaranje hidroksilnih ($\text{HO}\bullet$), hidroperoksidnih ($\text{HO}_2\bullet$) i drugih radikala, posebno u alkalnom području [2]. Ozon za pripremu vode malih vodovoda primenjuje se u generalne svrhe, i za oksidaciju i za dezinfekciju.

Tabela 1. Upoređenje potencijala oksidacije (na 25°C) različitih praktično primenljivih hemijskih sredstava za pripremu pijaće vode
Table 1. Comparison of oxidation potentials (at 25°C) of practically applicable oxidants for drinking water treatment

Sredstvo	Simbol	Potencijal oksidacije (V)
hidroksilni radikal	$\text{HO}\bullet$	2,80
ozon	O_3	2,07
vodonik peroksid	H_2O_2	1,78
hidroperoksidni radikal	$\text{HO}_2\bullet$	1,70
permanganat	MnO_4^-	1,68
hlor dioksid	ClO_2	1,57
hlorova (I) kiselina	HOCl	1,49
hlor – vodeni rastvor	$\text{Cl}_{2(\text{aq})}$	1,36
kiseonik – vodeni rastvor	$\text{O}_{2(\text{aq})}$	1,27

Ultraljubičaste ili UV zrake generalno su poznate po uticajima na život i zdravlje organizama, posebno štetnim kod preterane izloženosti, mada su u određenim dozama esencijalne za neke biohemijske procese. UV zrake u UV-C spektru zračenja (talasna duljina 100–280 nm) vrlo su efikasno dezinfekciono sredstvo, posebno za dezinfekciju pijaće vode [3]. Primarni efekt UV zraka je na DNK mikroorganizme, zbog čega nisu sposobni za reprodukciju, a stoga ne mogu da zaraze druge organizme. Doze UV-C zraka sa talasnom dužinom 254 nm za 99,99% inaktivaciju (dezinfekciju) različitih mikroorganizama, navedene su u tabeli 2.

Spektar efikasnosti u odnosu na vrstu mikroorganizama relativno je širok. Veliki niz mikroorganizama visoko je osetljiv na UV-C zrake, posebno fekalni, uključujući bakterije *E. Coli*, streptokoke i parazite *Cryptosporidium*, *Giardia* i neki drugi, koji se samo slabo uklanjaju drugim dezinfekcionim sredstvima (najčešće hlorom).

Doze, potrebne za dezinfekciju virusa (npr. Adenovirus) i nekih bakterija (npr. *Clostridium perfringens*, *Bacillus subtilis*), previsoke su za praktičnu primenu ili čak neefikasne, time se UV dezinfekcija smatra neizvodljivom za tretman tih. Za dezinfekciju pijaće vode primenjuje se minimalna UV doza od 40 mJ/cm². Ova je doza propisana sektorskim smernicama i standardima, koji su ušli i u opštu praksu i legislaciju [3, 4].



Tabela 2. Doze UV-C zraka (254 nm) za 99,99% (4-log) dezinfekciju različitih mikroorganizama
Table 2. UV-C dosages (254 nm) for 99,99% (4-log) inactivation of different microorganisms

Mikroorganizam	UV doza (mJ/cm ²)
Bacillus subtilis	222
Streptococcus faecalis	30
Legionella pneumophila	30
Salmonella typhi	51
Escherichia coli	18
Cryptosporidium	12
Giardia	11
Vibrio cholerae	9

U malim vodovodima UV zrake primenjuju se praktično isključivo za dezinfekciju, u objektima za pripremu vode, pre distribucije (npr. izlazak iz rezervoara) ili/i na različitim kritičnim kontrolnim tačkama na distributivnoj mreži.

2. Primeri iz prakse – mali vodovod sa kapacitetom 3,5 L/s – Primer „R“

2.1. Ozonizacija pijaće vode na sistemu pripreme vode malog vodovoda „R“

Mali vodovodni sistem „R“ snabdeva seosko područje – brdski kraj u Republici Sloveniji sa oko 800–1200 potrošača (region je turistički posećen i relativno je velika fluktuacija broja potrošača). Jedini vir vode sa kapacitetom za javno vodosnabdevanje je površinski – potok. Prirodom, sirova voda izložena je brzim promenama kvaliteta zbog vremenskih situacija, a istovremeno pod velikim je rizikom potencijalnog antropološkog/veštačkog zagađenja. Karakteristike ove sirove vode (generalno u poređenju sa ostalim sirovim vodama za pripremu pijaće u R. Sloveniji, koje su u više od 93% podzemne) se prikazuju u obliku povišene mutnoće (čak do 100 NTU), sa relativno visokim vrednostima TOC (2–5 mg/L), smeđom bojom, zemljanim mirisom i ukusom, relativno niskim redoks potencijalom (150–250 mV), visokim utroškom permanganata i zagađenjem fekalnim mikroorganizmima (*E. Coli*, streptokoki), a povremeno čak i parazitima (*Cryptosporidium*, *Giardia*).

Sve ovo naglašava potrebu za primenom višestepenog tretmana sirove vode, da bi pijaća voda na kraju ispunjavala propisane parametre (važeće u R. Sloveniji a i na širem prostoru) [5]. Za takav tip sirove vode, oksidacija i dezinfekcija ozonom, zbog efikasnosti u odnosu na probleme fizikalno-hemijske i mikrobiološke neadekvatnosti, poželjna je tehnologija pripreme, a čak i retka/jedina, koja oslovljava više aspekta/parametara vode sa takvim karakteristikama.

Primena hlora za mikrobiološku kontrolu u ovakvoj sirovoj vodi ograničena je zbog visokih potencijala pojava hlorisanih nusprodukata dezinfekcije (AOX, THM – trihalometani,...) Na sistemu „R“, hlorisanje nije se primenjivalo od kraja devedesetih godina nadalje i zamenilo se hlor dioksidom, ali je doziranje toga ograničeno najvećom koncentracijom koja se može primeniti (0,4 mg/L) [4].

Objekat za pripremu vode kapaciteta je 3,5 L/s. Priprema vode sastoji od (po redosledu pojavljivanja): koagulacije, taloženja, filtracije na peščanim filterima, ozonizacije, adsorpcije na aktivnom uglju (GAC) i istovremeno uklanjanje viška rastvorenog ozona, zaštitna dezinfekcija UV zracima, rezidualna dezinfekcija hlor dioksidom pre distribucije.



Slika 1. Pogled na sustav za ozonizaciju (generator, rashladni sistem, upravljački ormar, reakciona posuda, analizator ozona u vodi i detektor ozona u vazduhu) na prezentovanom praktičnom primeru „R“
Figure 1. View of ozonation system (ozone generator, cooling system, power supply and control panel, reactor, dissolved ozone analyser, ozone in air detector) „R“

Ozon kao hemijsko sredstvo za primenu u postupcima pripreme vode, izuzetno je reaktivan i opasan gas. Nezavisno o veličini i kapacitetima objekta za pripremu vode, kod primene ozona (generisanje, aplikacija, destrukcija viška) neophodno je povesti računa o merama bezbednosti, koje su nekim sektorskim propisima i pravno obavezujuće, uzimajući u obzir, da je jedan takav sistem mašina, električna oprema, elektromagnetna oprema, oprema pod pritiskom itd. Ozonski sistem mora da bude opremljen i bezbednosnim sistemima za upotrebu u potencijalno eksplozivnim atmosferama (ATEX). Neophodna je automatska kontrola i detekcija mogućih ispuštanja gasne faze, kontrola i alarmiranje pristupa.

Na sistemu „R“ ozon se primenjuje od 1986. godine. Nekoliko godina (od kraja devedesetih godina 20. veka do 2016) ozon se nije primenjivao zbog kvarova tehnike i nedostupnosti rezervnih delova za servisiranje originalnog sistema („Jeklo Ruše“). U periodu od 2014. do 2016. godine izvršena je rekonstrukcija objekta i zamena zastarele opreme, a i delimična nadogradnja. Od 2016. godine dalje ponovo je uspostavljen sistem ozonizacije. Aplikirane doze ozona su reda veličine 0,5–2,0 mg/l, koje se javljaju kao povišen redoks potencijal u reakcionoj posudi (reda veličine 750–900 mV), dok je rezidual ozona reda veličine 0,05–0,10 mg/L. Glavni rezultati primene ozoniranja: mikrobiološki ispravna vode bez zabeleženih odstupanja od propisanih parametara u monitoringu, voda bez izražene boje, ukusa i mirisa, poboljšana stabilnost fizičko-hemijskih parametara u sistemu vodosnabdevanja (stabilnost koncentracije sekundarnog dezinficijensa kroz distributivnu mrežu). U ekonomskom smislu,

prosečni ukupni trošak primene ozona na prezentovanom primeru iznosi reda veličine 0,05–0,10 €/m³ [6].

2.2. UV dezinfekcija pijaće vode na sistemu pripreme vode malog vodovoda „R“

Prvenstveno, UV dezinfekcija na sistemu „R“ ugradila se je zbog poboljšanja mikrobiološke kontrole u periodu od 2009. godine nadalje. Sistem je bio projektovan za dozu zračenja od 40 mJ/cm², u skladu sa i danas važećim pravilnicima. Među značajnim parametrima za primenu ove tehnologije, UV transmittanca na 1 cm kod talasne duljine 254 nm u sirovoj vodi iznosi 65–75%. Za vreme ugradnje UV sistema u 2009. godini, na sistemu pripreme radili su samo taložnik, peščani filteri i filter sa aktivnim ugljenom (GAC filter). UV transmittanca posle tretmana u tadašnje vreme iznosila je oko 80%. Posle rekonstrukcije objekata i celokupnog tretmana od 2016. godine nadalje, UV transmittanca postiže vrednosti od 85-90%.

Ugrađen je bio monohromatski UV uređaj (zračenje talasne duljine 254 nm) sa jednom lampom snage od 210W (73W kod 254 nm). Primena UV dezinfekcije u periodu 2009–2016 pokazala se kao efikasna i pouzdana tehnologija, jer se posle implementacije više nisu javljali mikrobiološki neispravni uzorci posle primarne dezinfekcije. Pre toga, velik su uticaj na mikrobiološku sliku pripremljene vode imale organske materije, koje tadašnja tehnologija nije uklanjala u dovoljnoj meri, pa bi se velik deo hemijskog sredstva za dezinfekciju (originalno gasni hlor, kasnije hlor dioksid) zapravo potrošio na oksidaciji materija u vodi, umesto da bi bio na raspolaganju za izvršavanje dezinfekcione funkcije. Na dezinfekciju UV zracima organske materije nemaju toliko izraženih uticaja, pa se time i primarna dezinfekcija obavlja puno efikasnije. Stoga se, UV dezinfekcija zadržala kao stepen zaštitne dezinfekcije i posle 2016. godine i rekonstrukcije objekta, po principu zaštite sa više barijera, mada zbog primene ozona više ne bi bila neophodno potrebna.

U ekonomskom smislu, prosečni ukupni trošak primene UV tehnologije na prezentovanom primeru iznosi reda veličine 0,005–0,010 €/m³. Specifična potrošnja struje iznosi 0,015–0,020 kWh/m³ [6].



Slika 2. Primer tipične instalacije UV reaktora na vodovodnom sistemu
Figure 2. View of typical UV disinfection system installation



3. Zaključak

U ovom radu su predstavljeni stručni aspekti primene ozona i UV zraka za pripremu pijaće vode na praktičnom primeru malog vodovoda. Iako se ozon generalno, zbog tehničko-tehnoloških i ekonomskih aspekta, puno češće primenjuje u sistemima sa većim kapacitetom, na ovom se primeru pokazuje, da je njegova primena željena a čak i potrebna također u malim vodovodnim sistemima. Ekonomski aspekti primene ozona u malim vodovodnim sistemima mogu da budu presudni u fazama odlučivanja i određivanja tehnologije pripreme vode već u predinvesticionoj fazi i fazi projektovanja. Mada ovde diskutovani primer sa navedenim ekonomskim parametrima ukazuje na mogućnost implementacije ove unapređene tehnologije pripreme pijaće vode bez prevelikog finansijskog tereta na celokupnu cenu vode (ne više od 10% ekonomske cene, koja se naplaćuje potrošačima).

UV dezinfekcija već je decenijama utvrđena kao efikasna tehnologija dezinfekcije pijaće vode, a u ekonomskom smislu u poslednjoj deceniji i po postala je puno više prihvatljiva. Generalno je razlog uvećane ekonomske prihvatljivosti raširenost tehnologije po broju instaliranih uređaja u svetskom merilu, pa se time smanjuju i generalni troškovi uređaja. Na diskutovanom primeru pokazano je, da i za male vodovodne sisteme, primena UV tehnologije ne treba da ima za rezultat više od 0,5–1% uticaj na povećanje ukupne cene vode, a istovremeno neuporedivo veći pozitivan uticaj na celokupan mikrobiološki kvalitet pijaće vode.

Istina je, da generalizovanje na osnovu pokaznog primera, nije moguće. Adekvatne tehnologije pripreme pijaće vode za postizanje propisanog kvaliteta trebalo bi da se odredi za svaki primer pojedinačno, uzimajući u obzir ne samo fizičko-hemijske i mikrobiološke karakteristike sirove vode, nego razmotriti zdravstveno-(hidro)tehničke, sanitarne i tehnološke aspekte uključi i (najmanje) aspekte opšte zaštite prirodne sredine, sociološke, ekonomske i urbanističke aspekte. Iako je ovo sve teško ostvariti u realnosti, bilo bi dobro da svi akteri u lancu vodosnabdevanja težimo ka tome, jer u širem smislu ovaj put dovodi do opšteg napretka na ovom području. Primena ozona i UV zračenja predstavljaju primenljiv i moguć kvalitativan pomak u procesima pripreme pijaće vode malih vodovoda.

4. Literatura

- [1] Gottschalk C, Libra J. A, Saupe A, *Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications*: Second Edition. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010.
- [2] Von Sonntag C, von Gunten U, *Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment: From Basic Principles to Applications*. IWA Publishing, London, UK, 2012.
- [3] 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: 3–22, 2006.
- [4] EPA: *Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual*; Environmental protection agency (Agencija za zaštitu životne sredine), Washington, SAD, 1999.
- [5] Uredba o pitni vodi (Uredba o pijaćoj vodi), *Uradni list RS*, št. 61/23 (*Službeni glasnik Republike Slovenije* br. 61/23), 2023.
- [6] Arhiva izvođenih projekata, MAK CMC tehnologija vode d.o.o., Ljubljana, Slovenija, 1989–2025.