Analiza učinkovitosti oksigenacije supstrata pomoću hibridnog sustava difuzora mikro i finih mjehurića

Hibić-Burtina, Leonora

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:002900

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

ANALIZA UČINKOVITOSTI OKSIGENACIJE SUPSTRATA POMOĆU HIBRIDNOG SUSTAVA DIFUZORA MIKRO I FINIH MJEHURIĆA

DIPLOMSKI RAD

LEONORA HIBIĆ BURTINA

Matični broj 238

Split, srpanj 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

DIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
SMJER: ZAŠTITA OKOLIŠA

ANALIZA UČINKOVITOSTI OKSIGENACIJE SUPSTRATA POMOĆU HIBRIDNOG SUSTAVA DIFUZORA MIKRO I FINIH MJEHURIĆA

DIPLOMSKI RAD

LEONORA HIBIĆ BURTINA

Matični broj 238

Split, srpanj 2020.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY

GRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
ORIENTATION: ENVIRONMENTAL PROTECTION

ANALYSIS OF SUBSTRATE OXYGENATION EFFICIENCY USING A HYBRID SYSTEM OF DIFFUSOR WITH MICRO AND FINE BUBBLES

DIPLOMA THESIS

LEONORA HIBIĆ BURTINA

Parent number 238
Split, July 2020

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Diplomski studij Kemijska tehnologija, smjer: Zaštita okoliša

Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo
Tema rada je prihvaćena na 32. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta od 10. prosinca 2019. godine

Mentor: Doc. dr. sc. Marin Ugrina
Pomoć pri izradi: Dr. Robert Mazur

ANALIZA UČINKOVITOSTI OKSIGENACIJE SUPSTRATA POMOĆU HIBRIDNOG SUSTAVA DIFUZORA MIKRO I FINIH MJEHURIĆA

LEONORA HIBIĆ BURTINA, 238

Sažetak: U ovom radu provedena je oksigenacija supstrata (vodovodna voda, komunalna otpadna voda s aktivnim muljem) primjenom jednog i dva difuzora. Napravljen je sedimentacijski test taloženja aktivnog mulja te mikrobiološka analiza. Da bi se biološka aerobna obrada otpadne vode mogla provesti, potrebno je u reaktoru postići uvjete zasićenosti kisikom. Kritična razina zasićenosti je 2 mg O_2/L, optimalna 4 mg O_2/L, a maksimalna predstavlja količinu kisika ovisno o supstratu. Rezultati oksigenacije ispitivanih supstrata pokazali su da se u kratkom vremenu postiže kritična, a potom i optimalna razina zasićenosti kisikom. Ovo ukazuje na primjenjivost biološke obrade komunalne otpadne vode s aktivnim muljem primjenom difuzora pri čemu se učinkovitost od 86,58% izražena preko KPK pokazatelja postiže za 5,5 sati primjenom jednog difuzora.

Ključne riječi: komunalna otpadna voda, aktivni mulj, oksigenacija, aerobna biološka obrada otpadne vode

Rad sadrži: 82 stranice, 27 slika, 11 tablica, 15 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Prof. dr. sc. Nataša Stipanelov Vrandečić – član, predsjednik
2. Doc. dr. sc. Ivona Nuić - član
3. Doc. dr. sc. Marin Ugrina – član, mentor

Datum obrane: 3. srpnja. 2020.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35.

BASIC DOCUMENTATION CARD

DIPLOMA THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology in Split
Graduate study of Chemical Technology, orientation: Environmental Protection

Scientific area: Technical sciences
Scientific field: Chemical engineering
Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 32 from 10th December 2019

Mentor: PhD. Marin Ugrina, Assistant professor
Technical assistance: PhD. Robert Mazur

ANALYSIS OF SUBSTRATE OXYGENATION EFFICIENCY USING A HYBRID SYSTEM OF DIFFUSOR WITH MICRO AND FINE BUBBLES

LEONORA HIBIĆ BURTINA, 238

Abstract: In this paper, oxygenation of the substrate (tap water, municipal wastewater with activated sludge) was performed by using one and two diffusers. A sedimentation test of activated sludge and microbiological analysis was performed. To perform biological aerobic wastewater treatment, it is necessary to achieve oxygen saturation conditions in the reactor. The critical saturation level is 2 mg O_2/L, the optimal 4 mg O_2/L, and the maximum amount of dissolved oxygen depends on the substrate. The results of oxygenation of the tested substrates showed that a critical and then optimal level of oxygen saturation is achieved in a short time. This indicates the applicability of the biological treatment of municipal wastewater with activated sludge using a diffuser, where the efficiency of 86.58% expressed through the COD indicator is achieved after 5.5 hours by using a single diffuser.

Keywords: municipal wastewater, activated sludge, oxygenation, aerobic biological wastewater treatment

Thesis contains: 82 pages, 27 figures, 11 tables, 15 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. PhD. Nataša Stipanelov Vrandečić, Full professor – member, chair person
2. PhD. Ivona Nuić, Assistant professor - member
3. PhD. Marin Ugrina, Assistant professor – member, supervisor

Defence date: July 3 2020

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposed in Library of Faculty of Chemistry and Technology in Split, Ruđera Boškovića 35.

Diplomski rad je izrađen u Krakowu na Sveučilištu AGH (Akademia Gornico-Hutnica), Zavodu za zaštitu okoliša (Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska) u sklopu Erasmus programa pod mentorstvom dr. Roberta Mazura i doc. dr. sc. Marina Ugrine u razdoblju od ožujka 2019. do lipnja 2020. godine.

Želim se zahvaliti svojim mentorima, dr. Robertu Mazuru na predloženoj temi i velikoj stručnoj pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela diplomskog rada, te doc. dr. sc. Marinu Ugrini na pomoći i savjetima pri pisanju rada. Veliko hvala mojoj obitelji i prijateljima koji su vjerovali u mene i bili mi potpora tijekom studiranja.

ZADATAK

1. Analizirati aktivni mulj.

2. Ispitati učinkovitost oksigenacije supstrata, vodovodne vode te komunalne otpadne vode s aktivnim muljem.

3. Ispitati učinkovitost difuzora za oksigenaciju komunalne otpadne vode protoka do 5 m^3/dan primjenom jednog i dva difuzora.

4. Usporediti učinkovitost oksigenacije komunalne otpadne vode u laboratorijskom modelu sekvencijalnog biološkog reaktora primjenom jednog i dva difuzora.

5. Izračunati potrošnju energije za vrijeme trajanja eksperimenta.

6. Izvesti zaključke o primjenjivosti procesa.

SAŽETAK

U ovom radu provedena je oksigenacija supstrata (vodovodna voda, komunalna otpadna voda s aktivnim muljem) primjenom jednog i dva difuzora. Napravljen je sedimentacijski test taloženja aktivnog mulja te mikrobiološka analiza. Da bi se biološka aerobna obrada otpadne vode mogla provesti, potrebno je u reaktoru postići uvjete zasićenosti kisikom. Kritična razina zasićenosti je 2 mg O_2/L, optimalna 4 mg O_2/L, a maksimalna predstavlja količinu kisika ovisno o supstratu. Rezultati oksigenacije ispitivanih supstrata pokazali su da se u kratkom vremenu postiže kritična, a potom i optimalna razina zasićenosti kisikom. Ovo ukazuje na primjenjivost biološke obrade komunalne otpadne vode s aktivnim muljem primjenom difuzora pri čemu se učinkovitost od 86,58% izražena preko KPK pokazatelja postiže za 5,5 sati primjenom jednog difuzora.

Ključne riječi: komunalna otpadna voda, aktivni mulj, oksigenacija, aerobna biološka obrada otpadne vode

ABSTRACT

In this paper, oxygenation of the substrate (tap water, municipal wastewater with activated sludge) was performed by using one and two diffusers. A sedimentation test of activated sludge and microbiological analysis was performed. To perform biological aerobic wastewater treatment, it is necessary to achieve oxygen saturation conditions in the reactor. The critical saturation level is 2 mg O_2/L, the optimal 4 mg O_2/L, and the maximum amount of dissolved oxygen depends on the substrate. The results of oxygenation of the tested substrates showed that a critical and then optimal level of oxygen saturation is achieved in a short time. This indicates the applicability of the biological treatment of municipal wastewater with activated sludge using a diffuser, where the efficiency of 86.58% expressed through the COD indicator is achieved after 5.5 hours by using a single diffuser.

Keywords: municipal wastewater, activated sludge, oxygenation, aerobic biological wastewater treatment

SADRŽAJ

UVOD……...…….……1

1. OPĆI DIO 2

1.1. Otpadne vode 3

1.2. Podjela otpadnih voda 3

1.2.1. Kućanske otpadne vode 3

1.2.2. Industrijske otpadne vode 4

1.2.3. Oborinske otpadne vode 5

1.3. Metode obrade otpadnih voda 5

1.3.1. Biološka obrada otpadnih voda 7

1.3.2. Aerobna obrada 7

1.3.2.1. Aktivni mulj 9

1.4. Primjena aeracije u biološkoj obradi otpadnih voda 10

1.5. Difuzori za aeraciju 11

1.5.1. Vrste generatora mikromjehurića 14

1.5.2. Materijali za izradu difuzora 16

1.6. Vodoopskrba i način obrade voda u Republici Poljskoj 17

1.7. Topljivost kisika u vodi 19

1.8. Kapacitet oksigenacije 21

2. EKSPERIMANTALNI DIO 3

2.1. Materijali 23

2.2. Aparatura i metoda rada 23

2.2.1. Sekvencijalni biološki reaktor 23

2.2.2. Uređaj za mjerenje kisika 23

2.2.3. Zračna pumpa 24

2.2.4. Rotametar 24

2.2.5. Difuzor 25

2.3. Metodologija rada 26

2.3.1. Karakterizacija aktivnog mulja 26

2.3.1.1. Sedimentacijski test 26

2.3.1.2. Mikroskopska analiza aktivnog mulja 26

2.3.2. Istraživanje učinkovitosti oksigenacije supstrata 26

2.3.2.1. Određivanje koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi - faza 1 26
2.3.2.2. Određivanje koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora - faza 2 27
2.3.2.3. Određivanje koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora - faza 3 28
3. REZULTATI 23
3.1. Rezultati određivanja sedimentacijskog testa 31
3.2. Rezultati određivanja učinkovitosti oksigenacije supstrata 31
3.2.1. Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi - faza 1 31
3.2.2. Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora - faza 2 39
3.2.3. Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora - faza 3 49
4. RASPRAVA 31
4.1. Analiza karakteristika aktivnog mulja 66
4.1.1. Analiza sedimentacijskog testa 66
4.1.2. Analiza mikroskopskih karakteristika aktivnog mulja 67
4.2. Učinkovitost oksigenacije supstrata 68
4.2.1. Koncentracija otopljenog kisika u vodovodnoj vodi - faza 1 68
4.2.1.1. Analiza rezultata kapaciteta oksigenacije 70
4.2.2. Koncentracija otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora - faza 2 71
4.2.3. Koncentracija otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora - faza 3 72
5. ZAKLJUČAK 78
6. LITERATURA 80

UVOD

Voda je važna odrednica života na Zemlji za mnoge organizme, uključujući i ljude, zbog čega je važno racionalno korištenje pitkih voda te pročišćavanje otpadnih voda. Čistoća vode pokazatelj je kvalitete života, a na mnogim mjestima širom svijeta ovo je veliki problem s kojim se stanovnici susreću svakodnevno.[1] U posljednje vrijeme, uslijed povećanja broja stanovnika, industrijskog napretka i tranzicije u modernom potrošačkom društvu, često dolazi do onečišćenja vodnih sustava zbog direktnog ispuštanja otpadnih voda u ekosustav ili zbog neadekvatne obrade otpadnih voda. Za obradu komunalnih otpadnih voda obično se koristi biološka obrada dok su u urbanim i gusto naseljenim područjima potrebni sve kompaktniji i učinkovitiji uređaji za pročišćavanje vode.[2] Napredak u učinkovitosti postupaka pročišćavanja otpadnih voda rezultat je, između ostalog, i uključivanja biološkog stupnja obrade u njegov sastav. Uporaba mikroorganizama je vrlo učinkovita, ali iziskuje mnogo energije. Na mjestima gdje je nemoguće ili je vrlo teško moguće spajanje na kolektivni kanalizacijski sustav koriste se uređaji za pročišćavanje kućanskih otpadnih voda s protokom do 5 m^3/dan. Trenutno se u Republici Poljskoj povećava udio malih uređaja za pročišćavanje koji koriste biološke procese te se radi na poboljšanju tehnologija učinkovite aeracije. Većina uređaja za pročišćavanje, kako malih, tako i industrijskih, koriste kisik s finim difuzorima mjehurića, smanjujući uporabu tehnologije grubih mjehurića. Stalni rad na novim tehnologijama i ulaganja u inovativne materijale doprinose poboljšanju te povećanju učinkovitosti rada svih postrojenja uključujući i postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda.[1]

1. OPĆI DIO

1.1. Otpadne vode

Otpadne vode su sve onečišćene tehnološke, kućanske, poljoprivredne i druge vode. Nastaju uporabom vode iz vodoopskrbnih sustava za određene namjene, pri čemu dolazi do promjena njenih prvotnih značajki: fizikalnih, kemijskih i mikrobioloških. One također sudjeluju u hidrološkom ciklusu, budući da se voda uzeta iz prirode za vodoopskrbu stanovništva, nakon uporabe kanalizacijskim sustavom odvodi na pročišćavanje i vraća u prirodni okoliš.[3]

1.2. Podjela otpadnih voda

Otpadne vode se razlikuju prema porijeklu pa se mogu svrstati u kućanske, industrijske i oborinske otpadne vode.

1.2.1. Kućanske otpadne vode

Kućanske otpadne vode nastaju u seoskim i gradskim naseljima. To su vode iskorištene u kućanstvu, ugostiteljstvu, zdravstvu, školstvu, uslužnim i drugim neproizvodnim djelatnostima. Biološka razgradljivost temeljno je svojstvo kućanskih otpadnih voda jer sadrže organske tvari koje se počinju razgrađivati čim dospiju u vodu pa se prema stupnju biološke razgradnje razlikuju:[4]

- *svježe otpadne vode* u kojima biološka razgradnja još nije uznapredovala, a koncentracija otopljenog kisika nije značajno manja nego u vodovodnoj vodi

- *odstajale otpadne vode* koje ne sadrže kisik, jer je potrošen za biološku razgradnju biološki razgradljive otpadne tvari

- *trule (septičke) otpadne vode* u kojima je biološka razgradnja toliko napredovala da se odvija anaerobno, a uspostavljena je ravnoteža između razgrađivača i organskih tvari

Sastav otpadnih tvari u kućanskim vodama ovisi o mnogim čimbenicima, a posebice o načinu života, klimatskim prilikama i raspoloživim količinama vode. Najčešće se kao pokazatelji svojstava kućanskih otpadnih voda upotrebljavaju: petodnevna biokemijska potrošnja kisika (BPK_5), količina suspendirane tvari, sadržaj mikroorganizama fekalnog porijekla, kemijska potrošnja kisika (KPK) i ukupan organski ugljik (UOU). Za nepročišćene tipične kućanske otpadne vode omjer BPK_5/KPK iznosi 0,4-0,8, a omjer BPK_5/UOU iznosi 1,0-1,6 što ukazuje na visoki sadržaj biorazgradljive organske tvari u vodi. Organska biološki razgradljiva tvar u kućanskim otpadnim vodama sadrži 40-60% proteina, 25-50% ugljikohidrata i približno 10% lipida te mikroorganizme, naročito bakterije i viruse. Budući da je sve patogene mikroorganizme teško utvrditi u otpadnoj vodi, kao indikatori služe ukupni koliformni organizmi i fekalni koliformi. Kućanske otpadne vode često su tamno obojene i neugodnog mirisa, što u estetskom pogledu predstavlja dodatno onečišćenje prijamnika takvih voda.[4]

1.2.2. Industrijske otpadne vode

Industrijske otpadne vode nastaju uporabom vode u tehnološkim procesima i u proizvodnji energije. Sastav i koncentracija industrijskih otpadnih voda ovise o primijenjenom tehnološkom procesu i stoga se ne mogu uspoređivati pomoću zajedničkih pokazatelja. Industrijske otpadne vode mogu se svrstati u dvije temeljne grupe:[4]

- *biološki razgradljive ili kompatibilne*, koje se smiju miješati s kućanskim otpadnim vodama

- *biološki nerazgradljive ili inkompatibilne*, koje se ne smiju miješati s kućanskim otpadnim vodama bez prethodnog pročišćavanja.

Industrijske otpadne vode mogu sadržavati: teške metale, kiseline, baze, mineralne soli, biocide, mineralna ulja i ugljikovodike, fenol i aromatske organske spojeve, radioaktivne tvari i sintetske kemijske proizvode te patogene mikroorganizme. Prethodno pročišćavanje industrijskih otpadnih voda potrebno je zbog kontrole toksičnih, postojanih (perzistentnih) tvari i onih koje se gomilaju u živim organizmima. Pročišćavanje industrijskih voda potrebno je i zbog izdvajanja eksplozivnih, zapaljivih i korozivnih tvari koje oštećuju kanalizacijske cijevi i uređaje. Velik dio vode u industriji upotrebljava se

kao rashladno sredstvo u izmjenjivačima topline (petrokemijska industrija, termoelektrane, nuklearne elektrane). Zbog zagrijavanja vode, dio rashladne vode ispari pa se povećava koncentracija soli u vodi, stoga industrijske otpadne vode s povišenom temperaturom predstavljaju posebnu vrstu onečišćivala.[4]

Karakteristični pokazatelji sastava industrijskih otpadnih voda su kemijska potrošnja kisika (KPK), ukupan organski ugljik (UOU) i ukupna potrošnja kisika (UPK).

1.2.3. Oborinske otpadne vode

Oborinske otpadne vode najčešće obuhvaćaju procjedne vode s poljoprivrednih zemljišta, neuređenih odlagališta otpada te površina cesta, a nastaju ispiranjem oborinama. U intenzivnoj poljoprivredi, pogotovo u područjima s nepovoljnom raspodjelom oborina tijekom godine, natapaju se poljoprivredne površine. Višak vode koji se procjeđuje do podzemne vode, odnosno otječe do površinskih voda razlikuje se po sastavu od vode za navodnjavanje. Sastav se mijenja zbog isparavanja vode i otapanja umjetnih gnojiva, sredstava za zaštitu biljaka i drugih sastojaka tla kroz koje voda prolazi. Ponovnom uporabom vode za natapanje višestruko se povećava koncentracija soli u otpadnoj vodi. Karakteristični pokazatelji sastava poljoprivrednih otpadnih voda su kemijska potrošnja kisika (KPK), tvrdoća vode, sadržaj fosfora, nitrata i pesticida.[4]

1.3. Metode obrade otpadnih voda

Obradom otpadnih voda poboljšava se kakvoća voda kako bi se mogle ponovno upotrebljavati ili ispuštati u vodne sustave. Pročišćavanjem se iz otpadnih voda:[5]

- odvajaju krutine
- odvajaju kapljevine od vode
- odvajaju plinovi iz vode
- smanjuje broj mikroorganizama koji izazivaju bolesti

Da bi se iz vode uklonile otpadne tvari primjenjuju se različiti postupci, najčešće slaganjem u jednu cjelinu, koji se provode na uređajima za obradu otpadnih voda. Najčešće primjenjivani postupci za uklanjanje otpadnih tvari iz otpadnih voda su

fizikalni, fizikalno-kemijski i biološki. Pročišćavanje ili obrada najčešće se dijeli u nekoliko stupnjeva:[5]

- Prethodni stupanj pročišćavanja (preliminarna obrada)
- Prvi stupanj pročišćavanja (primarna obrada)
- Drugi stupanj pročišćavanja (sekundarna obrada)
- Treći stupanj pročišćavanja (tercijarna obrada)

Prethodni stupanj pročišćavanja obuhvaća postupke kojima se iz otpadnih voda uklanjaju krupne raspršene i plutajuće otpadne tvari.

Prvi stupanj pročišćavanja obuhvaća primjenu fizikalnih i/ili kemijskih postupaka kojima se iz otpadnih voda uklanja najmanje 50% suspendirane tvari, a vrijednost KPK se smanjuje za oko 20% u odnosu na vrijednost KPK ulazne vode.

Drugi stupanj pročišćavanja obuhvaća primjenu bioloških i/ili drugih postupaka pročišćavanja kojima se u otpadnim vodama smanjuje koncentracija suspendirane tvari i BPK_5 za 70-90%, a koncentracija KPK za najmanje 75%.

Treći stupanj pročišćavanja obuhvaća primjenu fizikalno-kemijskih, bioloških i drugih postupaka, kojima se u otpadnim vodama smanjuje koncentracija onečišćujućih tvari za najmanje 80%, odnosno uklanjaju i drugi posebni pokazatelji otpadnih tvari, u granicama vrijednosti koje nije moguće postići primjenom drugog stupnja pročišćavanja.[5]

Podjela postupaka prema redoslijedu na uređajima za obradu prikazana je u tablici 1.1.[5]

Tablica 1.1. Pregled radnji i postupaka obrade otpadnih voda.[5]

Prethodni stupanj	Prvi stupanj	Drugi stupanj	Treći stupanj
Rešetanje Usitnjavanje Uklanjane pijeska i masnoća	Uklanjanje raspršene tvari - Taloženje - Isplivavanje - Cijeđenje na mikrositima	Uklanjanje biorazgradljive tvari - Biološki postupci - Fizikalno-kemijski postupci	Uklanjanje dušika i fosfora Uklanjanje postojane organske tvari Uklanjanje teških metala i drugih otopljenih anorganskih tvari

1.3.1. Biološka obrada otpadnih voda

Biološka obrada se ubraja u drugi stupanj pročišćavanja (sekundarna obrada) s ciljem smanjena koncentracije dušika i organskih tvari u otpadnoj vodi. Prednost ove obrade je što se koriste mikroorganizmi koji su sposobni razgraditi biološki razgradljive organske tvari u biomasu i plinove. Učinkovitost biološke obrade može biti spriječena ili dijelom narušena prisutnošću biotoksina i teških metala. Zbog jednostavnosti izvedbe i visoke ekonomičnosti, biološka obrada se obično primjenjuje u obradi otpadnih voda s visokom vrijednosti BPK_5 pokazatelja. Biološke metode obrade se mogu podijeliti na: aerobne i anaerobne.[6]

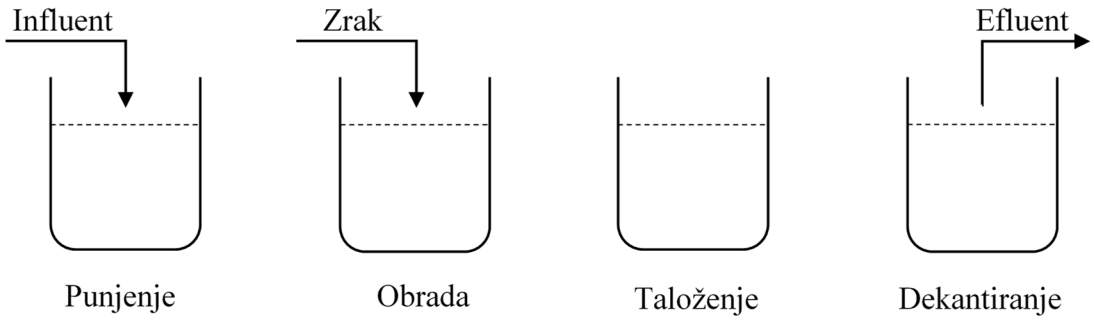
Biološke aerobne metode obrade podrazumijevaju razgradnju organskih tvari djelovanjem aerobnih mikroorganizama u prisutnosti kisika, a anaerobne se odvijaju u odsutnosti kisika uz anaerobne mikroorganizme i nastajanje bioplina. Za razliku od aerobnih procesa, anaerobnim procesima nastaju manje količine mulja, dok se oba procesa mogu provoditi na dva načina: sa suspendiranim ili imobiliziranim mikroorganizmima na biofilmu. Biološki procesi su se pokazali kao vrlo učinkoviti za uklanjanje organskih tvari na bazi ugljika i dušika.[6]

1.3.2. Aerobna obrada

Aerobnom obradom uz prisutnost kisika postiže se uklanjanje biorazgradljivih organskih onečišćivala uz nitrifikaciju amonijaka. Aerobni biološki procesi bazirani su na suspendiranom rastu biomase. U primjeni su aerirane lagune, sekvencijalni biološki reaktori, SBR (*engl*. Sequencing batch reactor) te se koriste i konvencionalni procesi za dobivanje aktivnog mulja. S ekonomskog aspekta, aerirane lagune su najprihvatljivije rješenje, obzirom da takav sustav ne zahtijeva neke posebne mjere kao ni visoko educirano osoblje. Međutim, kao i kod svih bioloških metoda efikasnost uklanjanja onečišćenja značajno ovisi o temperaturnim promjenama, čime je njihova primjena geografski limitirana, proces je dugotrajan (nekoliko mjeseci), a kakvoća obrade izlaznog efluenta najčešće ne zadovoljava uvjete za ispust u okoliš.[6]

Procesi s aktivnim muljem u SBR-u najrasprostranjenije su tehnologije obrade komunalnih otpadnih voda. SBR predstavlja diskontinuirani postupak obrade otpadne vode s aktivnim muljem suspendirane biomase, u kojem se u jednom bazenu – bioreaktoru sekvencijalno odvijaju pojedini stupnjevi obrade.

Tijek procesa biološke obrade i odvajanje aktivnog mulja iz pročišćene otpadne vode odvija se u jednom spremniku, a pročišćena otpadna voda se izbacuje u dijelovima iz spremnika. Proces se odvija u 4 faze: (I) u kojoj se spremnik sukcesivno napuni sirovom otpadnom vodom, (II) obrada uz aeraciju i miješanje gdje se događaju postupci denitrifikacije i nitrifikacije, uzrokovani promjenama režima rada sustava za prozračivanje, (III) taloženja i (IV) ispuštanje obrađene vode i viška mulja iz spremnika.[2] Proces rada reaktora shematski je prikazan na slici 1.1.



Slika 1.1. Proces rada SBR.[7]

SBR se koriste u kućnim i komunalnim postrojenjima za pročišćavanje otpadnih voda. Njihova prednost je mogućnost pročišćavanja otpadnih voda s promjenjivim opterećenjem onečišćenja. Ovim procesom može se postići smanjenje KPK vrijednosti do 75% te uklanjanje NH_3-N i do 99% uz vrijeme zadržavanja od 20-40 dana.

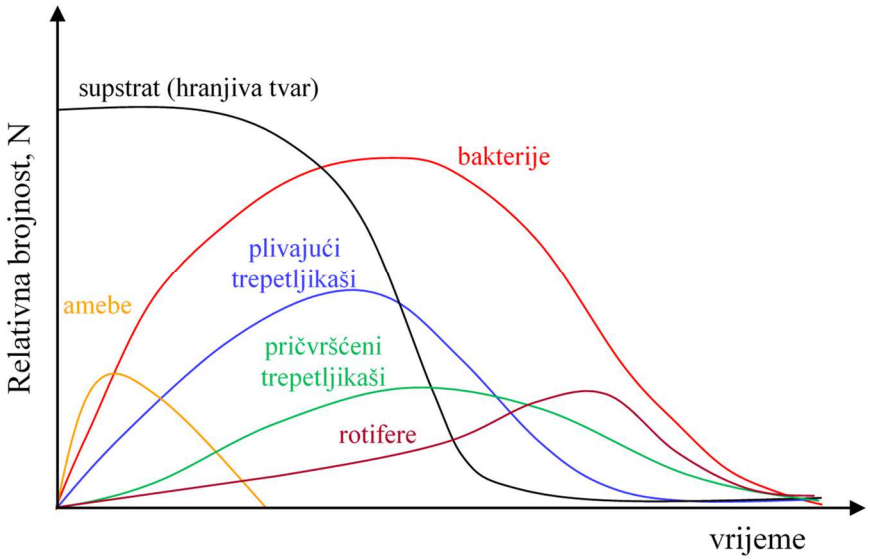
Međutim, zbog problema s velikom količinom mulja i teškog izdvajanja u konvencionalnim aerobnim sustavima, razvijen je niz inovativnih aerobnih procesa koji koriste biofilm, tj. procese s imobiliziranom biomasom. Kod tih sustava ne dolazi do gubitka aktivne biomase, što predstavlja veliku prednost. Također je smanjen utjecaj niskih temperatura na nitrifikaciju te inhibicija zbog visoke koncentracije dušika u odnosu na sustave sa suspendiranom biomasom. Od sustava s imobiliziranom biomasom ističu se prokapnici (*engl*. Trickling filters) i reaktor s pokretnim slojem nosača s biofilmom (*engl*. Moving – bed biofilm reactor, MBBR).[6]

Prokapnici se koriste za pročišćavanje otpadnih voda pomoću mikroorganizama pričvršćenih na određeni tip podloge. Sastoje se od nepropusnih spremnika ispunjenih poroznom ispunom koja predstavlja nosač biofilma. Ispune mogu biti komadići kamena, troska i različito oblikovani plastični materijali. Otpadna voda kroz prokapnik protječe (prokapljuje) vertikalno u smjeru odozgo prema dolje.[6]

Reaktor s pokretnim slojem nosača s biofilmom temelji se na uporabi suspendiranih poroznih polimernih nosača u stalnom pokretu u aeracijskom spremniku pri čemu aktivna biomasa raste u obliku biofilma na površini nosača. Glavne prednosti ove metode u usporedbi s konvencionalnim procesima sa suspendiranom biomasom su viša koncentracija biomase, nepostojanje perioda taloženja mulja, niža osjetljivost na toksične spojeve i uklanjanje organskih tvari i amonijaka u jednom procesu što ih čini prikladnijima za obradu toksičnih organskih onečišćivala i dušikom opterećenih otpadnih voda.[6]

1.3.2.1. Aktivni mulj

Aktivni mulj je suspenzija sastavljena od skupina mikroorganizama. Na početku stvaranja aktivnog mulja, događaju se svi biološki procesi zbog prisutnosti heterotrofnih bakterija u suspenziji. Pojavljuju se protozoe, što je karakteristično za svježu otpadnu vodu. Otpadna voda za vrijeme obrade ima visoku koncentraciju biogenih i organskih spojeva kao što su gljive i alge. Razmnožavanjem bakterijskih kolonija, povećava se masa aktivnog mulja, protozoe nestaju i na njihovom mjestu se pojavljuju trepetljikaši. Pojavom trepetljikaša može se govoriti o stabilnom aktivnom mulju. U završnom stupnju biološke obrade kada su razgrađeni otopljeni organski spojevi i brojčano je smanjena količina mikroorganizama pojavljuju se rotifere. U tom stupnju dolazi do smanjenja zamućenosti otpadnih voda. Sastav aktivnog mulja, posebice bakterije imaju značajan utjecaj na učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda. Važno je da aktivni mulj sadrži oksidirajuće, nitrificirajuće i denitrificirajuće mikroorganizme.[1] Prisutnost i relativna brojnost pojedinih grupa mikroorganizama tijekom razgradnje organske tvari u otpadnoj vodi prikazana je na slici 1.2.



Slika 1.2. Relativna brojnost mikroorganizama (N) u aktivnom mulju tijekom biološke obrade otpadne vode.[8]

1.4. Primjena aeracije u biološkoj obradi otpadnih voda

Aeracija je operacija u obradi otpadnih voda kojom se plinovita faza, najčešće zrak i tekuća faza, otpadna voda dovode u što bliži kontakt da bi se ostvario što intenzivniji prijenos plina u vodenu fazu.[9,10] Na slici 1.3. shematski je prikazana primjena aeracije u obradi otpadnih voda.



Slika 1.3. Primjena aeracije u obradi otpadnih voda.[9]

U primjeni je nekoliko vrsta aeracijskih sustava za obradu otpadnih voda. Izbor sustava koji će se koristiti u postrojenju ovisi o zadaći koju sustav treba izvršiti, vrsti i obliku reaktora, cijeni ugradnje sustava i njegovog održavanja. Način primjene aeracijskih sustava može se podijeliti u nekoliko grupa:[10]

- aeracija pod tlakom (dubinska aeracija)
- mehanička aeracija
- kombinirana aeracija.

Aeracija pod tlakom definirana je kao ubrizgavanje zraka ili kisika pod tlakom, ispod površine vode kako bi se povećala koncentracija otopljenog kisika te potaknulo miješanje vode i aktivnog mulja u reaktoru.

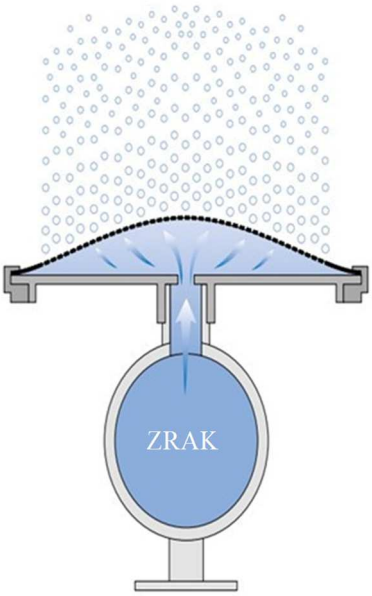
Mehanička aeracija podrazumijeva prijenos kisika u vodu pomoću mehaničkih uređaja koji uzrokuju uvođenje kisika iz zraka u otpadnu vodu pomoću mućkanja i miješanja.

Kombinirana aeracija koristi obje tehnologije, aeraciju pod tlakom i mehaničku aeraciju. Svi aeracijski sustavi koriste rotirajuće turbine ili propelere odnosno difuzore kako bi što bolje raspršili zrak koji se upuhuje u bazen.[10]

1.5. Difuzori za aeraciju

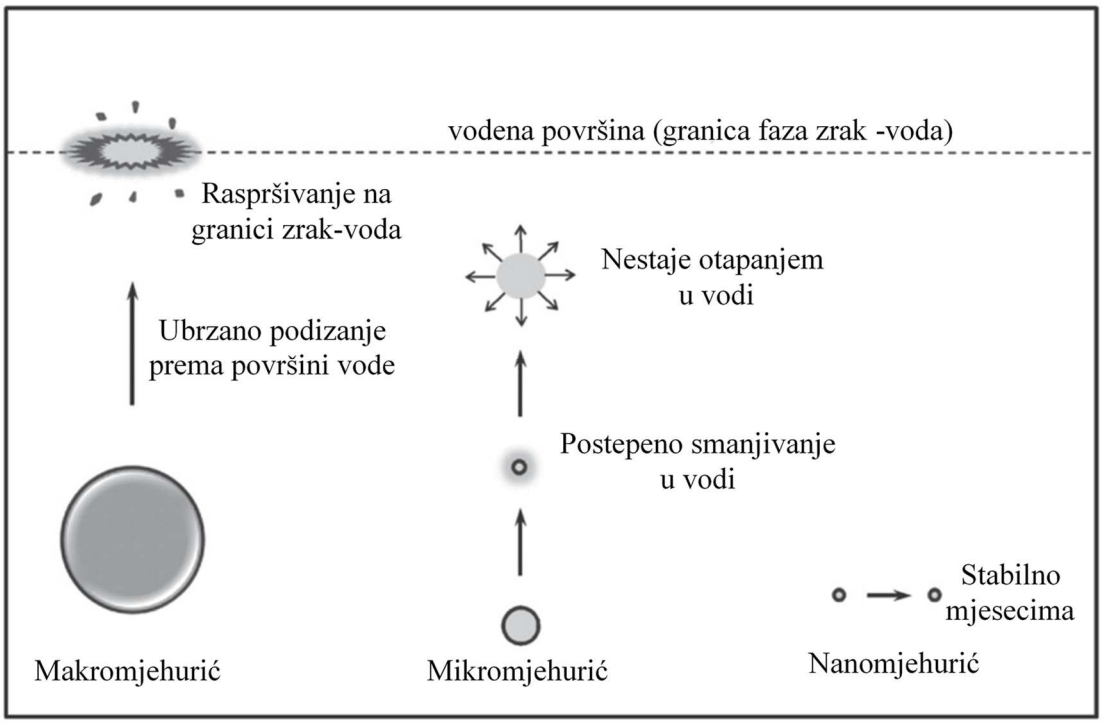
Difuzor je porozna naprava za prozračivanje, obično u obliku diska, cijevi ili ploče, koja se koristi za prijenos zraka ili kisika u kanalizacijski sustav ili bazen s otpadnom vodom.

Porozni difuzori omogućuje stvaranje sitnih mjehurića. Potopljeni difuzori ispuštaju mjehuriće zraka ili kisika na određenoj dubini, stvarajući slobodni, turbulentni mlaz mjehurića koji se podiže do površine vode pomoću sile uzgona, s kutom širenja od 11°. Kisik se otapa u vodi preko površine mjehurića koji putuju do površine vode. Također, prijenos kisika se vrši i na granici faza voda-zrak i na slobodnoj površini vode, zbog turbulencije koju stvaraju mlaz mjehurića i kruženje vode.[2] Na slici 1.4. prikazan je porozni difuzor.

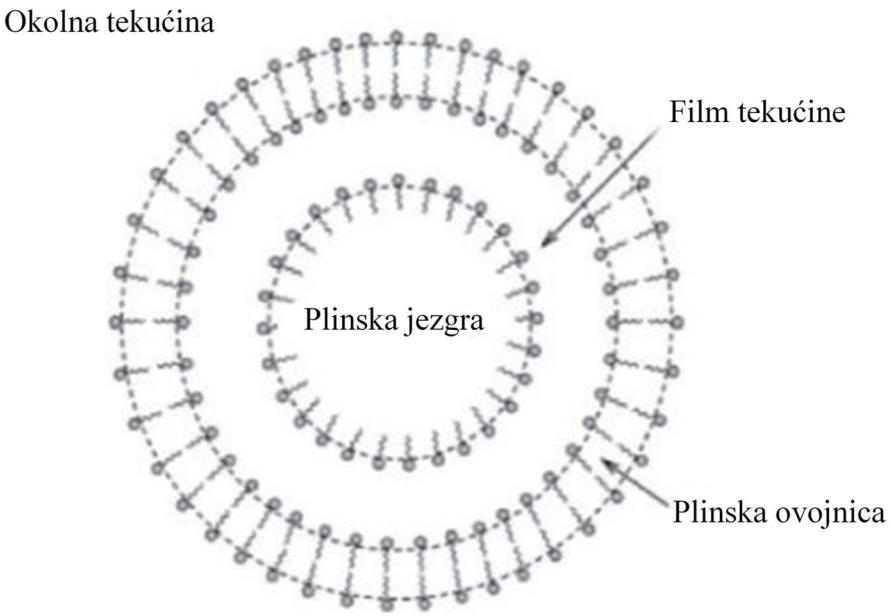


Slika 1.4. Porozni difuzor.[11]

Ovisno o veličini pora difuzora nastaju mjehurići različitih dimenzija. Makro mjehurići su definirani kao mali trodimenzijski objekti s volumenom čiji je promjer od 2 do 5 mm, mikro mjehurići su promjera između 10 i 60 µm te nano mjehurići promjera < 200 nm. Mikro mjehurići imaju korisne karakteristike, poput velike aktivne površine, dugog vremena zadržavanja u tekućini te velike brzine otapanja. Ove karakteristike im daju prednost pri otapanju kisika iz zraka u vodi, u usporedbi s makro mjehurićima koji se brzo uzdignu prema površini i puknu ili pak nano mjehurića koji se u vodi mogu zadržati mjesecima.[2] Prikaz brzine otapanja makro, mikro- i nano- mjehurića prikazan je na slici 1.5., a na slici 1.6. struktura mikromjehurića.



Slika 1.5. Prikaz brzine otapanja makro-, mikro- i nano-mjehurića.[12]



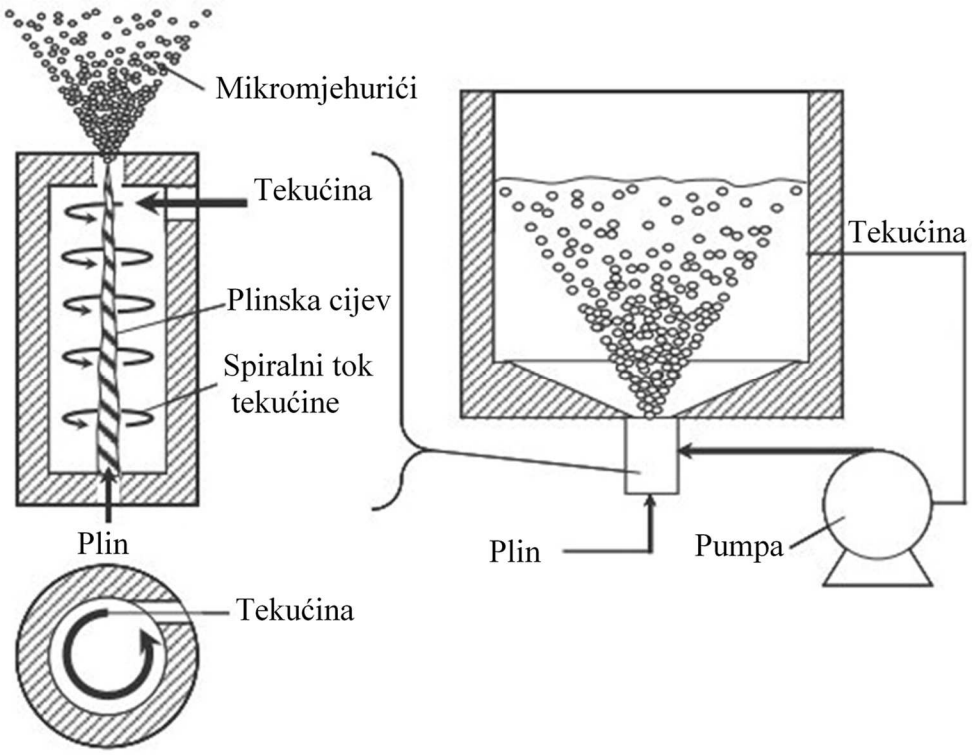
Slika 1.6. Struktura mikromjehurića.[12]

Mikromjehurići sastoje se od 3 sloja: unutarnjeg dijela koji je ispunjen s plinom, srednjeg dijela kojega okružuje vodena faza i vanjskog zaštitnog sloja od plina. U

posljednje vrijeme mikromjehurići imaju sve veću primjenu u tehnologiji pročišćavanja vode. Također, mikromjehurići se primjenjuju i u medicinske svrhe pri skeniranju organa tijela, adsorpciji proteina iz vodene faze itd.[2]

1.5.1. Vrste generatora mikromjehurića

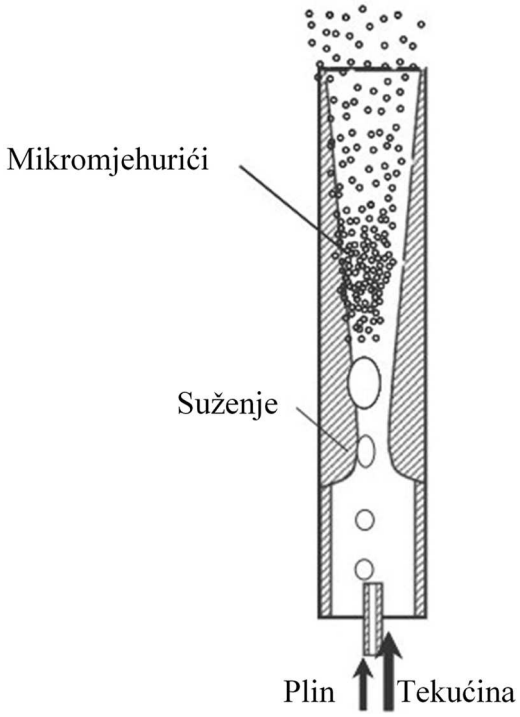
Postoji nekoliko vrsta generatora mikromjehurića, međutim nisu svi pogodni za rad u pogonima za obradu otpadnih voda. Gotovo svi generatori mikro mjehurića zahtijevaju mehaničke pokretne dijelove kojima se stvara snažna sila smicanja koja djeluje na tekućinu, npr. pumpa. Kada suspendirane flokule aktivnog mulja uđu u pumpu, flokule se razbijaju što smanjuje njihovu aktivnost.[2] Od trenutno dostupnih generatora, najboljim se pokazao generator sa spiralnim tokom tekućine (slika 1.7.).



Slika 1.7. Generator sa spiralnim tokom tekućine.[2]

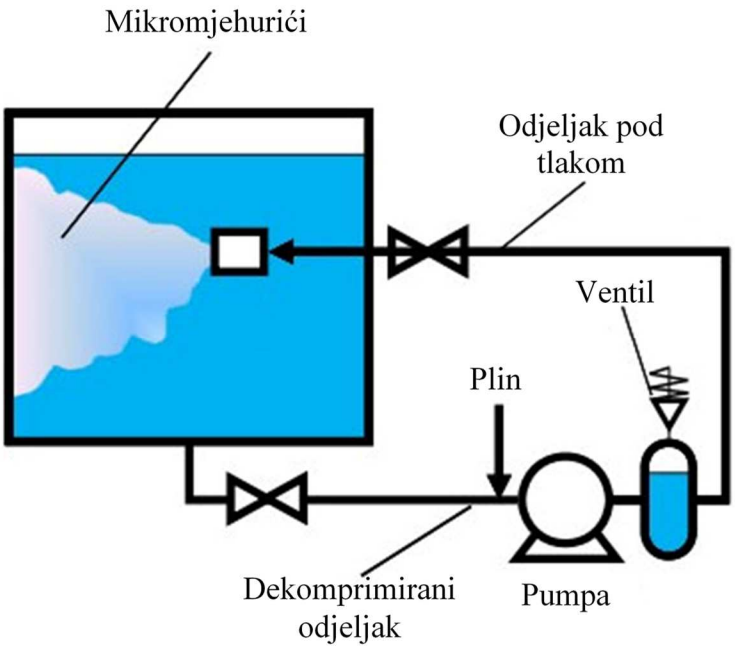
Voda se tangencijalno uvodi kroz bočni otvor u cilindar. Nastali spiralni tok tekućine formira udubljenje nalik na vir u cilindru. Plin se uvodi kroz otvor na dnu te se izbacuje zajedno s tekućinom kroz otvor na vrhu cilindra, gdje se plinska faza raspršuje na veoma sitne mjehuriće, odnosno mikromjehuriće. Mikromjehurići nastaju zbog

centrifugalne sile uzrokovane veoma brzom rotacijom tekućine.[2] Osim spiralnog generatora primjenjuje se i Venturijev tip generatora (slika 1.8.) te generator pod tlakom (slika 1.9.).



Slika 1.8. Venturijev generator.[2]

Kod Venturijevog generatora, obje faze, tekućina i plin ulaze istodobno na dnu cijevi. Uslijed velike promjene tlaka u cijevi dolazi do stvaranja mjehurića koji izlaze na vrhu.[2]



Slika 1.9. Generator pod tlakom.[2]

Kod generatora pod tlakom, tekuća i plinska faza ulaze u spremnik gdje se plin otapa do koncentracije zasićenja. Mikromjehurići nastaju uz pomoću reducirajućeg ventila, gdje veličina i broj mikromjehurića ovise o tlaku u spremniku.[2]

1.5.2. Materijali za izradu difuzora

Materijali koji se koriste za izradu difuzora mogu se podijeliti u tri kategorije:[10]

- keramika
- porozna plastika
- perforirane membrane

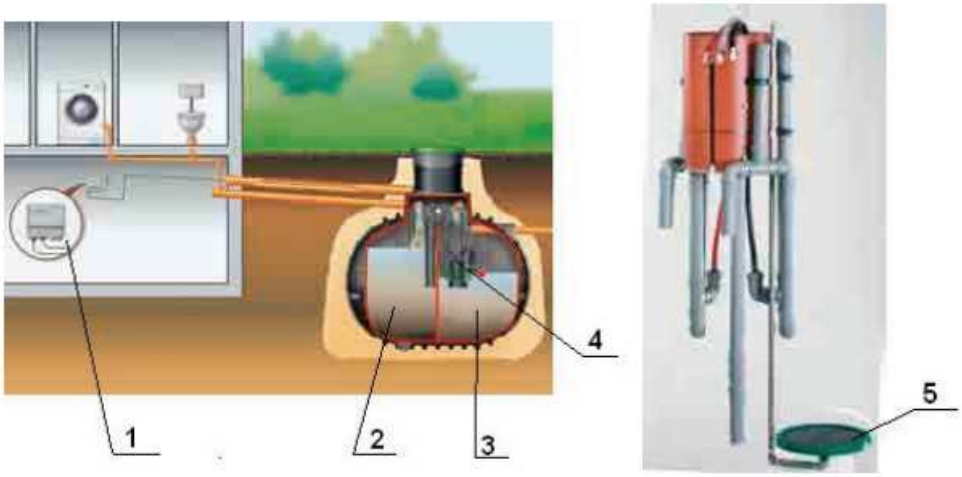
Keramika je najstariji i trenutno najčešće korišteni materijal za izradu difuzora na tržištu. Keramički materijali koji se najčešće koriste su glinica (aluminijev oksid), aluminijev silikat i silicijev(IV) oksid. Prednost ovih materijala je njihova čvrstoća i otpornost na trošenje te razvijena sredstva za čišćenje koja prodaju proizvođači opreme za aeraciju. Porozna plastika izrađuje se od nekoliko termoplastičnih polimera: polietilen, polipropilen, poli(viniliden-fluorid), etilen/vinil-acetat, stiren/akrilonitril i poli(tetrafluoroetilen). U uporabi su najčešće polietilen visoke gustoće i stiren akrilonitril. Membranski difuzori izrađuju se od elastomera: etilen/propilen kopolimer i

poli(tetrafluoroetilena). Veličina otvora na membranama može se mijenjati, povećavanjem i smanjivanjem protoka zraka te se na taj način može utjecati na veličinu mjehurića na način da manji otvori stvaraju manje mjehuriće, ali i povećavaju pad tlaka. Na tržištu možemo pronaći difuzore u obliku diskova, kupola, ploča i cijevi.[10]

1.6. Vodoopskrba i način obrade voda u Republici Poljskoj

Upravljanje vodama uključujući i otpadne vode jedan je od najvažnijih elemenata ekološke politike bilo koje zemlje s ekonomskog i socijalnog aspekta te i odraz održivog razvoja. U Republici Poljskoj mnogi niz godina ekološkom aspektu nije se davalo previše pažnje. Zbog toga je i danas prisutna velika neravnoteža između infrastrukture za opskrbu vodom (vodoopskrbna mreža) i one za sakupljanje otpadnih voda (kanalizacijska mreža), pogotovo u ruralnim područjima gdje još uvijek nije prisutna kanalizacijska mreža. Iz tih razloga ljudi se okreću drugačijim rješenjima. Jedan od njih su septičke jame. Problem septičkih jama je što je to samo privremeno rješenje. U određenom trenutku one se moraju isprazniti i sadržaj se odvodi u pogon za obradu voda, što također iziskuje dodatne ekonomske troškove. Postoji mogućnost istjecanja iz septičkih jama, čime dolazi do onečišćenja tla i podzemnih voda. Osim toga otpadne vode iz kućanska razlikuju se po koncentraciji otpadnih tvari od onih koje se već nalaze u bazenima za obradu voda. Biološki procesi obrade otpadnih voda koji se ponajviše koriste u Republici Poljskoj vrlo su osjetljivi na promjene sastava otpadne vode, stoga se upozorava na oprez pri izlijevanju sadržaja septičkih jama u bazen za obradu voda.[13]

Posljednjih 10 godina broj septičkih jama se smanjuje te ih zamjenjuju kućanski uređaji za obradu voda. Jedan od razloga je isplativost ugradnje u odnosu na cijenu pražnjenja jama. Uređaji su kapaciteta do 5 m^3 po danu koji su namijenjeni kućanstvima i farmama prema Poljskom zakonu o vodama.[14] Radi se o metodi uporabe aktivnog mulja u SBR-u. Cijeli proces odvija se u jednom reaktoru. Učinkovitost rada postrojenja za pročišćavanje otpadnih kućanskih voda u SBR-u je automatsko odvijanje više radnji unutar samog reaktora, počevši s fazom punjenja, uz istovremeno miješanje ili prozračivanje, sedimentaciju i dekantiranje te periodično ispuštanje pročišćenih otpadnih voda. Primjer procesne linije s malim SBR-om prikazan je na slici 1.10.

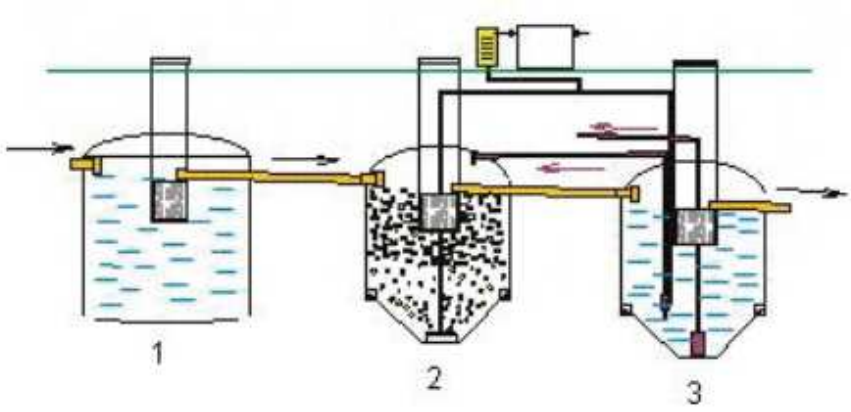


Slika 1.10. Procesna linija s SBR-om. (1) kontrolni sustav, (2) sedimentacijski rektor, (3) SBR, (4) pumpa za prozračivanje i (5) aeracijski ventilator.[15]

Otpadna voda iz kućanstva se prozračuje pomoću pumpe, ventilatora ili kroz membranski kanal aeratora. Pojedinačni uređaji za prozračivanje smješteni su u jednom spremniku podijeljenom na dva dijela. Prvi je pred sedimentacijski reaktor te drugi SBR. U slučaju već postojeće septičke jame moguća je ugradnja odgovarajućih uređaja koji će funkcionirati kao SBR.[15]

Međutim i tu dolazi do određenih problema. Operativni problem mini postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda temeljen na aktivnom mulju povezan je s nepravilnim dotokom kanalizacije i raznolikim sastavom. Problem se može riješiti punjenjem bioreaktorske komore plastičnim granulama. Time se ograničava ispiranje kanalizacije iz bioreaktora pri hidrauličkom preopterećenju.[15]

Procesna linija u ovom postrojenju sastoji se od sedimentacijskog reaktora, bioreaktora s granulama od polietilena te sekundarnog spremnika za odvajanje i recirkulaciju mulja (slika 1.11.).



Slika 1.11. Procesna linija s bioreaktorom s granulama. (1) Sedimentacijski reaktor, (2) Biorekator s plastičnim granulama, (3) dodatni reaktor.[15]

Kako bi se održala dobra kakvoća vode u rijekama i potocima, otpadne vode pročišćene na ovim uređajima trebalo bi koristiti na licu mjesta. Njihov sastav nakon obrade zadovoljavajućih je karakteristika i sa sigurnošću se mogu koristiti u poljoprivredi bez opasnosti za podzemne vode, ali ne i za ljudsku uporabu. Za to im je potrebna dodatna obrada.[14]

1.7. Topljivost kisika u vodi

Sadržaj kisika u vodi jedan je od pokazatelja kakvoće vode izražen u mg/dm^3 ili kao postotak zasićenosti vode kisikom. Na sadržaj otopljenog kisika u vodi utječu mnogi čimbenici, između ostalog: temperatura tekućine, tlak zraka, miješanje, slanost vode te prisutnost aerobnih bakterija koje troše kisik. U nekim slučajevima voda može biti zasićena kisikom, tj. udio kisika pri određenoj temperaturi biti viši i od 100%-tnog zasićenja. Na ovo može utjecati vrlo intenzivan proces fotosinteze ili nagli porast temperature pri pražnjenju rashladnih voda i/ili pad tlaka.[1]

Koncentracija kisika u slanoj vodi može se izračunati prema formuli[1]:

$$x = C_s - n \cdot \Delta C_s \tag{1-1}$$

gdje je:

x – topljivost kisika, mg/dm^3

C_s – topljivost kisika pri atmosferskom tlaku od 1013,25 hPa, mg/dm^3

n – koncentracija soli u vodi, mg/dm^3

ΔC_s – korekcija topljivosti kisika za slane vode

Odnos između topljivosti kisika i tlaka može se izračunati primjenom formule[1]:

$$C_s^{'} = C_s \cdot \frac{p - p_w}{1013{,}25\,\text{hPa} - p_w} \tag{1-2}$$

gdje je:

p – atmosferski tlak, hPa

p_w – tlak vodene pare u dodiru sa zrakom pri određenoj temperaturi, hPa

Topljivost kisika u vodi u ovisnosti o temperaturi dana je u tablici 1.2, a prikazuje raspodjelu topljivosti kisika ovisno o temperaturi vode s korekcijom za slanu vodu.[1]

Tablica 1.2. Topljivost kisika ovisno o temperaturi vode s korekcijom za slane vode.[1]

Temperatura (°C)	C_s (mg/dm^3)	ΔC_s (mg/dm^3)	Temperatura (°C)	C_s (mg/dm^3)	ΔC_s (mg/dm^3)
0	14,64	0,0925	14	10,30	0,0577
1	14,22	0,0890	15	10,08	0,0559
2	13,82	0,0857	16	9,86	0,0543
3	13,44	0,0827	17	9,66	0,0527
4	13,09	0,0798	18	9,46	0,0511
5	12,74	0,0771	19	9,27	0,0496
6	12,42	0,0745	20	9,08	0,0481
7	12,11	0,0720	21	8,90	0,0467
8	11,81	0,0697	22	8,73	0,0453
9	11,53	0,0675	23	8,57	0,0440
10	11,26	0,0653	24	8,41	0,0427
11	11,01	0,0633	25	8,25	0,0415
12	10,77	0,0614	26	8,11	0,0404
13	10,53	0,0597	27	7,96	0,0396

Iz tablice 1.2. se uočava da s porastom slanosti vode, topljivost kisika se smanjuje.

1.8. Kapacitet oksigenacije

Oksigenacija je postupak uvođenja kisika u vodu s ciljem povećanja koncentracije otopljenog kisika u vodi, dok je deoksigenacija suprotan proces, tj. odvođenje ili uklanjanje kisika iz vode.

Kapacitet oksigenacije jedan je od bitnijih parametara procesa aeracije i definira se kao količina kisika unesena u tekućinu uzimajući u obzir početni manjak kisika deoksigenirane vode po jedinici vremena pri tlaku od 760 mm Hg (101325 Pa), po jedinici volumena tekućine. Kapacitet oksigenacije izračunava se na sljedeći način:[1]

$$OC = 2{,}303 \cdot C_s^{'} \cdot \frac{1}{t_n} \cdot \sqrt{\frac{k_{10}}{k_r}} \cdot \log \frac{c_s - c_o}{c_s - c_t} \qquad (1\text{-}3)$$

gdje je:

- OC - kapacitet oksigenacije, g O_2/(m^3 h)
- C'_s - koncentracija kisika u tekućini pri temperaturi od 10 °C i tlaku 101325 Pa, g/m^3 (za čistu vodi iznosi 11,33 g/m^3)
- t_n - vrijeme oksigenacije, h
- k_{10}, k_r - konstante difuzije kisika u tekućini pri 10 °C i pri temperaturi pri kojoj je provedena oksigenacija, -
- c_s - koncentracija kisika u tekućini pri uvjetima mjerenja, g/m^3
- c_o - početna koncentracija kisika u tekućini, g/m^3
- c_t - koncentracija kisika u tekućini nakon oksigenacije, g/m^3

2. EKSPERIMANTALNI DIO

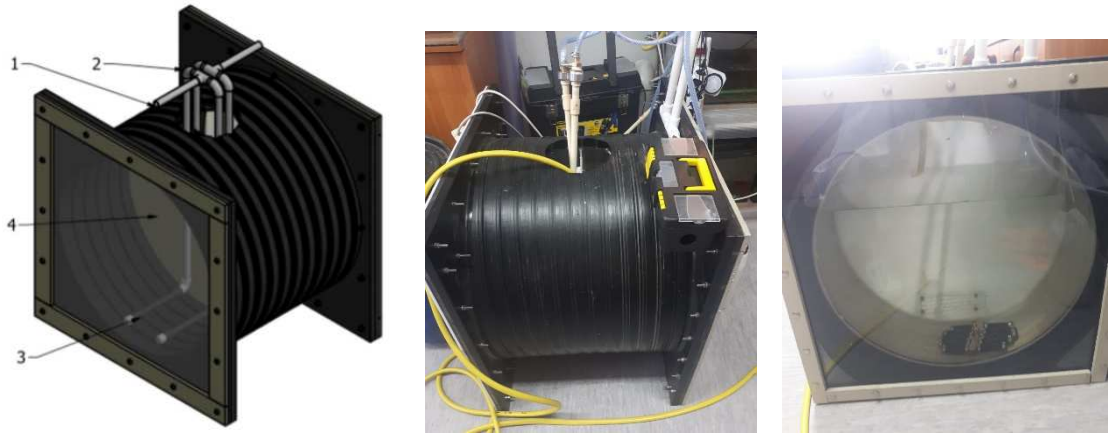
2.1. Materijali

Otpadna voda i aktivni mulj uzeti su početkom lipnja 2019. godine iz pogona za obradu otpadnih voda Myślenice koji se nalazi nadaleko od Krakowa. Prije početka provedbe eksperimenta pričekalo se dva tjedna da se uzorci adaptiraju vanjskim uvjetima.

2.2. Aparatura i metoda rada

2.2.1. Sekvencijalni biološki reaktor

Sekvencijalni biološki reaktor, SBR (slika 2.1) izrađen je od vodoravno položene cilindrične polipropilenske cijevi duljine 50 cm i unutarnjeg promjera 570 mm. Unutarnja komora je podijeljena na dva dijela sa 7 mm debelim pregradnim zidom od poli(vinilklorida), zapečaćenim silikonskim ljepilom. Štitnici su izrađeni od sintetičkog stakla debljine 8 mm. Ukupni kapacitet spremnika je 125,8 dm^3. Zrak iz kompresora u difuzore crpi se pomoću crijeva za zrak i polietilenske cijevi.[1]



(a) (b) (c)

Slika 2.1. (a) 3D Model SBR. (1) priključak, (2) zračna cijev, (3) cijev za difuzor, (4) pregradni zid.[1] Korišteni SBR (b) bočni i profilni (c) prikaz.

2.2.2. Uređaj za mjerenje kisika

Za mjerenje koncentracije kisika korišten je mjerač kisika Elmetron CX-461 (slika 2.2.) s opcijom automatskog mjerenja. Brojilo vrši mjerenja sadržaja otopljenog kisika u vodi, pH, vodljivosti, temperature, saliniteta i atmosferskog tlaka u vremenskim

intervalima koje definira korisnik. U isto vrijeme uređaj može izmjeriti od 1 do 6 odabranih parametara. Mjerenje kisika može se iskazati u % ili mg/L, a mjeri se galvanskim COG-1 senzorom, s točnošću ± 0,01 mg/L. Vodljivost se mjeri pomoću ECF-1 ćelije za provodljivost.



Slika 2.2. Uređaj za mjerenje kisika.

2.2.3. Zračna pumpa

Za snabdijevanje difuzora kisikom iz zraka, korištena je Hailea pumpa odnosno kompresor modela HAP-100 (slika 2.3.). Ovo je membranska pumpa kapaciteta 100 L/min i snage 90 W.



Slika 2.3. Zračna pumpa Hailea HAP-10.[1]

2.2.4. Rotametar

Protok zraka i kisika upravljao se pomoću rotametra do reduktora Ar/CO_2. Sastoji se od vertikalne staklene cijevi i plovka u obliku kuglice (slika 2.4.).



Slika 2.4. Rotametar.[1]

2.2.5. Difuzor

Korišten je difuzor za generiranje mikromjehurića od elastomera s mikro rupama izrađenima laserskom tehnologijom (slika 2.5.). Prorezi se otvaraju pod tlakom i iz otvora izlaze mikromjehurići zraka. Trenutno se ove vrste difuzera koriste u akvakulturi te se lako regeneriraju.



Slika 2.5. Difuzor za generiranje mikromjehurića.

2.3. Metodologija rada

2.3.1. Karakterizacija aktivnog mulja

2.3.1.1.Sedimentacijski test

Kako bi se izmjerila šaržna krivulja taloženja, spremnik (menzura) se puni uzorkom aktivnog mulja i pokreće se digitalni sat kako bi se pratilo trajanje eksperimenta. Mulj se pušta da se istaloži, a pozicija dodirne površine suspenzija-tekućina se mjeri u različitim vremenskim intervalima. Na početku testa, dodirna površina suspenzija-tekućina se obično mjeri češće, budući da se mulj taloži relativno brzo. Kasnije u testu, učestalost mjerenja se smanjuje budući da se dodirna površina sporije kreće. Standardni intervali mjerenja za krivulju šaržnog taloženja su 0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30 i 45 min, ali mogu se prilagoditi ovisno o dinamici taloženja određenog uzorka mulja. U ovom eksperimentu oni su iznosili 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 min.

2.3.1.2. Mikroskopska analiza aktivnog mulja

Mikroskopska analiza aktivnog mulja izvršena je mikroskopiranjem uzorka aktivnog mulja na optičkom mikroskopu pri uvećanju 120 puta.

2.3.2. Istraživanje učinkovitosti oksigenacije supstrata

Istraživanje učinkovitosti oksigenacije supstrata provodi se u tri faze. Svaka faza se sastoji od određivanja koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi (faza 1), komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora (faza 2) te komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem s jednim difuzorom (faza 3).

2.3.2.1. Određivanje koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi - faza 1

Mjerenje započinje punjenjem spremnika s 96,5 dm^3 vodovodne vode (slika 2.6.). Zatim se doda 40 g natrijevog sulfita da bi se voda deoksigenirala, tj. oslobodila kisika (1 g Na_2SO_3 uklanja 8 g otopljenog kisika). Potom se uključuju dva difuzora spojena na pumpu te se voda zasićuje s kisikom iz zraka uz pomoć mikro i finih mjehurića. Koncentracija otopljenog kisika mjeri se sondom za mjerenje kisika u vremenskom

periodu od jednog sata svakih 12 sekundi do ustaljenja vrijednosti. Izvršena su 3 uzastopna mjerenja, uvijek na svježem uzorku te je uzeta srednja vrijednost. Također je određena učinkovitosti difuzora preko pokazatelja kapaciteta oksigenacije te su mjereni fizikalni pokazatelji, temperatura i električna vodljivost.



Slika 2.6. Spremnik za određivanje koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi.

2.3.2.2. Određivanje koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora - faza 2

Mjerenja su usmjerena na proučavanje učinkovitosti oksigenacije komunalne otpadne vode s aktivnim muljem, simulirajući rad SBR, uz pomoć dva difuzora (slika 2.7.). Tlak unutar svakog difuzora iznosio je 0,3 bara te je protok zraka bio 1 L/min. Mjerenja su provedena u vremenskom periodu od jednog sata s vremenskim razmakom od 12 s. Također su mjereni fizikalni pokazatelji: pH, temperatura i električna vodljivost otpadne vode.



Slika 2.7. Simulirajući SBR reaktor s dva difuzora.

2.3.2.3. Određivanje koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora - faza 3

Mjerenja su usmjerena na proučavanje učinkovitosti oksigenacije komunalne otpadne vode s aktivnim muljem, simulirajući rad SBR, uz pomoć jednog difuzora (slika 2.8.). Prije početka mjerenja dodano je 40 g šećera (saharoza) s ciljem povećanja organske tvari otpadnoj vodi. Tijekom procesa oksigenacije, osim mjerenja koncentracije otopljenog kisika u vodi praćen je i tijek smanjena KPK. Na početku su izmjerene početne vrijednosti KPK u otpadnoj vodi te je uzeta srednja vrijednost. Nakon uključenja difuzora ponovno je vršeno mjerenje KPK i to nakon 2 sata, 4 sata i 5,5 sati. Mjerenje je provedeno u vremenskom intervalu od 5 sati i 34 minute s vremenskim razmakom od 10 sekundi. Također su mjereni fizikalni pokazatelji: pH, temperatura i električna vodljivost otpadne vode.



Slika 2.8. Simulirajući SBR s jednim difuzorom.

3. REZULTATI

3.1. Rezultati određivanja sedimentacijskog testa

Rezultati dobiveni provođenjem sedimentacijskog testa prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Vrijednosti mjerenja sedimentacijskog testa.

Vrijeme (min)		Visina (mL)	
t_1	5	h_1	200
t_2	10	h_2	170
t_3	15	h_3	146
t_4	20	h_4	130
t_5	25	h_5	120
t_6	30	h_6	119
t_7	40	h_7	109
t_8	50	h_8	100
t_9	60	h_9	98

3.2. Rezultati određivanja učinkovitosti oksigenacije supstrata

3.2.1. Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi - faza 1

Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi (faza 1) prikazani su u tablicama 3.2. i 3.3.

Tablica 3.2. Rezultati fizikalnih pokazatelja u vodovodnoj vodi.

Parametar, mjerna jedinica	Izmjerena vrijednost
Temperatura, °C	25,50
Električna vodljivost, mS/cm	1,10

Tablica 3.3. Rezultati vremenskog određivanja koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi za tri mjerenja i izračunata srednja vrijednost.

Vrijeme	$\gamma(O_2)$, mg O_2/L			
sat:min:sec	I mjerenje	II mjerenje	III mjerenje	Srednja vrijednost
0:00:10	0,00	0,00	0,00	0,00
0:00:20	0,06	0,10	0,04	0,07
0:00:30	0,10	0,12	0,06	0,09
0:00:40	0,34	0,18	0,02	0,18
0:00:50	0,41	0,22	0,08	0,24
0:01:00	0,46	0,34	0,15	0,32
0:01:10	0,52	0,41	0,41	0,45
0:01:20	0,54	0,56	0,37	0,49
0:01:30	0,69	0,78	0,12	0,53
0:01:40	0,76	1,07	0,33	0,72
0:01:50	0,75	1,09	0,32	0,72
0:02:00	0,83	1,15	0,45	0,82
0:02:10	0,88	1,14	0,77	0,93
0:02:20	0,92	1,20	0,84	0,99
0:02:30	1,03	1,21	0,74	0,99
0:02:40	1,01	1,22	0,68	0,97
0:02:50	1,06	1,25	0,75	1,02
0:03:00	1,15	1,24	1,11	1,17
0:03:10	1,20	1,28	1,11	1,20
0:03:20	1,25	1,32	1,05	1,21
0:03:30	1,77	0,87	0,85	1,16
0:03:40	1,86	0,78	0,74	1,12
0:03:50	1,78	0,94	0,88	1,20
0:04:00	1,70	0,94	0,86	1,16
0:04:10	1,68	1,00	0,90	1,19
0:04:20	1,77	1,12	1,00	1,29
0:04:30	1,78	1,11	0,97	1,29
0:04:40	1,78	1,045	0,89	1,24
0:04:50	1,80	1,24	1,06	1,37
0:05:00	1,90	1,21	1,01	1,37
0:05:10	1,96	1,32	1,10	1,46
0:05:20	1,93	1,32	1,08	1,44
0:05:30	1,94	1,48	1,22	1,55
0:05:40	2,03	1,44	1,16	1,54
0:05:50	2,07	1,56	1,26	1,63
0:06:00	2,08	1,60	1,28	1,65
0:06:10	2,15	1,65	1,31	1,70
0:06:20	2,14	1,79	1,43	1,78
0:06:30	2,18	1,87	1,49	1,85
0:06:40	2,26	1,86	1,46	1,86
0:06:50	2,35	2,03	1,61	2,00

nastavak tablice 3.3.

0:07:00	2,38	2,40	1,96	2,24
0:07:10	2,41	2,10	1,64	2,05
0:07:20	2,44	2,03	1,55	2,00
0:07:30	2,49	2,04	1,54	2,02
0:07:40	2,54	2,07	1,55	2,05
0:07:50	2,65	2,13	1,59	2,12
0:08:00	2,60	2,32	1,76	2,22
0:08:10	2,60	2,61	2,03	2,41
0:08:20	2,73	2,89	2,79	2,80
0:08:30	2,82	2,92	2,76	2,83
0:08:40	2,81	2,97	2,57	2,78
0:08:50	2,85	3,08	2,64	2,86
0:09:00	2,93	3,11	3,00	3,01
0:09:10	2,97	3,25	2,96	3,06
0:09:20	2,98	3,28	2,86	3,04
0:09:30	3,06	3,33	2,98	3,12
0:09:40	3,19	3,38	3,01	3,19
0:09:50	3,15	3,45	3,00	3,20
0:10:00	3,19	3,49	2,99	3,22
0:10:10	3,25	3,55	3,09	3,30
0:10:20	3,23	3,62	3,25	3,37
0:10:30	3,18	3,67	3,43	3,43
0:10:40	3,24	3,75	3,33	3,44
0:10:50	3,34	3,74	3,40	3,49
0:11:00	3,41	3,78	3,56	3,58
0:11:10	3,61	3,81	3,69	3,70
0:11:20	3,63	3,85	3,65	3,71
0:11:30	3,61	3,92	3,63	3,72
0:11:40	3,59	4,04	3,74	3,79
0:11:50	3,77	4,07	3,62	3,82
0:12:00	3,70	4,05	3,81	3,85
0:12:10	3,73	4,09	3,73	3,85
0:12:20	3,85	4,15	4,12	4,04
0:12:30	4,02	4,19	4,21	4,14
0:12:40	3,96	4,26	4,52	4,25
0:12:50	3,83	4,29	4,15	4,09
0:13:00	3,88	4,37	4,21	4,15
0:13:10	3,86	4,41	4,21	4,16
0:13:20	4,07	4,52	4,47	4,35
0:13:30	4,03	4,50	4,37	4,30
0:13:40	4,01	4,49	4,38	4,29
0:13:50	4,24	4,62	4,44	4,43
0:14:00	4,20	4,60	4,66	4,49
0:14:10	4,10	4,68	4,69	4,49
0:14:20	4,07	4,72	4,71	4,50
0:14:30	4,18	4,70	4,73	4,54
0:14:40	4,43	4,75	4,83	4,67

nastavak tablice 3.3.

0:14:50	4,57	4,78	4,78	4,71
0:15:00	4,36	4,80	4,72	4,63
0:15:10	4,49	4,77	4,82	4,69
0:15:20	4,66	4,85	4,63	4,71
0:15:30	4,71	4,88	4,73	4,77
0:15:40	5,04	4,91	4,80	4,92
0:15:50	5,23	4,99	4,84	5,02
0:16:00	5,16	5,02	4,72	4,97
0:16:10	5,12	5,13	4,43	4,89
0:16:20	5,17	5,29	4,58	5,01
0:16:30	5,13	5,52	4,87	5,17
0:16:40	5,23	5,39	5,01	5,21
0:16:50	5,24	5,38	5,23	5,28
0:17:00	5,24	5,40	5,28	5,31
0:17:10	5,22	5,34	5,29	5,28
0:17:20	5,26	5,40	5,13	5,26
0:17:30	5,27	5,36	5,26	5,30
0:17:40	5,49	5,51	5,18	5,39
0:17:50	5,60	5,71	5,26	5,52
0:18:00	5,64	5,63	5,39	5,55
0:18:10	5,65	5,59	5,31	5,52
0:18:20	5,65	5,55	5,56	5,59
0:18:30	5,62	5,58	5,72	5,64
0:18:40	5,62	5,61	5,64	5,62
0:18:50	5,65	5,62	5,48	5,58
0:19:00	5,64	5,66	5,56	5,62
0:19:10	5,64	5,68	5,75	5,69
0:19:20	5,69	5,65	5,89	5,74
0:19:30	5,72	5,59	5,62	5,64
0:19:40	5,78	5,62	5,52	5,64
0:19:50	5,78	5,64	5,53	5,65
0:20:00	5,82	5,65	5,59	5,69
0:20:10	5,81	5,67	5,67	5,72
0:20:20	5,84	5,68	5,76	5,76
0:20:30	5,87	5,76	5,74	5,79
0:20:40	5,89	5,85	5,71	5,82
0:20:50	5,92	5,91	5,71	5,85
0:21:00	5,93	6,01	5,72	5,89
0:21:10	5,93	6,02	5,67	5,87
0:21:20	5,93	6,07	5,69	5,90
0:21:30	5,99	6,09	5,85	5,98
0:21:40	5,94	6,11	5,90	5,98
0:21:50	6,01	6,13	5,79	5,98
0:22:00	5,97	6,19	5,68	5,95
0:22:10	6,06	6,28	5,85	6,06
0:22:20	6,08	6,26	5,93	6,09
0:22:30	6,09	6,24	5,93	6,09

nastavak tablice 3.3.

0:22:40	6,07	6,27	5,99	6,11
0:22:50	6,10	6,22	6,02	6,11
0:23:00	6,14	6,01	5,94	6,03
0:23:10	6,19	6,28	5,96	6,14
0:23:20	6,20	6,21	5,88	6,10
0:23:30	6,14	6,37	5,98	6,16
0:23:40	6,17	6,37	6,23	6,26
0:23:50	6,24	6,37	6,26	6,29
0:24:00	6,25	6,28	6,38	6,30
0:24:10	6,26	6,24	6,09	6,20
0:24:20	6,29	6,39	6,06	6,25
0:24:30	6,32	6,47	6,11	6,30
0:24:40	6,32	6,29	6,07	6,23
0:24:50	6,39	6,25	6,10	6,25
0:25:00	6,40	6,32	6,28	6,33
0:25:10	6,41	6,49	6,46	6,45
0:25:20	6,41	6,42	6,32	6,38
0:25:30	6,40	6,44	6,21	6,35
0:25:40	6,38	6,41	6,41	6,40
0:25:50	6,42	6,48	6,19	6,36
0:26:00	6,49	6,46	6,26	6,40
0:26:10	6,45	6,45	6,34	6,41
0:26:20	6,51	6,51	6,29	6,44
0:26:30	6,55	6,53	6,29	6,46
0:26:40	6,55	6,51	6,38	6,48
0:26:50	6,55	6,48	6,47	6,50
0:27:00	6,63	6,46	6,57	6,55
0:27:10	6,63	6,55	6,43	6,54
0:27:20	6,62	6,54	6,44	6,53
0:27:30	6,56	6,63	6,45	6,55
0:27:40	6,60	6,70	6,38	6,56
0:27:50	6,63	6,77	6,41	6,60
0:28:00	6,69	6,75	6,49	6,64
0:28:10	6,76	6,69	6,41	6,62
0:28:20	6,78	6,58	6,40	6,59
0:28:30	6,80	6,66	6,53	6,66
0:28:40	6,86	6,72	6,57	6,72
0:28:50	6,85	6,76	6,5	6,70
0:29:00	6,82	6,75	6,61	6,73
0:29:10	6,82	6,72	6,74	6,76
0:29:20	6,76	6,67	6,48	6,64
0:29:30	6,82	6,75	6,54	6,70
0:29:40	6,89	6,81	6,71	6,80
0:29:50	6,89	6,94	6,59	6,81
0:30:00	6,96	6,88	6,72	6,85
0:30:10	6,94	6,91	6,74	6,86
0:30:20	6,99	6,79	6,75	6,84

nastavak tablice 3.3.

0:30:30	7,00	6,96	6,78	6,91
0:30:40	7,03	7,02	6,82	6,96
0:30:50	7,06	7,01	6,83	6,97
0:31:00	7,04	6,98	6,78	6,93
0:31:10	7,04	7,01	6,89	6,98
0:31:20	7,09	7,14	6,96	7,06
0:31:30	7,13	7,02	6,74	6,96
0:31:40	7,11	6,98	6,88	6,99
0:31:50	7,10	7,06	7,09	7,08
0:32:00	7,17	7,07	7,04	7,09
0:32:10	7,21	7,15	6,97	7,11
0:32:20	7,18	7,16	6,95	7,10
0:32:30	7,24	7,11	6,94	7,10
0:32:40	7,23	7,14	7,17	7,18
0:32:50	7,27	7,15	7,00	7,14
0:33:00	7,26	7,20	7,06	7,17
0:33:10	7,30	7,13	6,98	7,14
0:33:20	7,30	7,26	6,95	7,17
0:33:30	7,34	7,23	7,09	7,22
0:33:40	7,49	7,28	7,05	7,27
0:33:50	7,46	7,21	7,23	7,30
0:34:00	7,40	7,14	7,36	7,30
0:34:10	7,38	7,24	7,18	7,27
0:34:20	7,38	7,39	7,14	7,30
0:34:30	7,37	7,42	7,21	7,33
0:34:40	7,41	7,44	7,24	7,36
0:34:50	7,43	7,39	7,22	7,35
0:35:00	7,48	7,35	7,23	7,35
0:35:10	7,47	7,33	7,33	7,38
0:35:20	7,48	7,40	7,28	7,39
0:35:30	7,51	7,48	7,37	7,45
0:35:40	7,50	7,43	7,35	7,43
0:35:50	7,54	7,49	7,46	7,50
0:36:00	7,52	7,56	7,43	7,50
0:36:10	7,49	7,50	7,34	7,44
0:36:20	7,53	7,59	7,43	7,52
0:36:30	7,53	7,47	7,39	7,46
0:36:40	7,54	7,84	7,42	7,60
0:36:50	7,61	7,82	7,50	7,64
0:37:00	7,62	7,80	7,41	7,61
0:37:10	7,67	7,94	7,53	7,71
0:37:20	7,70	7,82	7,64	7,72
0:37:30	7,71	7,81	7,61	7,71
0:37:40	7,71	7,70	7,58	7,66
0:37:50	7,72	7,83	7,55	7,70
0:38:00	7,69	7,91	7,51	7,70
0:38:10	7,71	7,98	7,55	7,75

nastavak tablice 3.3.

0:38:20	7,69	7,84	7,60	7,71
0:38:30	7,43	7,83	7,69	7,65
0:38:40	7,66	7,96	7,63	7,75
0:38:50	7,52	7,95	7,72	7,73
0:39:00	7,67	7,97	7,49	7,71
0:39:10	7,71	7,95	7,67	7,78
0:39:20	7,86	8,01	7,77	7,88
0:39:30	7,84	8,07	7,62	7,84
0:39:40	7,80	7,94	7,73	7,82
0:39:50	7,81	8,00	7,70	7,84
0:40:00	7,90	8,03	7,77	7,90
0:40:10	7,97	8,00	7,80	7,92
0:40:20	7,94	7,96	7,63	7,84
0:40:30	7,91	8,05	7,67	7,88
0:40:40	7,94	8,03	7,86	7,94
0:40:50	7,94	8,07	7,78	7,93
0:41:00	7,90	8,20	7,87	7,99
0:41:10	7,94	8,14	8,01	8,03
0:41:20	7,90	8,17	7,83	7,97
0:41:30	7,94	8,04	7,93	7,97
0:41:40	7,98	8,10	7,91	8,00
0:41:50	7,99	8,14	7,94	8,02
0:42:00	8,01	8,17	7,97	8,05
0:42:10	7,99	8,20	8,11	8,10
0:42:20	7,98	8,10	8,00	8,03
0:42:30	7,97	8,13	7,85	7,98
0:42:40	8,00	8,24	8,03	8,09
0:42:50	7,90	8,20	8,09	8,06
0:43:00	7,97	8,10	8,08	8,05
0:43:10	7,93	8,25	8,16	8,11
0:43:20	7,98	8,24	8,09	8,10
0:43:30	8,02	8,22	8,17	8,14
0:43:40	8,04	8,17	8,14	8,12
0:43:50	8,08	8,23	8,17	8,16
0:44:00	8,09	8,20	8,07	8,12
0:44:10	8,09	8,25	8,20	8,18
0:44:20	8,05	8,18	8,10	8,11
0:44:30	8,08	8,15	8,09	8,11
0:44:40	8,01	8,13	8,27	8,14
0:44:50	8,02	8,20	8,26	8,16
0:45:00	8,04	8,16	8,29	8,16
0:45:10	8,09	8,10	8,19	8,13
0:45:20	8,10	8,16	8,25	8,17
0:45:30	8,13	8,13	8,35	8,20
0:45:40	8,11	8,20	8,26	8,19
0:45:50	8,09	8,09	8,24	8,14
0:46:00	8,15	8,16	8,37	8,23

nastavak tablice 3.3.

0:46:10	8,15	8,23	8,30	8,23
0:46:20	8,17	8,27	8,19	8,21
0:46:30	8,18	8,21	8,30	8,23
0:46:40	8,19	8,23	8,24	8,22
0:46:50	8,18	8,25	8,24	8,22
0:47:00	8,15	8,24	8,15	8,18
0:47:10	8,19	8,13	8,15	8,16
0:47:20	8,17	8,26	8,26	8,23
0:47:30	8,20	8,24	8,09	8,18
0:47:40	8,21	8,23	8,16	8,20
0:47:50	8,20	8,19	8,26	8,22
0:48:00	8,20	8,19	8,20	8,20
0:48:10	8,24	8,20	8,26	8,23
0:48:20	8,17	8,32	8,31	8,27
0:48:30	8,20	8,32	8,09	8,20
0:48:40	8,17	8,16	8,00	8,11
0:48:50	8,14	8,11	8,30	8,18
0:49:00	8,21	8,24	8,26	8,24
0:49:10	8,18	8,32	8,10	8,20
0:49:20	8,17	8,28	8,10	8,17
0:49:30	8,19	8,09	8,24	8,17
0:49:40	8,20	8,12	8,10	8,14
0:49:50	8,18	8,15	8,24	8,19
0:50:00	8,17	8,32	8,20	8,23
0:50:10	8,20	8,29	8,24	8,24
0:50:20	8,17	8,30	8,30	8,25
0:50:30	8,21	8,19	8,26	8,22
0:50:40	8,22	8,28	8,05	8,18
0:50:50	8,21	8,34	7,98	8,18
0:51:00	8,21	8,31	8,26	8,26
0:51:10	8,18	8,24	8,23	8,22
0:51:20	8,19	8,27	8,22	8,23
0:51:30	8,22	8,33	8,27	8,27
0:51:40	8,24	8,21	8,32	8,26
0:51:50	8,19	8,16	8,28	8,21
0:52:00	8,17	8,16	8,31	8,21
0:52:10	8,25	8,27	8,28	8,27

3.2.2. Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora - faza 2

Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora (faza 2) prikazani su u tablicama 3.4. i 3.5.

Tablica 3.4. Rezultati fizikalnih pokazatelja u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora.

Parametar, mjerna jedinica	Izmjerena vrijednost
pH	6,8
Temperatura, °C	25,5
Električna vodljivost, μS/cm	822

Tablica 3.5. Rezultati vremenskog određivanja koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora.

Vrijeme	$\gamma(O_2)$, mg O_2/L	
sat:min:sec	Izmjerena vrijednost	Prosječna izmjerena vrijednost
0:00:10	0,04	5,63
0:00:20	0,40	5,63
0:00:30	0,60	5,63
0:00:40	0,40	5,63
0:00:50	0,58	5,63
0:01:00	0,48	5,63
0:01:10	0,36	5,63
0:01:20	0,34	5,63
0:01:30	0,40	5,63
0:01:40	0,40	5,63
0:01:50	0,56	5,63
0:02:00	0,66	5,63
0:02:10	0,63	5,63
0:02:20	0,60	5,63
0:02:30	0,74	5,63
0:02:40	0,71	5,63
0:02:50	2,65	5,63
0:03:00	3,90	5,63
0:03:10	4,61	5,63
0:03:20	6,34	5,63
0:03:30	7,42	5,63
0:03:40	6,92	5,63
0:03:50	5,97	5,63

nastavak tablice 3.5.

0:04:00	6,30	5,63
0:04:10	6,56	5,63
0:04:20	6,93	5,63
0:04:30	6,01	5,63
0:04:40	5,83	5,63
0:04:50	6,18	5,63
0:05:00	6,11	5,63
0:05:10	6,18	5,63
0:05:20	6,30	5,63
0:05:30	5,58	5,63
0:05:40	4,88	5,63
0:05:50	6,07	5,63
0:06:00	6,76	5,63
0:06:10	6,60	5,63
0:06:20	6,16	5,63
0:06:30	5,18	5,63
0:06:40	5,75	5,63
0:06:50	5,84	5,63
0:07:00	6,07	5,63
0:07:10	5,47	5,63
0:07:20	5,18	5,63
0:07:30	5,40	5,63
0:07:40	6,08	5,63
0:07:50	5,85	5,63
0:08:00	4,62	5,63
0:08:10	5,09	5,63
0:08:20	4,88	5,63
0:08:30	4,37	5,63
0:08:40	5,33	5,63
0:08:50	5,67	5,63
0:09:00	5,10	5,63
0:09:10	4,75	5,63
0:09:20	4,03	5,63
0:09:30	4,94	5,63
0:09:40	5,85	5,63
0:09:50	5,11	5,63
0:10:00	4,53	5,63
0:10:10	5,12	5,63
0:10:20	4,42	5,63
0:10:30	3,74	5,63
0:10:40	4,10	5,63
0:10:50	5,69	5,63
0:11:00	5,26	5,63
0:11:10	4,44	5,63
0:11:20	4,15	5,63
0:11:30	4,29	5,63
0:11:40	3,44	5,63

nastavak tablice 3.5.

0:11:50	4,96	5,63
0:12:00	3,69	5,63
0:12:10	5,00	5,63
0:12:20	5,31	5,63
0:12:30	5,83	5,63
0:12:40	5,59	5,63
0:12:50	5,42	5,63
0:13:00	5,59	5,63
0:13:10	6,68	5,63
0:13:20	7,51	5,63
0:13:30	5,40	5,63
0:13:40	5,95	5,63
0:13:50	5,91	5,63
0:14:00	5,81	5,63
0:14:10	5,14	5,63
0:14:20	4,20	5,63
0:14:30	3,92	5,63
0:14:40	4,67	5,63
0:14:50	5,93	5,63
0:15:00	5,33	5,63
0:15:10	5,08	5,63
0:15:20	3,99	5,63
0:15:30	4,37	5,63
0:15:40	4,60	5,63
0:15:50	5,58	5,63
0:16:00	5,26	5,63
0:16:10	5,74	5,63
0:16:20	5,68	5,63
0:16:30	5,14	5,63
0:16:40	5,39	5,63
0:16:50	4,90	5,63
0:17:00	6,39	5,63
0:17:10	6,48	5,63
0:17:20	6,12	5,63
0:17:30	6,48	5,63
0:17:40	6,42	5,63
0:17:50	7,57	5,63
0:18:00	5,64	5,63
0:18:10	5,97	5,63
0:18:20	6,51	5,63
0:18:30	5,40	5,63
0:18:40	6,18	5,63
0:18:50	5,94	5,63
0:19:00	5,93	5,63
0:19:10	7,16	5,63
0:19:20	5,95	5,63
0:19:30	6,27	5,63

nastavak tablice 3.5.

0:19:40	6,04	5,63
0:19:50	5,60	5,63
0:20:00	5,71	5,63
0:20:10	6,17	5,63
0:20:20	5,56	5,63
0:20:30	4,41	5,63
0:20:40	5,66	5,63
0:20:50	5,19	5,63
0:21:00	5,77	5,63
0:21:10	6,08	5,63
0:21:20	5,97	5,63
0:21:30	6,31	5,63
0:21:40	5,76	5,63
0:21:50	6,06	5,63
0:22:00	6,44	5,63
0:22:10	6,56	5,63
0:22:20	6,11	5,63
0:22:30	6,00	5,63
0:22:40	6,02	5,63
0:22:50	6,61	5,63
0:23:00	6,87	5,63
0:23:10	5,87	5,63
0:23:20	6,14	5,63
0:23:30	7,46	5,63
0:23:40	7,96	5,63
0:23:50	7,41	5,63
0:24:00	6,15	5,63
0:24:10	5,27	5,63
0:24:20	5,05	5,63
0:24:30	5,42	5,63
0:24:40	5,50	5,63
0:24:50	5,98	5,63
0:25:00	6,42	5,63
0:25:10	6,82	5,63
0:25:20	6,77	5,63
0:25:30	6,90	5,63
0:25:40	6,31	5,63
0:25:50	5,83	5,63
0:26:00	5,77	5,63
0:26:10	5,67	5,63
0:26:20	5,87	5,63
0:26:30	5,38	5,63
0:26:40	5,51	5,63
0:26:50	5,57	5,63
0:27:00	5,69	5,63
0:27:10	6,15	5,63
0:27:20	6,38	5,63

nastavak tablice 3.5.

0:27:30	6,31	5,63
0:27:40	6,45	5,63
0:27:50	7,09	5,63
0:28:00	7,31	5,63
0:28:10	7,33	5,63
0:28:20	6,56	5,63
0:28:30	5,06	5,63
0:28:40	4,79	5,63
0:28:50	5,15	5,63
0:29:00	5,86	5,63
0:29:10	6,04	5,63
0:29:20	5,96	5,63
0:29:30	6,07	5,63
0:29:40	6,11	5,63
0:29:50	6,20	5,63
0:30:00	6,15	5,63
0:30:10	6,46	5,63
0:30:20	6,93	5,63
0:30:30	6,14	5,63
0:30:40	4,89	5,63
0:30:50	5,06	5,63
0:31:00	5,42	5,63
0:31:10	5,39	5,63
0:31:20	6,33	5,63
0:31:30	4,77	5,63
0:31:40	3,78	5,63
0:31:50	4,17	5,63
0:32:00	5,10	5,63
0:32:10	5,46	5,63
0:32:20	5,19	5,63
0:32:30	4,90	5,63
0:32:40	5,10	5,63
0:32:50	5,06	5,63
0:33:00	4,85	5,63
0:33:10	4,91	5,63
0:33:20	5,16	5,63
0:33:30	5,30	5,63
0:33:40	5,41	5,63
0:33:50	5,38	5,63
0:34:00	5,34	5,63
0:34:10	5,61	5,63
0:34:20	5,47	5,63
0:34:30	5,42	5,63
0:34:40	5,28	5,63
0:34:50	5,09	5,63
0:35:00	5,10	5,63
0:35:10	5,28	5,63

nastavak tablice 3.5.

0:35:20	5,32	5,63
0:35:30	5,37	5,63
0:35:40	5,30	5,63
0:35:50	5,14	5,63
0:36:00	5,16	5,63
0:36:10	5,30	5,63
0:36:20	5,38	5,63
0:36:30	5,36	5,63
0:36:40	5,46	5,63
0:36:50	5,95	5,63
0:37:00	6,17	5,63
0:37:10	6,27	5,63
0:37:20	6,31	5,63
0:37:30	6,34	5,63
0:37:40	6,36	5,63
0:37:50	6,38	5,63
0:38:00	6,41	5,63
0:38:10	6,42	5,63
0:38:20	6,43	5,63
0:38:30	6,43	5,63
0:38:40	6,46	5,63
0:38:50	5,34	5,63
0:39:00	6,25	5,63
0:39:10	6,17	5,63
0:39:20	6,23	5,63
0:39:30	6,14	5,63
0:39:40	5,95	5,63
0:39:50	5,95	5,63
0:40:00	5,96	5,63
0:40:10	5,72	5,63
0:40:20	5,68	5,63
0:40:30	5,64	5,63
0:40:40	5,64	5,63
0:40:50	5,87	5,63
0:41:00	5,91	5,63
0:41:10	5,94	5,63
0:41:20	5,96	5,63
0:41:30	5,75	5,63
0:41:40	6,19	5,63
0:41:50	6,56	5,63
0:42:00	5,76	5,63
0:42:10	5,68	5,63
0:42:20	5,03	5,63
0:42:30	5,22	5,63
0:42:40	5,58	5,63
0:42:50	5,61	5,63
0:43:00	5,96	5,63

nastavak tablice 3.5.

0:43:10	6,10	5,63
0:43:20	6,33	5,63
0:43:30	6,50	5,63
0:43:40	6,40	5,63
0:43:50	6,05	5,63
0:44:00	6,17	5,63
0:44:10	6,29	5,63
0:44:20	6,28	5,63
0:44:30	6,27	5,63
0:44:40	6,34	5,63
0:44:50	6,26	5,63
0:45:00	6,25	5,63
0:45:10	6,31	5,63
0:45:20	6,24	5,63
0:45:30	5,96	5,63
0:45:40	5,91	5,63
0:45:50	5,80	5,63
0:46:00	5,68	5,63
0:46:10	5,77	5,63
0:46:20	5,84	5,63
0:46:30	5,87	5,63
0:46:40	6,03	5,63
0:46:50	6,12	5,63
0:47:00	6,13	5,63
0:47:10	6,69	5,63
0:47:20	6,83	5,63
0:47:30	6,91	5,63
0:47:40	6,98	5,63
0:47:50	7,01	5,63
0:48:00	6,70	5,63
0:48:10	6,27	5,63
0:48:20	6,09	5,63
0:48:30	6,01	5,63
0:48:40	6,01	5,63
0:48:50	5,97	5,63
0:49:00	6,05	5,63
0:49:10	6,21	5,63
0:49:20	6,26	5,63
0:49:30	6,25	5,63
0:49:40	6,37	5,63
0:49:50	6,41	5,63
0:50:00	6,28	5,63
0:50:10	5,45	5,63
0:50:20	4,80	5,63
0:50:30	5,45	5,63
0:50:40	5,47	5,63
0:50:50	5,54	5,63

nastavak tablice 3.5.

0:51:00	5,62	5,63
0:51:10	5,60	5,63
0:51:20	5,76	5,63
0:51:30	5,93	5,63
0:51:40	5,83	5,63
0:51:50	5,71	5,63
0:52:00	5,59	5,63
0:52:10	5,61	5,63
0:52:20	5,52	5,63
0:52:30	5,41	5,63
0:52:40	5,31	5,63
0:52:50	5,34	5,63
0:53:00	5,85	5,63
0:53:10	6,09	5,63
0:53:20	6,60	5,63
0:53:30	6,53	5,63
0:53:40	5,74	5,63
0:53:50	5,52	5,63
0:54:00	5,50	5,63
0:54:10	5,37	5,63
0:54:20	5,17	5,63
0:54:30	5,32	5,63
0:54:40	5,32	5,63
0:54:50	5,44	5,63
0:55:00	5,56	5,63
0:55:10	5,43	5,63
0:55:20	5,40	5,63
0:55:30	5,51	5,63
0:55:40	5,53	5,63
0:55:50	5,15	5,63
0:56:00	5,11	5,63
0:56:10	5,28	5,63
0:56:20	5,42	5,63
0:56:30	5,26	5,63
0:56:40	4,91	5,63
0:56:50	4,51	5,63
0:57:00	4,31	5,63
0:57:10	4,22	5,63
0:57:20	4,34	5,63
0:57:30	4,26	5,63
0:57:40	4,02	5,63
0:57:50	3,74	5,63
0:58:00	3,78	5,63
0:58:10	3,95	5,63
0:58:20	4,00	5,63
0:58:30	4,16	5,63
0:58:40	4,07	5,63

nastavak tablice 3.5.

0:58:50	4,07	5,63
0:59:00	4,39	5,63
0:59:10	4,71	5,63
0:59:20	4,90	5,63
0:59:30	5,03	5,63
0:59:40	4,76	5,63
0:59:50	4,43	5,63
1:00:00	4,37	5,63
1:00:10	4,59	5,63
1:00:20	4,83	5,63
1:00:30	4,95	5,63
1:00:40	4,78	5,63
1:00:50	4,58	5,63
1:01:00	4,47	5,63
1:01:10	4,47	5,63
1:01:20	4,50	5,63
1:01:30	4,73	5,63
1:01:40	4,83	5,63
1:01:50	4,84	5,63
1:02:00	4,88	5,63
1:02:10	5,10	5,63
1:02:20	5,23	5,63
1:02:30	5,36	5,63
1:02:40	5,44	5,63
1:02:50	5,48	5,63
1:03:00	5,50	5,63
1:03:10	5,52	5,63
1:03:20	5,52	5,63
1:03:30	5,53	5,63
1:03:40	5,53	5,63
1:03:50	5,53	5,63
1:04:00	5,53	5,63
1:04:10	5,43	5,63
1:04:20	4,89	5,63
1:04:30	5,51	5,63
1:04:40	5,52	5,63
1:04:50	5,58	5,63
1:05:00	5,68	5,63
1:05:10	5,74	5,63
1:05:20	5,79	5,63
1:05:30	5,9	5,63
1:05:40	6,00	5,63
1:05:50	6,05	5,63
1:06:00	6,04	5,63
1:06:10	6,04	5,63
1:06:20	6,04	5,63
1:06:30	6,04	5,63

nastavak tablice 3.5.

1:06:40	6,04	5,63
1:06:50	6,03	5,63
1:07:00	6,01	5,63
1:07:10	5,99	5,63
1:07:20	5,98	5,63
1:07:30	5,97	5,63
1:07:40	5,96	5,63
1:07:50	5,96	5,63
1:08:00	5,97	5,63
1:08:10	5,95	5,63
1:08:20	5,47	5,63
1:08:30	5,35	5,63
1:08:40	5,34	5,63
1:08:50	5,37	5,63
1:09:00	5,41	5,63
1:09:10	5,25	5,63
1:09:20	5,21	5,63
1:09:30	5,27	5,63
1:09:40	5,17	5,63
1:09:50	5,18	5,63
1:10:00	5,16	5,63
1:10:10	5,08	5,63
1:10:20	5,14	5,63
1:10:30	5,13	5,63
1:10:40	5,14	5,63
1:10:50	5,25	5,63
1:11:00	5,27	5,63
1:11:10	5,43	5,63
1:11:20	5,52	5,63
1:11:30	5,58	5,63
1:11:40	5,65	5,63
1:11:50	5,77	5,63

3.2.3. Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora - faza 3

Rezultati određivanja koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora (faza 3) prikazani su u tablicama 3.6. i 3.7., a rezultati vremenskog određivanja KPK vrijednosti u tablici 3.8.

Tablica 3.6. Rezultati fizikalnih pokazatelja u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora.

Parametar, mjerna jedinica	Izmjerena vrijednost
pH	6,8
Temperatura, °C	25,5
Električna vodljivost, μS/cm	840

Tablica 3.7. Rezultati vremenskog određivanja koncentracije otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora.

Vrijeme	$\gamma(O_2)$	Vrijeme	$\gamma(O_2)$	Vrijeme	$\gamma(O_2)$
sat:min:sec	mg O_2/L	sat:min:sec	mg O_2/L	sat:min:sec	mg O_2/L
0:00:00	0,00	1:51:30	4,79	3:43:00	4,63
0:00:10	0,00	1:51:40	5,06	3:43:10	4,73
0:00:20	0,15	1:51:50	5,05	3:43:30	4,62
0:00:30	0,54	1:52:00	5,20	3:43:40	4,43
0:00:40	0,89	1:52:10	5,27	3:43:50	4,37
0:00:50	0,99	1:52:20	4,53	3:44:00	4,32
0:01:00	1,46	1:52:30	4,25	3:44:10	4,33
0:01:10	1,89	1:52:40	4,33	3:44:20	4,32
0:01:20	2,15	1:52:50	4,21	3:44:30	4,33
0:01:30	4,56	1:53:00	4,07	3:44:40	4,32
0:01:40	4,07	1:53:10	4,02	3:44:50	4,32
0:01:50	4,31	1:53:20	4,10	3:45:00	4,31
0:02:00	4,89	1:53:30	4,14	3:45:10	4,51
0:02:10	4,97	1:53:40	4,21	3:45:20	4,62
0:02:20	5,15	1:53:50	4,24	3:45:30	4,42
0:02:30	5,71	1:54:00	4,41	3:45:40	4,36
0:02:40	5,71	1:54:10	4,37	3:45:50	4,32
0:02:50	4,29	1:54:20	4,26	3:46:00	4,32
0:03:00	3,99	1:54:30	4,04	3:46:10	4,32
0:03:10	4,32	1:54:40	4,07	3:46:20	4,94
0:03:20	4,40	1:54:50	4,26	3:46:30	4,98
0:03:30	5,23	1:55:00	4,18	3:46:40	5,17

nastavak tablice 3.7.

0:03:40	5,51	1:55:10	4,04	3:46:50	5,25
0:03:50	5,70	1:55:20	4,14	3:47:00	5,06
0:04:00	5,09	1:55:30	4,19	3:47:10	4,97
0:04:10	4,66	1:55:40	4,31	3:47:20	4,94
0:04:20	5,36	1:55:50	4,34	3:47:30	4,93
0:04:30	6,36	1:56:00	4,28	3:47:40	5,00
0:04:40	6,47	1:56:10	4,26	3:47:50	5,04
0:04:50	5,00	1:56:20	4,28	3:48:00	5,08
0:05:00	3,14	1:56:30	4,74	3:48:10	5,10
0:05:10	2,83	1:56:40	4,74	3:48:20	5,11
0:05:20	2,80	1:56:50	4,46	3:48:30	5,06
0:05:30	2,56	1:57:00	4,75	3:48:40	5,04
0:05:40	2,36	1:57:10	5,07	3:48:50	5,07
0:05:50	2,50	1:57:20	4,77	3:49:00	5,11
0:06:00	4,38	1:57:30	4,52	3:49:10	5,16
0:06:10	3,97	1:57:40	4,31	3:49:20	5,23
0:06:20	3,59	1:57:50	4,18	3:49:30	5,33
0:06:30	3,68	1:58:00	4,07	3:49:40	5,43
0:06:40	3,11	1:58:10	3,99	3:49:50	5,49
0:06:50	4,45	1:58:20	3,78	3:50:00	5,55
0:07:00	4,29	1:58:30	3,64	3:50:10	5,56
0:07:10	3,62	1:58:40	3,59	3:50:20	5,57
0:07:20	2,73	1:58:50	3,71	3:50:30	5,59
0:07:30	2,04	1:59:00	3,65	3:50:40	5,63
0:07:40	2,01	1:59:10	3,92	3:50:50	5,64
0:07:50	2,20	1:59:20	4,01	3:51:00	5,61
0:08:00	3,81	1:59:30	3,93	3:51:10	5,60
0:08:10	3,4	1:59:40	3,96	3:51:20	5,56
0:08:20	3,48	1:59:50	3,90	3:51:30	5,49
0:08:30	3,36	2:00:00	4,01	3:51:40	5,46
0:08:40	3,50	2:00:10	3,99	3:51:50	5,46
0:08:50	3,89	2:00:20	4,09	3:52:00	5,44
0:09:00	3,44	2:00:30	3,99	3:52:10	5,41
0:09:10	3,00	2:00:40	3,95	3:52:20	5,44
0:09:20	2,66	2:00:50	4,01	3:52:30	5,45
0:09:30	2,65	2:01:00	4,20	3:52:40	5,47
0:09:40	2,97	2:01:10	4,19	3:52:50	5,26
0:09:50	3,31	2:01:20	4,09	3:53:00	5,12
0:10:00	2,82	2:01:30	4,15	3:53:10	5,00
0:10:10	2,47	2:01:40	4,13	3:53:20	4,96
0:10:20	2,42	2:01:50	4,24	3:53:30	4,95
0:10:30	2,39	2:02:00	4,46	3:53:40	5,03
0:10:40	2,47	2:02:10	4,62	3:53:50	5,01
0:10:50	3,07	2:02:20	4,75	3:54:00	5,57
0:11:00	3,07	2:02:30	4,96	3:54:10	5,59
0:11:10	2,79	2:02:40	4,96	3:54:20	5,60
0:11:20	2,90	2:02:50	4,52	3:54:30	5,58

nastavak tablice 3.7.

0:11:30	2,87	2:03:00	4,27	3:54:40	5,56
0:11:40	2,71	2:03:10	4,35	3:54:50	5,55
0:11:50	2,75	2:03:20	4,20	3:55:00	5,55
0:12:00	2,83	2:03:30	4,03	3:55:10	5,59
0:12:10	2,85	2:03:40	4,21	3:55:20	5,56
0:12:20	2,86	2:03:50	4,58	3:55:30	5,56
0:12:30	2,86	2:04:00	4,77	3:55:40	5,55
0:12:40	2,99	2:04:10	4,83	3:55:50	5,64
0:12:50	3,02	2:04:20	4,81	3:56:00	5,82
0:13:00	2,95	2:04:30	4,83	3:56:10	5,77
0:13:10	2,77	2:04:40	4,81	3:56:20	5,74
0:13:20	2,87	2:04:50	4,78	3:56:30	5,84
0:13:30	2,86	2:05:00	4,74	3:56:40	5,86
0:13:40	3,03	2:05:10	4,74	3:56:50	5,76
0:13:50	3,17	2:05:20	4,79	3:57:00	5,68
0:14:00	2,95	2:05:30	4,88	3:57:10	5,58
0:14:10	2,86	2:05:40	5,05	3:57:20	5,52
0:14:20	2,87	2:05:50	5,07	3:57:30	5,65
0:14:30	2,92	2:06:00	4,68	3:57:40	5,60
0:14:40	2,85	2:06:10	4,11	3:57:50	5,76
0:14:50	2,76	2:06:20	4,02	3:58:00	5,78
0:15:00	3,30	2:06:30	4,15	3:58:10	5,78
0:15:10	3,27	2:06:40	4,55	3:58:20	5,74
0:15:20	3,26	2:06:50	4,62	3:58:30	5,75
0:15:30	3,20	2:07:00	4,68	3:58:40	5,79
0:15:40	3,19	2:07:10	4,64	3:58:50	5,93
0:15:50	3,21	2:07:20	4,59	3:59:00	5,97
0:16:00	3,23	2:07:30	4,62	3:59:10	5,95
0:16:10	3,21	2:07:40	4,65	3:59:20	5,92
0:16:20	3,16	2:07:50	4,80	3:59:30	5,93
0:16:30	3,09	2:08:00	4,85	3:59:40	5,93
0:16:40	2,97	2:08:10	4,63	3:59:50	5,97
0:16:50	2,85	2:08:20	4,26	4:00:00	5,97
0:17:00	2,91	2:08:30	3,94	4:00:10	5,94
0:17:10	2,98	2:08:40	3,70	4:00:20	5,93
0:17:20	3,03	2:08:50	3,79	4:00:30	5,93
0:17:30	3,03	2:09:00	3,89	4:00:40	5,93
0:17:40	2,99	2:09:10	3,82	4:00:50	5,93
0:17:50	2,92	2:09:20	4,09	4:01:00	5,98
0:18:00	2,91	2:09:30	4,09	4:01:10	5,97
0:18:10	2,93	2:09:40	4,14	4:01:20	6,01
0:18:20	2,92	2:09:50	4,24	4:01:30	6,01
0:18:30	2,92	2:10:00	4,34	4:01:40	5,91
0:18:40	2,89	2:10:10	4,26	4:01:50	5,85
0:18:50	2,92	2:10:20	4,23	4:02:00	5,82
0:19:00	2,94	2:10:30	4,55	4:02:10	5,80
0:19:10	2,99	2:10:40	4,70	4:02:20	5,78

nastavak tablice 3.7.

0:19:20	2,99	2:10:50	4,74	4:02:30	5,78
0:19:30	2,97	2:11:00	4,45	4:02:40	6,27
0:19:40	2,94	2:11:10	4,28	4:02:50	6,44
0:19:50	2,95	2:11:20	4,39	4:03:00	6,53
0:20:00	2,97	2:11:30	4,44	4:03:10	6,56
0:20:10	2,97	2:11:40	4,42	4:03:20	6,62
0:20:20	2,95	2:11:50	4,50	4:03:30	6,73
0:20:30	2,92	2:12:00	4,57	4:03:40	6,78
0:20:40	2,90	2:12:10	4,56	4:03:50	6,77
0:20:50	2,91	2:12:20	4,56	4:04:00	6,72
0:21:00	2,87	2:12:30	4,43	4:04:10	6,77
0:21:10	2,84	2:12:40	4,50	4:04:20	6,72
0:21:20	2,82	2:12:50	4,62	4:04:30	6,68
0:21:30	2,79	2:13:00	4,72	4:04:40	6,79
0:21:40	2,79	2:13:10	4,73	4:04:50	6,96
0:21:50	2,81	2:13:20	4,73	4:05:00	7,02
0:22:00	2,82	2:13:30	4,76	4:05:10	7,10
0:22:10	2,82	2:13:40	4,73	4:05:20	7,21
0:22:20	2,86	2:13:50	4,70	4:05:30	7,15
0:22:30	2,85	2:14:00	4,77	4:05:40	6,20
0:22:40	2,84	2:14:10	4,81	4:05:50	6,14
0:22:50	2,83	2:14:20	4,80	4:06:00	6,39
0:23:00	2,83	2:14:30	4,77	4:06:10	6,11
0:23:10	2,84	2:14:40	4,76	4:06:20	6,02
0:23:20	2,87	2:14:50	4,81	4:06:30	5,92
0:23:30	2,89	2:15:00	4,95	4:06:40	6,16
0:23:40	2,90	2:15:10	5,02	4:06:50	5,93
0:23:50	2,90	2:15:20	5,07	4:07:00	6,04
0:24:00	2,88	2:15:30	5,09	4:07:10	5,95
0:24:10	2,84	2:15:40	5,11	4:07:20	5,85
0:24:20	2,84	2:15:50	5,12	4:07:30	5,67
0:24:30	2,92	2:16:00	5,12	4:07:40	5,56
0:24:40	2,91	2:16:10	5,09	4:07:50	5,50
0:24:50	2,96	2:16:20	4,54	4:08:00	5,50
0:25:00	2,98	2:16:30	4,33	4:08:10	5,48
0:25:10	2,96	2:16:40	4,24	4:08:20	5,48
0:25:20	2,90	2:16:50	4,30	4:08:30	5,48
0:25:30	2,87	2:17:00	4,54	4:08:40	5,67
0:25:40	2,85	2:17:10	4,59	4:08:50	5,56
0:25:50	2,88	2:17:20	4,64	4:09:00	5,53
0:26:00	2,94	2:17:30	4,65	4:09:10	5,52
0:26:10	2,91	2:17:40	4,66	4:09:20	5,50
0:26:20	2,82	2:17:50	4,66	4:09:30	5,50
0:26:30	2,77	2:18:00	4,65	4:09:40	5,49
0:26:40	2,80	2:18:10	4,67	4:09:50	5,48
0:26:50	2,85	2:18:20	4,70	4:10:00	5,49
0:27:00	2,81	2:18:30	4,73	4:10:10	5,57

nastavak tablice 3.7.

0:27:10	2,87	2:18:40	4,77	4:10:20	5,58
0:27:20	2,89	2:18:50	4,80	4:10:30	5,60
0:27:30	2,84	2:19:00	4,85	4:10:40	5,60
0:27:40	2,85	2:19:10	4,94	4:10:50	5,61
0:27:50	2,95	2:19:20	4,98	4:11:00	5,62
0:28:00	2,95	2:19:30	5,01	4:11:10	5,67
0:28:10	2,93	2:19:40	4,66	4:11:20	5,75
0:28:20	2,88	2:19:50	4,37	4:11:30	5,70
0:28:30	2,82	2:20:00	4,18	4:11:40	5,72
0:28:40	2,80	2:20:10	4,13	4:11:50	5,63
0:28:50	2,83	2:20:20	4,09	4:12:00	5,60
0:29:00	2,87	2:20:30	3,99	4:12:10	5,50
0:29:10	2,84	2:20:40	3,98	4:12:20	5,48
0:29:20	2,63	2:20:50	3,96	4:12:30	5,47
0:29:30	2,64	2:21:00	3,98	4:12:40	5,48
0:29:40	2,84	2:21:10	4,01	4:12:50	5,48
0:29:50	3,00	2:21:20	4,11	4:13:00	5,48
0:30:00	3,01	2:21:30	4,17	4:13:10	5,48
0:30:10	3,13	2:21:40	4,13	4:13:20	5,48
0:30:20	3,20	2:21:50	4,13	4:13:30	5,48
0:30:30	3,33	2:22:00	4,28	4:13:40	5,48
0:30:40	3,18	2:22:10	4,18	4:13:50	5,49
0:30:50	3,01	2:22:20	4,20	4:14:00	5,51
0:31:00	3,20	2:22:30	4,20	4:14:10	5,51
0:31:10	2,79	2:22:40	4,13	4:14:20	5,51
0:31:20	2,89	2:22:50	4,21	4:14:30	5,51
0:31:30	2,79	2:23:00	4,19	4:14:40	5,51
0:31:40	2,89	2:23:10	4,09	4:14:50	5,51
0:31:50	2,98	2:23:20	4,24	4:15:00	5,51
0:32:00	3,19	2:23:30	4,35	4:15:10	5,51
0:32:10	3,23	2:23:40	4,44	4:15:20	5,52
0:32:20	3,19	2:23:50	4,45	4:15:30	5,5
0:32:30	3,35	2:24:00	4,42	4:15:40	5,49
0:32:40	3,30	2:24:10	4,42	4:15:50	5,49
0:32:50	3,42	2:24:20	4,31	4:16:00	5,50
0:33:00	3,52	2:24:30	4,38	4:16:10	5,52
0:33:10	3,23	2:24:40	4,42	4:16:20	5,52
0:33:20	3,54	2:24:50	4,51	4:16:30	5,51
0:33:30	3,61	2:25:00	4,36	4:16:40	5,49
0:33:40	3,62	2:25:10	4,27	4:16:50	5,50
0:33:50	3,48	2:25:20	4,26	4:17:00	5,51
0:34:00	3,57	2:25:30	4,21	4:17:10	5,51
0:34:10	3,69	2:25:40	4,35	4:17:20	5,52
0:34:20	3,65	2:25:50	4,66	4:17:30	5,52
0:34:30	3,74	2:26:00	4,54	4:17:40	5,52
0:34:40	3,46	2:26:10	4,66	4:17:50	5,52
0:34:50	3,81	2:26:20	4,65	4:18:00	5,51

nastavak tablice 3.7.

0:35:00	3,76	2:26:30	4,54	4:18:10	5,52
0:35:10	4,12	2:26:40	4,57	4:18:20	5,52
0:35:20	3,91	2:26:50	4,82	4:18:30	5,52
0:35:30	4,44	2:27:00	4,70	4:18:40	5,55
0:35:40	3,81	2:27:10	4,67	4:18:50	5,55
0:35:50	3,83	2:27:20	4,77	4:19:00	5,54
0:36:00	4,61	2:27:30	4,59	4:19:10	5,53
0:36:10	4,34	2:27:40	4,73	4:19:20	5,53
0:36:20	5,50	2:27:50	5,17	4:19:30	5,54
0:36:30	4,38	2:28:00	5,56	4:19:40	5,54
0:36:40	4,07	2:28:10	5,88	4:19:50	5,58
0:36:50	3,69	2:28:20	5,72	4:20:00	5,61
0:37:00	3,72	2:28:30	5,45	4:20:10	5,58
0:37:10	3,46	2:28:40	5,46	4:20:20	5,56
0:37:20	3,83	2:28:50	5,41	4:20:30	5,56
0:37:30	3,67	2:29:00	5,34	4:20:40	5,60
0:37:40	3,48	2:29:10	4,57	4:20:50	5,58
0:37:50	3,60	2:29:20	4,01	4:21:00	5,58
0:38:00	3,66	2:29:30	3,89	4:21:10	5,60
0:38:10	4,09	2:29:40	3,80	4:21:20	5,59
0:38:20	3,65	2:29:50	3,71	4:21:30	5,60
0:38:30	4,39	2:30:00	4,21	4:21:40	5,62
0:38:40	4,67	2:30:10	4,67	4:21:50	5,62
0:38:50	4,29	2:30:20	5,26	4:22:00	5,59
0:39:00	4,20	2:30:30	5,43	4:22:10	5,59
0:39:10	3,56	2:30:40	6,00	4:22:20	5,57
0:39:20	3,98	2:30:50	5,81	4:22:30	5,58
0:39:30	3,78	2:31:00	5,92	4:22:40	5,60
0:39:40	3,92	2:31:10	5,72	4:22:50	5,60
0:39:50	3,46	2:31:20	5,68	4:23:00	5,58
0:40:00	3,68	2:31:30	5,74	4:23:10	5,59
0:40:10	3,31	2:31:40	5,66	4:23:20	5,59
0:40:20	3,69	2:31:50	5,73	4:23:30	5,58
0:40:30	3,68	2:32:00	5,72	4:23:40	5,57
0:40:40	3,52	2:32:10	5,78	4:23:50	5,60
0:40:50	3,61	2:32:20	5,65	4:24:00	5,60
0:41:00	4,09	2:32:30	5,68	4:24:10	5,58
0:41:10	4,20	2:32:40	5,55	4:24:20	5,62
0:41:20	3,95	2:32:50	5,55	4:24:30	5,62
0:41:30	3,98	2:33:00	5,53	4:24:40	5,67
0:41:40	4,05	2:33:10	5,50	4:24:50	5,67
0:41:50	3,70	2:33:20	5,55	4:25:00	5,65
0:42:00	4,21	2:33:30	5,52	4:25:10	5,66
0:42:10	3,61	2:33:40	5,60	4:25:20	5,64
0:42:20	4,62	2:33:50	5,45	4:25:30	5,67
0:42:30	5,09	2:34:00	5,36	4:25:40	5,67
0:42:40	4,74	2:34:10	5,32	4:25:50	5,64

nastavak tablice 3.7.

0:42:50	4,15	2:34:20	5,30	4:26:00	5,66
0:43:00	3,51	2:34:30	5,18	4:26:10	5,65
0:43:10	3,60	2:34:40	5,07	4:26:20	5,63
0:43:20	3,86	2:34:50	5,11	4:26:30	5,61
0:43:30	3,93	2:35:00	4,95	4:26:40	5,59
0:43:40	3,96	2:35:10	5,17	4:26:50	5,62
0:43:50	3,92	2:35:20	6,01	4:27:00	5,63
0:44:00	4,26	2:35:30	6,54	4:27:10	5,63
0:44:10	4,23	2:35:40	6,62	4:27:20	5,63
0:44:20	3,38	2:35:50	6,71	4:27:30	5,60
0:44:30	3,47	2:36:00	6,86	4:27:40	5,56
0:44:40	3,50	2:36:10	6,55	4:27:50	5,57
0:44:50	3,41	2:36:20	6,52	4:28:00	5,56
0:45:00	3,41	2:36:30	6,36	4:28:10	5,55
0:45:10	3,26	2:36:40	6,57	4:28:20	5,55
0:45:20	4,40	2:36:50	6,40	4:28:30	5,54
0:45:30	5,14	2:37:00	6,57	4:28:40	5,56
0:45:40	5,38	2:37:10	6,84	4:28:50	5,56
0:45:50	4,79	2:37:20	5,56	4:29:00	5,57
0:46:00	4,81	2:37:30	4,48	4:29:10	5,57
0:46:10	4,50	2:37:40	4,07	4:29:20	5,56
0:46:20	4,92	2:37:50	3,85	4:29:30	5,56
0:46:30	5,92	2:38:00	4,10	4:29:40	5,56
0:46:40	5,11	2:38:10	5,06	4:29:50	5,56
0:46:50	4,81	2:38:20	5,26	4:30:00	5,56
0:47:00	4,84	2:38:30	5,66	4:30:10	5,56
0:47:10	4,83	2:38:40	4,98	4:30:20	5,55
0:47:20	7,12	2:38:50	4,26	4:30:30	5,55
0:47:30	5,42	2:39:00	3,72	4:30:40	5,54
0:47:40	4,73	2:39:10	3,60	4:30:50	5,54
0:47:50	4,68	2:39:20	3,67	4:31:00	5,54
0:48:00	4,72	2:39:30	3,78	4:31:10	5,55
0:48:10	5,73	2:39:40	3,90	4:31:20	5,55
0:48:20	5,60	2:39:50	3,69	4:31:30	5,54
0:48:30	6,16	2:40:00	3,66	4:31:40	5,54
0:48:40	5,92	2:40:10	3,56	4:31:50	5,56
0:48:50	5,64	2:40:20	3,78	4:32:00	5,56
0:49:00	6,34	2:40:30	3,67	4:32:10	5,58
0:49:10	5,79	2:40:40	3,58	4:32:20	5,56
0:49:20	5,73	2:40:50	3,67	4:32:30	5,55
0:49:30	5,86	2:41:00	3,70	4:32:40	5,54
0:49:40	6,03	2:41:10	3,79	4:32:50	5,54
0:49:50	6,56	2:41:20	4,19	4:33:00	5,53
0:50:00	6,54	2:41:30	4,76	4:33:10	5,53
0:50:10	6,60	2:41:40	4,83	4:33:20	5,53
0:50:20	6,26	2:41:50	4,64	4:33:30	5,58
0:50:30	5,08	2:42:00	4,43	4:33:40	5,56

nastavak tablice 3.7.

0:50:40	4,42	2:42:10	3,77	4:33:50	5,53
0:50:50	4,44	2:42:20	3,62	4:34:00	5,54
0:51:00	4,14	2:42:30	3,52	4:34:10	5,54
0:51:10	4,36	2:42:40	3,53	4:34:20	5,56
0:51:20	4,45	2:42:50	3,54	4:34:30	5,59
0:51:30	4,23	2:43:00	3,55	4:34:40	5,58
0:51:40	4,42	2:43:10	3,53	4:34:50	5,57
0:51:50	4,84	2:43:20	3,51	4:35:00	5,56
0:52:00	4,74	2:43:30	3,61	4:35:10	5,56
0:52:10	4,65	2:43:40	3,68	4:35:20	5,59
0:52:20	4,06	2:43:50	3,70	4:35:30	5,59
0:52:30	4,27	2:44:00	4,05	4:35:40	5,56
0:52:40	4,18	2:44:10	4,29	4:35:50	5,56
0:52:50	4,62	2:44:20	4,40	4:36:00	5,56
0:53:00	4,74	2:44:30	4,67	4:36:10	5,55
0:53:10	4,48	2:44:40	5,16	4:36:20	5,57
0:53:20	4,57	2:44:50	5,47	4:36:30	5,55
0:53:30	4,60	2:45:00	5,36	4:36:40	5,53
0:53:40	4,83	2:45:10	5,92	4:36:50	5,53
0:53:50	5,08	2:45:20	5,78	4:37:00	5,54
0:54:00	4,91	2:45:30	4,66	4:37:10	5,54
0:54:10	5,50	2:45:40	4,68	4:37:20	5,54
0:54:20	5,44	2:45:50	4,50	4:37:30	5,54
0:54:30	5,00	2:46:00	4,36	4:37:40	5,54
0:54:40	4,67	2:46:10	4,34	4:37:50	5,54
0:54:50	5,12	2:46:20	4,36	4:38:00	5,56
0:55:00	4,81	2:46:30	4,33	4:38:10	5,56
0:55:10	5,64	2:46:40	4,31	4:38:20	5,56
0:55:20	5,22	2:46:50	4,28	4:38:30	5,59
0:55:30	5,02	2:47:00	4,28	4:38:40	5,59
0:55:40	4,80	2:47:10	4,28	4:38:50	5,56
0:55:50	4,51	2:47:20	4,28	4:39:00	5,54
0:56:00	4,53	2:47:30	4,27	4:39:10	5,55
0:56:10	4,35	2:47:40	4,29	4:39:20	5,56
0:56:20	5,33	2:47:50	4,29	4:39:30	5,56
0:56:30	4,92	2:48:00	4,29	4:39:40	5,55
0:56:40	4,49	2:48:10	4,37	4:39:50	5,56
0:56:50	4,81	2:48:20	4,29	4:40:00	5,60
0:57:00	5,49	2:48:30	4,28	4:40:10	5,64
0:57:10	4,77	2:48:40	4,28	4:40:20	5,64
0:57:20	4,77	2:48:50	4,31	4:40:30	5,73
0:57:30	4,89	2:49:00	4,27	4:40:40	5,89
0:57:40	5,04	2:49:10	4,28	4:40:50	5,74
0:57:50	5,05	2:49:20	4,25	4:41:00	5,66
0:58:00	4,81	2:49:30	4,27	4:41:10	5,61
0:58:10	4,30	2:49:40	4,25	4:41:20	5,59
0:58:20	4,55	2:49:50	4,24	4:41:30	5,58

nastavak tablice 3.7.

0:58:30	5,08	2:50:00	4,25	4:41:40	5,56
0:58:40	5,16	2:50:10	4,25	4:41:50	5,54
0:58:50	5,17	2:50:20	4,27	4:42:00	5,54
0:59:00	5,20	2:50:30	4,28	4:42:10	5,54
0:59:10	5,19	2:50:40	4,28	4:42:20	5,54
0:59:20	4,88	2:50:50	4,26	4:42:30	5,53
0:59:30	4,73	2:51:00	4,30	4:42:40	5,53
0:59:40	5,16	2:51:10	4,59	4:42:50	5,56
0:59:50	4,79	2:51:20	4,53	4:43:00	5,59
1:00:00	5,12	2:51:30	4,48	4:43:10	5,66
1:00:10	5,33	2:51:40	4,32	4:43:20	5,72
1:00:20	4,96	2:51:50	4,34	4:43:30	5,63
1:00:30	5,01	2:52:00	4,31	4:43:40	5,59
1:00:40	4,96	2:52:10	4,38	4:43:50	5,56
1:00:50	5,64	2:52:20	4,43	4:44:00	5,56
1:01:00	5,52	2:52:30	4,40	4:44:10	5,56
1:01:10	4,88	2:52:40	4,31	4:44:20	5,58
1:01:20	4,76	2:52:50	4,27	4:44:30	5,59
1:01:30	4,81	2:53:00	4,25	4:44:40	5,57
1:01:40	4,55	2:53:10	4,29	4:44:50	5,56
1:01:50	4,91	2:53:20	4,36	4:45:00	5,58
1:02:00	5,65	2:53:30	4,34	4:45:10	5,56
1:02:10	5,03	2:53:40	4,29	4:45:20	5,56
1:02:20	4,32	2:53:50	4,38	4:45:30	5,57
1:02:30	4,30	2:54:00	4,35	4:45:40	5,57
1:02:40	4,75	2:54:10	4,48	4:45:50	5,57
1:02:50	4,80	2:54:20	4,62	4:46:00	5,56
1:03:00	4,34	2:54:30	4,49	4:46:10	5,56
1:03:10	4,17	2:54:40	4,41	4:46:20	5,56
1:03:20	4,37	2:54:50	4,35	4:46:30	5,54
1:03:30	4,33	2:55:00	4,31	4:46:40	5,56
1:03:40	4,22	2:55:10	4,29	4:46:50	5,56
1:03:50	4,15	2:55:20	4,28	4:47:00	5,57
1:04:00	4,07	2:55:30	4,32	4:47:10	5,56
1:04:10	3,99	2:55:40	4,32	4:47:20	5,56
1:04:20	4,13	2:55:50	4,32	4:47:30	5,56
1:04:30	4,34	2:56:00	4,29	4:47:40	5,56
1:04:40	4,35	2:56:10	4,27	4:47:50	5,60
1:04:50	4,37	2:56:20	4,27	4:48:00	5,63
1:05:00	4,24	2:56:30	4,32	4:48:10	5,59
1:05:10	4,30	2:56:40	4,38	4:48:20	5,56
1:05:20	4,29	2:56:50	4,37	4:48:30	5,56
1:05:30	4,25	2:57:00	4,35	4:48:40	5,57
1:05:40	4,42	2:57:10	4,44	4:48:50	5,59
1:05:50	4,41	2:57:20	4,39	4:49:00	5,58
1:06:00	4,23	2:57:30	4,40	4:49:10	5,56
1:06:10	4,59	2:57:40	4,39	4:49:20	5,56

nastavak tablice 3.7.

1:06:20	4,93	2:57:50	4,32	4:49:30	5,56
1:06:30	4,58	2:58:00	4,34	4:49:40	5,56
1:06:40	4,26	2:58:10	4,33	4:49:50	5,56
1:06:50	4,32	2:58:20	4,28	4:50:00	5,56
1:07:00	4,21	2:58:30	4,28	4:50:10	5,56
1:07:10	4,21	2:58:40	4,27	4:50:20	5,59
1:07:20	4,31	2:58:50	4,27	4:50:30	5,57
1:07:30	4,29	2:59:00	4,28	4:50:40	5,59
1:07:40	4,71	2:59:10	4,26	4:50:50	5,59
1:07:50	4,42	2:59:20	4,27	4:51:00	5,59
1:08:00	4,30	2:59:30	4,26	4:51:10	5,59
1:08:10	4,39	2:59:40	4,28	4:51:20	5,56
1:08:20	4,35	2:59:50	4,26	4:51:30	5,54
1:08:30	4,41	3:00:00	4,28	4:51:40	5,55
1:08:40	4,41	3:00:10	4,34	4:51:50	5,56
1:08:50	4,35	3:00:20	4,33	4:52:00	5,56
1:09:00	4,44	3:00:30	4,32	4:52:10	5,56
1:09:10	4,57	3:00:40	4,34	4:52:20	5,58
1:09:20	4,34	3:00:50	4,31	4:52:30	5,57
1:09:30	4,45	3:01:00	4,35	4:52:40	5,58
1:09:40	4,10	3:01:10	4,36	4:52:50	5,56
1:09:50	4,54	3:01:20	4,35	4:53:00	5,59
1:10:00	4,48	3:01:30	4,30	4:53:10	5,59
1:10:10	4,39	3:01:40	4,28	4:53:20	5,63
1:10:20	4,31	3:01:50	4,29	4:53:30	5,64
1:10:30	4,30	3:02:00	4,28	4:53:40	5,68
1:10:40	4,19	3:02:10	4,29	4:53:50	5,82
1:10:50	4,35	3:02:20	4,29	4:54:00	5,66
1:11:00	4,48	3:02:30	4,28	4:54:10	5,58
1:11:10	5,35	3:02:40	4,28	4:54:20	5,55
1:11:20	5,18	3:02:50	4,44	4:54:30	5,54
1:11:30	5,06	3:03:00	5,01	4:54:40	5,58
1:11:40	5,28	3:03:10	4,58	4:54:50	5,57
1:11:50	5,20	3:03:20	4,41	4:55:00	5,56
1:12:00	5,10	3:03:30	4,39	4:55:10	5,55
1:12:10	5,93	3:03:40	4,35	4:55:20	5,56
1:12:20	6,82	3:03:50	4,31	4:55:30	5,56
1:12:30	6,24	3:04:00	4,31	4:55:40	5,66
1:12:40	5,65	3:04:10	4,30	4:55:50	5,77
1:12:50	5,49	3:04:20	4,29	4:56:00	5,77
1:13:00	5,71	3:04:30	4,28	4:56:10	5,76
1:13:10	5,89	3:04:40	4,28	4:56:20	5,74
1:13:20	5,98	3:04:50	4,28	4:56:30	5,74
1:13:30	5,94	3:05:00	4,28	4:56:40	5,74
1:13:40	6,06	3:05:10	4,28	4:56:50	5,71
1:13:50	6,47	3:05:20	4,30	4:57:00	5,69
1:14:00	6,67	3:05:30	4,29	4:57:10	5,67

nastavak tablice 3.7.

1:14:10	7,21	3:05:40	4,29	4:57:20	5,66
1:14:20	7,79	3:05:50	4,28	4:57:30	5,62
1:14:30	7,61	3:06:00	4,29	4:57:40	5,61
1:14:40	5,40	3:06:10	4,30	4:57:50	5,60
1:14:50	4,88	3:06:20	4,31	4:58:00	5,59
1:15:00	4,94	3:06:30	4,32	4:58:10	5,59
1:15:10	5,06	3:06:40	4,34	4:58:20	5,59
1:15:20	4,82	3:06:50	4,32	4:58:30	5,58
1:15:30	4,97	3:07:00	4,32	4:58:40	5,58
1:15:40	4,94	3:07:10	4,31	4:58:50	5,57
1:15:50	5,20	3:07:20	4,31	4:59:00	5,57
1:16:00	5,73	3:07:30	4,36	4:59:10	5,57
1:16:10	5,99	3:07:40	4,46	4:59:20	5,59
1:16:20	5,31	3:07:50	4,51	4:59:30	5,62
1:16:30	4,62	3:08:00	4,59	4:59:40	5,59
1:16:40	4,40	3:08:10	4,62	4:59:50	5,59
1:16:50	5,19	3:08:20	4,57	5:00:00	5,56
1:17:00	5,69	3:08:30	4,47	5:00:10	5,55
1:17:10	5,60	3:08:40	4,36	5:00:20	5,53
1:17:20	5,68	3:08:50	4,47	5:00:30	5,52
1:17:30	5,27	3:09:00	4,68	5:00:40	5,52
1:17:40	5,40	3:09:10	4,78	5:00:50	5,52
1:17:50	5,95	3:09:20	4,80	5:01:00	5,52
1:18:00	5,45	3:09:30	4,81	5:01:10	5,52
1:18:10	5,28	3:09:40	4,85	5:01:20	5,52
1:18:20	5,33	3:09:50	4,79	5:01:30	5,52
1:18:30	5,42	3:10:00	4,73	5:01:40	5,52
1:18:40	5,19	3:10:10	4,67	5:01:50	5,53
1:18:50	5,26	3:10:20	4,66	5:02:00	5,56
1:19:00	5,63	3:10:30	4,69	5:02:10	5,59
1:19:10	6,16	3:10:40	4,65	5:02:20	5,56
1:19:20	6,17	3:10:50	4,67	5:02:30	5,54
1:19:30	6,05	3:11:00	4,63	5:02:40	5,55
1:19:40	6,08	3:11:10	4,57	5:02:50	5,54
1:19:50	4,89	3:11:20	4,62	5:03:00	5,54
1:20:00	4,66	3:11:30	4,63	5:03:10	5,55
1:20:10	4,42	3:11:40	4,62	5:03:20	5,56
1:20:20	4,12	3:11:50	4,44	5:03:30	5,53
1:20:30	4,14	3:12:00	4,38	5:03:40	5,53
1:20:40	4,65	3:12:10	4,33	5:03:50	5,52
1:20:50	4,36	3:12:20	4,33	5:04:00	5,52
1:21:00	4,14	3:12:30	4,49	5:04:10	5,54
1:21:10	4,54	3:12:40	4,84	5:04:20	5,53
1:21:20	4,60	3:12:50	4,62	5:04:30	5,53
1:21:30	4,71	3:13:00	4,46	5:04:40	5,54
1:21:40	4,48	3:13:10	4,36	5:04:50	5,53
1:21:50	4,53	3:13:20	4,36	5:05:00	5,53

nastavak tablice 3.7.

1:22:00	4,34	3:13:30	4,33	5:05:10	5,53
1:22:10	4,44	3:13:40	4,52	5:05:20	5,55
1:22:20	4,56	3:13:50	4,64	5:05:30	5,54
1:22:30	4,98	3:14:00	4,67	5:05:40	5,54
1:22:40	4,98	3:14:10	4,68	5:05:50	5,54
1:22:50	4,58	3:14:20	4,67	5:06:00	5,54
1:23:00	4,32	3:14:30	4,84	5:06:10	5,53
1:23:10	4,54	3:14:40	4,88	5:06:20	5,53
1:23:20	4,51	3:14:50	4,91	5:06:30	5,53
1:23:30	4,33	3:15:00	4,95	5:06:40	5,53
1:23:40	4,52	3:15:10	4,92	5:06:50	5,53
1:23:50	4,75	3:15:20	4,89	5:07:00	5,54
1:24:00	4,41	3:15:30	4,89	5:07:10	5,55
1:24:10	4,33	3:15:40	4,85	5:07:20	5,55
1:24:20	4,46	3:15:50	4,84	5:07:30	5,54
1:24:30	4,37	3:16:00	4,81	5:07:40	5,55
1:24:40	4,26	3:16:10	4,78	5:07:50	5,56
1:24:50	4,29	3:16:20	4,80	5:08:00	5,57
1:25:00	4,34	3:16:30	4,82	5:08:10	5,57
1:25:10	4,14	3:16:40	4,82	5:08:20	5,56
1:25:20	4,18	3:16:50	4,81	5:08:30	5,54
1:25:30	4,06	3:17:00	4,79	5:08:40	5,54
1:25:40	4,06	3:17:10	4,77	5:08:50	5,54
1:25:50	4,16	3:17:20	4,77	5:09:00	5,54
1:26:00	4,06	3:17:30	4,83	5:09:10	5,53
1:26:10	4,33	3:17:40	4,82	5:09:20	5,53
1:26:20	4,01	3:17:50	4,79	5:09:30	5,53
1:26:30	4,31	3:18:00	4,74	5:09:40	5,54
1:26:40	4,40	3:18:10	4,70	5:09:50	5,54
1:26:50	4,21	3:18:20	4,70	5:10:00	5,54
1:27:00	4,52	3:18:30	4,67	5:10:10	5,55
1:27:10	4,52	3:18:40	4,66	5:10:20	5,55
1:27:20	4,20	3:18:50	4,64	5:10:30	5,54
1:27:30	4,10	3:19:00	4,62	5:10:40	5,54
1:27:40	3,97	3:19:10	4,62	5:10:50	5,54
1:27:50	3,95	3:19:20	4,60	5:11:00	5,55
1:28:00	4,38	3:19:30	4,61	5:11:10	5,55
1:28:10	4,24	3:19:40	4,60	5:11:20	5,54
1:28:20	4,25	3:19:50	4,58	5:11:30	5,55
1:28:30	4,37	3:20:00	4,62	5:11:40	5,54
1:28:40	4,95	3:20:10	4,77	5:11:50	5,54
1:28:50	6,27	3:20:20	4,80	5:12:00	5,55
1:29:00	5,59	3:20:30	4,80	5:12:10	5,54
1:29:10	4,84	3:20:40	4,80	5:12:20	5,54
1:29:20	4,37	3:20:50	4,78	5:12:30	5,56
1:29:30	4,39	3:21:00	4,77	5:12:40	5,55
1:29:40	4,54	3:21:10	4,77	5:12:50	5,55

nastavak tablice 3.7.

1:29:50	4,10	3:21:20	4,77	5:13:00	5,54
1:30:00	4,25	3:21:30	4,74	5:13:10	5,54
1:30:10	4,66	3:21:40	4,75	5:13:20	5,53
1:30:20	4,80	3:21:50	4,73	5:13:30	5,54
1:30:30	4,89	3:22:00	4,71	5:13:40	5,56
1:30:40	4,92	3:22:10	4,70	5:13:50	5,56
1:30:50	4,79	3:22:20	4,68	5:14:00	5,59
1:31:00	5,07	3:22:30	4,66	5:14:10	5,56
1:31:10	5,43	3:22:40	4,66	5:14:20	5,56
1:31:20	5,22	3:22:50	4,67	5:14:30	5,55
1:31:30	5,29	3:23:00	4,68	5:14:40	5,57
1:31:40	6,39	3:23:10	4,72	5:14:50	5,58
1:31:50	6,13	3:23:20	4,73	5:15:00	5,56
1:32:00	5,75	3:23:30	4,70	5:15:10	5,59
1:32:10	5,21	3:23:40	4,71	5:15:20	5,55
1:32:20	4,62	3:23:50	4,67	5:15:30	5,54
1:32:30	4,79	3:24:00	4,68	5:15:40	5,54
1:32:40	4,94	3:24:10	4,73	5:15:50	5,53
1:32:50	5,25	3:24:20	5,41	5:16:00	5,54
1:33:00	5,36	3:24:30	5,60	5:16:10	5,54
1:33:10	5,40	3:24:40	5,64	5:16:20	5,54
1:33:20	5,40	3:24:50	5,76	5:16:30	5,56
1:33:30	5,17	3:25:00	5,82	5:16:40	5,56
1:33:40	4,97	3:25:10	5,04	5:16:50	5,54
1:33:50	5,29	3:25:20	4,62	5:17:00	5,56
1:34:00	4,98	3:25:30	4,50	5:17:10	5,56
1:34:10	5,01	3:25:40	4,38	5:17:20	5,57
1:34:20	4,91	3:25:50	4,53	5:17:30	5,57
1:34:30	4,41	3:26:00	4,59	5:17:40	5,55
1:34:40	4,29	3:26:10	4,53	5:17:50	5,54
1:34:50	4,49	3:26:20	4,60	5:18:00	5,54
1:35:00	4,42	3:26:30	4,63	5:18:10	5,55
1:35:10	4,97	3:26:40	4,42	5:18:20	5,54
1:35:20	4,96	3:26:50	4,40	5:18:30	5,54
1:35:30	4,90	3:27:00	4,36	5:18:40	5,55
1:35:40	4,99	3:27:10	4,32	5:18:50	5,56
1:35:50	5,10	3:27:20	4,36	5:19:00	5,56
1:36:00	5,17	3:27:30	4,36	5:19:10	5,55
1:36:10	5,19	3:27:40	4,32	5:19:20	5,55
1:36:20	4,70	3:27:50	4,35	5:19:30	5,54
1:36:30	4,98	3:28:00	4,32	5:19:40	5,54
1:36:40	5,17	3:28:10	4,32	5:19:50	5,56
1:36:50	4,95	3:28:20	4,48	5:20:00	5,55
1:37:00	4,99	3:28:30	4,46	5:20:10	5,56
1:37:10	4,71	3:28:40	4,36	5:20:20	5,62
1:37:20	4,52	3:28:50	4,46	5:20:30	5,59
1:37:30	4,56	3:29:00	4,53	5:20:40	5,59

nastavak tablice 3.7.

1:37:40	4,65	3:29:10	4,62	5:20:50	5,69
1:37:50	4,41	3:29:20	4,55	5:21:00	5,62
1:38:00	4,59	3:29:30	4,51	5:21:10	5,64
1:38:10	4,63	3:29:40	4,54	5:21:20	5,62
1:38:20	4,45	3:29:50	4,56	5:21:30	5,59
1:38:30	4,53	3:30:00	4,51	5:21:40	5,55
1:38:40	4,65	3:30:10	4,51	5:21:50	5,55
1:38:50	4,42	3:30:20	4,53	5:22:00	5,55
1:39:00	4,41	3:30:30	4,51	5:22:10	5,55
1:39:10	4,34	3:30:40	4,64	5:22:20	5,55
1:39:20	4,57	3:30:50	4,64	5:22:30	5,55
1:39:30	4,60	3:31:00	4,72	5:22:40	5,54
1:39:40	4,29	3:31:10	4,69	5:22:50	5,54
1:39:50	4,17	3:31:20	4,73	5:23:00	5,54
1:40:00	4,13	3:31:30	4,58	5:23:10	5,54
1:40:10	4,17	3:31:40	4,52	5:23:20	5,55
1:40:20	4,33	3:31:50	4,46	5:23:30	5,57
1:40:30	4,41	3:32:00	4,56	5:23:40	5,57
1:40:40	4,73	3:32:10	4,68	5:23:50	5,58
1:40:50	4,29	3:32:20	4,66	5:24:00	5,56
1:41:00	4,23	3:32:30	4,56	5:24:10	5,55
1:41:10	4,17	3:32:40	4,43	5:24:20	5,54
1:41:20	4,25	3:32:50	4,36	5:24:30	5,53
1:41:30	4,17	3:33:00	4,40	5:24:40	5,55
1:41:40	4,12	3:33:10	4,50	5:24:50	5,55
1:41:50	4,03	3:33:20	4,48	5:25:00	5,54
1:42:00	4,20	3:33:30	4,55	5:25:10	5,57
1:42:10	4,10	3:33:40	4,50	5:25:20	5,60
1:42:20	4,02	3:33:50	4,37	5:25:30	5,66
1:42:30	3,88	3:34:00	4,34	5:25:40	5,65
1:42:40	3,79	3:34:10	4,32	5:25:50	5,61
1:42:50	4,09	3:34:20	4,35	5:26:00	5,59
1:43:00	4,41	3:34:30	4,35	5:26:10	5,59
1:43:10	4,07	3:34:40	4,34	5:26:20	5,59
1:43:20	4,30	3:34:50	4,36	5:26:30	5,59
1:43:30	4,31	3:35:00	4,36	5:26:40	5,57
1:43:40	4,20	3:35:10	4,36	5:26:50	5,58
1:43:50	4,26	3:35:20	4,33	5:27:00	5,62
1:44:00	4,48	3:35:30	4,32	5:27:10	5,63
1:44:10	4,26	3:35:40	4,31	5:27:20	5,66
1:44:20	3,94	3:35:50	4,31	5:27:30	5,68
1:44:30	3,95	3:36:00	4,31	5:27:40	5,67
1:44:40	3,91	3:36:10	4,37	5:27:50	5,68
1:44:50	3,68	3:36:20	4,42	5:28:00	5,73
1:45:00	3,83	3:36:30	4,36	5:28:10	5,76
1:45:10	4,14	3:36:40	4,34	5:28:20	5,79
1:45:20	4,59	3:36:50	4,34	5:28:30	5,79

nastavak tablice 3.7.

1:45:30	4,15	3:37:00	4,33	5:28:40	5,74
1:45:40	4,15	3:37:10	4,33	5:28:50	5,69
1:45:50	4,34	3:37:20	4,34	5:29:00	5,67
1:46:00	4,10	3:37:30	4,37	5:29:10	5,69
1:46:10	4,33	3:37:40	4,62	5:29:20	5,67
1:46:20	4,15	3:37:50	4,73	5:29:30	5,64
1:46:30	4,47	3:38:00	4,58	5:29:40	5,66
1:46:40	4,51	3:38:10	4,44	5:29:50	5,66
1:46:50	4,29	3:38:20	4,39	5:30:00	5,78
1:47:00	3,99	3:38:30	4,36	5:30:10	5,83
1:47:10	3,87	3:38:40	4,36	5:30:20	5,85
1:47:20	3,87	3:38:50	4,33	5:30:30	5,90
1:47:30	4,10	3:39:00	4,36	5:30:40	5,79
1:47:40	4,14	3:39:10	4,33	5:30:50	5,70
1:47:50	4,16	3:39:20	4,32	5:31:00	5,66
1:48:00	4,10	3:39:30	4,32	5:31:10	5,64
1:48:10	4,17	3:39:40	4,35	5:31:20	5,65
1:48:20	4,74	3:39:50	4,47	5:31:30	5,63
1:48:30	4,53	3:40:00	4,92	5:31:40	5,62
1:48:40	4,42	3:40:10	4,84	5:31:50	5,64
1:48:50	4,44	3:40:20	4,63	5:32:00	5,66
1:49:00	4,58	3:40:30	4,51	5:32:10	5,73
1:49:10	4,60	3:40:40	4,51	5:32:20	5,84
1:49:20	4,82	3:40:50	4,55	5:32:30	5,97
1:49:30	4,90	3:41:00	4,57	5:32:40	6,05
1:49:40	4,72	3:41:10	4,53	5:32:50	5,95
1:49:50	4,66	3:41:20	4,46	5:33:00	5,72
1:50:00	4,25	3:41:30	4,44	5:33:10	5,63
1:50:10	4,06	3:41:40	4,53	5:33:20	5,59
1:50:20	4,14	3:41:50	4,57	5:33:30	5,61
1:50:30	4,23	3:42:00	4,62	5:33:40	5,62
1:50:40	4,56	3:42:10	4,6	5:33:50	5,66
1:50:50	4,95	3:42:20	4,58	5:34:00	5,74
1:51:00	5,01	3:42:30	4,57	5:34:10	5,8
1:51:10	4,49	3:42:40	4,6	5:34:20	5,78
1:51:20	4,52	3:42:50	4,65	5:34:30	5,73

Tablica 3.8. Rezultati vremenskog određivanja KPK vrijednosti u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora.

Vrijeme (h)	KPK (mg O_2/L)			
	I mjerenje	II mjerenje	III mjerenje	Srednja vrijednost
0	2500	2500	2450	2483
2	1650	1645	1635	1643
4	750	730	755	745
5,5	345	350	330	342

4. RASPRAVA

4.1. Analiza karakteristika aktivnog mulja

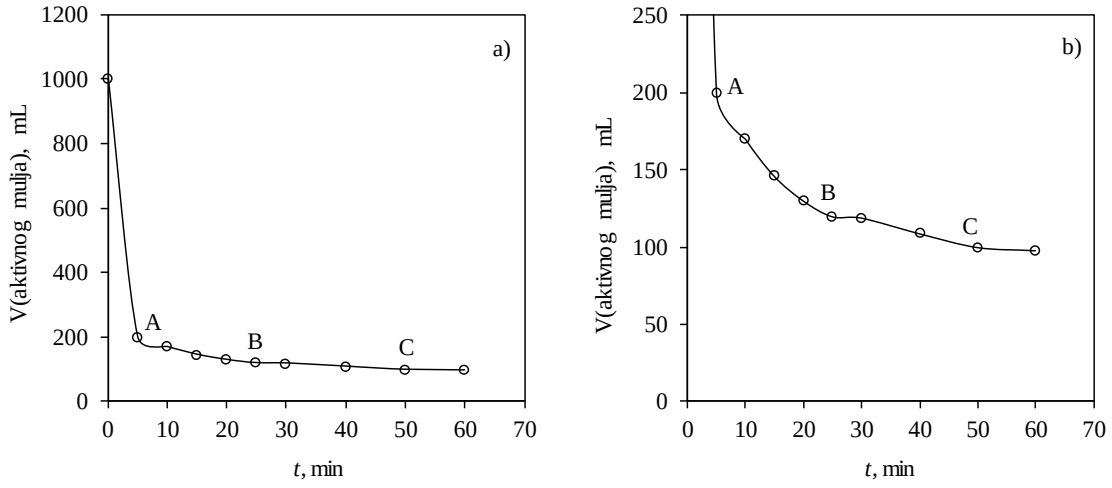
Aktivni mulj je karakteriziran određivanjem sedimentacijskog testa i mikroskopskom analizom.

4.1.1. Analiza sedimentacijskog testa

Taloženje je važan proces u uređajima za pročišćavanje otpadnih voda. U ovom radu se sagledava taloženje aktivnog mulja u SBR kao faze bistrenja prije ispuštanja u prijamnik.

Parametar indeks taloživosti mulja, SVI (*engl*. Sludge Volume Index) provodi se u vremenu od 30 minuta u graduiranoj posudi od 1 L. Pokazatelj je opće taloživosti mulja budući da volumen uzorka mulja nakon 30 minuta taloženja ovisi o njegovom ometanom taloženju i kompresijskom taloženju, na koje djeluje niz čimbenika kao što su mikrobiološki sastav aktivnog mulja, veličina flokula, površinska svojstva itd.

Detaljniji podaci o taloženju aktivnog mulja mogu se dobiti iz krivulje šaržnog taloženja koja omogućava ispitivanje taloženja mulja u različitim vremenima taloženja. Budući da je svaki proces taloženja jedinstven, potrebno je provesti sedimentacijski test taloženja. Izmjerene visine dodirne površine suspenzija-tekućina, odnosno visine aktivnog mulja u različitim vremenima taloženja prikazane u tablici 3.1., grafički su prikazane na slici 4.1.



Slika 4.1. Krivulja sedimentacijskog taloženja aktivnog mulja: a) cijela krivulja taloženja i b) uvećani segment krivulje taloženja.

Neposredno nakon početka eksperimenta, formiraju se četiri područja taloženja: supernatant (bistra otopina) te područja u kojima se odvija zonsko, prijelazno i kompresijsko taloženje.

Na početku taloženja, mulj se taloži relativno brzo, za 5 minuta mulj zauzima volumen 200 mL, odnosno dodirna površina suspenzija-tekućina je u području stacionarnog rasta, do točke A (slika 4.1. a).

Potom započinje područje ometanog taloženja, odnosno područje zonskog taloženja koje počinje u točki (A) i završava u točki (B), a karakterizira ga jasan linearni pad krivulje (slika 4.1. b).

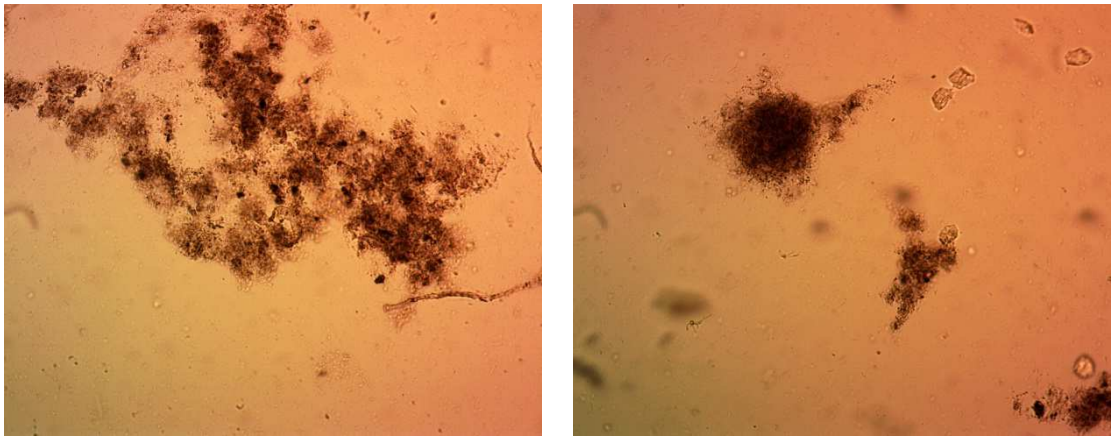
Područje tranzicije počinje u točki (B), a završava u točki (C). Unutar ovog područja sloj ima konstantnu debljinu koju formiraju čestice koje dolaze iz sloja ometanog taloženja koji se smanjuje i čestica koje dolaze iz kompresijskog sloja koji se povećava. Brzina taloženja se smanjuje budući da se gradijent koncentracije povećava s dubinom.

Područje kompresije počinje u točki kompresije (C) pri čemu dolazi do zbijanja čestica čime se stvara sve veći gradijent koncentracije kao i opadajuća brzina taloženja.

Temeljem analize sedimentacijskog testa uočava se da se za 5 minuta glavnina mulja istaloži, a za 30 min gotovo potpuno što ukazuje da analizirani aktivni mulj ima dobra taložna svojstva.

4.1.2. Analiza mikroskopskih karakteristika aktivnog mulja

Mikroskopska analiza aktivnog mulja prikazana je na slici 4.2. a i b.



(a) (b)

Slika 4.2. Mikroskopska analiza aktivnog mulja: (a) nakupine flokula i (b) jedna flokula.

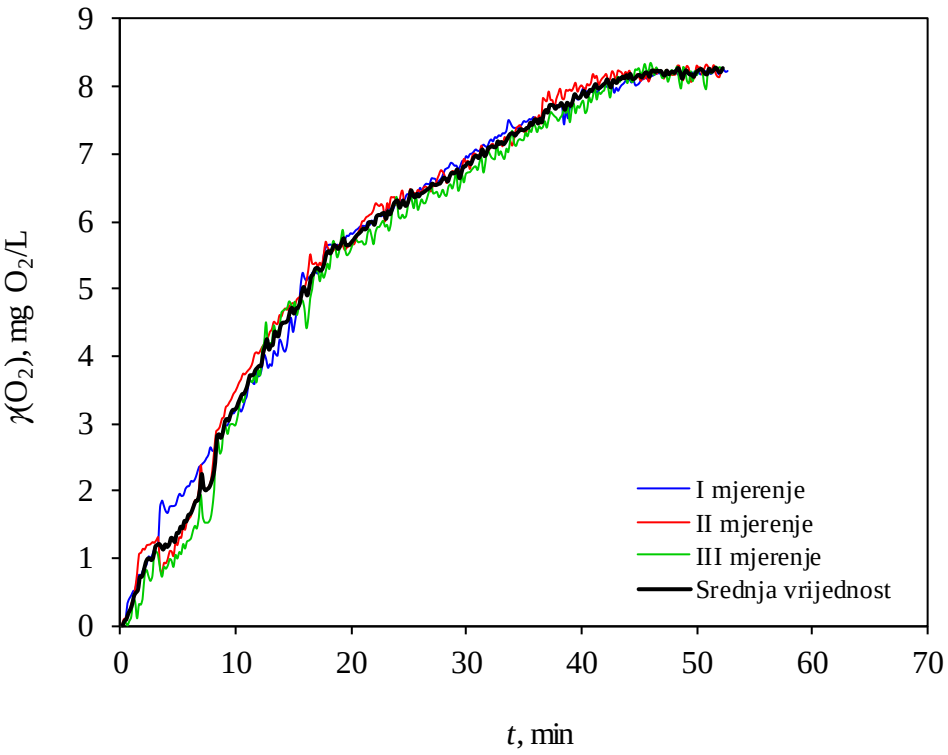
Mikroskopskom analizom aktivnog mulja uočavaju se flokule pravilnog, kuglastog oblika. Pravilan oblik flokula preduvjet je za brzu sedimentaciju flokula aktivnog mulja, budući da je brzina sedimentacija flokula obilježje dobre kakvoće izlazne vode iz biološkog uređaja za pročišćavanje otpadne vode. Mikroskopiranjem pri uvećanju od 120 puta nije bilo moguće determinirati vrste mikroorganizama jer se ne uočava filamentozni mulj već samo flokule aktivnog mulja. Budući da je struktura flokula kuglasta, ovaj oblik flokula aktivnog mulja sačinjavaju nitaste i štapićaste bakterije.

4.2. Učinkovitost oksigenacije supstrata

Istraživanje učinkovitosti oksigenacije supstrata provedeno je u tri faze. Svaka faza se sastojala od određivanja količine kisika otopljenog u vodovodnoj vodi (faza 1), komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora (faza 2) te komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem s jednim difuzorom (faza 3).

4.2.1. Koncentracija otopljenog kisika u vodovodnoj vodi - faza 1

Rezultati prikazani u tablici 3.3. grafički su prikazani na slici 4.3. kao ovisnost koncentracije otopljenog kisika o vremenu oksigenacije vodovodne vode zrakom primjenom difuzora za tri provedena mjerenja te izračunatu srednju vrijednost.



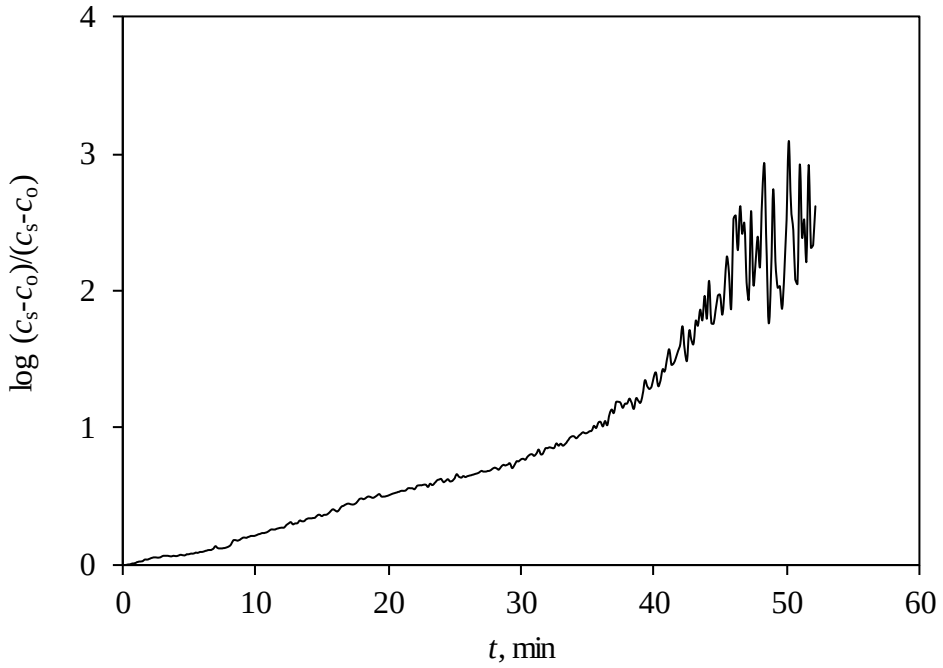
Slika 4.3. Krivulja zasićenja vodovodne vode kisikom iz zraka.

Tijekom biološke obrade otpadnih voda, koncentracija kisika u reaktoru trebala bi biti oko 4 mg/L, a minimalna razina kisika ne bi trebala biti ispod 2 mg/L jer će proces razgradnje kinetički gledano biti spor. Tijekom procesa oksigenacije, prethodno deoksigenirane vodovodne vode primjenom difuzora topljivost kisika kontinuirano raste do uspostave platoa, kada se topljivost kisika s vremenom ne mijenja što ukazuje da je ispitivani uzorak zasićen kisikom, odnosno postigla se maksimalna topljivost kisika u vodi.

Prema preporuci, minimalna razina kisika od 2 mg/L postiže se za 7 minuta, dok se preporučena razina koncentracije otopljenog kisika u iznosu od 4 mg/L postiže nakon 12,33 minute. Koncentracija kisika u reaktoru se stabilizirala nakon 48 minuta (s malim fluktuacijama) i kreće se u rasponu 8,20 < C_s < 8,26. Dobiveni rezultat odgovara maksimalnoj topljivosti kisika u deoksigeniranoj vodovodnoj vodi u uvjetima provedbe eksperimenta prema tablici 1.2. (C_s= 8,25 mg/L pri 25 °C.).

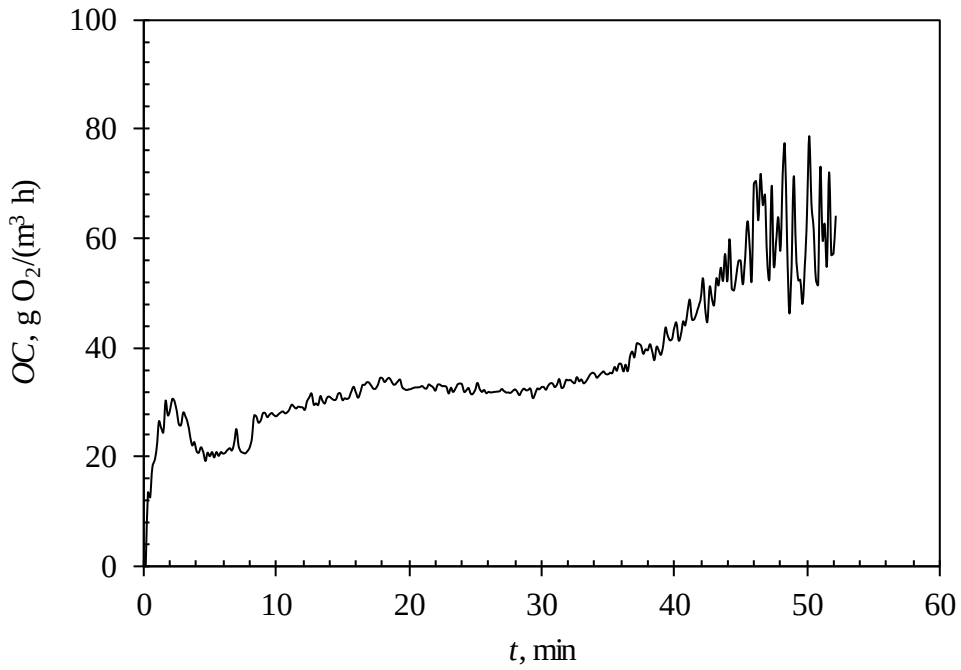
4.2.1.1. Analiza rezultata kapaciteta oksigenacije

Kapacitet oksigenacije simuliranog SBR-a određuje se u vodovodnoj vodi. Grafički prikaz odnosa logaritamske vrijednosti omjera razlike koncentracije kisika u vodi i vremenu u polulogaritamskom sustavu omogućuje određivanje ravne linije čiji kut nagiba (tgα) određuje brzinu oksigenacije pri temperaturi pri kojoj je provedena oksigenacija, k_r (slika 4.4.).



Slika 4.4. Određivanje brzine oksigenacije vodovodne vode kisikom iz zraka primjenom difuzora grafičkom metodom.

Vrijednosti kapaciteta oksigenacije, *OC* izračunate su prema jednadžbi (1-3) i prikazane su na slici 4.5. kao ovisnost *OC* o vremenu oksigenacije.

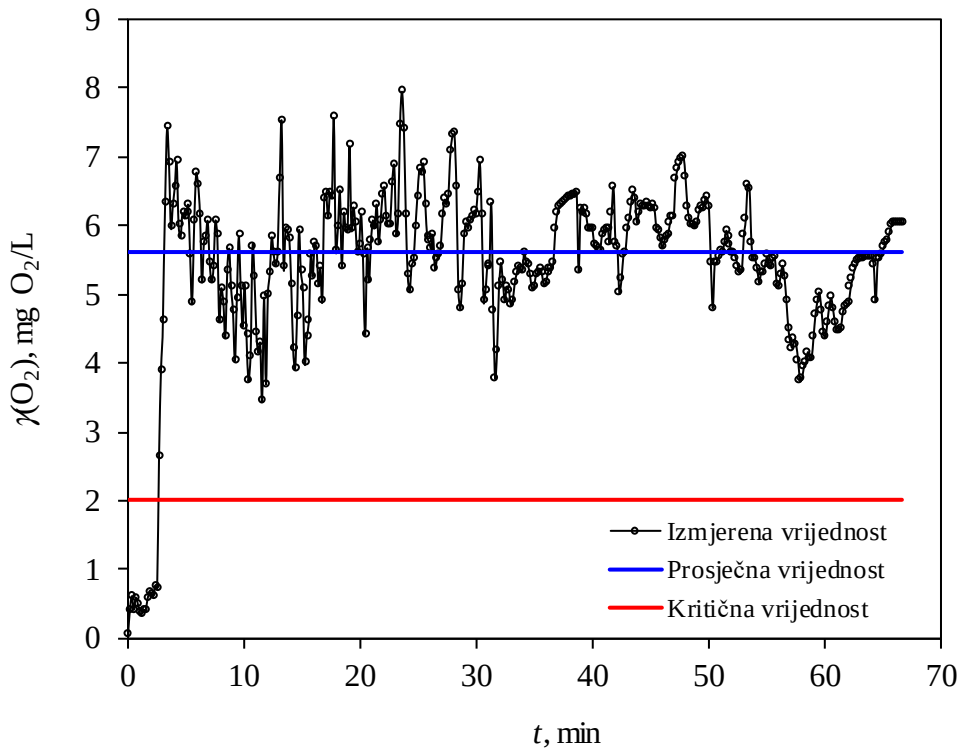


Slika 4.5. Kapacitet oksigenacije SBR u ovisnosti o vremenu oksigenacije.

Sa slike 4.5. se uočava da uz konstantan protok zraka, kapacitet oksigenacije, odnosno kapacitet prijenosa kisika u vodenu fazu naglo raste u prve tri minute pri čemu se postiže vrijednost *OC* u iznosu od ≈ 30 g $O_2/(m^3 \cdot h)$. Nakon toga vrijednosti *OC* fluktuiraju i neznačajno se mijenjaju do 40 minuta trajanja oksigenacije unutar raspona $30 < OC < 40$. Nakon 40 minuta oksigenacije dolazi do porasta te ustaljenja *OC* vrijednosti s fluktuacijama do kraja procesa pri čemu se postiže prosječna vrijednost OC u iznosu ≈ 60 g $O_2/(m^3 \cdot h)$.

4.2.2. Koncentracija otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć dva difuzora - faza 2

Rezultati prikazani u tablici 3.5. grafički su prikazani na slici 4.6. kao ovisnosti koncentracije otopljenog kisika o vremenu oksigenacije komunalne otpadne vode zrakom primjenom dva difuzora.

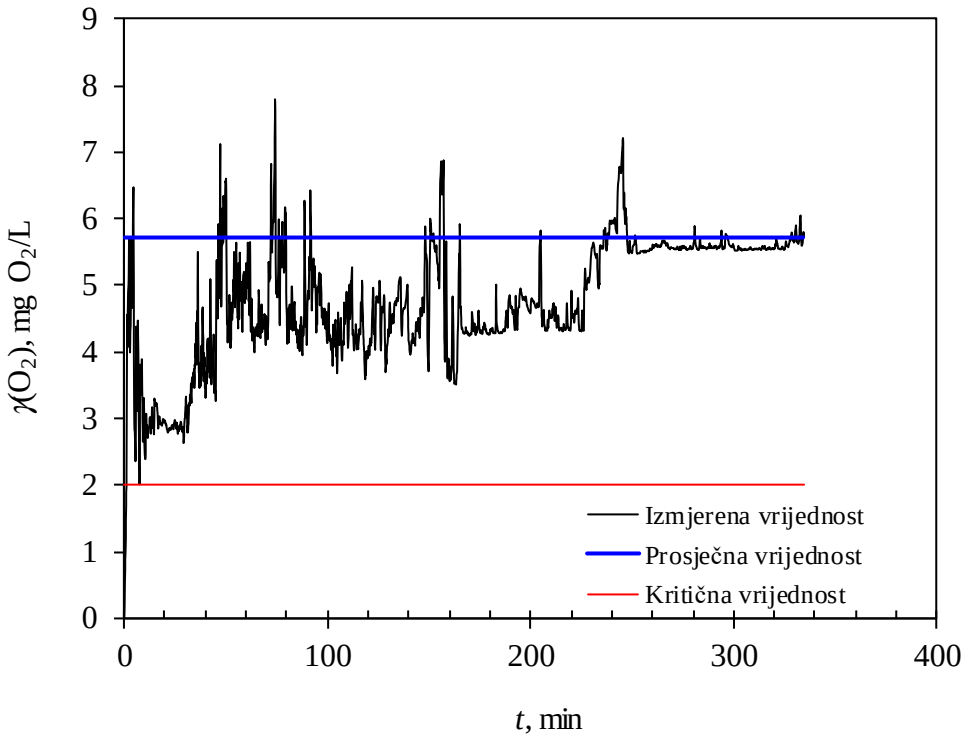


Slika 4.6. Koncentracija otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem primjenom dva difuzora u ovisnosti o vremenu oksigenacije.

Tijekom biološke obrade otpadne vode s aktivnim muljem, aeracijom uz pomoć dva difuzora minimalna razina koncentracije otopljenog kisika od 2 mg/L postiže se već nakon 2,83 minute. Nakon toga, koncentracije otopljenog kisika pokazuju fluktuirane vrijednosti i to od minimalne vrijednosti 2,65 mg/L do maksimalne vrijednosti 7,96 mg/L. Prosječna vrijednost koncentracije otopljenog kisika u cijelom ispitivanom području ima vrijednost 5,63 mg/L. Ova vrijednost ukazuje da je prosječna izračunata vrijednost koncentracije otopljenog kisika tijekom biološke obrade otpadne vode s aktivnim muljem oksigenacijom s dva difuzora iznad preporučene vrijednosti od 4 mg/L.

4.2.3. Koncentracija otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem uz pomoć jednog difuzora - faza 3

Rezultati prikazani u tablici 3.7. prikazani su na slici 4.7. kao ovisnost koncentracije otopljenog kisika o vremenu oksigenacije komunalne otpadne vode zrakom primjenom jednog difuzora.

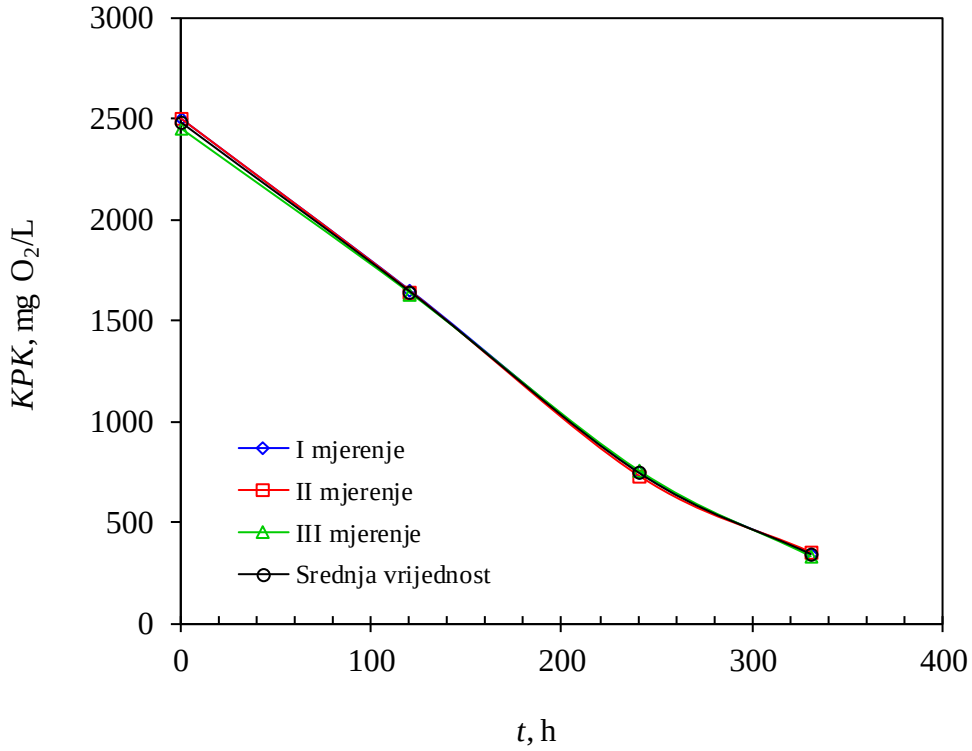


Slika 4.7. Koncentracija otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem primjenom jednog difuzora u ovisnosti o vremenu oksigenacije.

Minimalna koncentracija kisika od 2 mg/L potrebna za procese pročišćavanja tijekom biološke obrade otpadne vode s aktivnim muljem oksigenacijom primjenom jednog difuzora postignuta je već nakon 1,33 minute. Nakon toga, koncentracija otopljenog kisika pokazuje sukcesivne fluktuirane vrijednosti i to od minimalne vrijednosti od 2,80 mg/L do maksimalne vrijednosti 7,79 mg/L što ukazuje da razina kisika u otpadnoj vodi nije pala ispod kritične vrijednosti. Prosječna vrijednost koncentracije otopljenog kisika u cijelom ispitivanom području iznosi 5,73 mg/L što je iznad preporučene vrijednosti od 4 mg/L.

U simuliranom SBR oksigeniranom zrakom primjenom jednog difuzora, koncentracija kisika se polako povećava, a tek nakon 250 minuta koncentracija otopljenog kisika se stabilizira na vrijednost oko 5,5 mg/L. Fluktuacije vrijednosti mogu nastati uslijed brze cirkulacije otpadne vode uzrokovane disk difuzorom. Fluktuirajuće promjene koncentracije kisika rezultat su i snažne aktivnosti mikroorganizama i značajnog opterećenja otpadne vode nečistoćama, s početnom srednjom KPK vrijednosti od 2483 mg O_2/L.

Vremenska promjena KPK vrijednosti tijekom oksigenacije komunalne otpadne vode s aktivnim muljem primjenom jednog difuzora prikazane su na slici 4.8.



Slika 4.8. Krivulja kemijske potrošnje kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s jednim difuzorom.

U odabranim vremenskim intervalima napravljena su tri određivanja KPK te je izračunata srednja vrijednost. Početna vrijednost KPK prije uključenja difuzora iznosila je 2483 mg O_2/L. Nakon 2 sata oksigenacije primjenom jednog difuzora, KPK se smanjio na vrijednost 1643 mg O_2/L (33,83%), nakon 4 sata na vrijednost 745 mg O_2/L (70%) te nakon 5 sati na vrijednost 342 mg O_2/L (86,23%). Iz priloženih rezultata vidljivo je da postupkom oksigenacije otpadne vode uz pomoć difuzora primjenom mikro i finih mjehurića dolazi do značajnog smanjenja KPK.

4.3. Analiza rezultata učinkovitosti oksigenacije supstrata i potrošnje električne energije

Oksigenacijom prethodno deoksigenirane vode kritična razina koncentracije kisika od 2 mg/L postignuta je za 2 minute, a koncentracija od 4 mg/L nakon 12,33 minuta, dok je maksimalna vrijednost od 8,2 mg/L postignuta nakon 48 minuta. Ovi rezultati su ukazali koliko je vremena potrebno za postizanje kritične, optimalne i maksimalne razine koncentracije otopljenog kisika u vodovodnoj vodi gdje se kisik ne troši na biološke procese razgradnje i u kojoj prethodno nije bilo otopljenog kisika.

Oksigenacija komunalne otpadne vode s aktivnim muljem primjenom jednog i dva difuzora pokazuje slično ponašanje, pri čemu je u oba slučaja prosječna razina otopljenog kisika iznad 4 mg/L (5,63 mg/L primjenom dva i 5,73 mg/L primjenom jednog difuzora). To ukazuje da je razina koncentracije otopljenog kisika dovoljna za provedbu biološke obrade komunalne otpadne vode. Razlog sličnog ponašanja je isti protok zraka iz pumpe, zbog čega je protok zraka ograničavajući faktor, a ne količina mjehurića. Također, prosječna vrijednost koncentracija otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi s aktivnim muljem je manja od maksimalno otopljene koncentracije kisika u vodovodnoj vodi kao posljedica biološke razgradnje biološki razgradljivih organskih tvari.

Izmjerene vrijednosti električne provodnosti (tablice 3.2., 3.4. i 3.6.) u vodovodnoj vodi su veće nego u komunalnoj otpadnoj vodi zbog dodatka soli, Na_2SO_3, kao sredstva za deoksigenaciju.

Budući da je učinkovitost smanjenja KPK vrijednosti komunalne otpadne vode u iznosu od 86,53% postignuta za vrijeme trajanja procesa od 5,5 sati, važno je sagledati potrošnju električne energije u odnosu na postignutu učinkovitost.

Potrošnja električne energije tijekom nekog razdoblja mjeri se u kilovatsatima (kWh). Dakle, 1 kWh je ekvivalent za održavanje potrošnje energije 1000 W tijekom jednog sata. Potrošnja električne energije može se izračunati primjenom slijedeće jednadžbe:

$$E = P \cdot t \tag{4-1}$$

gdje je:

E – potrošnja električne energije, kWh

P – snaga uređaja, W

t – vrijeme, h

Za provedbu biološke razgradnje komunalne otpadne vode s aktivnim muljem oksigenacijom primjenom jednog difuzora, koristila se pumpa snage 90 W tijekom 5,5 sati pri čemu je dobivena učinkovitost smanjenja KPK u iznosu od 86,53%.

Stoga je,

$$E = 90\ \text{W} \cdot 5{,}5\ \text{h}$$

$$E = 495\ \text{Wh}$$

$$E = 0{,}495\ \text{kWh}$$

Dakle, potrošeno je 0,495 kWh električne energije.

Da bismo lakše usporedili potrošnju električne energije pumpe, u tablici 4.1. prikazana je potrošnja električne energije nekih odabranih električnih uređaja za isto vrijeme potrošnje električne energije, od 5,5 sati.

Tablica 4.1. Prikaz potrošnje električne energije nekih odabranih električnih uređaja.

Uređaj	Snaga, kW	Vrijeme korištenja, h	Ukupna utrošena električna energija, kW
Štednjak	1,5	5,5	8,25
Žarulja	0,06	5,5	0,33
Pećnica	2,4	5,5	13,20
Mikrovalna pećnica	1,3	5,5	7,15
Hladnjak	0,7	5,5	3,85
Perilica za rublje	3	5,5	16,50
Perilica za suđe	3	5,5	16,50
Televizor	0,01	5,5	0,06

Uočava se da pumpa koja se koristila za aerobnu biološku obradu spada u skupinu uređaja koji imaju manju potrošnju električne energije u odnosu na potrošnju klasičnih

kućanskih uređaja što ukazuje na moguću primjenjivost korištenja difuzora u obradi komunalne otpadne vode. U konačnici, novčani iznos potrošnje električne energije jednak je umnošku cijene koštanja 1 kWh i potrošene električne energije izražene u kWh.

5. ZAKLJUČAK

Svrha rada bila je ispitati mogućnost provedbe biološke obrade komunalne otpadne vode s aktivnim muljem oksigenacijom primjenom difuzora.

- Oksigenacijom prethodno deoksigenirane vode postignuta je kritična, optimalna i maksimalna razina koncentracije otopljenog kisika za 2 minute, 12,33 minute i 48 minuta.
- Kapacitet oksigenacije simuliranog SBR iznosi 60 g $O_2/(m^3 \cdot h)$.
- Prosječna vrijednost koncentracija otopljenog kisika u komunalnoj otpadnoj vodi oksigenacijom s jednim ili dva difuzora je slična.
- Oksigenacija komunalne otpadne vode s aktivnim muljem primjenom jednog i dva difuzora može se koristiti za biološku obradu.
- Učinkovitost biološke obrade sagledana preko KPK pokazatelja iznosi 86,53%.
- Oksigenacija komunalne otpadne vode s aktivnim muljem primjenom pumpe od 90 W ukazala je na malu potrošnju električne energije te na moguću primjenjivost u biološkoj obradi komunalnih otpadnih voda.

6. LITERATURA

1. *J. Pluta*, Porównanie efektywności natleniania ścieków przy zastosowaniu aeracji drobnopęcherzykowej dla powietrza oraz czystego tlenu, Projekt inżynierski, Akademia Górniczo – Hutnicza, Krakow, 2018.

2. *K. Terasaka, A. Hirabayashi, T. Nishino, S. Fujioka, D. Kobayashi,* Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge, Chem. Eng. Sci. **66** (2011) 3172–3179.

3. *D. Adanić*, Industrijske otpadne vode, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu Odjel Sigurnosti i zaštite, Stručni studij sigurnosti i zaštite, Karlovac, 2016.

4. Tehnička enciklopedija, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1963., svezak 10, str 64-90.

5. *S. Tedeschi*, Zaštita voda, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb, 1997, str. 113-114.

6. *T. Jovanović,* Uklanjanje amonijakalnog dušika iz procijednih voda odlagališta otpada fizikalno kemijskim postupkom, Diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016.

7. URL: https://www.engineeringexcelspreadsheets.com/2013/03/sequencing-batch-reactor-design-calculation/ (25.3.2020.).

8. *F. Briški*, Zaštita okoliša, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016., str. 87-88.

9. *J. Perić, N. Vukojević Medvidović,* Inženjerstvo otpadnih voda, nastavni materijal za predavanja i seminar, Kemijsko - tehnološki fakultet, Split, 2015 (interna skripta).

10. *B. Duić,* Usporedba sustava za aeraciju u obradi otpadnih voda, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu Prehrambeno-biotehnološki fakultet, 2016.

11. URL: https://hydriawater.se/wp-content/uploads/15-0020_VAT_Luftare_ENG_150605_webb-1.pdf (25.3.2020.).

12. *S. Khuntia, S. Kumar Majumder, P. Ghosh*, Microbubble-aided water and wastewater purification: a review, Rev. Chem. Eng. **28** (4-6) (2012) 191–221.

13. *A. Piasecki*, Water and Sewage Management Issues in Rural Poland, Water **11** (2019) 625-641.

14. *Stanisław Krzanowski, Andrzej Wałęga*, New technologies of small domestic sewage volume treatment applied in Poland, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, Nr. 3/2007, str. 69–78 Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi.

15. URL:https://www.villagewaters.eu/s2/760_65_28_Individual_wastewater_treatment_systemsJuchersk.pdf?v=17231755 (25.3.2020.).