

# Obrada komunalne otpadne vode membranskim procesima

D. Dolar,\* M. Racar, K. Košutić, N. Čavarović i K. Karadakić

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu  
Marulićev trg 19, 10 000 Zagreb

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



## Sažetak

Industrijalizacija, porast populacije i urbanizacija glavni su uzroci stvaranja sve većih količina komunalnih otpadnih voda (KOV) koje, neobrađene, predstavljaju ozbiljnu prijetnju prirodnim vodonosnicima. Radi zaštite okoliša i prirodnih resursa potrebno je primjenjivati visokoučinkovite i okolišu naklonjene tehnologije obrade KOV-a. Cilj ovog rada bio je obrada KOV-a naprednim membranskim postupcima; membranskim bioreaktorom (MBR) te dodatnom obradom MBR efluenta s nanofiltracijom (NF) i reverznom osmozom (RO). Laboratorijska i pilot-obrada KOV-a MBR-om rezultirala je smanjenjem kemijske potrošnje kisika (KPK), biokemijske potrošnje kisika (BPK<sub>5</sub>), mutnoće i suspendiranih tvari za više od 92 %. Mikrobiološki parametri smanjeni su za 4,12 log<sub>10</sub> do 4,88 log<sub>10</sub>. Naknadna obrada MBR efluenta s RO/NF membranama (XLE i NF270) pokazala je dodatno smanjenje svih mjerenih parametara.

## Ključne riječi

Komunalna otpadna voda, membranski procesi, membranski bioreaktor, nanofiltracija, reverzna osmoza

## 1. Uvod

Količina otpadne vode nastala u kućanstvima i industriji sve više raste s povećanjem broja stanovnika, intenzivnom urbanizacijom, gospodarskim razvojem i podizanjem životnog standarda.<sup>1</sup> Sve to zajedno ozbiljan je stres na postojeće vodene resurse koji su dostatni tek u određenim dijelovima svijeta.<sup>2</sup> Goleme količine generirane komunalne otpadne vode (KOV) je stoga potrebno iskoristiti, tj. kvalitetno obraditi, prije svega radi zaštite vodenog ekosustava te ljudskog zdravlja. *T. Sato i sur.*<sup>3</sup> prikazali su udio obrađenih otpadnih voda u svijetu prema ekonomskim kategorijama zemalja s niskim, nižim srednjim, višim srednjim i visokim dohotkom. Pokazalo se da zemlje s visokim dohotkom obrađuju u prosjeku 70 % proizvedene otpadne vode, zemlje s višim srednjim dohotkom 38 %, nižim srednjim 28 % i zemlje s niskim dohotkom obrađuju tek 8 % proizvedene otpadne vode.

U Europi se obrađuje 71 % otpadnih voda zahvaljujući djelomično visokoj javnoj svijesti o zaštiti okoliša i ljudskog zdravlja, tehnološkom napretku metoda pročišćavanja otpadnih voda te ulaganjima nacionalnih vlada u sustave za pročišćavanje otpadnih voda.<sup>3</sup> U Hrvatskoj se generira prosječno 350 milijuna m<sup>3</sup> otpadne vode a izgrađeno je oko 150 uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV), ukupnog kapaciteta 4,33 milijuna ekvivalent stanovnika (ES), od čega 1,87 milijuna ES čine uređaji s I. stupnjem pročišćavanja, 2,14 milijuna ES uređaji s II. stupnjem pročišćavanja te 0,32 milijuna ES s III. stupnjem pročišćavanja.<sup>4</sup>

Zbog sve strožih zakonskih regulativa poseže se za novim i modernijim tehnologijama obrade otpadnih voda. Membranski procesi kao što su membranski bioreaktor (MBR), nanofiltracija (NF) i reverzna osmoza (RO) postaju sve po-

pularnije i prihvaćenije metode obrade otpadnih voda. Konkurentnost membranskih uređaja naspram klasičnih UPOV-a je u boljoj kvaliteti efluenta, boljem i učinkovitim uklanjanju novih zagađivala<sup>5,6</sup> i mikroorganizama<sup>5,7</sup> te manjoj proizvodnji otpadnog mulja kod MBR-a.<sup>5</sup> Zbog ekonomičnosti procesa<sup>8</sup> primjena MBR-a u posljednjih 10 godina u znatnom je rastu. U 2010. godini u svijetu je s MBR-om obrađeno oko 400 · 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> dan<sup>-1</sup> otpadne vode, dok je 2018. obrađeno oko 5200 · 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> dan<sup>-1</sup>.<sup>9</sup>

Cilj ovog istraživanja bio je obrada realne komunalne otpadne vode s laboratorijskim i MBR pilot-uređajem te završna obrada laboratorijskog MBR efluenta s NF i RO membranama.

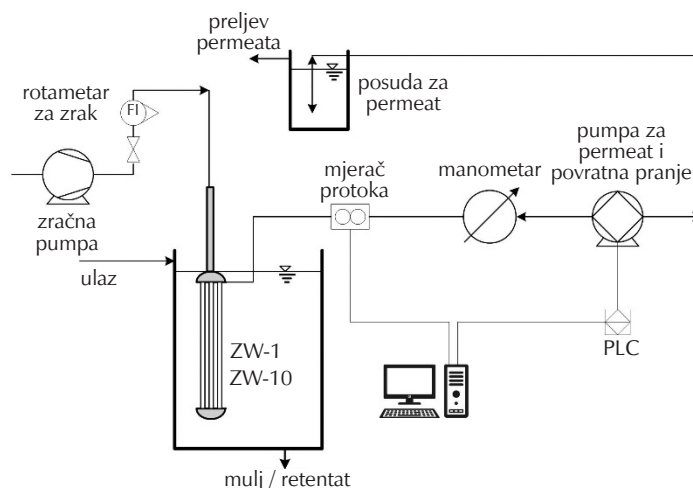
## 2. Eksperimentalni dio

Realna komunalna otpadna voda obrađena je hibridnim postupkom MBR-NF/RO. Realni uzorak KOV-a uzorkovan je na UPOV-u aglomeracije Čakovec, koji sačinjavaju otpadne vode kućanstva, oborinske otpadne vode i tehnološke otpadne vode gospodarstva koje su istim kanalizacijskim sustavom dovedene do UPOV-a Čakovec. Uzorkovanje je provedeno nakon grubih rešetki i pjeskolova/mastolova.

### 2.1. Laboratorijski i MBR pilot-uređaj

U prvoj fazi obrade KOV-a upotrijebljeni su laboratorijski i MBR pilot-uređaji koji su opremljeni odgovarajućim sensorima (tlak, temperatura, protok i razina) a uvjeti rada prikazani su u tablici 1. Za nadzor rada MBR-a i prikupljanje podataka primijenjen je Alpha Programming (SW0D5-ALVLS-EU) sustav (Mitsubishi Electric Corporation, Japan). Shematski prikaz laboratorijskog i MBR pilot-uređaja prika-

\* Autor za dopisivanje: doc. dr. sc. Davor Dolar,  
e-pošta: [dolar@fkit.hr](mailto:dolar@fkit.hr)



Slika 1 – Shematski prikaz laboratorijskog i MBR pilot-uređaja

Fig. 1 – Schematic presentation of laboratory and pilot MBR

zan je na slici 1. Volumen reaktora iznosio je 5 l (laboratorijski) i 200 l (pilot) a sadržavao je aktivni mulj dopremljen iz UPOV-a aglomeracije Čakovec.

Tablica 1 – Uvjeti rada laboratorijskog i MBR pilot-uređaja

Table 1 – Working conditions for laboratory and pilot MBR

	Laboratorijski MBR	Pilot-MBR
membrana	ZW-1	ZW-10
fluks/ $l m^{-2} h^{-1}$	$24,64 \pm 2,67$	40
hidrauličko vrijeme zadržavanja (HRT)/h	4,4	5,5
koncentracija mulja/ $g l^{-1}$	8,3	8,6
protok zraka/ $l min^{-1}$	20	75

Sastavni dio MBR-a bila je ultrafiltracijska (UF) membrana u obliku šupljih vlakana. U laboratorijskom MBR-u upotrijebljena je ZeeWeed 1 membrana (ZW-1) površine  $0,046 m^2$  i nominalne veličine pora  $0,02 \mu m$ , a u MBR pilot-uređaju ZeeWeed 10 membrana (ZW-10) površine  $0,9 m^2$  i nominalne veličine pora  $0,04 \mu m$ . Obje membrane su dobavljene od GE Water & Process Technologies, Mađarska. Pokusi u oba pokusa trajali su 5 dana. U laboratorijskom MBR-u komunalna otpadna voda dozirala se kontinuirano iz spremnika volumena 20 l te je spremnik svaki dan punjen svježom otpadnom vodom koja je čuvana na temperaturi do  $10 ^\circ C$ . U pilot-uređaju komunalna otpadna voda je kontinuirano dozirana iz UPOV-a aglomeracije Čakovec.

## 2.2. Laboratorijski NF/RO uređaj

MBR efluent dodatno je obrađen na NF/RO laboratorijskom uređaju koji je detaljno opisan u *E. Dražević i sur.*<sup>10</sup>

MBR efluent (10 l) cirkulirao je kroz membransku jedinicu protokom od  $3 l min^{-1}$  (brzina strujanja  $0,75 m s^{-1}$ ). Membrana je selektivno zadržavala retentat, a propuštala permeat. Tlak je praćen manometrom. Rabljene su nano-filtracijska NF270 i RO XLE membrane istog proizvođača (Dow-Filmtec, SAD). Karakteristike membrana prikazane su u *D. Dolar i sur.*<sup>11</sup>

Membrane su isprane sa 7 l demineralizirane vode kako bi se uklonio konzervans. Izvršena je tlačna predobrada odnosno stabilizacija protoka membrana demineraliziranom vodom pri tlaku od 15 bar u trajanju od 1 h. U drugoj fazi obrađivao se MBR efluent pri tlaku od 12 bar u trajanju od 3 h. U završnoj fazi NF/RO obrade membrane su ispirane demineraliziranom vodom u trajanju od 30 min. U svim fazama protok je praćen pomoću tehničke vage KERN 440-35A (Njemačka) a masa je bilježena računalno svakih 10 s.

## 2.3. Analiza vode

Komunalna otpadna voda, MBR efluent i NF/RO permeat analizirani su prema standardnim metodama;<sup>12</sup> pH, kemijska potrošnja kisika (KPK), biokemijska potrošnja kisika ( $BPK_5$ ), mutnoća, miris, električna provodnost, ukupne suspendirane čestice (TSS), ukupna koncentracija ugljika (TC), koncentracija anorganskog ugljika (IC), koncentracija otopljenog organskog ugljika (DOC), amonijak i mikrobiološka analiza (ukupne koliformne bakterije (KB), *Escherichia coli* (EC), *Enterococcus* (ENT), broj kolonija  $36 ^\circ C$  i  $22 ^\circ C$  (BK36 i BK22)). Za električnu provodnost i pH upotrijebljen je multimetar HandyLab 680 (SI Analytics, Njemačka), za mutnoću turbidimetar Turb 430 IR/Set (WTW, Njemačka), KPK i  $BPK_5$  sa spektrofotometrom Hach Lange DR3900 (Njemačka), TC, IC i DOC s analizatorom ugljika TC-V<sub>WS</sub> (Shimadzu, Japan). Amonij je određivan ionskim kromatografom DIONEX ICS-3000 (ThermoFischerScientific, SAD).

Za određivanje mikrobioloških parametara upotrijebljena su razrjeđenja od  $10^{-3}$  do  $10^{-6}$ . Koliformne bakterije, EC i

ENT određivane su primjenom metode membranske filtracije kroz filtar papir od celuloznog estera s promjerom pora od 0,45  $\mu\text{m}$ . Kao hranjiva podloga za ukupne koliformne bakterije i EC upotrijebljena je Chromogenic coliform agar (Biolife, Italija), a za *Enterokoke* selektivna hranjiva podloga Slanetz-Bartley. Nakon filtracije uzorka KB inkubirane su na 36 °C/24 h, EC na 44 °C/24 h, a ENT na 36 °C/48 h. Za suspektne kolonije EC primijenjen je završni biokemijski test Bactident *E. coli* (Merch). Nakon kvantifikacije ENT postojanost bakterija je potvrđena na Bile aesculin agaru (Biolife, Italija), koji svojim sastavom inhibira rast ostalih gram pozitivnih bakterija. BK36 i BK22 određivan je metodom razmaza na Yeast extract agaru. Inkubacija za BK36 iznosila je 48 h, a za BK22 72 h. Granica detekcije za KB, EC i ENT bila je 1 CFU 100 ml<sup>-1</sup>, a za ostale mikrobiološke parametre 1 CFU 1 ml<sup>-1</sup>.

### 3. Rezultati i rasprava

Komunalna otpadna voda obrađena je najprije u laboratorijskom a potom na MBR pilot-uređaju. U tablici 2 prikazani su fizikalno-kemijski i mikrobiološki parametri KOV-a koji su upotrijebljeni za oba uređaja te parametri dobivenog MBR efluenta. S obzirom na to da istraživanja nisu rađena istodobno, vidljiva je razlika u ulaznim parametrima, posebice u KPK-u i TSS-u. Razlozi odstupanja su značajne promjene u sastavu otpadne vode koje ovise o trenutačnim aktivnostima u području koje gravitira na UPOV. Najveća razlika dobivena je za TSS koji je tijekom istraživanja na laboratorijskom uređaju i iznosila je 550 mg l<sup>-1</sup>, a na pilot-uređaju 8661 g l<sup>-1</sup>. KPK vrijednost za vrijeme pilot-istraži-

vanja bila je dva puta veća, te je vjerojatno doprinos visokoj vrijednosti TSS za pilot-uređaj anorganskog porijekla.

Aktivni mulj je pregledan mikroskopski te su pronađeni *Rotaria*, *Suctorida* i *Vorticella* sp. kao tipični mikroorganizmi koji se rabe za obradu KOV-a. S aspekta razgradnje organskih tvari, vidljivo je da su laboratorijski i pilot-MBR imali sličnu učinkovitost smanjenja BPK<sub>5</sub> (> 99 % za laboratorijski, 97 % za pilot) i KPK (92 % za laboratorijski, 90 % za pilot), što odgovara vrijednostima dobivenim u radu M. Matošić i sur.<sup>13</sup> S druge strane, MBR u oba mjerila potpuno (100 %) je uklonio TSS i gotovo potpuno smanjio mutnoću (99,0 % laboratorijski i 99,9 % MBR pilot-uređaj). Dakle, i u laboratorijskom i pilot-uređaju potvrdila se ključna uloga UF membrane, a to je uklanjanje koloida i suspendiranih čestica,<sup>14</sup> što povlači za sobom veliko smanjenje mutnoće i TSS. Jedina značajnija razlika pojavila se u promjeni pH vrijednosti efluenta, koji je u laboratorijskom uređaju porastao, a na pilot-MBR-u se smanjio. Takva razlika u promjeni pH vrijednosti može proizlaziti iz nekonzistentnog sastava ulazne otpadne vode kod pilot-postrojenja te razlike u aeraciji reaktora.

Uz fizikalno-kemijske parametre praćeni su i mikroorganizmi te su njihove koncentracije prikazane u tablici 2. Međutim, zbog nemogućnosti određivanja mikroorganizama tijekom obrade KOV-a na laboratorijskom MBR-u oni su određivani samo na pilot-uređaju. Vidljivo je da su prisutni svi praćeni mikroorganizmi, od kojih je najviše KB u iznosu od 1,7 · 10<sup>7</sup> CFU 100 ml<sup>-1</sup>, a najmanje ENT 6 · 10<sup>5</sup> CFU 100 ml<sup>-1</sup>. Uklanjanje mikroorganizama na pilot-MBR-u kretalo se od 4,12 log<sub>10</sub> za BK36 i 4,88 log<sub>10</sub> za KB. Iz tablice 2 se može primijetiti da praćeni mikroorganizmi nisu u potpunosti uklonjeni, što nije bilo očekivano. Ra-

Tablica 2 – Fizikalno-kemijski parametri i mikroorganizmi KOV-a (Ulaz) i MBR efluenta za laboratorijski i pilot-MBR  
Table 2 – Physicochemical parameters and microorganisms of MWW (Ulaz) and MBR effluent (Effluent) for laboratory and pilot MBR

	jedinica	Laboratorijski MBR		Pilot-MBR	
		Ulaz	Efluent	Ulaz	Efluent
pH	–	7,24	7,73	7,62	6,83
KPK	mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>	309	24,4	615	60
BPK <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>	461	< 4	330	11
mutnoća	NTU	89,30	0,92	95,2	0,05
TSS	mg l <sup>-1</sup>	550	0	8661	0
vodljivost	$\mu\text{S cm}^{-1}$	1596	1360	1125	913
amonij	mg l <sup>-1</sup>				1,2957
TC	mg l <sup>-1</sup>	202,3	43,51	178,3	46,50
IC	mg l <sup>-1</sup>	114,8	27,24	102,10	3,924
DOC	mg l <sup>-1</sup>	87,50	16,27	76,20	42,58
koliformne bakterije	CFU 100 ml <sup>-1</sup>	2,8 · 10 <sup>6</sup>		1,7 · 10 <sup>7</sup>	224
<i>Escherichia coli</i>	CFU 100 ml <sup>-1</sup>	2,4 · 10 <sup>6</sup>		4,0 · 10 <sup>6</sup>	56
<i>Enterokoki</i>	CFU 100 ml <sup>-1</sup>	6 · 10 <sup>4</sup>		6 · 10 <sup>5</sup>	6
broj kolonija 36 °C	CFU 1 ml <sup>-1</sup>	1,8 · 10 <sup>6</sup>		3,7 · 10 <sup>6</sup>	282
broj kolonija 22 °C	CFU 100 ml <sup>-1</sup>	1,8 · 10 <sup>6</sup>		8,0 · 10 <sup>6</sup>	236

Tablica 3 – Fizikalno-kemijski parametri MBR efluenta (“Ulaz” za NF270 i XLE membrane) i RO/NF permeate  
 Table 3 – Physicochemical parameters of MBR effluent (“Ulaz” for NF270 and XLE membranes) and RO/NF permeates

	Jedinica	NF270		XLE	
		Ulaz	Permeat	Ulaz	Permeat
pH	–	7,81	7,82	7,84	7,15
KPK	mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>	22,70	< 5	23,80	6,67
BPK <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>	13,00	< 4	13,00	< 4
mutnoća	NTU	0,30	0,13	0,40	0,10
TSS	mg l <sup>-1</sup>	–	–	–	–
vodljivost	µS cm <sup>-1</sup>	1000	444	1083	55,5
amonij	mg l <sup>-1</sup>	–	–	–	–
TC	mg l <sup>-1</sup>	69,35	9,93	59,75	2,938
IC	mg l <sup>-1</sup>	42,35	9,00	42,33	0,772
DOC	mg l <sup>-1</sup>	27,01	0,926	17,42	2,166

zlog je što se UF membrane karakteriziraju kao membrane koje uklanjaju viruse i bakterije.<sup>14</sup> Kao potvrda tome je i veličina KB promjera 0,6 – 1,2 µm i duljina 2 – 3 µm, a veličina pora za ZW-10 membranu je 0,04 µm. K. Zhang i K. Farahbakhsh<sup>7</sup> također su prikazali prisutnost KB u MBR efluentu u iznosu od 240 CFU 100 ml<sup>-1</sup> i kao razlog su naveli stvaranje biofilma u cijevima uređaja.

Međutim, navedeni rezultati, bez obzira što je veličina pora ispitanih membrana ZW-1 0,02 µm i ZW-10 0,04 µm, upućuju na to da su rezultati dobiveni na laboratorijskom MBR-u prikladni za procjenu učinkovitosti i optimizaciju MBR-a na veće mjerilo, u tom slučaju na pilot-MBR-a. Nadalje, takvo poklapanje dvaju mjerila ukazuje na mogućnost procjenjivanja učinkovitosti većih mjerila na industrijskoj razini.

Prema dobivenim rezultatima jedino DOC za MBR pilot-uređaj ne zadovoljava uvjete graničnih vrijednosti emisija otpadnih voda za ispuštanje u površinske vode (NN 80/2013, 43/2014, 27/2015, 3/2016). U posljednjih nekoliko godina pojavljuje se sve veći interes uporabe vode u svrhu očuvanja prirodnih resursa. Ukoliko se otpadna voda želi ponovno upotrijebiti za navodnjavanje, zalijevanje zelenih površina, potrebna je dodatna obrada u industrijskim postrojenjima iz kojih dolaze otpadne vode. Prema EU smjernicama za navodnjavanje MBR efluent ne zadovoljava koncentraciju *Escherichie coli* s obzirom na to da njihova koncentracija treba biti ≤ 10 CFU 100 ml<sup>-1</sup>. S druge strane, prema smjernicama Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) salinitet prikazan pomoću vodljivost treba biti < 700 µS cm<sup>-1</sup>. U tu svrhu NF i RO pokazuju velik potencijal s obzirom na odlično uklanjanje organskih tvari i soli. Zbog toga je efluent MBR laboratorijskog uređaja dodatno obrađen s rahlom nanofiltracijskom (NF270) membranom i reverzno osmotskom (XLE) membranom. Rezultati permeata NF270 i XLE membrana prikazani su u tablici 3, u kojoj je vidljivo visoko smanjenje svih praćenih

parametara. Gotovo svi uzorci za KPK i BPK<sub>5</sub> bili su ispod granice detekcije uređaja (< 5 mg O<sub>2</sub> l<sup>-1</sup>) a ne postoji ni velika razlika između NF i RO membrane. Uočljiva razlika između ispitanih membrana je u smanjenju vodljivosti s obzirom na to da je s NF270 membranom vodljivost smanjena za 55,6 %, a s XLE za 94,9 %. Razlog leži u veličini pora membrana s obzirom na to da XLE membrana ima pore manje od 1 nm, a NF270 je predstavnik rahlih NF membrana, s porama veličine do 2 nm.<sup>15</sup>

#### 4. Zaključak

Utvrđena je visoka učinkovitost obrade realnih uzoraka komunalne otpadne vode na laboratorijskom i MBR pilot-uređaju, pri čemu su mutnoća, TSS, KPK, BPK<sub>5</sub> smanjeni za više od 92 %, dok su postignuti mikrobiološki parametri 4,12 – 4,88 log<sub>10</sub>. Time se omogućuje sigurno ispuštanje obrađene komunalne otpadne vode u prirodne vodonosnike. Usporedba rezultata dobivenih na laboratorijskom i pilot-uređaju ukazuje na mogućnost uvećanja mjerila. Naknadnom obradom MBR efluenta s RO (XLE) i NF (NF270) membranama dobiven je efluent (permeat) dodatno poboljšane kvalitete.

#### ZAHVALA

Ovaj rad financiran je (1.492.908,72 HRK) u sklopu Programa Vlade Republike Hrvatske za poticanje istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena za razdoblje od 2015. do 2016. godine uz podršku Ministarstva znanosti i obrazovanja, Ministarstva zaštite okoliša i prirode te energetske učinkovitosti i Hrvatske zaklade za znanost, u sklopu projekta *Izravna uporaba komunalne otpadne vode za navodnjavanje membranskim tehnologijama* (ReHOHMem) (PKP-2016-06-8522).

**Popis kratica i simbola****List of abbreviations and symbols**

BR22	– broj kolonija 22 – total colony count at 22 °C
BK36	– broj kolonija 36 °C – total colony count at 36 °C
BPK <sub>5</sub>	– biokemijska potrošnja kisika – biochemical oxygen demand
DOC	– otopljeni organski ugljik – dissolved organic carbon
EC	– <i>Escherichia coli</i>
ENT	– <i>Enterokokum</i> – <i>Enterococcus</i>
ES	– ekvivalent stanovnika – population equivalent
HRT	– hidrauličko vrijeme zadržavanja – hydraulic retention time
IC	– anorganski ugljik – inorganic carbon
KB	– ukupne koliforme bakterije – total coliform bacteria
KPK	– kemijska potrošnja kisika – chemical oxygen demand
KOV	– komunalna otpadna voda – municipal wastewater
MBR	– membranski bioreaktor – membrane bioreactor
NF	– nanofiltration – nanofiltration
RO	– reverzna osmoza – reverse osmosis
TC	– ukupni ugljik – total carbon
TSS	– ukupne suspendirane čestice – total suspended solids
UPOV	– uređaj za pročišćavanje otpadnih voda – wastewater treatment
ZW-1	– ZeeWee 1
ZW-10	– ZeeWee 10

**Literatura****References**

1. K. S. Balkhair, M.A. Ashraf, Field accumulation risks of heavy metals in soil and vegetable crop irrigated with sewage water in western region of Saudi Arabia, *Saudi J. Biol. Sci.* **23** (2016) S32–S44, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.09.023>.
2. C. A. Quist-Jensen, F. Macedonio, E. Drioli, Membrane technology for water production in agriculture: Desalination and wastewater reuse, *Desalination* **364** (2015) 17–32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.03.001>.
3. T. Sato, M. Qadir, S. Yamamoto, T. Endo, A. Zahoor, Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use, *Agricult. Water Manag.* **130** (2013) 1–13, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.007>.
4. L. Ostroški, Statistički ljetopis Republike Hrvatske 2018., Državni zavod za statistiku, Zagreb, 2018.
5. A. T. Basha, A. Y. Gebreyohannes, R. A. Tufa, D. N. Bekele, E. Curcio, L. Giorno, Removal of emerging micropollutants by activated sludge process and membrane bioreactors and the effects of micropollutants on membrane fouling: A review, *J. Environ. Chem. Eng.* **5** (2017) 2395–2414, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.027>.
6. J. Radjenović, M. Petrović, D. Barceló, Fate and distribution of pharmaceuticals in wastewater and sewage sludge of the conventional activated sludge (CAS) and advanced membrane bioreactor (MBR) treatment, *Water Res.* **43** (2009) 831–841, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.043>.
7. K. Zhang, K. Farahbakhsh, Removal of native coliphages and coliform bacteria from municipal wastewater by various wastewater treatment processes: Implications to water reuse, *Water Res.* **41** (2007) 2816–2824, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.010>.
8. J. Radjenović, M. Matošić, I. Mijatović, M. Petrović, D. Barceló, Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology, u: D. Barceló, M. Petrović (ur.) *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste: Removal Technologies*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008., str. 37–101.
9. F. Meng, S. Zhang, Y. Oh, Z. Zhou, H.-S. Shin, S.-R. Chae, Fouling in membrane bioreactors: An updated review, *Water Res.* **114** (2017) 151–180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.006>.
10. E. Drazević, S. Bason, K. Kosutic, V. Freger, Enhanced partitioning and transport of phenolic micropollutants within polyamide composite membranes, *Environ. Sci. Technol.* **46** (2012) 3377–3383, doi: <https://doi.org/10.1021/es204188j>.
11. D. Dolar, K. Košutić, D. Ašperger, Influence of adsorption of pharmaceuticals onto RO/NF membranes on their removal from water, *Water Air Soil Pollut.* **224** (2013) 1377, doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1377-0>.
12. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19<sup>th</sup> Ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, 1995.
13. M. Matošić, V. Crnek, H. K. Jakopović, I. Mijatović, Municipal wastewater treatment in a membrane bioreactor, *Fresen. Environ. Bull.* **18** (2009) 2275.
14. M. Mulder, Basic principles of membrane technology, 2<sup>nd</sup> Ed., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1996.
15. K. Košutić, D. Dolar, B. Kunst, On experimental parameters characterizing the reverse osmosis and nanofiltration membranes' active layer, *J. Membr. Sci.* **282** (2006) 109–114, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.010>.

## SUMMARY

### Treatment of Municipal Wastewater by Membrane Processes

*Davor Dolar,\* Marko Racar, Krešimir Košutić, Nina Čavarović, and Klara Karadakić*

Industrialization, population growth, and urbanization are the main causes for the generation of increasing quantities of municipal wastewater (MWW) which, untreated, pose a serious threat to natural aquifers. In order to protect the environment and natural resources, it is necessary to use high-efficiency and environmentally friendly technologies for the treatment of MWW. The goal of this work was treatment of MWW with advanced membrane processes; membrane bioreactor (MBR) and nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO). Laboratory and pilot treatment of MWW with MBR resulted in a reduction of more than 92 % in chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand ( $BOD_5$ ), turbidity and suspended matter. The number of microbiological parameters decreased by 4.12  $\log_{10}$  to 4.88  $\log_{10}$ . Subsequent treatment of MBR effluent with RO/NF membranes (XLE and NF270) further reduced all measured parameters.

#### Keywords

*Municipal wastewater, membrane processes, membrane bioreactor, nanofiltration, reverse osmosis*

*Faculty of Chemical Engineering and Technology  
University of Zagreb  
Marulićev trg 19  
10 000 Zagreb, Croatia*

Professional paper  
Received September 15, 2019  
Accepted September 18, 2019