

Učinkovitost aktivnog mulja u obradi komunalne otpadne vode

Ivanušić, Sanja

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:149:821955>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-08**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Sanja Ivanušić

UČINKOVITOST AKTIVNOG MULJA U OBRADI
KOMUNALNE OTPADNE VODE

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Marija Vuković Domanovac

Članovi ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Marija Vuković Domanovac

Prof. dr. sc. Zvezdana Findrik Blažević

Doc. dr. sc. Martina Sudar

Zagreb, rujan 2020.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Mariji Vuković Domanovac na podršci, stručnim savjetima, vodstvu, strpljenju i razumijevanju tijekom studiranja, a osobito tijekom izrade diplomskog rada.

Posebno hvala asistentici Moniki Šabić Runjavec, mag. ing. oecoing., na svim savjetima, komentarima i prijedlozima, strpljenju, brzini te ugodnoj radnoj atmosferi.

Zahvaljujem se tvrtki Zagrebačke otpadne vode – upravljanje i pogon d.o.o. na mogućnostima pruženim pri izradi ovog rada.

Najviše hvala najdražim ZOVuip -ovcima bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć.

Hvala Ana! Hvala Nikolina! Hvala Petra! Hvala Marine!

Hvala Marko!

Hvala mojima!

Ne dopusti da te svlada zlo, već zlo svladaj dobrim.

SAŽETAK

Čista voda i kanalizacijski sustav potrebe su današnjice, a pročišćavanje otpadnih voda je neophodno. Biološki postupci pročišćavanja komunalnih otpadnih voda najčešće uključuju proces s aktivnim muljem. Aktivni mulj je zajednica mikroorganizama odgovornih za razgradnju različitih onečišćujućih tvari prisutnih u komunalnoj otpadnoj vodi. Prisutna mikrobna zajednica pokazatelj je učinkovitosti rada uređaja za pročišćavanje otpadnih voda zbog povezanosti s fizikalno-kemijskim i operativnim parametrima procesa. U ovom je radu praćena učinkovitost aktivnog mulja tijekom 2019. godine na uređaju za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda grada Zagreba. Učinkovitosti uklanjanja taložive krute tvari, ukupne suspendirane tvari, KPK i BPK₅ iznosile su više od 90 % u prosjeku, a koncentracija ukupnog dušika i ukupnog fosfora smanjila se za 44 %, odnosno 45 %. Mikroskopska analiza omogućuje brzi uvid u sustav s aktivnim muljem i pridonosi boljem vođenju procesa obrade komunalne otpadne vode.

Ključne riječi: aktivni mulj, komunalna otpadna voda, indikatori aktivnog mulja, mikroskopska analiza

SUMMARY

Clean water and sewage system are the needs of today, and wastewater treatment is necessary. Biological processes for municipal wastewater treatment most often involve activated sludge process. Activated sludge is a community of microorganisms responsible for the decomposition of various pollutants present in municipal wastewater. The present microbial community is an indicator of wastewater treatment plant efficiency due to connection with physico-chemical and operational parameters of the process. In this paper, the efficiency of activated sludge process of municipal wastewater treatment plant of city of Zagreb during the year 2019 was monitored. The removal efficiencies of the settleable solids, total suspended solids, COD and BOD₅ were more than 90 % in average, and the concentration of total nitrogen and total phosphorus decreased by 44 % and 45 %, respectively. Microscopic analysis provides quick insight into the activated sludge system and contributes to better process control of municipal wastewater treatment.

Keywords: activated sludge, municipal wastewater, activated sludge indicators, microscopic analysis

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆI DIO	3
2.1. OTPADNE VODE	3
2.2. KOMUNALNE OTPADNE VODE.....	6
2.3. OBRADA KOMUNALNIH OTPADNIH VODA.....	7
2.3.1. Prehodni i prvi stupanj pročišćavanja.....	9
2.3.2. Drugi stupanj pročišćavanja	9
2.3.3. Treći stupanj pročišćavanja.....	10
2.3.4. Uklanjanje dušika i fosfora	11
2.4. KONVENCIONALNI PROCES S AKTIVNIM MULJEM	12
2.4.1. Mikrobna zajednica aktivnog mulja	14
2.5. CENTRALNI UREĐAJ ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA GRADA ZAGREBA.....	16
3. EKSPERIMENTALNI DIO	24
3.1. MATERIJALI	24
3.1.1. Otpadna voda.....	24
3.1.2. Aktivni mulj	24
3.1.3. Mjerni instrumenti i oprema.....	25
3.2. METODE RADA	26
3.2.1. Određivanje taloživih krutih tvari	26
3.2.2. Određivanje ukupne suspendirane tvari.....	27
3.2.3. Određivanje koncentracije organskih i anorganskih pokazatelja	27
3.2.4. Određivanje masene koncentracije biomase	27
3.2.5. Određivanje taloživosti aktivnog mulja	28
3.2.6. Mikroskopska analiza	28
4. REZULTATI.....	30
4.1. FIZIKALNO-KEMIJSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE.....	30
4.2. ORGANSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE	35
4.3. ANORGANSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE.....	36
4.4. KARAKTERISTIKE AKTIVNOG MULJA.....	41
4.4.1. Mikroskopska analiza	42

5. RASPRAVA	47
5.1. FIZIKALNO-KEMIJSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE	47
5.2. ORGANSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE	51
5.3. ANORGANSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE.....	53
5.4. KARAKTERISTIKE AKTIVNOG MULJA.....	55
5.4.1. Mikroskopska analiza aktivnog mulja	56
6. ZAKLJUČAK	61
7. LITERATURA.....	62
8. SIMBOLI I KRATICE	67

1. UVOD

Porast stanovništva, ubrzana urbanizacija i gospodarski razvoj globalno utječu na povećanu razinu onečišćenja i nastanak sve većih količina otpadnih voda. Pravilno upravljanje otpadnim vodama, od izvora nastanka, skupljanja, pročišćavanja te vraćanja u okoliš, od izuzetne je važnosti. Otpadne vode su potencijalno pristupačan i obnovljiv izvor vode, energije i hranjivih tvari.¹⁻³ Mnoge svjetske i europske organizacije u svojim strategijama uključuju poboljšanja koja obuhvaćaju gospodarenje otpadnim vodama. Jedan od ciljeva Svjetske zdravstvene organizacije je do 2030. godine poboljšati kakvoću vode smanjenjem onečišćujućih tvari u njihovom sastavu te povećanjem udjela obrađenih otpadnih voda i njihovu sigurnu upotrebu na globalnoj razini. Kako bi se osigurala zaštita voda donose se zakonski propisi kojima se zabranjuje ispuštanje onečišćujućih tvari u vode, provode se nadzori nad stanjem kakvoće voda, izvorima onečišćenja, grade se građevine za odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda, sve u svrhu očuvanja i poboljšavanja kakvoće te namjenske korisnosti voda.⁴⁻⁶

Unapređenje kvalitete života utječe na nastanak složenijeg sastava komunalnih otpadnih voda što predstavlja izazov u postrojenjima za pročišćavanje otpadnih voda. Učinkovitijom obradom osigurava se zaštita okoliša te sprečava negativan utjecaj otpadnih voda na zdravlje čovjeka. Za pročišćavanje otpadnih voda dostupne su razne tehnologije, a nove su konstantno u razvoju. Najčešće je primjenjivana tehnologija aktivnim muljem, koja se pokazala ekonomičnom i učinkovitom za biološku obradu otpadnih voda.^{5,7,8} Prema podacima iz 2019. godine, u Republici Hrvatskoj se otpadne vode pročišćavaju na 166 postrojenja. Od toga, 52 % uređaja sadrže prvi i drugi stupanj pročišćavanja.⁹

Mikrobiološkom analizom aktivnog mulja i mikroskopskim praćenjem pojavljivanja određenih vrsta protozoa u sustavu dobiva se uvid u učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda.^{10,11} Na biološkim uređajima za pročišćavanje moguća je pojava nepoželjnih mikroorganizama koji onemogućavaju taloženje aktivnog mulja, a isplivavanje mulja predstavlja potencijalno onečišćenje prijemnika. Pojava plivajućeg mulja kod komunalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda često se veže na promjene organskog opterećenja, nedostatak otopljenog kisika, promjene pH-vrijednosti i nedostatak hranjivih tvari.^{12,13}

U ovom radu istražena je povezanost mikrobne zajednice aktivnog mulja s fizikalno-kemijskim čimbenicima kao i njihova uloga pri učinkovitom pročišćavanju komunalnih otpadnih voda u Centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba (CUPOVZ) u periodu od godinu dana.

2. OPĆI DIO

2.1. OTPADNE VODE

Čista voda preduvjet je života na Zemlji i vitalna je za svaki ekosustav. Od izuzetne važnosti su resursi slatke vode koji se koriste pri proizvodnji električne energije, u poljoprivredi, industriji, rudarstvu itd.¹⁴ Upotrijebljene vode se nazivaju otpadne vode, bilo da su onečišćene ili potencijalno onečišćene. Danas se može razlikovati toliko vrsta otpadnih voda kolika je i svrha njihovog korištenja. Prema Zakonu o vodama⁶ otpadne vode su sve potencijalno onečišćene industrijske, sanitarne, oborinske i druge vode.

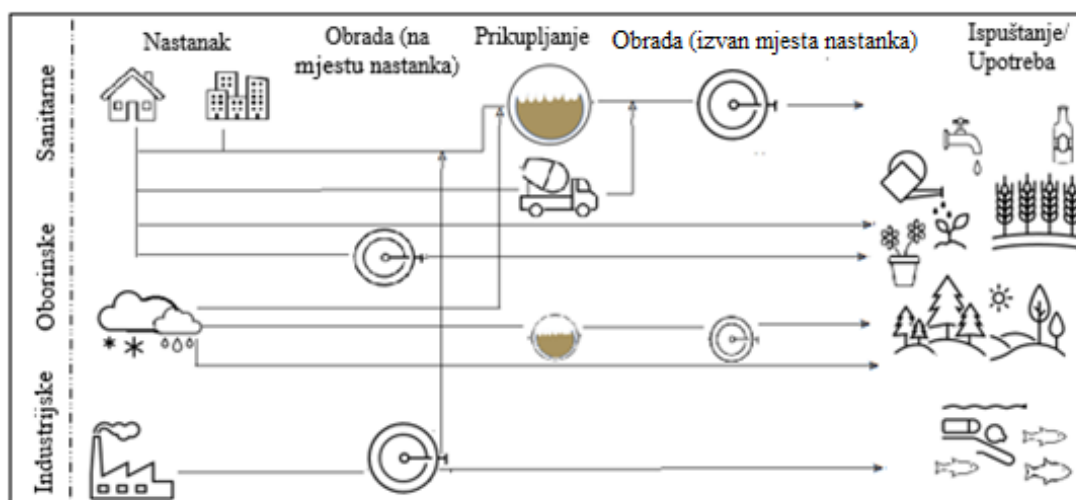
Industrijske otpadne vode su sve otpadne vode, osim sanitarnih otpadnih voda i oborinskih voda, koje se ispuštaju iz prostora korištenih za obavljanje trgovine ili industrijske djelatnosti (npr. rashladne). Sastav i količina industrijske otpadne vode ovisi o vrsti i načinu tehnološkog procesa stoga su karakteristične za svaki pojedini proizvodni proces.^{6,15} Otpadne vode iz kemijskih i petrokemijskih, metaloprerađivačkih, drvnih, tekstilnih industrija te iz industrijske proizvodnje celuloze i papira mogu sadržavati opasne tvari koje djeluju toksično, teže su razgradive ili potpuno nerazgradive te se mogu akumulirati u organizmima.^{16,17}

Sanitarne otpadne vode su otpadne vode koje se nakon korištenja ispuštaju iz stambenih objekata i uslužnih objekata. Potječu iz ljudskog metabolizma i aktivnosti kućanstava te sadrže patogene mikroorganizme, farmaceutike i druge organske tvari.^{6,18,19} Oborinske vode su otpadne vode koje nastaju ispiranjem oborinama, s površina prometnica, parkirališta ili drugih površina postupno otapaju onečišćenja. Većina oborina otapa u atmosferi onečišćenja koja su na tom području ispuštena u zrak, a kao posljedica sve većeg onečišćenja atmosfere te površina, oborinske otpadne vode postaju sve veći uzrok onečišćenja prirodnih voda.^{6,20,21}

Otpadne vode sadrže suspendirane tvari koje mogu dovesti do nastanka mulja i anaerobnih uvjeta u vodama u koje se ispuštaju. Također, uz ugljikove spojeve, otpadne vode sadrže i spojeve s dušikom i fosforom čime može doći do narušavanja ravnoteže u ekosustavu na način da dolazi do poticanja rasta nepoželjnih organizama, ali i onečišćenja podzemnih voda. Prisutne organske i anorganske tvari često su kancerogene, mutagene i toksične prirode kao što su fenoli, pesticidi i teški metali.^{15,22}

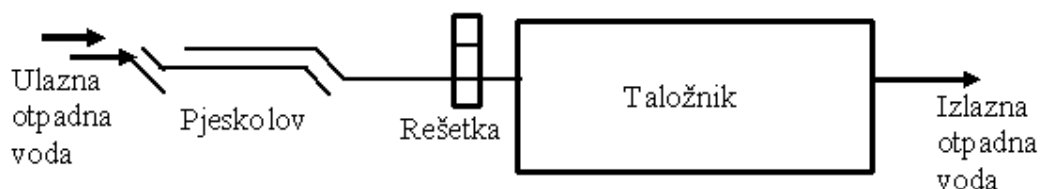
2. Opći dio

U 2019. godini ukupna količina otpadnih voda u Republici Hrvatskoj (RH) iznosila je 361 359 000 m³, što je povećanje za 7,6 % u odnosu na 2018. godinu. Od ukupne količine otpadnih voda, 53,7 % činile su vode iz kućanstava i gospodarskih djelatnosti (povećanje za 2,0 %), dok se 46,3 % odnosilo na ostale vode (oborinske vode i dr.). Otpadne vode mogu se sakupljati, obrađivati, koristiti obrađene ili se mogu izravno ispuštati u okoliš, nakon čega se neizravno mogu koristiti nizvodno iz prijemnika u koje su ispuštene (slika 2.1.).^{9,23}



Slika 2.1. Shematski prikaz mogućih puteva otpadnih voda.

Povijesno gledajući,^{24,25} u starom Rimu kanalizacijom se odvodila otpadna voda do najbliže rijeke ili jezera, ali već krajem 19. stoljeća javlja se potreba za pročišćavanjem otpadnih voda. S obzirom na epidemije kolere i drugih bolesti koje su zahvatile svijet, zbog loših sanitetskih uvjeta u gradovima, bilo je sigurno koliko je kanalizacija neophodna kako bi se spriječilo širenje zaraze te pridonijelo zdravlju ljudi. Tako su nastajale prve aglomeracije i uređaji za pročišćavanje otpadnih voda.



Slika 2.2. Shema uređaja za pročišćavanje krajem 19. stoljeća.

Shema prvih uređaja bila je jednostavna, kako je prikazano slikom 2.2. Uglavnom su to bili uređaji za mehaničku obradu, koji su sadržavali rešetke, pjeskolov te taložnik, a tijekom nepovoljnih događaja u povijesti, kao što su Prvi i Drugi svjetski rat, nije se pridavala važnost unaprjeđenju uređaja za pročišćavanje.^{24,25}

Danas je obrada otpadnih voda važna prije svega zbog očuvanja zdravlja ljudi, te zdravlja okoliša. Iz tog razloga ispuštanje otpadnih voda, kao i zaštita voda, osigurava se zakonskim propisima kojima se zabranjuju emisije onečišćujućih tvari u vode. Provede se nadzori nad stanjem kakvoće voda i izvorima onečišćenja, grade se uređaji za odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda u svrhu očuvanja i poboljšavanja kakvoće i namjenske korisnosti voda. Prema Zakonu⁶, odgovarajuće pročišćavanje otpadnih voda je obrada otpadnih voda bilo kojim postupkom i/ili načinom ispuštanja, koja omogućava da prijammnik zadovoljava odgovarajuće ciljeve kakvoće za vode u skladu s propisom.

Tablica 2.1. Podrijetlo, pročišćavanje i ispuštanje otpadnih voda RH u 2019. godini.

Otpadne vode	Količina, tis. m ³	Pročišćene otpadne vode	Količina, tis. m ³
Iz kućanstva	128 353	Prvostupanjski	74 759
Iz gospodarskih djelatnosti	65 667	Drugostupanjski	200 468
Ostale vode	167 339	Trećestupanjski	26 209
<i>Ukupno</i>	<i>361359</i>	<i>Ukupno</i>	<i>301 436</i>
Ispuštene otpadne vode - Nepročišćene	Količina, tis. m ³	Ispuštene otpadne vode - Pročišćene	Količina, tis. m ³
U podzemne vode	1 284	U podzemne vode	875
U vodotoke	48 237	U vodotoke	229 947
U akumulacije	-	U akumulacije	45
U more	10 402	U more	70 569
<i>Ukupno</i>	<i>59 923</i>	<i>Ukupno</i>	<i>301 436</i>

U skladu s osnovnim tehnološkim zahtjevima procesa, danas su razvijene različite tehnologije obrade otpadnih voda. Prema podacima iz 2019. godine, ukupan broj uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u RH iznosi 166, pri čemu ima najveći broj uređaja s drugim stupnjem pročišćavanja (87), a iz godine u godinu povećava se i broj uređaja za pročišćavanje trećeg stupnja (20) što pridonosi povećanju kvalitete pročišćenih voda. Iste godine na svim uređajima je pročišćeno ukupno 301 436 000 m³ otpadnih voda. Podrijetlo, pročišćavanje i ispuštanje otpadnih voda RH za 2019. godinu prikazano je tablicom 2.1.^{4,6,9,14,26}

Mnoga su istraživanja usmjerena na iznalaženje uspješnih strategija upravljanja svjetskim vodnim resursima, od područja upravljanja postojećim vodama do inovativnih tehnologija pročišćavanja voda. Potreba za vodom i odvodnjom je izazov današnjice, a pročišćavanje otpadnih voda je neophodno.¹⁴ Obradene otpadne vode mogu biti lako dostupni izvor vode, posebno u sušnim područjima te se upotrebljavati za navodnjavanje površina koje nisu od izravne gospodarske važnosti.²⁷

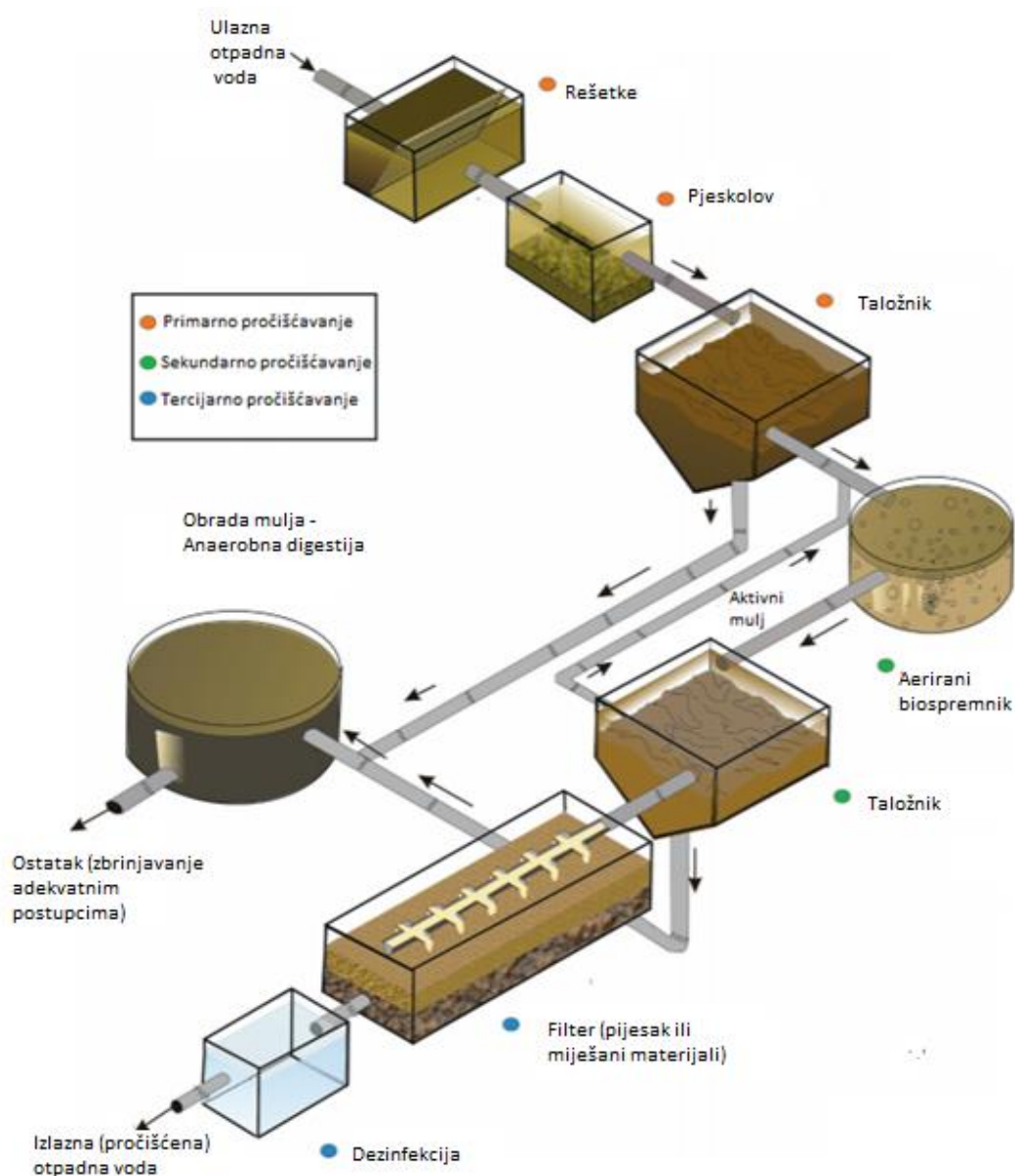
2.2. KOMUNALNE OTPADNE VODE

Komunalne otpadne vode su otpadne vode sustava javne odvodnje koje čine sanitarne otpadne vode ili otpadne vode koje su mješavina sanitarnih otpadnih voda s industrijskim otpadnim vodama i/ili oborinskim vodama određene aglomeracije. Aglomeracija je područje na kojem su stanovništvo i gospodarske djelatnosti dovoljno koncentrirani da se komunalne otpadne vode mogu prikupljati i odvoditi do uređaja za pročišćavanje otpadnih voda ili do krajnje točke ispuštanja u prijemnik. Sustav prikupljanja i odvodnje otpadnih voda je dio sustava javne odvodnje kojim se prikupljaju i odvođe komunalne otpadne vode. Kanalizacijski sustav može biti mješoviti (otpadne i oborinske vode), razdjelni, djelomično razdjelni ili kombinirani. Mješoviti kanalizacijski sustav prevladava u kontinentalnom dijelu Hrvatske (u crnomorskome slivu), a provedba mjera zaštite voda u takvim sustavima složenija je, skuplja i manje učinkovita. U jadranskome slivu češće je prisutan razdjelni sustav. Treba uzeti u obzir i starost kanalizacijskog sustava te pretpostaviti da je većina kanalizacijskih sustava u znatnoj mjeri vodopropusna.^{6,28}

Propisano je kakve vode se mogu ispuštati u sustav javne odvodnje. U skladu sa zakonskim propisima, industrijske otpadne vode prije ispuštanja moraju se pročititi do propisanih graničnih vrijednosti. Otpadne vode bolnica, koje sadrže veća mikrobiološka onečišćenja te onečišćenja različitim farmaceuticima i drugim patogenim tvarima, ispuštaju se u sustav javne odvodnje. Također mogu se dogoditi i iznenadna ispuštanja onečišćujućih tvari iz gospodarskih objekata, industrijskih pogona, nezgoda s istjecanjem tekućih goriva i drugih opasnih tvari. Ovakve vrste onečišćenja mogu negativno utjecati na rad uređaja.^{6,29}

2.3. OBRADA KOMUNALNIH OTPADNIH VODA

Pročišćavanje komunalnih otpadnih voda je obrada komunalnih otpadnih voda mehaničkim, fizikalno-kemijskim i/ili biološkim postupcima, a odvija se na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda koji su dizajnirani za ispunjavanje zahtjeva za propisanom kvalitetom otpadnih voda koje reguliraju vladina i međuvladina tijela. Uređaji koji se koriste u obradi otpadnih voda brojnih su izvedbi i uglavnom kombiniraju fizikalne, kemijske i biološke postupke. Shema današnjih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda prikazana je slikom 2.3.^{6,24,30,31}



Slika 2.3. Shematski prikaz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda.

2. Opći dio

Fizikalna obrada obuhvaća rešetanje i taloženje. Kemijska obrada uključuje koagulaciju, flokulaciju i elektrokemijske procese, a biološka obrada aerobne i/ili anaerobne procese. Uređaji za pročišćavanje razlikuju se po stupnju pročišćavanja s obzirom na postupak obrade te učinkovitost pročišćavanja, odnosno ispunjavanje zahtjeva propisanih zakonom. Ovisno o tome razlikuju se prethodno pročišćavanje, prvi, drugi i treći stupanj pročišćavanja otpadnih voda.^{30,31} Neki od najznačajnijih pokazatelja pri obradi otpadne vode navedeni su u tablici 2.2.

Tablica 2.2. Granične vrijednosti emisija onečišćujućih tvari u otpadnim vodama.

Pokazatelji	Mjerna jedinica	Granične vrijednosti za emisije	
		Sustav javne odvodnje	Površinske vode
Fizikalno – kemijski			
pH-vrijednost	-	6,5 – 9,5	6,5 – 9,0
Temperatura	°C	40	30
Boja		-	bez
Miris		-	bez
Taložive tvari	cm ³ /dm ³ h	10	0,5
Suspendirana tvar	mg/dm ³	-	35
Ekotoksikološki			
Toksičnost na <i>Daphnia magna</i>	LIDD, faktor razrijeđenja	-	2
Organski			
BPK ₅	mgO ₂ /dm ³	*	25
KPK _{Cr}	mgO ₂ /dm ³	*	125
Anorganski			
Ukupni fosfor	mg/dm ³	*	2 (1 jezera)
Ortofosfati		-	1 (0,5 jezera)
Sulfati	mg/dm ³	*	250
Ukupni dušik	mg/dm ³	*	15
Amonij	mg/dm ³	-	10
Nitriti	mg/dm ³	10	1
Nitrati	mg/dm ³	-	2

*sukladno članku 5. Pravilnika NN 26/2020.

Granične vrijednosti pokazatelja za ispuštanje otpadnih voda u sustav javne odvodnje određuju se sukladno općim uvjetima isporuke vodnih usluga koji se donose na osnovi zakona kojim se uređuju vodne usluge. Ukoliko nisu određene, vrijede sljedeće granične vrijednosti emisija za pokazatelje: biokemijska potrošnja kisika, BPK₅ = 250 mgO₂/dm³, kemijska potrošnja kisika, KPK_{Cr} = 700 mgO₂/dm³, ukupni dušik = 50 mg/dm³ i ukupni fosfor = 10 mg/dm³. Prije ispuštanja u površinske vode

otpadne se vode trebaju pročistiti do propisanih granica navedenih u tablici 2.2., s tim da kod drugog stupnja pročišćavanja najmanji postotak smanjenja pokazatelja treba biti 90 % za ukupnu suspendiranu tvar, 70 % za BPK₅ te 75 % KPK_{Cr}.³⁰

2.3.1. Prethodni i prvi stupanj pročišćavanja

Prethodno pročišćavanje je predobrada otpadnih voda s lokacije onečišćivača u skladu sa zahtjevima za ispuštanje otpadnih voda u sustav javne odvodnje. Kod mješovitih kanalizacijskih sustava često se izjednačuje neravnomjernost u dotoku i sastavu otpadne vode u egalizacijskom bazenu. Prvi stupanj stupanj obično čine grube i fine rešetke, pjeskolovi i mastolovi. Tijekom ovog postupka uklanjaju se veće suspendirane i plutajuće krute tvari, ulja i masti. U prvom stupnju pročišćavanja većina taloživih krutih tvari uklanja se fizikalnim procesom taloženja koje se može poboljšati dodatkom kemikalija (najčešće se koriste soli aluminija ili željeza). U taložnicima se smanjuje brzina otpadne vode, krute se tvari istalože, a plutajuće isplivaju na površini. Biološka aktivnost otpadnih voda u prvom stupnju pročišćavanja je zanemariva. Kada se koriste kemikalije, osim taložnika, koriste se i druge pomoćne jedinice kao što su stanice za unos kemikalija, uređaji za miješanje i flokulatori. Taložive krute tvari istaložene u prvom stupnju pročišćavanja najčešće se dalje obrađuju procesom anaerobne digestije.^{23,32}

2.3.2. Drugi stupanj pročišćavanja

Drugi stupanj pročišćavanja obuhvaća sekundarnu ili biološku obradu. Biološki postupci su najekonomičniji te najprihvatljiviji za okoliš jer se obrada zasniva na upotrebi mikroorganizama, od kojih su najviše prisutne bakterije, pomoću kojih dolazi do razgradnje organskih tvari. Biološka obrada može se odvijati aerobno ili anaerobno, ovisno o značajkama otpadne vode koja se obrađuje. Anaerobna obrada koristi se za visoko opterećene otpadne vode. Aerobna obrada ovisi o aktivnosti aerobnih mikroorganizama koji biokemijski razgrađuju organske tvari. Uređaji u kojima se provodi biološka razgradnja organske tvari mogu biti različitih izvedbi. Najpoznatiji su uređaji za biološku obradu s aktivnim muljem, membranski bioreaktori, reaktori s biofilmom, aerirane lagune i biljni uređaji.^{12,20,24,33}

Uređaj za biološku obradu otpadne vode aktivnim muljem najčešće čine aerirani bioreaktori u kojima se aeracija provodi mehaničkim miješalima, djelomično uronjenim u vodu, ili upuhivanjem zraka. Otopljene organske tvari u otpadnoj vodi izvor su hranjivih tvari aerobnim heterotrofnim mikroorganizmima aktivnog mulja. Tijekom drugog stupnja pročišćavanja uklanja se gotovo 90 % organske tvari. Nakon aeriranih bioreaktora otpadna voda uvodi se u naknadni taložnik gdje se aktivni mulj odvaja od pročišćene otpadne vode, dio aktivnog mulja vraća se u aerirani bioreaktor, a ostatak se odvodi na daljnju obradu i/ili zbrinjavanje.^{20,24}

Membranski bioreaktor (MBR) kombinira sustav s aktivnim muljem i membransku separaciju (mikrofiltraciju ili ultrafiltraciju s podtlakom). Membrane mogu biti u bioreaktoru ili odvojenom bazenu. Kod takvih sustava nisu potrebni naknadni taložnici.²⁴

Reaktori s biofilmom jesu prokapni filter i rotirajući biodisk. Punjeni su inertnim materijalom (punilom) preko kojeg se raspršuje otpadna voda. Na površini materijala prijanjaju mikroorganizmi i tvore biofilm. Kontinuiranim dotokom otpadne vode vanjski sloj biomase dobro je opskrbljen kisikom i supstratom te biomasa raste, a u unutarnjem sloju biofilma stvaraju se anaerobni uvjeti. U takvim uvjetima nastaju plinovi (CO₂, H₂S) koji pomažu odvajanje sloja biomase od punila.^{20,32}

Aerirane lagune jesu umjetna jezera ili bazeni u kojima se odvija taloženje suspendiranih tvari iz otpadnih voda. Na dnu lagune je sustav cjevovoda za dovod zraka u otpadnu vodu. Primjenjuju se za obradu otpadne vode iz šaržne proizvodnje. Biljni uređaji sastoje se od močvarnih biljaka zasađenih na pripremljeno tlo. Tlo se priprema na metalnu mrežu ispod koje se na nepropusnoj foliji nalaze perforirane cijevi za otpadnu vodu. Mikroorganizmi u simbiozi s močvarnim biljem razgrađuju otopljene biorazgradive tvari u otpadnoj vodi, a obrađena voda ispušta se u okoliš.^{20,32}

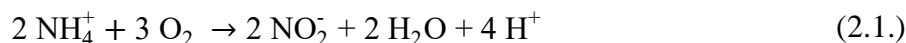
2.3.3. Treći stupanj pročišćavanja

Prema Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda³⁰, treći stupanj pročišćavanja podrazumijeva obradu komunalnih voda dodatnim postupkom kojim se uz drugi stupanj pročišćavanja postižu propisani zahtjevi za i/ili fosfor i/ili dušik i/ili mikrobiološke pokazatelje i/ili druge onečišćujuće tvari u cilju zaštite osjetljivih područja, odnosno postizanja ciljeva zaštite voda. Granična vrijednost

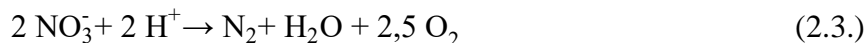
emisije ukupnog fosfora komunalnih otpadnih voda pročišćenih na uređaju trećeg stupnja pročišćavanja kapaciteta 10 000 do 100 000 ES je 2 mg/dm^3 , a ukupnog dušika 15 mg N/dm^3 . Za uređaje veće od 100 000 ES vrijednosti su 1 mg/dm^3 za ukupni fosfor, odnosno 10 mg/dm^3 za dušik. Najmanji postotak smanjenja onečišćenja fosforom iznosi 80 %, a za ukupni dušik 70 %. Postupak može uključivati biološke procese, membransku filtraciju, napredne oksidacijske procese i sl., ovisno o zahtjevima za postizanje ciljeva zaštite voda.^{6,20,32}

2.3.4. Uklanjanje dušika i fosfora

Dušik je gotovo potpuno prisutan u reduciranom obliku kao amonijev ion. Organski vezan dušik pretvara se u topljivi amonijak procesom amonifikacije. Autotrofne nitrificirajuće bakterije kao što su *Nitrosomonas* i *Nitrobacter* dobivaju energiju za svoj metabolizam i sintezu stanica oksidacijom amonijevog iona. Oksidacija se odvija u dva stupnja. Kako je prikazano reakcijama, u prvom stupnju amonijev ion se oksidira u nitritni ion (jednadžba 2.1.), a u drugom stupnju nitritni ion se oksidira u nitratni ion (jednadžba 2.2.):



Većina heterotrofnih mikroorganizama, kada nema otopljenog kisika, kao izvor kisika koristi nitrata i nitrite, pri čemu dolazi do procesa denitrifikacije (jednadžba 2.3.). Nitrati se prevode u elementarni dušik pomoću denitrificirajućih bakterija, nakon čega plinoviti dušik odlazi u atmosferu.



Fosfor u otpadnim vodama pretežno je prisutan kao ortofosfat. Topljivi anorganski polifosfati i organski fosforni spojevi tijekom procesa razgradnje transformiraju se u ortofosfate. To je jedini oblik koji mikroorganizmi mogu unositi. Sadržaj fosfora u suhoj stanici je oko 3 %. Fosfor ima važnu ulogu u energetskom metabolizmu (ADP/ATP), te se pohranjuje se kao polifosfat u staničnim organelima.

Uklanjanje fosfora potiče izmjena aerobnih i anaerobnih uvjeta u otpadnoj vodi pomiješanoj s aktivnim muljem. Tim uvjetima prilagođeni su fosfor-akumulirajući mikroorganizmi, stoga odvajanjem aktivnog mulja od pročišćene otpadne vode ujedno se uklanja i sadržaj fosfora. Fosfor se može i kemijski ukloniti taloženjem, jer otopljeni fosfati tvore teško topljive spojeve s koagulantima (koji su najčešće na bazi Al^{3+} i Fe^{3+}) koji se talože u naknadnom taložniku.^{30,32,34}

2.4. KONVENCIONALNI PROCES S AKTIVNIM MULJEM

Konvencionalni proces s aktivnim muljem temelji se na sposobnosti mikroorganizama, osobito bakterija, da svojim metabolizmom i enzimatskim procesima razgrađuju biorazgradive onečišćujuće tvari prisutne u otpadnim vodama. Postupak se provodi tako što se otpadna voda nakon prvog stupnja pročišćavanja miješa se s odgovarajućom količinom aktivnog mulja uz visoki udio mikroorganizama, pomoću miješala i/ili upuhivanjem zraka (za osiguravanje dovoljne koncentracije otopljenog kisika mikroorganizmima). Nakon određenog vremena, suspenzija aktivnog mulja i pročišćene otpadne vode se uvodi u naknadne taložnike, u kojima se aktivni mulj taloženjem odvaja od pročišćene vode koja se ispušta u okoliš ili obrađuje daljnjim postupcima. Dio istaloženog aktivnog mulja recirkulira, tj. vraća se u proces kao povratni mulj kako bi se proces obrade kontinuirano odvijao. Višak aktivnog mulja dalje se obrađuje odnosno zbrinjava odgovarajućim postupkom.^{20,32}

Najvažnije varijable procesa s aktivnim muljem dane su u nastavku. Masena koncentracija biomase u bioreaktoru, MLSS (eng. *mixed liquor suspended solids*), je masa mikroorganizama koja uz aktivne mikroorganizme sadrži mrtve stanice te anorganske tvari iz otpadne vode.^{31,32}

Hidrauličko vrijeme zadržavanja, θ , (eng. *hydraulic loading rate*) izražava brzinu kojom se otpadna voda dovodi u bioreaktor, a prikazano je jednačinom 2.4.:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (2.4.)$$

gdje je θ – hidrauličko vrijeme zadržavanja, d, V – volumen bioreaktora, m^3 , Q – protok otpadne vode, m^3/dan .

Prostorno opterećenje, HLR (eng. *hydraulic loading rate*), prikazano jednadžbom 2.5., definira se kao vrijednost BPK po jedinici volumena aeriranog bioreaktora na dan:

$$\text{HLR} = \frac{\text{BPK} \times Q}{V} \quad (2.5.)$$

gdje je HLR – prostorno opterećenje, kg/(m³dan), BPK – biokemijska potrošnja kisika, kgO₂/m³.

Opterećenje muljem, SLR (eng. *sludge loading rate*), predstavlja omjer supstrata (biorazgradive tvari ulazne otpadne vode dostupne mikroorganizmima) i biomase. Značajno utječe na kvalitetu pročišćavanja, a definirano je jednadžbom 2.6.:

$$\text{SLR} = \frac{\text{BPK} \times Q}{\text{MLSS} \times V} \quad (2.6.)$$

gdje je SLR – opterećenje muljem, kg/(kg d), MLSS – suspendirana tvar u aeriranom bioreaktoru, kg/m³.

Specifična brzina potrošnje supstrata, F/M (eng. *food to microorganism*), i vrijeme zadržavanja aktivnog mulja, θ_c , su definirani jednadžbama 2.7. i 2.8.:

$$F/M = Q \times \frac{(S_0 - S)}{V \times X} \quad (2.7.)$$

$$\theta_c = \frac{V \times X}{Q_w \times X_s} \quad (2.8.)$$

gdje su F/M – specifična brzina potrošnje supstrata, kg/kg d, θ_c – vrijeme zadržavanja aktivnog mulja, d, S_0 i S – koncentracije biorazgradivog organskog opterećenja ulazne i izlazne otpadne vode, izražene kao BPK₅, kg/m³, X i X_s – masene koncentracije aktivnog mulja (biomase) u bioreaktoru i višak biomase iz naknadnog taložnika, kg/m³, a Q_w – količina otpadnog mulja koji se proizvede na dan, m³/dan.

Naknadno taloženje značajno je za učinkovito odvajanje aktivnog mulja, radi kvalitete izlazne otpadne vode i za povratni mulj tj., održavanje koncentracije biomase. Koncentracija se održava brzinom recirkulacije mulja, uz poznate značajke taloživosti mulja i zgušnjavanja mulja u taložniku (jednadžba 2.9.):

$$\frac{Q_R}{Q} = \frac{X}{X_s - X} \quad (2.9.)$$

gdje je Q_R – recirkulacija mulja, m³/dan.

Taloživost mulja određuje se indeksom volumena mulja (IVM) definiranim kao volumen (cm^3) zauzet za 1 g krutih tvari u suspenziji nakon taloženja tijekom 30 minuta i određuje se eksperimentalno. Vrijednosti IVM ukazuju na taloženje suspendiranih tvari, odnosno biomase, što je niža vrijednost IVM mulj se bolje taloži, dok više vrijednosti ukazuju na loše taloženje. Loše taloženje može biti posljedica pojave nepoželjnih mikroorganizama u aktivnom mulju. Optimalne vrijednosti IVM karakteristične su za svako postrojenje, a najčešće se kreću između $75 \text{ cm}^3/\text{g}$ i $100 \text{ cm}^3/\text{g}$ za uređaje s manjim opterećenjem, odnosno $100 \text{ cm}^3/\text{g}$ i $150 \text{ cm}^3/\text{g}$ za uređaje većih opterećenja.^{31,34,35}

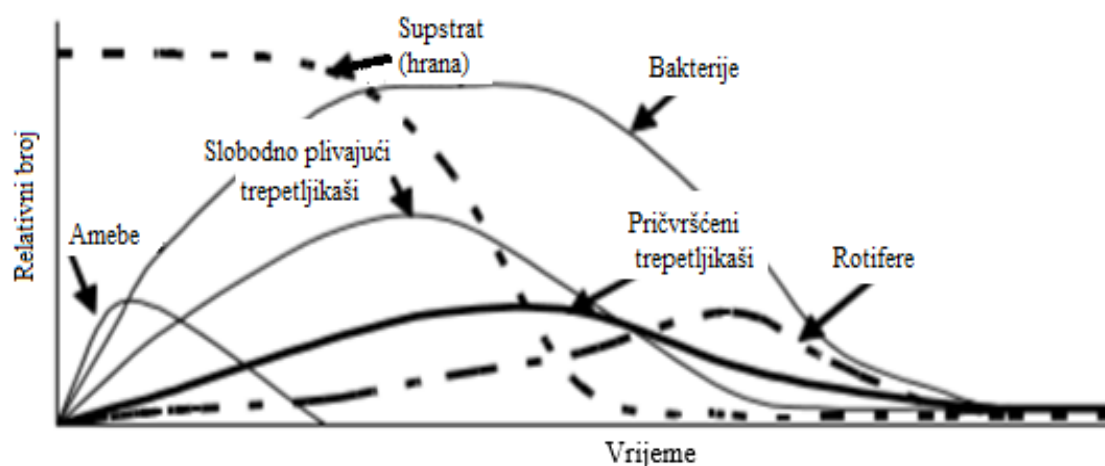
Za biološku razgradnju od velike je važnosti omjer nutrijenata. Mikroorganizmi trebaju ugljik, kao i dušik i fosfor za staničnu sintezu. Ako bilo koja od komponenti nije dostupna u dovoljnoj količini, metabolizam mikroorganizama je poremećen. Poželjan omjer iznosi $\text{BPK}_5:\text{N}:\text{P} = 100:5:1$. Za izrazito niske koncentracije fosfora ili dušika u sastavu otpadnih voda te tvari treba dodati da se spriječi nagomilavanje nepoželjnih mikroorganizama koji mogu lučiti izvanstanične polisaharide, uzrokovati pjenu te smanjiti kvalitetu obrađene otpadne vode. U slučaju nedostatka dušika mogu se dodati soli amonijaka ili uree, ali u otpadnoj vodi dušik i fosfor obično su prisutni u dovoljnim količinama.^{31,32,34}

2.4.1. Mikrobna zajednica aktivnog mulja

Mikrobiološka zajednica aktivnog mulja sastoji se od bakterija, protozoa, gljiva, algi i metazoa. Sastav i raznolikost mikrobne zajednice utječu na rad uređaja i učinkovitost pročišćavanja. U ovako složenom ekosustavu bakterije čine 95 % ukupnog broja mikroorganizama i imaju ključnu ulogu u pročišćavanju otpadnih voda.^{11,36} Poznavanje zajednice mikroorganizama olakšava optimizaciju procesa i poboljšava rad uređaja.¹¹

Mikrobna zajednica ovisi o sastavu otpadne vode te svaki uređaj za pročišćavanje ima karakterističnu zajednicu mikroorganizama, na što mogu utjecati koncentracija otopljenog kisika, temperatura, prisutne onečišćujuće tvari i razlike u pH-vrijednosti.^{37,38} Kontinuirano praćenje mikrobne zajednice može spriječiti neželjene pojave kao što je pjenjenje aktivnog mulja. Također, neki mikroorganizmi su izvrsni pokazatelji količine kisika, čime se može utjecati na aeraciju i doprinijeti ekonomskoj isplativosti procesa.³⁹

Mikroorganizmi aktivnog mulja mogu se podijeliti u nekoliko skupina. Relativni broj i promjena vrsta mikroorganizama pri obradi otpadnih voda prikazan je slikom 2.4. U početku procesa najzastupljenije se su amebe, a već početkom razgradnje supstrata smanjuje im se relativni broj. Relativna brojnost bakterija najveća je od svih mikroorganizama tijekom procesa razgradnje. Najveći rast bakterija se postiže u periodu razgradnje supstrata, dok se broj smanjuje kada se potroši supstrat. Najviše prisutnih slobodno plivajućih trepetljikaša ima u početnoj fazi razgradnje supstrata, dok ih pri najbržoj razgradnji supstrata po relativnoj brojnosti sustižu pričvršćeni trepetljikaši. Na kraju procesa povećava se relativan broj rotifera, čime dolazi do smanjenja broja trepetljikaša.^{20,39}



Slika 2.4. Relativni broj i promjena vrsta mikroorganizama pri obradi otpadnih voda.

Primjena aktivnog mulja u obradi otpadne vode široko je rasprostranjena. Važnost nekih prisutnih mikroorganizama u aktivnom mulju je poznata. Bakterije *Acinetobacter* i *Zoogloea ramigera* ključne su u formiranju pahuljica aktivnog mulja jer sintetiziraju i izlučuju izvanstaničnu polimernu tvar, EPS (eng. *extracellular polymeric substance*). EPS nastaje razaranjem stanica, lučenjem, ispuštanjem materijala sa staničnih površina i apsorpcijom tvari iz okoliša. Sastoji se od proteina i polisaharida u obliku koloida te određuje strukturu i svojstva biomase. Proizvodnju EPS-a može potaknuti niska vrijednost KPK/N omjera ili znatno opterećenje dušikom. *Microthrix parvicella* je nitasta bakterija koja zbog svoje morfologije otežava taloženje aktivnog mulja i uzrokuje pjenjenje, kao i druge nitaste bakterije. Postoje razni kemijski postupci za sprječavanje pjenjenja, ali ne postoji jedinstveno rješenje.

Istražuju se i biološki postupci jer neke vrste rotifera uspješno djeluju na određeni tip nitastih bakterija, odnosno smanjuju pjenjenje aktivnog mulja. Također, protozoe se hrane bakterijama te na taj način smanjuju zamućenost pročišćene otpadne vode.^{20,31,40-42}

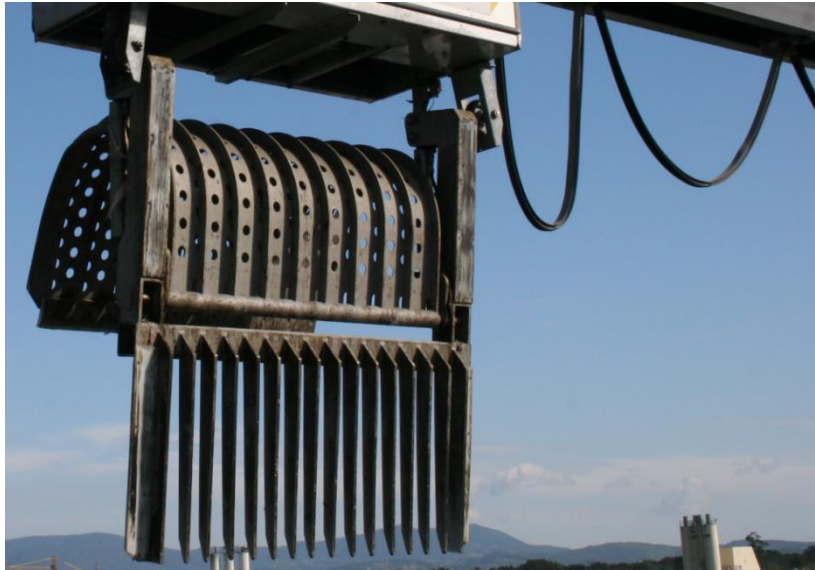
2.5. CENTRALNI UREĐAJ ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA GRADA ZAGREBA

Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba (CUPOVZ) izgrađen je za pročišćavanje komunalne otpadne vode 24h/dan (slika 2.5.).



Slika 2.5. Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba, CUPOVZ.

CUPOVZ sastoji se od mehaničkog i biološkog dijela s obradom izdvojenog viška mulja. Mehanički dio uređaja za pročišćavanje otpadnih voda sastoji se od grubih rešetki pomoću kojih se uklanja grubi otpad veći od 10 cm. Na slici 2.6. prikazana je gruba rešetka koja služi za uklanjanje grubih otpadnih tvari čime se nadalje štiti procesna oprema (pumpe) i pospješuje i učinkovitost daljnje obrade.^{43,44}



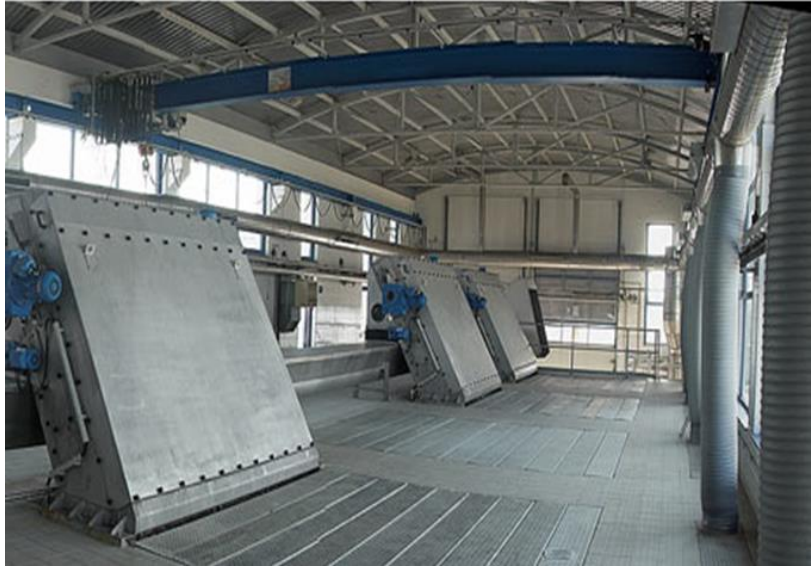
Slika 2.6. Gruba rešetka na CUPOVZ.

Nakon grubih rešetki slijedi ulazna crpna stanica (slika 2.7.), gdje prekrivene pužne crpke podižu ulaznu otpadnu vodu na visinu od oko 7 m. Na taj način povećava se gravitacijska potencijalna energija ulazne otpadne vode te otpadna voda dalje teče gravitacijski.⁴⁴



Slika 2.7. Ulazna crpna stanica na CUPOVZ.

Slika 2.8. prikazuje fine rešetke na mehaničkom dijelu CUPOVZ-a, kojim se uklanjaju otpadne tvari veći od 1 cm. Otpad s rešetki uklanja se spiralnim transporterima unutar kojih su smještene preše za pranje. Iz krupnog otpada se nadalje odstranjuje voda, otpad se preša i odlaže.



Slika 2.8. Fina rešetka na CUPOVZ.

Otpadna voda nakon finih rešetki dotječe u aerirane dvostruke komore pjeskolova-mastolova (slika 2.9).



Slika 2.9. Aerirani pjeskolov-mastolov na CUPOVZ.

Pijesak se dovodi u kanal smješten na dnu pjeskolova te se dvostrukim usisnim zgrtačem odvodi do klasifikatora za pijesak. Izdvojeni i ocijeđeni pijesak se zbrinjava odgovarajućim postupkom. Ulja i masti isplivaju na površinu te se potiskuju u zaseban spremnik iz kojeg se odvođe na daljnju obradu. Energija koju sadrže ulja i masti iskorištava se tijekom anaerobne mezofine digestije za proizvodnju bioplina.^{43,44}

Biološki dio uređaja zasniva se na tehnologiji aktivnog mulja, a jedinstvena tehničko-tehnološka cjelina u prethodnim taložnicima (slika 2.10.) dijeli se na dvije linije: linija vode i obrada mulja.



Slika 2.10. Prethodni taložnici na CUPOVZ.

Otpadna voda iz prethodnih taložnika miješa se s povratnim muljem i dovodi do razdjelnog okna gdje se ravnomjerno odvodi prema osam aeracijskih bioreaktora (slika 2.11.) što predstavlja biološki dio pročišćavanja na CUPOVZ-u.⁴⁴



Slika 2.11. Biološki dio pročišćavanja na CUPOVZ.

U aeracijskim bioreaktorima pri aerobnim uvjetima odvija se razgradnja biorazgradivih organskih spojeva pomoću mikroorganizmima. Kisik potreban za razgradnju dovodi se u bioreaktore po cijeloj površini, a optimalno iskorištavanje kisika te održavanje temperature u bioreaktorima postiže se upuhivanjem zraka na dnu kroz membranske difuzore. Upuhivanjem zraka ujedno se postiže i potrebno miješanje aktivnog mulja i otpadne vode. Projektni podaci bioreaktora navedeni su u tablici 2.3.^{43,44}

Tablica 2.3. Projektni podaci bioreaktora.

Parametar	Mjerna jedinica	Kapacitet 1,2 mil. ES
Dovod BPK ₅ u bioreaktor	kg/d	50 543
Dovod suhe tvari u bioreaktor	kg/d	34 170
Biološki sadržaj suhe tvari	kg ST/m ³	3,3
Opterećenje muljem	kg/(kg d)	0,31
Prostorno opterećenje	kg/(m ³ d)	1,0
Broj jedinica reaktora	komad	8
Volumen po svakom bioreaktoru	m ³	6 262
Dubina vode, odabrana	m	5,5
Širina reaktora, odabrana	m	16,5
Duljina reaktora, odabrana	m	69
Specifična produkcija viška mulja	kg ST/kg BPK ₅	0,96
Starost mulja	d	3,39
Ukupni volumen bioreaktora	m ³	50 096

Obrađena otpadna voda s aktivnim muljem iz bioreaktora odvodi se u naknadne taložnike za izdvajanje pročišćene vode od aktivnog mulja (slika 2.12.). Pročišćena voda odlazi glavnim odvodnim kanalom u recipijent Savu. Višak aktivnog mulja odvodi se na daljnju obradu, a dio aktivnog mulja recirkulira, odnosno vraća se u bioreaktore zajedno s ulaznom otpadnom vodom nakon prethodnih taložnika.



Slika 2.12. Naknadni taložnici na CUPOVZ.

Obrada mulja uključuje obradu izdvojenog viška mulja u liniji vode i masti na mehaničkoj obradi. Mulj istaložen u prethodnim taložnicima gravitacijski se zgušnjava u prethodnim zgušnjivačima. Slika 2.13. prikazuje prethodne i naknadne gravitacijske zgušnjivače za zgušnjavanje primarnog mulja i mulja nakon anaerobne digestije.



Slika 2.13. Prethodni i naknadni gravitacijski zgušnjivači na CUPOVZ.

Višak mulja iz naknadnih taložnika zgušnjava se strojno na trakastim zgušnjivačima uz dodatak sredstva za flokulaciju (slika 2.14.).



Slika 2.14. Trakasti zgušnjivač na CUPOVZ.

Ugušćeni primarni mulj i višak mulja, crpe se preko zasebnih sustava u spremnik s miješalicom unutar kojeg se uvode i prethodno izdvojene masti te željezov (III) klorid za uklanjanje sumpora. Navedena smjesa (tzv. sirovi mulj) uvodi se preko izmjenjivača topline u digestore (slika 2.15.) na truljenje s ciljem stabilizacije mulja i iskorištenja organske tvari za proizvodnju bioplina.



Slika 2.15. Digestori na CUPOVZ.

Stabilizacija mulja provodi se kontinuiranim procesom anaerobne mezofilne digestije. Toplina potrebna za rad sustava grijanja dobiva se iz kogeneracijskog postrojenja. Stabilizirani mulj iz procesa anaerobne digestije odvodi se na gravitacijsko zgušnjavanje u naknadne zgušnjivače (slika 2.13.), nakon čega se strojno dehidrira centrifugama, uz sredstva za flokulaciju. Prije odlaganja odvodnjeni stabilizirani mulj miješa se sa živim vapnom (CaO), pri čemu se uništavaju zaostali patogeni mikroorganizmi. Tijekom stabilizacije mulja unutar digestora dolazi do razgradnje organske tvari pri čemu nastaje bioplin koji se pročišćava preko pješčanih filtara radi uklanjanje viška vlage. Iz bioplina se proizvodi električna energija koja se uvodi u elektromrežu uređaja, a toplinska energija koja nastaje hlađenjem generatora koristi se za zagrijavanje digestora i zgrade obrade mulja.^{20,43,44}

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. MATERIJALI

3.1.1. Otpadna voda

Za praćenje fizikalno-kemijskih pokazatelja komunalne otpadne vode na Centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba (CUPOVZ), korišteni su kompozitni uzorci (24 h) ulazne i izlazne otpadne vode (slika 3.1.). Kompozitni uzorak ulazne otpadne vode uzorkovan je nakon prethodne obrade s grubim i finim rešetkama, a prije pjeskolova i mastolova. Kompozitni uzorak izlazne otpadne vode uzorkovan je nakon naknadnih taložnika, a prije glavnog odvodnog kanala koji utječe u rijeku Savu. Uzorci otpadne vode su izuzimani svakodnevno.



(a)



(b)

Slika 3.1. Kompozitni uzorci ulazne (a) i izlazne (b) otpadne vode s CUPOVZ.

3.1.2. Aktivni mulj

Uzorci aktivnog mulja (slika 3.2.) uzorkovani su iz aeracijskih bioreaktora na Centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba. Korišteni su za praćenje pokazatelja učinkovitosti obrade komunalne otpadne vode te mikroskopsku analizu mulja. Uzorci otpadne vode su izuzimani svakodnevno.



Slika 3.2. Uzorak aktivnog mulja s CUPOVZ.

3.1.3. Mjerni instrumenti i oprema

Protok ulazne i izlazne otpadne vode mjereni su uređajima Altometar IFS4000, Krohne, Njemačka. Temperatura, koncentracija otopljenog kisika, pH-vrijednost i električna vodljivost otpadne vode u aeriranim bioreaktorima, mjereni su uređajima Liquisys MCOM253, Endress+Hauser, Švicarska. Električna vodljivost, temperatura, pH-vrijednost i koncentracija otopljenog kisika u uzorcima otpadne vode mjerene su uređajem inoLab Multi 9430 IDS, WTW, Njemačka, s pripadajućom optičkom kisikovom i pH elektrodom te konduktometrijskom ćelijom, WTW, Njemačka. Za homogenizaciju uzoraka otpadne vode te aktivnog mulja korišten je homogenizator T25D, IKA, Njemačka. Za određivanje suhe tvari u uzorcima otpadne vode korišten je sušionik UN55, Memert, Njemačka. Za precizno vaganje upotrijebljena je analitička vaga ME204, Mettler Toledo, Njemačka. Pomoću KIT testova (Hach Lange, Njemačka) u uzorcima ulazne i izlazne otpadne vode određivani su KPK (LCK 314, 514), BPK₅ (LCK 554, 555), amonij (LCK 303,304,305), nitrati (LCK 339,340), nitriti (LCK 341,342), ukupni dušik (LCK 238, 338), ukupni fosfor (LCK 348, 350), ortofosfat (LCK 348) i sulfati (LCK 153). Rezultati prethodno navedenih pokazatelja su određivani spektrofotometrijski spektrofotometrom DR 3900, Hach Lange, Njemačka. Za određivanje koncentracija KPK, ukupnog dušika i ukupnog fosfora, dodatno je korišten termostat HT 200 S, Dr. Lange, Njemačka. Za određivanje BPK₅ korišten je inkubator Lovibond TC135S, Austrija. Masena

koncentracija (suha tvar) biomase u uzorcima aktivnog mulja određivana je pomoću vlagomjera IR-35 Denver Instrument, Njemačka i MA-35 Sartorius, Njemačka. Instrumenti su prije svake upotrebe kalibrirani. Uzorak suspenzije aktivnog mulja i otpadne vode je pregledavan pomoću svjetlosnog mikroskopa Primo Star, Carl Zeiss, Njemačka, opremljenog kamerom za snimanje mikrofotografija Power Shot A640, Canon.

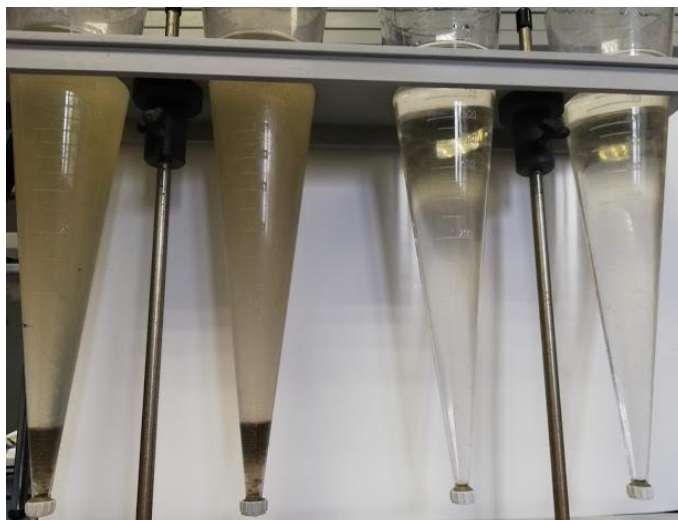
3.2. METODE RADA

Propisani pokazatelji komunalne otpadne vode praćeni su tijekom 2019. godine na Centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda Zagreba. U laboratoriju su provedene analize ulazne i izlazne otpadne vode za kemijsku potrošnju kisika (KPK), taložive krute tvari (TT), ukupne suspendirane tvari (UST), vodljivost (κ), temperaturu (T), pH-vrijednost, koncentraciju otopljenog kisika (O_2) koje su određivane svakodnevno. Petodnevna biokemijska potrošnja kisika (BPK_5) te koncentracije amonija, nitrata, nitrita, ukupnog dušika, ukupnog fosfora i ortofosfata određivane su jednom tjedno. Dodatno, u ulaznoj otpadnoj vodi, jednom tjedno je i određivana koncentracija sulfata.

U uzorcima aktivnog mulja svakodnevno je određivana masena koncentracija biomase (MLSS), volumen istaloženog mulja u 30 minuta (VM), indeks mulja (IVM) te najmanje tri puta tjedno provedena je mikroskopska analiza.

3.2.1. Određivanje taloživih krutih tvari

Postupak se provodi u konusnom Imhoff-ovom lijevku (slika 3.3.) pri čemu se prati taloživost krutih tvari (TT) u 1 dm^3 homogeniziranog uzorka. Određivanje taloživih krutih tvari je provedeno prema standardnoj metodi.⁴⁵ Taloživost se prati tijekom 1 h nakon čega se očita rezultat u $\text{cm}^3/(\text{dm}^3 \text{ h})$. Postupak određivanja taloživih krutih tvari proveden je za paralelne uzorke ulazne i izlazne otpadne vode.



Slika 3.3. Određivanje krutih tvari u otpadnoj vodi u Imhoff-ovim lijevcima.

3.2.2. Određivanje ukupne suspendirane tvari

Ukupna suspendirana tvar (UST) iz otpadne vode određivana je prema standardnoj metodi⁴⁵ iz poznatog volumena uzorka otpadne vode (ovisno o stupnju onečišćenosti) filtriranjem kroz membranski filter veličina pora 0,45 μm te sušenjem u sušioniku pri 105 °C do konstantne mase. Iz razlike masa i poznatog profiltriranog volumena uzroka računa se ukupna suspendirana tvar i izražava u mg/dm^3 .

3.2.3. Određivanje koncentracije organskih i anorganskih pokazatelja

Koncentracije KPK, BPK₅, amonijevog iona, nitrata, nitrita, ukupnog dušika, ukupnog fosfora, ortofosfata i sulfata određivane su u homogeniziranim uzorcima ulazne i izlazne otpadne vode. Za određivanje koncentracije amonija, nitrata, nitrita, ortofosfata i sulfata uzorci otpadne vode su profiltrirani preko naboranog filtera papira. Vrijednosti navedenih pokazatelja su određivane gotovim KIT testovima prema uputi proizvođača.

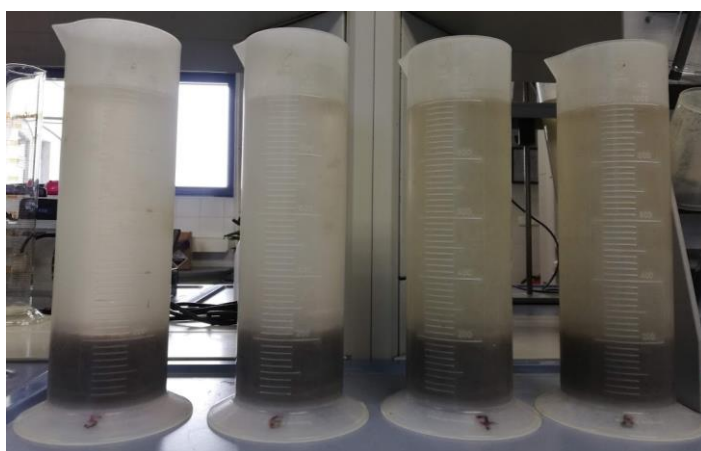
3.2.4. Određivanje masene koncentracije biomase

Masena koncentracija biomase (MLSS) određivana je filtracijom 100 cm^3 aktivnog mulja kroz prethodno izvagani filter papir (Munktell, Njemačka) pomoću Büchner-ovog lijevka. Nakon sušenja filtra s biomasom do konstante mase pri 105 °C

pomoću vlagomjera, računa se masena koncentracija iz razlike masa i poznatog profiltriranog volumena uzorka te se izražava kao g/dm^3 .

3.2.5. Određivanje taloživosti aktivnog mulja

Taloživost aktivnog mulja (VM) određuje se na način da se uzorak aktivnog mulja taloži u menzuri volumena 1 L te se nakon 30 minuta očita volumen istaloženog mulja (slika 3.4.). Po potrebi uzorak se razrijedi izlaznom vodom kako bi očitani volumen bio precizniji ($200 \text{ cm}^3/\text{dm}^3 - 300 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$).



Slika 3.4. Određivanje taloživosti aktivnog mulja.

Na temelju očitane vrijednosti računa se indeks mulja, cm^3/g , kao omjer taloživosti i masene koncentracije biomase:

$$\text{Indeks mulja, } [\text{cm}^3/\text{g}] = \frac{\text{Taloživost aktivnog mulja, } [\text{cm}^3/\text{dm}^3]}{\text{Masena koncentracija biomase, } [\text{g}/\text{dm}^3]} \quad (3.1.)$$

3.2.6. Mikroskopska analiza

Morfološke karakteristike uzorka aktivnog mulja te prisutnost viših mikroorganizama (amebe, bičaši, protozoe, metazoe i dr.) su određivane mikroskopskom analizom. Uzorak je uziman tri puta tjedno i odmah pregledavan pomoću svjetlosnog mikroskopa.

Vlažni preparat pripremljen je nanošenjem kapljice uzorka suspenzije aktivnog mulja i otpadne vode pipetom na predmetnicu. Preparat je pokriven pokrovnicom i promatran pod mikroskopom pri povećanjima od 40, 100 i 400×. Snimane su mikroskopske fotografije, tzv. mikrofotografije u prolaznoj svjetlosti. Fotografiran je reprezentativni uzorak pomoću mikroskopa opremljenog kamerom te su identificirani mikroorganizmi i određene značajne karakteristike aktivnog mulja.

4. REZULTATI

Postupcima opisanim u poglavljima 3.2.1. – 3.2.6. provedena je analiza obrade komunalne otpadne vode s Centralnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba (CUPOVZ). Analizirani su uzorci ulazne otpadne vode, izlazne otpadne vode te aktivni mulj iz aeracijskih bioreaktora tijekom 2019. godine. Praćeni su fizikalno-kemijski (poglavlje 4.1.), organski (poglavlje 4.2.) te anorganski pokazatelji (poglavlje 4.3.) komunalne otpadne vode te fizikalno-kemijski pokazatelji i mikroskopska slika aktivnog mulja (poglavlje 4.4.). Rezultati istraživanja obrade komunalne otpadne vode s aktivnim muljem prikazani su tablicama 4.1. – 4.8. te slikama 4.1. – 4.15.

4.1. FIZIKALNO-KEMIJSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE

Vrijednosti fizikalno-kemijskih pokazatelja za ulaznu i izlaznu komunalnu otpadnu vodu su prikazane tablicama 4.1. – 4.4. i slikom 4.1.

Tablica 4.1. Vrijednosti pokazatelja pH, temperature, električne vodljivosti i koncentracije otopljenog kisika za ulaznu otpadnu vodu na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

Mjeseci, 2019.	pH-vrijednost, –			T, °C			κ , $\mu\text{S}/\text{cm}$			O_2 , mg/dm^3		
	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja
Siječanj	7,82	8,01	7,94	12,3	15,2	14,5	948	2022	1125	0,02	1,94	0,56
Veljača	7,71	8,01	7,86	11,8	14,9	14,2	759	1093	968	0,02	2,74	0,71
Ožujak	7,75	8,10	7,85	13,5	15,7	15,2	742	1243	1002	0,02	2,56	0,37
Travanj	7,60	7,92	7,79	13,8	16,9	15,8	603	1157	1017	0,02	4,75	0,79
Svibanj	7,68	7,88	7,80	14,2	17,7	16,4	444	1160	976	0,01	5,14	0,93
Lipanj	7,49	7,83	7,71	16,9	20,6	19,3	628	1147	966	0,01	4,12	0,72
Srpanj	7,25	7,97	7,56	20,4	22,5	20,9	521	1218	1085	0,01	4,53	0,80
Kolovoz	7,68	7,99	7,85	21,1	22,1	21,5	696	1221	1023	0,01	1,95	0,89
Rujan	7,42	8,06	7,84	19,6	22,1	20,9	669	1239	1110	0,01	5,41	0,71
Listopad	7,39	7,73	7,55	18,0	20,6	19,6	759	1219	1079	0,02	3,17	0,89
Studeni	7,41	7,74	7,59	14,7	18,6	16,9	514	1138	960	0,01	7,98	1,95
Prosinac	7,50	7,75	7,62	11,2	16,8	15,0	586	1102	1010	0,02	6,51	2,98

4. Rezultati

Tablica 4.2. Vrijednosti pokazatelja pH, temperature, električne vodljivosti i koncentracije otopljenog kisika za izlaznu otpadnu vodu na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

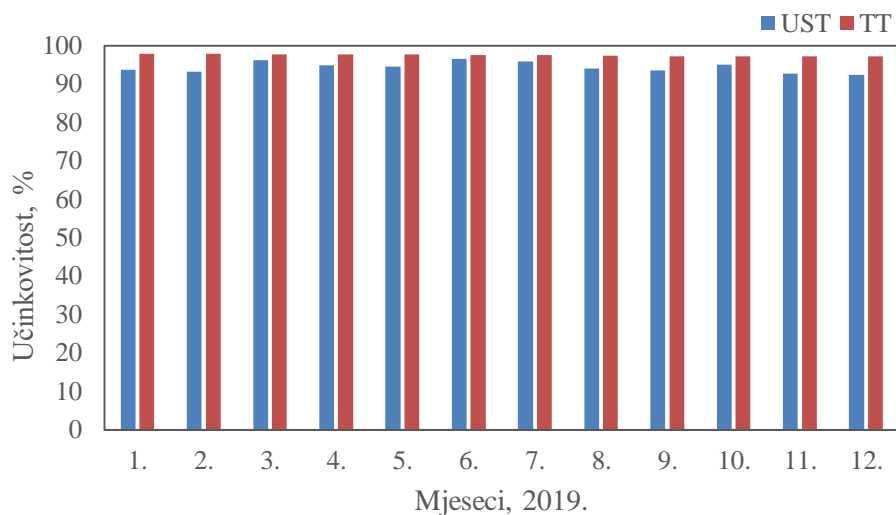
Mjeseci, 2019.	pH-vrijednost, –			T, °C			κ , $\mu\text{S/cm}$			O ₂ , mg/dm ³		
	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja
Siječanj	7,11	7,30	7,24	12,2	14,8	13,9	953	1709	1080	8,11	10,03	9,21
Veljača	7,20	7,54	7,38	11,9	14,6	13,8	698	1074	997	7,48	10,20	9,20
Ožujak	7,09	7,59	7,40	12,4	15,8	15,0	700	1075	990	9,12	11,10	9,75
Travanj	7,05	7,43	7,33	13,4	17,3	15,7	567	1074	920	8,45	10,48	9,40
Svibanj	7,08	7,42	7,31	13,6	18,0	16,4	495	1042	880	8,85	11,00	9,61
Lipanj	6,91	7,29	7,17	17,1	21,2	20,0	532	1040	876	8,22	10,17	9,40
Srpanj	6,97	7,32	7,22	20,7	22,6	21,5	533	1099	960	8,43	9,97	9,41
Kolovoz	6,94	7,42	7,24	21,2	22,8	22,1	547	1077	891	8,91	10,58	9,65
Rujan	6,83	7,44	7,33	19,3	22,6	20,9	560	1082	957	8,55	10,05	9,39
Listopad	6,72	7,29	7,22	16,9	20,6	19,4	620	1082	923	8,59	10,05	9,35
Studeni	6,80	7,13	7,01	14,9	18,3	16,4	412	983	832	8,06	10,80	9,49
Prosinac	6,88	7,29	7,06	11,1	16,3	14,4	515	989	893	9,26	10,62	9,99

Tablica 4.3. Vrijednosti protoka otpadne vode, taložive krute tvari i ukupne suspendirane tvari za ulaznu otpadnu vodu na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

Mjeseci, 2019.	Q , m ³ /dan			TT, cm ³ /(dm ³ h)			UST, mg/dm ³		
	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja
Siječanj	266716	528763	309757	0,3	14,0	8,0	71	369	213
Veljača	267059	563371	321874	4,5	14,0	8,0	124	370	212
Ožujak	252382	538437	292562	4,5	34,0	11,0	156	865	280
Travanj	255220	674356	353563	3,5	26,0	9,0	94	507	245
Svibanj	257548	732240	399441	3,0	10,0	7,0	102	322	192
Lipanj	253276	544571	329312	3,0	14,0	6,0	131	352	210
Srpanj	221440	579103	289664	4,0	9,5	6,0	118	334	178
Kolovoz	216516	498445	260240	2,0	7,0	4,0	82	234	157
Rujan	227197	561765	316791	3,0	13,0	6,0	126	404	189
Listopad	254827	497134	292731	3,5	11,0	6,0	128	354	204
Studeni	245670	732240	490120	2,0	9,5	5,0	66	310	156
Prosinac	344297	732240	481199	1,5	10,0	6,0	73	242	149

Tablica 4.4. Vrijednosti protoka otpadne vode, taložive krute tvari i ukupne suspendirane tvari za izlaznu otpadnu vodu na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

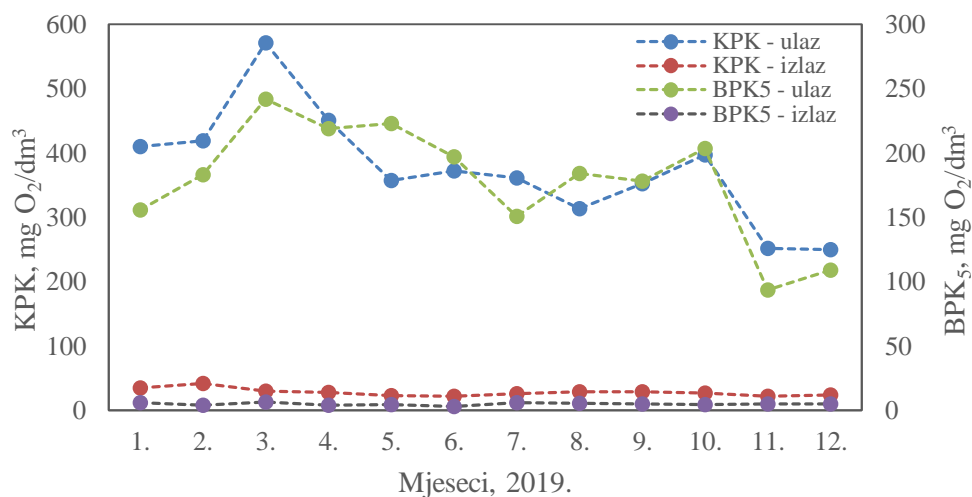
Mjeseci, 2019.	Q , m ³ /dan			TT, cm ³ /(dm ³ h)			UST, mg/dm ³		
	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja
Siječanj	257412	520642	301376	<0,1	2,0	0,1	6	40	13
Veljača	259272	551781	313939	<0,1	0,3	<0,1	6	23	13
Ožujak	244544	526535	284189	<0,1	0,1	<0,1	5	15	10
Travanj	247813	660356	344684	<0,1	0,4	<0,1	5	29	11
Svibanj	251505	732240	389780	<0,1	1,0	<0,1	2	37	9
Lipanj	246945	534925	320427	<0,1	2,0	0,1	3	33	7
Srpanj	215518	568160	282801	<0,1	0,1	<0,1	3	15	7
Kolovoz	210818	492065	254816	<0,1	0,1	<0,1	3	20	7
Rujan	223790	552120	311331	<0,1	0,2	<0,1	6	19	11
Listopad	247824	490893	285371	<0,1	0,1	<0,1	3	17	11
Studeni	238561	732240	479140	<0,1	0,2	<0,1	3	12	9
Prosinac	334874	732240	469784	<0,1	1,5	0,1	4	40	10



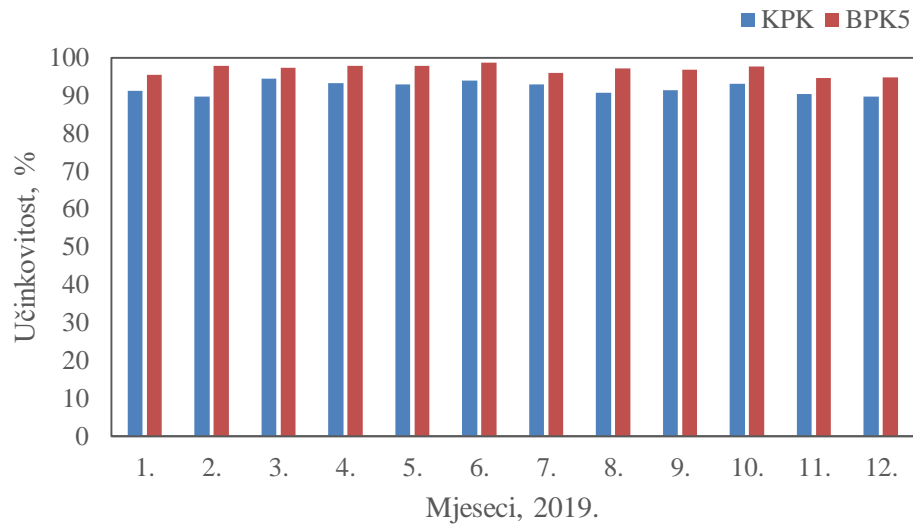
Slika 4.1. Grafički prikaz promjene vrijednosti uklanjanja ukupne suspendirane tvari i taložive krute tvari u komunalnoj otpadnoj vodi na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

4.2. ORGANSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE

Vrijednosti organskih pokazatelja za ulaznu i izlaznu komunalnu otpadnu vodu su prikazane slikama 4.2. i 4.3.



Slika 4.2. Grafički prikaz promjene vrijednosti KPK i BPK₅ u ulaznoj i izlaznoj komunalnoj otpadnoj vodi na CUPOVZ tijekom 2019. godine.



Slika 4.3. Grafički prikaz promjene vrijednosti uklanjanja KPK i BPK₅ u komunalnoj otpadnoj vodi CUPOVZ tijekom 2019. godine.

4.3. ANORGANSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE

Vrijednosti anorganskih pokazatelja za ulaznu i izlaznu komunalnu otpadnu vodu su prikazane tablicama 4.5. – 4.8. te slikom 4.4.

Tablica 4.5. Vrijednosti dušikovih spojeva za ulaznu otpadnu vodu na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

Mjeseci, 2019.	NH ₄ -N mg/dm ³			NO ₃ -N, mg/dm ³			NO ₂ -N, mg/dm ³		
	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja
Siječanj	16,4	26,6	23,4	0,3	0,5	0,4	0,10	0,18	0,14
Veljača	19,1	27,2	22,6	0,5	1,4	0,7	0,10	0,53	0,23
Ožujak	15,1	28,1	21,5	0,8	1,7	1,1	0,30	0,56	0,42
Travanj	12,0	29,4	22,2	0,5	1,6	0,8	0,09	0,36	0,16
Svibanj	18,3	23,0	20,2	0,5	1,1	0,7	0,10	0,67	0,27
Lipanj	15,7	22,3	23,7	0,4	0,6	0,8	0,08	0,10	0,25
Srpanj	17,6	22,8	20,9	0,5	0,8	0,6	0,09	0,50	0,20
Kolovoz	18,7	23,3	21,1	0,4	0,5	0,5	0,11	0,14	0,12
Rujan	12,0	26,7	20,2	0,3	1,9	0,8	0,20	1,29	0,58
Listopad	15,9	29,2	23,1	0,3	0,6	0,4	0,08	0,24	0,16
Studeni	9,2	19,9	13,4	0,8	1,7	1,2	0,13	0,51	0,31
Prosinac	8,5	17,9	14,4	0,6	2,7	1,6	0,18	0,44	0,31

Tablica 4.6. Vrijednosti dušikovih spojeva za izlaznu otpadnu vodu na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

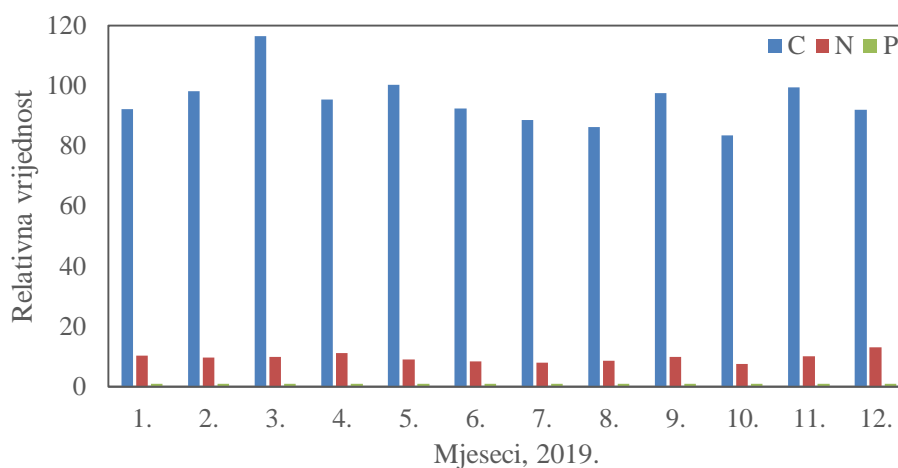
Mjeseci, 2019.	NH ₄ -N mg/dm ³			NO ₃ -N, mg/dm ³			NO ₂ -N, mg/dm ³		
	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja
Siječanj	1,2	6,2	3,2	7,0	19,2	14,5	0,94	3,79	1,80
Veljača	3,7	7,5	5,1	5,0	12,6	7,8	3,31	7,36	5,13
Ožujak	0,8	6,4	2,7	11,8	12,9	12,3	0,45	1,23	0,76
Travanj	1,5	3,3	2,3	7,5	26,7	17,3	0,40	1,35	0,69
Svibanj	0,4	3,4	1,7	13,0	15,6	14,4	0,19	0,45	0,32
Lipanj	0,7	1,4	1,1	12,0	18,9	16,2	0,12	0,21	0,17
Srpanj	0,5	1,5	0,9	12,5	21,2	18,4	0,17	0,29	0,22
Kolovoz	0,2	2,2	1,5	18,4	21,1	20,0	0,02	0,41	0,21
Rujan	0,3	3,7	1,5	9,4	15,4	13,8	0,07	0,42	0,24
Listopad	0,4	4,5	2,3	12,0	24,3	18,3	0,29	0,65	0,47
Studeni	1,1	2,3	1,7	8,4	16,4	13,1	0,11	0,31	0,22
Prosinac	0,2	0,5	0,4	8,6	14,6	11,8	0,31	0,80	0,54

Tablica 4.7. Vrijednosti ukupnog dušika, ukupnog fosfora i ortofosfata za ulaznu otpadnu vodu na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

Mjeseci, 2019.	TN, mg/dm ³			TP, mg/dm ³			PO ₄ -P, mg/dm ³		
	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja
Siječanj	32,6	49,1	40,1	2,48	4,98	4,10	1,63	2,44	2,17
Veljača	33,0	51,7	40,9	3,06	6,02	4,26	1,58	2,49	2,05
Ožujak	33,6	48,2	42,5	2,97	5,90	4,58	1,57	2,49	2,10
Travanj	38,6	48,6	44,4	2,51	5,98	4,42	1,20	2,56	2,08
Svibanj	30,0	43,1	35,8	3,06	4,61	4,02	1,51	2,11	1,84
Lipanj	30,4	34,5	32,1	3,31	5,18	4,59	1,45	2,31	2,13
Srpanj	29,5	35,8	33,0	3,27	4,49	4,16	1,65	2,56	2,17
Kolovoz	32,6	44,0	35,8	3,59	4,55	4,24	1,85	2,13	1,99
Rujan	30,1	46,7	36,0	2,26	5,02	3,84	0,86	2,63	1,82
Listopad	28,3	42,2	36,2	3,96	5,69	4,75	1,56	2,68	2,16
Studeni	16,8	28,1	23,2	1,98	2,65	2,32	0,90	1,65	1,18
Prosinac	20,4	38,3	30,1	1,34	3,25	2,37	0,68	1,59	1,18

Tablica 4.8. Vrijednosti ukupnog dušika, ukupnog fosfora i ortofosfata za izlaznu otpadnu vodu CUPOVZ tijekom 2019. godine.

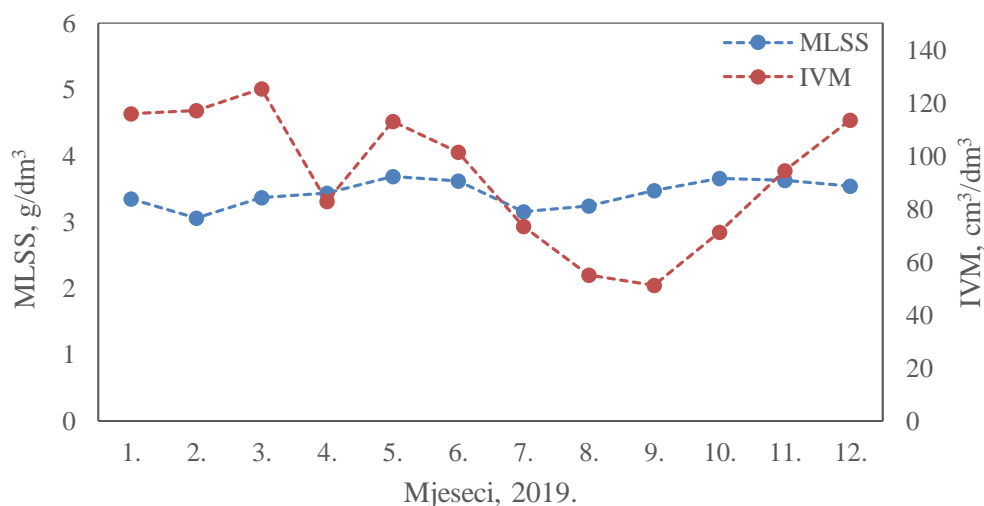
Mjeseci, 2019.	TN, mg/dm ³			TP, mg/dm ³			PO ₄ -P, mg/dm ³		
	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja	min.	maks.	srednja
Siječanj	17,9	22,8	21,3	1,69	2,62	2,27	1,36	2,29	2,01
Veljača	17,1	23,3	19,6	1,44	2,41	2,05	1,19	2,10	1,71
Ožujak	15,1	22,8	18,3	1,48	2,79	2,11	1,20	2,36	1,77
Travanj	20,6	34,4	25,8	1,16	2,92	2,34	0,97	2,61	2,05
Svibanj	16,7	19,1	18,0	1,37	2,38	1,97	1,17	2,09	1,78
Lipanj	15,3	21,1	17,9	1,68	2,66	2,18	1,47	2,56	2,00
Srpanj	15,5	25,1	21,1	1,83	3,25	2,68	1,59	2,97	2,43
Kolovoz	20,9	32,4	24,6	2,41	2,95	2,72	2,19	2,60	2,43
Rujan	11,1	22,9	19,4	1,22	3,32	2,16	0,96	2,98	1,87
Listopad	18,0	25,4	20,9	2,44	3,64	2,93	2,02	3,21	2,59
Studeni	11,2	18,8	15,8	1,03	3,16	1,74	0,88	1,75	1,24
Prosinac	10,8	20,7	16,1	0,54	1,80	1,26	0,60	1,50	1,03



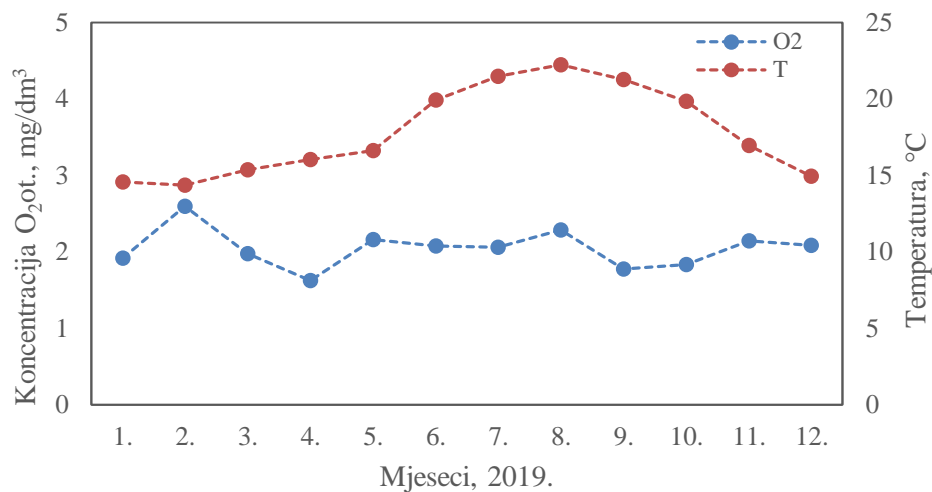
Slika 4.4. Grafički prikaz promjene vrijednosti C/N/P omjera u ulaznoj otpadnoj vodi na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

4.4. KARAKTERISTIKE AKTIVNOG MULJA

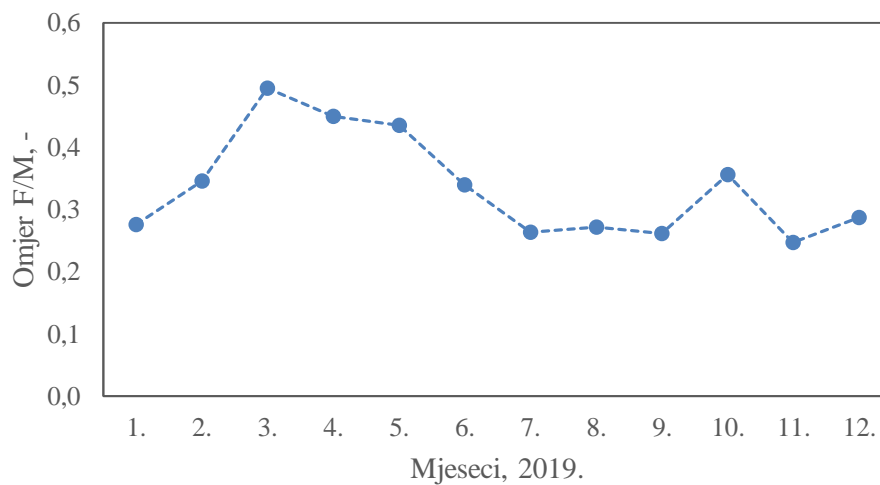
Vrijednosti pokazatelja za aktivni mulj u aeracijskim bioreaktorima prikazane su slikama 4.5. – 4.7.



Slika 4.5. Grafički prikaz promjene vrijednosti koncentracije biomase i vrijednosti indeksa mulja u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine.



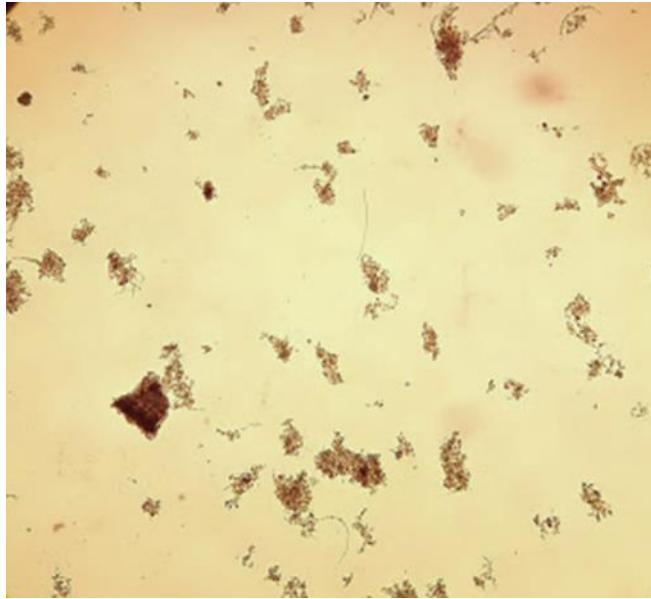
Slika 4.6. Grafički prikaz promjene vrijednosti koncentracije otopljenog kisika i temperature u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine.



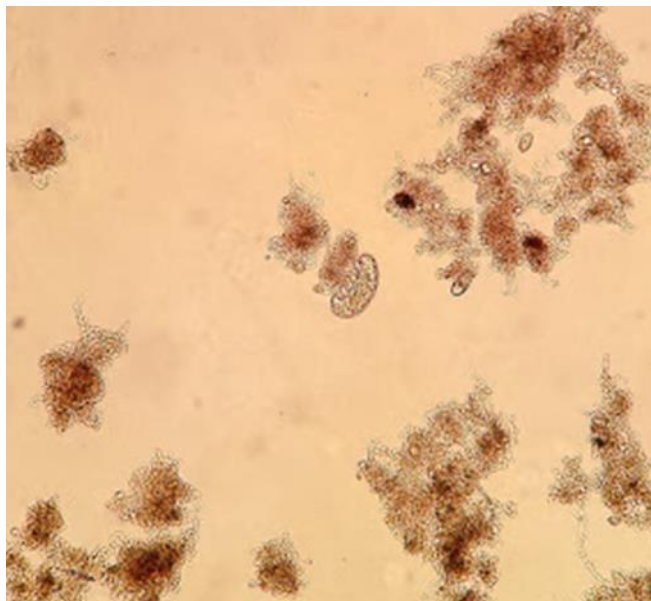
Slika 4.7. Grafički prikaz promjene vrijednosti specifične brzina potrošnje supstrata u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

4.4.1. Mikroskopska analiza

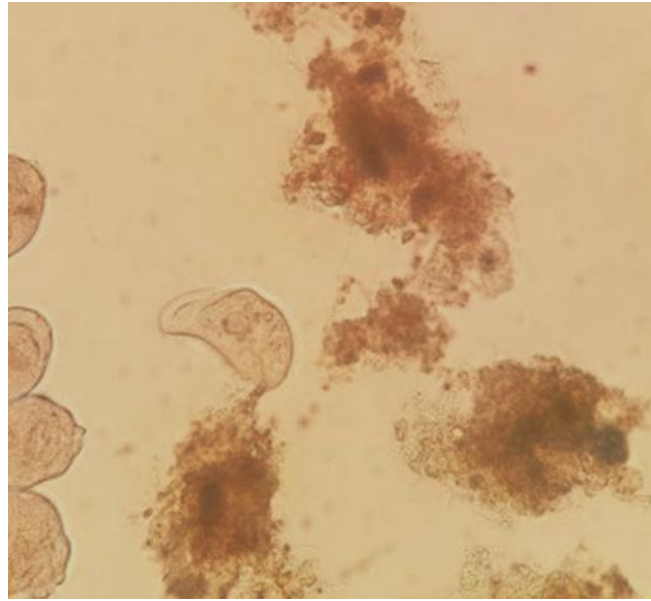
Postupkom opisanim u poglavlju 3.2.6. provedena je mikroskopska analiza suspenzije aktivnog mulja i komunalne otpadne vode tijekom 2019. godine. Rezultati su prikazani slikama 4.8. – 4.15.



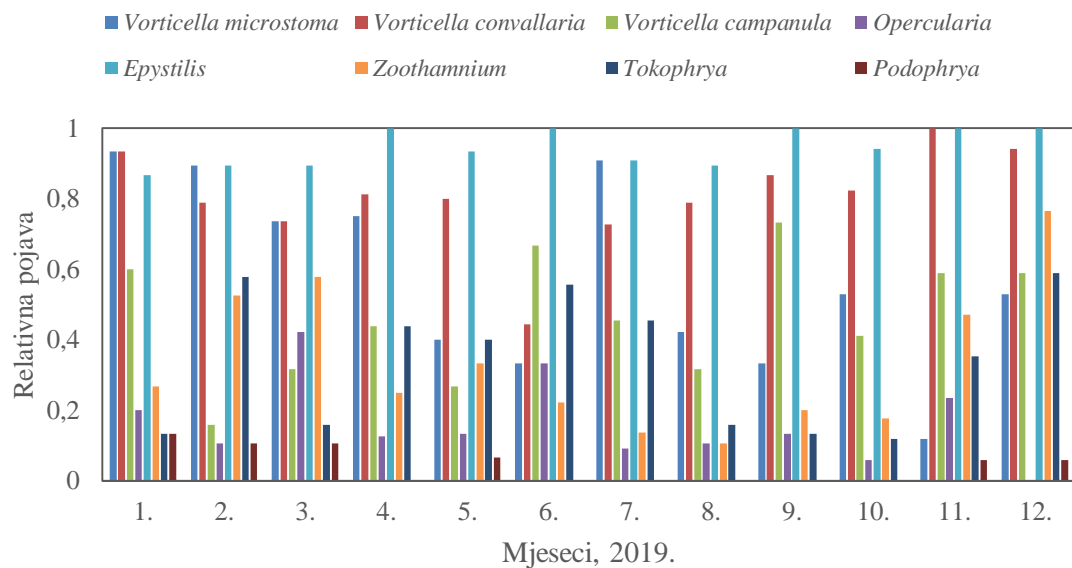
Slika 4.8. Mikrofotografija pahuljica aktivnog mulja u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine, snimljene u prolaznoj svjetlosti, P = 40×.



Slika 4.9. Mikrofotografija pahuljica aktivnog mulja u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine, snimljene u prolaznoj svjetlosti, P = 100×.

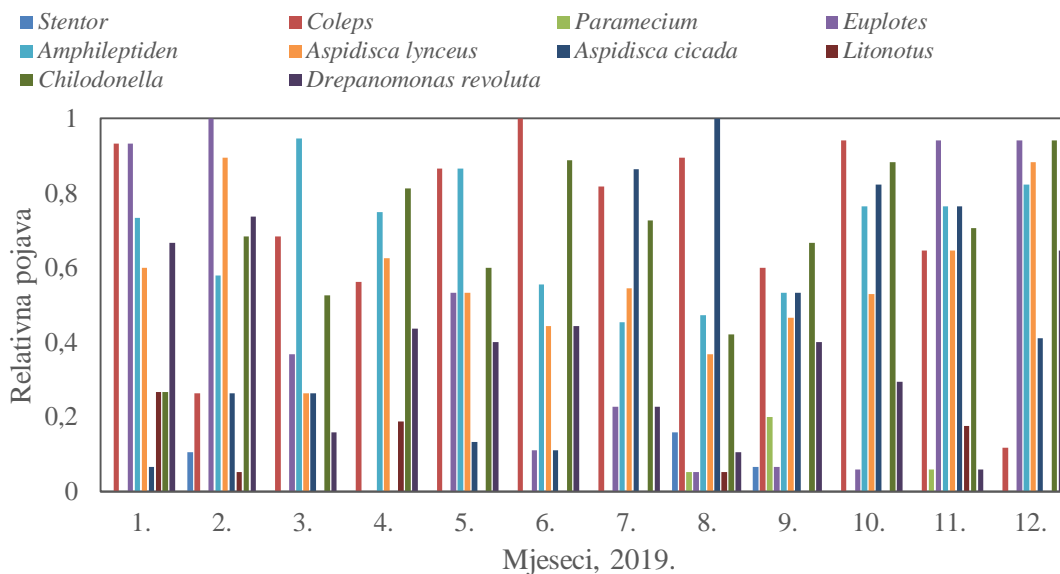


Slika 4.10. Mikrofotografija prisutnih protozoa u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine, snimljene u prolaznoj svjetlosti, P = 400×.

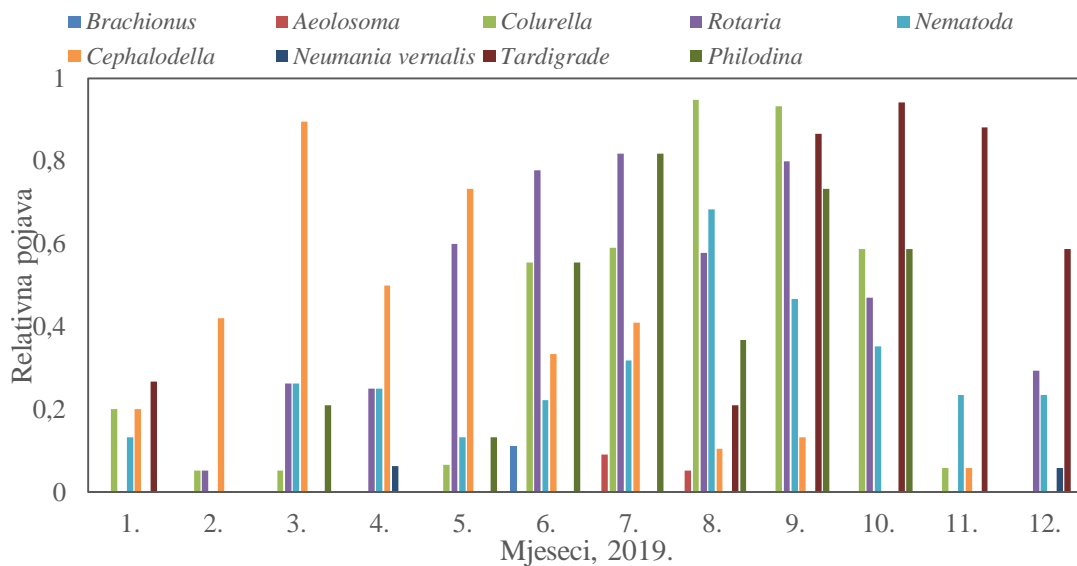


Slika 4.11. Grafički prikaz relativne pojave pričvršćenih trepetljikaša u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

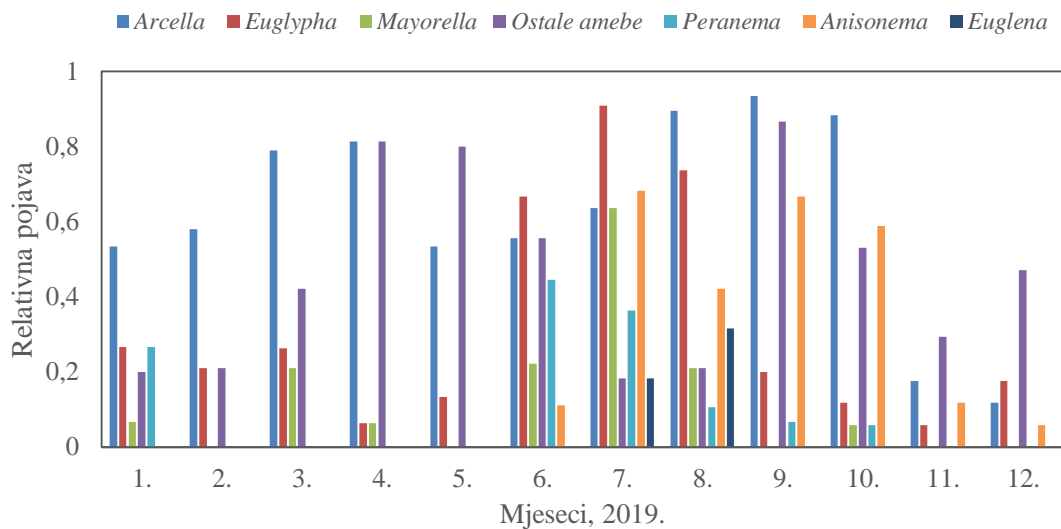
4. Rezultati



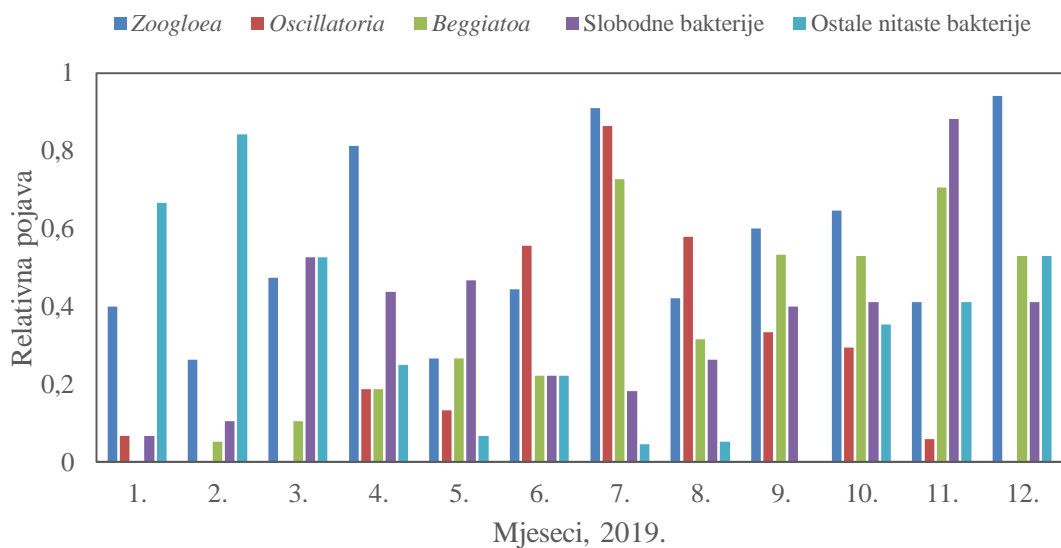
Slika 4.12. Grafički prikaz relativne pojave slobodno plivajućih trepetljikaša u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine.



Slika 4.13. Grafički prikaz relativne pojave metazoa u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine.



Slika 4.14. Grafički prikaz relativne pojave ameba i bičša u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine.



Slika 4.15. Grafički prikaz relativne pojave bakterija u obradi komunalne otpadne vode na CUPOVZ tijekom 2019. godine.

5. RASPRAVA

Obrada otpadnih voda važna je zbog očuvanja zdravlja ljudi i okoliša.^{4,6} Može se provoditi mehaničkim i/ili biološkim postupcima, a omogućava ispunjavanje zahtjeva za propisanom izlaznom kakvoćom. Biološki postupci su najjeftiniji te najprihvatljiviji za okoliš jer se zasnivaju na upotrebi mikroorganizama. Konvencionalni proces s aktivnim muljem temelji se na sposobnosti mikroorganizama da svojim metabolizmom i enzimatskim procesima razgrađuju biorazgradiva onečišćenja prisutna u otpadnim vodama.^{6,24,33} Mikrobiološka zajednica aktivnog mulja sastoji se od bakterija, protozoa, gljiva, algi i metazoa, a sastav i raznolikost mikrobne zajednice utječu na rad uređaja i učinkovitost pročišćavanja. Mikrobna zajednica ovisi o sastavu otpadne vode te svaki uređaj za pročišćavanje ima karakterističnu zajednicu mikroorganizama, na što mogu utjecati koncentracija otopljenog kisika, temperatura, prisutne onečišćujuće tvari i razlike u pH-vrijednost.^{10,11,39} Optimalna vrijednost za otopljeni kisik iznosi 3 – 5 mg/dm³, dok je optimalna pH-vrijednost od 6 do 8. Vrijednosti pH u drugim istraživanjima⁴⁶ kreću se između 6,8 i 8,3, dok je temperatura varirala od 18 °C do 25 °C. Vrijednosti električne vodljivosti bile su u rasponu od 29 – 1015 µS/cm.⁴⁷ KPK u ulaznoj vodi drugih postrojenja iznosi 571 – 1046 mgO₂/dm³, a u izlaznoj otpadnoj vodi 48 – 1180 mgO₂/dm³.^{1,47} Karakteristike ulazne otpadne vode značajno ovise o geografskom položaju, priključenosti i navikama stanovništva, kao o i priključku i vrstama industrijskih i drugih djelatnosti. Izlazne otpadne vode ovise o izvedbi uređaja, vođenju procesa, operativnim parametrima, koje bi trebalo uzeti u obzir pri usporedbi vrijednosti. Međutim učinkovitosti uklanjanja KPK i BPK₅ najčešće su između 80 % i 90 %.^{5,11,19,38,47}

5.1. FIZIKALNO-KEMIJSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE

U tablici 4.1. prikazane su minimalne, maksimalne te srednje vrijednosti za pH-vrijednost, temperaturu, električnu vodljivost i koncentraciju kisika ulazne otpadne vode tijekom svakog mjeseca 2019. godine. Prosječna pH-vrijednost ulazne otpadne vode tijekom 2019. godine iznosila je 7,75. Maksimalna vrijednost zabilježena je tijekom ožujka i iznosila je 8,10; dok je minimalna vrijednost od 7,25

zabilježena u srpnju. Najveće odstupanje od prosjeka je za 0,5 jedinica tijekom srpnja, a može se povezati s višim temperaturama koje pogoduju stvaranju molekularnog amonijaka. Za usporedbu, pH-vrijednosti komunalne otpadne vode mjerene na uređajima za pročišćavanje u Danskoj kreću se u rasponu od 6,85 do 7,55.^{46,48} Temperatura ulazne otpadne vode kretala se od minimalnih 11,2 °C u prosincu do maksimalnih 22,5 °C u srpnju, pri čemu je prosječna vrijednost temperature za cijelu 2019. godinu iznosila 17,5 °C. S obzirom da mikroorganizmi za biorazgradnju troše kisik, očekivana je niža vrijednost otopljenog kisika u ulaznoj otpadnoj vodi. Tijekom ljetnih mjeseci, zbog više temperature zraka, koncentracija otopljenog kisika u ulaznoj otpadnoj vodi se smanjuje.^{49,51,52} Električna vodljivost u ulaznoj otpadnoj vodi kretala se u rasponu od 444 do 2022 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dok je prosječna vrijednost tijekom 2019. godine iznosila 1027 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Električna vodljivost vodene otopine povezana je s vrstom i koncentracijom otopljenih i suspendiranih tvari u vodi. Visoke vrijednosti vodljivosti zabilježene su tijekom siječnja. Pretpostavlja se da su vrijednosti povišene zbog zimskog održavanja cesta u gradu Zagrebu, kada se pri niskim temperaturama primjenjuju sol i druga sredstva kako bi se spriječilo zaleđivanje cesta. Oborinskim vodama sol ulazi u sustav javne odvodnje te dolazi do postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda.⁵²⁻⁵⁴ Niske vrijednosti električne vodljivosti ulazne otpadne vode se mogu objasniti velikom količinom oborina. Uzorci kišnice u prosjeku iznose oko 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.^{55,56} Prosječna vrijednost koncentracije otopljenog kisika u ulaznoj otpadnoj vodi tijekom 2019. godine iznosila je 1,03 mg/dm^3 , dok je maksimalna vrijednost zabilježena tijekom studenog kada je iznosila 7,98 mg/dm^3 . Najmanje vrijednosti otopljenog kisika zabilježene tijekom svih mjeseci su se kretale između 0,01 i 0,02 mg/dm^3 . Niže vrijednosti koncentracija otopljenog kisika ukazuju na razgradnju organske tvari, odnosno mikrobno djelovanje.^{33,57} Visoka vrijednost otopljenog kisika u studenom može se povezati s maksimalnim protokom zabilježenim u istom mjesecu prema tablici 4.3., koji ukazuje na velike količine padalina (prema podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda, čak 179,2 mm, na mjernom mjestu Maksimir) u ulaznoj otpadnoj vodi. Ulazna otpadna voda sadržavala je manje količine organske tvari što je u skladu s vrijednostima KPK i BPK₅ za studeni. Prema slici 4.2. vrijednosti su najmanje upravo u studenom.^{33,53} Tijekom studenog temperatura je niža od prosjeka, a visoka vrijednost otopljenog kisika može ukazivati na smanjenu mikrobnu aktivnost u ulaznoj otpadnoj vodi kojoj pridonosi i niska temperatura okoliša.^{52,57}

Tablica 4.2. prikazuje minimalne, maksimalne te srednje vrijednosti za pH-vrijednost, temperaturu, električnu vodljivost izlazne otpadne vode tijekom svakog mjeseca 2019. godine. Prosječna pH-vrijednost izlazne otpadne vode bila je niža za 7 % od ulazne te je iznosila 7,24. Najveće odstupanje od prosjeka zabilježeno je u studenom kada je vrijednost za 0,44 bila manja od prosjeka. pH-vrijednost izlazne otpadne vode slaže s mjerenjima drugih postrojenja u svijetu gdje se vrijednosti kreću između 6,80 i 8,30 jedinica.⁴⁷ Odstupanja u pH-vrijednosti između ulazne i izlazne otpadne vode su moguća zbog potencijalnog nastanka organskih kiselina tijekom aerobne biološke obrade.⁵¹ Temperatura izlazne otpadne vode pratila je vrijednosti ulazne otpadne vode (tablica 4.1.). Vrijednost temperature je u prosjeku tek za 0,33 % bila niža u izlaznoj otpadnoj vodi. Najveće odstupanje od prosjeka uočeno je tijekom prosinca, gdje je temperatura za 6,4 °C bila niža od prosjeka, a dok je tijekom srpnja za 30 % bila veća od prosjeka. Prema Pravilniku³⁰ dozvoljeno je ispuštanje pročišćene otpadne vode u površinske vode do temperature 30 °C. Temperatura otpadne vode ovisi o klimi, odnosno o temperaturi zraka. Iz navedenog razloga sjevernije države imaju niže temperaturne vrijednosti od izmjerenih na CUPOVZ. Primjerice, u Danskoj je raspon temperatura od 9,0 do 18,0 °C, dok je u CUPOVZ od 13,8 do 22,1 °C.^{5,19,38,48} Električna vodljivost izlazne otpadne vode u prosjeku je iznosila 933 $\mu\text{S}/\text{cm}$, što je za 9 % manje odnosi na ulaznu otpadnu vodu. Najveće odstupanje u izlaznoj otpadnoj vodi zabilježeno je tijekom siječnja kada je vodljivost 83 % veća od prosjeka. Vrijednosti električne vodljivosti usko su povezane s ukupnom koncentracijom soli u otpadnoj vodi, a razlog ekstremnih vrijednosti vodljivosti nakon pročišćavanja posljedica je ekstremnih vrijednosti u ulaznoj otpadnoj vodi koje su pak posljedica održavanja cesta, odnosno ispiranja soli s cesta u sustav javne odvodnje.^{52,54} Prosječna vrijednost koncentracije otopljenog kisika u izlaznoj otpadnoj vodi tijekom 2019. godine je 9,5 mg/dm^3 . Tijekom procesa pročišćavanja koncentracija otopljenog kisika povećala se u prosjeku za 89 %, što je posljedica aeracije tijekom procesa biološke obrade. Tijekom veljače zabilježena je najniža vrijednost otopljenog kisika kada je bila za 21 % niža od prosjeka, što se pojašnjava mogućim mikrobnim djelovanjem na sadržaj biorazgradive organske tvari u izlaznoj otpadnoj vodi.^{47,58,59}

Tablicom 4.3. prikazane su minimalne, maksimalne te srednje vrijednosti za protok, taložive krute tvari i ukupnu suspendiranu tvar ulazne otpadne vode CUPOVZ tijekom svakog mjeseca 2019. godine. Prosječna vrijednost protoka tijekom 2019.

godine iznosila je 344771 m³/dan. Maksimalni protok ulazne otpadne vode zabilježen je tijekom svibnja, studenog i prosinca kada je iznosio 732240 m³/dan. Minimalni protok zabilježen je tijekom kolovoza i iznosio je 216516 m³/dan. Vrijednosti protoka povezane su s količinom oborina tijekom godine. Tijekom ljetnih mjeseci niži su protoci zbog manje količine oborina, odnosno dužih sušnih razdoblja.⁵³ Prosječna vrijednost taložive krute tvari u ulaznoj otpadnoj vodi tijekom 2019. godine je iznosila 7 cm³/dm³ h. Najniža vrijednost od 0,3 cm³/dm³ h zabilježena je tijekom siječnja, a najviša tijekom ožujka kada je iznosila 34 cm³/dm³ h. Taložive krute tvari čine suspendirane tvari dovoljne veličine i težine da se istalože u 1 h. Visoke vrijednosti taloživih tvari najčešće se javljaju pri većem protoku, tijekom prvih većih oborina nakon dužeg vremenskog razdoblja, koje ispiru urbane površine i kanalizacijski sustav.^{32,60} Prosječna vrijednost ukupne suspendirane tvari u ulaznoj otpadnoj vodi iznosila je 199 mg/dm³. Minimalna vrijednost suspendirane tvari u ulaznoj otpadnoj vodi je zabilježena u studenom u iznosu od 66 mg/dm³, a maksimalna u ožujku od 865 mg/dm³. Minimalne vrijednosti objašnjavaju se dužim kišnim razdobljem, a maksimalne, kao i kod taložive tvari, prvim snažnijim oborinama nakon nekog vremenskog razdoblja bez oborina, koje ispiru urbane površine i kanalizacijske cijevi.⁶⁰ Taložive i suspendirane tvari mogu sadržavati toksične komponente, uzrokovati fiziološki stres mikroorganizmima, inhibirati metabolizam te mogu dovesti do nepoželjnih posljedica.^{32,46}

Tablicom 4.4. prikazane su minimalne, maksimalne te srednje vrijednosti za protok, taložive krute tvari i ukupne suspendirane tvari izlazne otpadne vode CUPOVZ tijekom svakog mjeseca 2019. godine. Prosječna vrijednost protoka izlazne otpadne vode tijekom 2019. godine iznosila je 336470 m³/dan. Vrijednosti protoka izlazne otpadne vode u skladu su s vrijednostima protoka ulazne otpadne vode te su u prosjeku za samo 2 % niže. Maksimalni protok zabilježen je tijekom svibnja, studenog i prosinca, a najmanji protok tijekom kolovoza kada je za 37 % bio niži od prosjeka. Prosječna vrijednost taložive krute tvari u izlaznoj otpadnoj vodi je <0,1 cm³/dm³h. Najviša vrijednost zabilježena je tijekom siječnja i lipnja kada je iznosila 2 cm³/dm³ h., Učinkovitost uklanjanja taloživih krutih tvari tijekom 2019. u prosjeku je iznosila 98 % kako je prikazano na slici 4.1 Prosječna vrijednost ukupne suspendirane tvari u izlaznoj otpadnoj vodi iznosila je 10 mg/dm³. Minimalna vrijednost zabilježena je u svibnju u iznosu od 2 mg/dm³, a maksimalna u siječnju i prosincu od 40 mg/dm³ u izlaznoj otpadnoj vodi. Za usporedbu, u drugim istraživanjima

vrijednosti ukupne suspendirane tvari u izlaznoj otpadnoj vodi iznose od 3 do 140 mg/dm³. Prema nekim autorima, maksimalne vrijednosti tijekom siječnja i prosinca mogu se povezati s manjom raznolikosti mikroorganizama tijekom tih mjeseci, osobito sadržajem metazoa koje uklanjaju suspendirane tvari.^{47,56}

Slika 4.1. prikazuje prosječne vrijednosti učinkovitosti uklanjanja ukupne suspendirane tvari i taložive krute tvari u komunalnoj otpadnoj vodi CUPOVZ tijekom svih mjeseci 2019. godine. Prosječna vrijednost učinkovitosti uklanjanja ukupne suspendirane tvari tijekom 2019. godine iznosila je 94 %, dok je najviša iznosila 96 %. Najmanja prosječna učinkovitost uklanjanja ukupne suspendirane tvari ostvarena je tijekom prosinca i iznosila je 92 %, dok je najmanja vrijednost uklanjanja propisana Pravilnikom³¹ i iznosi 90 %. I u drugim je istraživanjima učinkovitost uklanjanja suspendirane tvari iznosila 80% - 95%.¹¹ Prosječna učinkovitost uklanjanja taložive krute tvari tijekom 2019. godine iznosila je 98 %, što je ujedno i najviša prosječna vrijednost, dok je najmanja iznosila 97 %. Važno je napomenuti da se taložive tvari CUPOVZ-a uklanjaju fizikalnim putem, kao i dio suspendiranih tvari.⁴⁴

5.2. ORGANSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE

Prosječne vrijednosti KPK i BPK₅ za ulaznu i izlaznu komunalnu otpadnu vodu tijekom 2019. godine prikazane su slikom 4.2. Vrijednost KPK u ulaznoj otpadnoj vodi u prosjeku je iznosila 376 mgO₂/dm³. Minimalna zabilježena vrijednost je 250 mgO₂/dm³, a maksimalna 571 mgO₂/dm³. Maksimalno odstupanje od prosjeka za 52 % zabilježeno je tijekom ožujka. U izlaznoj otpadnoj vodi prosječna vrijednost je iznosila 28 mgO₂/dm³, a maksimalno odstupanje od prosjeka zabilježeno je tijekom veljače kada je vrijednost za 46 % bila viša od prosječne vrijednosti. Visoka vrijednost KPK zabilježena u izlaznoj otpadnoj vodi mogući je razlog niže vrijednosti koncentracije otopljenog kisika zabilježenog za izlaznu otpadnu vodu u istom mjesecu, s obzirom da mikroorganizmi pri razgradnji prisutne organske tvari troše otopljeni kisik.^{33,57} Najniža vrijednost KPK u izlaznoj otpadnoj vodi zabilježena je u studenom, koja je za 6 mgO₂/dm³ niža od prosjeka. Minimalne i maksimalne vrijednosti KPK prate trend vrijednosti taloživih i suspendiranih tvari. Minimalne vrijednosti objašnjavaju se dužim kišnim razdobljem, a maksimalne, prvim snažnijim oborinama (nakon nekog vremenskog razdoblja bez oborina) koje ispiru urbane površine i kanalizacijske cijevi. Vrijednosti KPK izmjerene tijekom istraživanja na

drugim uređajima za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda u svijetu kreću se od 31 do 211 mg O₂/dm³ i od 571 do 1046 mgO₂/dm³ za ulaznu otpadnu vodu, odnosno od 32 do 52 mg O₂/dm³ za izlaznu otpadnu vodu. Karakteristike ulazne otpadne vode znatno se razlikuju od uređaja do uređaja. Vrijednosti u ovom istraživanju su između objavljenih vrijednosti, pa se može reći da ne odskakuju u odnosu na druge uređaje. Dobivene vrijednosti ovise o karakteristikama uređaja, industriji, klimi te navikama stanovništva stoga ih je bez svih potrebnih informacija teško uspoređivati.^{1,5,19,47} Prosječna vrijednost BPK₅ u ulaznoj otpadnoj vodi iznosila je 178 mgO₂/dm³. Najveće odstupanje od prosjeka je izmjereno tijekom studenog kada je vrijednost bila niža za 48 %. U izlaznoj otpadnoj vodi prosječna vrijednost je iznosila 5 mgO₂/dm³, a maksimalno odstupanje od prosjeka zabilježeno je tijekom ožujka i lipnja kada je vrijednost BPK₅ iznosila 7 mg O₂/dm³ odnosno 3 mg O₂/dm³, što je odstupanje od 40 %. Vrijednosti BPK₅ prate vrijednosti KPK. Slabija učinkovitost pročišćavanja uzrokuje povišenu koncentracija BPK₅ na izlazu.^{19,46} Na učinkovitost pročišćavanja utječe i vrijeme zadržavanja otpadne vode u aeracijskom bioreaktoru koje može biti prekratko za potpunu razgradnju biorazgradive organske tvari, gdje se kraće vrijeme zadržavanja otpadne vode javlja pri višim protocima.³⁵ Omjer vrijednosti BPK₅/KPK u ulaznoj otpadnoj vodi u prosjeku iznosio je 0,5 što ukazuje na biorazgradivost sadržanih organskih tvari u otpadnoj vodi. Za 60 % niža vrijednost omjera u izlaznoj otpadnoj vodi ukazuje da je veći dio biorazgradive organske tvari razgrađen.^{16,62} Na temelju vrijednosti KPK može se pretpostaviti vrijednost BPK₅. Poznavanje omjera omogućuje predviđanje BPK₅ vrijednosti.^{16,46}

Slikom 4.3. prikazane su vrijednosti učinkovitosti uklanjanja KPK i BPK₅ u komunalnoj otpadnoj vodi CUPOVZ tijekom 2019. godine. Prosječna učinkovitost uklanjanja organskog opterećenja izraženog preko KPK iznosila je 92 %, dok je najveća učinkovitost uklanjanja iznosila 94 %, a najmanja 90 %. Prosječna učinkovitost uklanjanja biorazgradivog organskog opterećenja izraženog preko BPK₅ iznosila je 97 %, a najmanja 95 %. Prosječna učinkovitost uklanjanja KPK i BPK₅ znatno je viša od propisanih vrijednosti³⁰. Prema drugim istraživanjima, učinkovitost uklanjanja kreće se od 80 do 90 % odnosno od 80 do 98 %.¹¹

5.3. ANORGANSKI POKAZATELJI OTPADNE VODE

Minimalne, maksimalne te srednje vrijednosti amonija, nitrata i nitrita za ulaznu otpadnu vodu CUPOVZ tijekom 2019. godine prikazani su tablicom 4.5. Vrijednosti amonija u ulaznoj otpadnoj vodi kretale su se između 8,5 i 29,4 mg/dm³. Prosječna vrijednost je iznosila 21,0 mg/dm³, a maksimalno odstupanje od prosjeka zabilježeno tijekom studenog kada je vrijednost bila za 38 % niža od prosjeka. U drugim istraživanjima dane su vrijednosti od 27 – 58 mg/dm³. Koncentracija nitrata u ulaznoj otpadnoj vodi u prosjeku iznose 0,8 mg/dm³, maksimalna vrijednost zabilježena je u prosincu te je iznosila 2,7 mg/dm³. Vrijednost nitrita u ulaznoj otpadnoj vodi tijekom 2019. u prosjeku je iznosila 0,26 mg/dm³, dok je minimalna vrijednost zabilježena je u listopadu i lipnju kada je iznosila 0,08 mg/dm³. Prosječne koncentracije nitrita slažu se s rezultatima drugih uređaja za pročišćavanje komunalne otpadne vode, gdje su iznosile 0,1 – 0,3 mg /dm³.⁴⁷

Tablica 4.6. prikazuje minimalne, maksimalne te srednje vrijednosti amonija, nitrata i nitrita za izlaznu otpadnu vodu CUPOVZ tijekom 2019. godine. Prosječna vrijednost amonija u izlaznoj otpadnoj vodi iznosila je 2,0 mg/dm³, što je 10 % prosječne vrijednosti amonija u ulaznoj otpadnoj vodi tijekom 2019. godine. Maksimalna vrijednost amonija u izlaznoj otpadnoj vodi je uočena u veljači kada je iznosila 7,5 mg/dm³, dok je minimalna vrijednost uočena u kolovozu i prosincu kada je bila za 90 % niža od prosječne vrijednosti. Učinkovitost uklanjanja amonija u prosjeku iznosi 90 %, dok je na drugim uređajima zabilježeno od 80 do 99 %. Vrijednosti amonija u izlaznoj otpadnoj vodi iznose od 1,6 do 21,9 mg/dm³.¹¹ Prosječna vrijednost nitrata u izlaznoj otpadnoj vodi tijekom 2019. iznosila je 14,8 mg/dm³, dok je minimalna vrijednost zabilježena u veljači i iznosila je 5,0 mg/dm³, a maksimalna u travnju 26,7 mg/dm³. Povećanje nitrata u prosjeku iznosi 95 % u odnosu na vrijednosti u ulaznoj otpadnoj vodi. Vrijednosti amonija u ulaznoj otpadnoj vodi prate vrijednosti nitrata u izlaznoj otpadnoj vodi, takve vrijednosti ukazuju da proces ide u dobrom smjeru odnosno, amonijak preko nitrita prelazi u nitrate.^{36,63} Prosječna vrijednost nitrita u izlaznoj otpadnoj vodi tijekom 2019. je iznosio 0,9 mg/dm³. Maksimalna vrijednost zabilježena je u veljači te je iznosila 7,36 mg/dm³. Takva visoka vrijednost ukazuje na usporen proces nitrifikacije, a podudara se i s visokom vrijednošću amonija u izlaznoj otpadnoj vodi te niskoj vrijednosti nitrata u istom mjesecu.^{41,63}

Tablicom 4.7. prikazane su minimalne, maksimalne te srednje vrijednosti ukupnog dušika, ukupnog fosfora i ortofosfata za ulaznu otpadnu vodu CUPOVZ tijekom 2019. godine. Ukupni dušik u ulaznoj otpadnoj vodi u prosjeku je iznosio 35,8 mg/dm³, minimalna vrijednost bilježi se u studenom u iznosu od 16,8 mg/dm³, a maksimalna vrijednost zabilježena tijekom veljače za 44 % viša je od prosječne vrijednosti. Vrijednosti dobivene na drugim uređajima iznose od 19,2 do 45,6 mg/dm³.¹¹ Ukupni fosfor u ulaznoj otpadnoj vodi u prosjeku je iznosio 3,97 mg/dm³, dok je minimalna vrijednost zabilježena u prosincu te je za 66 % bila niža od prosječne. Maksimalna vrijednost ukupnog fosfora je iznosila 6,02 mg/dm³ te je zabilježena tijekom veljače. U drugim istraživanjima koncentracija ukupnog fosfora u otpadnoj vodi iznosila je od 2,40 do 4,36 mg/dm³, što je uži raspon vrijednosti. Nadalje, vrijednost ortofosfata u ulaznoj otpadnoj vodi u prosjeku je iznosila 1,91 mg/dm³, pri čemu je najveća vrijednost zabilježena u listopadu od 2,68 mg/dm³.⁴⁷

Tablica 4.8. prikazuje minimalne, maksimalne te srednje vrijednosti ukupnog dušika, ukupnog fosfora i ortofosfata za izlaznu otpadnu vodu CUPOVZ tijekom 2019. godine. U prosjeku ukupni dušik u izlaznoj otpadnoj vodi iznosio je 19,9 mg/dm³, a maksimalna vrijednost zabilježena je u travnju 34,4 mg/dm³, dok je minimalna vrijednost za 46 % niža od prosjeka zabilježena u prosincu. U izlaznoj otpadnoj vodi vrijednost ukupnog dušika je u prosjeku 44 % niža od vrijednosti u ulaznoj otpadnoj vodi, dok se vrijednosti uklanjanja u drugim istraživanjima kreću u rasponu od 30 do 70 %, prosječne vrijednosti zabilježene tijekom ovog rada unutar su raspona danog u drugim istraživanjima. Ukupni fosfor u izlaznoj otpadnoj vodi u prosjeku je iznosio 2,20 mg/dm³ što je 45 % niža vrijednost u odnosu na ulaznu otpadnu vodu. Maksimalna vrijednost je zabilježena u listopadu 3,64 mg/dm³, a minimalna tijekom prosinca kada je iznosila 0,54 mg/dm³. Uklanjanje fosfora u drugim istraživanjima veće je od prosjeka tijekom 2019. godine na CUPOVZ, te iznosi od 60 do 80 %.¹¹ Vrijednost ortofosfata u izlaznoj otpadnoj vodi u prosjeku je iznosila 1,91 mg/dm³, dok je najveća vrijednost zabilježena u listopadu od 3,21 mg/dm³. Vrijednosti ortofosfata na ulazu i izlazu prate trend vrijednosti ukupnog fosfora, a u prosjeku vrijednosti su jednake u ulaznoj i izlaznoj otpadnoj vodi. Koncentracije ortofosfata u drugim istraživanjima kreću se od 0,1 do 4,0 mg /dm³, a maksimalne koncentracije ortofosfata su tijekom jeseni, kao i kod CUPOVZ. Više vrijednosti ortofosfata obično dovode do povećane eutrofikacije.⁴⁷

Slika 4.9. prikazuje prosječne vrijednosti C:N:P omjera ulazne otpadne vode tijekom 2019. godine. U prosjeku je C:N:P omjer iznosio 95:10:1. Omjer znatno odstupa u odnosu na prosjek tijekom ožujka, kada je sadržaj ugljika bio znatno viši. Također može se primijetiti pad omjera tijekom ljetnih mjeseci. Ako je omjer C:N u ulaznoj otpadnoj vodi izrazito visok, što je slučaj kod naglih opterećenja, heterotrofni organizmi troše više raspoloživog amonijaka i dušika od nitrificirajućih organizama. Omjer C:N:P utječe na brojnost mikroorganizama, koji omogućuju uklanjanje različitih vrsta molekula te učinkovito pročišćavanje otpadne vode.^{24,35-37}

5.4. KARAKTERISTIKE AKTIVNOG MULJA

U slici 4.5. prikazane su vrijednosti koncentracije biomase i vrijednosti indeksa mulja u aeracijskom bioreaktoru tijekom 2019. godine. Prosječna vrijednost masene koncentracije biomase (MLSS) iznosila je 3,40 g/dm³. U svibnju je zabilježena maksimalna vrijednost MLSS koja je za 8 % bila veća od prosječne vrijednosti. Minimalna vrijednost od 3,06 g/dm³ zabilježena je tijekom veljače. Sve navedene srednje vrijednosti u skladu su s literaturnim podacima gdje se preporučuje koncentracija biomase između 2 i 4 g/dm³ za obradu komunalne otpadne vode konvencionalnim postupkom s aktivnim muljem.^{46,64} Prosječne vrijednosti za indeks mulja su se kretale između 51 cm³/g i 125 cm³/g, dok je prosječna vrijednost za 2019. godinu iznosila 93 cm³/g što je unutar raspona preporučenih vrijednosti.³⁵

Promjene vrijednosti koncentracije otopljenog kisika i temperature u obradi komunalne otpadne vode CUPOVZ tijekom 2019. u bioreaktoru prikazane su slikom 4.6. Prosječna temperatura u bioreaktoru je iznosila 17,8 °C. Minimalna prosječna vrijednost zabilježena je u veljači i iznosila je 14,4 °C, a maksimalna u kolovozu i iznosi je 22,2 °C. Temperatura u bioreaktoru prati vrijednost temperature ulazne otpadne vode (tablica 4.1.). Temperatura je važan parametar koji utječe na biološku obradu.^{51,64,65} Uz niže temperaturne vrijednosti veže se i prekomjeran broj nitastih bakterija koje uzrokuju pjenjenje u sustavu s aktivnim muljem, tj. plivajući mulj.⁴⁸ Prosječna vrijednost koncentracije otopljenog kisika tijekom 2019. godine u bioreaktoru je iznosila 2,05 mg/dm³, dok je maksimalna vrijednost zabilježena u veljači i iznosila je 2,60 mg/dm³. Tijekom travnja zabilježena je najniža vrijednost koja je za 20 % bila niža od prosječne. Vrijednost otopljenog kisika ovisi o kemijskim, fizikalnim i biokemijskim aktivnostima koje se javljaju u bioreaktoru

tijekom pročišćavanja otpadne vode.⁶⁴ Kisik ima ograničenu topljivost u vodi i izravno je povezan s atmosferskim tlakom, temperaturom i koncentracijom soli u vodi. Niska koncentracija otopljenog kisika može ograničiti metabolizam mikroorganizama. Koncentracija otopljenog kisika određuje brzinu razgradnje organske tvari, aerobni rast, ali i troškove upravljanja procesom. Koncentracija otopljenog kisika mora se redovito kontrolirati jer je jedan od ključnih parametara za učinkovito vođenje procesa u bioreaktoru.^{39,66} Pri visokim koncentracijama otopljenog kisika smanjena je denitrifikacija, a niske koncentracije otopljenog kisika ograničavaju oksidaciju amonija. Koncentracija otopljenog kisika održava se upuhivanjem zraka što značajno utječe i na troškove pročišćavanja otpadnih voda.^{46,65,66} Stoga se maksimalna koncentracija otopljenog kisika u veljači može pripisati osiguravanju dovoljne koncentracije kisika aeriranjem bioreaktora. Na taj način se sprječava nastajanje mikroaerobnih uvjeta koji pogoduju rastu i razvoju nitastih bakterija. Nizak omjer C:N i više koncentracije otopljenog kisika u ulaznoj otpadnoj vodi pospješuju proces nitrifikacije tijekom obrade te smanjuju potrebu za upuhivanje zraka u bioreaktor.^{48,67}

Slikom 4.7. prikazana je promjena vrijednost specifične brzine potrošnje supstrata tijekom 2019. godine. Prosječna vrijednost F/M je iznosila 0,3, dok je najveća potrošnja supstrata zabilježena tijekom ožujka kada je F/M omjer bio jednak 0,5. Najniža vrijednost F/M od 0,2 se može uočiti za studeni kada je iznosila 0,2. Neravnoteža u vrijednosti F/M omjera može poremetiti učinkovitost biološke obrade otpadne vode. Ravnoteža između dostupne količine hrane i količine mikroorganizama u bioreaktoru ukazuje hoće li mikroorganizmi imati dovoljno hrane. Ukoliko nemaju dovoljno hranjivih tvari na raspolaganju počinju odumirati, odnosno ukoliko je prevelika količina hranjivih tvari, a nedovoljna količina mikroorganizma, neće doći do učinkovite razgradnje.^{32,60} Prema literaturi, za konvencionalni postupak s aktivnim muljem optimalna vrijednost F/M iznosi između 0,25 i 0,45. Prosječna vrijednost F/M za CUPOVZ nalazila se unutar optimalnih vrijednosti za učinkovit rad uređaja tijekom 2019. godine.⁶⁰

5.4.1. Mikroskopska analiza aktivnog mulja

Mikroskopska analiza se sastojala od vizualnog pregleda uzorka suspenzije aktivnog mulja i otpadne vode te određivanja karakteristika pahuljica i prisutnosti

indikatora kakvoće aktivnog mulja. Mikrofotografija pahuljica aktivnog mulja pri povećanju od 40× prikazane su slikom 4.8. Mogu se uočiti veće potpuno formirane pahuljice aktivnog mulja te manje pahuljice koje su u procesu formiranja. Prisutnost nove biomase ukazuje na dobar rast i razmnožavanje mikroorganizama prisutnih u aktivnom mulju.³⁶

Slike 4.9. i 4.10. prikazuju pahuljice aktivnog mulja pri većim povećanjima, 100× i 400×, radi boljeg uočavanja morfologije pahuljica aktivnog mulja te pobliže identifikacije indikatora kakvoće mulja. U navedenim slikama mogu se uočiti kompaktne pahuljice, uz prisustvo manjih pahuljica koje međusobnim povezivanjem počinju stvarati veću pahuljicu. Tamnija boja pahuljica ukazuje na kompaktnost i starost mulja. Prisutni mikroorganizmi u sustavu utječu na stvaranje i kakvoću pahuljica, koje se ovisno o svojoj morfologiji lakše ili teže talože u naknadnim taložnicima.³⁶ Prisutnost indikatora kakvoće mulja, kao što su amebe, bičaiši, trepetljikaši, metazoe i dr., u biološkom sustavu su pokazatelji su njegova zdravlja i starosti.^{39,64} Brojnost prisutnih protozoa u aktivnom mulju ukazuje na dobru kakvoću aktivnog mulja te da su zadovoljeni uvjeti u kojima se aktivni mulj može održavati, kao što su koncentracija kisika, koncentracija hranjivih tvari i sl.³⁹

Slikom 4.11. prikazana je relativna pojava pričvršćenih trepetljikaša u obradi komunalne otpadne vode CUPOVZ tijekom 2019. godine. Pričvršćeni trepetljikaši pojavljuju se pri kraju procesa, odnosno pri većoj starosti aktivnog mulja. *Vorticella microstoma* bila je prisutna u prva četiri mjeseca češće nego ostatak godine, a znatno rjeđe viđena je tijekom studenog. Njezina pojava ukazuje na manju kvalitetu izlazne otpadne vode, odnosno povišenim vrijednostima BPK₅ u izlaznoj vodi, te niskim koncentracijama otopljenog kisika.^{39,69,72} No takva korelacija nije primijećena u CUPOVZ. *Vorticella convallaria* je pokazatelj učinkovitog postupka pročišćavanja komunalne otpadne vode. Pojavljivala se gotovo jednako tijekom cijele godine, osim u lipnju kada je njena pojava rjeđa od ostatka godine. *Vorticella campanula* značajno se pojavljivala tijekom lipnja i rujna, dok je tijekom veljače rjeđe zastupljena. *Opercularia* sp. je uočena rjeđe od roda *Vorticella*. *Opercularia* sp. je najčešće je bila prisutna u ožujku, kada su uočene prosječne vrijednosti koncentracije kisika u izlaznoj otpadnoj vodi više od ostatka godine (tablica 4.2). Također tijekom ožujka su vrijednosti BPK₅ u ulaznoj i izlaznoj otpadnoj bilježene veće od prosječnih (slika 4.2.).^{39,69} Uobičajena je pojava *Opercularia* sp. pri većim vrijednostima BPK₅ u izlaznoj otpadnoj vodi, takve vrijednosti obično su povezane i s manjom učinkovitosti

uklanjanja BPK₅, što nije primijećeno na CUPOVZ. *Epistylis* sp. bio je najzastupljeniji rod pričvršćenih trepetljikaša uz konstantnu prisutnost tijekom 2019. godine u CUPOVZ. *Zoothamnium* sp. pojavljivao češće pri nižim temperaturama, a pri višim temperaturama, od srpnja pa do listopada rijetko je bio prisutan. Ove dvije protozoe povezuju se uz niske koncentracije BPK₅ u izlazu, te je *Zoothamnium* češće prisutan pri većoj starosti mulja.³⁹ *Tokophrya* sp. se znatno rjeđe pojavljivala u siječnju te u razdoblju od kolovoza do listopada, dok je u ostalim mjesecima bila jednako često prisutna. Znatno rjeđa je *Podophrya* sp. koja se od lipnja do listopada nije pojavila, iz čega se može primijetiti da joj ne odgovaraju više temperature. Prema literaturi vrste iz reda *Suctoria* se značajno pojavljuju kada su prisutni fenoli te mogu biti indikator učinkovitosti uklanjanja fenola.^{36,71-72}

Slikom 4.12. prikazana je relativna pojava slobodno plivajućih trepetljikaša. Njihova brojnost se smanjuje povećanim F/M omjerom. *Stentor* sp. je bio uočen samo u siječnju, kolovozu i rujnu, a općenito se rijetko pojavljuje. Tijekom cijele godine pojavljivao se *Coleps* sp. najčešće u lipnju, a značajno manje tijekom prosinca i veljače. Pojava *Paramecium* sp. je rijetka u aktivnom mulju CUPOVZ-a, tijekom 2019. a zabilježena je u kolovozu, rujnu i studenom. *Euplotes* sp. se značajno pojavljivao tijekom siječnja, veljače, studenog i prosinca, dok u travnju nije zabilježen uopće, a tijekom viših temperatura od lipnja do listopada vrlo se rijetko pojavljivao. Nadalje, *Amphileptiden* sp. pojavljivala se tijekom cijele godine, iako od lipnja do rujna nešto rjeđe nego ostalih mjeseci. *Aspidica lynceus* češće se pojavljivala od *Aspidisca cicade*, a značajno rjeđe je bila prisutna tijekom ožujka što se može povezati s vrijednošću indeksa mulja koja je maksimalna tijekom ožujka (slika 4.5.). Vrste *Aspidisca* povezuju se s izvrsnom nitrifikacijom, a pri niskim koncentracijama otopljenog kisika može se uočiti usporeno kretanje *Aspidica* tj. tromo kretanje. Visoka prisutnost trepetljikaša u aktivnom mulju upućuje na visoku učinkovitost pročišćavanja otpadne vode.^{36,39,72} *Litonotus* sp. se pojavljivao rijetko, a najčešće tijekom siječnja, dok se *Chilodonella* sp. tijekom siječnja javljala vrlo rijetko u odnosu na ostatak godine kada je bila značajno prisutna. *Drepanomonas revoluta* najčešće se javljao tijekom siječnja i prosinca, a značajno mala prisutnost bilježi se u studenom, na što je mogao utjecati i nizak F/M omjer tijekom studenog (slika 4.7.).^{36,71}

Relativna pojava metazoa u obradi komunalne otpadne vode CUPOVZ tijekom 2019. godine prikazana je slikom 4.13. Prisutnost metazoa najzastupljenija je

bila u ljetnim mjesecima pri višim temperaturama. Tijekom siječnja metazoe su bili rijetko prisutni mikroorganizmi, što se može povezati s visokom vodljivošću, odnosno prisutnošću visoke koncentracije soli u ulaznoj otpadnoj vodi, ali i nižim temperaturama (tablica 4.1.). Neki od najrjeđe prisutnih metazoa tijekom godine bili su su *Brachionus* sp. (lipanj), *Aeolosoma* sp. (srpanj, kolovoz), *Neumania vernalis* (travanj i prosinac). Vrste *Colurella* nisu prisutne samo tijekom travnja i prosinca, a tijekom kolovoza i rujna su najčešće metazoe. *Rotaria* sp. značajno se pojavljivala od svibnja do listopada, a nije bila prisutna tijekom siječnja i studenog. *Nematoda* sp. nije bila prisutna tijekom veljače, ali od lipnja do kolovoza bila je sve češća, nakon čega je njena prisutnost ponovno manja. *Cephalodella* sp. se najčešće pojavljivala u ožujku kada je i najzastupljenija od svih metazoa. Od kolovoza do studenog rijetko je bila prisutna, a u prosincu nije zabilježena njena prisutnost. *Tardigrade* sp. pojavljivao se u siječnju, te ponovno od kolovoza do prosinca, a najznačajniju prisutnost bilježio je u listopadu. *Philodina* sp. je bila najčešća tijekom srpnja, rujna i listopada, dok je tijekom studenog i prosinca bila potpuno odsutna. Općenito su metazoe prisutne u starom mulju te se povezuju s mutnoćom izlazne otpadne vode.^{36,39,72} Neke vrste metazoa su istraživane u svrhu uklanjanja nitastih bakterija. Međutim, problem je što se nitaste bakterije najčešće javljaju tijekom hladnijih mjeseci, kada su metazoe rijetko prisutne. Također, učinkovitost uklanjanja nitastih bakterija pri niskim temperaturama pokazala se niskom, dok je pri višim temperaturama vrlo učinkovito. Metazoe su većinom strogi aerobi i mogu metabolizirati čvrste organske tvari koje drugi mikroorganizmi ne mogu te na taj način pridonose pročišćavanju otpadnih voda.^{36,39,42,72}

Slika 4.14. prikazuje relativnu pojavu ameba i bičaša u obradi komunalne otpadne vode CUPOVZ tijekom 2019. godine. Najčešće prisutne amebe bile su *Arcella* sp., *Euglypha* sp. i *Mayorella* sp. *Arcella* sp. se značajno pojavljivala od kolovoza do listopada, dok je tijekom studenog i prosinca bila rijetko prisutna. *Euglypha* sp. je pak bila najčešća od lipnja do kolovoza, a *Mayorella* sp. se značajnije pojavila samo tijekom srpnja. Općenito, sve amebe su češće bile prisutne tijekom toplijih mjeseci od lipnja do listopada. Bičaši su se značajnije pojavljivali od srpnja do listopada, i to: *Peranema* sp. i *Anisonema* sp., dok je pojava *Euglena* sp. bila vrlo rijetka. Bičaši su obično indikatori visokog opterećenja ili niskih koncentracija otopljenog kisika.^{39,69}

Slika 4.15. prikazuje relativnu pojavu značajnih bakterija u aktivnom mulju CUPOVZ tijekom 2019. godine. Od bakterija koje se prate, *Zoogloea* sp. je bila najčešća tijekom travnja, srpnja i prosinca. *Oscillatoria* sp. se pojavljivala značajno od travnja do studenog, a *Beggiatoa* sp. je značajnije bila prisutna tijekom srpnja i studenog. Tijekom ljetnih mjeseci kao i tijekom siječnja i veljače bila je zabilježena manja prisutnost slobodnih bakterija u aktivnom mulju, što se može pripisati prisutnošću metazoa, predatora bakterija tijekom ljetnih mjeseci te smanjenoj aktivnosti, tj. razmnožavanju tijekom zimskih mjeseci.³⁶ Ostale nitaste bakterije javljaju se značajno u siječnju i veljači te ponovno od listopada do prosinca, dakle pri nižim temperaturama, a njihovo javljanje popraćeno je povećanjem indeksa mulja (slika 4.5.). Što je veća populacija bakterija, veća je koncentracija BPK₅ koja se može razgraditi. Velika raznolikost bakterija omogućuje uklanjanje različitih vrsta tvari, a kako bi bilo učinkovito pročišćavanje otpadne vode, populacija mora biti aktivna. Na aktivnost utječu razne toksične tvari, između ostalog i koncentracija soli.⁷¹ U nepovoljnim okolišnim uvjetima bakterije prilagođavaju metabolizam i/ili proizvode EPS koji im služi kao zaštita od vanjskih toksičnih uvjeta. Zbog toga može doći do smanjenja rasta populacije i smanjena učinkovitosti procesa jer je onemogućena izmjena tvari iz otpadne vode s bakterijama zaduženima za razgradnju.^{13,36} Brzi rast nitastih bakterija neželjena je promjena u aktivnom mulju, a vidljiva i u strukturi pahuljica aktivnog mulja. Negativno utječe na bakterijsku aktivnost, a time i na samu učinkovitost obrade. Ukoliko se takav problem tretira kemikalijama, proces pročišćavanja otpadne vode rezultira povećanim operativnim troškovima.^{36,65}

Mikrobna zajednica CUPOVZ podvrgnuta je brzim promjenama procesnih uvjeta koji mogu uzrokovati fiziološki stres mikroorganizmima te posljedično tome dovesti do nepoželjnih posljedica i niže učinkovitosti pročišćavanja otpadnih voda. Zbog navedenog razloga, važnost mikroskopske analize aktivnog mulja ima ključnu ulogu u pravovremenom djelovanju, čime se može značajno utjecati na učinkovitost obrade komunalne otpadne vode.^{39,72}

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih istraživanja obrade komunalne otpadne vode u Centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba (CUPOVZ) za 2019. godinu, može se zaključiti sljedeće:

1. Prosječna pH-vrijednost komunalne otpadne vode iznosila je 7,75. Vrijednost temperature ulazne otpadne vode kretala se u rasponu od 11,2 °C do 22,5 °C, dok su vrijednosti izlazne otpadne u prosjeku za 0,3 % niže od vrijednosti ulazne otpadne vode.
2. Vrijednost električne vodljivosti kretala se od 832 do 1125 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a koncentracija otopljenog kisika se tijekom procesa pročišćavanja povećala za 89 %, pri čemu je prosječna vrijednost u izlaznoj otpadnoj vodi iznosila 9,5 mg/dm^3 .
3. Učinkovitost uklanjanja taložive krute tvari i ukupne suspendirane tvari u prosjeku je iznosila 98 % i 94 %.
4. Prosječne vrijednosti učinkovitosti uklanjanja KPK i BPK₅ više su od 90%,
5. Koncentracija ukupnog dušika i ukupnog fosfora u ulaznoj otpadnoj vodi iznosila je 35,8 mg/dm^3 za dušik i 4,0 mg/dm^3 za fosfor, a tijekom procesa vrijednosti su smanjene za 44 %, odnosno 45 %.
6. Prosječna vrijednost masene koncentracije biomase u bioreaktoru iznosila je 3,4 g/dm^3 , a indeksa mulja 93 cm^3/g .
7. Na raznolikost mikrobne zajednice utjecala je kakvoća ulazne otpadne vode te radni uvjeti u bioreaktoru.
8. Mikroskopskom analizom dobiva se brzi uvid u tijek procesa što može povećati učinkovitost obrade komunalne otpadne vode te lakše vođenje procesa.

7. LITERATURA

1. Silvestre, G., Fernández, B., Bonmatí, A., Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants, *Energ. Convers. Manage.* 101 (2015) 255-262.
2. McDonald, R.I., Weber, K., Padowski, J., Flörke, M., Schneider, C., Green, P.A., Gleeson, T., Eckman, S., Lehner, B., Balk, D., Boucher, T., Grill, G., Montgomery, M., Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure, *Glob. Environ. Change* 27 (2014) 96-105.
3. Szabo, D., Coggan, T.L., Robson, T.C., Currell, M., Clarke, B.O., Investigating recycled water use as a diffuse source of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) to groundwater in Melbourne, Australia, *Sci. Total Environ.* 644 (2018) 1409-1417.
4. Progress on safe treatment and use of wastewater: piloting the monitoring methodology and initial findings for SDG indicator 6.3.1. Geneva: World Health Organization and UNHABITAT, 2018.
5. Salgot, M., Folch, M., Wastewater treatment and water reuse, *J. Environ. Sci. Health* 2 (2018) 64–74.
6. Zakon o vodama, NN 66/2019
7. Oliveira, M., Frihling, B.E.F., Velasques, J., Corrêa, F.J, Filho, M., Cavalheri, P.S., Migliolo, L., Pharmaceuticals residues and xenobiotics contaminants: Occurrence, analytical techniques and sustainable alternatives for wastewater treatment, *Sci. Total Environ.* 705 (2020) 1355-68.
8. Feodorov, V., Modern Technologies of Treatment and Stabilization for Sewage Sludge from Water Treatment Plant, *Agric. Agric. Sci. Procedia*, 10 (2016) 417-430.
9. Javna odvodnja u 2019., Priopćenje, Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, srpanj 2020., (https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2020/06-01-03_01_2020.htm; pristup 13. srpnja 2020.)
10. Briški, F., Zaštita okoliša, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Element, 2017, str. 67. – 87.
11. Yang, Y., Wang, L., Xiang, F., Zhao, L., Qiao, Z., Activated Sludge Microbial Community and Treatment Performance of Wastewater Treatment Plants in Industrial and Municipal Zones, *Int. J. Env. Res. Pub. He.* 17 (2020) 436
12. Liu, Y., Yuan, L., Huang, S., Huang, D., Liu, B., Integrated design of monitoring, analysis and maintenance for filamentous sludge bulking in wastewater treatment, *Measurement* 150 (2020) 107548
13. Shen, Y., Huang, D-M., Chen, Y-P., Yan, P., Gao, X., New insight into filamentous sludge bulking during wastewater treatment: Surface characteristics and thermodynamics, *Sci. Total Environ.* 712 (2020) 135795
14. Odlare, M., Introductory Chapter for Water Resources, u: Scott, A.E., Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences Elsevier, 2014

15. Muralikrishna, I.V., Manickam, V., *Industrial Wastewater Treatment Technologies, Recycling, and Reuse*, u: Muralikrishna, I.V., Manickam, V., *Environmental Management*, BSP books Pvt Ltd, Published by Elsevier Inc. 13 (2017) 295–336.
16. Bilińska, L., Gmurek, M., Ledakowicz, S., Comparison between industrial and simulated textile wastewater treatment by AOPs – Biodegradability, toxicity and cost assessment, *Chem. Eng. J.* 306 (2016) 550-559.
17. Kurnik, K., Treder, K., Skorupa-Kłaput, M., Tretyn, A., Tybursk, J., Removal of Phenol from Synthetic and Industrial Wastewater by Potato Pulp Peroxidases, *Water Air Soil Pollut.* 8 (2015) 226-254.
18. Huang, M., Lia, Y., Gu., G., Chemical composition of organic matters in domestic wastewater, *Desalination* 262 (2010) 36-42.
19. Latrach, L., Ouazzani, N., Hejjaj, A., Mahi, M., Masunaga, T., Mandi, L., Two-stage vertical flow multi-soil-layering (MSL) technology for efficient removal of coliforms and human pathogens from domestic wastewater in rural areas under arid climate, *Int. J. Hyg. Envir. Heal.* 221 (2018) 64-80.
20. Tušar B., *Pročišćavanje otpadnih voda*, Kigen, Zagreb, 2009, str. 42-65.
21. Diaz, P., Yeh, D., *Adaptation to Climate Change for Water Utilities*, u: Ahuja, S., *Water Reclamation and Sustainability*, Elsevier Inc. 2 (2014) 19-56.
22. Gudelj, I., Nove onečišćujuće tvari – ksenobiotici, *Hrvatske vode* 24 (2016) 58-61.
23. Mateo-Sagasta, J., Raschid-Sally, L., Thebo, A., *Global Wastewater and Sludge Production, Treatment and Use*, u: Drechsel, P., Qadir, M., Wichelns, D., *Wastewater - Economic Asset in an Urbanizing World*, Springer 2 (2015) 15-39.
24. Gerba, C.P., Pepper, I.L, *Municipal Wastewater Treatment*, in: Gerba, C.P., Pepper, I.L, Gentry T.J., *Environmental Microbiology*, Elsevier Inc., 25 (2015) 583-606.
25. Seeger, H., The history of German waste water treatment, *European Water Management* 2 (1999) 51-56.
26. Ofak. L., Usklađivanje hrvatskoga zakonodavstva s pravom EU-a u području zaštite voda s posebnim osvrtom na sudjelovanje javnosti i pristup pravosuđu, *Zbornik Pravnog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, 39 (2018) 269-300.
27. Maksimova, S., Kosourova, D., Pesheva, A., Recycling of Wastewater Treatment Plants Sludge in Urban Landscaping in West Siberia, *Procedia Eng.* 117 (2015) 232–238.
28. Strategija upravljanja vodama, NN 91/2008
29. Malollari, I., Pinguli, L., Buzo, R., Lajqi, V., Makolli, S., Cani, XH., Actual situation of wastewater from food industry and a case study of their treatment, *J. Environ. Prot. Ecol.* 20 (2019) 432-438.
30. Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, NN 26/2020
31. Waites, M., Morgan, N., Rockey, J., Higton, G., *Industrial Microbiology: An introduction*, Blackwell Science Ltd, 2001, str. 230.-239.

32. Muralikrishna, I.V., Manickam, V., Chapter Twelve - Wastewater Treatment Technologies, u: Muralikrishna, I.V., Manickam, V., Environmental Management, BSP books Pvt Ltd, Published by Elsevier Inc. 12 (2017) 249-293.
33. Šabić, M., Vuković Domanovac, M., Findrik Blažević, Z., Meštrović, E., Kinetika bioremedijacije farmaceutske industrijske otpadne vode, Kem. Ind. 64 (2015) 229–236.
34. Meyer, N., Jegen, B., Aqua Designer 8.xUA DESIGNER 8.x, Manual, Software for Design of Wastewater Treatment Plants, BITControl GmbH, 2016. str. 33-95.
35. Gerardi, Settability Problems and Loss of Solids in the Activated Sludge Process, John Wiley & Sons, Inc. (2002) 15, str. 99-121, 153-157.
36. Xu, S., Yao, J., Ainiwaer, M., Hong, Y., Zhang, Y., Analysis of Bacterial Community Structure of Activated Sludge from Wastewater Treatment Plants in Winter, Biomed Res. Int. 2018 (2018) 8278970
37. Ibarbalz, F.M., Figuerola, E.L.M., Erijman, L., Industrial Activated Sludge Exhibit Unique Bacterial Community Composition at High Taxonomic Ranks, Water Res. 47 (2013) 3854-3864.
38. Tian, L., Wang, L., A meta-analysis of microbial community structures and associated metabolic potential of municipal wastewater treatment plants in global scope, Environ. Pollut. 263 (2020) 114598
39. Foissner, W., Protists as bioindicators in activated sludge: Identification, ecology and future needs, Eur. J. Protistol. 55 (2016) 75-94.
40. Fan, N. S., Qi, R., Huang, B.-C., Jin, R.-C., Yang, M., Factors influencing Candidatus Microthrix parvicella growth and specific filamentous bulking control: A review, Chemosphere 244 (2020) 125371
41. Cydzik-Kwiatkowska, A., Zielin'ska, M., Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems, World J. Microbiol. Biotechnol. 32 (2016) 66
42. Kocerba-Soroka W., Fiatkowska, E., Pajdak-Stós, A., Klimek, B., Kowalska, E., Drzewicki, A., Salvado, H., Fyda, J., The use of rotifers for limiting filamentous bacteria, Type 021N, a bacteria causing activated sludge bulking, Water Sci. Technol., 67 (2013) 1557-1563.
43. Radna grupa WTE:Tehnološki projekt CUPOVZ, Postrojenje za biološku obradu vode s obradom mulja (nostrificiran od Malus, D., 27.2.2003.)
44. Tušar, B. i sur., Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu (CUPOVZ), Hrvatske vode 17 (2009) 241-250.
45. Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Bridgewater, L., Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, APHA, Washington, DC
46. Trygar, R., Nitrogen control in wastewater treatment plants, Second Edition, CET and the University of Florida Center for Training, Research and Education for Environmental Occupations, 2009.
47. Odjadjare, E.E.O., Okoh, A.I., Physicochemical quality of an urban municipal wastewater effluent and its impact on the receiving environment, Environmental. Monit. Assess. 170 (2010) 383–394.

48. Nierychlo, M., McIlro, S.J., Kucheryavskiy, S., Jiang, C., Ziegler, A.S., Kondrotaite, Z., Stockholm-Bjerregaard, M., Nielsen, H.P., Candidatus Amarolinea and Candidatus Microthrix Are Mainly Responsible for Filamentous Bulking in Danish Municipal Wastewater Treatment Plants, *Front. Microbiol.* 11 (2020) 1214.
49. Europska agencija za okoliš, Urban wastewater projects-a layperson's guide, Vodoprivredno-projektini biro, d.d. Zagreb, 1999, str.12
50. Schulte, P.M., The effects of temperature on aerobic metabolism: towards a mechanistic understanding of the responses of ectotherms to a changing environment, *J. Exp. Bio.* 218 (2015) 1856-1866.
51. Bhunia, P., Fundamentals of Biological Treatment. *Comprehensive Water Quality and Purification*, 2014, str.53, 71-73
52. Trick, J.K., Stuart, M., Reeder, S., Chapter 3 - Contaminated Groundwater Sampling and Quality Control of Water Analyses, u *Environmental Geochemistry (Second Edition) site Characterization, Data Analysis and Case Histories*, Elsevier, 2018, str. 25-45
53. https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci¶m=k2_1&Godina=2019 (pristup: 6.9.2020)
54. Perčin, A., Kisić, I., Zgorelec, Ž., Bogunović, I., Varijabilnost kemijskih značajki tla u PP Medvednica s obzirom na primjenu soli u zimskim uvjetima održavanja Sljemenske ceste, *Poljoprivreda i okoliš u 21. stoljeću*, Marija Bistrica, Hrvatska, 2015
55. Golnabi, H., Matloob, M.R., Bahar, M., Sharifian, M., Investigation of electrical conductivity of different water liquids and electrolyte solutions, *Iran. Phys. J.* 3 (2009) 24-28.
56. Lapinski, J., Tunnacliffe, A., Reduction of suspended biomass in municipal wastewater using bdelloid rotifers, *Water Res.* 37 (2003) 2027-34.
57. Beysens, D., Lekouch, I., Muselli, M., Mileta, M., Milimouk-Melnytchouk, I, Šojat, V., Physical and chemical properties of dew and rain water in the Dalmatian coast, Croatia, 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Münster, Germany, srpanj 2010.
58. Liu, S. How Cells Grow, u *Bioprocess Engineering (Second Edition), Kinetics, Sustainability, and Reactor Design*, Elsevier B.V., 2017., str. 629-697.
59. Modin, O., Persson, F., Wilén, B., Hermansson, M., Nonoxidative removal of organics in the activated sludge process, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2 (2016) 635–672.
60. Snyder, M., Wyant, D., Activated sludge process control, training manual for wastewater treatment plant operators, Environmental Assistance Center
61. Margeta, J., Fistanić, I., Šarić, M., Procjena zagađenja od oborinskih voda u krškim područjima, *Građevinar* 54 (2002) 265-274.
62. Santos, A., Bernardo, M., Vespeira, C., Cantinho, P., Minhalma, M., Cork industry wastewater characterization assessment of the biodegradability, reuse and of the relationship between BOD, COD and tannins with TOC, *J. Water Reuse Desal.* 2 (2012) 33-39.

63. Körner, S., Das, S.K, Veenstra, S., Vermaat, J.E., The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*, 71 (2001) 71-78.
64. DEP, Wastewater Treatment Plant Operator Certification Training, Module 16: The Activated Sludge Process Part II, Bureau of Safe Drinking Water, Department of Environmental Protection
65. Pajdak-Stós, A., Fiatkowska, E., The Influence of Temperature on the Effectiveness of Filamentous Bacteria Removal from Activated Sludge by Rotifers, *Water Environ. Res.* 84 (2012) 619 - 625.
66. Xu, J., Wang, P., Li, Y., Niu, L., Xing, Z., Shifts in the Microbial Community of Activated Sludge with Different COD/N Ratios or Dissolved Oxygen Levels in Tibet, China, *Sustainability* 11 (2019) 2284.
67. Rossetti, S., Tomei, M., Per, C., Nielsen, H., Tandoi, V., “*Microthrix parvicella*”, a filamentous bacterium causing bulking and foaming in activated sludge systems: a review of current knowledge, *FEMS Microbiol. Rev.* 29 (2005) 49–64.
68. Lee, S., Basu, S., Tyler, C.W., Wei, I.W., Ciliate populations as bio-indicators at Deer Island Treatment Plant, *Adv. Environ. Res.* 8 (2004) 371–378.
69. Mihajlova, D., Prokopov, T., Ivanova, V., Mihalkov, N., Monitoring of water and activated sludge assessment in wwtp with sequencing batch reactors, *Annuaire de l’Université de Sofia “St. Kliment Ohridski”, Faculte de Biologie*, 100 (2015) 260-269.
70. Papadimitriou, C., Palaska, G., Lazaridou, M., Samaras, P., Sakellariopoulos, G.P, The effects of toxic substances on the activated sludge microfauna, *Desalination*, 211 (2007) 177-191.
71. He, H., Chen, Y., Li, X., Cheng, Y., Yang, C., Zeng, G., Influence of salinity on microorganisms in activated sludge processes: A review, *Int. Biodeterior.* 119 (2017) 520-527.
72. Madoni, P., Protozoa in wastewater treatment processes: A mini review, *Ital. J. Zoo.* 78 (2011) 3-11.

8. SIMBOLI I KRATICE

θ	hidrauličko vrijeme zadržavanja, d
θ_c	vrijeme zadržavanja aktivnog mulja u bioreктору, d
ADP	adenozin difosfat
ATP	adenozin trifosfat
BPK ₅	petodnevna biokemijska potrošnja kisika, mgO ₂ /dm ³
CUPOVZ	Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba
EPS	izvanstanična polimerna tvar
ES	ekvivalent stanovnika
F/M	specifična brzina potrošnje supstrata
HLR	prostorno opterećenje, kg/(m ³ dan)
IVM	indeks volumena mulja, cm ³ /g
KPK	kemijska potrošnja kisika, mgO ₂ /dm ³
MBR	membranski bioreaktor
MLSS	masena koncentracija biomase u bioreктору, g/dm ³
NH ₄ – N	masena koncentracija amonija, mg/dm ³
NO ₂ – N	masena koncentracija nitrita, mg/dm ³
NO ₃ – N	masena koncentracija nitrata, mg/dm ³
O ₂	koncentraciju otopljenog kisika, mg/L
PO ₄ – P	masena koncentracija ortofosfata, mg/dm ³

Q	protok otpadne vode, m^3/d
Q_r	recirkulacija mulja, m^3/d
Q_w	količina otpadnog mulja, m^3/d
RH	Republika Hrvatska
S	BPK ₅ na izlazu, kg/m^3
S_0	BPK ₅ na uzlazu, kg/m^3
SLR	opterećenje muljem, $kg/(kg\ d)$
ST	suha tvar
T	temperatura, $^{\circ}C$
TN	masena koncentracija ukupnog dušika, mg/dm^3
TP	masena koncentracija ukupnog fosfora, mg/dm^3
TT	taloživa kruta tvar, $cm^3/(dm^3\ h)$
UST	ukupna suspendirana tvar, mg/dm^3
X	masena koncentracija biomase u bioreaktoru, kg/m^3
X_s	masena koncentracija viška biomase iz naknadnog taložnika, kg/m^3
κ	električna vodljivost, $\mu S/cm$

ŽIVOTOPIS

Sanja Ivanušić rođena je 16. veljače 1994. godine u Varaždinu. Opću gimnaziju srednje škole Dragutina Stražimira završava 2012. u Svetom Ivanu Zelini. Iste godine upisuje na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu studij Primijenjene kemije. Preddiplomski studij završava 2016. godine čime stječe akademski naziv sveučilišne prvostupnice primijenjene kemije. Od 2017. godine zapošljava se na mjesto analitičara u laboratoriju tvrtke Zagrebačke otpadne vode – upravljanje i pogon. Obrazovanje nastavlja 2018. godine upisom na diplomski studij Ekoinženjerstva na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Sudjelovala je na znanstveno-stručnom skupu XIII. Susretu mladih kemijskih inženjera s posterskim priopćenjem „Sastav mikrobne zajednice u postrojenju za pročišćavanje komunalne otpadne vode“ i na međunarodnom znanstveno-stručnom skupu 18. Ružičkini dani "Danas znanost – sutra industrija" s posterskim priopćenjem „Antropogeni utjecaj na dinamiku organskog opterećenja u komunalnim otpadnim vodama“.