

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikka

Jenna Finnilä

**MEMBRAANIBIOREAKTORIN SUODATUSKAPASITEETTIIN VAIKUTTAVAT
TEKIJÄT**

Tarkastajat: Dosentti, TkT Mari Kallioinen
Professori Mika Mänttari

Ohjaajat: Ilari Lignell
Dosentti, TkT Mari Kallioinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto (LUT)
LUT School of Engineering Science
Kemiantekniikka

Jenna Finnilä

Membraanibioreaktorin suodatuskapasiteettiin vaikuttavat tekijät

Diplomityö

2020

109 sivua, 36 kuvaa, 11 taulukkoa ja 9 liitettä

Tarkastajat: Dosentti, TkT Mari Kallioinen
Professori Mika Mänttari

Hakusanat: Jätevedenpuhdistus, membraanibioreaktori, suodatuskapasiteetti
Keywords: Wastewater treatment, membrane bioreactor, filtration capacity

Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamon käsittelyprosessi saneerattiin MBR-prosessiksi vuonna 2018. Puoli vuotta laitoksen käyttöönoton jälkeen siellä alkoi ilmetä suodatuskapasiteetin heikkenemistä. Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää syitä siihen sekä etsiä mahdollisia toimenpiteitä suodatuskapasiteetin palauttamiseksi ja ylläpitämiseksi jatkossa.

Työn kirjallisuusosassa esiteltiin yleisesti MBR-prosessien toimintaa, kartoitettiin membraanibioreaktorin suodatuskapasiteettiin vaikuttavia tekijöitä sekä etsittiin mahdollisia toimenpiteitä ja menetelmiä suodatuskapasiteetin palauttamiseksi ja ylläpitämiseksi. Lisäksi esiteltiin Viitasaaren Mustasuon laitoksen jätevedenpuhdistusprosessin toimintaa.

Kokeellisessa osassa etsittiin syitä suodatuskapasiteetin heikkenemiseen laboratorioskokeiden avulla. Tutkimusten keskiössä oli käytettyjen kalvojen toimivuus suodatuksessa sekä lietteiden suodatettavuus. Viitasaaren MBR:n lietteen suodatettavuutta verrattiin Mikkelin ja Parikkalan MBR-prosessien lietteiden suodatettavuuksiin ja havaittiin, että niissä oli huomattavia eroja. Eroja selittäviä tekijöitä etsittiin mikroskoipoimalla lietteitä sekä tutkimalla lietteiden kirkasteita.

Kokeiden perusteella Viitasaaren lietteen suodatettavuus oli heikkoa. Viitasaaren lietteestä löytyi verkkomaista ja kuitumaista materiaalia, mikä saattaisi olla osasy syy lietteen heikkoon suodatettavuuteen. Lisäksi laitoksen kuormituksesta iso osa on peräisin sakokaivolietteilistä, joiden voidaan epäillä heikentävän lietteen suodatettavuutta. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa tulisi tutkia keinoja lietteen suodatettavuuden parantamiseksi.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology (LUT)
LUT School of Engineering Science
Degree Programme of Chemical Engineering

Jenna Finnilä

Factors influencing the filtration capacity of membrane bioreactor

Master's thesis

2020

109 pages, 36 figures, 11 tables ja 9 appendices

Examiners: Docent, Dr.Tech. Mari Kallioinen
Professor Mika Mänttari

Keywords: Wastewater treatment, membrane bioreactor, filtration capacity

Wastewater treatment process in Viitasaari Mustasuo plant was rebuilt into an MBR process in 2018. Six months after the plant was commissioned, its capacity began to decline. The purpose of this thesis was to investigate the causes of the decline and examine possible operations to restore and maintain the capacity.

In the literature part of this thesis the operation of MBR processes was introduced, the factors affecting the filtration capacity of membrane bioreactor were surveyed and possible operations and methods to restore and maintain the filtration capacity were examined. In addition, the wastewater treatment process in Viitasaari Mustasuo plant was introduced.

The experimental part of the thesis sought causes of the filtration capacity reduction through laboratory experiments. The focus of the studies was on the functionality of the used membranes in filtration and on the filterability of the sludges. The sludge filterability of the Viitasaari MBR was compared with the sludge filterability of the Mikkeli and Parikkala MBR processes and it was noticed that there were significant differences. Factors explaining the differences were searched by examining microscopically the sludges and by inspecting the liquid part of the sludges.

The filterability of the Viitasaaris sludge was poor based on the experiments. The sludge contained webbed and fibrous material, which could be a partial reason for the sludge's poor filterability. In addition, a large part of the load at the Viitasaari plant comes from septage, which can be suspected of impairing the sludge's filterability. Possible further studies should explore ways to improve sludge filterability.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Operon Group Oy:lle syksyn 2019 ja kevään 2020 välisenä aikana. Haluan kiittää yritystä mahdollisuudesta tehdä diplomityö heille sekä hyvin ajankohtaisesta ja käytännönläheisestä aiheesta. Haluan kiittää kaikkia yrityksen työntekijöitä, jotka olivat apuna tässä työssä. Etenkin Haapaveden porukkaa työn alulle saattamisesta sekä erityisesti ohjaajaani Ilari Lignelliä. Häneltä sain paljon apua, vinkkejä ja ideoita työn tekemiseen.

Lisäksi haluaisin kiittää Viitasaaren, Mikkelin ja Parikkalan jätevedenpuhdistamoiden työntekijöitä auttamisesta näytteiden keräilyssä laboratoriokokeita varten. Viitasaaren porukalle lisäksi erityiskiitos auttamisesta prosessikuvauksen kanssa.

LUT yliopiston puolelta kiitän ohjaajaani Mari Kallioista ohjauksesta ja hyvistä huomioista työhön liittyen sekä mahdollisuudesta tehdä laboratoriokokeita koulun laitteilla. Lisäksi kiitän kaikkia, jotka auttoivat minua laitteiden käytössä ja kokeiden toteutuksessa. Mari Kallioisen lisäksi kiitän myös Mika Mänttäriä työni tarkastamisesta.

Haluan kiittää myös ystäviäni ja perhettäni, jotka auttoivat minua ja jaksoivat kuunnella murheitani työhön liittyen sekä kannustivat minua eteenpäin vastoinkäymisistä huolimatta.

Haapajärvellä, 25.5.2020



SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	7
1 JOHDANTO.....	9
KIRJALLISUUSOSA.....	10
2 MEMBRAANIBIOREAKTORIT.....	10
2.1 Membraanibioreaktorin esittely.....	10
2.2 Kalvot.....	14
2.3 Prosessiparametrit.....	17
2.4 Laitokset Suomessa.....	18
3 SUODATUSKAPASITEETTIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	20
3.1 Kalvojen likaantuminen.....	21
3.1.1 Kalvojen ominaisuudet.....	21
3.1.2 Kalvojen likaantumismekanismit.....	22
3.1.3 Tyypilliset epäpuhtaudet.....	24
3.2 Lietteen laatu.....	26
3.2.1 Prosessiparametrien vaikutus.....	26
3.2.2 Jäteveden ja lietteen ominaisuudet.....	28
3.2.3 Mikrobiologian vaikutus.....	31
3.3 Vaahoaminen.....	35
3.4 Saostuskemikaalien vaikutus.....	36
4. SUODATUSKAPASITEETIN PALAUTUS JA YLLÄPITO.....	37
4.1 Kalvojen puhdistaminen.....	37
4.1.1 Menetelmät.....	37
4.1.2 Käytettävät kemikaalit.....	40
4.1.3 Kalvojen likaantumisen kontrollointi.....	42
4.2 Lietteen kunnostus.....	43
4.3 Ilmastuksen optimoiminen.....	45
4.4 Vaahoamisen estäminen.....	46
4.5 Saostuskemikaalien syöttöpaikka.....	47
5 VIITASAAREN MUSTASUON JÄTEVEDENPUHDISTAMO.....	48
5.1 Prosessi.....	49
5.2 Kalvosuodatus.....	53
5.2.1 Kalvojen puhdistaminen.....	54
5.2.2 Kalvojen tilanne laitoksella työn alkaessa.....	56
5.2.3 Tehdyt toimenpiteet laitoksella.....	57
KOKEELLINEN OSA.....	58
6 KOKEELLISEN OSAN TARKOITUS.....	58
7 MATERIAALIT JA MENETELMÄT.....	58

7.1	Kokeissa käytetyt näytteet	59
7.2	Kokeissa käytetyt kalvot.....	60
7.3	Suodatuskokeet.....	62
7.3.1	Suodatuskokeet käytetyille kalvoille.....	64
7.3.2	Veden ja permeaatin vertailu kalvojen puhdistuksessa.....	64
7.3.3	Suodatuskokeet lietteille	65
7.3.4	Suodatuskokeet kirkasteille.....	66
7.3.5	”Pestyn” lietteen suodatus.....	67
7.3.6	Suodatuskokeet aktiivihillen kanssa	67
7.4	Mikroskopointi	68
7.5	Partikkelikokoanalyysi	69
7.6	Sameus.....	69
7.7	Kemikaalitestaukset sameuden vähentämiseksi	70
7.8	Tulosten käsittely.....	71
8	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	73
8.1	Suodatuskokeet käytetyille kalvoille	73
8.2	Veden ja permeaatin vertailu kalvojen puhdistuksessa	74
8.3	Suodatuskokeet lietteille.....	76
8.4	Lietteiden mikroskopointi.....	80
8.4.1	Viitasaaren liete	80
8.4.2	Mikkelin liete.....	83
8.4.3	Parikkalan liete.....	85
8.4.4	Lietteiden vertailu	87
8.5	Suodatuskokeet kirkasteille	88
8.6	”Pestyn” lietteen suodatus	90
8.7	Kemikaalitestaukset sameuden vähentämiseksi	91
8.8	Kirkasteiden sameus ja partikkelikokoanalyysi.....	93
8.9	Suodatuskokeet aktiivihillen kanssa	98
9	TOIMENPITEET LAITOKSELLA	100
10	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	101
	LÄHTEET	104
	LIITTEET	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

<i>A</i>	Kalvon pinta-ala [m ²]
<i>J</i>	Vuo [l/m ² h]
<i>L</i>	Permeabiliteetti [l/m ² hbar]
<i>p</i>	Paine [bar]
<i>q</i>	Permeaattivirtaama [l/h]
<i>v</i>	Veden kinemaattinen viskositeetti [m ² /s]

Lyhenteet

AOX	Adsorboituvat orgaaniset halogeeniyhdisteet
BOD	Biologinen hapenkulutus
BPC	Biopolymeeriryhmittymä (biopolymer clusters)
CAGR	Keskimääräinen vuosittainen kasvunopeus (compound annual growth rate)
CAS	Perinteinen aktiivilieteprosessi (conventional activated sludge process)
CEB	Puhdistuskemikaalein tehostettu vastavirtahuuhtelu
CIP	Suodattimien ylläpitopesu
COD	Kemiallinen hapenkulutus
DTPA	Dietyleenitriamiinipentaetikkahappo eli pentetihappo
EDTA	Etyleenidiamiinitetraetikkahappo
EPS	Ekstrasellulaariset polymeerit (extracellular polymeric substances)
F/M	Mikro-organismien suhde niiden ravintoon nähden (food to microorganism)
FS	Tasomainen kalvo (flat sheet)
HF	Onttokuitukalvo (hollow fibre)
HRT	Hydraulinen viipymä (hydraulic retention time)
LMH	l/m ² h
MBR	Membraanibioreaktori
MLSS	Lietekonsentraatio (mixed liquor suspended solids)
MLVSS	Lietteen orgaanisen kuiva-aineen pitoisuus
MT	Putkimainen kalvo (multitubular)
NTU	Sameuden yksikkö (nephelometric Turbidity Unit)
PAX	Polyalumiinikloridi

PE	Polyeteeni
PES	Polyeetterisulfony
PIX	Ferrisulfaatti
PP	Polypropeeni
PVDF	Polyvinyylideenifluoridi
QS	Quorum sensing-ilmio
SDS	Natriumlauryylisulfaatti
SMP	Liukoiset mikrobituotteet (soluble microbial products)
SRT	Lieteikä (solid retention time)
STP	Natriumtripolyfosfaatti
SVI	Lieteindeksi (sludge volyme index)
THM	Trihalometaani
TMP	Paine-ero kalvon yli

1 JOHDANTO

MBR-prosessi eli membraanibioreaktoriprosessi yhdistää perinteisen aktiivilieteprosessin kalvosuodatukseen. Perinteisessä aktiivilieteprosessissa kiintoaineen erotus tapahtuu painovoimalla, kun MBR-prosessissa kiintoaine erotetaan kalvosuodatuksella. Suomessa on tällä hetkellä käytössä kolme täyden mittakaavan MBR-prosessia: Viitasaarella, Parikkalassa ja Oulussa. Lisäksi Mikkelin Metsä-Sairilaan on rakenteilla uusi MBR-tekniikkaa hyödyntävä jätevedenpuhdistamo. Valmistuttuaan laitos tulee olemaan Suomen suurin MBR-tekniikkaa hyödyntävä jätevedenpuhdistamo.

Kuten jokaisessa jätevedenpuhdistustekniikassa, myös MBR:ssa on sekä hyviä että huonoja puolia. Membraanibioreaktoreita on käytössä ympäri maailmaa ja merkittävimpana haasteena niissä pidetään kalvojen likaantumisen aiheuttamaa suodatuskapasiteetin heikkenemistä (Iorhemen et al. 2016). Laitoksen suodatuskapasiteetti voi kuitenkin heikentyä myös monesta muusta syystä. Erityisesti lietteen laadulla on merkittävä vaikutus sen suodatettavuuteen. Toisaalta lietteen laadulla on vaikutusta myös kalvojen likaantumiseen. Kalvojen puhdistusmenetelmät ja -kemikaalit tulee optimoida jokaiselle laitokselle erikseen, sillä lietteiden laatu vaihtelee laitoksittain. Tulevan jäteveden koostumuksella on suuri merkitys muun muassa puhdistuskemikaalien valintaan.

Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamon käsittelyprosessi saneerattiin MBR-prosessiksi vuonna 2018. Noin puolen vuoden jälkeen käyttöönotosta laitoksella alkoi näkyä viitteitä suodatuskapasiteetin hitaasta heikkenemisestä. Laitoksella on tehty erilaisten kalvopesujen lisäksi monenlaisia kokeiluja suodatuskapasiteetin palauttamiseksi, mutta toimenpiteillä ei kuitenkaan ole saatu aikaan haluttua vaikutusta.

Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää, mistä Viitasaaren jätevedenpuhdistamon heikkenevä suodatuskapasiteetti voisi johtua ja etsiä mahdollisia toimenpiteitä sen palauttamiseksi ja ylläpitämiseksi. Työn kirjallisuusosassa kartoitetaan MBR:ien suodatuskapasiteettiin vaikuttavia tekijöitä sekä etsitään toimenpiteitä ja menetelmiä suodatuskapasiteetin palauttamiseksi ja ylläpitämiseksi. Lisäksi kirjallisuusosassa esitellään Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamon prosessin toimintaa. Kokeellisessa osassa etsitään laboratoriokokeiden avulla syitä, mistä laitoksen heikkenevä suodatuskapasiteetti voisi johtua ja testataan toimenpiteitä sen palauttamiseksi.

KIRJALLISUUSOSA

2 MEMBRAANIBIOREAKTORIT

MBR-tekniikka on hyödynnetty ensimmäisen kerran jätevedenpuhdistuksessa jo vuonna 1969 Yhdysvalloissa. Tällöin ultrasuodatuskalvojen avulla eroteltiin aktiiviliete lopullisesta purkuvedestä biologisen jätevedenkäsittelyn yhteydessä. Membraanibioreaktorit alkoivat kuitenkin yleistyä vasta 2000-luvulla ja etenkin Eurooppaan, Yhdysvaltoihin ja Kiinaan rakennettiin useita MBR-tekniikkaa hyödyntäviä jätevedenpuhdistamoita. (Kraume & Drews, 2010) MBR-tekniikka on tämän jälkeen kasvattanut valtavasti suosiota ja sen markkina-arvo on moninkertaistunut. MBR-laitoksia oli vuonna 2016 yli 200 eri maassa ja erilaisissa markkinatutkimuksissa on raportoitu jopa 15 % globaalien markkinoiden kasvunopeuksia. (Judd, 2016) MBR-markkinoiden odotetaan edelleen jatkavan kasvuaan ja arvioidaan, että keskimääräinen vuosittainen kasvunopeus (CAGR = compound annual growth rate) tulisi olemaan yli 15 % vuodesta 2018 vuoteen 2026. (Hai et al. (ed.) 2019)

Tiukentuvat päästörajoitukset ja huomion kiinnittyminen erilaisten haitta-aineiden poistotehokkuuteen lisäävät kiinnostusta MBR-tekniikkaa kohtaan. Perinteisen aktiivilieteprosessin puhdistustehokkuus on rajallinen, sillä sitä ei ole suunniteltu haitta-aineiden, kuten lääkejäämien, hormonien tai mikromuovien poistoon. Näiden poistamiseksi jätevesistä tarvitaan uusia tekniikoita. (Laitinen et al. 2014) MBR-prosessilla saattaisi olla tehostava vaikutus haitta-aineiden poistumiselle, sillä prosessia operoidaan tyypillisesti perinteistä aktiivilieteprosessia korkeammalla lieteiällä, mikä voi edesauttaa hitaasti hajoavien haitta-aineiden poistumista (Arola et al. 2017). Membraanibioreaktorilla puhdistettu jätevesi on kuitenkin tasalaatuisempaa ja siten helpommin jatkokäsiteltävissä kuin perinteisellä aktiivilieteprosessilla puhdistettu jätevesi. Tulevaisuudessa erilaisille haitta-aineille on odotettavissa tarkkailuarvoja ja lupaehtoja, jotka pakottavat puhdistamot tehostamaan puhdistusprosessejaan. (LUT University, 2014)

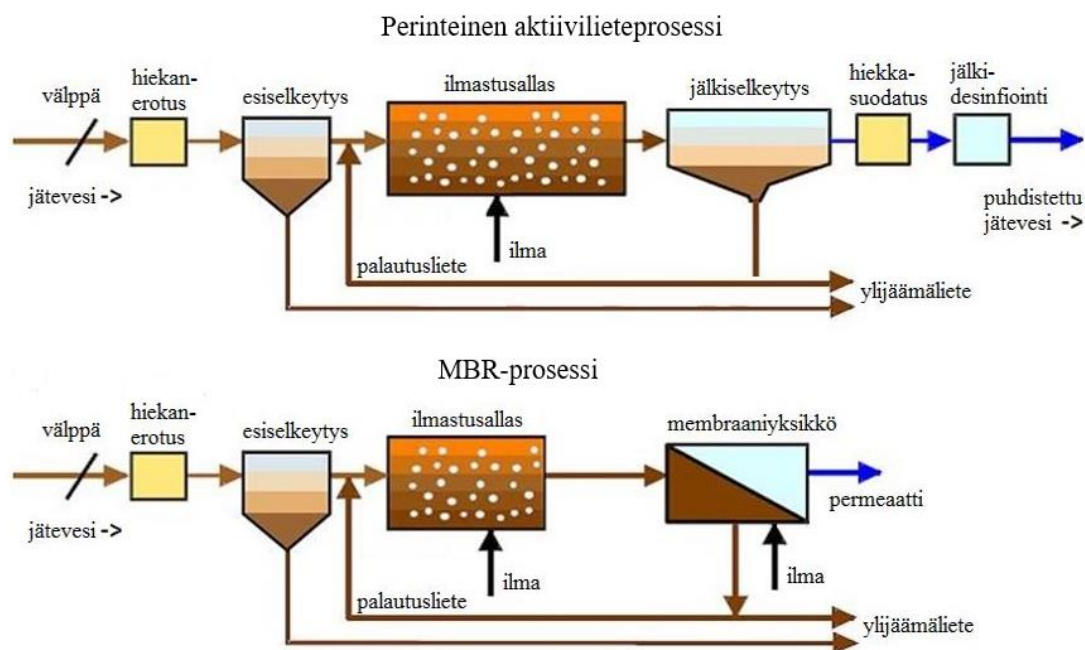
2.1 Membraanibioreaktorin esittely

Membraanibioreaktoreissa yhdistyvät perinteinen aktiivilieteprosessi sekä kalvosuodatus. MBR-prosessissa, kuten myös perinteisessä aktiivilieteprosessissa orgaanisen aineksen sekä

typen poisto tapahtuu biologisesti ja fosfori poistetaan tyypillisesti kemiallisella rinnakkaissaostuksella. Prosessit ovat tämän vuoksi hyvin samankaltaiset ja etenkin esikäsitteilyltään yhtäläiset. Molemmissa prosesseissa jätevesi menee ensin välppäykseen, josta se jatkaa matkaa hiekan- ja rasvanerotukseen. (Ma & Mark, 2017; Risteelä, 2019) Tehokkaalla kiintoaineen erotuksella voidaan minimoida kiintoainekappaleiden aiheuttamaa kalvojen vaurioitumista sekä tukkeutumista, jonka vuoksi kiintoaineen erotusta tehostetaan välppäyksen lisäksi hienovälppäyksellä tai siivilöinnillä MBR-prosesseissa. (Impero & Hammler, 2015) Saostuskemikaalit syötetään prosessiin hiekan- ja rasvanerotuksen jälkeen ja jätevesi jatkaa flokkauksen kautta esiselkeytykseen. (Ma & Mark, 2017; Risteelä, 2019) Pienillä jätevedenpuhdistamoilla ei ole tyypillisesti esiselkeytystä, vaan tällöin jätevesi jatkaa suoraan ilmastusaltaisiin (Laitinen et al. 2014).

Esikäsitteilyn jälkeen jätevesi jatkaa molemmissa prosesseissa ilmastusaltaaseen, jossa tapahtuu jäteveden biologinen käsittely. Tämän jälkeen MBR-prosessissa jätevesi menee kalvoaltaaseen, jossa puhdistettu jätevesi suodatetaan erilleen lietteestä. Kalvon läpi suodatettu puhdistunut jätevesi (permeaatti) voidaan useimmiten purkaa suoraan vesistöön. Perinteisessä aktiivilieteprosessissa jätevesi menee biologisen käsittelyn jälkeen jälkiselkeytykseen. Jälkiselkeytyksestä lähtevä vesi on mahdollista vielä käsitellä esimerkiksi hiekkasuodattamalla sekä desinfiomalla ennen sen purkuun pääsyä. (Ma & Mark, 2017)

MBR-prosessin ja perinteisen aktiivilieteprosessin suurimpana erona on se, miten puhdistettu vesi erotetaan lietteestä. Perinteisessä aktiivilieteprosessissa veden erotus perustuu painovoimaiseen laskeuttamiseen ja MBR-prosessissa suodatukseen. Kuvassa 1 on havainnollistettu perinteisen aktiivilieteprosessin ja MBR-prosessin eroavaisuuksia. MBR-prosessin etuja perinteiseen aktiivilieteprosessiin verrattuna ovat pienempi tilantarve, mahdollisuus suurempiin lietepitoisuuksiin sekä puhdistetun veden parempi laatu, (Luis (ed.) 2018) MBR-prosessit voidaan jakaa kahteen erilaiseen konfiguraatioon kalvojen sijoituspaikan perusteella. Kalvot voidaan sijoittaa aktiivilietealtaaseen tai ne voivat olla erillisessä yksikössä (Radjenović et al. 2007), mikä vaikuttaa prosessin tilantarpeeseen.



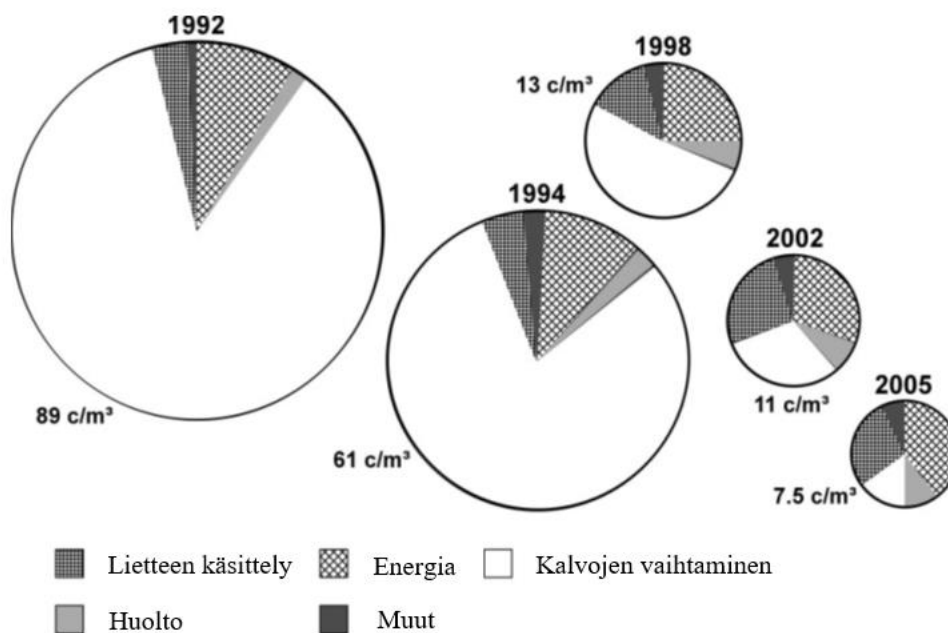
Kuva 1. Perinteisen aktiivilieteprosessin (CAS) ja MBR-prosessin eroavaisuudet. (Muokaten Ma & Mark, 2017)

Pienempi tilantarve selittyy kalvojen kyvylä korvata painovoimaan perustuvat jälkiselkeytysaltaat. MBR-prosessissa puhdistettu vesi erotetaan lietteestä suodattamalla vesi kalvon läpi paine-eron avulla. Biologisessa prosessissa voidaan tämän vuoksi hyödyntää suurempia lietepitoisuuksia, sillä lietteen laskeutuvuus ei enää rajoita lietepitoisuutta. (Ma & Mark, 2017; Hai & Yamamoto, 2011) Pienempi tilantarve mahdollistaa lisäksi tulevaisuudessa laitoksen laajentamisen helposti erityisesti tilanteissa, joissa perinteinen prosessi on saneerattu MBR-prosessiksi. Saneerauksessa ylimääräisiksi jääneitä tiloja voidaan hyödyntää myöhemmin esimerkiksi prosessin kapasiteetin kasvattamiseen (Ma & Mark, 2017) tai tertiääristen käsittelyiden lisäämiseen.

Puhdistetun veden laatu on MBR-tekniikkaa hyödyntävillä laitoksilla parempaa sekä tasalaatuisempaa kuin perinteistä painovoimaista lietteen ja puhdistetun veden erotusta käyttävillä laitoksilla. Membraanibioreaktorissa puhdistettu vesi suodatetaan kalvon läpi, jolloin kalvo erottaa puhdistetusta vedestä kiintoaineen, bakteerit sekä liukoisia yhdisteitä. (Hai & Yamamoto, 2011) Perinteisessä aktiivilieteprosessissa ei ole fyysistä estettä lietteen ja puhdistetun veden välissä, jolloin erotustehokkuus on riippuvainen lietteen laskeutuvuudesta (Radjenović et al. 2007). Heikosti laskeutuvaa ainesta voi päätyä

puhdistetun veden sekaan, mikä heikentää puhdistetun veden laatua. Puhdistetun veden laadun nousu mahdollistaa laajemmat uudelleenkäyttömahdollisuudet puhdistetulle vedelle sekä helpottaa mahdollista veden jatkokäsittelyä (Ma & Mark, 2017).

Kuten kaikissa prosesseissa, myös membraanibioreaktoreissa on myös huonoja puolia. MBR-prosessien keskeisimpänä haasteena pidetään kalvojen likaantumista. Toiminnan optimoimiseksi olisi tärkeää löytää oikeat strategiat ja tekniikat kalvojen puhdistamiseen ja likaantumisen minimoimiseksi. (Ma & Mark, 2017) Membraanibioreaktoreissa kalvojen likaantuminen aiheuttaa kustannuksia, sillä kalvojen puhdistukseen käytetään kemikaaleja. Kalvot voivat myös vaurioitua, jolloin niiden vaihtamisesta aiheutuu kustannuksia. Kalvojen hinnat ovat kuitenkin pudonneet valtavasti, sillä vuonna 1992 kalvojen vaihtaminen maksoi 400 €/m² kun vuonna 2005 hinta oli pudonnut alle 50 €/m². (Judd & Judd, 2006) Lisäksi kalvojen vaihtoväli on käyttökokemusten karttuessa huomattu olevan pidempi kuin aikaisemmin ajateltiin (Ma & Mark, 2017; Judd & Judd, 2006). Nykyisin kalvojen käyttöiän voidaan olettaa olevan keskimäärin yli 10 vuotta (Cote et al. 2012). Nämä tekijät ovat vaikuttaneet laskevasti MBR-prosessin käyttö- ja ylläpitokustannuksiin. Kuvassa 2 on havainnollistettu näiden kustannusten kehitystä vuosien saatossa.



Kuva 2. MBR-prosessin käyttö- ja ylläpitokustannusten kehitys. (Kraume & Drews, 2010)

Toisena keskeisenä haasteena MBR-prosesseissa voidaan pitää prosessin vaatimaa suurta energian tarvetta, sillä biologisen prosessin lisäksi joudutaan ilmastamaan myös suodattimia (Kraume & Drews, 2010). Nykyisin suurimmat operointikustannukset MBR-prosesseissa aiheutuvat energiasta (41 %), operaattoreista (28 %) sekä jätteen ja lietteen käsittelystä (16 %). Kalvojen vaihtamisesta aiheutuvat kustannukset ovat nykyisin melko merkityksettömät muihin kustannuksiin verrattuna, sillä vain 1 % operointikustannuksista aiheutuu kalvojen vaihtamisesta. (Iglesias et al. 2017)

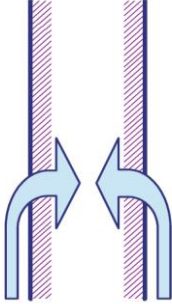
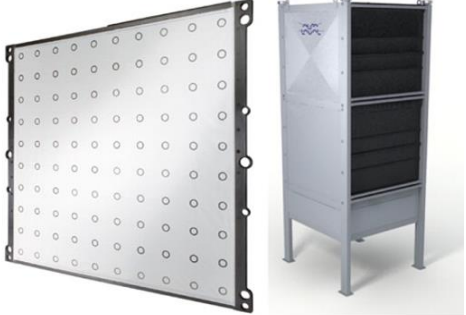
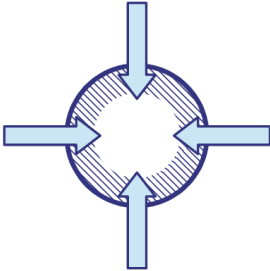

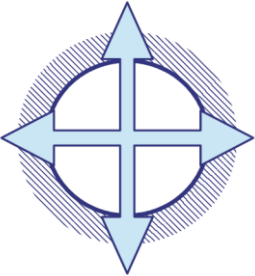

2.2 Kalvot

Paine-eroon perustuvat kalvosuodatusprosessit jaetaan mikro-suodatukseen, ultrasuodatukseen, nanosuodatukseen ja käänteisosmoosiin. Membraanibioreaktoreissa käytetään joko mikro-suodatuskalvoja (huokoskoko 0,1-1 µm) tai ultrasuodatuskalvoja (huokoskoko 0,005-0,1 µm). (Radjenović et al. 2007) Tyypillisesti membraanibioreaktoreissa käytettävien kalvojen huokoskoot vaihtelevat 0,03-0,4 µm välillä (Judd, 2016). Kalvot valmistetaan yleensä erilaisista polymeereistä tai keraamisista materiaaleista, mutta myös metallisia kalvoja on olemassa. Yleisimmin käytetyt materiaalit MBR:eissa käytettävien kalvojen valmistuksessa ovat erilaiset polymeerimateriaalit, kuten polyvinyyliidenifluoridi (PVDF), polyeetterisulfoni (PES), polyeteeni (PE) ja polypropeeni (PP). Muita mahdollisia valmistusmateriaaleja ovat selluloosat ja polyamidit. Kalvojen materiaalin tulee kestää kemiallista ja mekaanista rasitusta, kuten lämpötilan ja pH:n muutoksia. Kalvot voivat olla hydrofobisia tai hydrofiilisiä. Usein jätevedenkäsittelyssä käytettäviä hydrofobisia kalvoja muokataan pinnaltaan hydrofiilisemmiksi, sillä hydrofobiset kalvot ovat yleensä herkempiä likaantumaaan. Kalvojen ominaisuuksia voidaan muokata muun muassa kemiallisella hapettamisella, plasmakäsittelyillä tai orgaanisilla kemiallisilla reaktioilla. (Radjenović et al. 2007)

Membraanibioreaktoreissa käytetään tyypillisesti tasomaisia kalvoja (flat sheet = FS), onttokuitukalvoja (hollow fibre = HF) tai putkimaisia kalvoja (multitubular = MT) (Judd, 2016). Tasomaiset kalvot koostuvat yleensä neliön muotoisesta kehikosta, jonka molemmiin puolin on kalvopinta. Vesi virtaa ulkopuolelta kalvojen sisäpuolelle. Näitä yksittäisiä levyjä pakataan viere viereen, jolloin muodostuu suodatusmoduuli. Näitä moduuleita voidaan

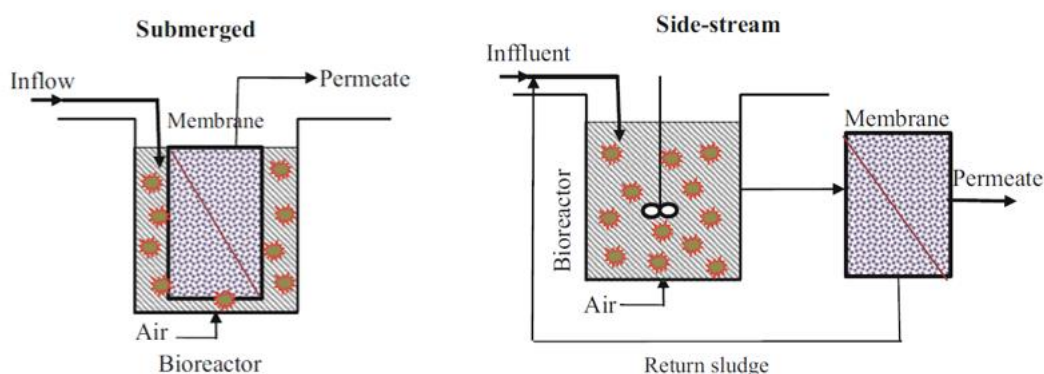
asetella myös päällekkäin. Judd:n (2016) mukaan onttokuitukalvojen ja putkimaisten kalvojen suurin eroavaisuus on virtaussuunta sekä halkaisija. Onttokuitukalvoissa vesi virtaa ulkopuolelta sisäänpäin, kun taas putkimaissa kalvoissa virtaus tapahtuu sisältä ulospäin. Onttokuitukalvojen halkaisijat vaihtelevat 0,4-2,6 mm välillä ja putkimaisten kalvojen 5-12 mm välillä. (Judd, 2016) Taulukossa I on esitetty näiden eri kalvotyypin toimintamekanismit sekä rakenteelliset erot.

Taulukko I. Eri kalvotyypin toimintamekanismit sekä rakenteet.

Kalvotyyppi	Mekanismi	Rakenne ja moduulit
Tasomaiset kalvot		
Onttokuitukalvot		
Putkimaiset kalvot		

Kuvien lähteet: Judd & Judd, 2006; Judd & Judd, 2011; Pentair; The MBR site; Wonder.

Membraanibioreaktorit voidaan luokitella sen mukaan, miten kalvomoduulit on sijoitettu prosessiin. Kalvomoduulit voidaan sijoittaa suoraan aktiivilietteeseen (immersed/submerged = iMBR) tai kalvot voivat olla erillisenä yksikkönä aktiivilieteprosessin jälkeen (side-stream = sMBR). Kalvomoduulien eri sijoituspaikat on esitetty kuvassa 3. (Radjenović et al. 2007; Judd, 2016)



Kuva 3. Kalvomoduulien eri sijoituspaikat MBR-prosessissa. (Figoli & Criscuoli (ed.), 2017)

Erilliseen yksikköön sijoitetut kalvot tarvitsevat lietteen pumppausta kalvoille ja takaisin aktiivilieteprossiin sekä kalvojen puhdistukseen. Lisäksi kalvot vaativat suuremmat paineerot kalvon yli (TMP) kuin aktiivilietteeseen upotetut kalvot. Näiden tekijöiden vuoksi erilliseen yksikköön sijoitettujen kalvojen energiankulutus on huomattavasti suurempi. Aktiivilietteeseen upotetut kalvot kuluttavat tyypillisesti energiaa suodatukseen 0,3-0,6 kWh/m³, kun erilliseen yksikköön sijoitetut kalvot kuluttavat 4-12 kWh/m³. Lisäksi kalvot erillisessä yksikössä ovat alttiimpia likaantumiselle, johtuen suuremmasta permeaattivirtaamasta. Putkimaisia kalvoja käytetään tyypillisesti erillisen kalvoyksikön omaavissa membraanibioreaktoreissa. (Radjenović et al. 2007; Judd, 2016)

Jätevedenpuhdistuksessa pääsääntöisesti suositaan kalvojen upottamista suoraan aktiivilietteeseen. Upotettujen kalvojen puhdistus tapahtuu ilmastuksen avulla. Kalvotyyppinä käytetään yleensä tasomaisia tai onttokuitukalvoja. (Radjenović et al. 2007; Judd, 2016)

2.3 Prosessiparametrit

Membraanibioreaktoriprosessin keskeisimpiä ajoparametreja ovat kalvon läpäisyyn vaadittava paine-ero (TMP = transmembrane pressure), vuo (flux) eli suodatetun veden määrä kalvojen pinta-alaa kohden (L/m^2h tai LMH) sekä permeabiliteetti (L/m^2hbar tai LMH/bar), joka kertoo kalvon läpäisykyvystä. Permeabiliteetti saadaan laskettua, kun vuo jaetaan paine-erolla kalvon yli. Näiden parametrien lisäksi tulee huomioida kalvon vastus, joka koostuu itsessään kalvosta, kalvon pinnalle muodostuneesta likakerroksesta sekä suodatettavan aineen ominaisuuksista. (Judd & Judd, 2006)

Membraanibioreaktoreissa vuon arvo vaihtelee tyypillisesti 10-100 LMH välillä. Kunnallista jätevedtä käsittelevät MBR:t, joissa kalvot on sijoitettu aktiivilietteeseen toimivat keskimääräisesti vuon arvoilla 20-30 LMH. Tähän arvoon on huomioitu kalvojen vaatima relaksaatiovaihe jokaisen suodatusvaiheen jälkeen sekä joka toinen kuukausi suoritettava kemiallinen pesu, sillä nämä vähentävät kalvojen suodatusaikaa ja siten keskimääräistä vuon arvoa. (Radjenović et al. 2007) Suomessa kylmät jätevedet heikentävät vuon arvoja.

Paine-erot kalvon yli (TMP) vaihtelevat käytettävän kalvotyypin perusteella, johtuen kalvojen eri huokoskoosta, materiaalista sekä moduulirakenteesta. Alfa Lavalin membraanibioreaktoreissa käytettäville tasomaisille kalvoille tyypillinen paine-ero suodatuksen aikana kalvon yli on 10-40 mbar, maksimin ollessa 150 mbar. Vastavirtapesussa (CIP) paine on miltei sama kuin suodatuksessa, maksimipaineen ollessa kuitenkin 30 mbar, jonka ylittyessä pesuohjelma pysähtyy. Sekä suodatuksessa että pesuvaiheessa kalvoihin kohdistuu paine-ero, jonka avulla suodatuksessa vettä imetään kalvosta läpi sekä pesuvaiheessa kalvosta työnnetään pesuvettä väärinpäin läpi. (Alfa Laval, 2019; Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019) Suezin membraanibioreaktoreissa käytettäville onttokuitukalvoille TMP:n arvot vaihtelevat 0-550 mbar välillä sekä suodatuksessa että pesuvaiheessa (Suez, 2019). Permeabiliteetiksi Alfa Laval lupaa tasomaisille kalvoille noin 700 LMH/bar arvoja (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019). Suez ilmoittaa onttokuitukalvojen permeabiliteettien olevan yli 900 LMH/bar (Suez, 2019). Kalvojen permeabiliteettien eroihin vaikuttavat samat tekijät kuin paine-eroonkin kalvon yli: kalvon huokoskoko, materiaali sekä moduulirakenne.

Lieteikä (SRT) on keskeinen operointiparametri kontrolloimaan lietteen tuottoa sekä ylläpitämään tasaista biomassan määrää reaktorissa. Lieteiällä tarkoitetaan aikaa, jonka biomassassa viipyy puhdistusprosessissa. Hydraulisella viipymällä (HRT) tarkoitetaan aikaa, mikä nesteellä ja kiintoaineella menee prosessin läpi kulkemiseen ja se on vahvasti sidoksissa lieteikään. MBR-prosesseja ajetaan usein suhteellisen pitkällä lieteikäällä, mutta lyhyellä hydraulisella viipymällä. Lieteikä vaihtelee MBR-prosesseissa 5-30 päivän välillä ja hydraulinen viipymä 4-9 tunnin välillä. Tyypillisin arvo lieteikälle on 20 päivää ja hydrauliselle viipymälle 6 tuntia. (Park et al. 2015)

Lietepitoisuus (MLSS) vaihtelee MBR-prosesseissa tyypillisesti 2-20 g/l (Le-Clech et al. 2006), kun se perinteisessä aktiivilieteprosessissa on yleensä 1.5-5 mg/l. Korkean lietepitoisuuden mahdollistaa laskeutuksen puuttuminen MBR-prosessissa, sillä perinteisessä aktiivilieteprosessissa puhdistustulos on ollut riippuvainen lietteen laskeutuvuudesta ja korkeilla lietepitoisuuksilla laskeutuvuus on ollut heikkoa. (Radjenović et al. 2007) MBR:n mahdollistama suurempi lietepitoisuus mahdollistaa myös pidemmällä lieteikäällä operoinnin (Judd & Judd, 2006).

Jätevedenpuhdistusprosessin lämpötila vaihtelee laitokselle tulevien jätevesien lämpötilojen perusteella, joten jätevesien alkuperällä voi olla merkittävää vaikutusta prosessissa vallitsevaan lämpötilaan. Esimerkiksi puhdistamoille mahdollisesti tulevat teollisuuden lämpimät prosessivedet nostavat prosessissa vallitsevaa lämpötilaa. Suomessa vuodenaajat vaikuttavat myös suuresti prosessiin tulevien jätevesien lämpötiloihin. Puhdistamolle tulevien jätevesien lämpötilat alkavat laskea syksyllä säiden viiletessä ja pysyvät talven ajan alhaisina. Puhdistamoille tulevat jätevedet ovat kylmimmillään keväällä sulamisvesien aikaan. Kesällä lämpötilat ovat vastaavasti korkeimmillaan. Puhdistamon rakenteella voi olla myös vaikutusta prosessissa vallitsevaan lämpötilaan. Jätevedenkäsittelyaltaat voivat sijaita sisätiloissa tai ulkona ja ne voivat olla avoimia tai katettuja.

2.4 Laitokset Suomessa

Vuonna 2014 rakennettiin Suomeen ensimmäiset MBR-tekniikkaa käyttävät pilotmittakaavan testilaitokset. MBR-tekniikkaa tutkittiin tuolloin ainakin Parikkalassa, Vihdissä ja Mikkelissä. (LUT University, 2014) Suomen ensimmäiset täyden mittakaavan MBR-

prosessit valmistuivat vuonna 2018 Viitasaarelle, Parikkalaan sekä Ouluun (Wiitaseudun energia, 2018; Venejärvi, 2019; Risteelä, 2019). Lisäksi Mikkeliin on tällä hetkellä rakenteilla Suomen suurin MBR-tekniikkaan perustuva jätevedenpuhdistamo. Alkuperäisen suunnitelman mukaan laitos olisi tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2020 aikana. (Mikkelin vesilaitos, 2015). Alla olevassa taulukossa on vertailtu käytössä ja rakenteilla olevia MBR-prosesseja Suomessa.

Taulukko II. Suomessa käytössä olevien MBR:ien ja Mikkeliin rakenteilla olevan MBR-prosessin vertailua (muokaten Risteelä, 2019; Mikkelin vesilaitos, 2015).

	Viitasaari	Parikkala	Oulu	Mikkeli
Kalvovalmistaja	Alfa Laval	Alfa Laval	Suez	Alfa Laval
Kalvotyyppi	tasomainen kalvo	tasomainen kalvo	onttokuitukalvo	tasomainen kalvo
Kalvomateriaali	PVDF	PVDF	PVDF	PVDF
Huokoskoko	0,2 µm	0,2 µm	0,04 µm	0,2 µm
Kalvojen sijoittelu	2 erillistä kalvoallasta	2 kalvosuodatuslohkoa osana ilmastusaltaita	4 erillistä kalvoallasta	6 erillistä kalvoallasosiota
Kalvoala	5 544 m ²	3 696 m ²	48 949 m ²	60 000 m ²
Tulovirtaama MBR-prosessiin	mitoitusvirtaama 70 m ³ /h	mitoitusvirtaama 70 m ³ /h	keskivirtaama 864 m ³ /h	mitoitusvirtaama 960 m ³ /h

Viitasaarella ja Parikkalassa kaikki puhdistamoille tulevat jätevedet menevät MBR:n kautta. Risteelän (2019) mukaan Oulussa MBR toimii perinteisen aktiivilieteprosessin rinnalla ja on mitoitettu käsittelemään 35 % esiselkeytetystä vedestä. Membraanibioreaktoriin on kuitenkin jätetty mahdollisuus laajentaa kalvopinta-alaa, jolloin tulevaisuudessa olisi mahdollista käsitellä 50 % esiselkeytetystä vedestä. (Risteelä, 2019) Mikkeliin rakenteilla oleva MBR on mitoitettu käsittelemään kaikki puhdistamolle tulevat jätevedet. Lisäksi suunnittelussa on otettu huomioon tulokuormituksen kasvaminen. (Mikkelin vesilaitos, 2015)

Viitasaarella kalvot on sijoitettu kahteen erilliseen kalvoaltaaseen, joihin pumpataan lietettä ilmastusaltaiden viimeisistä lohkoista. MBR-altaasta liete palautetaan painovoimaisesti hapenpoistolohkojen kautta takaisin ilmastusaltaiden alkuun. MBR:ssa on neljä rinnakkaista suodatussarjaa, joissa kaikissa on 3 kalvosuodatinta. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Parikkalan puhdistusprosessissa on kaksi rinnakkaista linjaa ja kalvot on sijoitettu ilmastusaltaiden loppupäähän. Kalvosuodattimia on 4 kummassakin linjassa. Ilmastusaltailta liete siirtyy kalvosuodatuslohkoihin painovoimaisesti ja lietettä kierrätetään kalvolohkoilta takaisin ilmastuksen alkupäähän pumpaamalla. Vanhoja jälkiselkeytysaltaita voidaan hyödyntää tasausaltaina suurien virtaamien yhteydessä ja näihin kertynyt jätevesi voidaan pumpata puhdistusprosessiin kapasiteetin sen salliessa. (Lignell, 2020^a)

Oulussa on kaksi rinnakkaista ilmastuslinjaa, mutta MBR-prosessi toimii neljälinjaisena. Kalvot sijaitsevat 4 erillisessä kalvoaltaassa ilmastuksen jälkeen ja liete pumpataan kalvoaltaisiin ilmastusaltaiden loppupäästä. Lietettä palautuu kalvoaltaista ylivuotovirtauksena ilmastusaltaiden alkuun. Jokaisessa kalvoaltaassa on 8 kalvosuodatinta. (Risteelä, 2019)

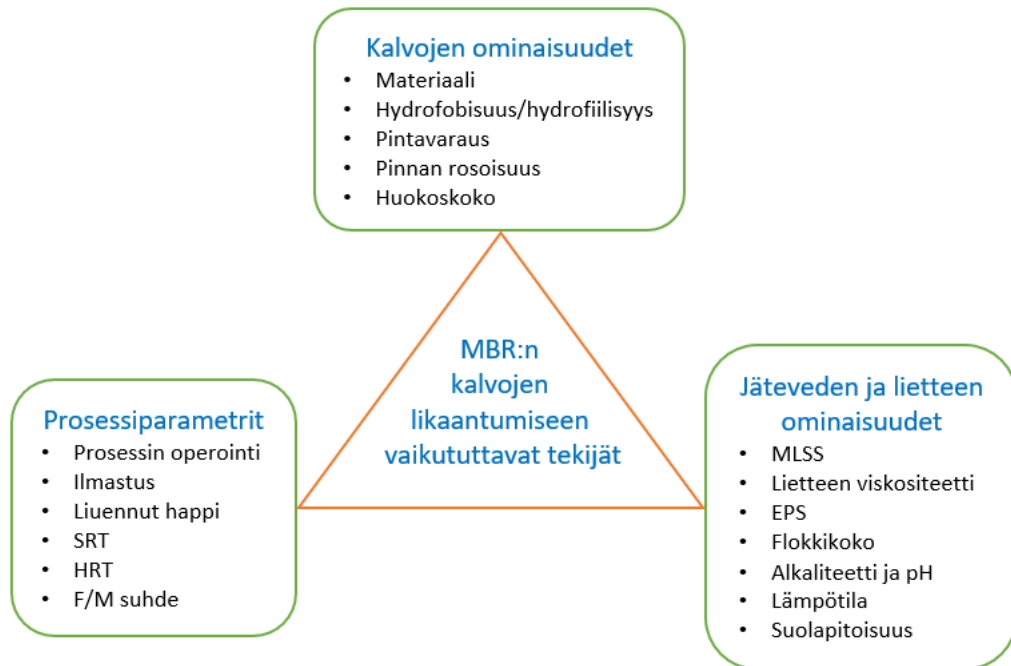
Mikkelissä ilmastusaltaat tulevat toimimaan kolmilinjaisena. Kalvot sijoitetaan ilmastusaltaiden loppuosaan, kuuteen erilliseen suljettuun allasosioon. Kalvoaltaita on myös mahdollista hyödyntää ilmastustilavuutena. Kalvoaltailta lietettä tullaan kierrättämään pumpaamalla takaisin ilmastusaltaiden alkuun. (Mikkelin vesilaitos, 2015)

3 SUODATUSKAPASITEETTIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Membranibioreaktorin suodatuskapasiteetti käsittää sen jätevesimäärän, joka on mahdollista suodattaa kalvoista läpi tietyssä aikayksikössä. Laitoksen suodatuskapasiteettiin vaikuttavat monet asiat, joista kalvojen suodatuskyky sekä lietteen laatu ovat keskeisimmässä roolissa.

3.1 Kalvojen likaantuminen

Kalvojen likaantuminen on yksi keskeisimmistä membraanibioreaktorin suodatuskapasiteettia rajoittavista tekijöistä (Iorhemen et al. 2016). Kuvaan 4 on listattu tekijöitä, joilla on vaikutusta kalvojen likaantumiseen membraanibioreaktoreissa.



Kuva 4. Kalvojen likaantumiseen vaikuttavat tekijät membraanibioreaktorissa (muokaten Iorhemen et al. 2016)

Jäteveden ja lietteen ominaisuudet vaikuttavat laitoksen suodatuskapasiteettiin kalvojen likaantumisen lisäksi lietteen laadun kautta, joten ne käsitellään kappaleessa 3.2. Prosessiparametrit käsitellään myös kappaleessa 3.2, sillä ne vaikuttavat pääasiassa lietteen laadun ja ominaisuuksien kautta kalvojen likaantumiseen.

3.1.1 Kalvojen ominaisuudet

Kalvojen ominaisuuksilla on merkitystä siihen, miten helposti ne likaantuvat, joka johtaa kalvojen suodatuskyvyn heikkenemiseen. Kalvojen materiaalit ja hydrofobisuus/hydrofiilisyy liittyvät vahvasti toisiinsa. Kalvojen materiaalit voivat olla hydrofiilisiä tai hydrofobisia ja tämä vaikuttaa kalvon likaantumistaipumukseen.

Hydrofobiset kalvomateriaalit ovat tyypillisesti herkempiä likaantumiselle jätevedenkäsittelyssä kuin hydrofiiliset, sillä useilla jäteveden sisältämällä hiukkasilla esiintyy hydrofobisia vuorovaikutuksia, jolloin ne tarttuvat helpommin hydrofobisiin kalvopintoihin. (Radjenović et al. 2007; Judd & Judd, 2006) Membraanibioreaktoreissa suosittu polymeerikalvot ovat yleensä hydrofobisia, mutta niiden hyviä puolia ovat fyysisen ja kemiallisen rasituksen kestävyys sekä hinta. Hydrofobisia kalvoja voidaan kuitenkin muokata hydrofiilisemmiksi, millä voidaan ehkäistä likaantumista. Kalvon pinnanvarauksella on merkitystä kalvojen likaantumiseen etenkin tapauksissa, joissa syöttö sisältää varautuneita hiukkasia. Useimmat kalvomateriaalit ovat negatiivisesti varautuneita normaaleissa olosuhteissa, jolloin lietteen sisältämät kationit kuten Ca^{2+} ja Al^{3+} voivat reagoida näillä kalvopinnoilla aiheuttaen epäorgaanista likaantumista. (Iorhemen et al. 2016)

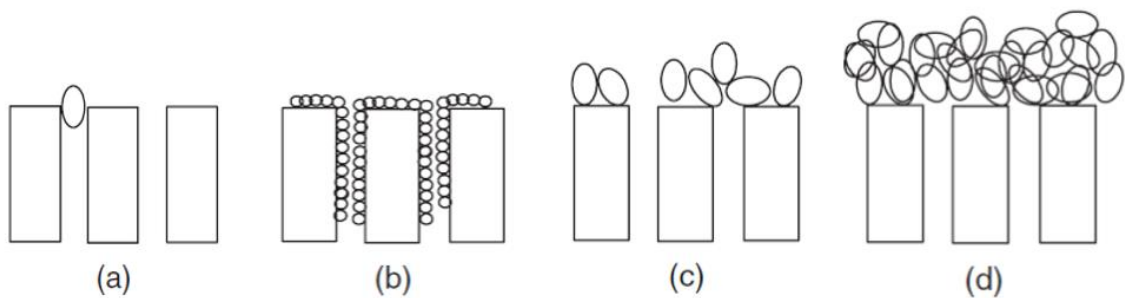
Kalvopinnan rosoisuudella on myös huomattu olevan jonkin verran vaikutusta kalvon likaantumiseen. Jäteveden sisältämät hiukkaset pystyvät helpommin kerääntymään rosoisen kalvopinnan tarjoamiin onkaloihin kuin kiinnittymään tasaiseen kalvopintaan. (Iorhemen et al. 2016)

Kalvojen huokoskolla suhteessa jätevesisyötön hiukkasten kokoon voi olla vaikutusta kalvojen likaantumiseen. Kalvon huokoskoon ollessa suurempi kuin syöttövirran hiukkasten koko, on hiukkasten mahdollista päästä kalvon huokosiin, mikä voi johtaa huokostukkeumiin. Kalvon huokosten taas ollessa syötön hiukkasten kokoa pienempiä, hiukkaset muodostavat helposti kakkukerroksen kalvon pinnalle. Puhdistamisen kannalta kakkukerros on helpommin poistettavissa kuin huokostukkeumat. Kalvon huokoskoon vaikutus kalvon likaantumiseen riippuu vahvasti syöttövirran partikkelikokojakaumasta. (Iorhemen et al. 2016)

3.1.2 Kalvojen likaantumismekanismit

Membraanibioreaktoreissa kalvojen likaantuminen voi aiheutua konsentraatio-polarisaatiosta, hiukkasten adsorptiosta kalvoon, hiukkasten saostumisesta kalvon pintaan sekä hiukkasten tarttumisesta kalvon huokosiin. (Radjenović et al. 2007; Hai & Yamamoto, 2011; Meng et al. 2009) Näiden menetelmien seurauksena hiukkaset voivat liata kalvoa eri tavoin (kuva 5). Koko huokosen tukkeutumisessa (complete blocking) yksittäiset hiukkaset

juuttuvat kalvon huokosiin tukkien ne kokokaan. Näiden hiukkasten koot ovat verrattavissa kalvon huokoskokoon. Osittaisessa huokosen tukkeutumisessa (standard blocking) hiukkaset kiinnittyvät sekä kalvon pintaan että huokosen seinäpintoihin pienentäen siten huokostilavuutta ja -kokoa. Hiukkaset ovat tällöin kalvon huokoskokoa pienempiä. Välillistä tukkeutumista voidaan pitää huokostukkeutumisen ja kakun muodostuksen välivaiheena. Siinä hiukkaset voivat kiinnittyä suoraan kalvon pintaan tai asettua jo kiinnittyneiden hiukkasten päälle, heikentäen näin kalvon suodatuskykyä. Kakun muodostuksesta voidaan puhua, kun kalvon pintaa ei ole enää vapaana ja siihen tulevat hiukkaset kiinnittyvät jo aiemmin kiinnittyneisiin hiukkasiin. Partikkelit ovat tässä tapauksessa kalvon huokoskokoa isompia. (Sadr & Saroj, 2015; Radjenović et al. 2007)



Kuva 5. Kalvojen likaantumismekanismit. a) Huokostukkeuma, b) Osittainen huokosen tukkeuma, c) välillinen tukkeutuminen d) Kakun muodostuminen (Judd & Judd, 2006)

Konsentraatiopolarisaatio on ilmiö, jossa liuenneita aineita tai partikkeleita kerääntyy ohueen nestekerrokseen kalvon pinnan läheisyyteen, eli niiden konsentraatio on suurempi lähellä kalvoa kuin muualla liuoksessa. Partikkelit voivat kerääntyessään kalvon pintaan muodostaa myös geelimäisen kerroksen. Konsentraatiopolarisaatio on luontainen ilmiö kalvosuodatukselle, mutta se heikentää usein kalvon suodatuskapasiteettia vastustamalla suodatettavan nesteen kalvon läpäisyä. Tätä voidaan ehkäistä riittävällä virtausnopeudella sekä sekoituksella, jolloin konsentraatioeroja ei pääse muodostumaan. (Wang et al. 2014; Judd & Judd, 2006)

Kalvojen likaantuminen voidaan jaotella myös sen mukaan, kuinka lujasti lika on tarttunut kiinni kalvoon ja millaista puhdistusmenetelmää tarvitaan palauttamaan kalvon alkuperäinen läpäisevyys. Palautuvassa (reversible) likaantumisessa kalvon pintaan tarttunut lika voidaan poistaa fyysisillä puhdistusmenetelmillä. Näihin menetelmiin lukeutuvat relaxaatio,

voimakkaan ilmastuksen aikaansaamat leikkausvoimat kalvon pinnalla sekä vastavirtapesu. Palautumaton (irreversible) likaantuminen koostuu siitä liasta, mikä ei lähde fyysisillä puhdistusmenetelmillä, mutta on poistettavissa kemiallisilla CIP-pesuilla. Jäännöslikaantumisella (residual) tarkoitetaan likaa, joka ei poistu CIP-pesuissa, mutta voidaan poistaa kemiallisilla liotuspesuilla (recovery cleaning). Peruuttamatonta (irrecoverable) likaantumista ei saada poistettua millään puhdistusmenetelmällä, jolloin kalvon suodatuskapasiteetti laskee pysyvästi. (Judd & Judd, 2006; Wang et al. 2014)

3.1.3 Tyypilliset epäpuhtaudet

Kalvoja tukkivat ja niiden pintaa likaavat aineet voidaan jakaa biologisiin, orgaanisiin ja epäorgaanisiin epäpuhtauksiin. Biologisiin epäpuhtauksiin lukeutuvat bakteerit ja flokit, joiden kerrostuminen, kasvusto ja metabolia kalvon pinnalla aiheuttavat kalvon likaantumista. Biologinen likaantuminen on kaksivaiheinen prosessi, joka alkaa sillä, kun yksi bakteerisolu kiinnittyy kalvon pintaan tai huokoseen. Tätä vaihetta seuraa bakteerien monistuminen, joka muodostaa vähitellen kakun kalvon pintaan, mikä heikentää kalvon läpäisevyyttä. (Iorhemen et al. 2016) Biologisen likaantumisen seurauksena kalvon pintaan saattaa muodostua biofilmikerros, joka koostuu erilaisista eliöistä sekä ekstrasellulaarisista polymeereistä (EPS). Biofilmin ominaisuudet, kuten sen tarttuvuuslujuus sekä koheesiolujuus riippuvat biofilmissä esiintyvien EPS:ien ominaisuuksista. Jos likakerros pääsee kasvamaan ja paksuuntumaan, voi sen alle kehittyä anaerobiset olosuhteet. Pitkälle edenneen biofilmin poistaminen kalvon pinnalta on haastavaa, sillä se tarttuu tiukasti ja vahvoilla sidoksilla kalvopinnalle. (Le-Clech et al. 2006)

Van den Brink et al. (2013) tekemässä tutkimuksessa havaittiin kalvojen permeaattipuolen myös likaantuneen. Tutkimuksessa tarkastettiin kalvot vuotojen varalta ja niitä ei löytynyt. Kalvojen permeaattipuolelta löydettiin bakteereita, alkueläimiä sekä EPS:iä. Joidenkin bakteerien, kuten *Bacillus subtilis* ja *Escherichia coli* oli havaittu läpäisevän pienilläkin huokoskoilla varustettuja kalvoja. Tutkimuksen perusteella bakteerit voivat muodostaa biofilmiä kalvojen permeaattipuolelle sinne päästessään. Kalvojen ilmastus ei puhdistaa kalvojen permeaattipuolta, jolloin bakteerien on helppo kiinnittyä sekä monistua siellä. (van den Brink et al. 2013)

Orgaaniset epäpuhtaudet käsittävät biopolymeerit, joiden kerrostuminen kalvoille johtaa kalvojen läpäisykyvyn heikkenemiseen. Näitä tuotteita muodostuu bakteerien ja mikrobien metabolian sekä biologisen ja mekaanisen rasituksen seurauksena ja niitä nimitetään usein ekstrasellulaarisiksi polymeereiksi (EPS) tai liukoisiksi mikrobituotteiksi (SMP), riippuen niiden karakterisointiin käytetystä menetelmästä. EPS:iin kuuluu paljon erilaisia makromolekyylejä, kuten polysakkarideja, proteiineja, fosfolipidejä ja nukleiinihappoja ja muita liukenemattomia polymeerisiä yhdisteitä. EPS:t sijaitsevat jätevedessä solujen pinnalla, niiden ulkopuolella tai mikrobiryhmittymien solujen välisissä tiloissa. SMP:t koostuvat erilaisista nestemäisessä faasissa olevista liukoisista aineista, kuten mikrobisolujen erittämistä polysakkarideista ja proteiineista, flokkimatriisien ja solujen hajoamistuotteista sekä muista jäteveden liukoisista aineista. EPS:illä ja SMP:eillä on huomattu olevan merkittäviä vaikutuksia niin lietteen suodatettavuuteen kuin kalvojen likaantumiseenkin. On jopa arvioitu, että EPS:t ja SMP:t olisivat merkittävin syy membraanibioreaktorin kalvojen likaantumiseen. (Lippel & Cerqueira, 2018; Le-Clech et al. 2006; Figoli & Criscuoli, 2017; Hai et al. (ed.) 2019)

Kun irtonaiset EPS:t ja SMP:t ryhmittyvät lietekakkuun, on niiden huomattu muodostavan biopolymeeriryhmittymiä (biopolymer cluster = BPC). Nämä suurikokoiset vapaat orgaaniset liuenneet aineet sisältävät biopolymeerien lisäksi joitakin mikro-organismeja. Suuren kokonsa vuoksi kalvot pidättävät BPC:t, joten niitä ei ole laitoksien purkuvesissä. Kooltaan 2,5-60 µm olevien biopolymeeriryhmittymien on huomattu olevan keskeisessä roolissa lietekakkujen kerrostumisessa kalvojen pintaan sekä kalvojen likaantumisessa. Biopolymeeriryhmittymien kertyessä lietteeseen on kalvojen likaantumisen huomattu lisääntyvän merkittävästi membraanibioreaktoreissa. (Iorhemen et al. 2016; Le-Clech et al. 2006; Hai et al. (ed.) 2019)

Epäorgaaniset epäpuhtaudet saostuvat kalvojen pintaan sekä huokosiin, johtaen kalvojen likaantumiseen ja tukkeutumiseen. Tyypillisimmät epäorgaaniset epäpuhtaudet sisältävät kationeja ja anioneja, kuten Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} ja OH^- . Näiden aineiden saostuminen kalvoille tapahtuu hydrolyysillä tai hapettumalla. Metallionien kohtuullinen määrä prosessissa voi kuitenkin kontrolloida biologista likaantumista ekstrasellulaarisia polymeerejä sitoen, mutta konsentraation ollessa liian suuri epäorgaanisen likaantumisen riski kasvaa merkittävästi. Epäorgaanisten saostumien

poistoon kalvoilta käytetään kemiallista puhdistusta, sillä se on paljon tehokkaampi kuin fyysinen puhdistus. (Iorhemen et al. 2016)

3.2 Lietteen laatu

Lietteen laatuun vaikuttavat monet tekijät, kuten prosessin operointi, prosessiolosuhteet sekä tulevan jäteveden koostumus. Lietteen laatu vaikuttaa laitosten toimintaan monin eri tavoin, kuten membraanibioreaktoreissa muun muassa lietteen suodatettavuuteen sekä kalvojen likaantumiseen.

3.2.1 Prosessiparametrien vaikutus

Membraanibioreaktoreita operoidaan tyypillisesti joko tasaisella paine-erolla kalvon yli (TMP) ja muuttuvalla permeaattivuolla tai tasaisella permeaattivuolla ja muuttuvalla paine-erolla kalvon yli. Operoitaessa tasaisella paine-erolla kalvon yli, kalvojen likaantuminen huomataan heikkenevästä permeaattivirtaamasta sekä kalvojen permeabiliteettiarvojen laskusta. Kun MBR-prosessia operoidaan tasaisella permeaattivirtaamalla, kalvojen likaantuminen huomataan TMP-arvojen kasvusta. (Iorhemen et al. 2016)

MBR-prosessissa jäteveden esikäsitteilyllä ja etenkin välppäyksellä on hyvin suuri merkitys kalvojen likaantumisen ehkäisemisessä. Prosessiin pääsevät kiintoainekappaleet voivat tukkia kalvojen välit, virtauskanavat sekä ilmastusaukot. Etenkin kunnallisilla puhdistamoilla hiukset ovat ongelmallisia, sillä yhteen kerääntyessään ne aiheuttavat helposti tukoksia. Ilmastusaukkojen tukkeutuminen lisää kalvojen likaantumista. Kun ilmastuksen teho heikkenee ja/tai ilmamäärä jakautuu epätasaisesti kalvoille, ilmakuplat eivät puhdistaa kalvojen pintaa enää tehokkaasti, jolloin lika pääsee kertymään kalvon pintaan. (Judd & Judd, 2006; Hai et al. (ed.) 2019) MBR-prosesseissa käytetään välppien lisäksi hienovälppiä ja siivilöitä, jolloin voidaan minimoida kiintoainekappaleiden pääsy prosessiin (Impero & Hammler, 2015)

Ilmastuksella on kaksoismerkitys membraanibioreaktoreissa, sillä sekä biologinen prosessi että kalvosuodatus tarvitsevat ilmastuksen. Biologisen prosessin puolella ilmastus mahdollistaa lietteen kiintoaineen sekoittumisen sekä mikro-organismien toiminnan

orgaanisen aineen hajottamiseksi. Kalvosuodattimien ilmastuksella on tarkoitus puhdistaa kalvojen pintaa kiintoaineesta. Ilmakuplien noustessa pohjalta pintaa kohden, heiluttavat ja hankaavat ne samalla kalvojen pintaa. Lisäksi ilmakuplat saavat aikaan lietevirtauksen, mikä vähentää lietteen kerrostumista kalvon pintaan. Kalvojen likaantumisen kannalta kalvojen ilmastuksella on enemmän vaikutusta kuin lietteen ilmastuksella, kun taas lietteen laadun kannalta lietteen ilmastus on avainasemassa. Lietteän ilmastuksessa käytetään hienokuplailmastimia, joissa ilmakuplan koko vaihtelee 2-5 mm välillä, sillä pienempi kuplan koko mahdollistaa paremman hapen siirtymisen. Kalvosuodattimien ilmastukseen käytetään karkeakuplailmastimia, joissa ilmakuplien koko vaihtelee 6-10 mm välillä. Suuremmat ilmakuplat aiheuttavat enemmän turbulenssia ja nousevat nopeampaa, jolloin ne puhdistavat kalvoja tehokkaasti. (Gkotsis et al. 2014; Judd & Judd, 2006)

Liunneen hapen konsentraatio lietteessä säätelee ilmastuksen määrää. Liunneen hapen määrä vaikuttaa kalvojen likaantumiseen lietteen laadun ja prosessin biologian, kuten biofilmin muodostumisen, SMP-pitoisuuden ja flokkien kokojakauman kautta. Suurempi liunneen hapen määrä tarjoaa yleensä paremman suodatettavuuden sekä vähentää kalvojen likaantumista, joiden lisäksi sen on väitetty kontrolloivan SMP:ien ja EPS:ien määrää ja laatua lietteessä. (Judd & Judd, 2006; Le-Clech et al. 2006)

SRT eli lieteikä sekä F/M-suhde säätelevät ennen kaikkea biomassan ominaisuuksia ja ovat siten tärkeimpiä tekijöitä, jotka vaikuttavat lietteen laatuun ja membraanibioreaktorin kalvojen likaantumiseen. Lieteikä säätelee ekstrasellulaaristen polymeerien (EPS) muodostumista, joiden on huomattu aiheuttavan suurimman osan kalvopintojen likaantumisesta, sillä EPS:t pystyvät vuorovaikuttamaan sekä muiden partikkeleiden että joissain tapauksissa myös kalvopintojen kanssa. Lieteiän ja F/M-suhteen arvot ovat toisistaan riippuvaisia. Kun lieteikä pitenee, F/M-suhde pienenee ja vastaavasti lieteiän lyhentyessä, F/M-suhde kasvaa. On huomattu, että todella lyhyt lieteikä (alle 2 päivää) sekä todella pitkä lieteikä (yli 50 päivää) lisäävät kalvojen likaantumista. Vastaavasti suuret F/M-suhteen arvot lisäävät kalvojen likaantumisherkkyttä (~ 2,4 g_{COD}/g_{MLVSS}/d), joka vastaa 2 päivän lieteikää. F/M-suhde on suositeltavaa pitää alle 0,5 g_{COD}/g_{MLVSS}/d. Lyhyellä lieteiällä operoitaessa likaantumisen lisääntyminen selittyy EPS:ien pitoisuuden kasvamisena. Lieteiän pidentyessä, EPS:ien määrä yleensä vähenee. Myös pienten F/M-suhteiden on havaittu pienentäneen EPS:ien pitoisuutta. Hyvin pitkän lieteiän aiheuttama

likaantumistaipumus selittyy likaa aiheuttavien aineiden kertymisellä prosessiin, lietteen korkeammalla viskositeetilla sekä liian korkeaksi päässeellä lietekonsentraatiolla (MLSS). Kaikki nämä voivat heikentää ilmastuksen tehokkuutta kalvoja puhdistettaessa. (Iorhemen et al. 2016; Le-Clech et al. 2006) Lignellin (2020^c) mukaan lieteikää tulisi säädellä lämpötilan suhteessa, sillä alhaiset lämpötilat heikentävät ja hidastavat puhdistusprosessin toimintaa, jolloin sitä tulisi kompensoida pidemmällä lieteiällä.

HRT eli hydraulinen viipymä vaikuttaa lietteen ominaisuuksien kautta kalvojen likaantumiseen. Kun HRT:n arvo pienenee, kalvojen likaantumisenopeus kasvaa. Tämä selittyy sillä, että lyhyt HRT mahdollistaa EPS:ien määrän kasvamisen, lisää rihmamaisten bakteerien liikakasvua, kasvattaa jäteveden MLSS-konsentraatiota sekä lietteen viskositeettia. (Iorhemen et al. 2016)

3.2.2 Jäteveden ja lietteen ominaisuudet

Jäteveden koostumus riippuu sen alkuperästä. Teollisuuden jätevesi on yleensä hyvin erilaista verrattuna kunnalliseen jäteveeseen. Jätevedenpuhdistamolle tulevien jätevesien koostumus tulee ottaa huomioon prosessia operoitaessa. Jäteveden koostumus ja orgaaninen kuormitus ovat keskeisessä roolissa vaikuttamassa lietteen suodatettavuuteen ja kalvojen likaantumisherkyyteen. Jäteveden sisältämien komponenttien vuorovaikutukset vaikuttavat siihen, miten herkästi ne likaavat kalvoja. Lisäksi tulevan jäteveden muut ominaisuudet, kuten pH ja lämpötila vaikuttavat sekä koko prosessin että kalvojen toimintaan. (Judd & Judd, 2006; Krzeminski et al. 2012)

Lietekonsentraatiolla (MLSS) tarkoitetaan kiintoaineen määrää ilmastusaltaassa (Bahadori & Smith, 2016) ja sillä on keskeinen vaikutus lietteen laatuun. Kuitenkaan lietteen suodatettavuuteen ja kalvojen likaantumiseen sillä ei ole selkeää yhteyttä tutkimusten perusteella. Eri tutkimuksia vertailtaessa osa on sitä mieltä, että lietekonsentraation kasvu vaikuttavaa negatiivisesti laitoksen suodatuskapasiteettiin, osa sanoo, että vaikutus on merkityksetön ja osan mielestä sillä on positiivisia vaikutuksia. Näissä tutkimuksissa lietekonsentraation vaihteluvälit ovat olleet hyvin erilaisia, mikä voi osaltaan selittää tutkimustuloksia. Tästä voidaan päätellä, että lietekonsentraatiolla ei ole suoraa korrelaatiota laitoksen suodatuskapasiteettiin. On kuitenkin huomattu, että lietekonsentraation kasvaessa,

kasvaa myös EPS:ien pitoisuus, minkä on huomattu lisäävän merkittävästi kalvojen likaantumista ja siten heikentävän kalvojen permeabiliteettiarvoja. Lisäksi lietekonsentraation noustessa nousee lietteen viskositeetti, joka vaikuttaa lietteen ominaisuuksiin. Lietekonsentraatiolla voidaan todeta olevan vaikutusta vasta, kun se on riittävän korkea (yli 15 g/l). (Le-Clech et al. 2006; Deowan et al. 2015; Iorhemen et al. 2016)

Lietteen viskositeettiin vaikuttavat prosessin lietekonsentraatio sekä lämpötila. Tyypillisesti viskositeetti pysyy suhteellisen alhaisena ja nousee hitaasti lietekonsentraation kasvaessa nopeammin. Kuitenkin kriittisen lietekonsentraation ylittyessä, viskositeetti alkaa kasvaa eksponentiaalisesti lietekonsentraation kasvaessa. Kriittinen lietekonsentraatio riippuu prosessin toiminnasta, mutta tyypillisesti se vaihtelee 10-17 g_{MLSS}/L välillä. MBR-prosesseissa korkea viskositeetti heikentää lietteen suodatettavuutta sekä kalvojen läpäisevyyttä, voi rajoittaa hapensiirtoa ja heikentää ilmastuksen puhdistusvaikutusta kalvoille, mikä lisää kalvojen likaantumisriskiä. (Iorhemen et al. 2016; Judd & Judd, 2006)

Membraanibioreaktoreissa lieteflokkien kokojakauma on hyvin laaja ja flokkikoolla on huomattu olevan vaikutusta niin lietteen suodatettavuuteen kuin kalvojen likaantumisherkkyyteen. Flokkien kokoon voi vaikuttaa niin tulevan jäteveden koostumus kuin myös muun muassa lieteikä, liuenneen hapen määrä, eri aineiden/kemikaalien lisäykset sekä ilmastuksen tehokkuus. Voimakas ilmastus voi hajottaa flokkeja pienemmiksi. Pienten (alle 1 µm) kolloidien, hiukkasten ja vapaiden bakteerien suuri konsentraatio heikentää lietteen suodatettavuutta ja lisää merkittävästi kalvojen likaantumista, sillä pienemmät partikkelit tarttuvat kalvojen pintaan helpommin kuin suuret. Lisäksi merkittävä tekijä on flokkikoon suhde kalvon huokoskokoon. Flokkikoon ollessa kalvon huokoskokoa suurempi, flokit eivät tuki kalvoa sisältä, vaan kerääntyvät kalvon pintaan. Pienemmät flokit voivat juuttua kalvon huokosiin tukkien ne. Tällaiset huokostukkeutuneet kalvot ovat hankalampia puhdistaa kuin pinnasta likaiset kalvot. Käsitellyn veden erottaminen suspendoituneesta biomassasta on tehokkaampaa flokkikoon kasvaessa. Flokkien koon kasvulla voidaan siten parantaa lietteen suodatettavuutta sekä vähentää kalvojen likaantumista. Flokkikokoa voidaan kasvattaa lisäämällä lietteeseen esimerkiksi aktiivihiihtä tai polymeeriä. Myös aerobisen rakeisen lietteen käyttäminen membraanibioreaktorissa kasvattaa flokkikokoa ja sen on todettu lisäävän kalvojen läpäisevyyttä 50 %:lla. Toisaalta sen on myös huomattu heikentävän kalvojen puhdistumista. Suurimpana haasteena aerobisen rakeisen lietteen

hyödyntämiselle pidetään kuitenkin prosessin epävakautta. Aerobiset rakeet saattavat hajota pitkäaikaisessa käytössä. (Iorhemen et al. 2016; Le-Clech et al. 2006; Judd & Judd, 2006; Hai et al. (ed.) 2019); Krzeminski et al. 2012)

Alkaliteetti ja pH ovat tärkeitä parametrejä biohajoamisessa. MBR-prosessissa nitrifikaatiossa muodostuu happoja, jotka laskevat prosessin pH-arvoa. Jäteveden alkaliteetilla on tärkeä tehtävä pyrkiä pitämään pH optimaalisella tasolla. Kuitenkin syöttövirtaan joudutaan yleensä lisäämään emäksisiä aineita, jotta prosessin pH pysyisi prosessin toiminnalle optimaalisella tasolla. Useissa tutkimuksissa on todettu, että alhainen pH lisää EPS:ien vapautumista, muodostumista sekä niiden adsorptiota kalvoihin, mikä aiheuttaa kalvojen likaantumista. Korkean pH:n on taas todettu lisäävän muun muassa kalsiumkarbonaatin saostumista, joka aiheuttaa epäorgaanista likaantumista kalvoihin. Kuitenkin kalsiumkarbonaattisaostumien kohtuullinen määrä prosessissa voi vähentää biologista likaantumista sitoen EPS:iä. (Iorhemen et al. 2016)

Lämpötila vaikuttaa hyvin moneen asiaan MBR-prosessissa, etenkin lietteen laatuun, sen suodatettavuuteen ja sitä kautta kalvojen likaantumiseen. Ensinnäkin lämpötilan lasku prosessissa saa lietteen viskositeetin kasvamaan ja viskositeetin kasvaessa, ilmastuksen aikaansaamat leikkausvoimat kalvojen pinnalla heikkenevät. Toiseksi flokkulaatio heikkenee lämpötilan laskiessa ja se pienentää lieteflokkien kokoa ja vapauttaa EPS:iä ja submikroskooppisia partikkeleita lietteeseen. Lisäksi matala lämpötila lisää SMP-pitoisuuksia ja rihmamaisten bakteerien määrää prosessissa. Kolmanneksi lämpötilan aleneminen heikentää orgaanisen aineen (COD) biohajoamista, mikä johtaa hajoamattomien liuenneiden ja hiukkasmaisten aineiden konsentraation kasvuun. Neljänneksi hiukkasten takaisinsiirtonopeus laskee lineaarisesti lämpötilan laskiessa, Brownin diffuusion mukaisesti. Tällöin kalvopinnan lähellä olevien hiukkasten liike hidastuu, jolloin niiden konsentraatio kasvaa. Tämä lisää konsentraatiopolarisaatiota kalvopinnan läheisyydessä. Nämä kaikki tekijät vaikuttavat suoraan kalvojen likaantumiseen. Lisäksi yhtäkkisten lämpötilavaihteluiden on todettu aiheuttavan SMP-pitoisuuden kasvua ja biomassan heikentymistä sekä heikentävän flokkulaatiota, joten on suositeltavaa operoida MBR:eita tasaisella lämpötilalla. Jos alhaisia lämpötiloja ei voida välttää laitoksen operoinnissa, on ilmastusta tehostettava lietteen viskositeetin kasvun takia. (Iorhemen et al. 2016; Judd & Judd, 2006)

Suuri suolapitoisuus muuttaa aktiivilietteen fyysisiä ja biokemiallisia ominaisuuksia, kuten kasvattaa EPS- ja SMP-pitoisuuksia sekä liukoisen COD:n määrää. Lisäksi suolat aiheuttavat kemiallista saostumista ja sähköstaattisia vuorovaikutuksia kalvon pintaa kohti. Nämä kaikki tekijät lisäävät kalvojen likaantumiseriskiä. Ionien koostumus ja pitoisuus jätevedessä vaikuttavat suuresti muodostuvien flokkien rakenteeseen, kokoon ja lujuuteen. On huomattu, että moniarvoisten kationien (kuten Mg^{2+} ja Ca^{2+}) suuret pitoisuudet muodostavat vahvoja ja kompakteja flokkeja. Tämä selittyy niiden mahdollisuudella muodostaa ryhmiä EPS:ien ja yksittäisten solujen kanssa. Yksiarvoiset kationit sitä vastoin heikentävät flokkilujuuksia. Moniarvoisten kationien läsnäolo suhteessa yksiarvoisiin kationeihin korkeasta suolapitoisuudesta huolimatta voi auttaa lujien bioflokkin muodostumisessa ja siten parantaa lietteen suodatettavuutta ja vähentää kalvojen likaantumista. (Iorhemen et al. 2016; Judd & Judd, 2006)

3.2.3 Mikrobiologian vaikutus

Biologinen jätevedenpuhdistus perustuu täysin mikro-organismien kykyyn hajottaa orgaanista ja epäorgaanista ainesta. Tämän vuoksi on hyvin tärkeää, että aktiivilietteen eliökanta on hyvinvoivaa ja kestävä. Aktiivilietteen eliökantaan kuuluu pääasiassa erilaisia bakteereita, alkueläimiä sekä usein joitakin monisoluisia eläimiä, kuten rataseläimiä, sukkulamatoja ja karhukaisia. Mikrobikannan lajirakenne vaihtelee tulevan jäteveden koostumuksen sekä prosessiolosuhteiden perusteella. (Judd & Judd, 2006; Glymph, 2005)

Bakteerit ovat runsaslukuisimpia ja tärkeimpiä mikro-organismeja jätevedenkäsittelylaitoksilla ja ne muodostavatkin noin 90-95 % aktiivilietteen biomassasta. Bakteerien rooli vedenpuhdistuksessa on hajottaa orgaanista ainesta epäorgaaniseksi yhdisteiksi, jotta muut mikrobit voivat käyttää niitä ravinnokseen. Bakteerit osallistuvat myös flokkien muodostamiseen. (Glymph, 2005; Schuyler et al. 2001)

Alkueläimet (protozoa) ovat yksisoluisia mikro-organismeja ja aktiivilietteen mikro-organismeista noin 3 % on alkueläimiä. Alkueläimillä on tärkeä rooli biologisessa jätevedenkäsittelyssä, sillä ne hajottavat orgaanista ainesta, poistavat bakteereita sekä parantavat flokkien muodostumista. Ne toimivat myös indikaattoreina jäteveden laadulle

sekä laitoksen tehokkuudelle. Jätevedenkäsittelyprosesseissa esiintyy yli 400 alkueläinlajia ja ne luokitellaan usein niiden liikkumisen perusteella: (Glymph, 2005; Schuyler et al. 2001)

1. Amebat (amoebae)
2. Siimaeliöt (flagellates)
3. Ripsieläimet (ciliates)
4. Vapaasti uivat ripsieläimet (free-swimming ciliates)
5. Ryömivät ripsieläimet (crawling ciliates)
6. Varrelliset ripsieläimet (stalked ciliates)

Amebat ovat alkueläinten alkeellisin laji. Ne käyttävät ravintonaan orgaanisten pienhiukkasten lisäksi leviä, bakteereita ja toisia pieniä alkueläimiä. Ameboja esiintyy jätevedenkäsittelyssä vähän, sillä ne liikkuvat hitaasti ja eivät pärjää kilpailussa ruuasta bakteereille ja muille alkueläimille. (Glymph, 2005)

Siimaeliöt ovat tyypillisesti melko pieniä ja niillä on joko yksi tai kaksi uintisiimaa, joita vispaamalla ne liikkuvat. Siimaeliöt viihtyvät ravinnerikkaissa vesissä. Aktiivilietteessä viihtyvät siimaeliöt syövät pääasiassa liukoisia orgaanisia ravinteita, kuten bakteeritkin, joten ne kilpailevat keskenään ruuasta. (Glymph, 2005)

Ripsieläimet ovat osittain tai kokonaan lyhyiden värekarvojen peitossa, joita käytetään pääasiassa liikkumiseen. Ripsieläimet syövät pääasiassa bakteereita, leviä ja hiivasieniä, joten ne eivät aktiivisesti osallistu orgaanisen aineen poistoon jätevesistä. Kuitenkin ne osallistuvat kokonaisvaltaiseen veden selkeyttämiseen poistamalla liukoisia bakteereita, leviä ja muita pieniä mikro-organismeja. (Glymph, 2005)

Vapaasti uivat ripsieläimet liikkuvat vedessä nimensä mukaisesti uiden tai kieppuen. Vapaat hajanaiset bakteerit ovat niiden pääasiallista ruokaa. Kun liete sisältää runsaasti bakteereita, lisääntyy vapaasti uivien ripsieläinten määrä lietteessä merkittävästi. (Glymph, 2005)

Ryömivät ripsieläimet ovat hyvin yleisiä aktiivilietteessä. Niiden suuri määrä merkitsee hyviä prosessiolosuhteita. Ryömivien ripsieläinten ollessa dominoivana eliölajina, on suurin osa lietteen liukoisista ravinteista saatu poistettua. Tällöin hajanaiset bakteerit alkavat kasaantua muodostaen flokkeja. Ryömivät ripsieläimet ovat huonoja uimareita ja ne liikkuvat ryömimällä kiinteiden flokkien pinnalla. (Glymph, 2005)

Varrellisilla ripsieläimillä on värekarvoja ainoastaan suunsa edessä ja niiden avulla ne ohjaavat ruokaa suuhunsa. Ne syövät pääasiassa bakteereita, leviä ja pieniä alkueläimiä. Ne voivat kiinnittyä lähes mihin vain ja vain harvoin uivat vapaasti. Varrellisia ripsiseläimiä esiintyy sekä yksittäisinä eliöinä sekä ryhmittymänä, joissa voi olla yli 100 ripsieläintä. (Glymph, 2005)

Rataseläimet, sukkulamadot ja karhukaiset ovat tyypillisimmät monisoluiset eläimet jätevedenkäsittelyprosesseissa. Kooltaan ne ovat yleensä alkueläimiä isompia. Ravintonaan ne käyttävät bakteereita, leviä ja alkueläimiä. (Glymph, 2005)

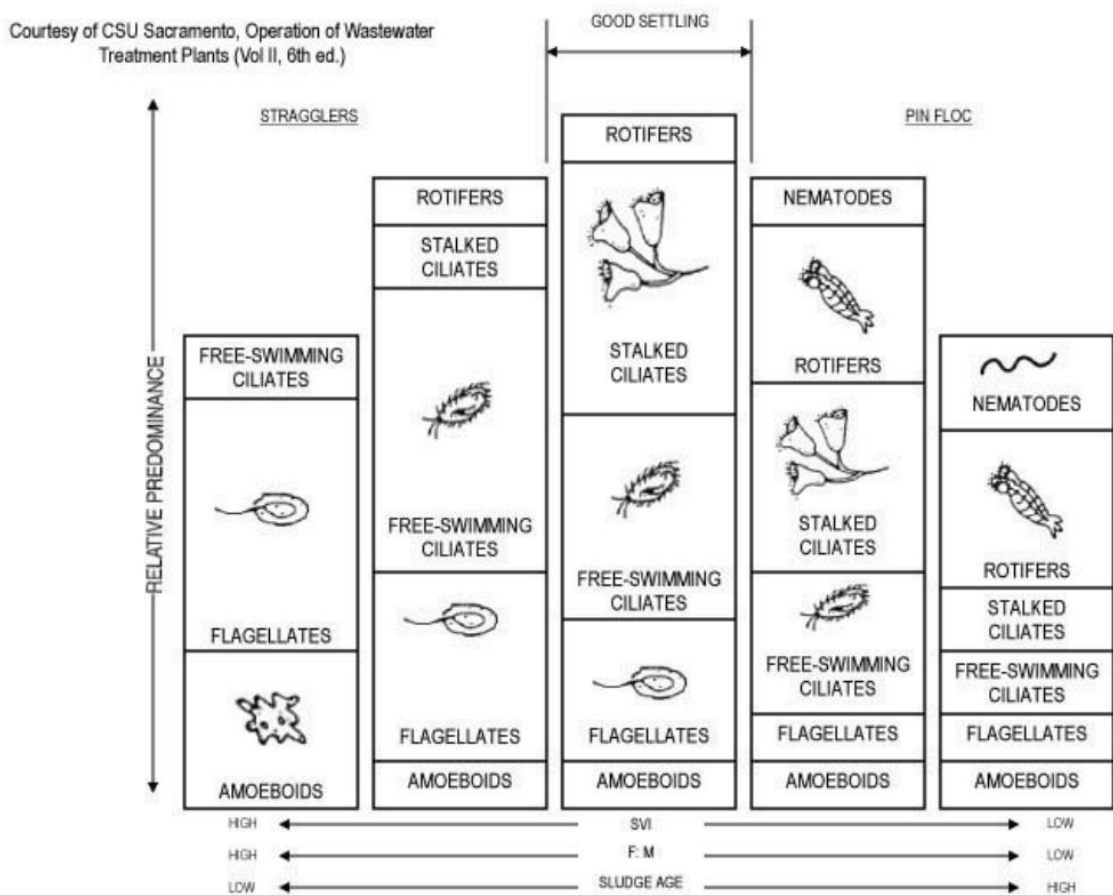
Rataseläimillä on monia hyödyllisiä tehtäviä jätevesien käsittelyprosesseissa. Ne stimuloivat mikroflooran toimintaa ja hajoamista, parantavat hapen läpäisykykyä ja auttavat mineraaliravinteiden kierrätyksessä, mikä auttaa stabiloimaan orgaanista jätettä. Lisäksi rataseläimet kirkastavat purkuvettä poistaen siitä jäljelle jääneet hajanaiset bakteerit, levät ja muut pienet alkueläimet. Rataseläimiä on todella monia eri lajeja, mutta hyvin hoidetuissa käsittelyprosesseissa esiintyy vain yhdestä neljään eri lajia. Rataseläinten on myös huomattu parantavan flokkien muodostumista sekä hillitsevän liman kasvua, mikä vähentää anaerobisten olosuhteiden muodostumista liman kerroksiin. (Schuyler et al. 2001; Glymph, 2005)

Sukkulamadoilla on yksinkertainen rakenne ja niitä esiintyy eri kokoisina. Sukkulamadot liikkuvat heiluttamalla vartaloaan edestakaisin. (Glymph, 2005) Sukkulamadot osallistuvat kokonaisvaltaiseen biologiseen stabilointiin jätevesissä, lietteissä sekä maaperässä. Etenkin biologisissa suodattimissa sukkulamadoilla on merkittävä rooli biofilmin kasvun vähentäjänä, mikä ehkäisee suodattimen tukkeutumista. Lietteissä sukkulamadot lisäävät hapen diffuusiota, ravinteiden kierrätystä ja tyhjentävät bakteeripopulaatiota. (Schuyler et al. 2001)

Karhukaisia esiintyy usein samoissa elinympäristöissä kuin rataseläimiä ja sukkulamatoja. (Glymph, 2005) Niillä on myös kyky selviytyä äärimmäisissä olosuhteissa. Karhukaiset tarvitsevat vettä, mutta ne kestävät kuivuutta pitkiä aikoja, sillä ne voivat siirtyä kryptobioosiin, jolloin niiden aineenvaihdunta pysähtyy. Karhukaiset kestävät suuria lämpötilavaihteluita, sillä niiden on todettu selviävän sekä -273 että 150 °C lämpötiloista. Ne selviävät kovien paineiden alla sekä tyhjiöissä. (Ben-Barak, 2009) Karhukaisten ravintoa

ovat levät ja pienet alkueläimet. Niiden vartalo voi olla väriltään punainen, oranssi tai vihreä. (Glymph, 2005)

Alkueläinten populaation muodostumiseen vaikuttavat sekä fyysiset, biologiset että kemialliset tekijät. Laitoksen rakenne, vuodenaajat ja jäteveden alkuperä vaikuttavat prosessissa vallitseviin lämpötiloihin. Lietteikä ja käsittelyprosessin kesto ovat keskeisimpiä vaikuttajia siihen, millainen eliökanta prosessiin muodostuu. Näiden lisäksi alkueläinten populaation muodostumiseen vaikuttavat muun muassa liuennon hapen määrä, pH, hiilidioksidipitoisuus, valoisuus, virtausnopeus, myrkylliset jätteet ja organismien lähde. (Schuyler et al. 2001) Kuvassa 6 on esitelty tyypillisimpien aktiivilietteen mikrobien ja lietteen laadun välisiä yhteyksiä.



Kuva 6. Tyypilliset mikrobit aktiivilieteprosessissa sekä niiden ja lietteen laadun väliset yhteydet. (DNR, 2010)

Kun liete on hyvin nuorta ja laihaa, lietteen eliökanta koostuu pääasiassa ameboista ja siimaeliöistä. Kun lieteikä sekä lietekonsentraatio alkavat kasvaa korvautuvat amebat vapaasti uivilla ripsieläimillä. Lieteiän ja -konsentraation saavuttaessa optimaalisen tason vallitsevina mikrobeina ovat varrelliset ja vapaasti uivat ripsieläimet. Lieteiän tästä kasvaessa rataseläimet ja varrelliset ripsieläimet alkavat hallitsemaan eliökantaa ja lieteiän ollessa todella korkea, rataseläimet ja sukkulamadot dominoivat eliökantaa. (DNR, 2010)

Alkueläimet toimivat lietteen laadun mittareina ja niiden perusteella voidaan tehdä päätelmiä prosessin toiminnasta. Amebojen suuri määrä aktiivilietteessä kertoo jäteveden sisältävän vielä merkittävän määrän käsittelemätöntä ravintoa. Tämä voi tarkoittaa, että laitokselle on tullut massiivinen kuormitus, jätevesi sisältää paljon pienhiukkasia tai liuenneen hapen määrä on alhainen. Siimaeliöiden ollessa vallitsevana eliökantana kielii se liukoisten ravinteiden tai kuolleen ja mätänevän materiaalin suuresta määrästä lietteessä. Lietteen mikrobien koostuessa pääsääntöisesti vapaasti uivista ripsieläimistä on se tyypillisesti merkinä aktiivisten bakteereiden runsaudesta. Tämä tarkoittaa, että liete sisältää vielä ravinteita. Ryömivien ripsieläinten runsaus lietteessä indikoi lietteen sisältävän runsaasti flokkeja, jolloin suurin osa orgaanisesta aineesta on poistunut jätevedestä. Lisäksi se tarkoittaa lieteiän olevan optimaalinen. Varrellisten ripsieläinten ollessa vallitsevana eliökantana, on suurin osa orgaanisista ravinteista poistettu lietteestä. Lietteen vanhetessa varrelliset ripsieläimet vaihtuvat yksinään esiintyvistä lajeista rypäsmäisiin lajeihin. (Glymph, 2005)

Monisoluisten eläimien olemassaolo kielii käsittelyprosessin olosuhteista. Optimaalisissa olosuhteissa niitä esiintyy aktiivilietteessä, mutta kohtuullisesti. Monisoluiset eläimet eivät ikinä saisi olla dominoivana lajina vedenpuhdistusprosesseissa, sillä niiden vaikutus orgaanisen aineksen poistoon on vähäinen. Kuolleiden rataseläinten esiintyvyys lietteessä indikoi jäteveden myrkyllisyydestä. Sukkulamatojen suuri esiintyvyys lietteessä kertoo korkeasta lieteiästä. (Glymph, 2005; DNR, 2010)

3.3 Vaahtoaminen

Vaahtoaminen aktiivilieteprosessissa johtuu yleensä korkeasta lieteiästä, normaalia korkeammasta lämpötilasta, matalasta F/M-suhteesta ja korkeasta MLSS-konsentraatiosta

tai prosessiin päässeistä öljyistä, rasvoista ja pinta-aktiivisista aineista. Myös rihmamaisten bakteerien, kuten *Nocardia* ja *microthrix* on huomattu aiheuttavan vaahtoamista prosesseissa. (Judd & Judd, 2006) MBR-prosesseissa vaahtoaminen on yhdistetty erityisesti EPS:ien runsaaseen esiintymiseen, rihmamaisten bakteerien olemassaoloon sekä ilmastuksen vaikutukseen (Zhang et al. 2019; Di Bella & Torregrossa, 2013). Lisäksi kalvojen kemiallinen pesu on joissain tapauksissa aiheuttanut vaahtoamista MBR-prosessissa (Wang et al. 2014). Vaahtoaminen voi olla merkki myös lieteflokkien hajoamisesta prosessissa tai puutteellisesta ilmastuksesta, sillä heikko ilmastus lisää solukuolemia lietteessä (Lignell, 2020^c).

Vaahtoaminen MBR-prosessissa vaikuttaa lietteen ominaisuuksiin ja siten kalvojen likaantumisherkkyyteen. Vaahtoaminen heikentää lietteen suodatettavuutta, jolloin kalvojen permeabiliteettiarvojen lasku heikentää samalla myös koko laitoksen käsittelykapasiteettia. Vaahtoavan lietteen huonompi suodatettavuus verrattuna normaaliin lietteeseen selittyy sen suuremmalla hydrofobisuudella. (Judd & Judd, 2006; Zhang et al. 2019)

3.4 Saostuskemikaalien vaikutus

Suomen jätevedenpuhdistamoilla fosforin poisto jätevesistä tapahtuu pääosin kemiallisella saostuksella. Saostuskemikaaleina käytetään joko rauta- tai alumiinisuoloja. (VVY, 2016) Tyypillisimpiä saostuskemikaaleja ovat ferrikloridi, ferrisulfaatti, polyalumiinikloridi ja alumiinisulfaatti. Useat tutkimukset raportoivat saostuskemikaaleilla olevan positiivisia vaikutuksia membraanibioreaktoreiden toimintaan. Niillä on huomattu olevan EPS- ja SMP-pitoisuuksia vähentävä sekä flokkikokoa kasvattava vaikutus. Lisäksi saostuskemikaalien on huomattu vähentävän kalvojen huokostukkeutumista, palautumatonta likaantumista sekä suodatuskakkujen muodostumista kalvoille, mikä pienentää suodatusvastusta. Näiden tekijöiden yhteysvaikutukset näkyvät parantuneena lietteen laatuna ja suodatettavuutena sekä vähentyneenä kalvojen likaantumisherkkyytenä. Saostuskemikaalit parantavat myös permeaatin laatua flokkuloimalla ja adsorboimalla hydroksidisakkaan lietteestä epäpuhtauksia ja etenkin liukoisia komponentteja, jolloin ne erottuvat paremmin kalvosuodatuksessa. (Le-Clech et al. 2006; Mishima & Nakajima, 2009; Song et al. 2008; Teli et al. 2012)

Saostuskemikaaleilla on kuitenkin pH:ta alentava vaikutus ja pH:n lasku voi heikentää biologisen prosessin toimintaa (Iorhemen et al. 2016). Prosessiin saatetaan joutua syöttämään emäksisiä aineita pH:n säätämiseksi. Saostuskemikaalien yliannostus voi johtaa ylimääräisten kemikaalien kerrostumiseen kalvojen pinnalle (Iorhemen et al. 2016).

4. SUODATUSKAPASITEETIN PALAUTUS JA YLLÄPITO

Kalvojen suodatuskyky sekä lietteen laatu vaikuttavat keskeisesti membraanibioreaktorin suodatuskapasiteettiin. Toimivilla puhdistusmenetelmillä ylläpidetään kalvojen suodatuskykyä ja prosessin operoinnilla voidaan vaikuttaa lietteen laatuun.

4.1 Kalvojen puhdistaminen

Kalvojen likaantuminen on membraanibioreaktorin suurimpia haittapuolia ja yksi yleisimmistä syistä suodatuskapasiteetin laskuun. Kalvojen likaantuminen on väistämätön ongelma, joten kalvojen puhdistaminen kuuluu olennaisena osana membraanibioreaktorin toimintaan (Wang et al. 2014).

4.1.1 Menetelmät

Kalvoja voidaan puhdistaa fyysisesti, kemiallisesti, fysikaalis-kemiallisesti sekä biologisesti/biokemiallisesti. Näitä menetelmiä voidaan käyttää erikseen, mutta usein niitä yhdistellään parhaan mahdollisen puhdistustuloksen saavuttamiseksi. Kalvojen puhdistus voidaan suorittaa lietealtaassa suodatusmoduulien ollessa omilla paikoillaan tai ne voidaan nostaa pesun ajaksi pois altaista. (Wang et al. 2014)

Fyysinen puhdistus toteutetaan yleensä ilmastuksella, relaksaatiolla tai vastavirtahuuhtelulla. Ilmastus on laajasti käytetty menetelmä kalvojen puhdistamiseen ja sen avulla vähennetään konsentraatiopolarisaatiota (Wang et al. 2014) sekä irrotetaan kalvoihin kiinni jäänyttä kiintoainetta. Kalvojen puhdistaminen ilmastuksen avulla perustuu ilmakuplien hankaavaan vaikutukseen kalvopinnoilla sekä ilmakuplien aikaansaamaan lietteen turbulenttiseen virtaukseen. (Judd & Judd, 2006)

Kalvojen puhdistaminen relaksaatiolla ja vastavirtahuuhtelulla toteutetaan keskeyttämällä suodatus tietyin väliajoin. Tyypillisesti yksi suodatussykli MBR:ssa kestää 8-15 minuuttia, jonka jälkeen tulee 1-2 minuuttia kestävä puhdistusvaihe. Relaksaation aikana kalvoihin ei kohdistu imupainetta, jolloin kalvoihin kiinni jääneen lian on helpompi irrota kalvojen pinnalta ilmakuplien hankaavan vaikutuksen sekä turbulenttisen lietevirtauksen ansiosta. Vastavirtapesuissa suodatettua permeaattia työnnetään paineen avulla kalvoista väärinpäin läpi, millä pyritään irrottamaan kalvon pintaan tarttunutta likaa. Ilmastus pidetään päällä myös vastavirtahuuhtelun aikana, jolloin se tehostaa lian irtoamista. Relaksaatiota ja vastavirtahuuhtelua voidaan vuorotella kalvojen puhdistuksessa. Kuitenkin jokaisen suodatussyklin jälkeen käytetään aina jompaakumpaa menetelmää. (Lippel & Cerqueira, 2018) Vastavirtapesuja voidaan avustaa tai tehdä myös pelkästään ilmalla. Kuitenkin pelkästään ilmalla suoritettu vastavirtapesu saattaa kuivattaa osittain kalvoja, mikä voi aiheuttaa niiden haurastumista. (Wang et al. 2014) Tasomaiset kalvot eivät tyypillisesti ole vastavirtapestäviä, vaan niissä käytetään pääasiassa relaksaatiota. (Le-Clech et al. 2006)

Suodatusmoduulit voidaan myös nostaa pois lietealtaasta pesun ajaksi. Tällöin kalvoille voidaan suorittaa fyysinen puhdistaminen käsin, jolloin kalvot pyyhitään, suihkutetaan ja kiinni jääneet liat irrotetaan. Tällainen puhdistus suoritetaan yleensä 1-3 vuoden välein. (Wang et al. 2014) Fyysisen puhdistuksen suurin etu on se, ettei siinä tarvitse käyttää kemikaaleja. Fyysisellä puhdistuksella voidaan poistaa palautuvaa likaantumista, kuten muodostuneita suodatuskakkuja kalvon pinnalla. Palautumatonta likaantumista on hankala puhdistaa fyysisillä menetelmillä. (van den Brink et al. 2013)

Palautumatonta likaantumista kontrolloidaan kemiallisilla pesuilla. Kalvojen kemiallinen puhdistus jakautuu ylläpitopesuihin (maintenance cleaning) sekä liotuspesuihin (recovery cleaning). Ylläpitopesuja (CIP) suoritetaan viikoittain tai kuukausittain ja niiden tarkoituksena on palauttaa kalvojen permeabiliteetit lähelle alkuperäisiä arvoja. Liotuspesuja käytetään, kun ylläpitopesuilla ei saada kalvojen permeabiliteettiarvoja palautumaan riittävästi. Liotuspesuja tehdään yleensä kerran tai kahdesti vuodessa. Kemiallisten pesujen suoritustekniikat vaihtelevat kalvotyyppien perusteella. Onttokuitukalvojen CIP-pesu suoritetaan vastavirtahuuhtelun periaatteella, jolloin pesuliuos työnnetään paineen avulla kalvoista väärinpäin läpi. Tasomaiset kalvot eivät yleensä ole vastavirtahuuhdeltavia ja niille CIP-pesu suoritetaan pumppaamalla pesuliuos kalvoille ja antamalla sen liottaa kalvoja.

CIP-pesujen tyypillinen kesto aika riippuu suoritusmenetelmästä, mutta vaihtelee tyypillisesti 1-3 tunnin välillä. Liotuspesussa kalvoja pidetään pesuliouksessa, jolloin niihin tarttunut lika voi liueta irti kalvoista. (Wang et al. 2014) Liotuspesuissa käytetään vahvempia pesuliouksia kuin ylläpitopesuissa. Ylläpitopesuissa esimerkiksi natriumhypokloriitin konsentraatio pesuliouksessa on tyypillisesti 200-500 mg/l, kun liotuspesussa annostus on usein 2000-3000 mg/l. (Judd & Judd, 2006) Liotuspesujen kesto aika vaihtelee usein 8-24 tunnin välillä, riippuen kalvojen liotusajasta. (Wang et al. 2014)

Fysikaalis-kemialliset puhdistusmenetelmät yhdistävät fyysisiä ja kemiallisia puhdistusmenetelmiä. Membraanibioreaktoreissa yksi käytetyimmistä fysikaalis-kemiallisista puhdistusmenetelmistä on puhdistuskemikaalein tehostettu vastavirtahuuhdeltu (CEB). CEB:tä käytetään tyypillisesti päivittäin ja siinä käytetyn puhdistusliouksen kemikaalikonsentraatio on yleensä alhaisempi kuin ylläpito- tai liotuspesuissa. Esimerkiksi natriumhypokloriitin pitoisuus CEB-pesussa vaihtelee tyypillisesti 100-500 mg/l välillä. (Wang et al. 2014)

Kalvojen puhdistukseen on kehitelty myös biologisia/biokemiallisia puhdistusmenetelmiä. Näissä puhdistusmenetelmissä käytettävä puhdistusliuos sisältää bioaktiivisia aineita, kuten entsyymeitä, joilla voidaan tehostaa kalvoa likaavien aineiden poistamista. Biologisiin/biokemiallisiin puhdistusmenetelmiin lukeutuvat muun muassa entsyymaattinen puhdistus, bakteerien välisen ryhmäviestinnän rajoittaminen (quorum quenching) ja typpioksidin aikaansaama biofilmin irrottaminen. Menetelmiä ei ole hyödynnetty vielä täyden mittakaavan laitoksissa. (Wang et al. 2014)

Entsyymaattiset aineet ovat hyvin spesifisiä ja eri entsyymit vuorovaikuttavat vain tiettyjen aineiden kanssa. Tämän vuoksi puhdistuksessa käytettävien entsyymien valintaan vaikuttaa suuresti se, millaista likaa kalvoissa on. Entsyymit pystyvät rikkomaan tehokkaasti kalvon pintaan kertynyttä likakerrosta. Palautumatonta likaantumista voidaan poistaa entsyymaattisella puhdistuksella. (Wang et al. 2014)

Bakteerit viestivät keskenään pienten signaalintimolekyylien välityksellä ja tätä viestintää kutsutaan ryhmäviestinnäksi (quorum sensing = QS). Ryhmäviestinnän on osoitettu säätelevän geeniekspressiota, joka säätelee osittain bakteerien käyttäytymistä. Ryhmäviestinnällä on huomattu olevan vaikutusta mm. SMP:eiden ja EPS:ien tuotantoon

sekä joidenkin entsyymien eritykseen. Näiden lisäksi ryhmäviestintä vaikuttaa olevan avainroolissa biofilmin muodostumisen säätelemisessä. Rajoittamalla tätä ryhmäviestintää (quorum quenching), voidaan vähentää kalvojen biologista likaantumista ja ehkäistä biofilmin muodostumista. (Gkotsis et al. 2014)

4.1.2 Käytettävät kemikaalit

Kemiallisissa pesuissa käytettävät kemikaalit voidaan jakaa neljään kategoriaan: happoihin, emäksiin, hapettimiin ja muihin kemikaaleihin, joita voivat olla mm. vedenpehmennys- ja pinta-aktiiviset aineet. Myös entsyymit lukeutuvat muihin kemikaaleihin. (Wang et al. 2014)

Happopesuilla poistetaan epäorgaanista likaa, joka syntyy kemiallisella saostuksella sekä biologisesti ohjautuvalla mineralisaatiolla. Kemiallista saostumista aiheuttavat epäorgaaniset aineet, kuten moniarvoiset kationit. Mineralisaation seurauksena syntyvät saostumat muodostuvat biopolymeerien ja suolojen reagoidessa keskenään. Avainmekanismeja näiden eri saostumien poistossa ovat neutralointi sekä kaksinkertaiset hajoamisreaktiot. Happopesuissa laajasti käytettyihin happoihin kuuluvat oksaalihappo, sitruunahappo, typpihappo, suolahappo, fosforihappo ja rikkihappo. Näistä oksaali- ja sitruunahappo voivat neutralointi- ja hajoamisreaktioiden lisäksi muodostaa komplekseja metalli-ionien (kuten raudan) kanssa, jolloin niiden puhdistustehokkuus saattaa olla muita happoja parempi. (Wang et al. 2014)

Emäspesuilla puhdistetaan kalvoihin kertynyttä orgaanista likaa. Natriumhydroksidi on hyvin yleisesti käytetty puhdistuskemikaali. Orgaaniset aineet, kuten proteiinit ja hiilihydraatit voidaan hydrolysoida ja liuottaa pienemmiksi molekyyleiksi. Rasvat ja öljyt voivat reagoida emästen kanssa saippuoitumisreaktiolla, muodostaen vesiliukoisia misellejä. Emäspesun puhdistusmekanismi perustuu korkean pH:n avulla orgaanisen lian funktionaalisten ryhmien deprotonointiin, jolloin likapartikkelit varautuvat negatiivisesti. Hylkimisvoimat likapartikkeleiden ja likakerroksen välillä yhdistettynä ilmastuksella aikaansaatuun poikittaisvirtaukseen riittävät irrottamaan likaa kalvon pinnalta. (Wang et al. 2014)

Hapettimet poistavat orgaanista ja biologista likaa hapetuksella ja/tai desinfioinnilla. Käytetyimpiä hapettimia kalvojen puhdistuksessa ovat natriumhypokloriitti ja

vetyperoksidi. Muita käytettyjä kemikaaleja ovat polyvinyylipyrrolidoni, peretikkahappo ja natriumperboraatti. Hapettimilla suoritetussa puhdistuksessa orgaanisen lian funktionaaliset ryhmät hapetetaan ketoni-, aldehydi- ja karboksyyliyhdyksiksi. Näiden ryhmien läsnäolo yhdisteissä lisää yhdisteiden hydrofiilisyyttä, mikä vähentää niiden kalvoa likaavaa vaikutusta. Hapettimet voivat myös hajottaa kolloideja ja mikrobiflokkeja hienommiksi hiukkasiksi ja liukoisiksi orgaanisiksi aineiksi, mikä helpottaa niiden lisähapetusta. Hapetusprosessin aikana pienen molekyylipainon omaavat orgaaniset aineet voidaan muuttaa kokonaan hiilidioksidiksi ja vedeksi. On kuitenkin huomattu, että natriumhypokloriitin käyttö voi johtaa adsorboituvien orgaanisten halogeeniyhdisteiden (AOX) ja trihalometaanien (THM) muodostumiseen. Vetyperoksidi voi tämän vuoksi olla parempi vaihtoehto, sillä se ei tuota myrkyllisiä yhdisteitä. (Wang et al. 2014)

Muut kemikaalit kategoria sisältää metallisia vedenpehennysaineita, pinta-aktiivisia aineita sekä muita detergentejä. Metallisista vedenpehennysaineista kalvojen puhdistuksessa voidaan käyttää sitruunahappoa, etyleenidiamiinitetraetikkahappoa (EDTA), natriumtripolyfosfaattia (STP) ja pentetihappoa (DTPA). Nämä muodostavat voimakkaita komplekseja metalli-ionien kanssa, jolloin alun perin metalli-ioneihin yhdistyneet biopolymeerit vapautuvat niiden alkuperäiseen muotoonsa. Tällä tavoin voidaan hajottaa biomolekyylien keskinäisiä sekä kalvon ja biomolekyylien välisiä sidoksia, jolloin likakerros menettää muotonsa ja biopolymeerit voidaan siirtää pois kalvon pinnalta turbulentsilla virtauksella. Pinta-aktiivisista aineista voidaan hyödyntää mm. natriumlauryylisulfaattia (SDS). Pinta-aktiivisten aineiden tiedetään liuottavan makromolekyyliä ja mahdollistavan siten misellien muodostumisen makromolekyylien sekä rasvojen, öljyjen ja proteiinien kanssa. Tämä helpottaa kalvojen puhdistamista näistä aineista. Pinta-aktiiviset aineet pystyvät myös hajottamaan orgaanisen lian ja metalli-ionin välisiä sidoksia. (Wang et al. 2014)

Lisäksi eri kemikaaleja voidaan käyttää yhdessä tai peräkkäin, jolloin voidaan saavuttaa parempia puhdistustuloksia kuin erikseen käytettyinä. Emäksen ja hapettimen yhdistämisellä on saatu aikaan merkittävää vuon kasvua. Happoja ja hapettimia on kokeiltu sekä yhdistää että käyttää peräkkäin hyvin tuloksin. Myös happoja ja emäksiä on kokeiltu sekoittaa ja käyttää peräkkäin. Kalvojen puhdistukseen on kehitetty myös joitakin

kaupallisia pesuaineita. Nämä pesuaineet voivat hyödyntää erilaisten kemikaalien etuja ja siten tehostaa kalvojen puhdistumista. (Wang et al. 2014)

4.1.3 Kalvojen likaantumisen kontrollointi

Kalvojen likaantumisen hallitseminen ja ehkäiseminen voidaan jakaa neljään päästrategiaan: (Radjenović et al. 2007; Judd & Judd, 2006)

1. Riittävä syöttöveden esikäsittely
2. Puhdistusstrategioiden optimointi
3. Konsentraatiopolarisaation rajoittaminen
4. Lietteen laadun muokkaaminen

Jätevesi kulkee aina välppäyksen läpi puhdistusprosessiin mennessään. Kuitenkin pelkän välppän käyttö MBR-prosesseissa on huomattu lisäävän huomattavasti riskiä erilaisten tukosten muodostumiseen. (Judd & Judd, 2006) Tämän vuoksi MBR-prosesseissa tulisi käyttää lisäksi hienovälppäystä ja/tai siivilöintiä. (Impero & Hammler, 2015) Jätevettä voidaan esikäsitellä myös esiselkeyttämällä (Gkotsis et al. 2014). Suuremmilla jätevedenkäsittelylaitoksilla onkin käytössä esiselkeytysaltaat.

Kalvojen valmistajilla on omat ohjeensa siitä, miten heidän kalvojaan tulisi puhdistaa ja millaisia puhdistusmenetelmiä niille voidaan käyttää. Puhdistusstrategioihin voi sisältyä monia eri puhdistusmenetelmiä sekä niiden yhdistelmiä. Puhdistusstrategian laadintaan vaikuttaa valmistajan ohjeistuksen lisäksi laitokselle tulevan jäteveden koostumus sekä kalvoihin kertyneen lian laatu, sillä eri menetelmillä poistetaan erilaista likaa. (Radjenović et al. 2007) Puhdistusmenetelmiä on tutkittu runsaasti ja kiinnostavimpina muuttujina pidetään eri kemikaaleja ja niiden liuosvahvuuksia (Lignell, 2020^o), puhdistuksen kestoa, puhdistustiheyttä sekä takaisinhuuhtelun virtausta (Radjenović et al. 2007). Myös lämpötilalla ja paineella on vaikutusta kalvojen puhdistamisessa (Lignell, 2020^o). Eri laitoksilla toimivat erilaiset puhdistusstrategiat ja optimaalisen puhdistusstrategian löytyminen voi vaatia paljon puhdistuskokeita laitoksella. (Radjenović et al. 2007)

Konsentraatiopolarisaatiota voidaan vähentää pienentämällä permeaattivuota tai lisäämällä virtauksen turbulentsisuutta ilmastusta lisäämällä. Pienentämällä permeaattivuota voidaan

vähentää hiukkasten kalvopinnoille suuntautuvaa virtausta. Vuon pienentyessä on laitokseen kuitenkin asennettava lisää kalvoja, jolloin pääomakustannukset lisääntyvät. Permeaattivuota ei voida pienentää ilman kalvojen lisäämistä, sillä se on riippuvainen laitokselle tulevan jäteveden määrästä. Ilmastuksen voimakkuus on yksi keskeisimmistä toimintaparametreista suodatuskakkujen muodostumisen ehkäisemiseksi kalvojen pinnalle. Kalvoilmastuksen lisääminen on kuitenkin kohtuuttoman kallista, sillä se vaatii paljon energiaa. (Radjenović et al. 2007)

Lietteen laatua muokkaamalla voidaan vähentää sen kalvoja likaavia vaikutuksia. Lietettä voidaan muokata kemikaalein tai sen biologisia ominaisuuksia voidaan muuttaa prosessiparametrejä muuttamalla. (Radjenović et al. 2007) Lietteen kunnostuksesta kerrotaan enemmän kappaleessa. 4.2.

4.2 Lietteen kunnostus

Lietteen ominaisuuksia voidaan muokata prosessiparametrejä muuttamalla tai lisäämällä lietteeseen erilaisia kemikaaleja. Prosessiparametreistä lieteiällä sekä -konsentraatiolla on vaikutusta moneen asiaan, kuten lietteen mikrobikantaan sekä EPS:ien tuotantoon ja vapautumiseen lietteessä. Kuitenkin käytännössä prosessiparametrejä muutellaan hyvin harvoin pelkästään kalvoja likaavien hiukkasten pitoisuuksien hallitsemiseksi. Yleensä lietteen kunnostus suoritetaan kemikaalilisäyksillä. (Judd & Judd, 2006; Radjenović et al. 2007; Hai & Yamamoto, 2011)

Lietteen laatua voidaan muokata lisäämällä sinne erilaisia kemikaaleja. Suomessa jätevedenpuhdistamoilla fosforin poisto tapahtuu pääsääntöisesti saostuskemikaaleilla saostamalla (VVY, 2016). Lisäksi näiden saostuskemikaalien on huomattu parantavan membraanibioreaktoreiden toimintaa. Saostuskemikaalien kyky tehostaa MBR:ien toimintaa perustuu pitkälti niiden flokkien kokoa kasvattavaan vaikutukseen sekä EPS- ja SMP-pitoisuuksien vähentämiseen. Nämä vaikutukset parantavat lietteen suodatettavuutta ja vähentävät kalvojen likaantumista. (Wu et al. 2006; Le-Clech et al. 2006; Mishima & Nakajima, 2009)

Alumiinitrisulfaatti ja ferrikloridi ovat tutkituimpia saostuskemikaaleja membraanibioreaktorien toiminnan tehostamisessa. (Le-Clech et al. 2006; Judd & Judd, 2006; Song et al. 2007; Iorhemen et al. 2016) Näiden lisäksi on tutkittu muun muassa polymeerisiä koagulantteja, kuten alumiinikloridia sekä ferrisulfaattia (Wu et al. 2006).

Alumiinitrisulfaatti ja ferrikloridi adsorboivat vedestä hiukkasia, kolloideja ja liukoisia orgaanisia aineita. Niiden on huomattu vähentävän merkittävästi EPS- ja SMP-pitoisuuksia lietteessä. Lisäksi ne kasvattavat lieteflokkien kokoa. (Le-Clech et al. 2006; Mishima & Nakajima, 2009) Polymeerisillä saostuskemikaaleilla on lieteflokkien kokoa kasvattavan vaikutuksen lisäksi kyky hillitä geelikerroksen muodostumista, hidastaa lian kehittymistä, poistaa pysyvää likaa kalvojen pinnalta ja parantaa lietteen suodatettavuutta. (Wu et al. 2006) Niillä ei kuitenkaan huomattu olevan suurta vaikutusta EPS- ja SMP-pitoisuuksiin. (Teli et al. 2012)

Lietteen laatua voidaan saostuskemikaalien lisäksi muokata lisäämällä adsorboivia aineita. Nämä adsorboivat itseensä erityisesti orgaanisia yhdisteitä, mutta myös muita epäpuhtauksia. Adsorboivien aineiden on huomattu olevan tehokkaita vähentämään EPS- ja SMP-pitoisuuksia, mikä pienentää merkittävästi kalvojen likaantumisriskiä. Käytetyin ja tutkituin adsorboiva aine on aktiivihiili, mutta myös zeoliitteja, kationisia polymeeripohjaisia aineita sekä kitosaania on käytetty. (Gkotsis et al. 2014; Iorhemen et al. 2016; Le-Clech et al. 2006; Hai & Yamamoto, 2011)

Aktiivihiilen lisäyksellä lietteeseen on huomattu saavutettavan monia hyviä vaikutuksia membraanibioreaktorissa. Aktiivihiili sitoo itseensä liukoisia orgaanisia aineita ja vähentää tehokkaasti EPS- ja SMP-pitoisuuksia lietteessä. Tämän lisäksi aktiivihiili saa aikaan biofilmin muodostumista hiukkasten pinnalle, jolloin mikrobit ovat suojattuina väliaineessa esiintyviltä haitallisilta ja myrkyllisiltä aineilta. Myös mikrobit, jotka kasvavat hitaasti, mutta ovat aktiivisia hajottamaan vaikeasti hajoavia aineita jäävät reaktoriin. Aktiivihiilen ja biofilmin läsnäolo lisäävät epäpuhtauksien adsorptiota lietteessä sekä parantavat muodostuvan lietteen laskeutuvuutta sekä kuivattavuutta. (Lippel & Cerqueira, 2018) Optimaalinen annostus aktiivihiilille lietteeseen vaihtelee hieman eri tutkimuksissa, mutta sekä 0,75 g/l ja 1,2 g/l on esitetty (Li et al. 2005; Iorhemen et al. 2016).

Aktiivihiihlä voidaan käyttää rakeisena tai jauhettuna versiona. Tutkimuksissa on hyödynnetty pääsääntöisesti jauhemaista aktiivihiihlä, sillä sen on ajateltu tehoavan paremmin kapeissa kalvoväleissä esiintyvään likaantumiseen sekä suurten hiilikappaleiden on epäilty vahingoittavan kalvoja. Jauhemaisen aktiivihiihlen lisäämisen on huomattu kasvattavan permeaattivirtaamaa, parantavan lietteen suodatettavuutta sekä vähentävän flokkien kokoonpuristuvuutta, mikä lisää muodostuvien suodatuskakkujen huokoisuutta. (Lippel & Cerqueira, 2018) Rakeisella aktiivihiihellä on huomattu olevan samanlaisia vaikutuksia kuin jauhemaisella aktiivihiihellä, minkä lisäksi sen on havaittu tehostavan ilmastuksella suoritettavaa kalvopuhdistusta lisäämällä hankausvaikutusta kalvoihin. Tämän ansiosta on myös esitetty, että ilmastuksen määrää olisi mahdollista vähentää. Rakeisista materiaaleista ei kuitenkaan tiedetä, voivatko ne vahingoittaa kalvoja. Tarvitaan vielä lisää tutkimusta, jotta voidaan löytää kalvoille sopiva rakeinen materiaali sekä kyseiselle materiaalille optimaalinen ilmastuksen voimakkuus. (Iorhemen et al. 2016; Iorhemen et al. 2017)

Zeoliitteja voidaan hyödyntää lietteen ominaisuuksien parantamiseen. Zeoliiteilla on saatu vähennettyä SMP-pitoisuutta sekä kasvatettua flokkien kokoa. Niiden huomattiin myös lisäävän muodostuneiden suodatuskakkujen huokoisuutta. Nämä ominaisuudet ovat vähentäneet merkittävästi kalvojen likaantumista. (Rezaei & Mehrnia, 2014)

Adsorboivien aineiden käyttö sopii todennäköisesti parhaiten satunnaisten häiriöiden ratkaisemiseksi, joten niitä ei ole kannattavaa syöttää jatkuvasti prosessiin (Hai & Yamamoto, 2011). Adsorboivilla aineilla voidaan saavuttaa hyötyjä, mutta saatuja hyötyjä on verrattava aineiden lisäyksistä aiheutuneisiin kustannuksiin, jotta saataisiin kokonaiskuva kannattavuudesta (Lippel & Cerqueira, 2018).

4.3 Ilmastuksen optimoiminen

Ilmastuksella on tärkeä rooli membraanibioreaktorissa, sillä biologinen prosessi tarvitsee happea toimiakseen ja sillä ehkäistään kalvojen likaantumista. Ilmastukselle on tärkeää löytää optimaalinen taso, sillä liian heikko ilmastus heikentää biologisen prosessin toimintaa sekä kalvojen puhdistaminen on puutteellista. Liian voimakkaan ilmastuksen on taas huomattu rikkovan flokkeja ja siten vapauttavan EPS:iä ja SMP:eitä, joiden tiedetään

lisäävän kalvojen likaantumista. Voimakas ilmastus lisää myös energiakustannuksia. (Iorhemen et al. 2016; Le-Clech et al. 2006)

Ilmastuksen optimoinnissa tulee kiinnittää huomiota myös ilmakuplan kokoon. Pienempi kupla mahdollistaa tehokkaamman hapen siirtämisen, kun taas suurempi kupla puhdistaa paremmin kalvoja. (Judd & Judd, 2006) Tämän vuoksi biologisessa puhdistuksessa käytetäänkin yleensä hienokuplailmastimia ja kalvojen puhdistuksessa karkeakuplailmastimia. Joissakin tutkimuksissa on kuitenkin tultu siihen lopputulokseen, että hienokuplailmastimet vähentäisivät kalvojen likaantumista paremmin kuin karkeakuplailmastimet (Zhang et al. 2019; Le-Clech et al. 2006). Toisaalta hienokuplailmastimet voivat aiheuttaa vaahtoamista membraanibioreaktoreissa (Zhang et al. 2019).

Kalvojen ilmastuksessa olisi tärkeää, että se jakautuisi tasaisesti kalvoille (Le-Clech et al. 2006). Pohjalta nousevien ilmakuplien jakautuessa epätasaisesti kalvomoduulissa, johtaa se alueisiin, joissa ei ole ollenkaan virtausta tai virtausnopeudet ovat hyvin heikkoja. Puutteellinen virtausnopeus lisää lietteen kerrostumista kalvon pintaan, mikä aiheuttaa kalvon suodatuskyvyn heikkenemistä. (Tacke et al. 2008) Ihanteellisessa tilanteessa ilmakuplat pyyhkisivät kalvoja joka kohdasta, jolloin kalvojen pintaan ei pääsisi kertymään likaa. Käytännössä kuitenkin ilmastuksen jakautumista kalvoille on haastava arvioida laitoksilla.

Ilmastusreiät voivat myös tukkeutua jäteveden mukana tulevista kuiduista ja muista kiintoainekappaleista (Lignell, 2020^c). Tukkeutumiset aiheuttavat ja lisäävät kalvojen epätasaista ilmastusta. Tällöin kasvaa riski siihen, että osa kalvoista jää kokonaan ilman ilmapuhdistusta. Ilmastusreiät tulisi puhdistaa ja ilmastuksen toiminta tarkastaa väliajoin. Tällöin olisi hyvä kiinnittää huomiota myös ilmastuksen jakautumiseen ja tarvittaessa tehdä muutoksia, jotta ilmastus saataisiin jakautumaan paremmin kalvoille.

4.4 Vaahtoamisen estäminen

Vaahtoamisen määrän on huomattu korreloivan EPS-pitoisuuksien kanssa membraanibioreaktoreissa (Judd & Judd, 2006; Zhang et al. 2019; Di Bella & Torregrossa,

2013). Lisäksi rihmamaisten bakteerien on todettu edesauttavan vaahdon muodostumista. (Di Bella & Torregrossa, 2013) Myös ilmastuksella on huomattu olevan vaikutusta membraanibioreaktorin vaahtoamiseen. On huomattu, että hienokuplailmastimet aiheuttavat herkemmin vaahtoaamista MBR-altaissa kuin karkeakuplailmastimet (Zhang et al. 2019).

Vaahtoaamista voidaan ehkäistä vähentämällä EPS:ien konsentraatiota lietteessä kunnostamalla lietettä erilaisia kemikaaleja käyttäen (Radjenović et al. 2007). Rihmamaisten bakteerien aiheuttamaa vaahtoaamista voidaan torjua sekä kemikaalein, mutta myös prosessiolosuhteita muuttamalla, jolloin pyritään estämään rihmamaisten bakteerien kasvun mahdollistavat olosuhteet. (Hakala et al. 2012). Lisäksi vaahtoaamista voidaan hillitä erilaisilla vaahdonestoaineilla (Judd & Judd, 2006).

4.5 Saostuskemikaalien syöttöpaikka

Saostuskemikaaleilla, kuten polyalumiinikloridilla (PAX) ja ferrisulfaatilla (PIX) on jäteveden pH:ta alentava vaikutus, sillä ne ovat hyvin happamia (pH~1) (Kemira, 2013^a; Kemira, 2013^b). Biologisessa puhdistuksessa pH:n tulisi olla 7-8, jotta puhdistus toimisi tehokkaasti (VVY, 2018). Jos prosessissa on hyvä alkaliteetti, ei fosforin saostuskemikaalien syöttö vaikuta suuresti biologisen prosessin pH:seen. Nitrifikaatio on osa biologista jätevedenpuhdistusta ja siinä ammoniumionit hapettuvat nitriitti-ioneiksi vapauttaen samalla vetyioneita. Vetyionit kuluttavat jäteveden alkaliteettia, jolloin prosessin pH saattaa laskea (Rantanen, 2010). Tämän takia prosessiin joudutaan usein syöttämään emäkisiä aineita, jotta prosessin pH saadaan pidettyä optimaalisella tasolla biologiselle prosessille. Prosessin pH:n säätöön voidaan käyttää muun muassa natriumhydroksidia, kalsiumoksidia tai natriumkarbonaattia. (Laitinen et al. 2014)

Kemikaalien syöttöpaikkoihin prosessissa tulisi kiinnittää huomiota. Kemikaaleja, jotka mahdollisesti voisivat reagoida keskenään tarkoituksettomasti tai häiritä toistensa toimintaa, ei tulisi syöttää prosessissa liian lähekkäin. Sekä PAX:n että PIX:n käyttöturvallisuustiedotteissa vaarallisten reaktioiden mahdollisuuksiin on merkitty, että emäkset aiheuttavat eksotermisiä reaktioita. Lisäksi vältettäviin aineisiin on listattu kloriitit, hypokloriitit, sulfiitit, galvanoidut pinnat sekä vahvat emäkset. (Kemira, 2013^a; Kemira, 2013^b)

Natriumhydroksidi on vahva emäs, jonka pH vaihtelee 12-14 välillä, riippuen sen vahvuudesta. Natriumhydroksidin käyttöturvallisuustiedotteessa mainitaan sen reagoivan eksotermisesti vahvojen happojen kanssa, reagoivan voimakkaasti veden kanssa sekä vapauttavan vetykaasua ollessaan kosketuksissa metallien kanssa. Lisäksi natriumhydroksidi saattaa reagoiva vaarallisesti muun muassa alumiinin, sinkin, happojen, magnesiumin sekä hapettavien aineiden kanssa. (Aqua Nova Oy, 2016)

Näiden tietojen perusteella saostuskemikaalien syöttö prosessiin tulisi tapahtua riittävän etäällä emäksen syöttökohdasta, sillä kemikaalit saattavat reagoida keskenään tarkoituksettomasti liian lähekkäin syötettynä. Myös emäksen syöttö liian lähelle saostuskemikaalien syöttöä voi häiritä fosforin saostumista prosessissa.

5 VIITASAAREN MUSTASUON JÄTEVEDENPUHDISTAMO

Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamo on rakennettu 1960-luvun lopulla. Tällöin jätevedet käsiteltiin selkeyttämällä rautasulfaatilla tehostaen. Puhdistamon laajennus valmistui 1990. Puhdistamoa on tämän jälkeen saneerattu useaan kertaan. Puhdistamo muutettiin aktiivilietteellä toimivaksi biologis-kemialliseksi rinnakkaissaostuslaitokseksi vuonna 2001. Tällöin puhdistamolle rakennettiin toinen selkeytysallas sekä ilmastusaltaat. Sakokaivolietteen vastaanotto ja ruuvipuristin lietteen kuivaukseen uusittiin 2011. Tulevalle jätevedelle hankittiin uusi ruuvivälppä vuonna 2013. Vuonna 2014 laitokselle investoitiin automaattisesti käynnistyvä varavoimakone, jonka avulla puhdistusprosessia pystytään ajamaan sähkökatkojenkin aikana. Valvomon koneet ja ohjelmistot uusittiin 2015. Vuonna 2016 ilmastusaltaiden lautaset vaihdettiin sekä jälkiselkeytysaltaita modernisoitiin. Viimeisin saneeraus valmistui 2018, kun jätevedenpuhdistusprosessi muutettiin toimimaan MBR-tekniikalla. Tällöin ylimääräisiksi jääneitä selkeytysaltaita voidaan hyödyntää prosessissa tasausaltaina. Vuoden 2018 aikana uusittiin myös esikäsitteilylaitteistot. (Wiitaseudun energia, 2018; Huuskonen & Mäkelä, 2020)

Jätevedenpuhdistamon lupaehdot MBR-prosessin käyttöönoton jälkeen on esitetty taulukossa III. Lupaehdot on jaettu kolmeen eri vaiheeseen, jolloin ne tiukentuvat asteittain. Ensimmäinen vaihe on voimassa heti käyttöönoton jälkeen vuoden 2019 loppuun. Toinen vaihe on voimassa vuosina 2020-2021. Kolmas vaihe eli lopulliset lupaehdot astuvat

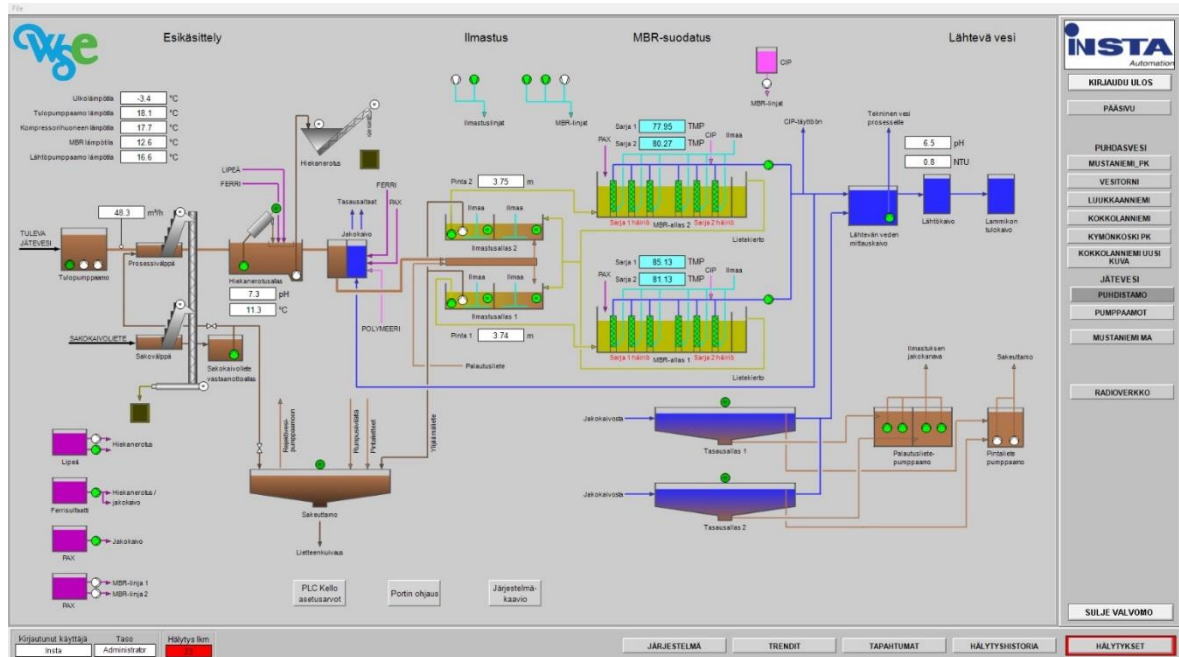
voimaan vuonna 2022. Ensimmäisen vaiheen lupaehdot ovat voimassa myös silloin, kun prosessia ajetaan hybridi- tai aktiivilieteprosessina. Muut kuormitusarvot lasketaan neljännesvuosikeskiarvoina, paitsi ammoniumtyppi, joka lasketaan vuosikeskiarvona. Tuloksiin otetaan mukaan myös mahdolliset poikkeustilanteet. (Wiitaseudun energia, 2018)

Taulukko III. Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamon lupaehdot (Wiitaseudun energia, 2018).

Kuormite	Lupaehdot 1. vaihe		Lupaehdot 2. vaihe		Lupaehdot 3. vaihe	
	Pitoisuus (mg/l)	Reduktio (%)	Pitoisuus (mg/l)	Reduktio (%)	Pitoisuus (mg/l)	Reduktio (%)
BOD _{7ATU}	< 15	> 90	< 12,5	> 90	< 10	> 95
Kokonaisfosfori	< 0,8	> 90	< 0,6	> 90	< 0,5	> 95
Kiintoaine	< 35	> 90	< 15	> 90	< 10	> 90
COD _{Cr}	< 125	> 75	< 100	> 75	< 90	> 85
Ammoniumtyppi	-	-	-	-	< 8	> 80

5.1 Prosessi

Kuvassa 7 on esitetty Viitasaaren jätevedenpuhdistamon prosessikaavio. Jätevedenkäsittelyprosessi alkaa tulopumppaamosta, josta jätevesi menee porrasvälpille. Välppäyksellä poistetaan jätevedestä kiintoainekappaleita. Porrasvälpiltä jätevesi jatkaa hiekanerotusaltaaseen, jonka loppuosaan syötetään fosforin saostuskemikaalit ferrisulfaatti (PIX) ja polyalumiinikloridi (PAX) sekä natriumhydroksidi, jolla säädetään prosessin pH:ta. Hiekanerotuksen jälkeen jätevesi menee 1-2 mm siivilöiden läpi, jotta jätevedestä saadaan erotettua kalvoprosessia haittaavia kuituja. Tämä poistettava kuituaines syötetään sakeuttamoon helpottamaan lietteen kuivausta. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019; Huuskonen & Mäkelä, 2020)



Kuva 7. Viitasaaren jätevedenpuhdistamon prosessi.

Hiekkanerotuksen ja siivilöinnin jälkeen jätevesi menee jakokaivon kautta ilmastusaltaisiin. Ilmastuksessa on kaksi rinnakkaista linjaa ja jätevesi jaetaan tulokanavasta molempiin linjoihin. Ilmastusaltaat on jaettu kahteen lohkokoon, joista ensimmäistä on pidetty ilmastamattomana eli anoksisena ja toista lohkoa ilmastettuna eli aerobisena, ammoniumtypen nitrifikaation ja denitrifikaation mahdollistamiseksi. Aerobisten lohkojen ilmastusta ohjataan happimittausten perusteella. Tarvittaessa myös anoksisia lohkoja voidaan ilmastaa. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Tarvittaessa jakokaivon sulkuluukkaa säätämällä voidaan pienentää ilmastusaltaille menevää virtaamaa ja ohjata virtaus menemään toiseen tasausaltaaseen ylivuotona. Tämä ohitusvesi voidaan käsitellä kemiallisesti saostamalla, selkeyttää sekä tarvittaessa desinfioida. Liian suuret kylmät vesimäärät sekä huonolaatuiset vedet voivat häiritä aktiivilieteprosessin toimintaa ja ohitusvirtauksen avulla prosessin toimintaa voidaan suojella. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Ilmastusaltaseen menevä linja on mahdollista sulkea kokonaan, jolloin jätevesi ohjautuu ohituskaivon kolmipadosta ylivuotona tasausaltaseen. Biologinen prosessi on mitoitettu toimimaan enintään 115 m³/h virtaamalle, joten vanhoja selkeytysaltaita voidaan käyttää

tasausaltaina tasaamaan virtauspiikkejä tai aktiivilietteen jälkiselkeytykseen. On myös mahdollista kierrättää aktiivilietettä tasausaltaan kautta, jolloin lietemassalle saadaan suurempi tilavuus, mikä auttaa kevään kylmien virtaamien käsittelyssä. Tasausaltaan pohjalle laskeutuva kiintoaines ja jätevesi pumpataan palautuslietepumpuilla ilmastukseen. Prosessin biologian mitoitusravot on esitetty taulukossa IV. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Ylijäämälietettä poistetaan ilmastuksen viimeisistä lohkoista. Poistopumppausta ohjataan lieteiän perusteella, jolloin poistettavan lietteen määrä suhteutetaan altaissa olevaan lietemassaan ja laitokselle tulevan orgaanisen aineen määrään. Ylijäämäliete pumpataan sakeuttamoon. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019; Lignell, 2020^c)

MBR-altaille liete pumpataan ylijäämäpumppujen jälkeen ilmastuksen viimeisistä lohkoista lietekiertopumpuilla. MBR:ssa on kaksi rinnakkaista suodatusallasta, joissa kummassakin on kaksi suodatinsarjaa. MBR-altaisiin pumpataan lietettä nelinkertaisesti puhdistamon tulovirtaamaan nähden, jottei kiintoainepitoisuus nouse liian suureksi kalvoaltaissa. Ylimääräinen liete virtaa painovoimaisesti MBR-altaisissa olevien hapenpoistolohkojen kautta takaisin ilmastusaltaiden alkuun, eli anoksisiin lohkoihin. Hapenpoistolohkojen tarkoituksena on kuluttaa lietteen sisältämä vapaa happi loppuun, jottei se häiritse denitrifikaation toimintaa anoksisissa altaissa. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Kalvojen läpi suodatettu permeaatti johdetaan lähtevän veden mittauskaivoon, josta otetaan teknistä vettä prosesseille. Mittauskaivosta puhdistettu vesi jatkaa lähtökaivon kautta lammikon tulokaivoon ja lopulta vesi puretaan vesistöön. Vaihtoehtoisesti permeaatti voidaan kalvoaltailta johtaa tasausaltaan kautta lähtökaivoon. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Taulukko IV. Viitasaaren jätevedenpuhdistamon mitoitusarvot (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019).

Parametri	Tila-/kuormitusarvo	Yksikkö
Ilmastusaltaiden tilavuus	560	m ³
Ilmastus vesisyvyys	3,75	m
MBR-altaiden tilavuus	230	m ³
MBR-altaiden vesisyvyys	4,5	m
Virtaama		
q _{ka}	42	m ³ /h
q _{mit MBR}	70	m ³ /h
q _{mit hybridi}	115	m ³ /h
q _{max hydr.max}	220	m ³ /h
Viipymä q _{ka}	16,6	h
Tilakuorma	0,42	kg _{BOD} /m ³ /d
Typen tilakuorma	0,08	kg _N /m ³ /d
Lieteikä, max	30	d
Aerobinen tilavuus	max. 700	m ³
Aerobinen lieteikä	10-30	d
Lietepitoisuus (ilmastus)	4-18	kg _{MLSS} /m ³
Lietekuorma	0,03-0,07	kg _{BOD₇} /kg _{MLSS} /d
Lämpötila-alue	5-14	°C
BOD ₇	320	kg/d
COD _{cr}	960	kg/d
Kok. fosfori	15	kg/d
Kok. typpi	60	kg/d
Kiintoaine	600	kg/d
AVL	4500	kg/d

Jätevedenkäsittelyprosessia voidaan ajaa kokonaan MBR-prosessina tai virtaaman ollessa 70-115 m³/h hybridiprosessina, jolloin MBR:n kautta poistuu 70 m³/h virtaamasta ja tästä ylimenevä määrä ohjataan ylivuotona ilmastuksesta tasausaltaaseen 1. Tällöin tasausaltaiden jakokaivoon aletaan syöttää fosforin saostuskemikaalia sekä polymeeriä. Tasausaltaan palautuslietepumput käynnistetään ja ajetaan maksimiteholla niin kauan, kun ilmastusaltat ovat ylivuototilassa. Kun virtaama laskee, tyhjentyä tasausallas ilmastukseen. Kun lietettä menee ohivuotona tasausaltaaseen, ohjataan permeaatti tällöin suoraan lähtökaivoon. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Kun virtaama on 115-220 m³/h, ohjataan sulkuluukku kuristamalla kaikki yli 115 m³/h menevä virtaus suoraan esikäsittelyn jälkeen toiseen tasausaltaaseen. Ilmastuksesta päätty

ylivuotona 45 m³/h virtaamasta ensimmäiseen tasausaltaaseen. Loput virtaamasta eli 70 m³/h suodatetaan MBR:n kautta. Jakokaivoon syötetään fosforin saostuskemikaalia sekä polymeeriä. Permeaatti ohjataan tällöin suoraan lähtevän veden mittauskaivoon. Jos tasausaltaat tulevat täyteen, päätyy ylivuoto näistä suoraan lähtökaivoon. Näin suurilla virtaamilla puhdistustulokset ovat heikompia kuin normaalitilanteissa. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

5.2 Kalvosuodatus

Kalvosuodatus koostuu kahdesta rinnakkaisesta kalvoaltaasta, joiden syvyys on 4,5 metriä ja yhteistilavuus 230 m³. Kummassakin kalvoaltaassa on kuusi suodatusyksikköä, jotka on jaettu kolmen suodattimen sarjoihin, jolloin yhdessä altaassa on siten kaksi suodatinsarjaa. Suodatinsarjoja on kaikkiaan neljä ja suodatusyksiköitä yhteensä 12. Yhdessä kalvosuodattimessa on 462 m² kalvoa ja suodatinkalvojen kokonaispinta-ala on 5544 m². Kalvosuodattimina käytetään Alfa Lavalin MFM-300-462 kalvosuodatusmoduuleita. Näiden kalvojen huokoskoko on 0,2 µm. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Jokaisen kalvosuodattimen pohjalla on karkeakuplailmastin, jonka ilmareikien halkaisija on 5 mm. Pohjalta pintaa kohden noustessaan ilmakuplat sekä niiden aikaansaama lietteen turbulenttinen virtaus puhdistavat kalvopintoja kiintoaineesta. Ilmastus on päällä aina koko suodatussyklin ajan. Ilmastuksen ansiosta kiintoaine ei pääse laskeutumaan altaan pohjalle ja vesi sekoittuu tehokkaasti. Vaikkei suodatus olisi päällä, suodattimia taukoilmastetaan noin puolen tunnin välein kolmen minuutin ajan, kiintoaineen laskeutumisen estämiseksi. Suodatinsarjat saavat olla korkeintaan tunnin ajan ilmastamatta. Lisäksi suodatinsarjaa ilmastetaan aina 30 sekunnin ajan, ennen suodatuksen aloitusta. Vähimmäisilmamäärä suodatinsarjaa kohden on noin 230 m³/h ja puhdistusilmastuksen paine tulisi olla 0,47-0,51 bar. Jos paine nousee tämän yli, ovat ilmastimet alkaneet tukkeutua. Tukkeutumisesta tulee hälytys ja tällöin putket tulee huuhdella. Ilmastusputkille voidaan suorittaa tarvittaessa myös vesipesu. Puhdistusilmastuksen paine ei saisi olla pidempiä aikoja yli 0,6 bar, sillä se rasittaa kompressoreita. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Liete ja puhdistettu jätevesi erotetaan toisistaan suodattamalla vesi kalvon läpi alipaineen avulla. Alipaine muodostetaan permeaattipumpuilla ja kaksi suodatinsarjaa käyttää samaa

pumppua. Suodatus tapahtuu suodatussyklissä, jossa vettä suodatetaan 10 minuutin ajan, jonka jälkeen tulee 2 minuutin relaksaatiojakso. Relaksaatiojakson aikana kalvoon ei kohdisteta alipainetta, jolloin kalvon pintaan jäänyt kiintoaines pystyy irtoamaan. Ilmastus on päällä aina myös relaksaation aikana, jolloin ilmakuplat sekä turbulenttinen lietevirtaus irrottavat kiintoainesta kalvoista. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Suodatusta ohjataan ilmastuksen tai tasausaltaiden pinnanmittauksella ja permeaattipumppujen käyntiteho riippuu käytössä olevien suodatinsarjojen määrästä. Kun ilmastusaltaan pinnankorkeus on alle 3,5 metriä, suodatus ei ole toiminnassa. Ensimmäinen suodatinsarja käynnistyy, kun ilmastuksen pinnankorkeus nousee 3,5 metriin ja sammuu, kun pinta laskee 3,45 metriin. Jos pinnan korkeus jatkaa nousemista 3,6 metriin, alkaa myös linjan toinen suodatinsarja suodattamaan. Kun pinta laskee ilmastusaltaassa 3,55 metriin, sammuu toinen suodatinsarja. Permeaattipumpun ohjausarvona käytetään tehopumppausta (asetusarvo 20 LMH), kun pinnankorkeus ylittää 3,65 metriä ja huippuvirtaamaa (asetusarvo 26 LMH), kun pinta nousee yli 3,68 metrin. Näitä ei kuitenkaan ole Viitasaarella pystytty käyttämään huonon suodattumisen vuoksi. Jos käytetään vain yhtä suodatinsarjaa kerrallaan, yhden suodatussyklin jälkeen vaihtuu käytettävä suodatinsarja. Suodatinsarjat voivat olla yhtäjaksoisesti lepotilassa korkeintaan kaksi tuntia. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019; Huuskonen & Mäkelä, 2020)

5.2.1 Kalvojen puhdistaminen

Suodatuskalvot tukkeutuvat ilmastuksesta huolimatta ja niiden toimintaa tarkkaillaan permeabiliteettien arvojen avulla, mikä ottaa huomioon permeaattivirtaaman kalvon pinta-alaa kohden (l/m^2h) sekä kalvoon kohdistuvan imupaineen (bar). Kun permeabiliteettien keskiarvo suodatuksen viimeisellä minuutilla laskee alle 200 LMH/bar, automaatio antaa 3 tason pesuhälytyksen, jolloin pesu pitää suorittaa viikon sisällä. Permeabiliteettien keskiarvon laskiessa 150 LMH/bar, pesu on suoritettava kahden päivän sisällä. Jos permeabiliteetin arvo laskee alle 100 LMH/bar, suodatus sammuu automaattisesti. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Kalvoja pestään kemikaalipesuilla, jotka voidaan tehdä CIP-pesuina (cleaning in place) tai liotuspesuina. Emäskemikaaleilla poistetaan orgaanista likaa ja hapoilla epäorgaanista.

Pesukemikaaleina Viitasaarella on käytetty natriumhypokloriittia sekä sitruunahappoa tai oksaalihappoa. Sitruuna-/oksaalihapon sekaan lisätään myös suolahappoa riittävän alhaisen pH:n (1,5-2) saavuttamiseksi. Natriumhypokloriitin sekaan voidaan tarvittaessa lisätä natriumhydroksidia, jotta saadaan riittävän korkea pH (11,5). Kuitenkin on huomattu, että pH nousee riittävän korkealle ilman lisäystä. Pesukemikaaliliuos valmistetaan CIP-asetamalla laimentamalla kemikaali sopiviin pitoisuuksiin 5 m³ säiliöön. Yhden suodatinsarjan pesuun käytetään 16 m³ laimennettua pesuliuosta, joten laimennussäiliöön valmistetaan pesuliuosta neljä kertaa aina yhden suodatinsarjan pesun aikana. Natriumhypokloriitin pitoisuus laimennetussa pesuliuoksessa on 0,05 %. Tällöin yhden suodatinsarjan pesuun tarvitaan noin 100 litraa 10 % natriumhypokloriittia. Sitruuna-/oksaalihapolle vastaava pitoisuus on 0,5-1 %. Sitruunahappoa sekä oksaalihappoa on saatavilla liuksena sekä kiinteänä aineena. Pesuissa liuksen käyttäminen on huomattavasti helpompaa, sillä kiinteä aine pitää liuottaa ennen sen käyttöä pesuissa. Sitruuna-/oksaalihapon sekaan lisätään 30 % suolahappoa 0,4 g/l. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Happopesujen tarpeellisuus riippuu laitokselle tulevan jäteveden koostumuksesta. Jos happopesu tarvitaan, aloitetaan pesu sillä ja sen jälkeen suoritetaan emäspesu. Lähtökohtaisesti kalvoille tehdään neljä kertaa vuodessa emäspesu ja joka toisella kerralla myös happopesu. Pesujen tarpeellisuutta seurataan kalvojen permeabiliteettiarvoista ja pesuja tehdään tarvittaessa useammin. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

CIP-pesut suoritetaan MBR-altaissa, jolloin suodatusyksiköjä ei tarvitse nostaa sieltä ylös, eikä allasta tyhjentää jätevedestä. Muilla suodatinsarjoilla voidaan jatkaa suodatusta normaalisti. CIP-pesut suoritetaan automaatiolla ja pesun etenemistä voidaan seurata askelnumeroiden perusteella. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Kerrallaan pestään aina yksi suodatinsarja eli kolme suodatusyksikköä. CIP-pesuissa pesukemikaalia pumpataan kalvojen permeaattipuolelle, josta se vastavirtapesuna kulkeutuu kalvon läpi altaaseen. Paine-ero kalvon yli on pesussa noin 20 mbar. Pesukemikaalia pumpataan kalvoille siihen asti, kunnes pesukemikaalisäiliön pinta saavuttaa pysäytysrajan (0,4 m). Tämän jälkeen valmistetaan uusi annos pesuliuosta ja liuksen valmistuttua pumpataan jälleen kalvoille. Tämä toistetaan yhteensä neljä kertaa yhdelle suodatussarjalle. Pesun jälkeen ohjelma siirtyy huuhtelusekvenssiin, jossa laimennussäiliötä täytetään pelkästään vedellä ja pumpataan kalvoille. Huuhtelu on valmis, kun laimennussäiliön pH on

6-8, jonka jälkeen säiliö tyhjenetään vielä pumppaamalla vesi kalvoille. (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019)

Kalvoille voidaan suorittaa myös liotuspesuja, jos CIP-pesuilla ei saada kalvoja puhdistumaan. Liotuspesuissa MBR-allas tyhjenetään jätevedestä ja täytetään käytettävällä pesuliuksella. Viitasaarella kalvoja on liotettu yhtäjaksoisesti maksimissaan 12 tuntia. Liotuspesut rajoittavat kuitenkin laitoksen käsittelykapasiteettia, sillä toinen linja on tällöin pois suodatuskäytöstä. Nämä pesut tulisi siitä syystä ajoittaa mahdollisimman pienen virtaaman aikaan, jotta pesussa olevia kalvoja olisi mahdollista pitää mahdollisimman kauan liotuksessa.

5.2.2 Kalvojen tilanne laitoksella työn alkaessa

Ensimmäiset puoli vuotta käyttöönotosta kalvojen permeabiliteettien arvot pysyivät noin 700 LMH/bar tasolla. Tänä aikana prosessiin syötettiin fosforin saostamiseksi PIX:iä (ferrisulfaattia) sekä pH:n säätämiseksi natriumhydroksidia (Aquazone/Jyväskylän energia Oy, 2019). Puolen vuoden jälkeen MBR-prosessin käyttöönotosta prosessiin alettiin syöttää myös PAX:ia (polyalumiinikloridia), jotta liukoinen fosfori saataisiin paremmin saostumaan prosessissa. Kuitenkin tämän jälkeen kalvojen permeabiliteetti-arvot ovat lähteneet laskuun.

Lokakuussa 2019 kalvojen permeabiliteetti-arvot vaihtelivat välillä 160-300 LMH/bar. Oletuksena oli, että heikko suodatuskapasiteetti johtuisi tukkeutuneista kalvoista. Laitoksella oli tehty erilaisia kemikaalipesuja, joilla oli yritetty puhdistaa kalvoja. Pesuilla ei kuitenkaan ollut saatu merkittävää vaikutusta kalvojen permeabiliteettien arvoihin. Laitoksella tehtyjen CIP-pesujen jälkeen kalvojen permeabiliteetti-arvot lietteen suodatuksessa ovat nousseet noin viiden päivän ajan vähitellen korkeammalle saavuttaen 250-300 LMH/bar arvoja. Kuitenkin tämän jälkeen permeabiliteettien arvot ovat lähteneet laskuun. Kalvojen valmistajan mukaan kemikaalipesuilla kalvojen permeabiliteettien arvot pitäisivät palautua lähelle alkuperäisiä arvoja, eli noin 700 LMH/bar. Suoritetuilla pesuilla ei päästy haluttuun lopputulokseen.

5.2.3 Tehdyt toimenpiteet laitoksella

Ensimmäiset kemikaalipesut kalvoille oli tehty lokakuussa 2018. Marraskuussa 2018 kalvojen permeabiliteetti-arvot olivat pudonneet alle 200 LMH/bar, joten loppuvuonna ja alkuvuodesta 2019 kalvoille tehtiin liotuspesuja. Tämän jälkeen permeabiliteettien arvot pysyivät hetken aikaa noin 500 LMH/bar tasolla. Kuitenkin toukokuussa 2019 kalvojen permeabiliteettien arvot putosivat jälleen noin 200 LMH/bar tasolle. Tähän saatiin pientä parannusta natriumhypokloriittipesuilla ja toukokuun puolivälissä permeabiliteettien arvot olivat noin 300 LMH/bar. Keväällä ja kesällä tehtiin CIP-pesuja noin parin kuukauden välein jokaiselle sarjalle. Kalvojen puhdistusta kokeiltiin tehdä myös toistamalla pesuja useina peräkkäisinä päivinä eri kemikaaleilla. Näillä ei kuitenkaan saatu merkittävää muutosta kalvojen permeabiliteettien arvoihin. (Hautala, 2019)

Loka-marraskuussa 2019 pesuja tehtiin välillä hyvin tiiviisti, mutta mitään suurta vaikutusta niillä ei ollut kalvojen permeabiliteettien arvoihin. Marraskuun puolivälissä kalvojen permeabiliteetti-arvot olivat noin 300 LMH/bar. Suurimmassa osassa pesuja pesukemikaalina oli käytetty natriumhypokloriittia, mutta myös sitruunahappoa ja oksaalihappoa oli kokeiltu. Muutamia pesuja oli kokeiltu tehdä myös pelkästään vedellä. (Hautala, 2019)

Perinteisten automaattisten CIP-pesujen lisäksi suodattimien sisään on kokeiltu syöttää suoraan pesukemikaaleja. CIP-pesujen linjoihin on myös asennettu ilmanpoistoletkuja. Erilaisten kalvopesujen lisäksi Viitasaarella on kokeiltu myös monia muita menetelmiä suodatuskapasiteetin palauttamiseksi. Kalvoaltaita on kokeiltu tyhjentää ja huuhtoa, ilmastuslinjoihin on asennettu huuhteluputkia ja ilmamäärien vaikutuksia on tutkittu. Myös manuaalisia siivilöitä on asennettu tehostamaan kuitujen poistamista. (Lignell, 2019^b)

Lietteen laatuun on pyritty vaikuttamaan lieteikää vaihtelemalla sekä syöttämällä prosessiin erilaisia polymeerejä ja vaahdonestoaineita. Rihmamaisten bakteerien vaikutusta on selvitetty mikroskopoinneilla. Myös hybridiajomallia on tutkittu. Sakokaivolietteiden vaikutuksia on tutkittu ja todettu niiden aiheuttavan suuria kuormitusvaihteluita prosessiin. (Lignell, 2019^b)

KOKEELLINEN OSA

6 KOKEELLISEN OSAN TARKOITUS

Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamo saneerattiin toimimaan MBR-prosessina vuonna 2018. Noin puolen vuoden jälkeen käyttöönotosta laitoksella alkoi ilmetä suodatuskapasiteetin heikkenemistä. Tämän työn kokeellisen osan tarkoituksena oli tutkia laboratoriokokeiden avulla, mistä Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamon heikentyvä suodatuskapasiteetti voisi johtua. Ensisijaisena tavoitteena oli etsiä syitä, mistä suodatuskapasiteetin heikkeneminen aiheutuu, jonka lisäksi tutkittiin myös erilaisia toimenpiteitä suodatuskapasiteetin palauttamiseksi ja sen ylläpitämiseksi. Alkuoletuksena työssä oli, että MBR:n suodatuskalvot olisivat tukossa ja likaisia, mikä aiheuttaisi laitoksen suodatuskapasiteetin heikkenemistä. Laboratoriokokeet aloitettiin tästä syystä laitoksella käytössä olleiden kalvojen tutkimisella.

Kalvojen tutkimisen lisäksi vertailtiin Viitasaaren membraanibioreaktorin lietettä muiden vastaavien prosessien lietteisiin, sillä lietteen laadulla on merkittävä vaikutus sen suodatettavuuteen ja siten koko prosessin toimintaan. Viitasaaren MBR:n lietettä vertailtiin sekä Parikkalan että Mikkelin MBR:ien lietteisiin. Lietteiden vertailulla haettiin tietoa siitä, miten eri puhdistamoiden lietteet suodattuvat toisiinsa nähden ja voisiko Viitasaaren laitoksen heikentyneen suodatuskapasiteetin taustalla olla lietteen laatu.

7 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Suodatuskapasiteetin heikkenemiseen johtaneita syitä etsittiin erilaisilla laboratoriokokeilla, jotka tehtiin Lappeenrannan-Lahden teknillisellä yliopistolla. Suodatuskokeissa käytettiin Viitasaaren laitoksella käytössä olleita kalvoja sekä uutta kalvoa. Tutkittavat lietteet tulivat Viitasaaren, Mikkelin ja Parikkalan membraanibioreaktoreista ja permeaatti Viitasaarelta.

7.1 Kokeissa käytetyt näytteet

Laboratoriokokeissa käytettiin Viitasaaren, Mikkelin ja Parikkalan membraanibioreaktoreiden lietteitä, Viitasaaren laitoksen permeaattia sekä vesijohtovettä. Yhdessä suodatuskokeessa käytettiin myös Viitasaaren jätevedenpuhdistamolle tullutta sakokaivolietettä. Kokeissa käytettiin myös lietteistä erotettua kirkasta osuutta eli kirkastetta. Kirkasteiden erottaminen lietteestä suoritettiin siten, että liete laskeutettiin, jonka jälkeen pinnalle muodostunut kirkas osa eroteltiin pohjalle laskeutuneesta kiintoaineesta.

Taulukkoon V on kerätty päivämäärät, jolloin lietteitä on haettu laitoksilta sekä milloin ja millaisia kokeita lietteille ja kirkasteille on tehty laboratoriossa. Lisäksi taulukossa on esitetty laitoksilla mitatut lietteiden kiintoainepitoisuudet hakupäivinä. Taulukossa esitetyt lietteen laskeumien arvot on mitattu laboratoriossa. Laskeumien mittaukset suoritettiin siten, että dekanterilasiin mitattiin yksi litra lietettä ja lietteen annettiin laskeutua puoli tuntia. Tämän jälkeen laskeutuneen kiintoainekerroksen tilavuus kirjattiin ylös.

Taulukko V. Tietoja lietteille tehdyistä laboratoriokokeista ja lietteiden ominaisuuksista kokeiden aikaan.

Lietteen haku	Paikkakunta	kiintoainepitoisuus	Kokeiden suoritus	Kokeet
16.10.2019	Parikkala	4 g/l	16.10.2019	Suodatus levyn 1 kalvolla, 6 h suodatus
4.11.2019	Viitasaari	4,5 g/l	4.11.2019	Suodatus levyn 1 kalvolla
			5.11.2019	6 h suodatus
4.11.2019	Mikkeli	3,3 g/l	5.11.2019	Suodatus levyn 1 kalvolla
			6.11.2019	6 h suodatus
25.11.2019	Viitasaari, Mikkeli		25-26.11.2019	Mikroskopointi
27.11.2019	Parikkala		27.11.2019	Mikroskopointi
9.12.2019	Viitasaari	6,9 g/l	10.12.2019	Kirkasteen suodatus levyn 2 kalvolla, "pestyn" lietteen suodatus levyn 2 kalvolla
			12.12.2019	Lietteen ja kirkasteen suodatus uudella kalvolla, ½ h laskeuma 900
2.3.2020	Viitasaari	7,8 g/l	3.3.2020	Kirkasteen sameus ja partikkelikokoanalyysi
			5.3.2020	Kirkasteen ja lietteen suodatus uudella kalvolla, lietteen suodatus aktiivihiihen kanssa, ½ h laskeuma 840
2.3.2020	Viitasaari		4.3.2020	Sakokaivolietteen kirkasteen suodatus
2.3.2020	Mikkeli	2,5 g/l	3.3.2020	Kirkasteen sameus ja partikkelikokoanalyysi
			4.3.2020	Kirkasteen ja lietteen suodatus uudella kalvolla, ½ h laskeuma 230
3.3.2020	Parikkala	2 g/l	3.3.2020	kirkasteen ja lietteen suodatus uudella kalvolla, kirkasteen sameus ja partikkelikokoanalyysi, ½ h laskeuma 230

Mikkelin MBR on pilot-mittakaavan laitos ja se sijaitsee sisätiloissa, joten sen olosuhteet ovat hieman erilaiset kuin Viitasaaren ja Parikkalan täyden mittakaavan laitoksilla. Lietteet kuljetettiin laitoksilta ilmastettuina auton peräkontissa. Lietteiden säilytys tapahtui yliopiston alakerrassa sijaitsevassa kylmiössä, jossa niitä myös ilmastettiin. Ilmastus suoritettiin kompressorin ja ilmastuskivien avulla, jolloin ilma saatiin lietteeseen pieninä ilmakuplina.

7.2 Kokeissa käytetyt kalvot

Viitasaarella oli talvella 2019 vaihdettu yksi kolmikerroksinen Alfa Lavalin MFM-300-462 suodatusmoduuli, jonka suodatinkalvovevyt oli säilytetty tämän jälkeen vedessä. Kalvojen permeabiliteetti-arvot prosessissa olivat pudonneet alle puoleen valmistajan lupaamista 700 LMH/bar arvoista. Näistä käytetyistä kalvovevyistä leikattiin kalvopaloja, joille tehtiin laboratoriossa suodatuskokeita. Kalvopaloja otettiin viidestä eri kalvovevystä satunnaisotannalla molemmilta puolilta. Lisäksi mukaan valikoitiin tarkoituksella myös likaisen näköisiä kalvopaloja. Suurin osa kalvoista oli kuitenkin pinnasta puhtaan näköisiä. Vertailukohteeksi käytetyille kalvoille tilattiin uutta kalvoa Alfa Lavalilta. Uudelle kalvolle tehtiin ennen varsinaisia suodatuskokeita käyttöönottopesut, liottamalla emäksisessä (pH 8,5-10,5) liuoksessa ja suodattamalla vettä kalvosta läpi noin 10 minuutin ajan sekä oikein-että väärinpäin. Kalvoja säilytettiin muovipusseissa, joiden pohjalle lisättiin vähän vettä, jotta kalvot pysyivät kosteina. Kaikki suodatuskokeissa käytetyt kalvot olivat Alfa Lavalin valmistamia. Taulukossa VI on esitetty tietoja kalvosta.

Taulukko VI. Tietoja suodatuskokeissa käytetystä kalvosta.

Valmistaja	Alfa Laval
Tyyppi	MFP2
Materiaali	PVDF
Huokoskoko	0,2 µm
Tyypillinen TMP suodatuksen aikana	0,01-0,04 bar
Tyypillinen nettovuon vaihteluväli	10-30 LMH
Ylin lämpötila	50 °C
pH	1-11

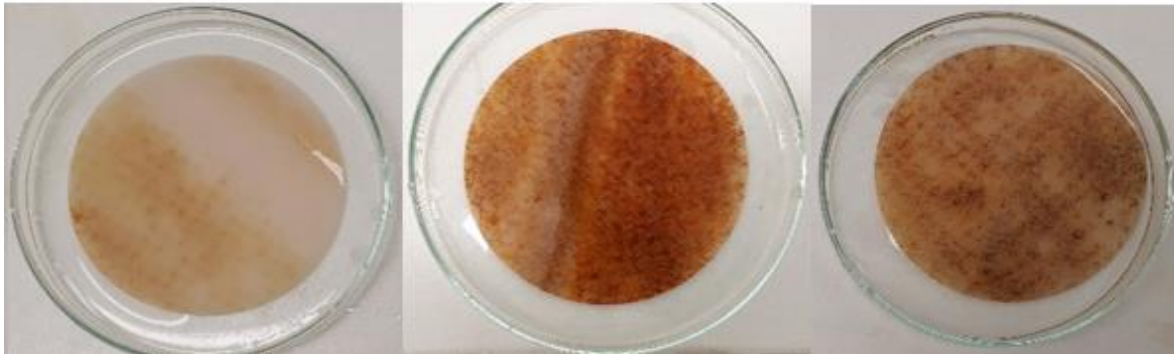
Kuvassa 8 on esitetty esimerkkikalvo uudesta ja käytetystä kalvosta. Käytetyistä kalvoista suurin osa oli pinnaltaan puhtaan näköisiä. Kokeita varten kalvot nimettiin sen mukaan, mistä levystä ne oli otettu. Levyistä leikattiin useita eri kalvopaloja. Jos samassa kokeessa käytettiin yhdestä levystä useampaa kuin yhtä kalvopalaa, eroteltiin ne käyttämällä levyn numeron lisäksi a:ta ja b:tä.



Kuva 8. Esimerkkikalvo uudesta ja käytetystä kalvosta. Uusi kalvo kuvassa vasemmalla, käytetty oikealla. Käytetyistä kalvoista suurin osa oli pinnaltaan puhtaan näköisiä.

Uuden ja käytettyjen kalvojen välillä oli värieroa, sillä käytetyt kalvot olivat käytössä vähän värjäytyneet, kun taas uusi kalvo oli valkoista. Tehtäessä liete- ja kirkastesuodatuksia uudella kalvolla, värjäytyi sekin pinnasta.

Käytetyistä kalvoista löytyi myös likaisia kohtia ja näitä otettiin mukaan tarkoituksella, sillä haluttiin tutkia likaantuneiden kalvojen toimintaa suodatuksessa. Osassa kalvoja oli vain vähän värjäytymää, mutta muutamat kalvopalat olivat voimakkaasti värjäytyneitä. Alla olevassa kuvassa vasemmalla on kalvolevystä 4 otettu kalvopala, keskellä ja oikeassa reunassa olevat kalvot on otettu levystä 5. Myöhemmissä kokeissa keskimmäistä kalvoa tarkoitettaessa puhutaan kalvo 5a:sta ja oikean reunan kalvoa tarkoitettaessa puhutaan kalvo 5b:stä.



Kuva 9. Vasemmalla on levystä 4 otettua kalvoa, keskellä levystä 5 kalvo a ja oikeassa reunassa levystä 5 kalvo b.

Kuvista nähdään, että kalvojen ulkonäössä oli suurta vaihtelua. Kuitenkin suurin osa kalvoista oli puhtaan näköisiä ja levyn 5 kalvopalojen näköistä kalvoa oli hyvin harvakseltaan kalvovevyissä. Lisäksi tummat kohdat keskittyivät kalvovevyissä lähinnä sen reunoille.

7.3 Suodatuskokeet

Suodatuskokeet tehtiin Lappeenrannan-Lahden teknillisellä yliopistolla Amicon-suodatuslaitteella. Suodatuslaitetta jouduttiin hieman modifioimaan, jotta saimme riittävän pienen paineen suodatukseseen, sillä paineen haluttiin olevan kokeissa hyvin lähellä laitoksella käytettäviä paineen arvoja. Viitasaaren MBR-prosessissa paineet suodatuksessa ovat yleensä 10-30 mbar ja vastavirtapesussa 10-25 mbar. Laitetta käytetään yleensä 1-6 bar paineissa. Paine tuotettiin suodatettavasta nesteestä muodostuvan nestepatsaan avulla, joka tehtiin kiinnittämällä pullo laitteistoon ylösalaisin ja merkitsemällä siihen mitta-asteikko paineelle. Kuvassa 10 on suodatuskokeissa käytetty koelaitteisto. Laitteistoon kuului itse suodatusyksikön lisäksi lämmitys/sekoituslevy, vaaka permeaatin punnitukseen, sekoitin ja lämpömittari, joka mittasi suodatettavan nesteen lämpötilaa. Suodatuslaitteisto oli yhdistetty tietokoneeseen, joka tallensi vaa'an lukemia ajan funktiona.



Kuva 10. Amicon-suodatuslaitteisto

Suodatuskokeet suoritettiin siten, että kokeissa käytettävä kalvo asetettiin laitteeseen kalvon sileä pinta ylöspäin. Laitoksen CIP-pesuja mallintavissa suodatuskokeissa kalvo asetettiin laitteeseen väärinpäin, jolloin kalvon karhea puoli oli ylöspäin. Tämän jälkeen laite kasattiin, nostettiin sekoituslevyn päälle ja suodatettava neste kaadettiin laitteistoon siten, että nesteen pinta tuli mitta-asteikon kohdalle 30. Tämä vastasi 30 mbar:ia. Suodatettavaa nestettä lisättiin laitteistoon suodatuksen aikana siten, että nesteen pinta pysyi mitta-asteikon kohdassa 30, jolloin paine pysyi vakiona. Kuuden tunnin lietesuodatukset olivat ainoa suodatuskoe, jossa paine ei pysynyt vakiona, vaan aleni sitä mukaa, mitä laitteisto suodatti nestettä läpi.

Kun suodatettava neste oli saatu laitteistoon, sekoitin laitettiin päälle ja asetettiin arvoon 100 rpm, jonka jälkeen käynnistettiin mittaus tietokoneelta. Suodatuksen alkulämpötila merkittiin ylös. Suodatuskokeita tehtiin eri kestoilla ja kokeen lopussa suodatettavan nesteen

lämpötila merkittiin ylös, mittaus pysäytettiin tietokoneelta ja laitteisto tyhjennettiin ja huuhdeltiin. Suodatettavien nesteiden lämpötilat vaihtelivat kokeissa, joten tuloksille tehtiin lämpötilakorjaukset kappaleessa 7.8 esitetyn mukaisesti.

7.3.1 Suodatuskokeet käytetyille kalvoille

Käytettyjen kalvojen toimivuutta suodatuksessa tutkittiin suodattamalla niistä läpi Viitasaaren laitoksen permeaattia. Uudella kalvolla suodatettiin myös permeaattia, jotta käytetyille kalvoilla saatiin vertailukohde. Kalvoja tutkittiin viidestä eri levystä ja levyistä 1 ja 5 tutkittiin kahta eri kalvopalaa.

Suodatuskokeissa sekoitusnopeus oli 100 rpm ja paine 30 mbar. Paine pidettiin vakiona lisäämällä permeaattia suodatuslaitteistoon sitä mukaa, kun sitä suodattui kalvon läpi. Permeaatin lämpötilat vaihtelivat suodatuskokeissa ja kunkin kokeen alkulämpötila on esitetty taulukossa VII. Suodatuskokeiden kestot vaihtelivat 20-30 minuutin välillä.

Taulukko VII. Käytetyillä kalvoilla tehtyjen suodatuskokeiden alkulämpötilat.

	Levy 1 kalvo a	Levy 1 kalvo b	Levy 2	Levy 3	Levy 4	Levy 5 kalvo a	Levy 5 kalvo b
Alkulämpötila	16	11	10	13	19	18	19

7.3.2 Veden ja permeaatin vertailu kalvojen puhdistuksessa

Viitasaaren laitoksella kalvojen vastavirtapesuissa käytetään kalvojen läpi suodatettua permeaattia. Kokeiden avulla pyrittiin selvittämään, voisiko vesijohtovettä käyttämällä saada parempia tuloksia kalvojen pesuissa kuin permeaattia käyttämällä. On pohdittu, voiko permeaattiin mahdollisesti jääneet pienet hiukkaset aiheuttaa tukkeutumista kalvon permeaattipuolelle pesuvaiheen aikana. Lisäksi on pohdittu permeaatin mahdollisuutta biofilmin muodostukseen.

Kokeet suoritettiin siten, että ensin suodatettiin tutkittavaa nestettä kalvosta oikeinpäin läpi (IO). Tämän jälkeen kalvo käännettiin väärinpäin (V) ja suodatus toistettiin. Väärinpäin suodatuksen jälkeen kalvo käännettiin takaisin oikeinpäin ja suoritettiin vielä yksi suodatus

(20). Tämän menetelmän tarkoituksena oli mallintaa laitoksella tehtyjä vastavirtapesuja (CIP-pesuja). Suodatuskokeissa sekoitusnopeus oli 100 rpm ja paine 30 mbar, mikä pidettiin vakiona. Suodatuskokeet tehtiin vesijohtovedellä ja permeaatilla uudelle kalvolle sekä levyjen 1 ja 5 kalvoille. Viidennen levyn kalvoista käytettiin kuvassa 9 esitettyä kalvoa 5b. Suodatuskokeiden alkulämpötilat vaihtelivat ja nämä on esitetty taulukossa VIII. Suodatuskokeiden kestot vaihtelivat 15 minuutista 30 minuuttiin.

Taulukko VIII. Laitoksen CIP-pesuja mallintavien suodatuskokeiden alkulämpötilat.

Kalvo, suodatettu neste	Suodatus	Alkulämpötila
Uusi, vesi	1O	22
	V	16
	2O	17
Uusi, permeaatti	1O	14
	V	12
	2O	13
1, vesi	1O	21
	V	19
	2O	18
1, permeaatti	1O	20
	V	20
	2O	20
5, vesi	1O	16
	V	19
	2O	17
5, permeaatti	1O	8
	V	10
	2O	11

7.3.3 Suodatuskokeet lietteille

Lietteille tehtiin suodatuskokeita kahdella eri kestolla. Toiset kokeet kestivät alle tunnin ja toiset kuusi tuntia. Alle tunnin mittaisten suodatuskokeiden kestot vaihtelivat 45 minuutista tuntiin. Näissä suodatuskokeissa lietteitä suodatettiin käyttäen uusia sekä levyn 1 kalvoja. Sekoitusnopeus suodatuskokeissa oli 100 rpm ja paine 30 mbar, mikä pidettiin vakiona. Suodatuskokeissa lämpötilat vaihtelivat ja kokeiden alku- ja loppulämpötilat on esitetty taulukossa IX. Taulukossa on esitetty myös päivämäärät, jolloin kokeet on tehty.

Taulukko IX. Alle tunnin mittaisten suodatuskokeiden alku- ja loppulämpötilat sekä päivämäärät, jolloin kokeet tehtiin.

	Mikkeli, uusi	Mikkeli, 1	Parikkala, uusi	Parikkala, 1	Viitasaari, uusi	Viitasaari, uusi 12.12.	Viitasaari, 1
Alkulämpötila	11	11	11	16	10	11	16
Loppulämpötila	18	17	18	20	18	20	20
Koe tehty	4.3.2020	5.11.2019	3.3.2020	16.10.2019	5.3.2020	12.12.2019	4.11.2019

Kuuden tunnin mittaisissa suodatuskokeissa käytettiin levyn 1 kalvoja. Näissä suodatuskokeissa paine ei pysynyt vakiona, vaan aleni sitä mukaa, kun permeaattia suodattui laitteistosta. Lietteiden lämpötiloissa oli kokeiden alussa pientä eroa. Viitasaaren ja Mikkelin lietteiden lämpötilat olivat kokeiden alussa 11 °C ja Parikkalan ~15 °C. Lämpötilat tasaantuivat kuitenkin suodatusten edetessä huoneenlämpöiseksi (21°C).

7.3.4 Suodatuskokeet kirkasteille

Kirkasteiden erottaminen lietteestä suodatuskokeita varten suoritettiin siten, että liete laskeutettiin, jonka jälkeen pinnalle muodostunut kirkas osa erotettiin pohjalle laskeutuneesta kiintoaineesta. Suodatuksissa sekoitusnopeus oli 100 rpm ja paine 30 mbar, mikä pidettiin vakiona. Suodatukset tehtiin uusilla kalvoilla ja kokeiden kestot vaihtelivat 45-60 minuutin välillä. Kirkasteiden lämpötilat suodatuskokeissa vaihtelivat ja taulukkoon X on kerätty kirkasteiden alku- ja loppulämpötilat kokeissa. Taulukossa on lisäksi esitetty päivämäärät, jolloin kokeet tehtiin.

Taulukko X. Kirkasteiden alku- ja loppulämpötilat suodatuskokeissa sekä kokeiden suoritusajankohta.

	Mikkeli	Parikkala	Viitasaari	Viitasaari 12.12.	Sakokaivo
Alkulämpötila	17	19	17	22	15
Loppulämpötila	19	20	19	23	19
Koe tehty	4.3.2020	3.3.2020	5.3.2020	12.12.2019	4.3.2020

7.3.5 ”Pestyn” lietteen suodatus

Lietteen ”pesu” toteutettiin siten, että lietteen kiintoaineen annettiin laskeutua astian pohjalle, jonka jälkeen pinnalle muodostunut kirkas osa kaadettiin pois. Tämän jälkeen lietteen sekaan lisättiin takaisin saman verran vesijohtovettä, kuin kirkastetta oli otettu pois. Lietettä sekoitettiin vähän aikaa, jonka jälkeen sen annettiin jälleen laskeutua ja taas kirkaste poistettiin ja korvattiin vedellä. Tämä toistettiin yhteensä kolme kertaa, jonka jälkeen suoritettiin suodatus. Käytännössä poistunut kirkasteen määrä kullakin laskeutuskerralla vastasi aina noin 30 % koko seoksen tilavuudesta. Suodatus tehtiin levyn 2 kalvolle ja lietteenä käytettiin Viitasaaren lietettä. Myös lietteen kirkastetta suodatettiin levyn 2 kalvolla. Suodatuskokeet olivat kestoltaan noin tunnin mittaisia. ”Pestyn” lietteen lämpötila suodatuksessa oli noin 20 °C. Kirkasteen lämpötila oli alussa 18 °C ja lopussa 21 °C. Molemmat suodatuskokeet tehtiin 10.12.2019.

7.3.6 Suodatuskokeet aktiivihiihen kanssa

Viitasaaren lietteelle tehtiin 5.3.2020 kaksi noin tunnin mittaista suodatuskoetta, joissa lietteeseen lisättiin aktiivihiihtä. Ensimmäisessä kokeessa rakeinen aktiivihiihti jauhettiin hienoksi ja tätä lisättiin litraan lietettä 1,2 g, sillä Le-Clech et al. (2006) mukaan kyseinen annostus olisi optimaalinen aktiivilietteen suodatuksen kannalta. Toisessa kokeessa rakeista aktiivihiihtä lisättiin litraan lietettä 5 g. Kummassakin suodatuksessa käytettiin uutta kalvoa ja paine pidettiin vakiona 30 mbar:ssa. Sekoitusnopeus kummassakin kokeessa oli aluksi 100 rpm. Liete, johon oli lisätty 5 g/l annostuksella rakeista aktiivihiihtä oli 40 minuutin kohdalla laskeutunut hyvin tiiviiksi suodatuslaitteistossa, joten sekoitusnopeus nostettiin tällöin arvoon 250 rpm ja pidettiin tässä arvossa loppukokeen ajan. Kokeen, jossa lietteeseen oli lisätty 1,2 g/l annostuksella aktiivihiihtä, sekoitusnopeus pidettiin koko kokeen ajan arvossa 100 rpm. Tämän kokeen lämpötila oli alussa 15 °C ja kokeen lopussa 19 °C. 5 g/l aktiivihiihtiannostuksella olevan kokeen alkulämpötila oli 17 °C ja kokeen lopussa lämpötila oli 20 °C.

7.4 Mikroskopointi

Mikroskopointiin käytettiin Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston Olympus SZX9 mikroskooppia, jossa oli kamerana Leica DFC450. Käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 11. Mikroskoopin maksimisuurennos on 1114-kertainen.



Kuva 11. Lietteiden tutkimiseen käytetty mikroskooppi

Mikroskoopilla tutkittiin Viitasaaren, Mikkelin ja Parikkalan membraanibioreaktoreiden lietteitä. Viitasaaren ja Mikkelin lietteet haettiin 25.11.2019 ja niiden mikroskopointi tehtiin sekä samana päivänä että 26.11.2019. Parikkalan liete haettiin ja tutkittiin 27.11.2019. Lietteiden tutkiminen suoritettiin siten, että lietteiden annettiin laskeutua puoli tuntia, jonka jälkeen näyte pipetoitiin laskeutuneesta lietteestä. Jokaisesta lietteestä otettiin useampia näytteitä.

Mikroskopoinnissa näytteille tehtiin silmämääräistä tarkastelua, jonka lisäksi näytteistä otettiin kuvia sekä tehtyjä havaintoja kirjattiin ylös. Eliöiden määrää arvioitiin vertailemalla eri eliöiden määrää keskenään ja niiden tunnistamiseen käytettiin kirjallisuuslähteitä.

7.5 Partikkelikokoanalyysi

Lietteiden kirkasteiden partikkelikokoanalyysit tutkittiin Malvern Mastersizer 3000 laitteella, jossa näytteensyöttöyksikkönä käytettiin Hydro SV -yksikköä. Laite on esitetty kuvassa 12. Laitteen valmistaja ilmoittaa laitteen mittausalueen olevan 0,01-3500 μm (Malvern Panalytical, 2020).

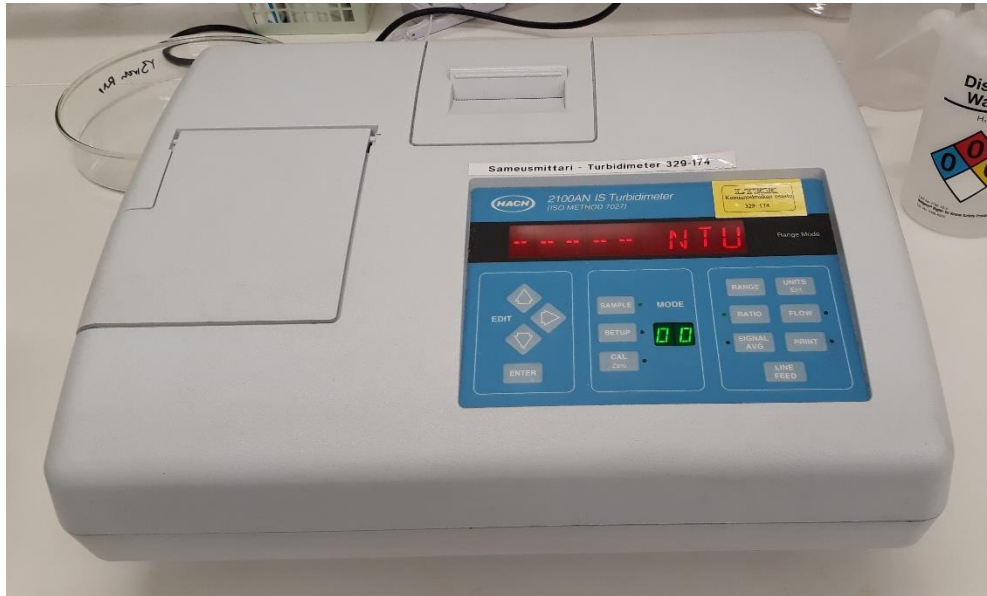


Kuva 12. Malvern Mastersizer 3000 ja näytteensyöttöyksikkönä Hydro SV.

Kirkasteiden partikkelikokoanalyysissä taustana käytettiin puhdistettua vettä. Näytteensyöttöyksikkö täytettiin ensin puhdistetulla vedellä ja mittaukselle ajettiin tausta. Tämän jälkeen näytteensyöttöyksikköön puhdistetun veden sekaan pipetoitiin tutkittavaa kirkastetta ja laite teki jokaiselle kirkasteelle viisi rinnakkaista mittausta. Kirkasteiden partikkelikokoanalyysit tehtiin 3.3.2020.

7.6 Sameus

Kirkasteiden sameudet mitattiin HACH 2100AN IS -sameusmittarilla ja se on esitetty kuvassa 13. Laite antoi sameuksien arvot NTU-arvoina (Nephelometric Turbidity Unit).



Kuva 13. HACH 2100AN IS –sameusmittari.

Kirkasteiden sameudet mitattiin siten, että kirkasteet laitettiin mittausastiaan, jonka jälkeen ne vuorotellen laitettiin laitteistoon. Laite antoi hetken päästä kirkasteelle sameuden arvon. Sameuksien arvot kirjattiin ylös. Mittaus toistettiin jokaiselle kirkasteelle 5 kertaa ja saaduista sameuden arvoista laskettiin keskiarvo. Mittaukset suoritettiin 3.3.2020.

7.7 Kemikaalitestaukset sameuden vähentämiseksi

Viitasaaren laitoksen tiloissa tehtiin 18-19.12.2019 kemikaalitestauksia, joiden tarkoituksena oli selvittää, voisiko eri kemikaaleilla saada kirkasteen sameutta poistumaan. Testattavina kemikaaleina oli ferrisulfaatti PIX, polyalumiinikloridi PAX, kationinen ja anioninen polyakryyliamidi sekä kemfoamx 2599 ja 2500. Kokeet suoritettiin lietteen kirkasteelle. Kirkaste suodatettiin käsipaperin läpi ennen kemikaalien lisäyksiä, kiintoainejäämien poistamiseksi.

Kemikaalitestaukset suoritettiin siten, että astiaan mitattiin 2 dl kirkastetta, jonka sekaan pipetoitiin 0,1 ml kemikaalia. Heti kemikaalilisäyksen jälkeen liuos sekoitettiin hyvin. Kationinen ja anioninen polymeeri olivat kiinteitä ja näistä muodostettiin ensin liuos punnitsemalla 1 g polymeeriä, joka liuotettiin litraan vettä. Tyypillisesti laitoksilla käytettävät polymeeriliuokset vastaavat tätä liuosvahvuutta (Lignell, 2019^e). Kemikaalien

pipetoitavat määrät valikoituivat sen perusteella, että suuresta annostuksesta voidaan lähteä pienentämään annostusta, jos liuoksessa tapahtuu reagointia haluttuun suuntaan. PIX:n annostus kokeessa oli noin 5-kertainen Viitasaaren laitoksella tyypillisesti annosteltavaan määrään nähden. PAX:n osalta pitoisuus oli noin 13-kertainen. PAX:lla kokeiltiin myös eri annostuksia ja pienin testattava annostus kirkasteelle vastasi pitoisuutta 130 g/m³.

PAX:ia kokeiltiin lisätä myös lietteen sekaan. Koe suoritettiin samalla tavalla kuin kirkasteille. Lietettä mitattiin astiaan 2 dl, minkä sekaan lisättiin PAX:ia 0,1 ml. Liuos sekoitettiin hyvin ja tämän jälkeen lietteen annettiin laskeutua.

7.8 Tulosten käsittely

Tietokone tallensi suodatuskokeiden tulokset muodossa suodatettua permeaattia grammoina minuuttia kohden. Arvot muutettiin yksikköön l/h. Jakamalla nämä saadut arvot kalvon pinta-alalla, saimme suodatukselle vuon arvon. Vuon arvot laskettiin yhtälön 1 mukaan.

$$J = \frac{q}{A} \quad (1)$$

jossa	J	vuon [l/m ² h]
	q	permeaattivirtaama [l/h]
	A	Kalvon pinta-ala [m ²]

Suodatuskokeille laskettiin myös permeabiliteetin arvot. Permeabiliteetin laskenta suoritettiin yhtälön 2 mukaan. Paine toteutettiin suodatuksessa nestepatsaan avulla ja paine pidettiin vakiona lisäämällä nestettä suodatetun nesteen tilalle.

$$L = \frac{J}{p} \quad (2)$$

jossa	L	permeabiliteetti [l/m ² hbar]
	J	vuon [l/m ² h]
	p	paine [bar]

Lämpötilat suodatuskokeissa vaihtelivat, joten tuloksille tehtiin lämpötilakorjaukset 15 °C:seen veden kinemaattisen viskositeetin avulla (liite I). Käytetyillä kalvoilla tehtyjen suodatuskokeiden sekä veden ja permeaatin vertailu kalvojen puhdistuksessa -suodatuskokeiden lämpötilat tasattiin kokeiden alkulämpötilojen perusteella. Muissa kokeissa lämpötilojen nousu kokeen aikana otettiin huomioon approksimoimalla lämpötilat eri ajanhetkille alku- ja loppulämpötilojen perusteella. Lämpötilakorjaukset on tehty yhtälön 3 mukaisesti.

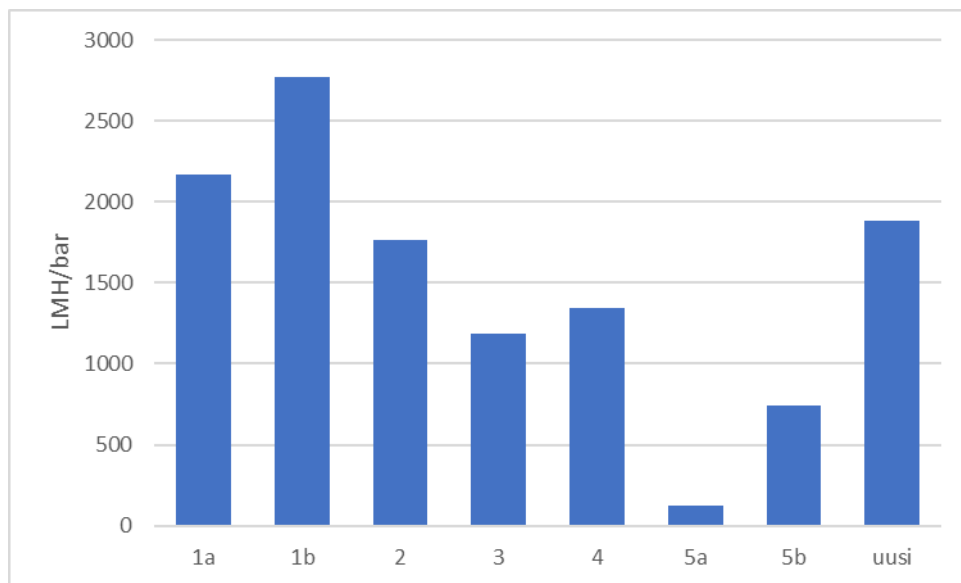
$$J_k = \frac{J_a \cdot \nu_a}{\nu} \quad (3)$$

jossa	J_k	Suodatuksen lämpötilakorjattu vuo [l/m^2h]
	J_a	Suodatuksen alkuperäinen vuo [l/m^2h]
	ν_a	Suodatettavan nesteen lämpötilaa vastaava veden kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]
	ν	Haluttua lämpötilaa (15 °C) vastaava veden kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]

8 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELO

8.1 Suodatuskokeet käytetyille kalvoille

Käytettyjen kalvojen toimivuutta suodatuksessa tutkittiin suodattamalla kalvoista läpi permeaattia. Suodatuskokeiden tulokset on esitetty 15 minuutin kohdalta kokeen aloituksesta ja ne ovat kuvassa 14. Suodatuskokeiden mittaustulokset on esitetty liitteessä II.



Kuva 14. Kalvojen läpäisykyvyn vertailua permeaattilla suodatettuna. Sekoitusnopeus suodatuksissa oli 100 rpm ja paine 30 mbar. Arvot on otettu 15 minuutin kohdalta kokeen aloituksesta. Tuloksille on tehty lämpötilakorjaus 15 °C:seen kokeiden alkulämpötilojen perusteella.

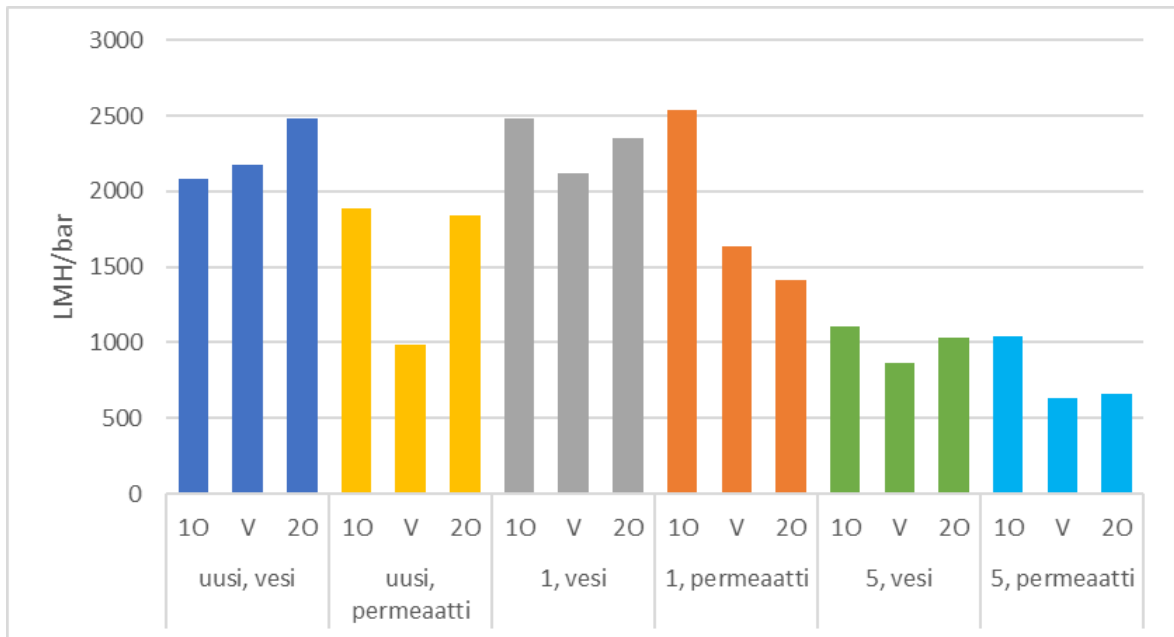
Kuvasta nähdään, että käytettyjen kalvojen permeabiliteettien arvot vaihtelivat paljon. Saatua tuloksia voi osaltaan selittää se, että kalvojen materiaali on heterogeenistä, joten läpäisykyky voi vaihdella kalvon eri kohdissa. Kuitenkaan sen ei pitäisi aiheuttaa kovin suuria vaihteluita permeabiliteettiarvoihin. Levyjen 1, 2 ja 3 kalvot olivat pinnasta puhtaan näköisiä, kun taas levyjen 4 ja 5 kalvot olivat selvästi likaisia (kuva 9). Kun tämä tieto otetaan huomioon koetulosten analysoinnissa, voidaan todeta ainakin levyn 5 kalvoissa olevan sellaista likaa, mikä heikentää kalvojen permeabiliteettien arvoja. Levyjen 3 ja 4 kalvopalojen tulokset ovat mielenkiintoisia, sillä levyn 4 kalvon permeabiliteetin arvo on parempi kuin levyn 3 kalvon, vaikka levyn 4 kalvo on pinnaltaan selvästi likainen. On mahdollista, että kolmannen levyn kalvossa olisi esimerkiksi huokostukkeumaa, sillä sitä ei näe kalvon pinnalta.

Vertailtaessa vanhojen kalvojen toimivuutta suhteessa uuteen kalvoon, huomataan, että levyn 1 kalvot saavat jopa parempia permeabiliteetin arvoja, levyn 2 kalvo saa hyvin samanlaisia arvoja ja loput testatut kalvot saavat heikompia arvoja kuin uusi kalvo. Kuitenkin vain levyn 5 kalvot saavat merkittävästi heikompia permeabiliteetin arvoja kuin uusi kalvo. Tummuneet kohdat kalvoissa keskittyivät tyypillisesti suodatuslevyjen reunoille, mikä viittaisi siihen, että puhdistus näissä kohdissa on ollut riittämätöntä. Tämä voisi aiheutua ilmastuksen sekä kalvopesuissa käytettävien pesukemikaalien epätasaisesta jakautumisesta kalvoille, jolloin suodatuslevyjen reuna-alueet saattavat jäädä kokonaan ilman puhdistusta.

Näiden tulosten pohjalta voitaisiin päätellä, että luultavasti suurin osa kalvoista olisi käyttökuntoisia, sillä valmistajan lupaama 700 LMH/bar permeabiliteetti täyttyy kaikkien muiden kalvojen kohdalla, paitsi 5a:n. Lisäksi tummia kohtia kalvoissa oli vain hyvin vähän suhteessa puhtaan kalvon alaan. Kuitenkin levyn 3 kalvon tulos viittaisi siihen, että osassa kalvoissa olisi mahdollisesti jonkin asteista tukkeutumista, jota ei nähdä kalvon pinnalta. Nyt testatut käytetyt kalvot eivät kuitenkaan vastaa täysin niitä kalvoja, mitkä tällä hetkellä ovat laitoksessa käytössä, sillä suodatuskokeissa käytetyt kalvot ovat olleet puoli vuotta vedessä, jolloin ne ovat mahdollisesti voineet puhdistua. Kokeissa käytettyjen kalvojen permeabiliteetit olivat laitoksella käytössä ollessaan olleet noin 300 LMH/bar (Lignell, 2020^c).

8.2 Veden ja permeaatin vertailu kalvojen puhdistuksessa

Tehdyillä suodatuskokeilla pyrittiin mallintamaan laitoksella tehtäviä vastavirtapesuja (CIP) ja kokeilla haluttiin vertailla veden ja permeaatin eroja kalvojen puhdistuksessa. Kuvassa 15 on esitetty kalvojen permeabiliteettien arvot 15 minuutin kohdalta. Suodatuskokeiden mittaustulokset on esitetty liitteessä III.



Kuva 15. Laitoksen vastavirtapesuja mallintavat suodatuskokeet, joissa ensimmäisessä suodatuksessa kalvo oli oikeinpäin (10), toisessa väärinpäin (V) ja kolmannessa suodatuksessa jälleen oikeinpäin (20). Suodatukset tehtiin vesijohtovedellä sekä permeaatilla levyjen 1 ja 5 kalvoille sekä uudelle kalvolle. Levystä 5 käytettiin kalvoa b. Tulokset on 15 minuutin kohdalta. Kokeissa sekoitusnopeus oli 100 rpm ja paine 30 mbar. Tulokset on lämpötilakorjattu 15 °C:seen kokeiden alkulämpötilojen perusteella.

Kuvaajasta nähdään, että vesisuodatuksilla on paremmat permeabiliteettien arvot kuin permeaatilla tehdyillä suodatuksilla. Uuden kalvon toimintaa tutkittaessa vedellä ja permeaatilla huomataan, että vedellä tehdyissä kokeissa permeabiliteetin arvot nousevat joka kokeessa. Tähän voi vaikuttaa se, että kalvo ei ollut vielä kunnolla kastunut kokeiden alkaessa ja kokeiden edetessä kalvo kastui paremmin ja siitä syystä permeabiliteetin arvot paranivat.

Tyypillisesti kalvosta väärinpäin suodatettaessa permeabiliteetin arvot ovat heikompia kuin oikeinpäin suodatuksissa. Permeaattia suodatettaessa uudesta kalvosta väärinpäin läpi on tulos huomattavasti oikeinpäin tehtyjä suodatuksia heikempi. Kuitenkaan permeabiliteetin arvo ei nouse toisessa oikeinpäin tehdyssä permeaattisuodatuksessa enää ihan ensimmäisen suodatuksen arvoon, vaan jää hieman heikommaksi.

Levyn 1 kalvon vesisuodatuksissa permeabiliteetit eivät vaihteleva kovin suuresti, mutta toisen oikeinpäin suodatuksen permeabiliteetin arvo jää ensimmäistä suodatusta hieman heikommaksi. Permeaatilla tehdyissä suodatuksissa kalvon toiminta heikkenee

merkittävästi. Ensimmäisessä suodatuksessa kalvolla on todella hyvä permeabiliteetin arvo, kunnes se heikkenee koe kokeelta.

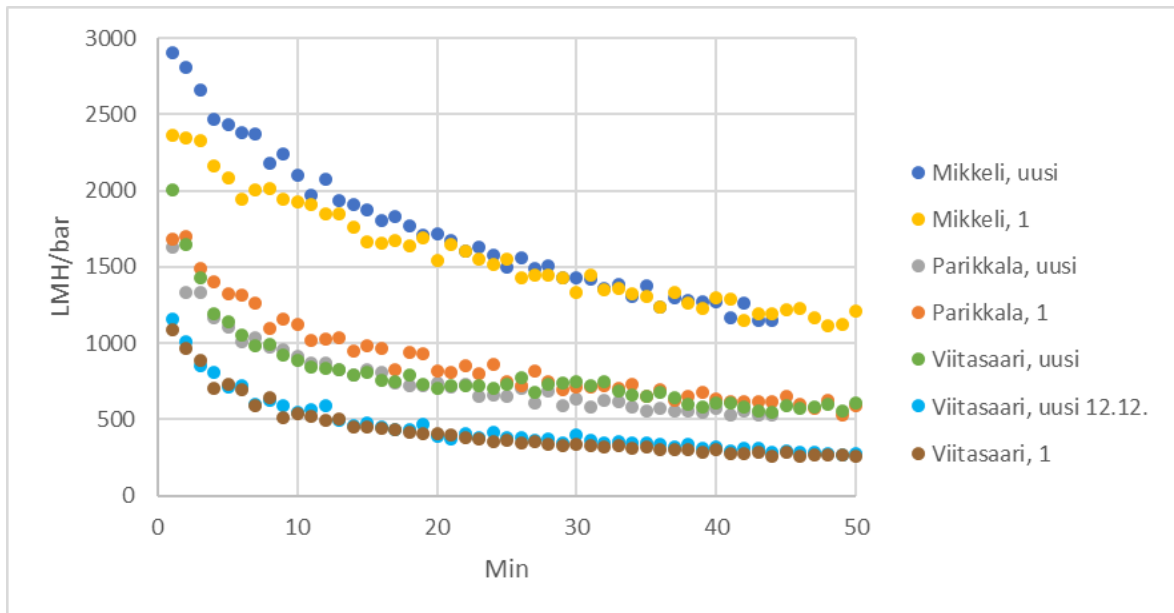
Levyn 5 kalvolle molemmat sekä vesi- että permealiteetit käyttäytyvät hyvin samankaltaisesti. Huomioitavaa on, että permealiteetissä toisen oikeinpäin suodatuksen permeabiliteetin arvo jää huomattavasti ensimmäistä suodatusta alhaisemmaksi. Vesisuodatuksessa se kuitenkin palaa lähes ensimmäisen suodatuksen tasolle.

Yhteenvedon voisi todeta, että vesisuodatuksissa toisen oikeinpäin (20) suodatuksen permeabiliteetin arvo palautuu lähes ensimmäisen suodatuksen (10) tasolle. Permealiteetin sijaan sama arvo jää ensimmäistä suodatusta alhaisemmaksi. Tämän voisi selittää se, että permealiteetin on mahdollisesti jäänyt pieniä hiukkasia, mitkä tarttuvat kalvon permealiteetipuolelle tai huokosiin kalvoille väärinpäin tehdyissä suodatuksissa, mikä heikentäisi seuraavaa oikeinpäin suodatusta. Tämän perusteella vesi saattaisi toimia paremmin kalvojen puhdistuksessa.

Tätä asiaa tulisi tutkia vielä paremmin ja kattavammin, sillä kolmen kalvon kokeilun perusteella ei voida tehdä vielä johtopäätöksiä. Tarvittaisiin paljon laajempaa otantaa, jotta tuloksia voitaisiin yleistää. Lisäksi tulisi tutkia lämpötilan vaikutusta kalvojen puhdistamiseen. Tulisi selvittää, olisiko pesuliuoksen lämpötilan nostolla mahdollista tehostaa kalvojen puhdistumista.

8.3 Suodatuskokeet lietteille

Kun suurin osa käytetyistä kalvoista vaikutti olevan käyttökuntoisia, lähdettiin vertailemaan eri MBR-laitosten lietteiden suodatettavuutta. Vertailtavaksi haettiin lietteitä Mikkelistä, Parikkalasta ja Viitasaarelta. Lietesuodatusten tulokset on esitetty kuvassa 16. Näiden kokeiden mittaustulokset ovat liitteessä IV.



Kuva 16. Lietteet suodatettiin levyn 1 kalvoilla sekä uusilla kalvoilla. Suodatuskokeissa sekoitusnopeus oli 100 rpm ja paine 30 mbar. Suodatuskokeet levyn 1 kalvoilla tehtiin vuoden 2019 loppupuolella. Uusilla kalvoilla tehdyt kokeet tehtiin maaliskuussa 2020. Viitasaaren lietettä suodatettiin uudella kalvolla lisäksi joulukuussa 2019. Tuloksille on tehty lämpötilakorjaus 15 °C:seen.

Kuvaajasta nähdään, että lietteiden suodatettavuudessa on todella isoja eroja. Verrattaessa pelkästään levyn 1 kalvoille tehtyjä suodatuksia keskenään, nähdään Mikkelin lietteen suodattuvan kaikista parhaiten, sitten Parikkalan lietteen ja huonointen suodattuu Viitasaaren liete. Viitasaaren lietteelle permeabiliteetin arvot ovat todella alhaiset. Näiden kokeiden tekoaikaan lietteiden kiintoainepitoisuuksissa ei ollut kovin suuria eroja (3,3; 4,0; 4,5 g/l). Viitasaaren liete suodatettiin levyn 1 kalvolla 4.11.2019 ja samoihin aikoihin laitoksella prosessissa käytössä olleiden kalvojen permeabiliteetit olivat alle 300 LMH/bar. Suodatuskokeen alussa permeabiliteettien arvot ovat huomattavasti suurempia kuin laitoksella, mutta kokeen edetessä ne putoavat lähelle laitoksen kalvojen arvoja.

Kokeiden tulosten tarkastelussa on huomioitava se, että lietteiden kiintoainepitoisuudet nousivat suodatusten edetessä. Kiintoainepitoisuuden nousu suodatuskokeessa oli riippuvainen siitä, paljonko laitteistosta suodattui kokeen aikana permeaattia. Tästä syystä kiintoainepitoisuudet käyttäytyivät eri suodatuksissa eri tavalla. Levyn 1 kalvoilla tehdyissä suodatuksissa Mikkelin lietteen kiintoainepitoisuus nousi kokeen aikana eniten ja Viitasaaren vähiten.

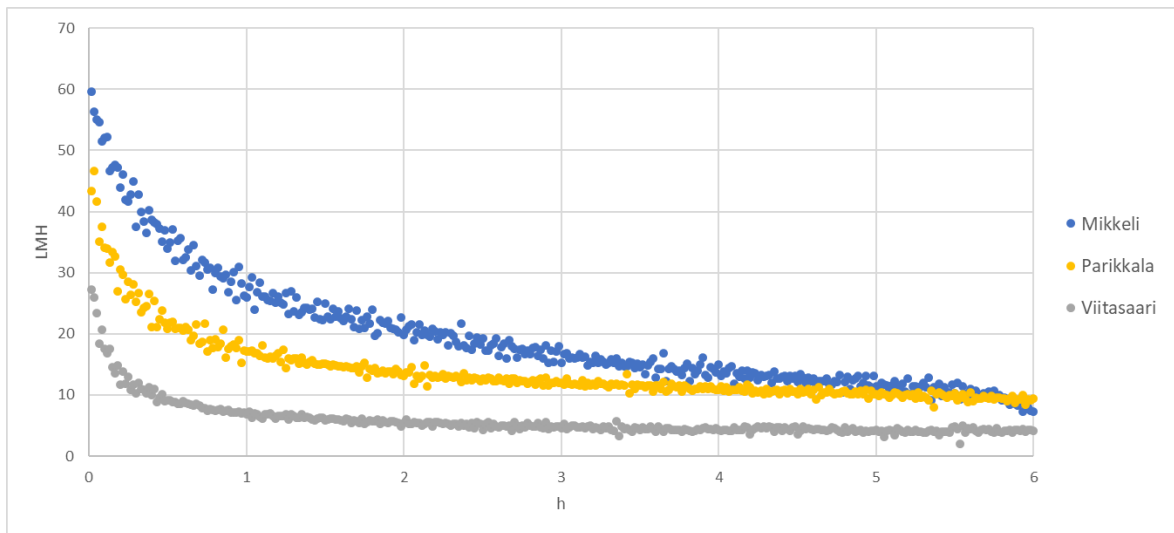
Uusilla kalvoilla tehdyissä suodatuksissa Mikkelin liete suodattui huomattavasti paremmin kuin muut. Parikkalan ja Viitasaaren lietteet saivat nyt hyvin samanlaisia arvoja. Kokeiden teko aikaan Mikkelin ja Parikkalan lietteiden kiintoainepitoisuudet olivat lähellä 2 g/l, kun se Viitasaarella oli lähes 8 g/l. Lisäksi Mikkelin ja Parikkalan lietteiden laskeumat olivat molemmat 230 ja Viitasaarella 840. Vaikka Parikkalan ja Viitasaaren lietteillä oli näin suuret erot, suodattuiivat ne silti hyvin samankaltaisesti. Tämän perusteella voitaisiin ajatella, että laskeuman arvo ei ole hyvä indikaattori lietteen suodatettavuudelle. Kiintoaineen pitoisuudellakaan ei näyttäisi olevan näillä vaihteluväleillä (2-8 g/l) merkitystä lietteen suodatettavuuteen. Lisäksi Rosenberger & Kraume (2003) havaitsivat tutkimuksessaan, että lietteen suodatettavuus ei merkitsevästi vaihdellut kiintoainepitoisuuksien vaihdellessa 2-24 g/l välillä. Näiden huomioiden perusteella voidaan olettaa, että kokeen aikana tapahtuvalla kiintoainepitoisuuden nousulla ei ole merkittävää vaikutusta suodatuskokeiden tuloksiin. Oletettavissa kuitenkin olisi, että kiintoainepitoisuuden noustessa merkittävästi, heikentäisi se lietteen suodatettavuutta.

Viitasaaren liete suodattui hyvin samankaltaisesti sekä käytetyllä kalvolla, että uudella kalvolla vuoden 2019 loppupuolella (Viitasaari, 1 ja Viitasaari, uusi 12.12.). Viitasaaren liete suodattui uudella kalvolla maaliskuussa 2020 huomattavasti aikaisempia suodatuksia paremmin (Viitasaari, uusi). Laitoksella tehtiin alkuvuodesta muutoksia, jotka tulosten perusteella ovat parantaneet lietteen suodatettavuutta. Näistä tehdyistä muutoksista kerrotaan enemmän kappaleessa 9.

Tuloksissa kiinnitti huomiota se, että permeabiliteettiarvot heikkenevät koko ajan suodatusten edetessä. Suodatuskokeissa käytettiin sekoitusta, jolla estettiin suodatuskakkujen muodostuminen kalvon pintaan. Suodatuskakut eivät voi tämän vuoksi olla syynä heikentyviin permeabiliteettiarvoihin. Näiden tulosten perusteella käytetyt kalvot toimivat lietteiden suodatuksessa hyvin samankaltaisesti kuin uusi kalvo. Yhteenvetona voisi todeta, että erot suodatuksissa johtuvat lähinnä lietteen laadusta ja sen muutoksista.

Kuuden tunnin lietesuodatuksissa paine ei pysynyt vakiona, vaan laski sitä mukaa, kun permeaattia suodattui laitteistosta. Tämän vuoksi suodatuskokeiden tulokset on esitetty vuon arvoina. Suodatuskokeiden tulokset on esitetty kuvassa 17. Kokeiden mittaustulokset ovat liitteessä V. Lietteiden lämpötiloissa oli alussa pientä eroa. Viitasaaren ja Mikkelin lietteiden

lämpötilat olivat kokeiden alussa 11 °C ja Parikkalan ~15 °C. Lämpötilat tasaantuivat kuitenkin suodatusten edetessä huoneenlämpöiseksi (21°C).



Kuva 17. Kuuden tunnin suodatuskokeet lietteille. Sekoitusnopeus 100 rpm ja paine aleni sitä mukaa, kun permeaattia suodattui laitteistosta. Paine oli alussa 30 mbar. Lämpötiloissa alussa muutamien asteiden eroa, mutta tasaantuivat huoneenlämpöön (21 °C) suodatusten edetessä.

Tulosten tulkinnassa tulee ottaa huomioon paineen pienentyminen kokeen aikana sekä kiintoainepitoisuuden nousu. Lietteiden tilavuus kokeiden alussa oli 900 ml. Koelaitteisto ei kuitenkaan ollut tasapaksu, joten kokeiden lopussa vallitsevia paineita (nestepatsaan korkeuksia) on hankala määrittää tarkasti. Mikkelin lietteen suodatuksessa laitteistosta oli poistunut kokeen aikana 446 ml permeaattia, jolloin paineen voidaan kokeen lopussa arvioida olleen noin 20 mbar:ia. Mikkelin lietteen kiintoainepitoisuus oli kaksinkertaistunut kokeen aikana, sillä nestettä oli poistunut noin puolet alkuperäisestä tilavuudesta.

Parikkalan lietettä suodatettaessa permeaattia suodattui kokeen aikana 317 ml, jolloin jäljelle jäänyt lietepatsaan korkeus vastasi noin 24 mbar:n painetta. Parikkalan lietteen kiintoainepitoisuus oli kokeen aikana noussut noin 30 %. Viitasaaren lietteen suodatuksessa laitteistosta poistui permeaattia 133 ml, jolloin paine kokeen lopussa oli noin 27 mbar:ia. Viitasaaren lietteen kiintoainepitoisuuden nousun voidaan olettaa olleen vähäistä.

Näiden suodatuskokeiden tulokset olivat hyvin samanlaiset kuin alle tunnin mittaisissa suodatuskokeissa levyn 1 kalvoille. Mikkelin liete suodattui parhaiten, seuraavaksi Parikkalan liete ja Viitasaaren liete suodattui heikointen. Parikkalan ja Viitasaaren lietteiden

suodatuksissa vuon arvot tasaantuivat, mutta Mikkelin lietteen suodatuksessa vuon arvo heikkeni koko suodatuskokeen ajan. Selitys tälle löytyy luultavasti muita merkittävästi nopeammin vähenevästä suodatuspaineesta sekä kiintoainepitoisuuden noususta.

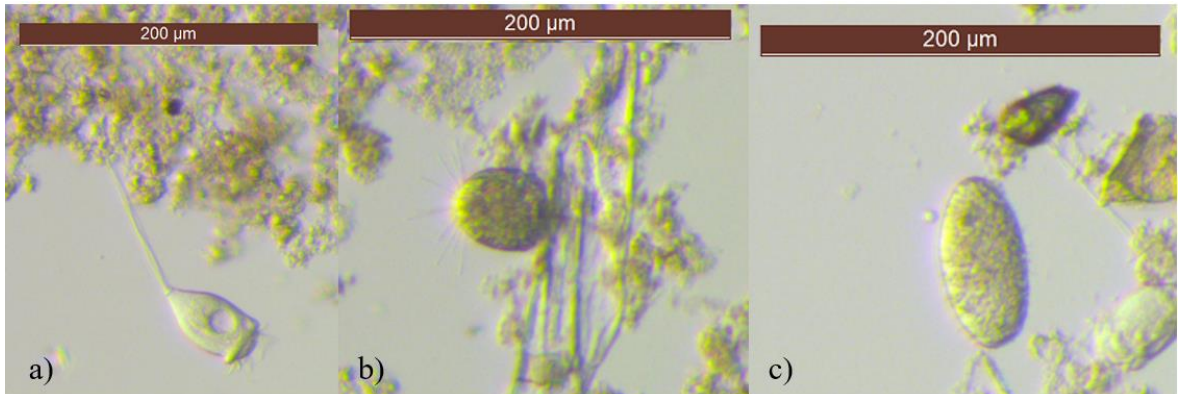
Kaikissa suodatuskokeissa Mikkelin liete suodattui muita paremmin. Mikkelin MBR on pilot-mittakaavan laitos ja se sijaitsee sisätiloissa. Parikkalan ja Viitasaaren laitokset ovat täyden mittakaavan laitoksia, joten prosessiolosuhteet ovat niissä hyvin erilaiset Mikkeliin verrattuna. Erilaiset prosessiolosuhteet vaikuttavat lietteiden ominaisuuksiin ja selittävät siten osaltaan suodatuskokeiden tuloksia.

8.4 Lietteiden mikroskopiointi

Syitä lietteiden erilaiseen suodatettavuuteen lähdettiin etsimään lietteiden koostumuksista, joita tutkittiin mikroskopoimalla. Mikroskoopilla tutkittiin Viitasaaren, Mikkelin sekä Parikkalan lietteitä ja näistä tutkimuksista voitiin huomata, että lietteiden eliökannat olivat erilaisia. Mikkelin liete oli tutkittaessa todella laihaa, laitoksella olevien ongelmien vuoksi, joten tulokset eivät sen osalta vastaa normaalia tilannetta.

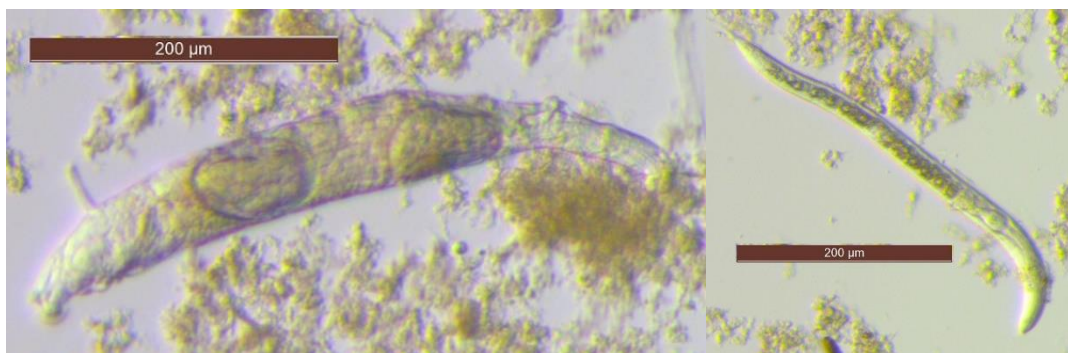
8.4.1 Viitasaaren liete

Viitasaaren lietteen eliökanta koostui pääasiassa erilaisista ripsieläimistä ja rataseläimistä sekä pienistä pistemäisistä eliöistä, joita ei mikroskoopilla nähty sen tarkemmin. Näitä pieniä pistemäisiä eliöitä oli hyvin runsaasti lietteessä ja ne liikkuivat hyvin nopeasti. Viitasaaren lietteen ripsieläimet koostuivat suurimmaksi osaksi varrellisista ripsieläimistä, kuten *vorticelloista* (kuva 18a). Lisäksi lietteestä löytyi muutamia yksittäisiä *suctorioita* sekä vapaasti uivia ripsieläimiä (kuvat 18b ja 18c).



Kuva 18. Viitasaaren lietteessä olevia ripsieläimiä. Kuvassa a) *vorticella*, b) *suctorium* ja c) vapaasti uiiva ripsieläin, mahdollisesti *colpidium colpoda*.

Viitasaaren lietteessä oli kohtuullisen paljon myös rataseläimiä, joiden lisäksi löytyi muutamia sukkulamatoja. Nämä eliöt on esitetty kuvassa 19. Vasemmalla on rataseläin ja oikealla sukkulamato.

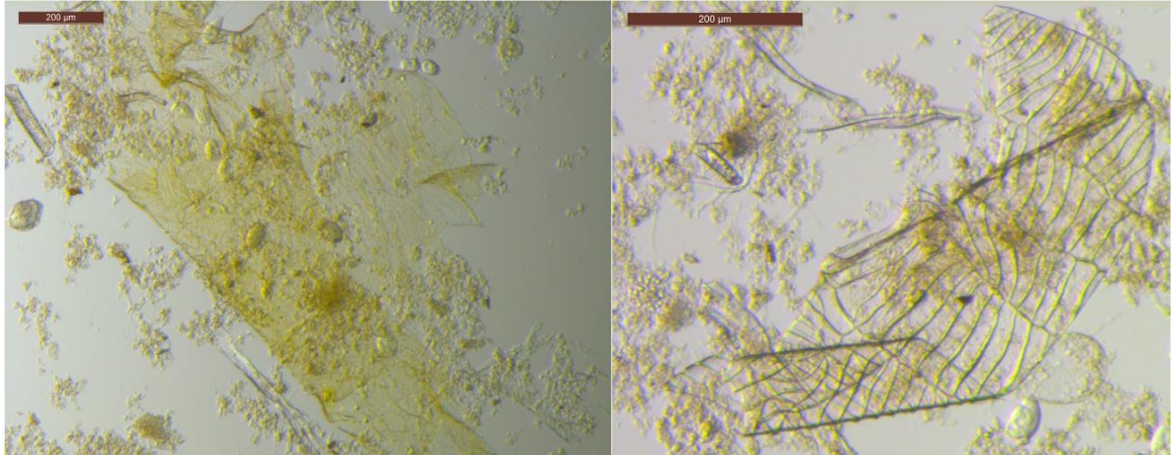


Kuva 19. Vasemmalla rataseläin ja oikealla sukkulamato.

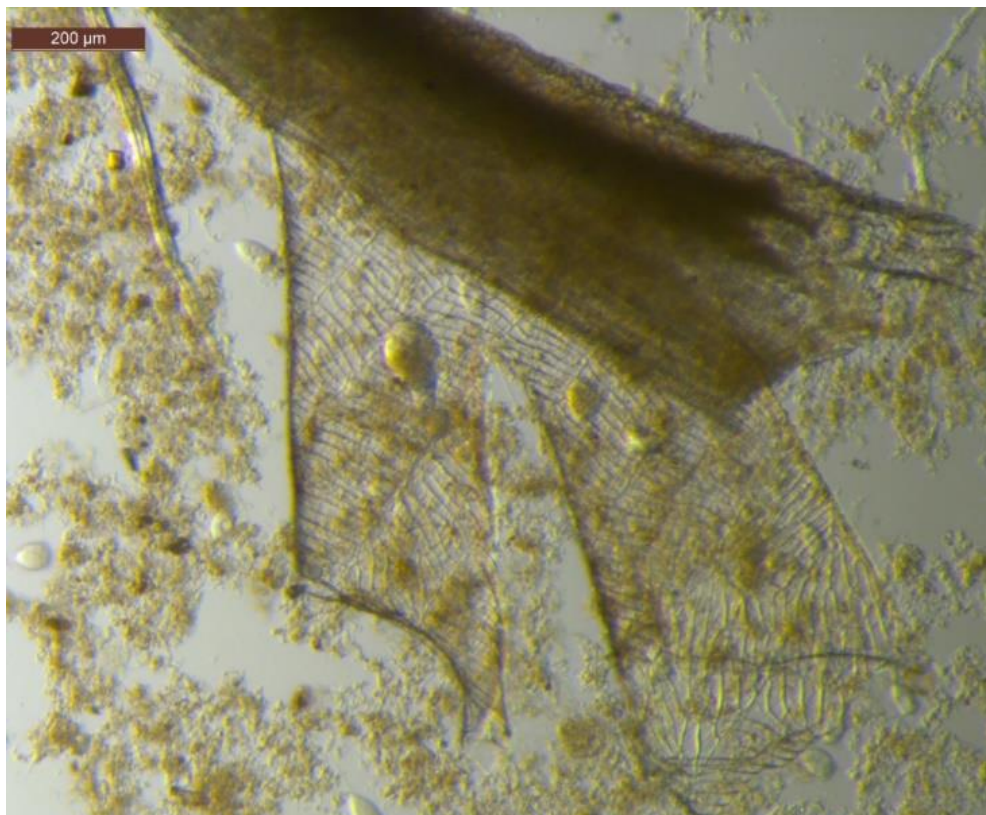
Lietteen eliökannan perusteella voi tehdä päätelmiä lietteen laadusta. Varrellisten ripsieläinten suuri esiintyvyys lietteessä tarkoittaa, että suurin osa orgaanisista ravinteista on poistettu. Sukkulamatojen esiintyvyys viittaa vähän liian korkeaan lieteikään, kuten myös rataseläinten melko suurehko määrä. Jos aseteltaisiin Viitasaaren liete kuvan 6 sarakkeisiin, asettuisi se niistä neljänteen, jolloin lieteindeksi (SVI) ja F/M-suhde ovat suhteellisen matalia ja lieteikä suhteellisen korkea.

Lietteessä kiinnitti kuitenkin eniten huomiota se, että siellä oli verkkomaista ja harsomaista materiaalia sekä paljon eri mittaisia kuitumaisia ja palkkimaisia kappaleita. Kuvissa 20 ja 21

on havainnollistettu lietteestä löytynyttä verkkomaista ja harsomaista materiaalia ja kuvassa 22 kuitumaisia ja palkkimaisia kappaleita. Kuitumaisista ja palkkimaisista kappaleista suurin osa oli pitkiä, useiden millimetrien mittaisia.

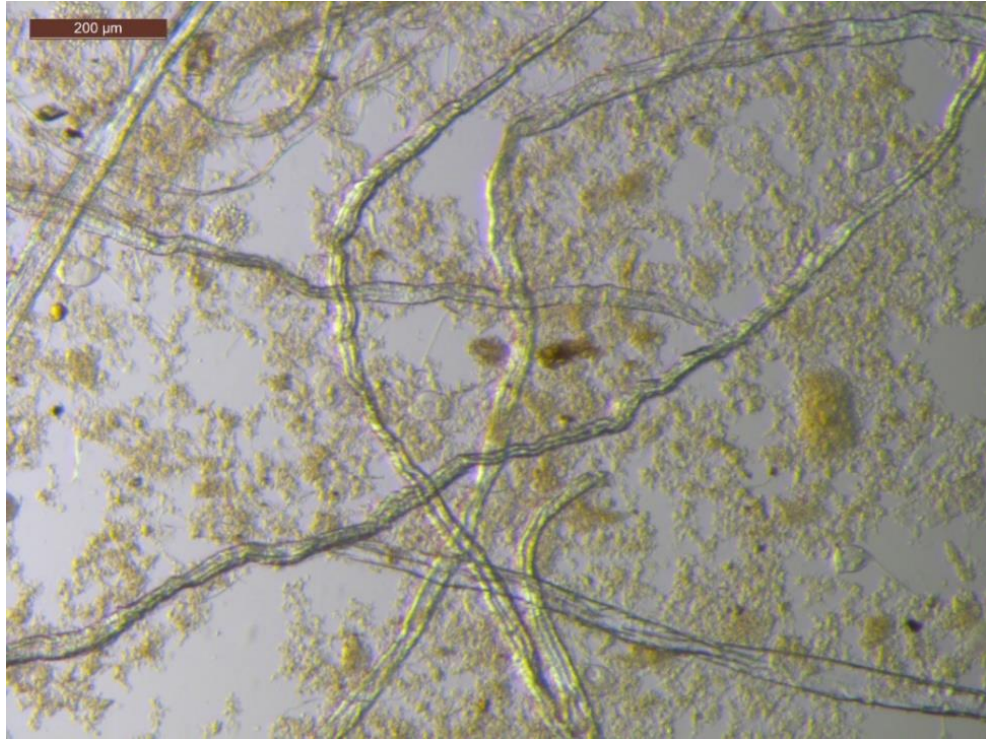


Kuva 20. Verkkomaista ja harsomaista materiaalia Viitasaaren lietteessä.



Kuva 21. Verkkomaista materiaalia Viitasaaren lietteessä.

Tällaisten rakenteiden voisi kuvitella heikentävän lietteen suodatettavuutta. Etenkin verkkomaisten ja harsomaisten materiaalien olisi mahdollista painautua kalvon pintaan peittäen sitä suureltakin alalta, mikä voisi heikentää kalvojen suodatuskykyä.

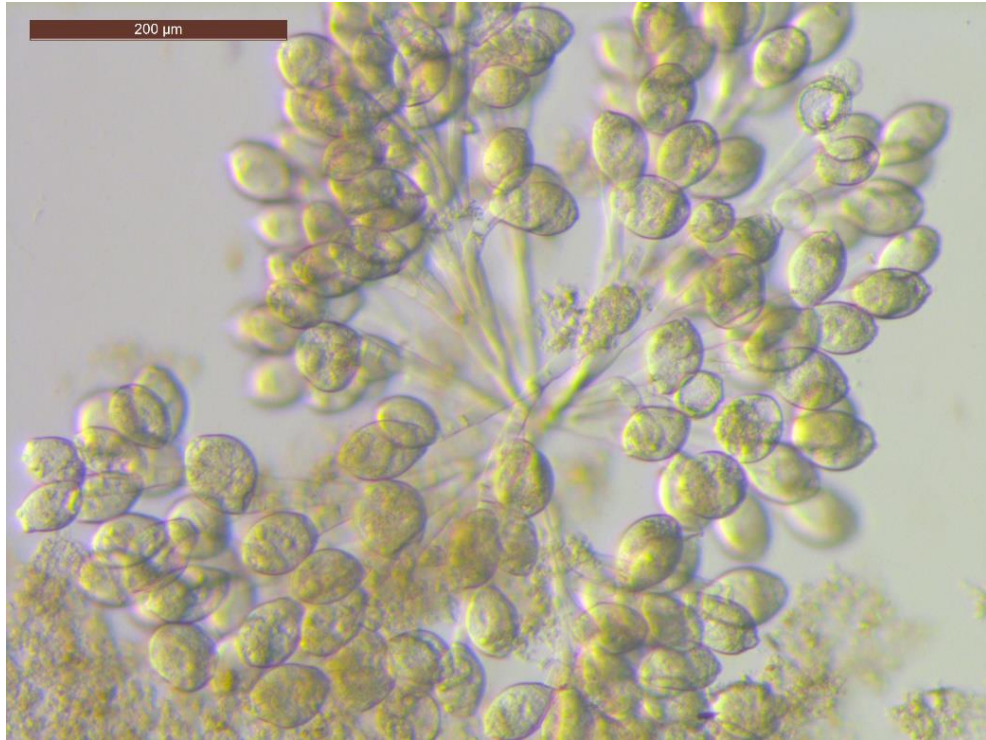


Kuva 22. Kuitumaisia ja palkkimaisia kappaleita Viitasaaren lietteessä.

8.4.2 Mikkelin liete

Mikkelin liete oli todella laihaa, sillä laitoksella oli näytettä haettaessa epänormaali tilanne. Tämä varmasti näkyi lietteen eliöstössä, sillä muiden paikkakuntien lietteissä oli paljon enemmän eliöitä kuin Mikkelin lietteessä. Mikkelin lietteen eliöstö koostui pääasiassa erilaisista varrellisista ripsieläimistä. Suurin osa Mikkelin lietteessä olevista ripsieläimistä oli paksuvartisia ja ne esiintyivät eri kokoisina ryppäinä. Pienissä ryppäissä esiintyi muutamia erilaisia ripsieläinlajeja, mutta lajiltaan mahdollisesti oleva *opercularia* esiintyi sekä pieninä että suurina ryppäinä (kuva 23). Lietteestä löytyi myös muutamia rataseläimiä sekä sukkulamatoja. Lisäksi lietteessä oli melko paljon paksulla varrella olevaa puumaista kasvustoa, jota on havainnollistettu kuvassa 24. Tämä voisi mahdollisesti olla jotain leväkasvustoa. Kuitumaisia ja palkkimaisia kappaleita ei Mikkelin lietteestä paljoa löytynyt,

vain muutamia harvakseltaan ja paljon lyhyempiä kuin Viitasaaren lietteessä olleet kappaleet. Verkkomaista materiaalia ei ollut ollenkaan.



Kuva 23. Varrellisten ripsieläinten rypäs Mikkelin lietteessä, mahdollisesti *Opercularia*.



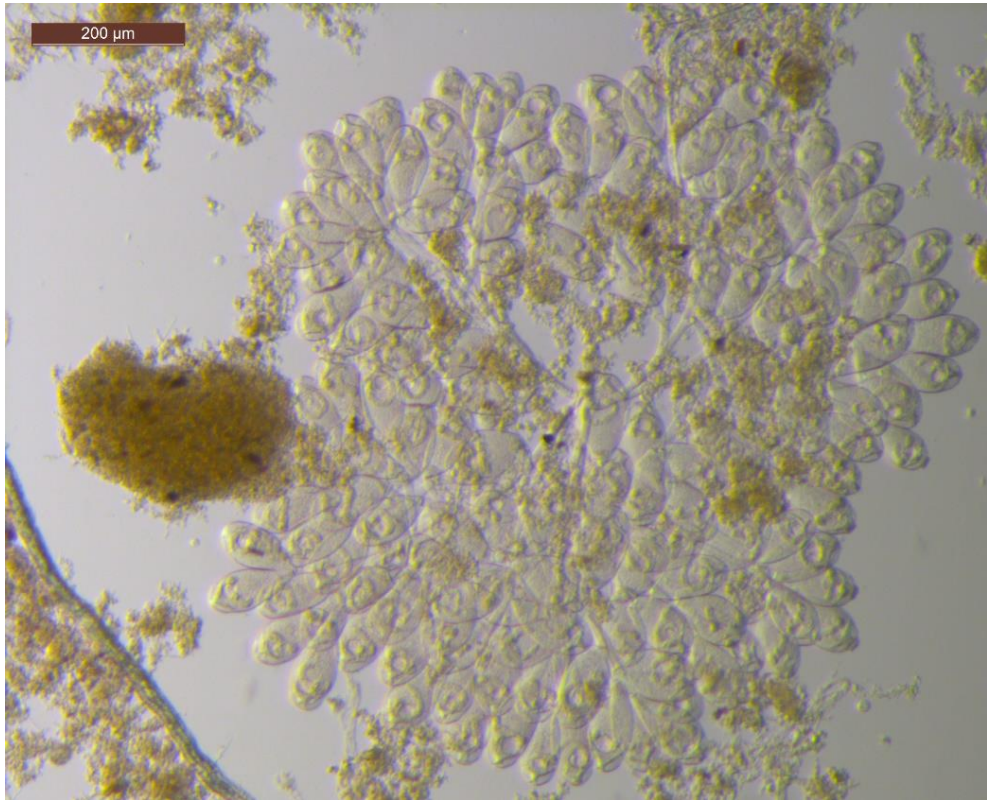
Kuva 24. Puumaista kasvustoa Mikkelin lietteessä.

Mikkelin liete suodattui kaikista parhaiten. Lietteestä ei löytynyt ollenkaan verkkomaista materiaalia. Kuitumaisia ja palkkimaisia kappaleita löytyi vain muutamia, mutta nekään eivät olleet kovin isoja. Tämä tukee ajatusta, että kuitumaiset kappaleet ja etenkin verkkomaiset materiaalit heikentäisivät lietteen suodatettavuutta. Mikkelin eliöstön perusteella ei pystytä tekemään kunnollisia johtopäätöksiä lietteen laadusta, sillä prosessissa olleiden häiriöiden vuoksi eliöstö ei anna kuvaa lietteen normaalista tilasta. Lietteän eliöstö oli mikroskopoinnin aikaan suhteellisen suppea ja eliöitä oli melko vähän muiden paikkakuntien lietteisiin verrattuna.

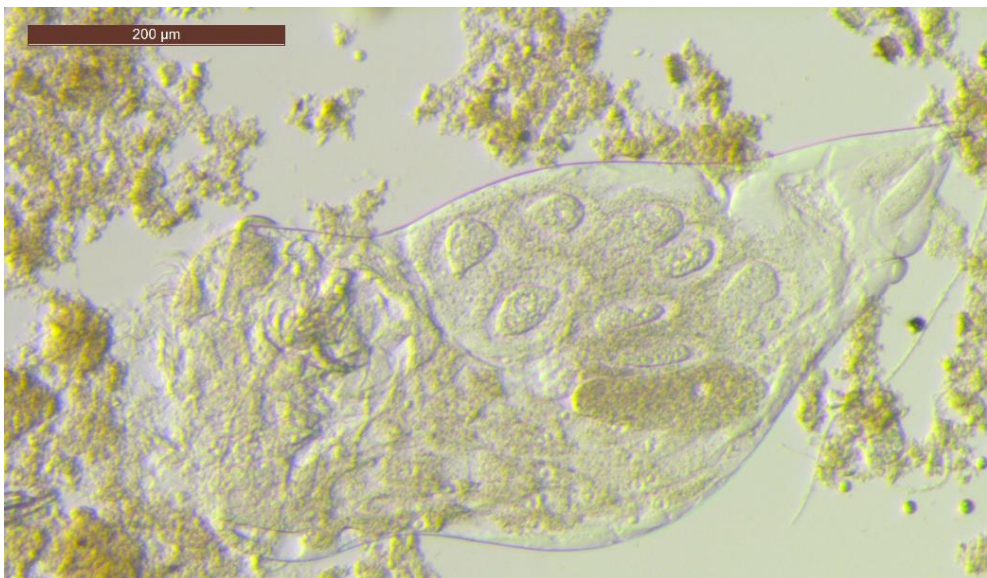
8.4.3 Parikkalan liete

Parikkalan lietteessä oli todella paljon erilaisia vapaasti uivia ripsieläimiä, jotka liikkuvat hyvin nopeasti. Vapaasti uivista ripsieläimistä pystyi tunnistamaan *lironotuksen* sen muista poikkeavan ulkomuodon perusteella, mutta suurin osa oli melko pieniä ja pallomaisia. Nämä liikkuvat lisäksi niin nopeasti, että niitä oli hyvin vaikea tunnistaa sen tarkemmin. Parikkalan lietteestä löytyi myös varrellisia ripsieläimiä, joista osa esiintyi yksin ja osa oli muodostanut todella suuriakin ryppäitä. Näistä voitiin tunnistaa *vorticellat*, *epistyliset* ja *suctoriat*. Esimerkiksi *epistyliset* olivat muodostaneet suuriakin ryppäitä, kuten kuvasta 25 voidaan nähdä. Ripsieläinten lisäksi lietteessä oli aika paljon erilaisia rataseläimiä sekä muutamia sukkulamatoja.

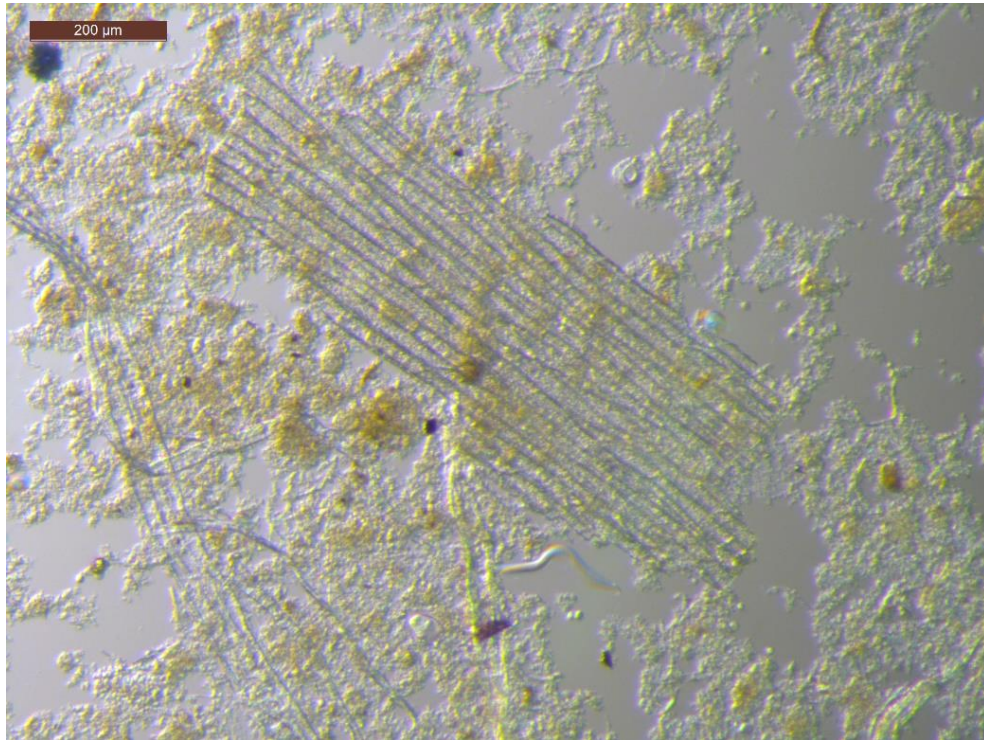
Parikkalan lietteessä kiinnitti eniten huomiota suuret epistylis-ryppäät (kuva 25) sekä joidenkin rataseläinten suuri koko (kuva 26), sillä muiden puhdistamoiden lietteissä ei ollut näin suuria eliöitä. Parikkalan lietteestä löytyi myös kuitumaisia ja palkkimaisia kappaleita, joista osa oli aika pitkiä, useiden millimetrien pituisia. Myös verkkomaista materiaalia löytyi Parikkalan lietteestä jonkin verran, kuten kuvasta 27 voidaan nähdä. Viitasaaren lietteeseen verrattuna sekä kuitumaisia kappaleita että verkkomaista materiaalia oli vähemmän.



Kuva 25. *Epistylis*-rypä.



Kuva 26. Rataseläin Parikkalan lietteessä.



Kuva 27. Parikkalan lietteestä löytynyttä verkkoimaista materiaalia sekä kuitumaisia kappaleita.

Parikkalan lietteessä dominoivat vapaasti uivat ripsieläimet, mikä kertoo lietteessä olleen vielä ravinteita jäljellä. Varrellisia ripsieläimiä oli määrällisesti enemmän kuin rataseläimiä, ja sukkulamatoja vain yksittäisiä. Käytettäessä kuvaa 6 apuna Parikkalan lietteen analysoinnissa, ei lietteen eliöstä asetu yksiselitteisesti mihinkään sarakkeeseen. Vapaasti uivat ripsieläimet dominoivat toisessa sarakkeessa, mutta silloin pitäisi esiintyä myös siimaeliöitä ja lietteessä ei pitäisi olla sukkulamatoja. Matojen esiintyvyyden perusteella voisi ajatella lietteen kuuluvan neljänteen sarakkeeseen. Tällöin eliöiden jakautuvuus ei täysin täsmää, mutta on kuitenkin melko lähellä. Eliökannan perusteella voisi kuitenkin olettaa, että Parikkalan liete on melko lähellä optimaalista lieteikää sekä -konsentraatiota.

8.4.4 Lietteiden vertailu

Vertailtaessa lietteitä huomasi selkeästi, että Parikkalan lietteessä oli eniten eliöitä, Viitasaaren lietteessä oli lähes yhtä paljon, kun taas Mikkelissä oli melko vähän. Tämä johtuu luultavasti siitä, että näytteenottohetkellä Mikkelin liete oli todella laihaa laitoksella olleiden häiriöiden vuoksi. Lietteet olivat kuitenkin eliöiltään hyvin erilaisia, muutamia

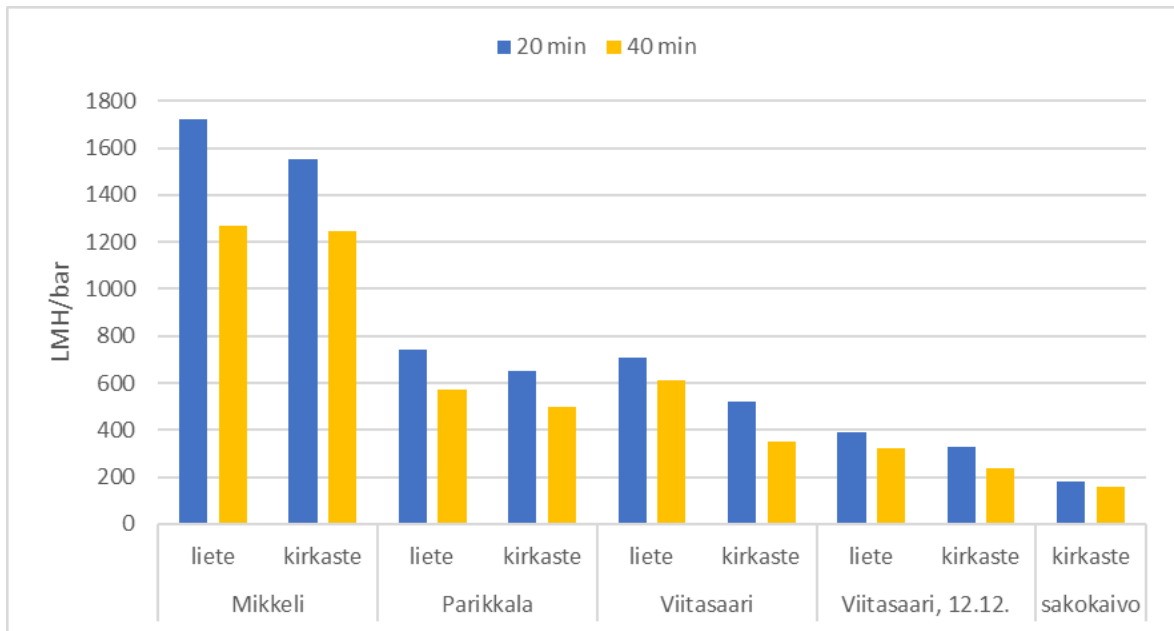
poikkeuksia lukuun ottamatta. Viitasaaren lietteessä oli todella paljon hyvin pieniä liikkuvia pistemäisiä eliöitä, kun taas Parikkalassa oli paljon isompia, vapaasti uivia pallomaisia ripsieläimiä. Mikkelissä ei ollut mitään vastaavia. Kaikissa lietteissä oli sukkulamatoja sekä rataseläimiä, mutta Mikkelissä huomattavasti vähemmän. Viitasaaren ja Parikkalan lietteissä rataseläimiä oli runsaasti, mutta ne olivat erilaisia. Viitasaarella pääroolissa olivat *vorticellat* ja Parikkalassa vapaasti uivien ripsieläinten lisäksi *epistylis*-ryppäät. Mikkelin lietteen eliöstö koostui pääasiassa luultavasti *opercularia*-ripsieläimistä. Parikkalan ja Mikkelin lietteissä varrelliset ripsieläimet esiintyivät pääasiassa ryppäissä, kun taas Viitasaaren lietteessä ei esiintynyt ryppäissä kasvavia eliöitä.

Sekä Viitasaaren että Parikkalan lietteissä oli kuitumaisia pitkiä kappaleita sekä verkkomaista materiaalia. Näitä oli Viitasaaren lietteessä enemmän kuin Parikkalan lietteessä. Mikkelissä ei ollut kuin yksittäisiä lyhyitä kuitumaisia kappaleita. Verkkomaista materiaalia ei lietteessä ollut. Yhdisteltäessä näitä tuloksia lietteiden erilaisiin suodatettavuuksiin, voitaisiin ajatella, että kuitumaisten kappaleiden ja verkkomaisten materiaalien esiintyvyys heikentäisi lietteen suodatettavuutta. Mikkelissä näitä ei ollut ja se suodattui huomattavasti Parikkalaa ja Viitasaarta paremmin. Parikkalan liete suodattui myös syksyllä 2019 paremmin kuin Viitasaaren liete ja Parikkalan lietteessä oli vähemmän havaittavissa verkkomaista materiaalia. Tämä tukee ajatusta, että etenkin verkkomainen materiaali lietteessä olisi ongelmallista suodatuksen kannalta.

8.5 Suodatuskokeet kirkasteille

Lietesuodatusten lisäksi tutkittiin, miten pelkät lietteiden kirkasteet suodattuisivat. Lietteiden laskeumia mitatessa huomio oli nimittäin kiinnittynyt pinnalle muodostuneiden kirkasteiden sameuksiin. Myös Viitasaarella tulleen sakokaivolietteen kirkasteen suodattumista tutkittiin, sillä iso osa Viitasaaren jätevedenpuhdistamon kuormituksesta on peräisin sakokaivolietteilistä.

Suodatuskokeiden tuloksista on esitetty permeabiliteettien arvot 20 ja 40 minuutin kohdilta kuvassa 28. Kirkasteiden ja lietteiden suodattavuuksien vertailemiseksi kirkasteiden kanssa samoina ajankohtina tehdyt lietesuodatukset on myös esitetty kuvassa. Mittaustulokset kirkasteiden suodatuskokeista ovat liitteessä VI.



Kuva 28. Suodatuskokeet kirkasteille sekä lietteille uusilla kalvoilla. Kokeissa sekoitusnopeus 100 rpm ja paine 30 mbar. Suodatuskokeista esitetty tulokset ajanhetkiltä 20 ja 40 minuuttia. Kokeet tehty maaliskuussa 2020, lukuun ottamatta Viitasaaren lietteelle ja kirkasteelle 12.12.2019 tehtyjä kokeita. Kokeen tuloksille on tehty lämpötilakorjaus 15 °C:seen.

Kuten kuvasta voidaan huomata, ei lietteiden ja kirkasteiden suodatettavuuksilla ole kovinkaan isoja eroja keskenään. Kuitenkin lietteet suodattuivat hieman paremmin kuin kirkasteet. Tyypillisesti kunkin laitoksen lietteen ja kirkasteen suodatus eteni melko yhdenmukaisesti suodatuskokeen aikana, joten voidaan ajatella niiden suodattuvan miltei yhtäläisesti. Tämä antaisi viitteitä siihen, että lieteflokkit eivät vaikuttaisi suuresti lietteiden suodatettavuuteen.

Sakokaivojen tyhjennys on suoritettava tarvittaessa, mutta vähintään kerran vuodessa (Viitasaaren tekninen lautakunta, 2019), jolloin jätevedenpuhdistamolle tulevan jäteveden koostumus muuttuu oleellisesti, sillä sakokaivolietteiden ominaisuudet ovat hyvin erilaiset kuin viemäriverkosta laitokselle suoraan tulevien jätevesien.

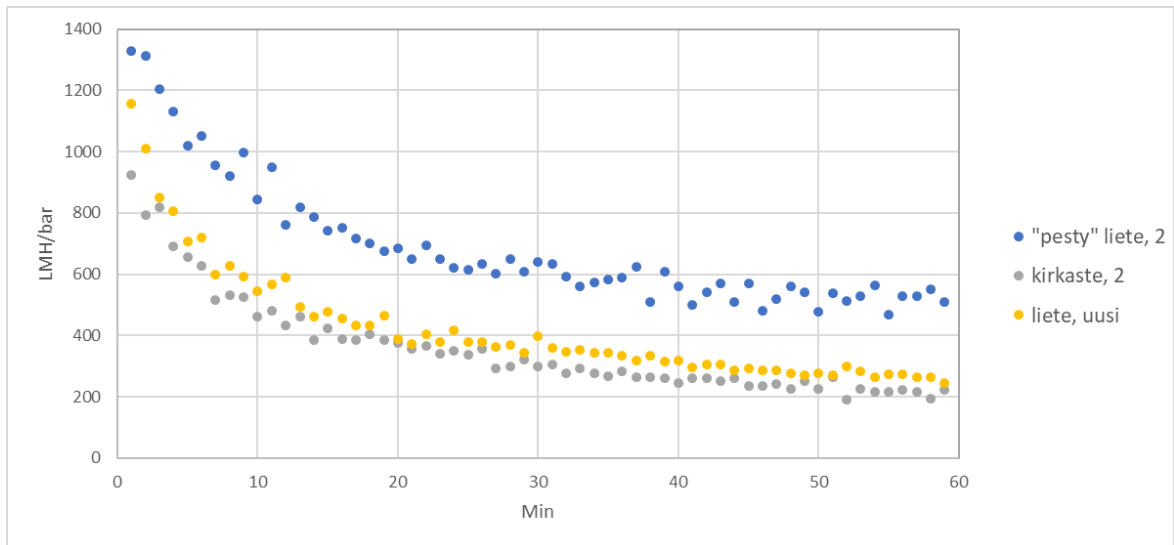
Sakokaivolietteen kirkaste suodattui muita kirkasteita selvästi heikommin suodatuskokeissa. Lisäksi se muodosti suodatuksessa sekoituksesta huolimatta kalvon pintaan kakkukerroksen, jota eivät muut kirkasteet, eivätkä lietteet tehneet. Muodostunut kakkukerros oli myös tarttunut melko tiukasti kalvon pintaan kiinni. Muiden suodatuskokeiden perusteella voidaan olettaa, että sakokaivoliete suodattuisi lähes yhtäläisesti kirkasteensa kanssa. Kun kuitenkin

otetaan huomioon se, että jo pelkän kirkasteen suodatuksessa kalvon pintaan muodostui sitkeä kakkukerros, voidaan epäillä, että lietteen kanssa kakkua muodostuisi nopeammin ja enemmän kalvon pinnalle. Tämä heikentäisi suodatusta entisestään. Sekä tämän päätelmän että sakokaivon kirkasteen suodatuskokeen perusteella voidaan todeta, että sakokaivolietteiden suodattaminen on haasteellista. Viitasaaren laitoksen kuormituksesta iso osa on peräisin sakokaivolietteistä, joten voidaan epäillä sen heikentävän kokonaisuudessaan lietteen suodatettavuutta laitoksella. Viitasaaren laitoksella ei myöskään ole kunnollista tasausallasta sakokaivolietteille, vaan ne aiheuttavat prosessiin hetkellisiä kuormitusvaihteluita (Lignell, 2020^c).

Suodatuskokeiden tuloksista nähdään, että Viitasaaren lietteen sekä kirkasteen suodatettavuus on kohentunut kevään 2020 aikana. Tähän vaikuttaneista toimenpiteistä kerrotaan enemmän kappaleessa 9. Joulukuussa Viitasaaren kirkaste oli huomattavasti sameampaa kuin maaliskuun kokeiden aikaan. Kirkasteen sameudella voisi tämän perusteella olla vaikutusta kirkasteen suodatettavuuteen.

8.6 ”Pestyn” lietteen suodatus

Lietteen ”pesun” tarkoituksena oli pyrkiä poistamaan lietteen kirkasteessa olevaa sameutta. ”Pestyn” lietteen suodatuksessa käytettiin levyn 2 kalvoa ja vertailtavien tulosten saamiseksi myös kirkasteelle tehtiin suodatuskoe kyseisen levyn kalvolla. Tulokset näistä suodatuksista on esitetty kuvassa 29. Suodatuskokeiden mittaustulokset ovat liitteessä VII. Lietteenä kokeissa käytettiin Viitasaaren lietettä. Näiden suodatuskokeiden lisäksi kuvaan on lisätty samalla koekerralla (12.12.2019) tehty suodatus Viitasaaren lietteelle uudella kalvolla.



Kuva 29. ”Pestyn” lietteen suodatus suhteessa kirkasteen ja lietteen suodatettavuuteen. ”Pesty” liete ja kirkaste suodatettu levyn 2 kalvolla, liete uudella kalvolla. Kokeissa käytetty Viitasaaren lietettä. Suodatuksissa sekoitusnopeus oli 100 rpm ja paine 30 mbar. Tuloksille on tehty lämpötilakorjaus 15 °C:seen.

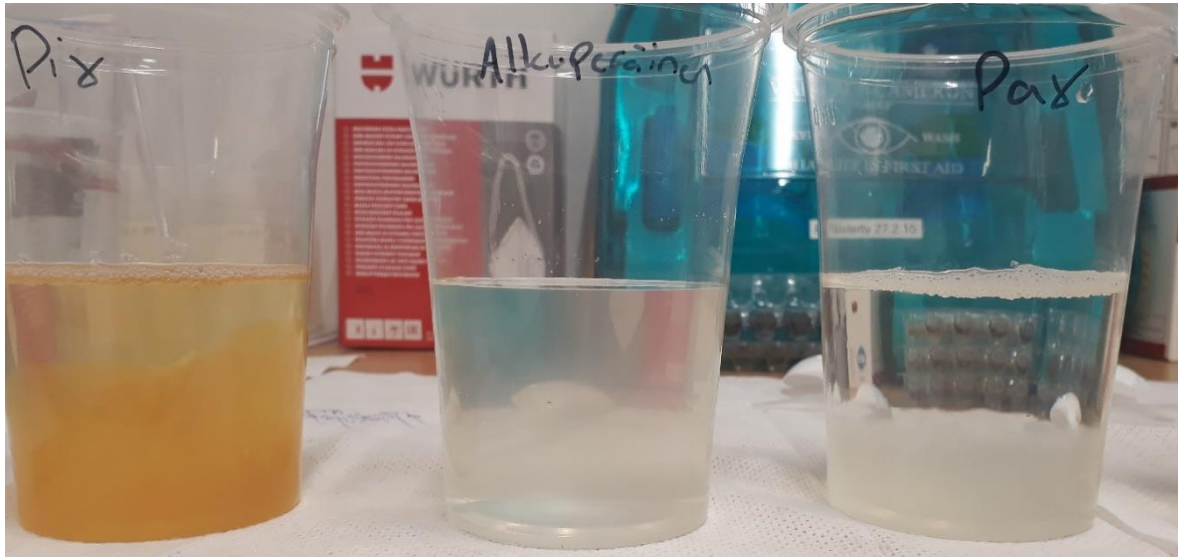
Kuvasta nähdään, että lietteen kirkasteen vaihtamisella voidaan parantaa lietteen suodatettavuutta. Keskimäärin permeabiliteettien arvot nousivat 300 LMH/bar, kun lietteen kirkaste vaihdettiin vesijohtoveteen. Kirkasteen korvaamisella pyrittiin poistamaan sen sisältämää pientä hiukkasta, mikä aiheutti kirkasteeseen sameutta. Tämän poistolla oli selvästi vaikutusta lietteen suodatettavuuteen.

8.7 Kemikaalitestaukset sameuden vähentämiseksi

Aiemmin tehtyjen kokeiden perusteella kirkasteen sameudella ajateltiin olevan vaikutusta lietteen suodatettavuuteen. Kemikaalitestauksien tarkoituksena oli selvittää, voisiko kirkasteen seassa olevaa sameutta saada vähenemään.

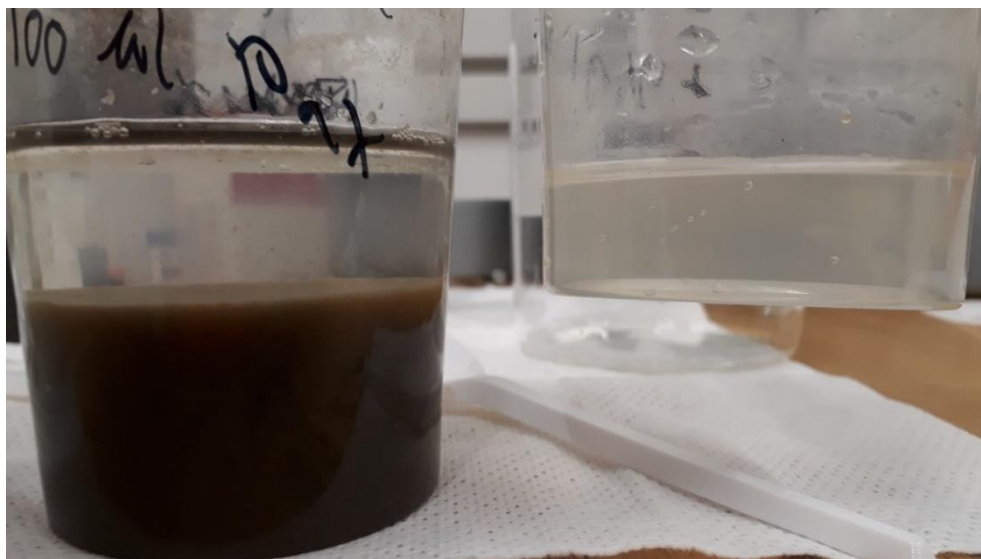
Tuloksena näistä kokeista saimme, että PIX ja PAX saivat kirkasteen sameuden flokkaantumaan ja veden kirkastumaan. PAX reagoi vedessä heti ja saostumat laskeutuivat nopeasti, kun taas PIX:illä sekä reagointi että laskeutuminen olivat hitaampaa ja epätasaisempaa. Lisäksi PIX värjäsi voimakkaasti kirkastetta oranssiksi. Kemfoamx:illä kirkaste sameni vain entisestään ja polyakryyliamidien lisäyksellä ei huomannut mitään

vaikutusta alkuperäiseen kirkasteeseen verrattuna. Kuvassa 30 on havainnollistettu PIX:n ja PAX:n toimivuutta kirkasteen kirkastamisessa.



Kuva 30. Kemikaalitestaukset PIX:llä ja PAX:lla kirkasteen sameuden vähentämiseksi. Kokeissa kemikaalien annostus oli 0,5 ml/l kirkastetta. Kuvassa vasemmalla PIX:llä ja oikealla puolella PAX:lla tehty koe. Keskellä alkuperäistä kirkastetta.

Huomattiin myös, että PAX:lla saostetun kirkasteen saostumat voitiin suodattaa vedestä pois käsipaperin avulla. Tällöin saatiin täysin kirkasta vettä tulokseksi. Tästä voidaan päätellä, että muodostuneet saostumat olivat suhteellisen suuria, kun eivät läpäisseet enää käsipaperia. Kirkasteelle tehtiin myös pienemmillä PAX:n annostuksilla kokeita. Pienin testattava annostus vastasi pitoisuutta 130 g/m^3 . Myös tällä annostuksella PAX reagoi nopeasti kirkasteessa ja muodosti saostumia, joista suurin osa laskeutui astian pohjalle. PAX:ia kokeiltiin lisätä myös lietteen sekaan ja kuvasta 31 voidaan nähdä PAX:n lisäyksen vaikutus lietteeseen muodostuvalle kirkasteelle.



Kuva 31. PAX:n lisäyksen vaikutus lietteen kirkasteelle. PAX:ia lisättiin lietteeseen annostuksella 0,5 ml/l. Vertailun helpottamiseksi oikean puolen astiassa alkuperäistä kirkastetta.

Kuvasta nähdään, että muodostuva kirkaste on hieman kirkkaamman näköistä kuin alkuperäinen kirkaste, mutta sameutta on vielä paljon jäljellä. PAX toimii tehokkaasti pelkän kirkasteen kanssa, mutta lietteeseen laitettuna vaikutus oli paljon heikompi.

8.8 Kirkasteiden sameus ja partikkelikokoanalyysi

Lietteiden ja kirkasteiden suodattaessa hyvin samankaltaisesti, lähdettiin tutkimaan kirkasteiden ominaisuuksia. Lisäksi aiemmissa kokeissa oli tehty havaintoja, että kirkasteen sameudella olisi vaikutusta suodatettavuuteen. Lietteiden laskeutuksessa muodostuneille kirkasteille tehtiin sameuden mittausta sekä partikkelikokoanalyysi 3.3.2020. Näiden mittausten pohjalta lähdettiin tarkastelemaan, selittäisivätkö tulokset kirkasteiden erilaisia suodatettavuuksia. Tutkitut kirkasteet on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Eri paikkakuntien lietteiden laskeutuksessa muodostuneet kirkasteet. Vasemmalta oikealle: Parikkala, Viitasaari ja Mikkeli

Kuvasta voidaan nähdä, että kyseisten kokeiden aikaan Viitasaaren kirkaste oli kirkkaimman näköistä. Parikkalan kirkaste oli jo silmämääräisestikin samean näköistä. Kirkasteiden sameudet mitattiin kuvassa 13 olevalla sameusmittarilla. Laite antoi sameuksien arvot NTU -yksikössä. Tulokset näistä sameusmittauksista on esitetty taulukossa XI.

Taulukko XI. Kirkasteiden sameudet NTU arvoina 3.3.2020.

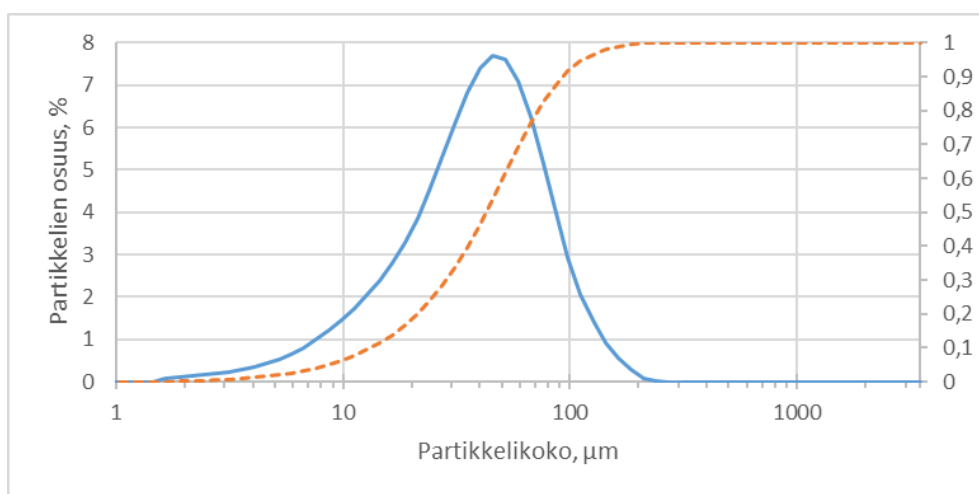
Paikkakunta	Sameus [NTU]
Viitasaari	3,42
Mikkeli	6,23
Parikkala	29,30

Mitatut sameuksien arvot tukevat silmämääräisiä havaintoja. Parikkalan kirkaste oli muita huomattavasti sameampaa. Verrattaessa sameuksien arvoja kirkasteiden ja lietteiden suodatettavuuksiin, voidaan todeta, etteivät sameudet korreloi suodatettavuuden kanssa. Vaikka Viitasaaren kirkaste oli kirkasta ja Parikkalan sameaa, suodatettiin ne hyvin samankaltaisesti. Lisäksi Mikkelin ja Viitasaaren sameuksien arvoissa ei ollut merkittävää

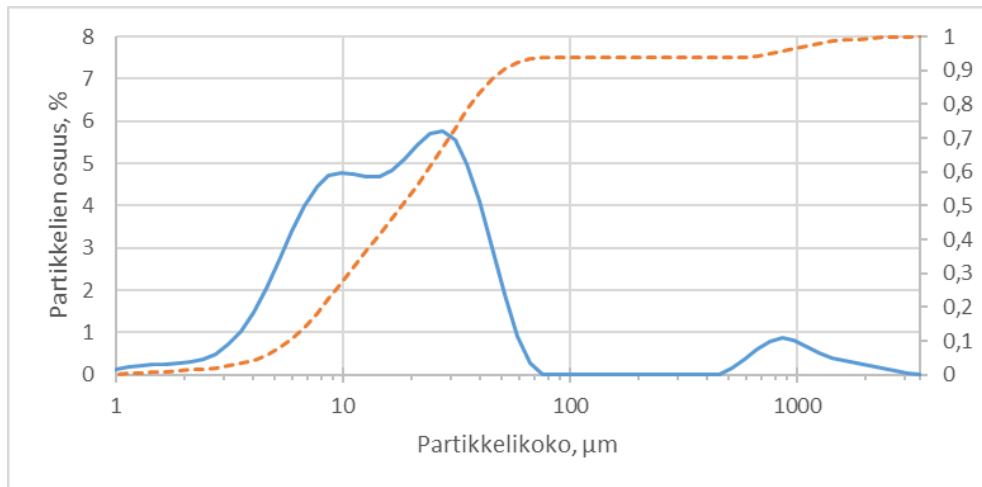
eroa, kun taas suodatettavuudessa oli. Toisaalta Viitasaaren kirkasteen sameus oli vähentynyt silmämääräisesti tarkasteltuna loppuvuoden 2019 ja kevään 2020 välillä ja keväällä liete suodattui paremmin. Mitattuja sameuden arvoja loppuvuodelta 2019 ei kuitenkaan ole.

Kirkasteiden partikkelikokoanalyysi suoritettiin samoista näytteistä sameuden mittausten kanssa. Jokaisen laitoksen kirkasteelle tehtiin 5 rinnakkaista mittausta, joista laskettiin kesiarvo. Rinnakkaisten mittausten tulokset olivat hyvin yhteneviä. Mittaustulokset on esitetty liitteessä VIII.

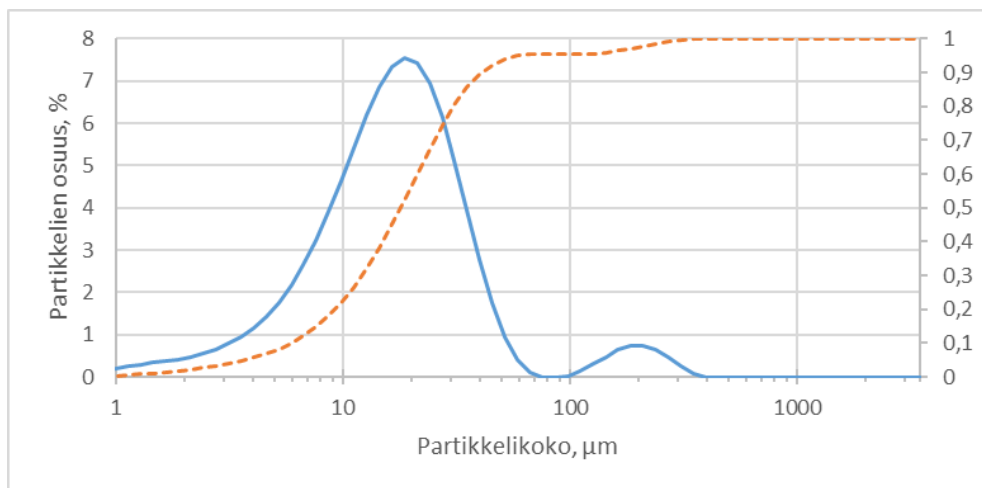
Analyysi suoritettiin kappaleessa 7.5 esitetyllä laitteistolla. Viitasaaren kirkasteen partikkelikokoanalyysin tulokset on esitetty kuvassa 33, Mikkelin kirkasteen kuvassa 34 ja Parikkalan kirkasteen kuvassa 35. Kuvaajissa sininen käyrä tarkoittaa partikkelien osuutta. Oranssi katkoviiva on kumulatiivinen käyrä ja sen arvot luetaan kuvaajan oikean laidan akselista.



Kuva 33. Viitasaaren kirkasteen partikkelikokojakauma. Oranssilla katkoviivalla kumulatiivinen käyrä.



Kuva 34. Mikkelin kirkasteen partikkelikokojakauma. Oranssilla katkoviivalla kumulatiivinen käyrä.



Kuva 35. Parikkalan kirkasteen partikkelikokojakauma. Oranssilla katkoviivalla kumulatiivinen käyrä.

Viitasaaren kirkasteen partikkelikokojakauman piikki osuu 45 μm kohdalle. Kumulatiivisen käyrän perusteelle puolet partikkeleista on tätä pienempiä ja puolet isompia. Suurimmat partikkelit ovat kokoluokaltaan noin 200 μm . Kaikista partikkeleista 90 % on kooltaan alle 95 μm .

Mikkelin kirkasteen partikkelikokojakaumassa esiintyy kolme piikkiä. Ensimmäinen piikki asettuu 10 μm kohdalle, suurin piikki on 25 μm kohdalla ja hyvin pieni piikki löytyy kohdasta 950 μm . Kumulatiivisesta käyrästä katsottuna 50 % partikkeleista on alle 20 μm kokoisia ja 90 % kaikista partikkeleista on kooltaan alle 50 μm . Suurimmat partikkelit Mikkelin kirkasteessa olivat kooltaan yli 3000 μm .

Parikkalan kirkasteen partikkelikokojakaumassa merkittävin piikki on kohdassa 20 μm ja puolet kaikista partikkeleista ovat tätä pienempiä. 90 % kaikista partikkeleista on kooltaan alle 40 μm . Parikkalan kirkasteesta löytyy myös jonkin verran isompia partikkeleita ja tämän pienen piikin keskikohta sijoittuu 200 μm kohdalle. Parikkalan kirkasteen suurimmat partikkelit ovat kooltaan noin 350 μm .

Partikkelikokojakaumien tuloksia vertailtaessa lietteiden ja kirkasteiden suodatettavuuksiin, nähdään, etteivät ne korreloi keskenään. Mikkelin ja Parikkalan kirkasteilla on melko samankaltainen partikkelikokojakauma, sillä ne sisältävät huomattavasti enemmän pientä partikkeliä kuin Viitasaaren kirkaste. Samankaltaisesta kokojakaumasta huolimatta ne suodattuvat hyvin eri tavalla. Ennako-oletus siitä, että suuri määrä hyvin pieniä partikkeleita huonontaisi lietteen suodatusta, ei tuloksien perusteella ole oikea. Viitasaarella vain puolet kirkasteen partikkeleista on alle 45 μm , kun Parikkalassa 90 % kaikista kirkasteen partikkeleista on alle 40 μm ja tästä huolimatta lietteet suodattuvat hyvin samankaltaisesti. Tulosten perusteella kirkasteen partikkelikokojakaumalla ei huomattu olevan selvää yhteyttä lietteen ja kirkasteen suodatettavuuteen.

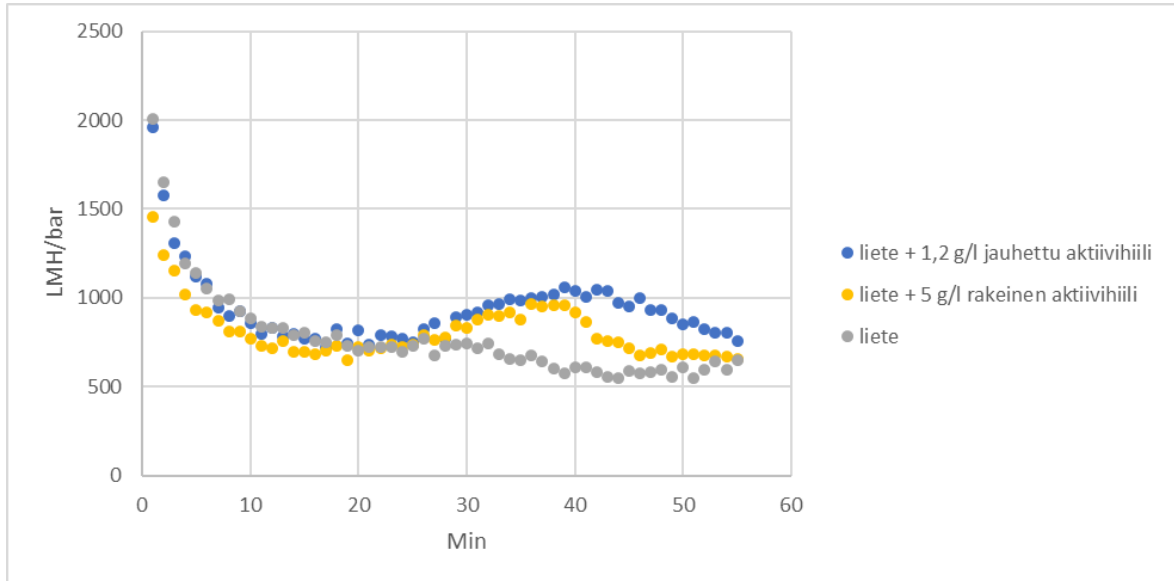
Krzeminski et al. (2012) tutkivat lietteen partikkelikoon vaikutusta lietteen suodatettavuudelle. Tutkimuksessa käytettiin tasomaisia kalvoja, joiden huokoskoko oli 0,08 μm . Tuloksista kävi ilmi, että kokoluokaltaan 10-100 μm partikkeleilla ei ollut selvää vaikutusta lietteen suodatettavuudelle, mikä vahvistaa tässä työssä tehtyjä huomioita. Vaikka tutkimus oli suoritettu lietteelle, voidaan tuloksia soveltaa myös kirkasteille, sillä tehdyissä suodatuskokeissa kirkasteet suodattuivat lähes yhtäläisesti lietteidensä kanssa. Samaisessa tutkimuksessa huomattiin kuitenkin alle 1 μm kokoisten partikkelien määrän vähentymisen lietteessä parantavan lietteen suodatettavuutta (Krzeminski et al. 2012). Partikkelikokoanalyysin tulosten perusteella kirkasteissa alle 1 μm kokoisten partikkeleiden osuus oli hyvin pieni (alle 0,6 %), joten tutkimuksen tulosta ei voida soveltaa nyt tutkittujen kirkasteiden erilaisten suodatettavuuksien selittämisessä. Lisäksi Krzeminski et al. (2012) tekemässä tutkimuksessa kalvon huokoskoko oli pienempi kuin nyt tehdyissä kokeissa, joten tutkimuksen tulos alle 1 μm kokoisten partikkeleiden osalta ei ole täysin vertailukelpoinen.

8.9 Suodatuskokeet aktiivihiilen kanssa

Aktiivihiilen käyttämistä lietteen laadun muokkaukseen on tutkittu runsaasti. Muun muassa Zouboulis et al. (2017) tutkivat aktiivihiilen lisäyksen vaikutusta lietteen suodatettavuudelle pilot-mittakaavan MBR:ssa. Tutkimuksessa havaittiin lietteen suodatettavuuden parantuneen lisättäessä aktiivihiiltä lietteeseen annostuksilla 1, 3 ja 5 g/l (Zouboulis et al. 2017).

Viitasaaren laitoksen tiloissa tehtiin alustavia kokeita lisäämällä rakeista aktiivihiiltä tuoreen lietteen sekaan. Näissä kokeissa huomattiin aktiivihiilen lisäyksen kasvattavan lieteflokkien kokoa silmämääräisesti tarkasteltuna. Reagointi tapahtui heti lisäyksen jälkeen ja liete muuttui rakeisemman näköiseksi.

Suodatuskokeita tehtiin kahdella eri aktiivihiilen annostuksella. Toisessa kokeessa jauhettua aktiivihiiltä annosteltiin 1,2 g/l ja toisessa rakeista aktiivihiiltä 5 g/l lietteen sekaan. Tulokset näistä suodatuksista on esitetty kuvassa 36, minkä lisäksi myös pelkän lietteen suodatus on lisätty kuvaan vertailtavuuden helpottamiseksi. Mittaustulokset suodatuksista on esitetty liitteessä IX. Liete, johon lisättiin 5 g/l rakeista aktiivihiiltä oli 40 minuutin jälkeen laskeutunut hyvin tiiviiksi suodatuslaitteistossa, joten sekoitusnopeutta nostettiin tällöin arvoon 250 rpm ja pidettiin tässä arvossa loppukokeen ajan. 1,2 g/l aktiivihiiliannostuksella tehdyn kokeen sekoitusnopeus oli koko kokeen ajan 100 rpm.



Kuva 36. Suodatuskokeet aktiivihiihlä sisältäville lietteille. Vertailun vuoksi myös pelkän lietteen suodatus kuvassa. Suodatuksissa käytetty uutta kalvoa ja Viitasaaren lietettä. Kokeissa sekoitusnopeus oli 100 rpm ja paine 30 mbar. Koe, jossa aktiivihiihlä oli lisätty annostuksella 5 g/l sekoitusnopeus nostettiin 40 minuutin jälkeen arvoon 250 rpm. Tuloksille on tehty lämpötilakorjaus 15 °C:seen.

Kuvaajasta nähdään, että lietteet suodattuivat ensimmäisen 20 minuutin ajan hyvin yhdenmukaisesti. Tämän jälkeen aktiivihiihlä sisältäneiden lietteiden suodatusten permeabiliteettien arvot lähtivät nousuun ja nousu kesti 40 minuuttiin saakka, jonka jälkeen ne laskivat tasaisesti kokeiden loppuun asti. Kokeen lopussa suodatusten permeabiliteetit olivat hyvin tasaiset. Kokeen, jossa lietteeseen oli lisätty 5 g/l aktiivihiihlä, sekoitusnopeuden muutoksella oli tulosten perusteella vaikutusta. Kyseisen kokeen permeabiliteetin arvo alkoi laskea voimakkaasti juuri sekoitusnopeuden noston jälkeen (40 minuutin kohdalla).

Lisättäessä laboratoriossa aktiivihiihlä lietteisiin, ei niissä tapahtunut samanlaista reaktiota kuin laitoksen tiloissa testattaessa tuoreen lietteen kanssa. Suodatuskokeet, joissa lietteeseen lisättiin aktiivihiihlä, tehtiin 5.3.2020 ja kokeissa käytetty liete oli haettu laitokselta jo 2.3.2020. Vaikka liete oli säilytetty ilmastettuna, oli sen koostumus muuttunut säilytyksen aikana. Tämän takia tulokset eivät välttämättä vastaa tilannetta, jossa aktiivihiihlä lisättäisiin tuoreen lietteen sekaan. Näiden tulosten pohjalta ei voida tehdä päätelmiä aktiivihiihien toimivuudesta lietteen suodatettavuuden parantamisessa.

9 TOIMENPITEET LAITOKSELLE

Fosforin saostuskemikaalin PAX:in syöttökohtaa muutettiin 4.11.2019. Tähän asti molemmat fosforin saostuskemikaalit oli syötetty natriumhydroksidin kanssa samaan paikkaan prosessin alkuun. Tällöin kemikaalit olivat voineet reagoida keskenään tarkoituksettomasti. Muutoksessa lietettä alettiin kierrättää tasausaltaiden kautta takaisin prosessiin ja PAX:ia alettiin syöttää tasausaltaille menevään lietevirtaan. Altaista liete palautetaan ilmastukseen. Tarkoituksena on saada hienojakoinen aines flokkautumaan uudestaan tasausaltaissa. Tämän jälkeen prosessi denitrifioi hieman myös tasausaltaissa. (Lignell, 2019^a)

PAX:n syöttökohtaa muuttamalla prosessin lipeän tarve hieman vähentyi. Lisäksi liukoisen fosforin poistuminen tehostui. Näiden tulosten perusteella voidaan päätellä PAX:n ja lipeän häirinneen toisiaan samaan paikkaan syötettyinä. (Huuskonen & Mäkelä, 2020)

Kemikaalitestauksen perusteella laitoksella kokeiltiin syöttää prosessiin normaalia enemmän PAX:ia, jotta se sitoisi kirkasteen sameutta pois. Normaalisti prosessiin on syötetty PIX:ia 150 g/m³ ja PAX:ia 50 g/m³. Kokeilussa PIX:n annostus pienennettiin 100 g/m³ ja PAX:n annostus nostettiin 200 g/m³. (Lignell, 2020^b) Kokeilua tehtiin kahdessa 4 päivän jaksossa joulutammikuun vaihteessa. Kokeiluilla ei ollut näkyviä vaikutuksia laitoksella.

Prosessiin kokeiltiin myös syöttää kationista polyelektrolyyttiä (lietepolymeeriä) aikavälillä 7.1-4.3.2020 (Mäkelä, 2020), sillä sen huomattiin sitovan tehokkaasti sameutta pois lietteen kirkasteesta. Viitasaaren lietteen kirkaste oli todella kirkasta 3.3.2020 tehtyjen laboratoriokokeiden aikaan, joten selvästi aineen syöttö prosessiin sitoi sameutta pois. Laboratoriossa tehdyissä suodatuskokeissa myös lietteen suodatettavuus oli parantanut joulukuusta, joten luultavasti polymeerin lisäys oli parantanut lietteen suodatettavuutta. Kuitenkaan itse laitoksella ei havaittu muutosta lietteen suodatettavuudessa eikä kalvojen permeabiliteetti-arvoissa. Polymeerin syötön vaikutukset näkyivät laitoksen tiloissa tehdyissä kirkasteen suodatuksissa parempana suodatettavuutena sekä lietteen laskeumia mitatessa parantuneena lietteen laskeutumisena.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää, mistä Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamon heikkenevä suodatuskapasiteetti johtuu ja etsiä myös mahdollisia toimenpiteitä suodatuskapasiteetin palauttamiseksi ja ylläpitämiseksi. Asiaa lähdettiin tutkimaan erilaisten laboratorioskokeiden avulla.

Työn alkaessa oletuksena oli, että suodatuskapasiteetin heikkeneminen johtuisi likaisista ja tukkeutuneista kalvoista. Käytetyille kalvoille tehdyissä suodatuskokeissa kuitenkin suurin osa kalvoista vaikutti olevan täysin käyttökuntoisia. Käytetyistä kalvoista löytyi kuitenkin myös selvästi likaisia kalvoja, joiden suodatuskyky oli heikentynyt. Likaiset kohdat kalvoissa keskittyivät tyypillisesti kalvolevyjen reunoille. Tämä viittaisi siihen, että kalvojen puhdistus laitoksella olisi hieman epätasaista ja osa kalvopinnoista jäisi vaille puhdistusta. Ongelma voisi aiheutua ilmastuksen sekä kalvopesuissa käytettävien pesukemikaalien epätasaisesta jakautumisesta kalvoille.

Suurin osa vaihdetun suodatusmoduulin kalvoista oli kuitenkin puhtaan näköisiä, ja ne saivat suodatuskokeissa hyviä permeabiliteettiarvoja. Lisäksi käytetyt kalvot toimivat lietteiden suodatuskokeissa lähes yhtäläisesti uuden kalvon kanssa. Tämän perusteella syy heikentyneeseen suodatuskapasiteettiin olisi enemmän lietteen laadussa kuin kalvoissa. Eri paikkakuntien lietteiden suodatettavuuksissa olikin huomattavia eroja.

Syitä lietteiden erilaisille suodatettavuuksille etsittiin mikroskopoimalla lietteitä. Mikroskopoinneissa havaittiin, että Viitasaaren ja Parikkalan lietteet sisälsivät pitkiä kuitumaisia kappaleita sekä verkkomaista materiaalia. Mikkelin lietteestä ei näitä löytynyt ja Mikkelin liete suodattui huomattavasti Viitasaaren ja Parikkalan lietteitä paremmin. Tämän perusteella pitkillä kuitumaisilla kappaleilla ja verkkomaisella materiaalilla voisi olla heikentävä vaikutus lietteen suodatettavuuteen.

Suodatettaessa kirkasteita havaittiin niiden suodattuvan lähes yhtäläisesti lietteidensä kanssa. Tämä viittaisi siihen, että lieteflokeilla ei olisi merkitystä lietteen suodatettavuuteen ja syy lietteiden erilaiseen suodattumiseen löytyisi kirkasteista. Suodatuskokeissa oli havaittu kirkasteiden olevan melko sameita, joten sameuden arveltiin olevan syynä heikkoon suodatettavuuteen. Sameudet mitattiin, mutta niillä ei huomattu olevan suoraa yhteyttä kirkasteiden erilaisiin suodatettavuuksiin. Toisaalta Viitasaaren lietteen kirkasteen sameus

oli kuitenkin vähentynyt loppuvuoden 2019 ja kevään 2020 välillä ja keväällä liete suodattui paremmin kuin loppuvuonna. Sameuksien lisäksi kirkasteista tutkittiin partikkelikokojakaumat, sillä ajateltiin, että pienten partikkelien suurella määrällä voisi olla vaikutusta suodatettavuuteen. Tuloksista kävi kuitenkin ilmi, että selkeää yhteyttä partikkelikokojakauman ja suodatettavuuden väliltä ei löytynyt.

Sakokaivolietteen kirkasteen huomattiin suodattuvan huomattavasti muita kirkasteita huonommin. Lisäksi se muodosti kalvon pinnalle melko tiukasti kiinni jääneen kakkukerroksen, mitä eivät muut kirkasteet tai lietteet tehneet. Voidaan olettaa, että sakokaivolietteen suodatuksessa muodostuisi enemmän ja nopeammin kakkukerrosta kalvon pintaan kuin pelkkää kirkastetta suodatettaessa. Suodatuskokeen perusteella voitaisiin ajatella, että sakokaivolietteiden suodattaminen olisi haastavaa. Koe tulisi kuitenkin tehdä useammalle sakokaivoliettele, jotta tuloksia voitaisiin yleistää. Viitasaaren laitoksen kuormituksesta iso osa aiheutuu sakokaivolietteistä, jolloin niiden suurella määrällä saattaisi olla heikentävä vaikutus koko lietemassan suodatettavuuteen laitoksella.

Tutkimusten perusteella yksiselitteistä syytä laitoksen heikentyneeseen suodatuskapasiteettiin ei löytynyt. Kuitenkin ongelma vaikuttaisi olevan lietteen laadussa. Tulevaisuudessa sakokaivolietteiden kohdalla tulisi tutkia, voitaisiinko esikäsittelyn avulla parantaa niiden suodatettavuutta sekä vähentää niiden taipumusta tarttua kalvon pintaan. Lisäksi niiden tasaisella syöttämisellä prosessiin välttyttäisiin kuormitusvaihteluilta, jotka voivat olla prosessin biologialle haasteellisia. Kuitumaisten kappaleiden ja verkkomaisen materiaalin poistoa prosessista tulisi selvittää ja jatkossa pyrkiä estämään niiden pääsy prosessiin. Esikäsittelyn toimivuuteen tulisi kiinnittää huomiota ja tarvittaessa tehostaa sitä.

Suodatuskapasiteetin palauttamiseksi lietteen sekaan kokeiltiin lisätä aktiivihientä. Suodatuskokeita tehtäessä liete käyttäytyi aktiivihienten kanssa eri tavoin kuin kokeiltaessa sitä tuoreen lietteen kanssa. Aktiivihienten lisäys vaikutti tuoreeseen lietteeseen flokkikokoa kasvattavasti, mutta vanhassa lietteessä aktiivihienten lisäyksellä ei ollut samanlaista vaikutusta. Suodatuskokeiden tekoaikaan liete oli jo useamman päivän vanhaa, jolloin lietteen koostumus oli säilytyksen aikana muuttunut. Tästä syystä suodatuskokeiden tulokset eivät välttämättä vastaa tilannetta, jossa aktiivihieni lisättäisiin tuoreeseen lietteeseen.

Suodatuskokeita tulisi tehdä tuoreelle lietteelle aktiivihiilen kanssa ja kiinnittää kokeissa huomiota siihen, tehostavatko rakeet kalvojen puhdistumista ja voivatko ne vahingoittaa kalvoja. Suodatuskapasiteetin ylläpitämiseksi tutkittiin vesijohtoveden ja permeaatin eroavaisuuksia vastavirtapesuissa. Kokeiden perusteella vesi saattaisi toimia paremmin kalvojen puhdistuksessa, mutta tarvitaan vielä lisää tutkimusta asiasta. Lämpötilan vaikutusta vastavirtapesujen tehokkuudelle tulisi tutkia.

Jatkotutkimuksissa voisi myös selvittää lietteen sisältämien partikkeleiden varausta suhteessa laitoksella käytettävän kalvon varaukseen. Onko mahdollista, että eri laitosten lietteiden partikkelit tai kalvot ovat eri tavalla varautuneet ja selittäisikö tämä niiden erilaisen suodatettavuuden. Lietteitä voisi kokeilla suodattaa myös eri huokoskoon omaavilla kalvoilla ja katsoa, miten se vaikuttaisi suodatukseen. Lietteiden partikkelien koon suhde kalvon huokoskoon voi mahdollisesti vaikuttaa lietteen suodatettavuuteen.

LÄHTEET

- Alfa Laval. 2019. MBR membranes. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.1.2020]. Saatavilla: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/separation/membranes/mbr-membranes/mbr-membranes_200000414-2-en-gb.pdf
- Aqua Nova Oy. 2016. Käyttöturvallisuustiedote. Natronlipeä 50 % liuos. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.2.2020]. Saatavilla: <https://www.aquanova.fi/assets/ktt/ktt-natronlipea.pdf>
- Aquazone/Jyväskylän energia Oy. 2019. Viitasaaren Mustasuon jätevedenpuhdistamon MBR-prosessiselostus.
- Arola, K., Hatakka, H., Mänttari, M. & Kallioinen, M. 2017. Novel process concept alternatives for improved removal of micropollutants in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 186, pp. 333-341. Doi:10.1016/j.seppur.2017.06.019
- Bahadori, A. & Smith, S. 2016. *Dictionary of Environmental Engineering and Wastewater Treatment*. Cham: Springer International Publishing.
- Ben-Barak, I. 2009. *The Invisible Kingdom: From the Tips of Our Fingers to the Tops of Our Trash, Inside the Curious World of Microbes*. Hachette UK.
- Cote, P., Alam, Z. & Penny, J. 2012. Hollow fiber membrane life in membrane bioreactors (MBR). *Desalination*, 288, pp. 145-151. Doi:10.1016/j.desal.2011.12.026
- Deowan, S., Bouhadjar, S. & Hoinkis, J. 2015. Membrane bioreactors for water treatment. in Basile, A., Cassano, A. & Rastogi, N. (ed.) 2015. *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications*. Woodhead Publishing. Doi:10.1016/B978-1-78242-121-4.00014-9
- Di Bella, G. & Torregrossa, M. 2013. Foaming in membrane bioreactors: Identification of the causes. *Journal of Environmental Management*, 128, pp. 453-461. Doi:10.1016/j.jenvman.2013.05.036
- DNR. 2010. *Advanced Activated Sludge Study Guide*. Wisconsin Department of Natural Resources, Wastewater Operator Certification. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 7.2.2020]. Saatavilla: <https://dnr.wi.gov/regulations/opcert/documents/wwsgactsludgeadv.pdf>
- Figoli, A. & Criscuoli, A. (ed.) 2017. *Sustainable Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment*. Green Chemistry and Sustainable Technology. Singapore: Springer.
- Gkotsis, P., Banti, D., Peleka, E., Zouboulis, A. & Samaras, P. 2014. Fouling Issues in Membrane Bioreactors (MBRs) for Wastewater Treatment: Major Mechanisms, Prevention and Control Strategies. *Processes*, 2(4), pp. 795-866. Doi:10.3390/pr2040795.

- Glymph, T. 2005. *Wastewater Microbiology: A Handbook for Operators*. Denver. American Water Works Association.
- Hai, F., Yamamoto, K. & Lee, C.H. (ed.) 2019. *Membrane Biological Reactors – Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse*. 2 ed. London. IWA Publishing. ISBN: 9781780409177
- Hai, F. & Yamamoto, K. 2011. *Membrane Biological Reactors*. In P. Wilderer (Eds.), *Treatise on Water Science* (pp. 571-613). UK: Elsevier.
- Hakala, I., Myllymäki, J. & Saarinen, R. 2012. *Rihmaopas*. Käsikirja rihmamaisten bakteerien tunnistamiseksi ja niiden aiheuttamien ongelmien torjumiseksi. Lounais-Suomen vesiensuojeluyhdistys.
- Hautala, M. 2019. Viitasaaren jätevedenpuhdistamo ja CIP-pesut [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottoja: Jenna Finnilä. Lähetetty: 12.11.2019 klo 8.28.
- Huuskonen, T & Mäkelä, P. 2020. Viitasaaren puhdistamo [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Jenna Finnilä. Lähetetty 21.1.2020 klo 9.09.
- Iglesias, R., Simón, P., Moragas, L., Arce, A. & Rodriguez-Roda, I. 2017. Cost comparison of full-scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 75(11), p. 2562. Doi:10.2166/wst.2017.132
- Impero, J. & Hammler, K. 2015. MBR Screening Part 1: MBR screen designs and performance – an overview. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.5.2020]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/features/membrane-bioreactor-screening-part-1-mbr-screen-designs-and-performance-an-overview/>
- Iorhemen, O., Hamza, R. & Tay, J. 2016. Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling. *Membranes*, 6(2). Doi:10.3390/membranes6020033
- Iorhemen, O. T., Hamza, R. A. & Tay, J. H. 2017. Membrane fouling control in membrane bioreactors (MBRs) using granular materials. *Bioresource Technology*, 240, pp. 9-24. Doi:10.1016/j.biortech.2017.03.005
- Judd, S. & Judd, C. 2006. *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Oxford: Elsevier.
- Judd, S. & Judd, C. 2011. *The MBR Book*. 2 ed. Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment. Oxford: Elsevier.
- Judd, S. 2016. The status of industrial and municipal effluent treatment with membrane bioreactor technology. *Chemical Engineering Journal*, 305, pp. 37-45. Doi:10.1016/j.cej.2015.08.141

- Kemira. 2013^a. Käyttöturvallisuustiedote. Kemira PAX-14. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.2.2020]. Saatavilla: <https://www.aquanova.fi/assets/ktt/ktt-pax-14.pdf>
- Kemira. 2013^b. Käyttöturvallisuustiedote. Kemira PIX-105. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.2.2020]. Saatavilla: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BABB1A9E7-949C-452C-A5BE-59BF26C658EE%7D/134440>
- Kraume, M. & Drews, A. 2010. Membrane Bioreactors in Waste Water Treatment – Status and Trends. *Chemical Engineering & Technology*, 33(8), pp. 1251-1259. Doi:10.1002/ceat.201000104
- Krzeminski, P., Iglesias-Obelleiro, A., Madebo, G., Garrido, J., van Der Graaf, J. & van Lier, J. 2012. Impact of temperature on raw wastewater composition and activated sludge filterability in full-scale MBR systems for municipal sewage treatment. *Journal of Membrane Science*, 423-424, pp. 348-361. Doi:10.1016/j.memsci.2012.08.032
- Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R. & Toivikko, S. 2014. Parat käyttökelpoinen tekniikka (BAT) – Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. *Suomen ympäristö 3/2014*. Ympäristöministeriö.
- Le-Clech, P., Chen, V. & Fane, T. 2006. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284(1), pp. 17-53. Doi:10.1016/j.memsci.2006.08.019
- Li, Y., He, Y., Liu, Y., Yang, S. & Zhang, G. 2005. Comparison of the filtration characteristics between biological powdered activated carbon sludge and activated sludge in submerged membrane bioreactors. *Desalination*, 174(3), pp. 305-314. Doi:10.1016/j.desal.2004.10.005
- Lignell, I. 2019^a. Viitasaaren jätevedenpuhdistamon prosessin muutos [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottoja: Jenna Finnilä. Lähetetty: 24.10.2019 klo 11.01.
- Lignell, I. 2019^b. Viitasaaren seikkailut tähän mennessä [yksityinen sähköpostiviesti]. Lähetetty 11.11.2019 klo 10.16. Sähköposti välitetty: 10.3.2020 klo 16.35. Vastaanottaja: Jenna Finnilä
- Lignell, I. 2019^c. Viitasaaren kuppikokeet 17-19.12.2019 [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Jenna Finnilä. Lähetetty: 17.12.2019 klo 15.23.
- Lignell, I. 2020^a. Parikkalan jätevedenpuhdistamo [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottoja: Jenna Finnilä. Lähetetty: 14.1.2020 klo 15.02.
- Lignell, I. 2020^b. Viitasaaren MBR [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottoja: Jenna Finnilä. Lähetetty: 29.1.2020 klo 11.20.
- Lignell, I. 2020^c. Teknologiajohtaja. Operon Group Oy. Haastattelu 9.4.2020.

Lippel, G. & Cerqueira, A. 2018. Membrane Bioreactors (MBRs) in Dezotti, M. k., Lippel, G. k. & Bassin, J. P. k. 2018. Advanced Biological Processes for Wastewater Treatment: Emerging, Consolidated Technologies and Introduction to Molecular Techniques. Cham: Springer International Publishing.

Luis, P. (ed.) 2018. Fundamental modeling of membrane systems: Membrane and process performance. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

LUT University. 2014. Kunnalliseen jätevedenpuhdistukseen uusi tekniikka käyttöön pian myös Suomessa. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.1.2020]. Saatavilla: https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/kunnalliseen-jatevedenpuhdistukseen-uusi-tekniikka-kayttoon-pian-myos-suomessa

Ma, K. & Mark, J. 2017. A Preliminary Comparative Analysis of MBR and CAS Wastewater Treatment Systems. *Int Water Wastewater Treat* 3(2). Doi: <http://dx.doi.org/10.16966/2381-5299.138>

Malvern Panalytical. 2020. Mastersizer 3000. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.5.2020]. Saatavilla: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000>

Meng, F., Chae, S., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. & Yang, F. 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43, pp. 1489-1512. Doi:10.1016/j.watres.2008.12.044

Mikkelin vesilaitos. 2015. Metsä-sairilan jätevedenpuhdistamo – hankekuvaus. Kaupunginvaltuusto 31.8.2015 liite 1 §. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.1.2020]. Saatavilla: <https://docplayer.fi/23358943-Metsa-sairilan-jatevedenpuhdistamo-hankekuvaus.html>

Mishima, I. & Nakajima, J. 2009. Control of membrane fouling in membrane bioreactor process by coagulant addition. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 59(7), p. 1255. Doi:10.2166/wst.2009.090

Mäkelä, P. 2020. Muutokset Viitasaaren jätevedenpuhdistamolla [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottoja: Jenna Finnilä. Lähetetty: 1.4.2020 klo 12.17.

Park, H., Chang, I. & Lee, K. 2015. Principles of membrane bioreactors for wastewater treatment. Boca Raton. CRC Press; IWA Publishing.

Pentair. X-flow airlift. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.1.2020]. Saatavilla: <https://xflow.pentair.com/en/products/x-flow-airlift>

Pöyry. 2019. Jätevesitarkkailun yhteenveto 2018. Wiitaseudun energia Oy, Viitasaaren JVP.

Radjenović J., Matošić M., Mijatović I., Petrović M., Barceló D. 2007. Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology. In: Barceló D.,

- Petrovic M. (eds) Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 5S/2. Berlin, Heidelberg. Springer.
- Rantanen, Pirjo 2010. Biologinen typen ja fosforinpoisto jätevesistä - nitrifikaation tehostaminen vapaasti kelluvilla kantoainepatjoilla. Espoo: Aalto-yliopisto, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Lisensiaattityö.
- Rezaei, M. & Mehrnia, M. 2014. The influence of zeolite (clinoptilolite) on the performance of a hybrid membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 158, pp. 25-31. Doi:10.1016/j.biortech.2014.01.138
- Risteelä, S. 2019. MBR-tekniikka Taskilan jätevedenpuhdistamolla. Diplomityö. Oulun yliopisto. Teknillinen tiedekunta.
- Rosenberger, S. & Kraume, M. 2003. Filterability of activated sludge in membrane bioreactors. *Desalination*, 151(2), pp. 195-200. Doi:10.1016/S0011-9164(02)00998-0
- Sadr, S. & Saroj, D. 2015. Membrane technologies for municipal wastewater treatment in Basile, A., Cassano, A. & Rastogi, N. (ed.) 2015. *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications*. Woodhead Publishing. Doi: 10.1016/B978-1-78242-121-4.00014-9
- Schuyler, R. & Municipal Subcommittee. 2001. *Wastewater biology: The microlife*. Water Environment Federation. 2nd ed. ISBN 1-57278-167-X
- Song, K., Kim, Y. & Ahn, K. 2008. Effect of coagulant addition on membrane fouling and nutrient removal in a submerged membrane bioreactor. *Desalination*, 221(1-3), pp. 467-474. Doi:10.1016/j.desal.2007.01.107
- Suez. 2019. ZeeWeed 500 membrane. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.1.2020]. Saatavilla: <https://www.suezwatertechnologies.com/products/ultrafiltration/zeeweed-500-membrane>
- Tacke, D., Pinnekamp, J., Prieske, H. & Kraume, M. 2008. Membrane bioreactor aeration: Investigation of the velocity flow pattern. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 57(4), p. 559. doi:10.2166/wst.2008.123
- Teli, A., Antonelli, M., Bonomo, L. & Malpei, F. 2012. MBR fouling control and permeate quality enhancement by polyaluminium chloride dosage: A case study. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 66(6), p. 1289. Doi:10.2166/wst.2012.315
- The MBR site. Membrane bioreactors – hollow fibre configurations. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.1.2020]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/mbr-hollow-fibre-configurations/>

van den Brink, P., Vergeldt, F., Van As, H., Zwijnenburg, A., Temmink, H. & van Loosdrecht, M. 2013. Potential of mechanical cleaning of membranes from a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 429, pp. 259-267. Doi:10.1016/j.memsci.2012.11.061

Viitasaaren tekninen lautakunta. 2019. Kunnalliset jätehuoltomääräykset. Sydän-Suomen jätelautakunta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.4.2020]. Saatavilla: https://viitasaari.fi/wp-content/uploads/2019/06/10764-Jatehuoltomaaraykset_1_8_2019.pdf

VVY. 2016. Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa. Suomen vesilaitosyhdistys ry. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 42. Helsinki.

VVY. 2018. Finnish Industrial Wastewater Guide – conveying non-domestic wastewater to sewers. Suomen vesilaitosyhdistys ry ja Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. Vesilaitosyhdistyksen julkaisusarja nro 69. Helsinki.

Wang, Z. Ma, J., Tang, C., Kimura, K., Wang, Q. & Han, X. 2014. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. *Journal of Membrane Science*, 468, pp. 276-307.

Wiitaseudun energia. 2018. Mustasuon jätevedenpuhdistamo ympäristölupahakemus [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.11.2019]. Saatavilla Aluehallintoviraston Lupa-Tietopalvelusta: <https://tietopalvelu.ahtp.fi/Lupa/>

Wonder. Hollow fibre ultrafiltration membrane. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.1.2020]. Saatavilla: <http://wdtec.com.cn/products/mofenlicailiao/30.html>

Wu, J., Chen, F., Huang, X., Geng, W. & Wen, X. 2006. Using inorganic coagulants to control membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Desalination*, 197, pp. 124-136. Doi:10.1016/j.desal.2005.11.026

Zhang, M., Leung, K., Lin, H. & Liao, B. 2019. Characterization of foaming and non-foaming sludge relating to aeration and the implications for membrane fouling control in submerged membrane bioreactors. *Journal of Water Process Engineering*, 28, pp. 250-259. Doi:10.1016/j.jwpe.2019.02.011

Zouboulis, A. I., Gkotsis, P. K., Zamboulis, D. X. & Mitrakas, M. G. 2017. Application of powdered activated carbon (PAC) for membrane fouling control in a pilot-scale MBR system. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 75(10), p. 2350. Doi:10.2166/wst.2017.108

LIITTEET

LIITE I	Veden kinemaattinen viskositeetti lämpötilan funktiona	1 sivu
LIITE II	Käytettyjen kalvojen suodatuskokeiden mittaustulokset	1 sivu
LIITE III	Veden ja permeaatin vertailu kalvojen puhdistuksessa - suodatuskokeiden mittaustulokset	1 sivu
LIITE IV	Lyhyiden lietesuodatusten mittaustulokset	2 sivua
LIITE V	Kuuden tunnin lietesuodatusten mittaustulokset	5 sivua
LIITE VI	Kirkasteiden suodatuskokeiden mittaustulokset	2 sivua
LIITE VII	Mittaustulokset ”pestyn” lietteen ja kirkasteen suodatuksesta levyn 2 kalvoille	1 sivu
LIITE VIII	Partikkelikokojakaumien mittaustulokset ja niiden kumulatiivisten jakaumien mittaustulokset	5 sivua
LIITE IX	Mittaustulokset suodatuskokeista aktiivihiilen kanssa	2 sivua

Lämpötila, [°C]	Veden kinemaattinen viskositeetti, ·10⁻⁶ [m²/s]
0	1,793
1	1,732
2	1,674
3	1,619
4	1,568
5	1,520
6	1,474
7	1,429
8	1,386
9	1,346
10	1,307
11	1,270
12	1,235
13	1,201
14	1,169
15	1,138
16	1,108
17	1,080
18	1,053
19	1,027
20	1,002
21	0,978
22	0,955
23	0,933
24	0,911
25	0,893
26	0,873
27	0,854
28	0,836
29	0,818
30	0,802
31	0,785
32	0,769
33	0,753
34	0,738
35	0,724

	Levy 1 kalvo a	Levy 1 kalvo b	Levy 2	Levy 3	Levy 4	Levy 5 kalvo a	Levy 5 kalvo b
Alkulämpötila, [°C]	16	11	10	13	19	18	19
t, [min]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]
0	2,96	2,57	0,35	2,09	1,58	0,04	0,45
1	8,18	8,93	3,93	4,52	4,72	0,27	2,16
2	12,92	15,32	7,34	6,74	7,84	0,53	3,85
3	17,64	21,18	10,67	9,14	10,77	0,79	5,66
4	22,52	26,90	13,97	11,56	13,82	1,06	7,21
5	27,10	32,61	17,25	13,81	16,89	1,32	8,92
6	31,77	38,08	20,60	16,07	19,71	1,56	10,53
7	36,30	43,55	23,64	18,26	22,73	1,84	12,16
8	40,68	48,70	26,89	20,41	25,65	2,10	13,70
9	45,15	53,77	29,93	22,77	28,49	2,37	15,32
10	49,63	58,93	33,26	24,85	31,33	2,60	16,89
11	53,99	63,62	36,15	27,15	34,20	2,89	18,51
12	58,22	68,49	39,26	29,30	36,96	3,16	20,02
13	62,67	73,33	42,33	31,48	39,70	3,44	21,52
14	67,25	78,06	45,35	33,53	42,38	3,70	23,13
15	71,48	82,78	48,27	35,66	45,21	3,96	24,69
16	75,90	87,31	51,25	37,76	47,91	4,22	26,20
17	80,23	91,96	54,09	39,88	50,54	4,50	27,65
18	84,41	96,45	57,07	41,82	53,30	4,75	29,12
19	88,66	100,89	59,97	43,82	56,05	5,01	30,68

	uusi, vesi			uusi, permeaatti			1, vesi		
	10	V	20	10	V	20	10	V	20
Alkulämpötilä, [°C]	22	16	17	14	12	13	21	19	18
t, [min]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]
0	6,84	3,15	4,81	3,15	6,00	2,07	2,60	5,06	7,79
1	12,54	8,48	9,85	7,65	9,36	5,79	8,68	11,12	12,64
2	18,10	13,75	14,99	11,91	12,41	9,41	14,68	16,94	17,47
3	23,63	18,79	20,00	16,33	15,17	13,10	20,42	22,43	22,28
4	29,04	23,80	25,03	20,35	17,96	16,70	26,34	28,03	26,97
5	34,42	28,59	30,04	24,58	20,52	20,19	31,99	33,51	31,93
6	39,71	33,48	35,00	28,58	22,83	23,75	37,59	38,91	36,64
7	44,75	38,23	39,94	32,53	25,25	27,23	43,29	44,18	41,26
8	49,74	42,79	44,94	36,33	27,55	30,66	49,02	49,21	45,98
9	54,91	47,47	49,86	40,23	29,78	34,11	54,65	54,35	50,51
10	59,96	51,90	54,75	44,05	31,68	37,50	60,37	59,47	55,24
11	64,97	56,45	59,72	47,76	33,80	40,73	66,07	64,48	59,94
12	69,91	60,68	64,60	51,57	35,72	44,11	71,74	69,27	64,54
13	74,82	65,24	69,59	55,16	37,66	47,43	77,30	74,04	69,15
14	79,76	69,45	74,55	58,77	39,65	50,65	82,88	78,81	73,87
15	84,47	73,70	79,52	62,26	41,38	53,97	88,36	83,28	78,69

	1, permeaatti			5, vesi			5, permeaatti		
	10	V	20	10	V	20	10	V	20
Alkulämpötilä, [°C]	20	20	20	16	19	17	8	10	11
t, [min]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]
0	4,28	1,88	2,77	0,20	2,47	2,16	1,77	2,82	2,89
1	11,01	6,15	5,79	2,61	4,89	4,19	3,45	4,39	3,92
2	17,63	10,31	8,87	4,67	7,13	6,13	4,99	5,87	4,88
3	23,93	14,21	11,87	6,84	9,50	8,23	6,58	7,22	5,96
4	30,19	18,04	14,95	9,00	11,66	10,19	8,21	8,62	6,96
5	36,28	22,02	18,02	11,11	13,91	12,19	9,93	9,83	8,03
6	42,50	25,90	21,08	13,25	16,00	14,30	11,42	11,07	8,97
7	48,53	29,80	24,14	15,41	18,05	16,29	13,05	12,20	10,11
8	54,38	33,58	27,12	17,49	20,19	18,24	14,59	13,34	11,15
9	60,18	37,26	30,24	19,74	22,14	20,29	16,18	14,50	12,16
10	66,03	40,92	33,07	21,79	24,20	22,25	17,70	15,63	13,16
11	71,69	44,66	36,08	24,03	26,21	24,27	19,22	16,62	14,23
12	77,35	48,27	39,10	26,68	28,18	26,27	20,72	17,72	15,35
13	82,84	51,83	42,08	28,95	30,10	28,29	22,33	18,67	16,38
14	88,47	55,39	45,23	31,06	32,01	30,35	23,82	19,66	17,45
15	93,94	58,92	48,28	33,22	33,83	32,42	25,45	20,71	18,58

	Mikkeli uusi	Mikkeli 1	Parikkala uusi	Parikkala 1	Viitasaari uusi	Viitasaari uusi 12.12.	Viitasaari 1
Alkulämpötila, [°C]	11	11	11	16	10	11	16
Loppulämpö- tila, [°C]	18	17	18	20	18	20	20
t, [min]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]
0	5,18	5,78	2,09	3,18	4,08	1,50	0,71
1	10,12	9,80	4,86	6,47	7,40	3,47	2,84
2	14,90	13,79	7,13	9,78	10,13	5,19	4,72
3	19,43	17,75	9,40	12,69	12,50	6,64	6,45
4	23,75	21,43	11,44	15,42	14,53	8,05	7,83
5	28,01	25,08	13,37	18,00	16,47	9,29	9,25
6	32,18	28,48	15,13	20,56	18,26	10,55	10,61
7	36,33	31,99	16,94	23,03	19,94	11,60	11,77
8	40,15	35,52	18,64	25,23	21,63	12,70	13,06
9	44,08	38,92	20,32	27,54	23,20	13,74	14,09
10	47,86	42,30	21,96	29,79	24,71	14,72	15,16
11	51,41	45,64	23,53	31,82	26,14	15,74	16,20
12	55,15	48,87	25,09	33,88	27,60	16,80	17,19
13	58,64	52,11	26,57	35,96	29,05	17,69	18,20
14	62,08	55,28	27,99	37,85	30,44	18,52	19,11
15	65,45	58,27	29,48	39,82	31,85	19,38	20,02
16	68,79	61,25	30,98	41,76	33,18	20,22	20,91
17	72,18	64,27	32,35	43,42	34,49	21,02	21,78
18	75,46	67,22	33,69	45,30	35,87	21,82	22,62
19	78,62	70,27	35,03	47,16	37,19	22,68	23,43
20	81,80	73,04	36,40	48,80	38,46	23,40	24,24
21	84,90	76,00	37,71	50,41	39,76	24,09	25,04
22	87,94	78,88	39,09	52,11	41,06	24,86	25,80
23	91,03	81,67	40,32	53,75	42,36	25,58	26,56
24	94,03	84,47	41,58	55,51	43,62	26,37	27,29
25	96,87	87,34	42,82	57,04	44,93	27,09	28,04
26	99,83	89,98	44,15	58,52	46,32	27,81	28,75
27	102,66	92,66	45,30	60,20	47,57	28,50	29,48
28	105,53	95,33	46,61	61,74	48,92	29,20	30,17
29	108,32	97,98	47,76	63,16	50,28	29,87	30,85
30	111,11	100,44	48,99	64,62	51,66	30,65	31,55
31	113,88	103,11	50,12	66,08	52,99	31,35	32,23
32	116,54	105,61	51,34	67,56	54,37	32,03	32,88
33	119,24	108,19	52,54	69,00	55,64	32,72	33,55
34	121,79	110,71	53,67	70,50	56,89	33,39	34,19
35	124,54	113,20	54,79	71,84	58,12	34,08	34,84
36	127,01	115,55	55,94	73,26	59,40	34,75	35,46
37	129,60	118,08	57,06	74,57	60,62	35,39	36,10

38	132,17	120,48	58,18	75,95	61,76	36,06	36,73
39	134,71	122,81	59,28	77,37	62,86	36,69	37,32
40	137,25	125,28	60,43	78,70	64,02	37,33	37,96
41	139,64	127,73	61,51	79,99	65,18	37,94	38,54
42	142,24	129,97	62,65	81,28	66,32	38,57	39,12
43	144,60	132,29	63,74	82,58	67,41	39,20	39,72
44	146,96	134,62	64,83	83,87	68,48	39,79	40,26
45		137,00		85,24	69,63	40,39	40,86
46		139,39		86,51	70,75	40,98	41,41
47		141,66		87,71	71,89	41,57	41,97
48		143,83		89,02	73,06	42,15	42,54
49		146,02		90,13	74,17	42,72	43,11
50		148,38		91,38	75,39	43,30	43,66
51		150,49		92,55	76,49	43,87	44,21
52		152,75		93,76	77,69	44,50	44,74
53		154,93		94,96	78,98	45,10	45,28
54		157,12		96,14	80,17	45,67	45,81
55		159,34		97,38	81,47	46,26	46,35
56		161,30		98,57	82,82	46,85	46,87
57		163,50		99,75	84,24	47,42	47,39
58		165,60		101,02	85,59	47,99	47,89
59		167,63		102,10	86,97	48,52	48,42

	Mikkeli	Parikkala	Viitasaari		Mikkeli	Parikkala	Viitasaari
Alkulämpötila, [°C]	11	~15	11	t, [h]	m, [g]	m, [g]	m, [g]
t, [h]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	3,00	306,28	197,52	84,70
0,00	4,24	0,62	0,89	3,02	307,34	198,26	85,03
0,02	8,02	3,37	2,62	3,03	308,41	199,06	85,31
0,03	11,59	6,32	4,26	3,05	309,42	199,81	85,61
0,05	15,08	8,96	5,74	3,07	310,44	200,55	85,93
0,07	18,54	11,18	6,91	3,08	311,45	201,30	86,25
0,08	21,80	13,56	8,22	3,10	312,47	202,04	86,55
0,10	25,10	15,72	9,33	3,12	313,53	202,77	86,85
0,12	28,41	17,87	10,40	3,13	314,55	203,56	87,16
0,13	31,36	19,88	11,51	3,15	315,58	204,28	87,45
0,15	34,35	21,99	12,43	3,17	316,52	205,04	87,76
0,17	37,37	24,06	13,29	3,18	317,50	205,77	88,08
0,18	40,36	25,77	14,23	3,20	318,47	206,52	88,36
0,20	43,14	27,70	14,97	3,22	319,51	207,25	88,66
0,22	46,06	29,58	15,85	3,23	320,48	208,03	88,95
0,23	48,72	31,21	16,60	3,25	321,48	208,78	89,22
0,25	51,36	33,02	17,42	3,27	322,46	209,53	89,53
0,27	54,07	34,69	18,11	3,28	323,41	210,26	89,82
0,28	56,92	36,47	18,85	3,30	324,38	210,97	90,13
0,30	59,30	38,07	19,50	3,32	325,38	211,72	90,40
0,32	62,01	39,76	20,26	3,33	326,35	212,46	90,66
0,33	64,54	41,25	20,96	3,35	327,36	213,21	91,02
0,35	66,97	42,79	21,65	3,37	328,29	213,94	91,23
0,37	69,28	44,34	22,30	3,38	329,26	214,68	91,54
0,38	71,83	46,02	23,01	3,40	330,19	215,41	91,82
0,40	74,28	47,36	23,64	3,42	331,12	216,26	92,11
0,42	76,70	48,97	24,34	3,43	332,10	216,91	92,38
0,43	79,10	50,31	24,90	3,45	333,07	217,65	92,63
0,45	81,46	51,73	25,51	3,47	333,98	218,35	92,93
0,47	83,68	53,24	26,15	3,48	334,94	219,09	93,22
0,48	86,02	54,62	26,72	3,50	335,86	219,82	93,49
0,50	88,17	55,94	27,30	3,52	336,81	220,55	93,79
0,52	90,38	57,32	27,88	3,53	337,66	221,26	94,07
0,53	92,73	58,71	28,44	3,55	338,60	221,99	94,35
0,55	94,75	60,03	29,00	3,57	339,58	222,72	94,66
0,57	96,98	61,36	29,54	3,58	340,59	223,39	94,94
0,58	99,24	62,69	30,08	3,60	341,40	224,12	95,19
0,60	101,27	63,99	30,65	3,62	342,30	224,85	95,50
0,62	103,33	65,33	31,20	3,63	343,20	225,55	95,78
0,63	105,47	66,64	31,74	3,65	344,27	226,32	96,03
0,65	107,39	67,84	32,27	3,67	345,05	226,99	96,32

0,67	109,58	69,09	32,79	3,68	345,95	227,68	96,61
0,68	111,55	70,45	33,33	3,70	346,88	228,43	96,88
0,70	113,42	71,62	33,85	3,72	347,78	229,15	97,15
0,72	115,45	72,80	34,35	3,73	348,66	229,86	97,42
0,73	117,46	74,17	34,85	3,75	349,55	230,59	97,69
0,75	119,39	75,25	35,32	3,77	350,39	231,26	97,94
0,77	121,34	76,45	35,81	3,78	351,30	231,99	98,22
0,78	123,07	77,57	36,29	3,80	352,26	232,70	98,49
0,80	124,97	78,78	36,76	3,82	353,04	233,40	98,75
0,82	126,92	79,91	37,24	3,83	353,95	234,08	99,00
0,83	128,78	81,08	37,73	3,85	354,80	234,78	99,26
0,85	130,62	82,39	38,19	3,87	355,69	235,48	99,54
0,87	132,50	83,41	38,66	3,88	356,64	236,20	99,81
0,88	134,20	84,52	39,14	3,90	357,66	236,90	100,10
0,90	136,01	85,66	39,59	3,92	358,50	237,62	100,40
0,92	137,92	86,82	40,04	3,93	359,31	238,32	100,68
0,93	139,54	87,94	40,49	3,95	360,23	239,04	100,96
0,95	141,50	89,14	40,95	3,97	361,13	239,74	101,23
0,97	143,29	90,11	41,39	3,98	362,00	240,43	101,52
0,98	144,95	91,20	41,84	4,00	362,95	241,12	101,79
1,00	146,59	92,28	42,27	4,02	363,78	241,84	102,05
1,02	148,34	93,36	42,73	4,03	364,66	242,52	102,32
1,03	150,19	94,45	43,13	4,05	365,52	243,23	102,59
1,05	151,71	95,52	43,57	4,07	366,43	243,90	102,85
1,07	153,41	96,59	44,00	4,08	367,36	244,59	103,11
1,08	155,21	97,63	44,41	4,10	368,11	245,28	103,41
1,10	156,86	98,78	44,80	4,12	368,97	245,97	103,68
1,12	158,51	99,80	45,23	4,13	369,79	246,68	103,95
1,13	160,13	100,81	45,66	4,15	370,68	247,36	104,22
1,15	161,74	101,84	46,10	4,17	371,48	248,03	104,53
1,17	163,43	102,85	46,52	4,18	372,37	248,77	104,83
1,18	165,02	103,89	46,91	4,20	373,18	249,48	105,06
1,20	166,67	104,96	47,33	4,22	374,05	250,13	105,33
1,22	168,26	105,94	47,75	4,23	374,91	250,81	105,62
1,23	169,83	107,04	48,17	4,25	375,70	251,47	105,93
1,25	171,52	107,95	48,60	4,27	376,54	252,15	106,22
1,27	172,99	108,96	48,98	4,28	377,36	252,79	106,53
1,28	174,70	109,95	49,41	4,30	378,19	253,49	106,82
1,30	176,20	110,96	49,83	4,32	379,03	254,14	107,13
1,32	177,84	111,97	50,23	4,33	379,79	254,81	107,43
1,33	179,30	112,93	50,63	4,35	380,67	255,49	107,68
1,35	180,79	113,95	51,06	4,37	381,47	256,18	107,98
1,37	182,33	114,92	51,46	4,38	382,27	256,82	108,28
1,38	183,87	115,87	51,87	4,40	383,09	257,50	108,54
1,40	185,39	116,85	52,27	4,42	383,92	258,19	108,84

1,42	186,92	117,84	52,65	4,43	384,70	258,84	109,12
1,43	188,36	118,80	53,02	4,45	385,53	259,54	109,38
1,45	189,96	119,75	53,41	4,47	386,33	260,21	109,68
1,47	191,38	120,70	53,81	4,48	387,16	260,88	109,99
1,48	192,79	121,66	54,21	4,50	387,93	261,52	110,22
1,50	194,37	122,62	54,58	4,52	388,78	262,22	110,48
1,52	195,82	123,57	54,96	4,53	389,59	262,88	110,79
1,53	197,24	124,50	55,35	4,55	390,35	263,55	111,07
1,55	198,77	125,45	55,74	4,57	391,16	264,25	111,36
1,57	200,22	126,39	56,12	4,58	391,94	264,89	111,64
1,58	201,72	127,32	56,50	4,60	392,74	265,58	111,91
1,60	203,15	128,25	56,87	4,62	393,48	266,17	112,19
1,62	204,55	129,17	57,23	4,63	394,26	266,88	112,47
1,63	206,00	130,10	57,62	4,65	395,04	267,51	112,74
1,65	207,53	131,02	58,00	4,67	395,82	268,17	113,01
1,67	208,95	131,93	58,34	4,68	396,62	268,83	113,27
1,68	210,29	132,84	58,71	4,70	397,36	269,53	113,54
1,70	211,80	133,77	59,07	4,72	398,10	270,19	113,84
1,72	213,12	134,64	59,41	4,73	398,88	270,83	114,13
1,73	214,53	135,57	59,80	4,75	399,65	271,48	114,40
1,75	215,86	136,54	60,13	4,77	400,49	272,13	114,65
1,77	217,31	137,35	60,48	4,78	401,15	272,80	114,89
1,78	218,68	138,25	60,85	4,80	401,92	273,48	115,19
1,80	220,20	139,14	61,21	4,82	402,74	274,13	115,44
1,82	221,45	140,05	61,57	4,83	403,44	274,77	115,71
1,83	222,72	140,91	61,95	4,85	404,23	275,41	116,00
1,85	224,13	141,78	62,28	4,87	405,03	276,08	116,25
1,87	225,51	142,67	62,65	4,88	405,86	276,72	116,51
1,88	226,88	143,53	63,00	4,90	406,58	277,40	116,78
1,90	228,28	144,41	63,34	4,92	407,34	278,04	117,02
1,92	229,61	145,29	63,70	4,93	408,17	278,73	117,28
1,93	230,93	146,14	64,06	4,95	408,90	279,33	117,53
1,95	232,24	147,04	64,41	4,97	409,61	280,01	117,79
1,97	233,52	147,92	64,75	4,98	410,44	280,65	118,05
1,98	234,96	148,76	65,06	5,00	411,16	281,29	118,32
2,00	236,22	149,59	65,40	5,02	411,86	281,91	118,57
2,02	237,53	150,46	65,78	5,03	412,62	282,57	118,83
2,03	238,88	151,33	66,11	5,05	413,36	283,21	119,03
2,05	240,24	152,25	66,44	5,07	414,09	283,84	119,29
2,07	241,44	153,00	66,79	5,08	414,78	284,45	119,56
2,08	242,72	153,83	67,13	5,10	415,51	285,08	119,82
2,10	244,08	154,63	67,47	5,12	416,29	285,74	120,04
2,12	245,34	155,46	67,79	5,13	416,99	286,39	120,33
2,13	246,64	156,40	68,12	5,15	417,71	287,02	120,60
2,15	247,90	157,12	68,47	5,17	418,46	287,63	120,85

2,17	249,14	157,96	68,82	5,18	419,13	288,26	121,09
2,18	250,46	158,77	69,13	5,20	419,93	288,90	121,36
2,20	251,75	159,60	69,48	5,22	420,57	289,52	121,61
2,22	252,96	160,41	69,83	5,23	421,29	290,16	121,86
2,23	254,24	161,23	70,17	5,25	422,01	290,76	122,13
2,25	255,50	162,08	70,50	5,27	422,70	291,42	122,38
2,27	256,78	162,88	70,84	5,28	423,42	292,03	122,63
2,28	257,93	163,71	71,17	5,30	424,18	292,65	122,87
2,30	259,20	164,53	71,49	5,32	424,89	293,26	123,11
2,32	260,45	165,34	71,82	5,33	425,70	293,84	123,37
2,33	261,63	166,17	72,15	5,35	426,28	294,52	123,64
2,35	262,77	166,98	72,46	5,37	426,99	295,03	123,89
2,37	264,14	167,75	72,80	5,38	427,68	295,67	124,15
2,38	265,29	168,61	73,12	5,40	428,43	296,33	124,37
2,40	266,41	169,40	73,45	5,42	429,05	296,97	124,62
2,42	267,66	170,21	73,75	5,43	429,76	297,59	124,87
2,43	268,76	171,00	74,09	5,45	430,42	298,20	125,12
2,45	269,93	171,81	74,38	5,47	431,08	298,83	125,36
2,47	271,16	172,61	74,73	5,48	431,82	299,45	125,66
2,48	272,32	173,39	75,06	5,50	432,47	300,10	125,97
2,50	273,54	174,19	75,33	5,52	433,23	300,68	126,25
2,52	274,63	174,98	75,66	5,53	433,82	301,29	126,38
2,53	275,72	175,79	76,01	5,55	434,54	301,93	126,70
2,55	276,87	176,59	76,30	5,57	435,18	302,53	126,94
2,57	278,04	177,37	76,63	5,58	435,83	303,09	127,23
2,58	279,26	178,15	76,94	5,60	436,53	303,75	127,51
2,60	280,30	178,96	77,24	5,62	437,15	304,32	127,81
2,62	281,43	179,75	77,56	5,63	437,83	304,93	128,07
2,63	282,60	180,53	77,88	5,65	438,47	305,53	128,31
2,65	283,61	181,33	78,19	5,67	439,10	306,13	128,58
2,67	284,81	182,08	78,51	5,68	439,75	306,75	128,86
2,68	285,95	182,88	78,77	5,70	440,37	307,36	129,13
2,70	287,06	183,68	79,12	5,72	441,04	307,96	129,41
2,72	288,08	184,44	79,44	5,73	441,65	308,58	129,66
2,73	289,18	185,23	79,72	5,75	442,33	309,17	129,90
2,75	290,29	186,01	80,04	5,77	442,95	309,78	130,19
2,77	291,35	186,79	80,34	5,78	443,58	310,39	130,44
2,78	292,44	187,54	80,68	5,80	444,16	310,99	130,68
2,80	293,50	188,31	81,00	5,82	444,77	311,59	130,94
2,82	294,62	189,10	81,31	5,83	445,34	312,16	131,20
2,83	295,75	189,84	81,62	5,85	445,87	312,76	131,47
2,85	296,79	190,63	81,96	5,87	446,45	313,38	131,71
2,87	297,89	191,43	82,26	5,88	446,99	313,93	131,98
2,88	298,90	192,16	82,55	5,90	447,51	314,52	132,25
2,90	300,05	192,97	82,90	5,92	448,06	315,11	132,51

2,92	301,02	193,70	83,18	5,93	448,52	315,74	132,79
2,93	302,11	194,46	83,49	5,95	449,01	316,27	133,04
2,95	303,09	195,22	83,79	5,97	449,52	316,86	133,31
2,97	304,17	196,00	84,10	5,98	449,99	317,44	133,58
2,98	305,31	196,76	84,41	6,00	450,45	318,04	133,84

	Mikkeli kirkaste	Parikkala kirkaste	Viitasaari kirkaste	Viitasaari 12.12. kirkaste	Sakokaivo kirkaste
Alkulämpötila, [°C]	17	19	17	22	15
Loppulämpötila, [°C]	19	20	19	23	19
t, [min]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]	m, [g]
0	2,50	6,61	2,81	0,51	0,47
1	7,67	10,70	5,96	2,81	1,41
2	12,41	14,31	8,39	4,66	2,20
3	16,88	17,40	10,56	6,32	2,92
4	21,31	20,23	12,59	7,83	3,54
5	25,68	22,72	14,35	9,22	4,06
6	29,87	25,04	16,08	10,52	4,60
7	33,96	27,39	17,63	11,62	5,12
8	37,85	29,55	19,16	12,73	5,57
9	41,82	31,45	20,68	13,92	6,11
10	45,80	33,47	22,01	14,88	6,58
11	49,38	35,38	23,23	15,87	6,92
12	53,16	37,07	24,52	16,79	7,39
13	56,88	38,85	25,77	17,69	7,74
14	60,44	40,53	27,01	18,55	8,17
15	64,00	42,25	28,12	19,40	8,50
16	67,39	43,86	29,30	20,22	8,89
17	70,83	45,40	30,35	21,02	9,25
18	74,17	46,93	31,37	21,79	9,62
19	77,52	48,50	32,42	22,55	9,95
20	80,71	49,87	33,49	23,29	10,31
21	83,99	51,35	34,51	24,02	10,69
22	87,03	52,74	35,45	24,71	11,05
23	90,19	54,14	36,37	25,40	11,34
24	93,43	55,48	37,28	26,07	11,65
25	96,44	56,86	38,19	26,76	11,97
26	99,58	58,17	39,18	27,42	12,30
27	102,54	59,47	40,05	28,06	12,63
28	105,57	60,75	40,91	28,71	12,94
29	108,51	62,07	41,80	29,33	13,22
30	111,51	63,34	42,71	29,96	13,55
31	114,47	64,55	43,57	30,57	13,87
32	117,33	65,84	44,34	31,17	14,16
33	120,17	67,04	45,20	31,77	14,47
34	123,05	68,23	45,94	32,35	14,75
35	125,76	69,45	46,78	32,93	15,05
36	128,52	70,65	47,54	33,52	15,34
37	131,34	71,73	48,37	34,10	15,63
38	133,98	72,87	49,16	34,64	15,93
39	136,65	73,99	49,88	35,22	16,24

40	139,27	75,07	50,62	35,77	16,56
41	141,83	76,28	51,32	36,31	16,79
42	144,38	77,43	52,14	36,86	17,12
43	147,04	78,43	52,86	37,39	17,34
44	149,65		53,60	37,93	17,63
45	152,18		54,36	38,41	17,91

	"Pesty" liete levyn 2 kalvolla	Kirkaste levyn 2 kalvolla		"Pesty" liete levyn 2 kalvolla	Kirkaste levyn 2 kalvolla
Alkulämpötila, [°C]	~ 20	18	t, [min]	m, [g]	m, [g]
Loppulämpötila, [°C]	~ 20	21	31	59,54	32,09
t, [min]	m, [g]	m, [g]	32	60,82	32,69
0	4,83	2,31	33	62,03	33,32
1	7,7	4,21	34	63,27	33,92
2	10,53	5,84	35	64,53	34,5
3	13,13	7,52	36	65,8	35,11
4	15,57	8,94	37	67,15	35,68
5	17,77	10,29	38	68,25	36,25
6	20,04	11,58	39	69,56	36,81
7	22,1	12,64	40	70,77	37,34
8	24,09	13,73	41	71,85	37,9
9	26,24	14,81	42	73,02	38,46
10	28,06	15,76	43	74,25	39
11	30,11	16,77	44	75,35	39,56
12	31,75	17,68	45	76,58	40,07
13	33,52	18,65	46	77,62	40,58
14	35,22	19,46	47	78,74	41,1
15	36,82	20,35	48	79,95	41,59
16	38,44	21,17	49	81,12	42,13
17	39,99	21,98	50	82,15	42,62
18	41,5	22,83	51	83,31	43,19
19	42,96	23,64	52	84,42	43,61
20	44,44	24,43	53	85,56	44,11
21	45,84	25,18	54	86,78	44,59
22	47,34	25,95	55	87,79	45,07
23	48,74	26,67	56	88,93	45,56
24	50,08	27,41	57	90,07	46,04
25	51,41	28,12	58	91,26	46,47
26	52,78	28,87	59	92,36	46,96
27	54,08	29,49	60	93,44	47,43
28	55,48	30,12	61	94,54	47,87
29	56,79	30,8	62	95,64	48,34
30	58,17	31,43			

Koko, [µm]	Viitasaari					Parikkala					Mikkeli				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,053	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,068	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,077	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,088	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,128	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,166	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,188	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,214	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,243	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,276	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,314	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,405	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,523	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,594	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,675	0	0	0	0	0	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0	0	0	0	0
0,767	0	0	0	0	0	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
0,872	0	0	0	0	0	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,991	0	0	0	0	0	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13
1,13	0	0	0	0	0	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,17	0,18	0,18	0,18	0,17
1,28	0	0	0	0	0	0,29	0,29	0,3	0,29	0,3	0,2	0,21	0,22	0,21	0,19
1,45	0	0	0	0	0	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,22	0,23	0,25	0,24	0,22
1,65	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,24	0,25	0,27	0,26	0,24
1,88	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,41	0,42	0,42	0,42	0,43	0,26	0,27	0,29	0,28	0,26
2,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13	0,46	0,48	0,48	0,48	0,49	0,29	0,31	0,32	0,32	0,3

2,42	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,53	0,55	0,56	0,55	0,56	0,35	0,38	0,39	0,38	0,37
2,75	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,63	0,65	0,66	0,65	0,66	0,48	0,51	0,51	0,5	0,49
3,12	0,24	0,25	0,24	0,25	0,24	0,76	0,78	0,79	0,78	0,8	0,69	0,73	0,73	0,71	0,7
3,55	0,29	0,3	0,3	0,3	0,29	0,93	0,95	0,96	0,95	0,97	1,01	1,07	1,06	1,03	1,01
4,03	0,35	0,36	0,37	0,37	0,36	1,14	1,17	1,18	1,17	1,19	1,45	1,54	1,53	1,49	1,44
4,58	0,43	0,44	0,45	0,45	0,43	1,39	1,43	1,44	1,44	1,46	2	2,12	2,12	2,06	1,99
5,21	0,52	0,53	0,55	0,55	0,53	1,7	1,75	1,77	1,78	1,81	2,62	2,79	2,8	2,72	2,63
5,92	0,64	0,65	0,67	0,68	0,66	2,06	2,14	2,18	2,19	2,24	3,25	3,46	3,5	3,4	3,3
6,72	0,79	0,81	0,82	0,83	0,81	2,5	2,62	2,68	2,7	2,76	3,8	4,06	4,13	4,02	3,91
7,64	0,97	1	1	1,02	0,99	3,02	3,18	3,27	3,3	3,38	4,2	4,51	4,61	4,51	4,38
8,68	1,19	1,23	1,21	1,25	1,21	3,64	3,85	3,95	3,99	4,09	4,4	4,75	4,89	4,8	4,68
9,86	1,44	1,48	1,44	1,5	1,45	4,33	4,59	4,71	4,75	4,86	4,42	4,82	4,97	4,91	4,81
11,2	1,72	1,77	1,7	1,79	1,72	5,09	5,38	5,5	5,53	5,65	4,32	4,77	4,94	4,9	4,81
12,7	2,02	2,09	2	2,11	2,03	5,87	6,16	6,26	6,28	6,39	4,21	4,7	4,87	4,86	4,78
14,5	2,34	2,44	2,35	2,47	2,38	6,6	6,85	6,91	6,9	6,99	4,19	4,72	4,89	4,89	4,8
16,4	2,71	2,83	2,77	2,9	2,8	7,19	7,37	7,38	7,32	7,38	4,34	4,89	5,04	5,02	4,93
18,7	3,14	3,29	3,28	3,41	3,29	7,56	7,63	7,56	7,45	7,47	4,65	5,2	5,32	5,26	5,14
21,2	3,66	3,83	3,9	4,01	3,88	7,62	7,56	7,42	7,25	7,22	5,08	5,58	5,64	5,54	5,38
24,1	4,27	4,46	4,62	4,71	4,57	7,33	7,14	6,92	6,7	6,63	5,51	5,89	5,89	5,72	5,52
27,4	4,99	5,19	5,42	5,49	5,34	6,69	6,37	6,1	5,85	5,74	5,79	6,01	5,92	5,69	5,47
31,1	5,78	5,95	6,24	6,3	6,13	5,75	5,34	5,04	4,77	4,64	5,8	5,82	5,63	5,37	5,13
35,3	6,56	6,69	6,99	7,03	6,86	4,62	4,16	3,87	3,6	3,45	5,45	5,27	4,99	4,71	4,48
40,1	7,22	7,29	7,56	7,58	7,39	3,43	2,98	2,71	2,47	2,32	4,73	4,38	4,04	3,78	3,58
45,6	7,64	7,62	7,82	7,81	7,62	2,31	1,91	1,7	1,49	1,35	3,7	3,26	2,9	2,69	2,53
51,8	7,7	7,59	7,68	7,64	7,44	1,38	1,05	0,91	0,76	0,63	2,53	2,08	1,74	1,61	1,5
58,9	7,34	7,16	7,12	7,05	6,86	0,7	0,46	0,38	0,29	0,2	1,4	1,03	0,78	0,72	0,66
66,9	6,6	6,35	6,21	6,11	5,95	0,26	0,13	0,1	0	0	0,54	0,31	0,19	0,18	0,15
76,0	5,58	5,29	5,06	4,95	4,86	0	0	0	0	0	0,08	0	0	0	0
86,4	4,42	4,13	3,87	3,75	3,76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98,1	3,29	3,03	2,78	2,67	2,81	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0
111	2,3	2,11	1,92	1,81	2,09	0,11	0,14	0,17	0,23	0,09	0	0	0	0	0
127	1,53	1,42	1,29	1,19	1,59	0,23	0,26	0,32	0,45	0,26	0	0	0	0	0
144	0,94	0,91	0,85	0,75	1,22	0,34	0,39	0,48	0,68	0,51	0	0	0	0	0
163	0,51	0,53	0,52	0,42	0,89	0,41	0,49	0,62	0,88	0,77	0	0	0	0	0
186	0,21	0,24	0,26	0,18	0,57	0,43	0,54	0,71	1	0,98	0	0	0	0	0
211	0	0,06	0,08	0	0,27	0,38	0,51	0,71	1,01	1,08	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0,07	0,28	0,42	0,62	0,88	1,03	0	0	0	0	0
272	0	0	0	0	0	0,15	0,28	0,44	0,65	0,84	0	0	0	0	0
310	0	0	0	0	0	0	0,12	0,24	0,37	0,56	0	0	0	0	0
352	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,09	0,27	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
454	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0	0	0
516	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0,2	0,19	0,2	0,18
586	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,38	0,42	0,42	0,43
666	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,39	0,56	0,65	0,67	0,73

0,276	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,314	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,405	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,523	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,594	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,675	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,767	0	0	0	0	0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0	0	0	0	0
0,872	0	0	0	0	0	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
0,991	0	0	0	0	0	0,34	0,35	0,36	0,36	0,37	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16
1,13	0	0	0	0	0	0,54	0,56	0,57	0,57	0,58	0,3	0,31	0,3	0,3	0,29
1,28	0	0	0	0	0	0,79	0,81	0,82	0,82	0,83	0,47	0,49	0,48	0,48	0,46
1,45	0	0	0	0	0	1,08	1,1	1,11	1,11	1,13	0,67	0,7	0,7	0,69	0,65
1,65	0	0	0	0	0	1,4	1,43	1,45	1,45	1,47	0,89	0,93	0,94	0,93	0,87
1,88	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07	1,77	1,8	1,83	1,83	1,86	1,13	1,17	1,21	1,19	1,11
2,13	0,18	0,16	0,17	0,18	0,17	2,18	2,22	2,25	2,25	2,29	1,38	1,44	1,5	1,47	1,37
2,42	0,32	0,29	0,3	0,31	0,3	2,64	2,7	2,73	2,73	2,78	1,67	1,75	1,82	1,79	1,67
2,75	0,48	0,46	0,46	0,47	0,45	3,17	3,25	3,29	3,28	3,34	2,03	2,13	2,21	2,17	2,04
3,12	0,68	0,66	0,65	0,68	0,65	3,8	3,9	3,94	3,93	4	2,5	2,64	2,72	2,67	2,53
3,55	0,93	0,91	0,89	0,92	0,89	4,56	4,68	4,73	4,72	4,8	3,19	3,37	3,44	3,39	3,22
4,03	1,22	1,21	1,19	1,23	1,18	5,49	5,63	5,69	5,67	5,77	4,2	4,44	4,5	4,42	4,23
4,58	1,57	1,58	1,56	1,59	1,54	6,62	6,8	6,87	6,84	6,96	5,64	5,97	6,03	5,91	5,67
5,21	2	2,02	2,01	2,04	1,97	8,01	8,23	8,31	8,29	8,42	7,64	8,1	8,16	7,97	7,67
5,92	2,52	2,55	2,56	2,59	2,51	9,71	9,98	10,09	10,07	10,23	10,27	10,88	10,96	10,69	10,3
6,72	3,15	3,2	3,24	3,27	3,17	11,77	12,12	12,27	12,26	12,46	13,52	14,34	14,46	14,09	13,6
7,64	3,94	4,01	4,06	4,1	3,97	14,27	14,73	14,94	14,96	15,22	17,32	18,4	18,59	18,11	17,51
8,68	4,91	5,01	5,06	5,12	4,97	17,3	17,92	18,21	18,25	18,6	21,52	22,91	23,2	22,62	21,89
9,86	6,1	6,24	6,27	6,37	6,17	20,93	21,77	22,16	22,24	22,69	25,92	27,66	28,09	27,42	26,57
11,2	7,54	7,72	7,71	7,87	7,62	25,27	26,36	26,86	26,99	27,55	30,34	32,48	33,06	32,34	31,38
12,7	9,25	9,5	9,41	9,66	9,35	30,36	31,73	32,36	32,53	33,21	34,67	37,25	38	37,24	36,19
14,5	11,27	11,59	11,42	11,77	11,38	36,23	37,89	38,62	38,8	39,59	38,88	41,95	42,87	42,11	40,97
16,4	13,61	14,02	13,77	14,24	13,76	42,83	44,75	45,53	45,71	46,59	43,08	46,67	47,76	46,99	45,77
18,7	16,33	16,85	16,55	17,14	16,56	50,02	52,12	52,9	53,03	53,96	47,41	51,56	52,81	52,02	50,69
21,2	19,47	20,14	19,83	20,54	19,85	57,58	59,75	60,47	60,48	61,43	52,07	56,76	58,13	57,28	55,83
24,1	23,12	23,97	23,73	24,55	23,73	65,2	67,31	67,88	67,74	68,65	57,15	62,33	63,77	62,82	61,21
27,4	27,39	28,44	28,34	29,26	28,3	72,53	74,45	74,8	74,44	75,28	62,66	68,22	69,66	68,54	66,73
31,1	32,39	33,62	33,76	34,76	33,64	79,22	80,82	80,9	80,29	81,02	68,44	74,23	75,57	74,23	72,2
35,3	38,17	39,58	40	41,05	39,77	84,97	86,16	85,94	85,06	85,66	74,24	80,05	81,21	79,59	77,32
40,1	44,72	46,27	46,99	48,08	46,63	89,58	90,32	89,81	88,66	89,11	79,69	85,32	86,2	84,31	81,81
45,6	51,94	53,56	54,55	55,66	54,02	93,01	93,3	92,52	91,13	91,43	84,41	89,7	90,24	88,09	85,39
51,8	59,58	61,18	62,37	63,47	61,64	95,32	95,2	94,22	92,63	92,77	88,11	92,96	93,14	90,78	87,92
58,9	67,27	68,77	70,05	71,12	69,08	96,7	96,26	95,12	93,39	93,41	90,64	95,04	94,88	92,39	89,42
66,9	74,62	75,92	77,17	78,17	75,94	97,4	96,72	95,5	93,67	93,61	92,04	96,07	95,66	93,11	90,08
76,0	81,22	82,27	83,37	84,28	81,89	97,66	96,85	95,6	93,68	93,61	92,58	96,37	95,85	93,29	90,23

	Liete + 1,2 g/l jauhettu aktiivihiili	Liete + 5 g/l rakeinen aktiivihiili
Alkulämpötila, [°C]	15	17
Loppulämpötila, [°C]	19	20
t, [min]	m, [g]	m, [g]
0	1,43	1,41
1	5,16	4,32
2	8,16	6,8
3	10,64	9,11
4	12,98	11,15
5	15,11	13,02
6	17,16	14,86
7	19	16,61
8	20,75	18,24
9	22,56	19,87
10	24,23	21,42
11	25,79	22,92
12	27,41	24,39
13	28,94	25,95
14	30,5	27,38
15	32	28,81
16	33,51	30,22
17	34,92	31,67
18	36,53	33,17
19	37,98	34,51
20	39,58	35,99
21	41,05	37,44
22	42,63	38,91
23	44,2	40,42
24	45,75	41,91
25	47,25	43,43
26	48,9	45,05
27	50,62	46,62
28	52,17	48,21
29	53,96	49,95
30	55,77	51,66
31	57,61	53,46
32	59,53	55,32
33	61,47	57,21
34	63,46	59,15
35	65,49	61
36	67,54	63,04
37	69,6	65,04
38	71,7	67,06
39	73,88	69,08

40	76,02	71,01
41	78,09	72,83
42	80,24	74,45
43	82,38	76,05
44	84,38	77,63
45	86,34	79,14
46	88,39	80,56
47	90,3	82,01
48	92,22	83,51
49	94,08	84,92
50	95,87	86,36
51	97,69	87,8
52	99,42	89,22
53	101,11	90,65
54	102,81	92,06
55	104,4	93,48