

Utjecaj koncentracije mulja na obradu komunalne otpadne vode membranskim bioreaktorom

Čalo, Dora

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:219346>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Dora Čalo

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Dora Čalo

**UTJECAJ KONCENTRACIJE MULJA NA OBRADU KOMUNALNE
OTPADNE VODE MEMBRANSKIM BIOREAKTOROM**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: doc. dr. sc. Davor Dolar

Članovi ispitnog povjerenstva: doc. dr. sc. Davor Dolar

izv. prof. dr. sc. Danijela Ašperger

dr. sc. Lidija Furač

Zagreb, rujan 2019.

*Ovaj rad izrađen je na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije,
Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za fizikalnu kemiju, akademske godine 2018. / 2019.*



Vlada
Republike
Hrvatske

**Izravna uporaba komunalne otpadne vode za navodnjavanje membranskim tehnologijama
(ReHOHMem)**

Projekt se financira u sklopu Programa Vlade Republike Hrvatske za poticanje istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena za razdoblje od 2015. do 2016. godine

**Sadržaj ove publikacije isključiva je odgovornost Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije*



REPUBLIKA HRVATSKA
MINISTARSTVO ZAŠTITE
OKOLIŠA I ENERGETIKE



ministarstvo znanosti
obrazovanja i sporta



FOND ZA ZAŠTITU OKOLIŠA I
ENERGETSKU UČINKOVITOST



HRZZ
Hrvatska zaklada
za znanost

*Prije svega želim se zahvaliti svom mentoru doc. dr. sc. Davoru Dolaru na velikoj pomoći,
prenesenom znanju i strpljenju pri izradi ovog rada.*

*Zahvaljujem se svojim prijateljima na pruženoj podršci i pomoći u svakom trenutku, a
pogotovo hvala mojim curama!*

*Na kraju se beskrajno zahvaljujem svojim roditeljima, sestri i obitelji na razumijevanju,
neizmjerljivoj potpori i ljubavi.*

Sažetak

U današnje vrijeme sve je veća količina otpadnih voda kao posljedica razvoja industrije i porasta populacije. Kako bi se takva voda vratila u okoliš na ekološki i ekonomski prihvatljiv način razvijaju se postupci pročišćavanja otpadnih voda. U nove tehnologije pročišćavanja spadaju i membranski procesi, koji dobivaju značajnu ulogu u zadnjih desetak godina.

Cilj ovoga rada bio je ispitati utjecaj koncentracije aktivnog mulja (MLSS) na obradu komunalne otpadne vode (KOV-a) membranskim bioreaktorom (MBR-om) s ultrafiltracijskom (UF) membranom. MBR-om su kroz tri perioda ispitivani parametri: mutnoća, električna provodnost (κ), pH vrijednost, ukupan ugljik (TC), ukupan dušik (TN), kemijska potrošnja kisika (KPK), biokemijska potrošnja kisika kroz 5 dana (BPK₅) i ukupna suspendirana tvar (TSS).

Rezultati su dokazali da smanjenjem MLSS-a dolazi do najvećeg uklanjanja TC-a, KPK i BPK₅. Za najmanju vrijednost MLSS-a od 6,95 g L⁻¹ smanjenje je 83,87 %, 98,95 % i 99,10 % za navedene parametre. Niže vrijednosti separacije uočeni su za κ i TN, dok na mutnoću MLSS nema značajan utjecaj.

Ključne riječi: komunalna otpadna voda, membranski bioreaktor, koncentracija aktivnog mulja, ultrafiltracija

Abstract

Today, the amount of wastewater is increasing as a result of industrial development and population growth. In order to return such water to the environment in an environmentally and economically acceptable manner, wastewater treatment processes are being developed. New purification technologies include membrane processes, which have played a significant role in the last ten years.

The aim of this study was to investigate the effect of sludge concentration on municipal wastewater (KOV) treatment by a membrane bioreactor (MBR) with an ultrafiltration (UF) membrane. MBR tested parameters for three periods: turbidity, electrical conductivity (κ), pH, total carbon (TC), total nitrogen (TN), chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen consumption over 5 days (BOD_5), active sludge concentration (MLSS) and total suspended solids (TSS). They were monitored for how MLSS affects the quality of the perm.

The results proved that the reduction of MLSS results in the highest removal of TC, COD and BOD_5 . For the smallest MLSS value of 6.95 g L^{-1} the decrease is 83.87 %, 98.95 % and 99.10 % for the above parameters. Lower separation values were observed for κ and TN, while MLSS turbidity was not significantly affected.

Key words: municipal wastewater, membrane bioreactor, activated sludge concentration, ultrafiltration

Sadržaj

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO	2
2.1. Otpadne vode.....	2
2.1.1. Industrijska otpadna voda.....	2
2.1.2. Kućanska otpadna voda	3
2.1.3. Oborinska otpadna voda	3
2.1.4. Procjedna otpadna voda.....	3
2.2. Mulj	4
2.2.1. Primarni mulj.....	4
2.2.2. Sekundarni mulj	4
2.2.3. Tercijarni mulj	4
2.2.4. Aktivni mulj	4
2.3. Membranski procesi	5
2.3.1. Tlačni membranski procesi.....	5
2.3.2. UF.....	6
2.3.3. MBR	6
3. EKSPERIMENTALNI DIO	13
3.1. Materijali	13
3.1.1. KOV i aktivni mulj.....	13
3.1.1. Uređaj MBR	13
3.1.2. Membrana.....	14
3.1.3. Instrumenti.....	15
3.2. Metode ispitivanja	15
3.2.1. Određivanje MLSS-a i TSS-a.....	15
4. REZULTATI I RASPRAVA	16
5. ZAKLJUČAK	22
6. LITERATURA	23
7. POPIS SIMBOLA I KRATICA.....	26
8. ŽIVOTOPIS	27

1. UVOD

Dobro je poznato kako voda ima bitnu i nespornu ulogu u nastanku, razvoju i održavanju života na Zemlji. Dvije trećine Zemljine površine prekrivene su vodom, međutim voda je najvrjednija kao izvor životinjama i biljkama. Održivost zaliha vode u svijetu najbitnije je pitanje obzirom na porast stanovništva. Voda čini 75 % ljudske tjelesne mase i glavni je sastojak organizma. Sve ove činjenice ukazuju kako je voda jedan od najvažnijih spojeva za život na Zemlji.¹

Porastom potrošnje pitke vode javio se njen nedostatak kao najvažniji problem čovječanstva. Jedan od problema je zapravo kvaliteta same vode. Porastom populacije i povećanim razvojem industrije javlja se sve veća količina otpadnih voda. Ispuštanje takvih nepročišćenih voda u prirodu ekološki je neprihvatljivo i zato se razvijaju postupci pročišćavanja otpadnih voda. U postupcima pročišćavanja kao nusprodukt se pojavljuje mulj. Mulj je mješavina organskih i anorganskih otpadnih tvari raspršenih u vodi. Može sadržavati i parazite, viruse, patogene mikroorganizme te brojne toksične spojeve. Čovjek treba postati odgovorniji da vodu koju uzimamo iz okoliša za potrebe svoga života treba vratiti u okoliš ne narušavajući prirodnu ravnotežu i kvalitetu.²

U ovom radu ispitivan je utjecaj koncentracije mulja na obradu komunalne otpadne vode (KOV-a) membranskim bioreaktorom (MBR-om). Uzorak vode iz Čakovca korišten je na ultrafiltracijskoj (UF) ZeeWeed 1 (ZW-1) membrani i praćeni su parametri: mutnoća, električna provodnost (κ), pH vrijednost, ukupan ugljik (TC), ukupan dušik (TN), kemijska potrošnja kisika (KPK), biokemijska potrošnja kisika unutar 5 dana (BPK₅), koncentracija aktivnog mulja (MLSS) i ukupna suspendirana tvar (TSS).

2. OPĆI DIO

2.1. Otpadne vode

Otpadne tvari kao i otpadna energija zapravo su rezultat samih djelovanja ljudi koje završavaju kao nepoželjan i nekoristan otpad. Mogu se u prirodi naći u više oblika: kao tekućine, krutine ili plinovi. Otpadne vode su vrsta otpadnih tvari, a definiraju se kao kombinacija različitih otpada ili tekućina prenošenih vodom koji nastaju u kućanstvima i industrijama.³

Otpadnim vodama smatramo svu potencijalno onečišćenu industrijsku, kućansku, oborinsku ili neku drugu vodu. Njima je upotrebom na neki način promijenjen prvobitan sastav, odnosno njihove fizikalne, kemijske i mikrobiološke karakteristike. Sastavni su dio i hidrološkog ciklusa kojim se voda upotrijebljena za opskrbu stanovništva kanalizacijskim sustavom odvodi na pročišćavanje i vraća u okoliš.⁴

Najrasprostranjenijom vrstom otpadnih voda smatra se KOV. U nju svrstavamo industrijsku, kućansku (sanitarnu), oborinsku te procjednu otpadnu vodu.⁵

2.1.1. Industrijska otpadna voda

Vrsta nastala upotrebom vode u industrijskim i drugim proizvodnim pogonima. Različiti tehnološki procesi industrija u kojima nastaju uvjetuju i različite sastave otpadnih voda. Obzirom na to dijele se na biološki razgradive i biološki nerazgradive otpadne vode.⁴

Biološki razgradive su one koje se mogu miješati s gradskim otpadnim vodama i odvoditi zajedničkom kanalizacijom, a biološki nerazgradive se prije miješanja s gradskom otpadnom vodom moraju pročistiti. Prethodno pročišćavanje je važno kako bi se uklonile tvari koje sprečavaju biološku razgradnju, inhibitori koji onemogućuju rad uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) kao i eksplozivne, korozivne i zapaljive tvari koje mogu oštetiti kanalizacijske objekte i cijevi.⁶

Postojanjem veće količine dušika u otpadnoj vodi pretpostavlja se utjecaj industrije. Gradske otpadne vode mjere vrijednost pH od oko 7,0-7,5 dok ta vrijednost za otpadne vode u industriji može biti uglavnom veća, ali i manja od toga. Teški metali, visoki salinitet uz nagle oscilacije i povišena temperatura neke su od karakteristike industrijske otpadne vode.^{4,5}

2.1.2. Kućanska otpadna voda

Najzastupljenija vrsta otpadnih voda nastala zbog kućanskih aktivnosti, za zadovoljavanje svih neophodnih životnih funkcija. One zapravo nastaju pri upotrebi sanitarnih trošila vode kućanstava, industrija, uslužnih objekata i drugih pogona s postojećim sanitarnim čvorom.

Takve vode su onečišćene organskim tvarima, pa time im je najbitnija značajka biorazgradivost. Prema stupnju biorazgradnje dijele se na svježju, odstajalu i septičku vodu.

Svježja voda je ona u kojoj proces biorazgradnje još nije napredovao. U drugom stupnju biorazgradnje, odnosno kod odstajale vode sadržaj kisika je zanemariv, dok kod septičke (trule) vode biorazgradnja se odvija na anaerobni način, tj. proces je uznapredovao.

Također kućanske vode mogu se podijeliti na sive i crne vode. U sive vode ubrajamo one iz kupaonica, tuševa, praonica koje ne sadrže mnogo krutih tvari, pa zbog toga se mogu prenamijeniti za npr. zalijevanje vrtova. U crne vode ubrajamo otpadne vode iz kuhinje i sanitarnih čvorova.⁵

U usporedbi s vodovodnom vodom temperatura kućanske otpadne vode je povišena. Utjecaj na temperaturu ima sama uporaba tople vode u kućanstvu i zbog procesa biorazgradnje u kanalizacijskom sustavu. Prosječna temperatura iznosi od 11,6 do 20,5 °C.⁴

2.1.3. Oborinska otpadna voda

Ova vrsta otpadne vode smatra se uvjetno čistim vodama. One nisu onečišćene već zagađenje dolazi od padalina koje putem ispiru i otapaju atmosferu koja sadrži plinovite sastojke niske pH vrijednosti i kao rezultat daju kisele kiše.⁶

Zagađenje može doći i prolaskom oborinskih voda kroz tlo tretirano znatnih količinama pesticida, herbicida i umjetnih gnojiva na poljoprivrednim zemljištima.⁷

Najveći problem predstavljaju oborinske vode koje otječu izgrađenim gradskim površinama kojima izvor zagađenja je s prometnica, gusto naseljenih i industrijskih područja.⁸

2.1.4. Procjedna otpadna voda

Podzemne vode filtrirane tečenjem kroz slojeve zemlje nazivamo procjedne vode. Kod objekata na padini ili dubokih podruma odvodnja otpadnih voda rješava se procjeđivanjem

podzemne vode. Prikuplja se posebnim kanalizacijskim sustavom (drenažom) kojim se onda uključi na zajednički odvod.^{5,6}

2.2. Mulj

U postupcima pročišćavanja otpadnih voda se kao nusprodukt stvara mulj. Nastala količina ovisi o samom procesu pročišćavanja, a i o sastavu otpadne vode. Većim stupnjem pročišćavanja dobiju se i veće količine mulja. Kako bi se smanjio štetan utjecaj na okoliš potrebna je stalna obrada prije koje je bitno ustanoviti njegovu količinu, sastav i osnovne značajke. Obzirom na vrstu obrade razlikujemo primarni, sekundarni, tercijarni te aktivni mulj.^{5,9}

2.2.1. Primarni mulj

Ova vrsta mulja se izdvaja nakon prvog stupnja pročišćavanja, a sadrži anorganske tvari poput pijeska, karbonskih i kovinskih kovina i gline. Uz anorganske sadrži i organske tvari koje se dijele na lako i teško razgradive. U lako razgradive se ubrajaju masti, bjelančevine i ugljikohidrati, dok u teško razgradive vlakna i gume. Može sadržavati i žive organizme poput bakterija, gljivica i virusa.

2.2.2. Sekundarni mulj

Mulj izdvojen iz biološkog reaktora procesima aerobne i anaerobne razgradnje otopljenih organskih tvari. Najvećim dijelom sadrži bakterije i njihove ostatke. Količina samih bakterija ovisi o postupku pročišćavanja, uređaju, unosu zraka i starosti mulja.

2.2.3. Tercijarni mulj

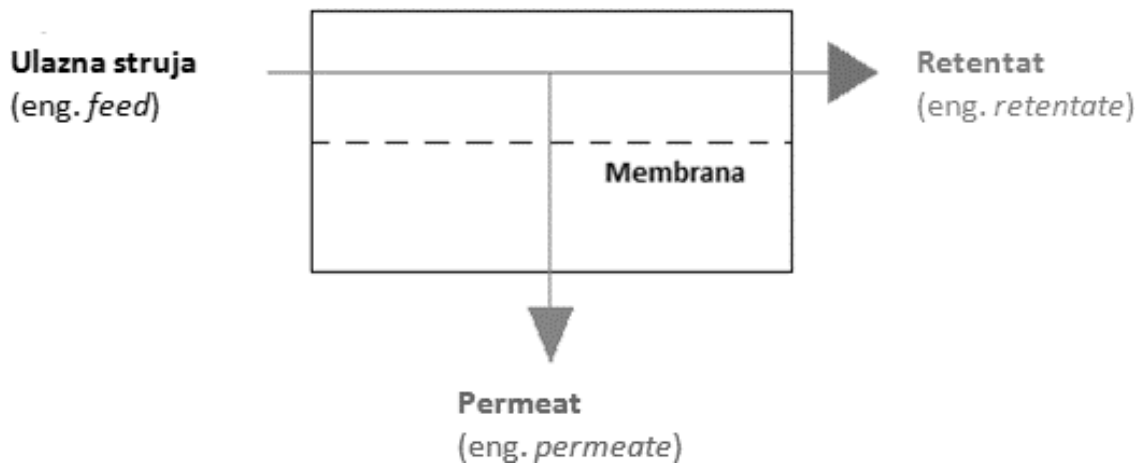
Tercijarni mulj se izdvaja u odvojenom trećem stupnju pročišćavanja. Sadrži ostatke reakcija dodanih kemikalija s otpadnom vodom i njezinim sadržajem te adsorbense sa sastojcima adsorbiranih iz otpadnih voda.⁵

2.2.4. Aktivni mulj

Nastaje međusobnim povezivanjem bakterija, kvasaca i algi različitih naboja sa suspendiranim česticama u nakupine zvane pahuljice ili flokule. Najzastupljeniji mikroorganizmi su bakterije. Takvo mnoštvo mikroorganizama se širi biološkim reaktorom, a unose se samom otpadnom vodom.^{5,9}

2.3. Membranski procesi

Membranske se procese može definirati kao separacijske kod kojih se prijenos kroz membranu događa kao rezultat pokretačke sile koja djeluje na komponentne u ulaznoj struji. Cilj ovakvog procesa je odvajanje sastojaka ulazne struje (pojne kapljevine) djelovanjem povišenog tlaka na permeat (smanjena koncentracija otopljenih tvari) i retentat (povećavana koncentracija otopljenih tvari). Prikaz ovakvog procesa dan je Slikom 1. Kod svakog procesa bitnu ulogu ima membrana koja ima sposobnost puno lakšeg prijenosa jedne komponente nego druge zbog razlike u fizikalnim i kemijskim svojstvima između komponente i membrane. Pokretačka sila može biti: razlika koncentracija (Δc), temperature (ΔT), tlakova (Δp) ili električnog potencijala (ΔE) s obje strane membrane. Dakle, membranski procesi se mogu koristiti u svrhe pročišćavanja otopina, suspenzija ili za potrebe njihovog koncentriranja.^{10, 11}



Slika 1. Membranski proces

2.3.1. Tlačni membranski procesi

Pokretačka sila tlačnog membranskog procesa predstavlja radni tlak. On uzrokuje prolazak otapala i različitih otopljenih molekula, dok druge molekule ne prolaze kroz membranu ovisno o strukturi i karakteristikama membrane. Obzirom na primijenjeni tlak razlikujemo mikrofiltraciju (MF), UF, nanofiltraciju (NF) i reverznu osmozu (RO). Osnovna razlika između ovih procesa je vrsta membrane i veličina pora. Tablicom 1. prikazane su osnovne razlike tlačnih separacijskih procesa. Mogu se koristiti u svrhu uklanjanja suspendiranih čestica, pa čak i za uklanjanje malih organskih spojeva i iona.^{11, 12}

Tablica 1. Tlačni separacijski procesi

Membranski separacijski proces	Područje tlakova (bar)	Mehanizam separacije	Veličina pora (nm)	Područje flukseva (L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹)
MF	0,1 do 2,0	Isključenje prema veličini	>50	>50
UF	1,0 do 5,0	Isključenje prema veličini	2 do 50	10 do 50
NF	5,0 do 20,0	Isključenje prema veličini, interakcija membrana-otopina, isključenje nabojem	<2	1,4 do 12
RO	10,0 do 60,0	Isključenje prema veličini, interakcija membrana-otopina	<2	0,05 do 1,4

MF radi po principu klasične filtracije, dok NF i RO rade na načelu difuzije uz porast tlaka. Prednosti membranskih separacija su kontinuirano izvođenje separacije, manji energetske troškovi, lako se kombiniraju s drugim procesima (hibridni procesi), membranska svojstva su varijabilna te nema potrebe za aditivima. Mane su im kratak životni vijek, niska selektivnost te membransko blokiranje.

2.3.2. UF

UF je proces između mikrofiltracije i nanofiltracije. Membrane koje se koriste proizvode se na bazi prirodnih ili sintetičkih makromolekularnih tvari. Veličina pora ovih membrana kreću se od 2 do 100 nm, a radni tlak ne prelazi 5 bar. Najviše se primjenjuju za koncentriranje makromolekularnih otopina gdje je potrebno zadržati veće molekule, a male prolaze kroz membranu. Važnu primjenu ima u prehrambenoj industriji, farmaceutskoj industriji, metalurgiji, tekstilnoj industriji.^{5, 11}

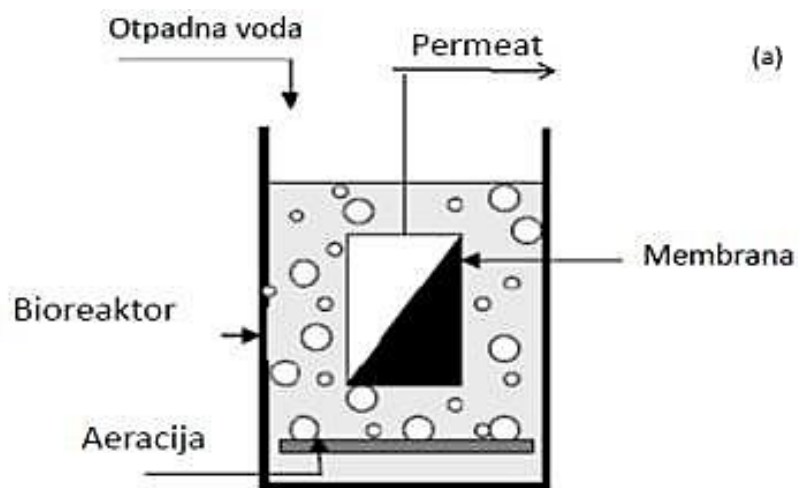
2.3.3. MBR

MBR je tehnologija koja pripada grupi periodičke nestacionarne bioobrade. Sustav u jednom procesu predstavlja kombinaciju biološke obrade s aktivnim muljem i membrane.

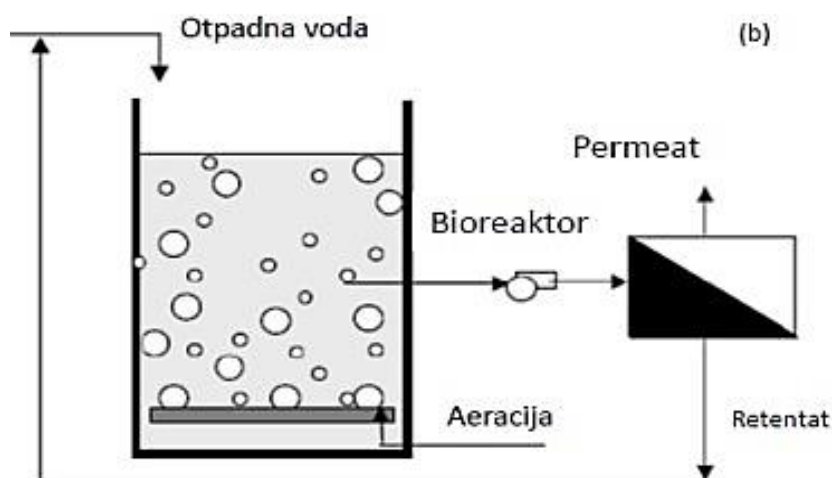
Nakon biološke obrade voda se propušta kroz, najčešće, ultrafiltracijske membrane, koje zadržavaju mikroorganizme i sve zaostale organske i anorganske tvari, a propuštaju vodu. Veličina pora takvih membrana iznosi između 10 nm i 0,4 μm . Ovakav reaktor može raditi pri većim koncentracijama mulja od čak 12 g L^{-1} , što znatno smanjuje volumen reaktora i proizvodnju mulja.¹³

MBR ima dvije konfiguracije:

1. MBR s membranom uronjenom u bioreaktor (Slika 2.)
2. MBR s tangencijalnim membranskim modulom izvan bioreaktora i povratom retentata u bioreaktor¹⁴ (Slika 3.)



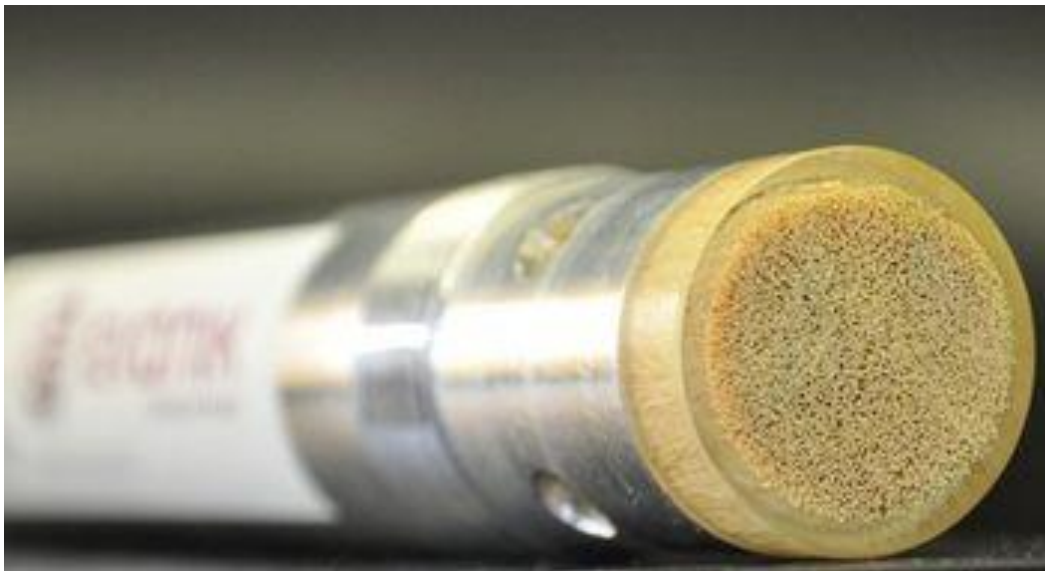
Slika 2. MBR s membranom uronjenom u bioreaktor



Slika 3. MBR s tangencijalnim membranskim modulom izvan bioreaktora i povratom retentata u bioreaktor

Danas postoji šest osnovnih modula membranskih modula koji se primjenjuju u procesima. Moduli se uglavnom razlikuju geometrijski na ravne ili cilindrične, a dijele se na: pločaste module / ravna platna (eng. *flat sheet* (FS)), module sa šupljim vlaknima (eng. *hollow fibre* (HF)), cijevne membranske module (MT), kapilarne module (CT), module s nabranim filter ulošcima (eng. *pleated filter cartridge* (FC)) i modul u obliku spiralnog namotaja (eng. *spiral-wound* (SW)). Od svih nabrojanih tipova, samo prve tri su pogodne za primjenu kod MBR uređaja.¹⁵

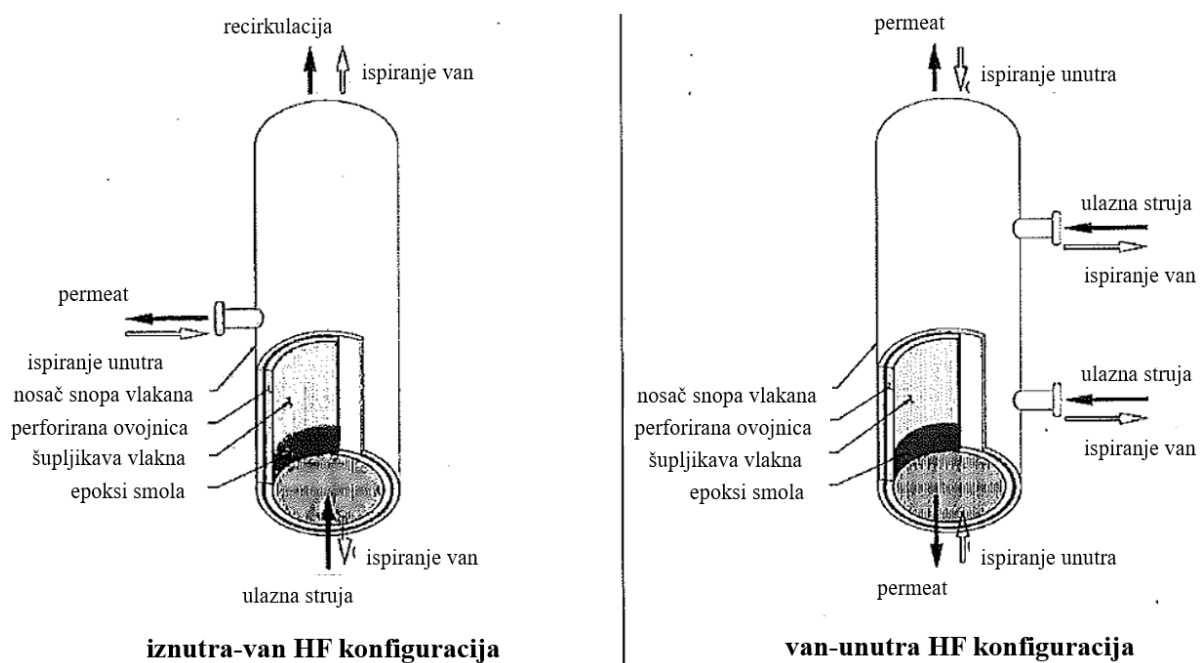
HF čine membrane tubularnog oblika kojima su šuplja vlakna smještena u tlačnoj posudi. Krajevi vlakana učvršćeni su na čelne ploče epoksi smole, tako da ulazna voda dolazi na snop vlakana izvana, prolazi kroz vlakna, a permeat na čeonim stranama izlazi iz njih. Zbog veće gustoće pakiranja od pločastih membrana učinkovitost separacije im je veća. Membrane sa šupljim vlaknima mogu se sastojati od nekoliko stotina do preko 10 000 vlakana. Vanjski promjer im je između 0,5 i 2,0 mm, a unutarnji od 0,3 do 1,0 mm. Debljina stijenke vlakna je od 0,1 do 0,6 mm, dok je duljina vlakana i do 2 m.¹⁶



Slika 4. Membrana sa šupljim vlaknima

Kod UF membranskih modula sa šupljim vlaknima, obzirom na separacijski sloj koji se nalazi na unutarnjoj ili vanjskoj površini, razlikujemo način rada iznutra-van (eng. *inside-out*) i van-unutra (eng. *outside-in*) (Slika 5). Modul iznutra-van znači da je separacijski sloj na unutarnjoj površini vlakana.

U tom slučaju ulazna struja ulazi u središte vlakana i radijalno se filtrira kroz vlaknasti zid dok se permeat skuplja izvan vlakana. Tada ulazna struja može ući u središte vlakana na bilo kojem kraju modula, dok permeat izlazi kroz otvor koji se nalazi u sredini ili na kraju modula. Prilikom rada van-unutra, ulazna struja ulazi izvan vlakana, a permeat se skuplja u sredini vlakana. Ulazna struja obično ulazi u modul kroz ulazni otvor koji se nalazi u sredini i filtrira se u sredinu vlakana, a permeat izlazi kroz otvor na jednom kraju modula. Xu i sur.¹⁷ su u svom radu prikazali da je permeabilnost modula izvana-van veća nego u slučaju modula van-unutra. Većina sustava šupljih vlakana djeluje u načinu izravne filtracije te se povremeno ispiraju radi uklanjanja akumuliranih čestica.



Slika 5. Shematski prikaz HF konfiguracija

Pločasti modul / ravna platna (FS) je obično pravokutan. Upotrebljava se uglavnom u konfiguraciji s membranom unutar reaktora. Primjenjuje se za pročišćavanje industrijske i kućanske otpadne vode.

Cijevni membranski moduli (MT) se upotrebljavaju samo u reaktoru s tangencijalnim membranskim modulom izvan bioreaktora. Postoje dva tipa ovakvog modula: serijski spojen modul spiralnog oblika i vertikalno postavljeni modul pločastog tipa.^{18, 19}

Osnovne karakteristike MBR-a:

- MLSS

MLSS (eng. *Mixed Liquor Suspended Solids*) predstavlja biološki nerazgradive tvari i mikroorganizme suspendirane u mješovitoj tekućini u bioreaktoru. Obično se iskazuje u $g L^{-1}$, a formula po kojoj se izračunava prikazana je jednadžbom 1.

$$MLSS = \frac{\text{masa mulja [g]}}{\text{volumen [L]}}, \quad (1)$$

gdje se masa mulja dobije oduzimanjem mase filter papira s osušenim muljem i mase praznog suhog filter papira, a volumen je količina filtriranog uzorka.

- Hidrauličko vrijeme zadržavanja (HRT)

HRT (eng. *Hydraulic Retention Time*) se računa pomoću jednadžbe 2 i predstavlja vrijeme koje otpadna voda provede u kontaktu s aktivnim muljem u bioreaktoru. Time se omogućuje sorpcija i biološka razgradnja

$$HRT = \frac{\text{volumen [L]}}{\text{protok [Lmin}^{-1}\text{]}}, \quad (2)$$

gdje je volumen (L) volumen reaktora, a protok ($L \text{ min}^{-1}$) je protok kroz korištenu membranu.

Povećanjem HRT-a uglavnom se postiže bolje uklanjanje i samim time kvalitetniji/čišći permeat, dok smanjenjem dolazi do bržeg onečišćenja membrana reaktora i time manjeg uklanjanja.

- Vrijeme zadržavanja mulja (SRT)

Vrijeme koje aktivni mulj provede u bioreaktoru naziva se vrijeme zadržavanja mulja (SRT, eng. *Sludge Retention Time*), odnosno starost mulja. Smatra se jednim od najbitnijih parametara pri obradi otpadne vode MBR-om.

Kao relativno nova tehnologija, MBR uređaji su često podcijenjeni u odnosu na dobro poznate tehnologije. Unatoč takvim stavovima, MBR tehnologija postaje sve više prihvaćena, što kroz brojna istraživanja i poboljšanja MBR uređaja tako i kroz sve širu primjenu. Najvažniju ulogu ima u obradi otpadnih voda. Značajna prednost je zadržavanje biološki krutih tvari ili taloga u reaktoru. To znači da se SRT može kontrolirati neovisno o HRT-u i time se u reaktoru

dopušta viši MLSS. MBR je pogodan i zbog svoje kompaktnosti i male veličine, jednostavnosti, manje količine viška mulja (time i manjih troškova), kvalitetom permeata što omogućuje uporabu otpadne vode u svrhu navodnjavanja, zalijevanja i slično.^{15, 20}

Grelier i sur. (2005)²¹ su istraživali utjecaj SRT-a na radne karakteristike membranskih bioreaktora. Tri ista bioreaktora su radila u različitim vremenima zadržavanja mulja od 8, 15 i 40 dana za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda. Ovo istraživanje je bilo podijeljeno u dvije faze: u prvoj je održavan HRT u sva tri reaktora od 12 h, a u drugoj je MLSS bio u sva tri reaktora od 7-8 g L⁻¹. Rađena je i kemijska analiza ulazne otpadne vode i permeata. Analizirala se KPK, koncentracija nitrata i TSS. Rezultati u prvoj fazi dali su stopu razgradnje KPK-a od 95 %, a za nitrata od 98-99 %. U drugoj fazi uočeno je da je za najmanje vrijeme zadržavanja stopa uklanjanja nitrata iznosila samo 14 %. Kao rezultat istraživanja je dokazano kako karakteristike membrane manje ovise o MLSS nego o SRT-u. Tako je vrijeme zadržavanja od 40 dana pokazalo najbolje rezultate, no manje je primjenjivo u urbanim postrojenjima radi potrebe za većim volumenom reaktora čime bi se smanjila ekonomska učinkovitost. Nasuprot tome, SRT od 8 dana rezultiralo je najvećim blokiranjem uzrokovanim česticama i koloidima. Obzirom na važnost učinkovitosti filtracije kao ekonomskog čimbenika MBR procesa, SRT bi optimalno trebao biti između 15 i 40 dana.

Sun i sur. (2018)²² su razvili novi MBR sustav kombinirajući MBR s aktivnim muljem i alge u jednom reaktoru. Radili su s četiri reaktora napravljenih od prozirnog PVC-a radnog volumena od 6,5 L. Reaktori su se razlikovali po omjeru algi i mulja od 1:10, 1:5 i 1:1. Zaključeno je da najveću djelotvornost alge imaju na uklanjanju KPK-a, TN i fosfora u reaktoru omjera 1:5, dok najviše uklonjenih nitrata, nitrita i amonijevih iona u reaktoru omjera 1:1. U usporedbi s klasičnim MBR-om najveća razlika se pokazuje kod reaktora omjera 1:1. Rezultati su pokazali da različiti omjeri algi i mulja imaju veliki utjecaj na pročišćavanje otpadnih voda kao i na onečišćenje membrana. Omjer od 1:5 daje najbolje rezultate uklanjanja.

Capodici i sur. (2019)²³ su uspoređivali učinkovitost prijenosa kisika u MBR-u. Procijenili su ga koeficijentom prijenosa pod različitim TSS-om, viskoznošću i veličini taloga. Dokazali su da koeficijent prijenosa kisika opada s TSS-om u usporedbi s uobičajenim MLSS-om. Primijećeno je da kada je TSS veći od 5 g L⁻¹ koeficijent prijenosa kisika je usporediv s

koeficijentom kod uobičajenog MBR-a. Time se zaključilo da na učinkovitost o prijenosu kisika u najvećoj mjeri utječe TSS.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Materijali

3.1.1. KOV i aktivni mulj

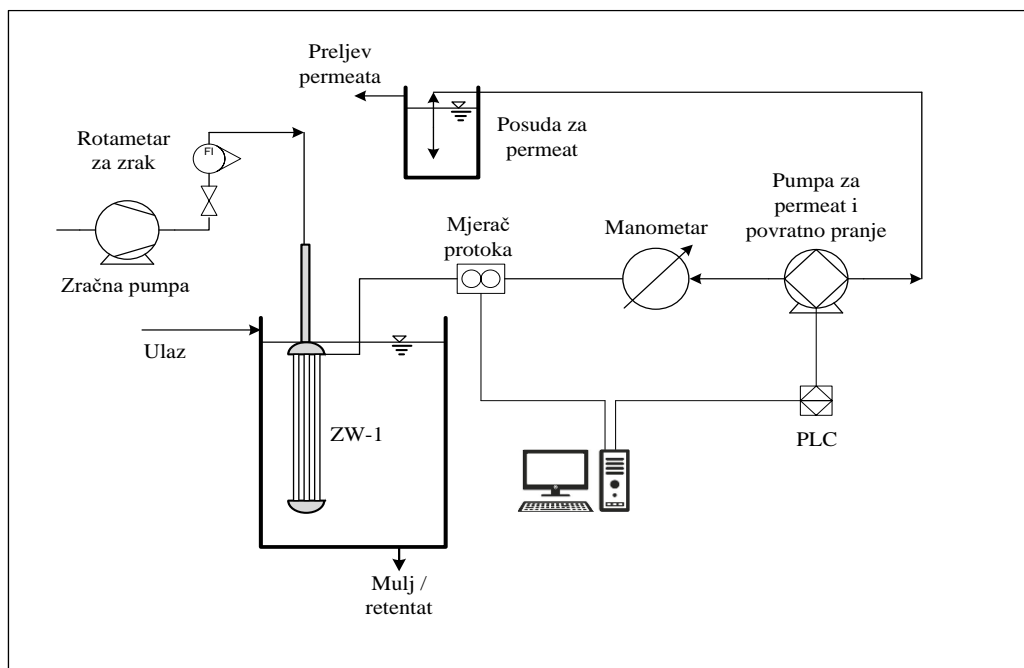
Za eksperimentalni dio ovog rada korišten je KOV i aktivni mulj dobiven prilikom uzorkovanja na uređaju za pročišćavanje otpadne vode aglomeracije Čakovec. Na sustav za odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda osim grada Čakovca, uključeno je i pet općina: Nedelišće, Pribislavec, Strahoninec, Sveti Juraj na Bregu i Šenkovec. KOV čine tehnološke, oborinske i otpadne vode kućanstva i gospodarstva koje se kanalizacijskim sustavom odvede do uređaja za pročišćavanje. Udio od 1/3 čine industrijske, a 2/3 otpadne vode iz kućanstva. Realni uzorak za ovaj rad uzrokovan je nakon grubih rešetki i pjeskolova/mastolova na mjestu označenom na Slici 6.



Slika 6. Mjesto uzorkovanja na UPOV-u aglomeracije Čakovec

3.1.1. Uredaj MBR

Za obradu korišten je laboratorijski MBR čija tehnologija pripada grupi separacijskih procesa s biološkom obradom s aktivnim muljem. Uređaj je radnog volumena 5 L s uronjenom UF membranom, opremljen sensorima za temperaturu, tlak i protok. Za mjerenje protoka korišten je mjerač Cole Parmer (C3290843). Na Slici 7. vidljiv je shematski prikaz reaktora.



Slika 7. Shematski prikaz laboratorijskog MBR sustava

3.1.2. Membrana

Separacija je provedena UF membranom sa šupljikavim vlaknima ZW-1 površine 0,046 m² i nominalnog promjera pora od 0,02 μm. Karakteristike membrane od GE Water & Process Technologies (Mađarska) prikazane su u Tablici 2.

Tablica 2. Karakteristike korištene membrane zadane od proizvođača

Karakteristike	
radni tlak [kPa]	-90 do 90
maksimalna radna temperatura [°C]	40
dozvoljena pH vrijednost	5,0 do 10,0
promjer pora [μm]	0,02
dozvoljena pH vrijednost prilikom čišćenja	2,0 do 12,0
maksimalna koncentracija klora pri čišćenju [mg L ⁻¹]	1000
dozvoljen fluks [m ³ dan ⁻¹]	55 do 110
materijal	poli(viniliden-fluorid) (PVDF)
MWCO [Da]	000

3.1.3. Instrumenti

- Turbidimetrom WTW Turb 430 IR/Set (Njemačka) mjerena je mutnoća [NTU].
- Multimetrom SI Analytics HandyLab 680 (Njemačka) određivana je κ [$\mu\text{S cm}^{-1}$] i pH vrijednost.

Vrijednosti KPK [$\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$], TN [mg L^{-1}] i BPK₅ [$\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$] određivane su spektrofotometrom Hach Lange DR 3900 (Njemačka). Kivete s uzorkom za određivanje KPK i TN prethodno su stavljene u termostat Hach Lange HT 200S (Njemačka) i grijane 15 min na 170 °C.

- Shimadzu TOC-Vws analizatorom ugljika (Japan) određivan je TC [mg C L^{-1}], a uzorak je prethodno profiltriran kroz celulozno acetatne filtre Chromafil Xtra CA-45/25 (Macherey-Nagel, Njemačka) veličine pora od 0,45 μm .

U svrhu određivanja MLSS-a i TSS-a filtrat je vagan na analitičkoj vagi KERN ALS 220-4 (Njemačka).

3.2. Metode ispitivanja

Prema standardnim metodama ispitivanja vode napravljena su mjerenje mutnoće, pH vrijednosti, KPK-a, TC-a, κ , BPK₅ i TN za ulazni uzorak te permeat. Uz navedene analize provedena je i analiza mulja za određivanje MLSS-a i TSS-a.

3.2.1. Određivanje MLSS-a i TSS-a

U svrhu određivanja masene koncentracije mulja i suspendiranih čestica provedeno je i ispitivanje aktivnog mulja. Prvo su se na 60 min pohranili filter papiri za filtraciju aktivnog mulja i suspendiranih čestica (GH Polypro, 47 mm, 0,45 μm) u eksikatoru. Potom je provedena vakuumska filtracija 5-20 mL uzorka, ovisno o vrsti uzorka. Potom je dobiveni filtrat sušen u sušioniku na 105 °C u vremenu od 60 min i ponovno stavljen u eksikator na isto vremensko razdoblje. Nakon eksikacije filtrat je vagan na analitičkoj vagi iz čije se mase dobiva vrijednost masene koncentracije mulja [g L^{-1}] i suspendiranih čestica [mg L^{-1}].

$$\gamma \text{ [g L}^{-1}\text{]} = \frac{\text{masa mulja [g]}}{\text{volumen uzorka [L]}} \quad (3)$$

4. REZULTATI I RASPRAVA

Cilj ovog rada bio je odrediti utjecaj MLSS-a na obradu KOV-a MBR-om. Ispitivanje je provedeno kroz tri perioda (tri tjedna), gdje je svaki period imao određenu vrijednost MLSS-a. Mjerali su se svakodnevno pH vrijednost, mutnoća, κ , TC, KPK, BPK₅ i TN.

U Tablici 3. prikazane su srednje vrijednosti parametara dobivenih ispitivanjem uz pripadajuće faktore separacije (*R*) za Period I. gdje je vrijednost MLSS-a bila 22,22 g L⁻¹.

Tablica 3. Dobivene srednje vrijednosti i *R* za ispitivane parametre za Period I.

Parametar	KOV	Permeat	<i>R</i> / %
Mutnoća	353 ± 21,01	0,98 ± 1,11	99,72
TSS [mg L ⁻¹]	516 ± 27,84	0	>99,99
κ [μs cm ⁻¹]	1641,40 ± 45,30	1241,40 ± 39,39	24,37
pH	7,51 ± 3,06	7,89 ± 3,14	5,10
TN [mg N L ⁻¹]	96,64 ± 10,99	13,34 ± 4,08	86,20
TC [mg C L ⁻¹]	217,70 ± 16,50	85,26 ± 10,32	60,84
KPK [mg O ₂ L ⁻¹]	1137,40 ± 37,71	31,82 ± 6,31	97,20
BPK ₅ [mg O ₂ L ⁻¹]	1717,40 ± 46,33	55,20 ± 8,31	96,79

Iz navedenih vrijednosti uočava se smanjenje mutnoće s 353 NTU na 0,98 NTU točnije za izvrsnih 99,72 % i smanjenje TSS-a za >99,99 %. To potvrđuje da je MBR proces iznimno efikasan u uklanjanju suspendiranih čestica i koloida koji uglavnom stvaraju mutnoću što su dokazali Matošić i sur.²⁴ kojima je mutnoća permeata ispod 0,1 NTU što je usporedivo s regulativama vode za piće. Električna provodnost je smanjena za niskih 24,37 % što je moguće zbog UF membrane u sklopu MBR-a koja ima velike pora kojima nije moguće zadržati ionsku vrstu iz voda²⁵, dok se pH vrijednost permeata povećala za 5,10 %. Veliki postotak uklanjanja organske tvari vidljiv je iz smanjenja KPK i BPK₅ za 97,20 %, odnosno 96,79 %. Razlog tomu je iznimno dobra učinkovitost MBR procesa što je vidljivo i kod Hoinkis i sur.²⁶ gdje je uklanjanje veće od 90 %. TN smanjen je za 86,20 %, s 96,64 ± 10,99 mg N L⁻¹ na 13,34 ± 4,08 mg N L⁻¹, a TC s 217,70 ± 16,50 mg C L⁻¹ na 85,26 ± 10,32 mg C L⁻¹ točnije za 60,84 %.

Iz Tablice 4. koja prikazuje srednje vrijednosti i *R* dobivenih ispitivanjem u Perioda II. možemo zaključiti da je smanjenjem MLSS-a na 19,95 g L⁻¹ došlo do izmjena u vidu uklanjanja TC-a. Naime vrijednost TC-a se smanjila za većih 73,83 % što je za 13 % više nego u prethodnom periodu. Smanjenje TN-a je bilo manje za 7 % od Perioda II.

Tablica 4. Dobivene srednje vrijednosti i *R* za ispitivane parametre za Period II.

Parametar	KOV	Permeat	<i>R</i> / %
Mutnoća	270,20 ± 18,38	0,77 ± 0,98	99,72
TSS [mg L ⁻¹]	1510 ± 47,59	0	>99,99
κ [μ s cm ⁻¹]	1567,40 ± 44,26	1182 ± 38,44	24,44
pH	7,18 ± 2,99	7,75 ± 3,11	7,94
TN [mg N L ⁻¹]	164,96 ± 14,36	33,50 ± 6,47	79,69
TC [mg C L ⁻¹]	271,42 ± 18,42	71,03 ± 9,42	73,83
KPK [mg O ₂ L ⁻¹]	2986,60 ± 61,10	31,22 ± 6,25	98,95
BPK ₅ [mg O ₂ L ⁻¹]	1988 ± 49,85	38,60 ± 6,95	98,06

Vidljiv je isti postotak smanjenja mutnoće od 99,72 %, κ od 24,44 %, neznatno povećanje pH vrijednosti i smanjenje TSS-a za >99,99 %. Za KPK i BPK₅ dobiven je očekivano visoki postotak smanjenja iznad 98 % kao i kod Perioda I.

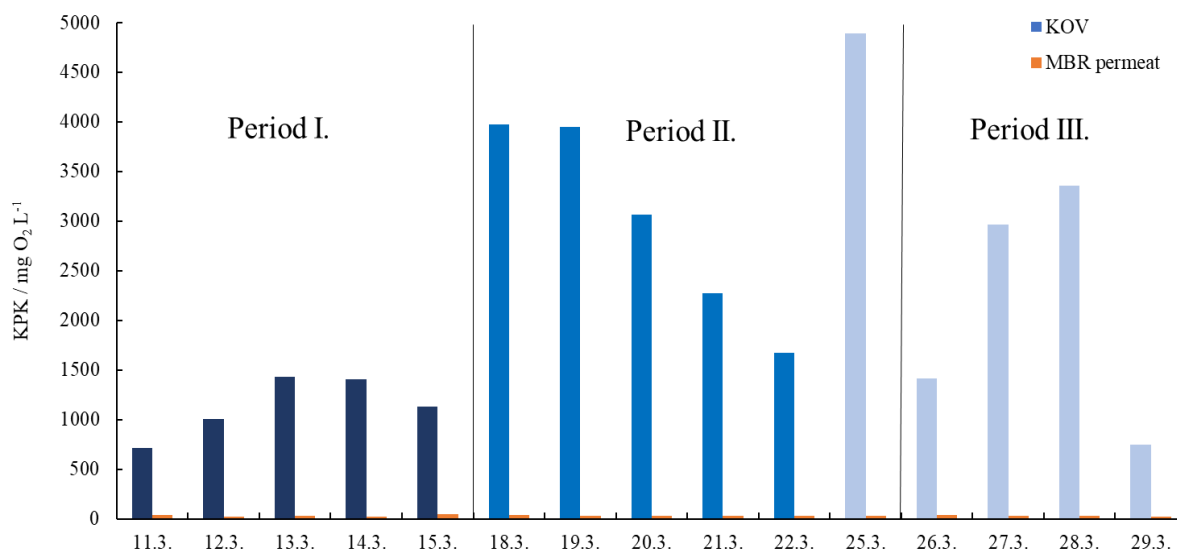
U periodu III. MLSS je bio najniži i iznosio je 6,95 g L⁻¹. Za posljednji period mjerenja srednje vrijednosti su dane Tablicom 5.

Mjerenje uz najnižu vrijednost MLSS-a dalo je rezultate smanjenja mutnoće, κ , TSS-a i povećanje pH vrijednosti. Vrijednost TN se smanjila za 63,33 %, dok se TC smanjio za 83,87 %. Kod KPK i BPK₅ opet se ponovilo uspješno uklanjanje od 98,95 % i 99,10 %.

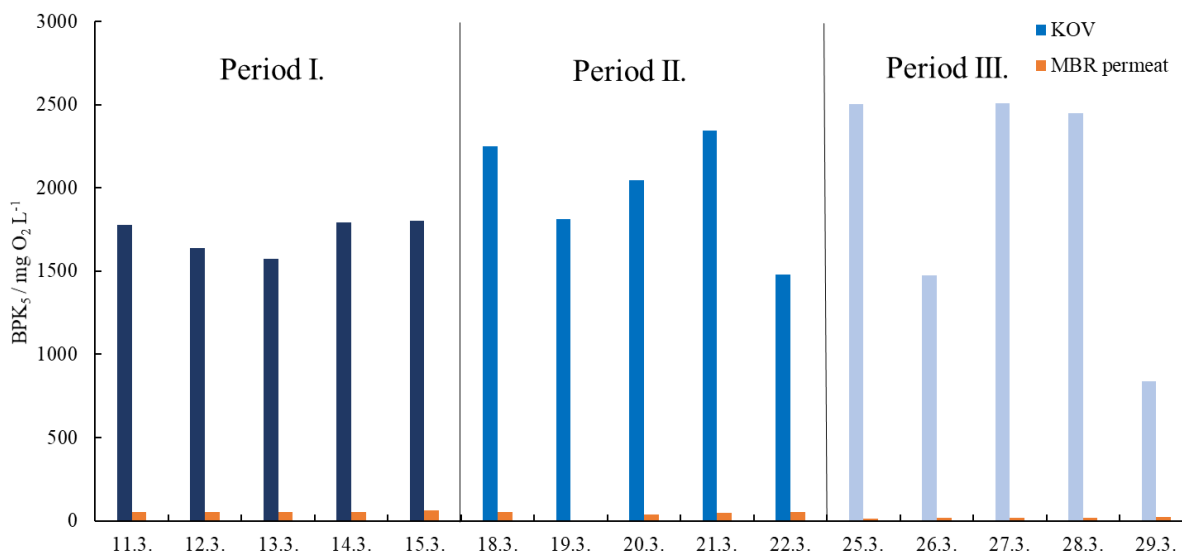
Tablica 5. Dobivene srednje vrijednosti i R za ispitivane parametre za Period III.

Parametar	KOV	Permeat	R / %
Mutnoća	194,80 ± 15,60	1,00 ± 1,12	99,49
TSS [mg L ⁻¹]	1365 ± 45,25	0	>99,99
κ [μs cm ⁻¹]	1467,40 ± 42,83	1184,40 ± 38,47	19,29
pH	7,01 ± 2,96	7,86 ± 3,14	12,15
TN [mg N L ⁻¹]	148,46 ± 13,62	54,44 ± 8,25	63,33
TC [mg C L ⁻¹]	356,82 ± 21,12	57,57 ± 8,48	83,87
KPK [mg O ₂ L ⁻¹]	2675,20 ± 57,83	28,20 ± 5,92	98,95
BPK ₅ [mg O ₂ L ⁻¹]	1955 ± 49,43	17,60 ± 4,69	99,10

Slikama 8. i 9. dan je grafički prikaz rezultata KPK i BPK₅ za KOV i MBR permeat za sva tri perioda tokom provođenja ispitivanja. Vidljive su velike fluktuacije u prikazanim vrijednostima u ulaznoj otopini i pokazuje da sastav ulazne otopine uvelike ovisi o trenutnim aktivnostima u području gdje se UPOV nalazi. KPK je varirao od 716 do 4892 mg O₂ L⁻¹, a BPK₅ između 837 i 2509 mg O₂ L⁻¹.



Slika 8. Grafički prikaz ovisnosti KPK za KOV i MBR permeat za sva tri perioda ispitivanja



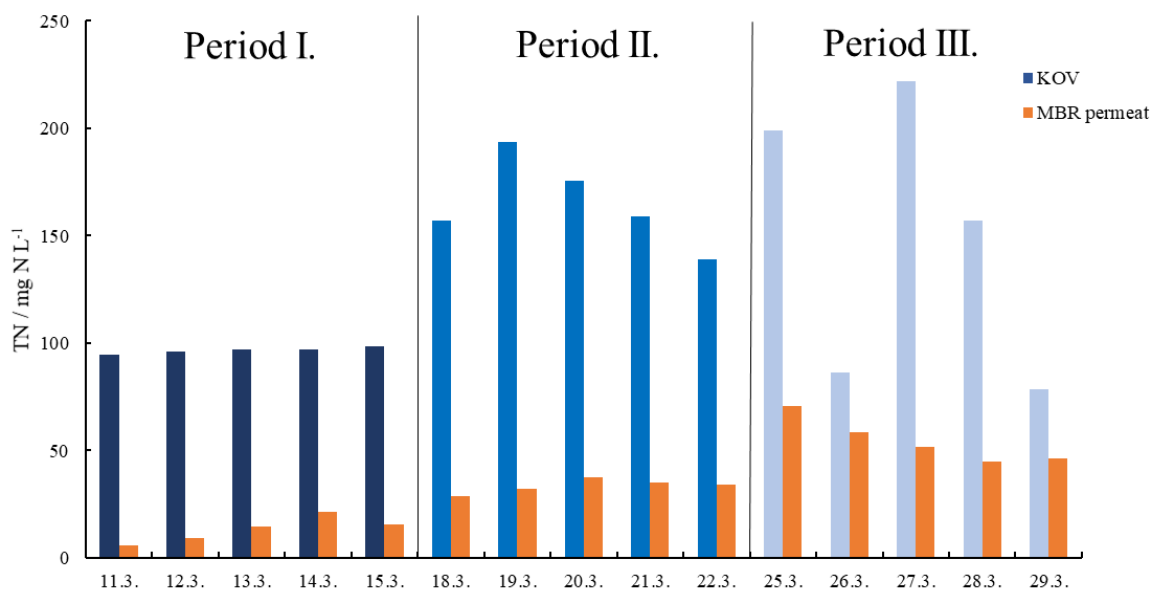
Slika 9. Grafički prikaz ovisnosti BPK₅ za KOV i MBR permeat za sva tri perioda ispitivanja

Potrošnja kisika vrlo je važan pokazatelj kvalitete otpadne vode. S obzirom na to da veće vrijednosti KPK i BPK₅ ukazuju na viši sadržaj organske tvari možemo zaključiti da je MBR proces s visokom učinkovitošću uklonio oksidirajuće spojeve iz KOV-a s obzirom da je iz Slika 8. i 9. vidljivo vrlo visoko smanjenje vrijednosti KPK (97,20 % za Period I., 98,95 % za Period II. i 98,95 % za Period III.) i BPK₅ (96,79 % za Period I., 98,06 % za Period II. i 99,10 % za Period III.). Uz vrlo visoko uklanjanje važno je napomenuti da je smanjenje KPK kroz tri perioda bilo konstantno, tj. nije ovisilo o koncentraciji u ulaznoj otopini. Kod BPK₅ uočava se poboljšanje uklanjanja obzirom na smanjenje MLSS-a u ulaznoj otopini kroz tri perioda ispitivanja. MLSS ima utjecaj na prijenos kisika i učinkovitost obrade, zato je smanjenjem MLSS-a, učinkovitost uklanjanja kisika bila veća. Prijenos kisika ima veliku ulogu kod metabolizma mikroorganizama u mulju jer je neophodan za njihovo odvijanje. Problem je što kod obrade voda veći MLSS smanjuje učinkovitost prijenosa kisika.¹⁴

Visoka učinkovitost uklanjanja organske tvari MBR-om obično se objašnjava dobrom mikrobnom aktivnošću i učinkovitim uklanjanjem suspendiranih tvari UF membranom koja se najčešće koristi.²⁴

Tran i sur. (2019)²⁷ dobili su uporabom MBR-a i NF-a stalno visoki postotak uklanjanja organskih tvari. Također MBR-om s reverzibilnom osmozom Chen i sur. (2004)²⁸ dobili su kako se KPK i BPK₅ smanjio preko 97 % što nam ukazuje da MBR kao tehnologija daje izvrsne rezultate u uklanjanju organskih tvari.

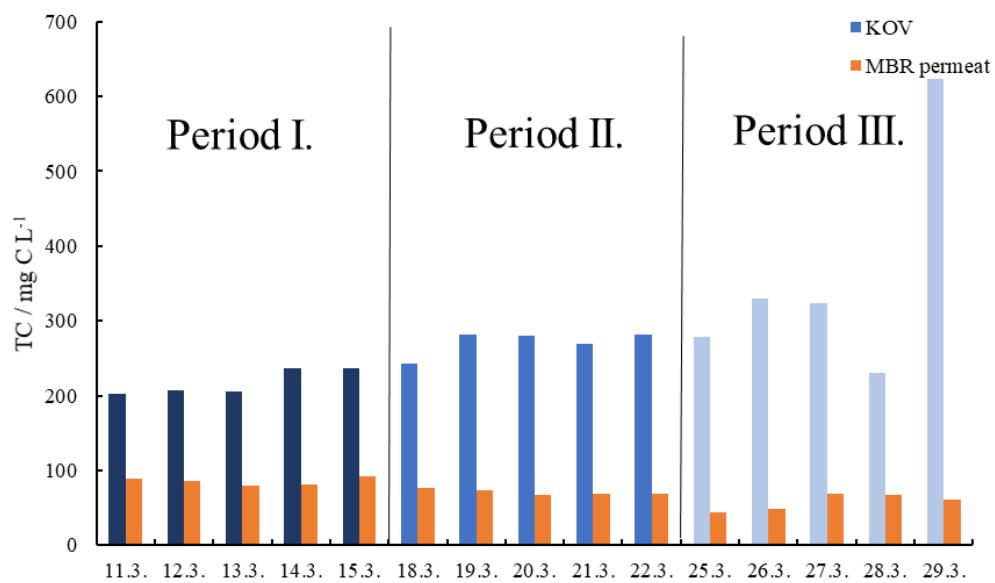
Na Slici 10. prikazane su koncentracije TN-a za KOV i MBR permeat za sva tri perioda istraživanja. Smanjenje TN-a u Periodu I. bilo je za 86,20 %, s $96,64 \pm 10,99 \text{ mg N L}^{-1}$ na $13,34 \pm 4,08 \text{ mg N L}^{-1}$, Periodu II. za 76,69 %, s $164,96 \pm 14,36 \text{ mg N L}^{-1}$ na $33,50 \pm 6,47 \text{ mg N L}^{-1}$ i u Periodu III. za 63,33 %, s $148,46 \pm 13,62 \text{ mg N L}^{-1}$ na $54,44 \pm 8,25 \text{ mg N L}^{-1}$. Obzirom na koncentraciju u ulaznoj otopini, vidljivo je da smanjenju TN-a više pogoduje viša vrijednost MLSS-a.



Slika 10. Grafički prikaz ovisnosti TN za KOV i MBR permeat za sva tri perioda ispitivanja

To znači da je koncentracija TN u permeatu rasla, a to je posljedica veće količine prisutnog organskog dušika u mulju. Živi mikroorganizmi sadržani u mulju troše dušik za svoj rast, a smanjenjem MLSS-a smanjuje se i potreba za dušikom. Tako su i Xu i sur. (2016)²⁹ dobili smanjenje učinkovitosti uklanjanja dušika smanjenjem HRT-a.

Na Slici 11. prikazane su koncentracije TC-a za KOV i MBR permeat za sva tri perioda istraživanja. Također su dobivene velike razlike između pojedinih perioda i unutar perioda, osim u Periodu I. gdje ja ulazna koncentracija bila slična. Smanjenje TC-a u Periodu I. bilo je za 60,84 %, s $217,70 \pm 16,50 \text{ mg C L}^{-1}$ na $85,26 \pm 10,32 \text{ mg C L}^{-1}$, Periodu II. za 73,83 %, s $271,42 \pm 18,42 \text{ mg C L}^{-1}$ na $71,03 \pm 9,42 \text{ mg C L}^{-1}$ i u Periodu III. za 83,87 %, s $356,82 \pm 21,12 \text{ mg C L}^{-1}$ na $57,57 \pm 8,48 \text{ mg C L}^{-1}$. Obzirom na koncentraciju u ulaznoj otopini, vidljivo je da uklanjanju više pogoduje niža vrijednost MLSS-a.



Slika 11. Grafički prikaz ovisnosti TC za KOV i MBR permeat za sva tri perioda ispitivanja

5. ZAKLJUČAK

Obradom KOV-a MBR-om u svrhu ispitivanja utjecaja MLSS-a na samu obradu dobiveni su sljedeći rezultati:

- Pri MLSS-u od $22,22 \text{ g L}^{-1}$ mutnoća se smanjila za 99,72 %, TSS >99,99 %, κ za 24,37 %, a pH vrijednost permeata povećala za 5,10 %. TN se smanjio za 86,20 %, TC za 60,84 %, a KPK i BPK₅ za 97,20 %, odnosno 96,79 %.
- Pri MLSS-u od $19,95 \text{ g L}^{-1}$ smanjena je mutnoća za 99,72 %, TSS >99,99 %, κ za 24,59 % i pH vrijednost se povećala za 7,94 %. Smanjio se TN za 79,69 % i TC za 73,83 %. Za KPK i BPK₅ dobiveni su rezultati od 98,95 % i 98,05 %.
- Pri MLSS-u od $6,95 \text{ g L}^{-1}$ dobiveno je da se mutnoća smanjila za 99,49 %, TSS >99,99 %, κ za 19,29 % i pH povećao za 12,15 %. Vrijednost TN se smanjila za 63,33 %, TC za 83,87 %, dok su KPK i BPK₅ dali rezultate od 98,95 % i 99,10 %.
- Dakle smanjenjem koncentracije mulja došlo je do boljeg uklanjanja organske tvari. MLSS ima utjecaj na prijenos kisika i učinkovitost obrade, zato je smanjenjem MLSS-a, učinkovitost uklanjanja kisika bila veća.
- Uklanjanju ugljika pogodovao je niži MLSS, dok je viša koncentracija bolje utjecala na uklanjanje dušika iz KOV-a.
- Mutnoća je tijekom sva tri perioda imala sličan rezultat, dok κ u manjoj mjeri pogoduje viši MLSS. Za pH vrijednost uočava se najveće povišenje pri najmanjem MLSS-u.

6. LITERATURA

1. De Souza Torres, K., Winter, O.C., The when and where of water in the history of the Universe, CEFET-MG, Brazil (2018) 47-73
2. Gunder, B., The membrane-coupled activated sludge proces sin municipal wastewater tretment, Technomic, Lancaster (2000)
3. Tchobanoglous G., Burton L. F., Stensel D. H., Metcalf & Eddy, Inc.: Wastewater Engineering Treatment and Reuse, McGraw-Hill Companies, Inc. (2003) 10-20
4. Tušar, B.: Ispuštanje i pročišćavanje otpadnih voda, Croatia knjiga, Zagreb (2004) 13-27, 41-47
5. Tušar, B.: Pročišćavanje otpadnih voda, Kigen d.o.o. i Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb (2009) 51-121, 273-315
6. Glancer-Šoljan, M., Landeka Dragičević, T., Šoljan, V., Ban, S. Biološka obrada otpadnih voda–Interna skripta, Kugler d.o.o., Zagreb (2001)
7. Tedeschi S.: Zaštita voda, HDGI, Zagreb (1997) 172-183
8. Margeta J. : Oborinske i otpadne vode: teret onečišćenja i mjere zaštite, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split (2007)
9. <https://www.britannica.com/technology/activated-sludge-method> (pristupljeno: 20. kolovoza 2019.)
10. Radoš, J. Čišćenje NF/RO membrana nakon adsorpcije alendazola na membrane, Završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, (2016)
11. Košutić, K., Membranske tehnologije obrade voda, Zbirka nastavnih tekstova, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu (2014)
12. Harcum, S., Biologically Inspired Textiles, Woodhead Publishng Series in Textiles, (2008) 26-43.
13. Delegado, S., Villarroel, R., González, E., Morales, M. Aerobic membrane bioreactor for wastewater treatment – performance under substrate – limited condiotions, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemistry, University of La Laguna, Španjolska
14. Matošić, M., Membranski bioreaktori u zaštiti okoliša, Interna skripta, Zagreb (2014)
15. Serdarević, A., Razvoj i primjena MBR tehnologije u procesu prečišćavanja otpadnih voda, Naučni rad, Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu (2014)

16. <https://www.mrwa.com/WaterWorksMnl/Chapter%2019%20Membrane%20Filtration.pdf> (12. rujna 2019.)
17. Xu, J., Ruan, G., Gao, X., Pan, X., Su, B., Gao, C., Pilot study of inside-out and outside-in hollow fiber UF modules as direct pretreatment of seawater at low temperature for reverse osmosis. *Desalination*, Kina (2008) 219(1-3), 179–189
18. Mulder, M. *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, (1996) 394-400
19. <https://ips-konzalting.hr/page/wwtptehnologije> (25. kolovoza 2019.)
20. Radoš, J., Obrada komunalne otpadne vode membranskim tehnologijama u svrhu navodnjavanja, Diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagreb(2018)
21. Grelier, P., Rosenberger, S., Tazi-Pain, A., Influence of sludge retention time on membrane bioreactor hydraulic performance, Membrane Bioreactor Department, Anjou Recherche, chemin de la Digue, Francuska (2005)
22. Sun, L., Tian, Y., Zhang, J., Li, H., Tang, C., Li, J., Wastewater treatment and membrane fouling with algal-activated sludge culture in a novel membrane bioreactor: Influence of inoculation ratios, State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Kina (2018)
23. Capodici, M., Corsino, S. F., Di Trapani, D., Torregrossa, M., Viviani, G., Effect of biomass features on oxygen transfer in Conventional Activated Sludge and Membrane BioReactor systems, Department of Engineering, University of Palermo, Italija (2019)
24. Matošić M., Crnek V., Korajlija Jakopović H., Mijatović I., Municipal wastewater treatment in a membrane bioreactor, Faculty of food technology and biotechnology, Zagreb (2009) 2275-2281.
25. Sousa, M. R. S., Lora-Garcia, J., López-Pérez, M.-F., Modelling approach to an ultrafiltration process for the removal of dissolved and colloidal substances from treated wastewater for reuse in recycled paper manufacturing. *Journal of Water Process Engineering*, 21 (2018) 96–106
26. Hoinkis J, Deowana S, Pantenb V, Figolic A, Huangd R, Driolic E., MembraneBioreactor (MBR) Technology—a Promising Approach for Industrial WaterReuse, *Procedia Eng* (2012)
27. Tran, T., Nguyen, T.B., Ho, H.L., Le, D.A., Lam, T.D., Nguyen, D.C., Hoang, A.T.,

- Do, T.S., Hoang, L., Nguyen, T.D., Bach, L.G., Integration of Membrane Bioreactor and Nanofiltration for the Treatment Process of Real Hospital Wastewater in Ho Chi Minh City, Vietnam; NTT Hi-Tech Institute, Nguyen Tat Thanh University, Vietnam (2019)
28. Chen, T.K., Chen, J.N., Combined membrane bioreactor (MBR) and reverse osmosis (RO) system for thin-film transistor-liquid crystal display TFT-LCD, industrial wastewater recycling, Institute of Environmental Engineering, National Chiao Tung University, Tajvan (2004)
29. Xu, J., He, S., Wu, S., Huang, J., Zhou, W., Chen, X., Effect of HRT and water temperature on nitrogen removal in autotrophic gravel filter, School of Environment Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Kina (2016)

7. POPIS SIMBOLA I KRATICA

BPK₅ - biokemijska potrošnja kisika unutar 5 dana [mg O₂ L⁻¹]

CT – kapilarni modul

FC – modul s nabranim filter ulošcima, eng. *pleated filter cartridge*

FS - pločasti modul, eng. *flat sheet*

HF – modul sa šupljim vlaknima, eng. *hollow fibre*

HRT - hidrauličko vrijeme zadržavanja, eng. *Hydraulic Retention Time*, [h]

κ - električna provodnost [$\mu\text{S cm}^{-1}$]

KOV - komunalna otpadna voda

KPK - kemijska potrošnja kisika [mg O₂ L⁻¹]

MBR - membranski bioreaktor

MLSS - koncentracija aktivnog mulja, eng. *Mixed Liquor Suspended Solids*, [g L⁻¹]

MT – cijevni modul

NF- nanofiltracija

NTU - nefelometrijska turbidimetrijska jedinica za mutnoću

R – faktor separacije [%]

SRT – vrijeme zadržavanja mulja, eng. *Sludge Retention Time*, [h]

SW – modul u obliku spiralnog namotaja, eng. *spiral-wound*

UF – ultrafiltracija

UPOV - uređaj za pročišćavanje otpadnih voda

TC - ukupna koncentracija ugljika, engl. *Total carbon* [mg C L⁻¹]

TN - ukupan dušik, engl. *Total nitrogen* [mg N L⁻¹]

TSS – ukupna suspendirana tvar, eng. *Total suspended solids* [mg L⁻¹]

