



■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SUODATUSKALVOJEN PUHDISTUSMENETELMÄ - HOB

TEKIJÄ: Reetta Turkki

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Reetta Turkki			
Työn nimi Suodatuskalvojen puhdistusmenetelmä – HOB			
Päiväys	09.03.2023	Sivumäärä/Liitteet	18
Ohjaaja(t) Juha-Matti Aalto			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Mikkelin vesilaitos			
Tiivistelmä Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli testata ja tutkia toimiiko kehittämäni suodatinkalvojen puhdistusmenetelmä käytännössä. Työssä pyrittiin myös vertaamaan tunnettuja ja käytettyjä puhdistusmenetelmiä kyseiseen uuteen menetelmään ja mitä hyötyjä uudesta menetelmästä voidaan saada. Suodatinkalvojen puhdistusmenetelmää testattiin Mikkelin Kenkäveronniemen jätevedenpuhdistamolla sijaitsevassa pilot-laitoksessa, jossa tutkitaan ja optimoidaan kalvosuodatustekniikkaa. Menetelmää testattiin kahteen kertaan: ensimmäisen kerran maaliskuussa ja toisen kerran huhtikuussa 2019. Tarkoituksena oli testata menetelmää erilaisissa olosuhteissa ja seurata onko esimerkiksi vuodenajoilla merkitystä pesujen tuloksiin vai voidaanko kehittää menetelmä, joka on olosuhderiippumaton. Menetelmän testaukset onnistuivat hyvin ja tulokset olivat parempia kuin mitä osattiin ennen testauksia olettaa. Menetelmän testaus ja sen tulokset ovat tarkoitettu pelkästään tilaajan käyttöön.			
Avainsanat kalvosuodatus, puhdistusmenetelmä, tukkeutuminen, MBR-tekniikka			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author Reetta Turkki			
Title of Thesis Cleaning method for filter membranes - HOB			
Date	March 9, 2023	Pages/Appendices	18
Supervisor(s) Juha-Matti Aalto			
Client Organisation /Partners Mikkelin Vesilaitos			
Abstract Abstract The purpose of this thesis was to test and research if a new cleaning method for filter membranes could work in practice. The purpose was to compare the already known cleaning methods to the new one and what benefits it would give to the process. The cleaning method was tested in Kenkäveronniemi wastewater treatment plant in Mikkelä where there is a research plant that studies and optimizes MBR-technique. The method was tested two times: first time in March and second time in July 2019. The purpose was to test the method in different circumstances and monitor if there is some difference to the cleaning results when the cleaning is done in different seasons or if it's possible to create a method that is independent of circumstances. A result, the testing of the new cleaning method was successful, and the results were even better than expected. The testing of the method and all the results are for the client organization's use only.			
Keywords membrane filtration, cleaning method, clogging, MBR-technique			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	KALVOSUODATUS	2
2.1	Kalvosuodatus jätevedenpuhdistuksessa.....	2
3	MBR - KALVOBIOREAKTORI	3
3.1	MBR-tekniikka	4
3.1.1	kalvomateriaalit	4
3.1.2	kalvotyytit.....	4
3.2	MBR-tekniikan käyttö Suomessa	6
4	MIKKELIN PILOT-LAITOS	6
4.1	Membraanit	7
4.2	Prosessikuvaus	7
4.3	Tuloksia	8
4.4	Tärkeimmät tunnusluvut	9
5	Kalvojen likaantuminen ja puhdistus.....	10
5.1	Tukkeutumisen lajit	10
5.2	Tunnetut puhdistusmenetelmät	11
5.3	Tunnettujen puhdistusmenetelmien ongelmat	12
5.4	Tehokkaaman puhdistusmenetelmän tarve	12
6	HOB.....	13
7	HOB:N TESTAUS MIKKELIN PILOT LAITOKSELLA	13
7.1	HOB tulokset	15
7.2	HOB:n edut tunnettuihin puhdistusmenetelmiin	15
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	16
LÄHTEET		

1 JOHDANTO

Kalvobioreaktori on jäteveden puhdistuksessa käytettävä menetelmä, jossa yhdistyy biologinen aktiivilieteprosessi ja mekaaninen lietteen erotus, kalvosuodatus. Termi kalvobioreaktori tulee englanninkielisestä sanasta *Membrane bioreactor* ja tekniikka tunnetaan lyhenteenä MBR.

MBR-tekniikan käyttö on lisääntynyt ympäri maailmaa, mutta Suomessa tekniikka on vielä suhteellisen uusi. Kiinnostus MBR-tekniikkaa kohtaan on kuitenkin lisääntynyt Suomessa johtuen tekniikan edistyksellisestä puhdistustehosta. MBR-tekniikalla saadaan tehokkaasti poistettua jätevedestä kiintoaineita, mikrobeja sekä typen yhdisteitä ja fosforia.

Mikkelin Vesilaitoksella Kenkäveronniemessä käynnistettiin kesällä 2017 koelaitos, jossa tarkoituksena on testata mittakaavassa MBR-tekniikkaa. Koelaitos on sijoitettu perinteisen aktiivilietelaitoksen vierelle omaksi yksiköksi. Koelaitos koostuu välpästä, esiselkeytyksestä, biologisista altaista ja MBR-yksiköstä. Koelaitoksessa puhdistettu jätevesi johdetaan viemäriin ja sitä kautta perinteisen laitoksen prosessiin.

MBR-laitoksia on monia maailmalla, mutta kaikkia laitoksia yhdistää yksi yhteinen ongelma, kalvojen tukkeutuminen. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kalvojen tukkeutumista sekä esitetään ratkaisumenetelmä kyseiselle ongelmalle. Työssä perehdytään erityisesti Mikkelin Kenkäveronniemessä sijaitsevan MBR-koelaitoksen kalvojen puhdistukseen.

2 KALVOSUODATUS

Kalvosuodatusta käytetään suolan poistoon, juomaveden tuotannossa sekä uusiokäyttöön. Kalvosuodatus on ollut käytössä jo pitkän aikaa ja tekniikkaa on aloitettu hyödyntämään perinteisen vedenpuhdistuksen lisäksi myös jäteveden puhdistuksessa. Tekniikan kehitys ja käyttökokemukset ovat lisänneet tietoisuutta kalvosuodatuksen tehokkuudesta, ja tämä on johtanut tekniikan käyttöön myös laajemmin. Kalvosuodatusta voidaan nykyään hyödyntää myös lääketieteessä ja ruuan valmistamisessa. (Singh 2015)

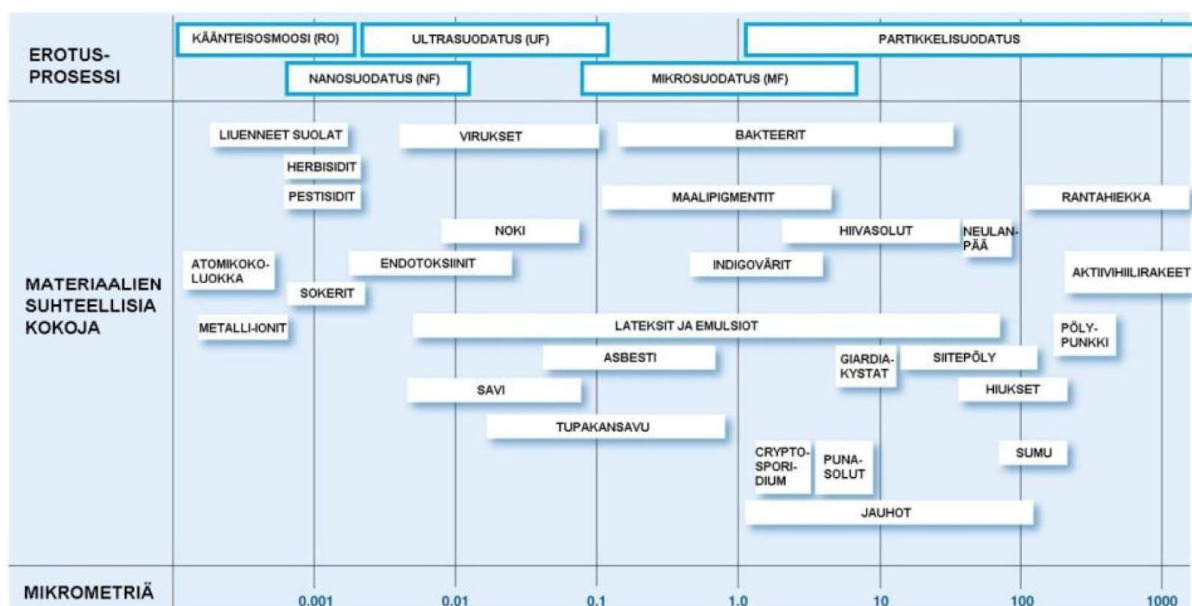
Kalvosuodatusmekaniikan toiminta perustuu puoliläpäiseviin kalvoihin. Kalvo sallii osan partikkeleista suodattua kalvon läpi ja osa partikkeleista pidättäytyy kalvolle. Kalvon läpäisevää osaa kutsutaan permeaatiksi ja kalvolle pidättynyt osa on konsentraattia. Suodatus tapahtuu syöte- ja permeaattipuolen välisen paine-eron avulla. Tekniikan mukaan paine voi olla yli- tai alipainetta. (Singh 2015)

2.1 Kalvosuodatus jätevedenpuhdistuksessa

Kalvosuodatusmenetelmien erot perustuvat erilaisten suodattimien suodatuskykyjen eroavaisuuksiin. Suodatuskyky määräytyy huokoskoon perusteella. Huokoskoko jakaa kalvosuodatusmenetelmät neljään luokkaan: mikrosuodatus (microfiltration), ultrasuodatus (ultrafiltration), nanosuodatus (nanofiltration) ja käänteisosmoosi (reverse osmosis). Näistä mikrosuodatus on huokoskooltaan suurin ja käänteisosmoosi pienin. (Pinnekamp & Friendrich 2003)

Suodatusmenetelmät soveltuvat eri huokoskokojensa takia eri suodatustarpeisiin ja suodatusmenetelmä valitaan puhdistustavoitteen mukaan. Kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa voidaan hyvin käyttää mikro- ja ultrasuodatusta, joiden avulla puhdistettavasta jätevedestä saadaan poistettua kiintoainetta sekä suurin osa bakteereista. Nanosuodatusta ja käänteisosmoosia voidaan käyttää puhtaan veden tuotantoon, koska niissä huokoskoot ovat jo niin pieniä, että ne suodattavat liuenneita suoloja ja jopa lääkkeitä. (Judd & Jefferson 2003)

Kalvosuodatusmenetelmät eroavat toisistaan huokoskokojen lisäksi myös eri kalvopaineiden avulla. Mitä pienemmät ovat kalvon huokokset, sitä suurempi kalvopaine vaaditaan, jotta suodatus toimii. Mikrosuodatuksessa kalvopaine on yleensä 0,1–0,3 bar, kun taas pienihuukoissa käänteisosmoosisa tarvittava kalvopaine vaihtelee 5 ja 70 bar välillä. Kuvassa 1 on esitetty eri suodatinkalvojen suodatuskykyjä. (Judd & Jefferson 2003; Singh 2015)



Kuva 1. Kalvojen suodatuskykyjen vertailua (Lignell et al. 2015)

3 MBR – KALVOBIOREAKTORI

MBR tarkoittaa englannin kielellä sanaa *membrane bioreactor*, joka tarkoittaa suomeksi kalvobioreaktoria. MBR-prosessissa yhdistyy kalvosuodatus ja biologinen jäteveden puhdistusprosessi. Jäteveden puhdistuksessa MBR-tekniikka yhdistää biologisen aktiivilieteprosessin ja mekaanisen kalvosuodatuksen. Tällä yhdistelmällä jätevedestä saadaan poistettua tehokkaasti orgaaniset aineet kuten typpi ja fosfori, sekä kiintoaineena vaikuttava liete. (Judd 2011)

MBR- tekniikka alkoi kehittyä 1900-luvun alussa. Vaikka tekniikkaa ei vielä silloin käytetty, sen toimivuutta pidettiin mahdollisena. 1960-luvulla kehitettiin ensimmäiset kalvobioreaktoriprosessit, joiden tarkoitus oli puhdistaa laivojen jätevesiä. Ensimmäiset kunnallisen jäteveden puhdistukseen tarkoitetut MBR-laitokset otettiin käyttöön 1990-luvun loppupuolella Japanissa ja USA:ssa. Siitä lähtien kalvobioreaktorit ovat levinneet ympäri Eurooppaa ja teknologiaa kehitetään vielä tänäkin päivänä. (Judd & Judd Ltd 2018a)

Pohjoismaissa ja Suomessa MBR-tekniikka on suhteellisen uusi ja käyttökokemuksia on harvakseltaan. Syy on osittain siinä, että Suomessa on haasteellisemmat ilmasto-olosuhteet verrattuna Keski-Euroopan leutoon ilmastoon. Myös monimutkaiset lupaehdot sekä tiukentuva lainsäädäntö eivät houkuttele MBR-tekniikan käyttöönottoa Suomessa. Jotta MBR-

tekniikka rantautuisi pysyvästi Suomeen, tarvittaisiin uudenlaisia suunnittelu- ja ajotapoja, jotka sopivat pohjoisen ilmastolle. (Lignell et al. 2015)

3.1 MBR – tekniikka

MBR-tekniikan toimivuuteen voidaan vaikuttaa kalvomateriaaleilla ja erilaisilla kalvotyypeillä, joilla saavutetaan toisistaan eroavia puhdistustuloksia. Lisäksi kalvojen asettelulla on merkitystä toimivuuden kannalta. Kalvosuodatuksessa käytetään yleensä polymeerisiä tai keraamisia kalvoja. Kalvotyypit voidaan jakaa ulkonäkönsä perusteella kolmeen luokkaan: tasokalvot, ottokuitukalvot ja putkimaiset kalvot. Kalvot voidaan myös sijoittaa eri tavalla: suoraan lietteeseen tai erilliseen kalvosuodatusprosessiin, joka tulee perinteisen aktiivilieteprosessin jälkeen. (Judd 2011)

3.1.1 Kalvomateriaalit

Jätevedenpuhdistuksessa käytettävässä MBR-tekniikassa kalvot voidaan valmistaa, joko polymeeristä tai keramiikasta. Käytettävä materiaali riippuu kulutuksesta ja kemikaalien käytöstä. Orgaanisesta polymeeristä valmistetut kestävät epäorgaanisia keraamisia kalvoja vähemmän kulutusta, mutta niillä on parempia hydrofiilisiä ja hydrofobisia ominaisuuksia, joita tarvitaan suodatuksessa. (Judd 2011)

Polymeeri on kalvon materiaalina suositumpi kuin keramiikka. Polymeereillä on todettu olevan paremmat fysikaaliset ominaisuudet, kuten pintajännitys ja adsorptio. Polymeeristä valmistetuilla kalvoilla on myös korkea sulamispiste ja kiteisyys. Nämä ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi kalvon suodatuskykyyn ja tukkeutumiseen. (Singh 2015)

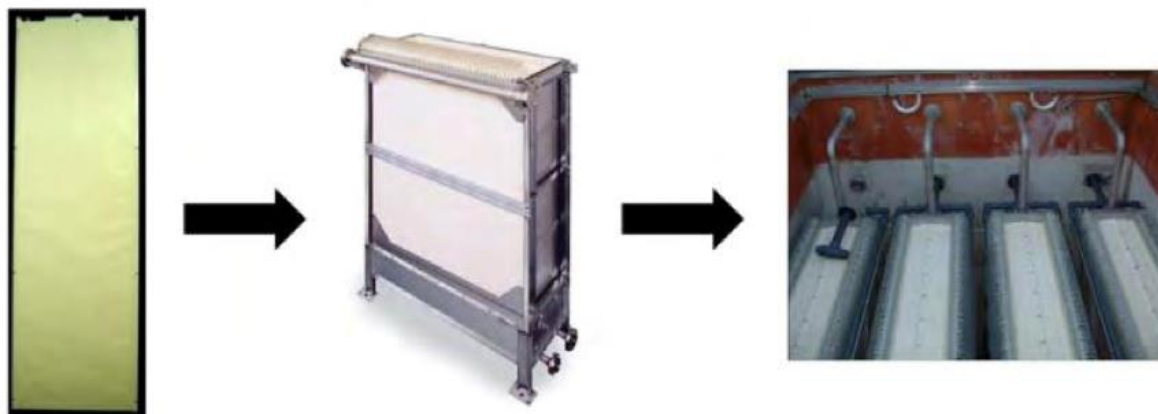
Polymeeristä valmistettuja kalvoja on monenlaisia. Täysin hydrofobisia polymeerikalvomateriaaleja ovat polypropyleeni ja polyetyleni, täysin hydrofiilinen polymeeri on selluloosa-asetaatti. Näiden yhdistelmillä saadaan kalvoille niitä ominaisuuksia, jotka parantavat suodatustehokkuutta ja -tulosta. (Judd 2011)

3.1.2 Kalvotyypit

Suodatuskalvot voidaan jakaa kolmeen ryhmään: tasomaiset kalvot, ottokuitukalvot ja putkimaiset kalvot. MBR-tekniikassa eri kalvotyypeillä on omat etunsa, ja ne soveltuvat toisistaan poikkeaviin puhdistusolosuhteisiin. Kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa hyödynne-

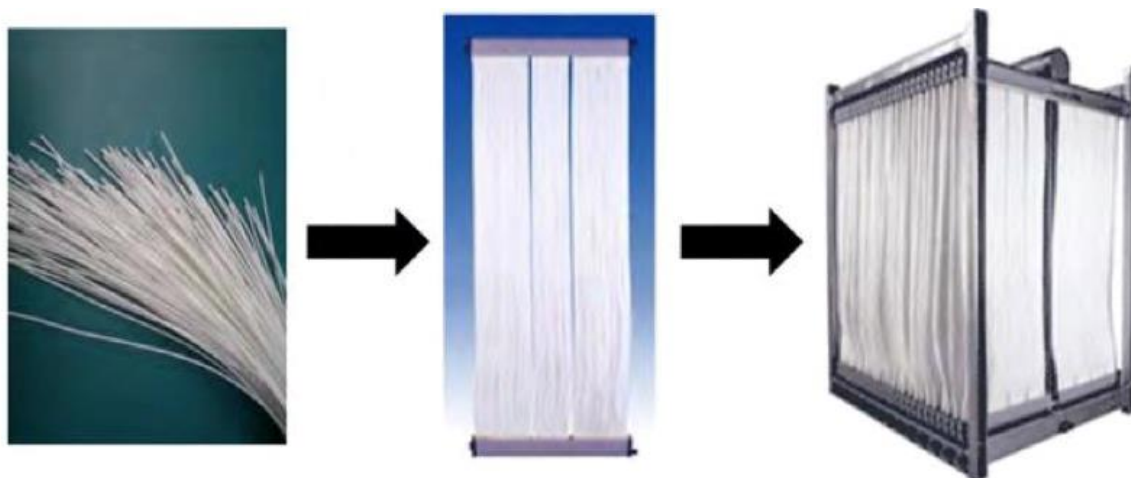
tään paljon tasokalvoja ja onttokuitukalvoja, kun taas putkimaiset kalvot soveltuvat enemmän pienemmille virtaamille, esimerkiksi teollisuuteen. (Judd 2011)

Kuvassa 2 on esitetty tasokalvo, joka on muodoltaan nelikulmainen. Tasokalvot muodostavat kasetin, jossa kalvot ovat aseteltu lähekkäin. Kalvon läpäisevä puhdas vesi johdetaan moduulin putkistojen kautta permeattilinjaan. Päällekkäin asetellut kasetit muodostavat moduulin. (Judd 2011, Judd & Judd Ltd 2018)



Kuva 2. Tasokalvo eli *flat sheet* (Krzeminski 2013)

Kuvassa 3 on esitetty onttokuitukalvo, joka on muodoltaan ohut ja pitkä putkimainen kalvo. Jätevesi virtaa ontton kalvon ulkopuolelta kalvon sisäpuolelle alipaineen avulla. Moduulissa on tuhansia kuiduiksi kutsuttuja onttokalvoja, jotka yhdistyvät toisiinsa jakotukkien avulla. Jakotukeista puhdistettu vesi johdetaan permeaattilinjastoon. (Judd 2011)



Kuva 3. Onttokuitukalvo, *hollow fiber*. (Krzeminski 2013)

Kuvassa 4 esitetyissä putkimaisissa kalvoissa, kooltaan pienet putkimaiset kalvot sijoitetaan suuremman paineputken sisään. Putkimaisissa kalvoissa jätevesi syötetään pienten putki-

maisten kalvojen sisäpuolelle ja kalvojen ulkopuolelle suodattuva permeaatti johdetaan paineputkesta permeaattilinjoihin. (Judd & Judd Ltd 2018f)



Kuva 4. Putkimaiset kalvot. (Krzeminski 2013)

3.2 MBR-tekniikka Suomessa

MBR-tekniikka on Suomessa käytössä Taskilan, Viitasaaren ja Parikkalan jätevedenpuhdistamoilla. Parikkalassa ja Viitasaarella on käytössä Alfa Lavalin valmistamat tasokalvot, joiden huokoskoko on $0,2\ \mu\text{m}$. Onttokuitukalvot, joiden huokoskoko on $0,04\ \mu\text{m}$ on käytössä Taskilassa ja nämä kalvot ovat Suez Water Technologies & Solutions toimittamat.

MBR-tekniikka on yleistymässä muiden pohjoismaiden tapaan myös Suomessa. Mikkeliin valmistuu MBR-tekniikkaa perustuva jätevedenpuhdistamo, joka valmistuessaan tulee olemaan Euroopan ja maailman moderneimpia jätevedenkäsittelylaitoksia. (Mikkelin vesilaitos 2016)

4 MIKKELIN PILOT-LAITOS

Mikkelissä käynnistettiin kesällä 2017 MBR-tekniikkaa tutkiva koelaitos. Koelaitos on toteutettu Mikkelin vesilaitoksen ja Aquazone Oy:n yhteistyönä ja hankkeen rahoituksessa on ollut mukana Business Finland Oy. Koelaitos on osa Smart Effluents- projektia, jonka tavoitteena on kehittää jätevedenkäsittelyn puhdistusjärjestelmä tulevan sukupolven tarpeisiin.

Mikkelin MBR-koelaitos on täyden mittakaavan jätevedenpuhdistamo. Koelaitoksesta löytyy tuloallas, hienovälppä, esiselkeytys, 6 kpl typenpoistoaltaita, ilmastusallas, MBR-allas sekä 2 kpl deox-liettenkierrätysaltaita. Lisäksi lietteenkierrätystä varten on sakeuttamo ja ylivuotoa varten rejektiallas. Biologista allastilavuutta on 27m^3 ja koelaitos on mitoitettu noin 2m^3 tulovirtaamalle.

4.1 Membraanit

Koelaitoksessa on käytössä Alfa Lavalin MFM 100 tasokalvot, joiden huokoskoko on 0,2 μm . Kalvot on valmistettu polyvinyylideenifluoridista (PVDF). MBR-kasetin kalvopinta-alaa on 154 m^2 ja kasetin pohjassa on S-ilmastin, jonka tarkoituksena on pienentää ilmamäärän tarvetta ja ehkäistä kalvojen tukkeutumista.

4.2 Prosessikuvaus

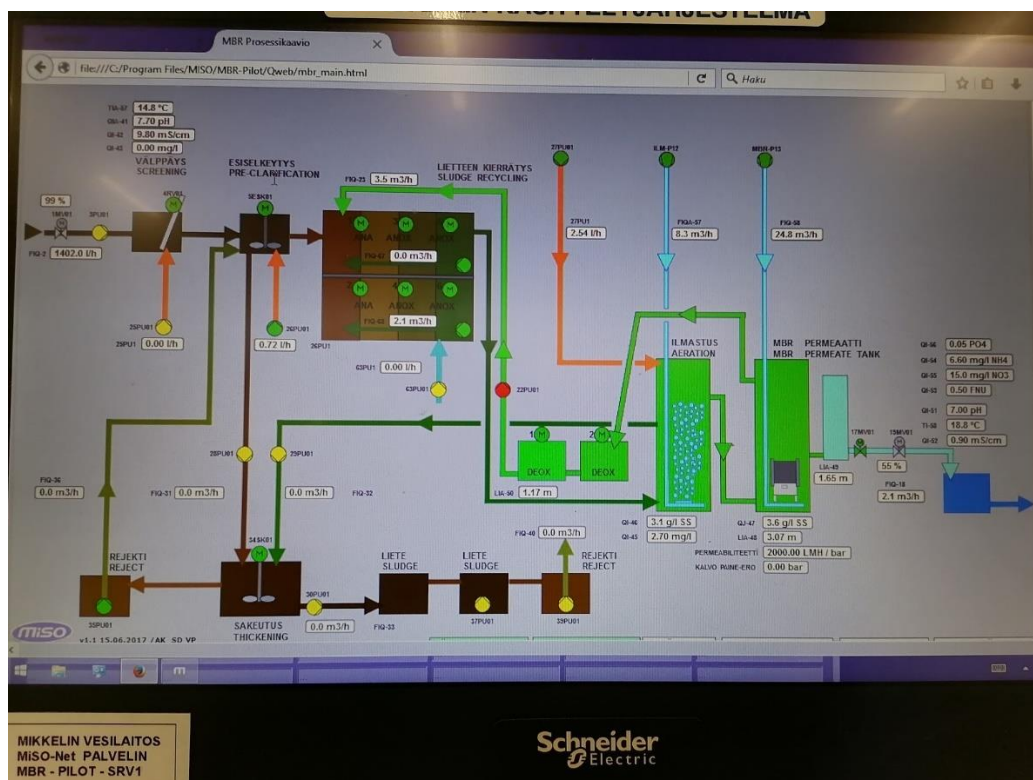
Koelaitos on sijoitettu Mikkelin jätevedenpuhdistamon prosessin rinnalle. Koelaitokseen tuleva jätevesi otetaan pääprosessin väliltä. Tuleva jätevesi pumpataan koelaitokseen, jossa jätevesi johdetaan hienovälpän läpi. Välpätty jätevesi johdetaan esiselkeytykseen, jossa poistetaan hienompi kiintoaines. Esiselkeytyksen kouruun syötetään esisaostuskemikaalia, polyalumiinikloridia, noin 50 ml/h virtaamalla. Polyalumiinikloridin tarkoituksena on tehostaa fosforin poistoa.

Esiselkeytyksestä lähtee yhde biologisiin altaisiin, joissa tapahtuu typenpoisto. Biologisia altaita on 6 kappaletta, 4 niistä on hapellisia ja 2 hapettomia. Biologisia altaita sekoitetaan perämoottoreilla, jotta altaiden pohjiin ei kertyisi lietepatjaa. Biologisten altaiden välillä on lietekierto, jossa jätevesi kiertää hapettomista altaista hapellisiin altaisiin.

Biologisista altaista jätevesi johdetaan kokooja putkea pitkin ilmastusaltaaseen. Ilmastusaltaan tilavuus on noin 10 m^3 . Ilmastusaltaan pohjassa on 12 ilmastinlautasta ja ilmamäärä altaassa vaihtelee 5-15 m^3 välillä. Ilmastusaltaaseen syötetään fosforin saostuskemikaalia PAXia (polyalumiinikloridi) noin 175 ml/h sekä lipeää (natrumhydroksidi) noin 150 ml/h.

Ilmastusaltaasta jätevesi virtaa ylivuotona yhdettä pitkin MBR-altaaseen. MBR-allas on kooltaan samankokoinen kuin ilmastusallas. MBR-altaassa on kalvokasetti, jonka pohjassa on oma ilmastin. Jätevesi työntyy kalvojen läpi painovoiman avulla. Paine-ero kalvolle muodostetaan MBR-altaan pinnan ja altaan vieressä olevan permeaattikolonnin pinnan erotuksella. Puhdistettu jätevesi eli permeaatti johdetaan putkea pitkin permeaattisäiliöön, josta on ylivuoto viemäriin.

MBR-altaasta lähtee ylivuoto Deox-altaisiin. Deox-altaista jätevesi pumpataan lietekiertonä takaisin biologisiin, hapellisiin altaisiin. Kuvassa 5 on esitetty tarkemmin Mikkelin koelaitoksen prosessikuvaus automaatiojärjestelmässä.



Kuva 5. Mikkelin koelaitoksen prosessikuvaus.

Koelaitosta operoidaan Mipro Oy:n toimittaman automaation avulla. Automaatio ilmoittaa mahdolliset prosessin häiriötilat sekä lähettää tarvittaessa hälytyksiä. Automaatiosta pystytään seuraamaan ja säätämään virtaamia, altaiden pintojen tasoja sekä muita parametrejä kuten kiintoainepitoisuutta, ilmamääriä sekä pH-arvoja.

4.3 Tuloksia

Mikkelin MBR-pilot laitosta on ajettu kesästä 2017 asti. Permeaatista on otettu säännöllisesti viikottain näytteitä, jotka on analysoitu Mikkelin vesilaitoksen laboratoriossa. Puhdistustulokset ovat olleet kauttaaltaan hyvät ja raja-arvot alittavia.

Fosforin osalta on päästy alle 0,05 mg/l pitoisuuksiin. Typenpoistossa on parhaimmillaan päästy jopa 90 % poistotehokkuuteen. Taulukossa 1 on esitetty tarkemmin uusimpia tuloksia koelaitoksen lähtevästä permeaatista.

	kertanäyte	kertanäyte	kertanäyte	kertanäyte	kertanäyte	kertanäyte	kertanäyte
date	1/15/20	1/21/20	1/29/20	2/5/20	2/11/20	2/19/20	3/4/20
Analysis							
Phosphorus total P (mg/l)	<0,05	0,09	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Soluble phosphorus (liukoinen kok.fosfori) (mg/l)	<0,05	0,09	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Fe (mg/l)	0,07	0,08	0,19	0,09	0,12	0,1	0,21
SS (mg/l)	<1	<1		<1	<1	<1	<1
CODcr(O2 mg/l)	16	14	30	20	18		18
NO3-N (mg/l)	16	21,9	22,9	2,5	17,8	10,3	3,1
NH4-N (mg/l)	0,26	0,15	3,85	34,7	17,6	15,2	35,6
N total (mg/l)	24	22	30	36	35	25	35
Alkalinity (mmol/l)	1,99	2,89	4,53	5,72	2,72	1,07	1,41
pH	7,3	7,5	7,6	7,9	7,6	6,9	
Coli (MPN/100 ml)	2	1	214	42	2	2	
Escherichia Coli (MPN/100 ml)	0	0	1	6	0	0	
HPC (MPN)							
Al (mg/l)	<0,10		0,34	0,18	<0,10	<0,10	<0,10
Sähkönjohtavuus (mS/m)							

Taulukko 1. Analyysituloksia Mikkelin MBR-koelaitoksen lähtevästä vedestä.

4.4 Tärkeimmät tunnusluvut

Kalvosuodatuksessa prosessin toimintaa seurataan tunnuslukujen avulla. Tunnuslukujen avulla voidaan päätellä muun muassa kalvojen kunto sekä mahdollinen puhdistustarve. Tärkeimpiä tunnuslukuja kalvosuodatuksessa ovat: vuoto, permeabiliteetti, kalvopaine ja lietteen suodatettavuutta kuvaava SVI-indeksi.

Suodatuskalvon kuntoa voidaan arvioida myös suodatuksen aikana tapahtuvan permeabiliteettiarvon liikkeistä. Jos suodatuksen aikana permeabiliteettiarvo laskee, voidaan päätellä, että kalvo on tukossa. Jos permeabiliteettiarvo pysyy samana koko suodatusjakson ajan, voidaan päätellä, että kalvot ovat puhtaat.

Vuolla kuvataan suodatuskalvon eli membraanin kuormistusta. Vuon suuruuteen vaikuttaa muun muassa huokoskoko ja lietteen ominaisuudet. Vuon arvot vaihtelevat laitoskohtaisesti, esimerkiksi Mikkelin koelaitoksella vuon arvot vaihtelevat 13–23 LMH välillä.

Kalvopaineella eli TMP (Transmembrane pressure) tarkoitetaan suodatuksesta syntyvää painetta. Permeabiliteetti (MK) tarkoittaa kalvon läpäisykykyä. Permeabiliteetti määritetään vuon (J) ja TMP-arvon avulla.

Läpäisykyky on yksi tärkeimmistä parametreista kuvaamaan kalvon kuntoa. Mitä korkeampi permeabiliteetti arvo on, sitä parempi läpäisevyys on. Permeabiliteetin ollessa matala, voidaan päätellä, että kalvot ovat tukossa.

SVI-indeksi kuvaa lietteen suodatettavuutta. Suositeltava SVI-arvo määritellään lietteen laskeutuvuuden avulla. Indeksien ollessa alle 80 liete on erinomaisessa kunnossa. SVI-arvon ol-

lessa yli 150 liete ei laskeudu kunnolla ja sen suodatettavuus on heikkoa. SVI-indeksi laske-
taan kaavasta:

Lietteen suodatettavuuden on havaittu olevan merkittävässä asemassa membraanin tukkeu-
tumiseen. Heikko suodatettavuus lisää kalvojen tukkeutumista ja heikentää suodatuskalvon
kapasiteettia. (van Haandel & van der Lubbe 2012)

5 KALVOJEN LIKAANTUMINEN JA PUHDISTUS

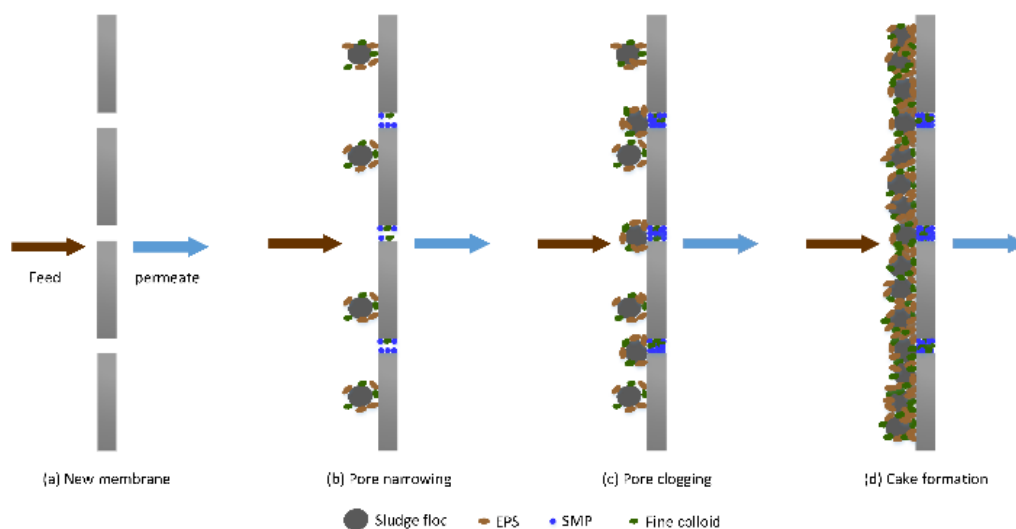
Kalvosuodatuksessa puoliläpäisevien kalvojen pinnalle kertyy partikkeleita, jotka ajan saa-
tossa tukkivat myös kalvon huokosia. Tukkeutuminen pienentää kalvojen suodatuspinta-alaa
ja tämä heikentää suodatuksen tehokkuutta. Kalvojen likaantuminen ja tukkeutuminen vai-
kuttaa myös permeaatin laatuun ja energian tarve kasvaa. (Lignell et al. 2015)

Kalvojen likaantumista voi ennalta ehkäistä mekaanisella puhdistuksella, mutta varsinainen
puhdistus tapahtuu vastavirtapesulla. Vastavirtapesussa kalvoille syötetään suodaussuuntaa
vastaan pesuliuosta, joka voi sisältää pesua tehostavia kemikaaleja. (Lignell et al. 2015)

5.1 Tukkeutumisen lajit

Kalvojen tukkeutuminen voidaan jakaa kolmeen ryhmään likaantumisen voimakkuuden
mukaan: väliaikainen likaantuminen (reversible fouling), pysyvä likaantuminen (irreversible
fouling) ja peruuttamaton likaantuminen (irrecoverable fouling). (Krzeminski 2013)

Kalvojen pintatukkeutumista kutsutaan väliaikaiseksi tukkeutumiseksi. Tämä tarkoittaa sitä,
että suodatuksen aikana kalvon pintaan kertyy partikkeleita, jotka tukkivat huokosten pin-
taa. Pysyvä likaantuminen on tilanne, jossa kalvojen pintatukkeutumisen lisäksi tapahtuu
myös huokostukkeutumista. Huokostukkeutumisessa partikkelit kiinnittyvät suodattimen
huokosten sisään ja estävät suodatusta. Peruuttamaton tukkeutuminen on likaantumislajeista
pahin. Siinä huokostukkeutuminen on niin pitkälle edennyt, ettei tukkeutumia voida tun-
netuilla menetelmillä poistaa. Kuvassa 6 on esitetty eri tukkeutumisen lajeja. (Krzeminski
2013)



Kuva 6. Tukkeutumisen lajit. (Iorhemen et al. 2016)

5.2 Tunnetut puhdistusmenetelmät

Kalvojen likaantumista ja tukkeutumista pystytään tarvittaessa poistamaan. Kalvot puhdistetaan yleensä niin sanotulla vastavirtapesulla tai -huuhtelulla, jossa kalvoille syötetään vasten suodatussuuntaa permeaattia tai erillistä pesuliuosta.

Membraanin suodatuskyvyn parantamiseksi tunnetaan kaksi menetelmää: mekaaninen puhdistus ja kemiallinen puhdistus. Mekaaninen puhdistus sisältää suodatussyklin aikana tapahtuvan vastavirtahuuhtelun sekä kalvoilmastuksen. Mekaanisella puhdistuksella pystytään poistamaan ja estämään kalvojen väliaikaista likaantumista.

Kemiallisia puhdistusmenetelmiä ovat muun muassa ylläpitopesut ja liotuspesut. Käytettävä kemikaali määräytyy likaantumisen syyn perusteella. Orgaanista likaa poistetaan natriumhypokloriitilla (NaClO) ja epäorgaanista likaa ja saostumia poistetaan sitruunahapolla ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$).

Ylläpitopesut ovat viikottain suoritettavia vastavirtapesuja, joiden tarkoitus on poistaa kalvon pinnalle ja huokosiin muodostunutta pysyvää likaantumista, joihin mekaaninen puhdistus ei ole tehonnut. Liotuspesut ovat voimakkaampia kemikaalipesuja, joissa kalvoja liotetaan kemikaaliliuoksessa. Liotuspesujen tarkoituksena on saada palautettua kalvojen suodatuskykyä paremmin kuin ylläpitopesuissa. Liotuspesuja suoritetaan 1–2 kertaa vuodessa ja pesuliuoksien konsentraatiot vaihtelevat 1,1 g/l ja 3 g/l välillä.

5.3 Tunnettujen puhdistusmenetelmien ongelmat

Nykyisillä käytetyillä ja edellä mainituilla puhdistusmenetelmillä ei olla saatu suodatuskykyä parantavia vaikutuksia. Puhdistuksien jälkeen permeabiliteetin on huomattu palautuvan hyvin nopeasti ennen puhdistuksia vallinneeseen tilanteeseen. Esimerkiksi Mikkelin koelaitoksella permeabiliteetti on palautunut jopa kolmen päivän jälkeen samaan tai jopa huomattavaksi kuin ennen puhdistusta. Käytetyillä ja tunnetuilla puhdistusmenetelmillä ei olla saatu näkyviä vaikutuksia suodatussyklin tasaisuuteen.

Nykyisillä tunnetuilla kalvon puhdistusmenetelmillä ei saada pidettyä permeabiliteetti arvoa vakaana ja tasaisena suodatuksen aikana. Tästä käyttäytymisestä voidaan päätellä, ettei puhdistusmenetelmä ole toiminut ja puhdistanut kalvoa. Tunnetuissa puhdistusmenetelmissä käytetään huomattava määrä kemikaaleja. Kemikaalien vaikutukset kalvoille ja biologiaan ovat merkittäviä. Jokainen kemikaalipesu epäonnistuessaan kuluttaa kalvoa ja tappaa altaissa sijaitsevan biologisen massan. Kuoltuaan biomassassa on heikosti suodatettavaa ja tukkii entistä enemmän kalvoja. Suuret kemikaalimäärät ovat myös huomattava työturvallisuus ja ympäristöriski.

5.4 Tehokkaamman puhdistusmenetelmän tarve

Heikot puhdistustulokset tunnetuilla menetelmillä ovat nostaneet tarpeen kehittää uusia menetelmiä kalvojen puhdistamiseksi. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää ja testata MBR-kalvojen puhdistusmenetelmä, joka on olosuhde riippumaton, ja jolla saadaan varma puhdistustulos pienillä kemikaalimäärillä.

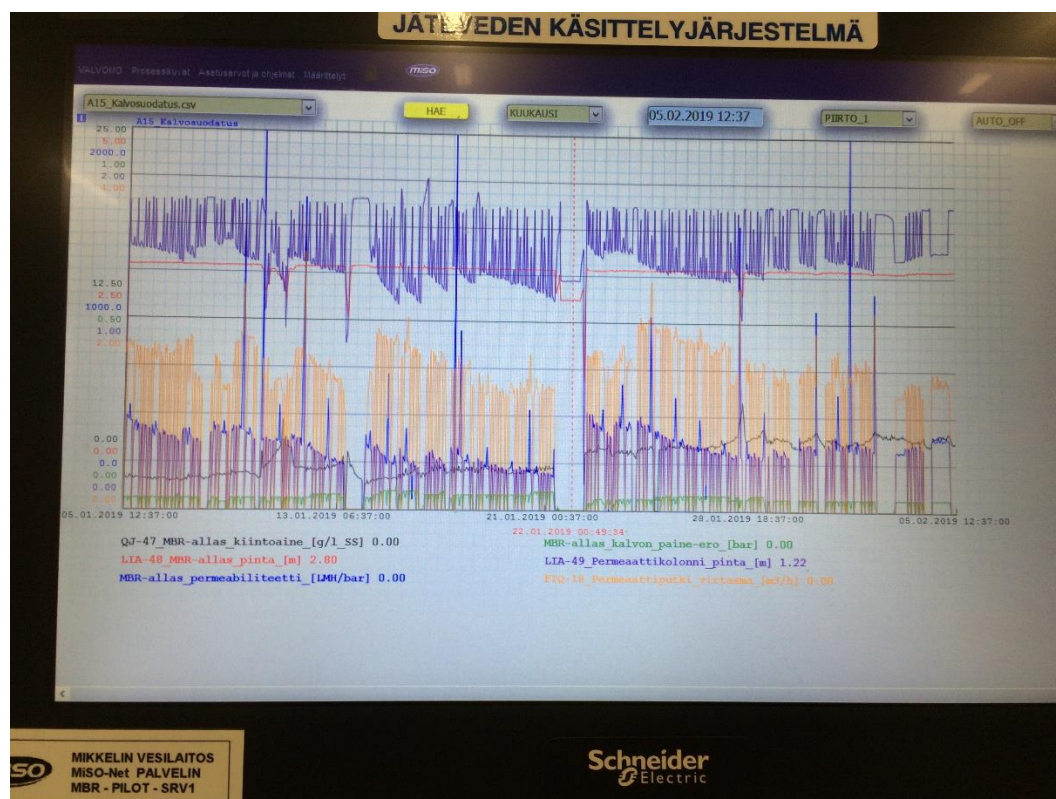
Kemikaalien käyttöä vähentämällä saadaan myös säästettyä kalvojen kuntoa ja biologinen liete ei vaurioidu liikaa. Kemikaalimääriä vähentämällä pystytään myös vähentämään ympäristö- ja työturvallisuusriskejä. Pienemmät kemikaalimäärät pienentävät myös kalvosuodatuslaitoksen käyttökustannuksia ja tekevät tekniikasta entistäkin kilpailukykyisemmän perinteiseen aktiivilieteprosessiin verrattuna.

6 HOB

Hot Backwash eli HOB on uusi ja tehokkaampi kalvojen puhdistusmenetelmä, jossa puhdistustehokkuus perustuu kuuman veden hyödyntämiseen. Lämpimällä vedellä tehtävä vastavirtahuuhdeltu parantaa kalvon pintaan syntyneen likakerroksen poistoa. HOB-puhdistusmenetelmään on mahdollista lisätä kemikaaleja parantamaan saostumien ja orgaanisen lian poistoa. Tarvittavat kemikaalimäärät ovat kuitenkin huomattavasti pienempiä kuin aikaisemmissa puhdistusmenetelmissä, koska suurin osa puhdistuksesta perustuu lämpimään veteen. Tarkemmat pesumenetelmän tiedot ovat vain tilaajan käyttöön.

7 HOB:N TESTAUS MIKKELIN PILOT-LAITOKSELLA

HOB-menetelmää testattiin Mikkelin kalvosuodatusta tutkivassa pilot-laitoksessa keväällä 2019. Tähän mennessä laitosta oli ajettu nykyisillä kalvoilla yhdeksän kuukautta. Ennen HOB:n testausta koelaitoksella oli suoritettu kemikaaleilla tehostettuja viikottaisia ylläpito-pesuja, joissa käytettiin sitruunahappoa ja natriumhypokloriittia. Puhdistustulokset olivat heikkoja niin permeabiliteetin kuin suodoksenkin osalta, kuten kuvassa 7 on esitetty.

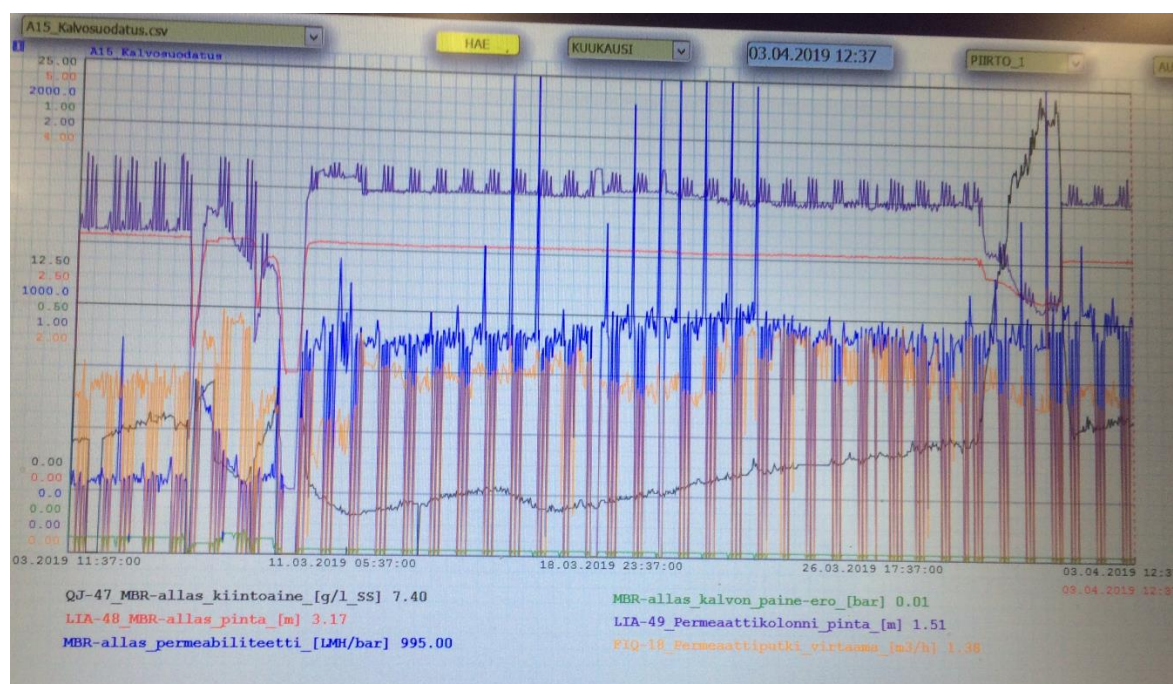


Kuva 7. Tunnettujen puhdistusmenetelmien vaikutus permeabiliteettiin. Permeabiliteetti näkyy alemman puoleisena sinisenä viivana.

HOB:n testaus suoritettiin 9.3.2019. Lähtötilanteessa permeabiliteetin arvo oli noin 300 ja kalvopaine-eroa oli noin 0,04bar. Käytettävä pesuliuos koostui lämpimästä vesijohtovedestä sekä laimeasta sitruunahaposta. Tarkemmat menetelmän tiedot ja pesuohje on vain tilaajan käytössä.

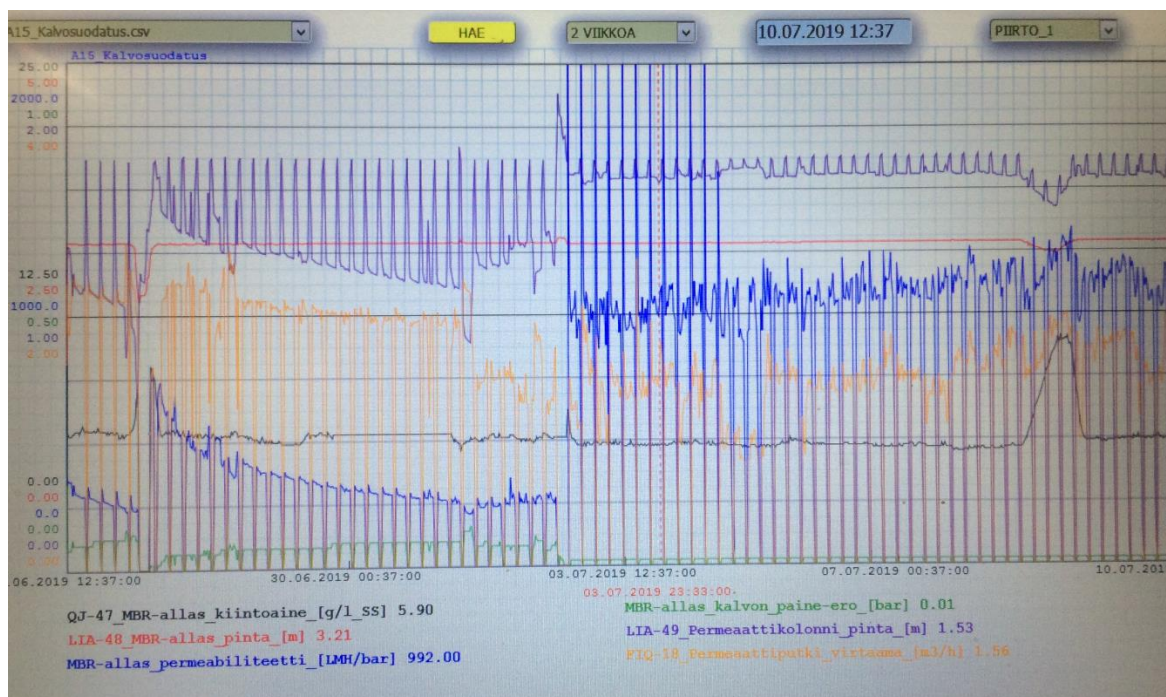
Permeabiliteetissä huomattiin välittömästi selkeä parantuminen. Permeabiliteetti nousi heti pesun jälkeen 1000 lnh/bar ja kalvopaine-eroa oli vain 0,01 bar. Permeabiliteetin arvo 1000 lnh/bar voidaan pitää poikkeuksellisen korkeana MF-suodatuksessa.

HOB-menetelmän jälkeen laitosta ajettiin normaalisti usean viikon ajan. Automaation piirrost seurattuna permeabiliteetti pysyi monta viikkoa yli 1000 lnh/bar. Paine-ero kalvolla ei noussut yli 0,02 bar. Permeaatin laadussa ei näkynyt suuria muutoksia HOB-pesun jälkeen. Kuvassa 8 on esitetty permeabiliteetin kehitystä HOB-pesun jälkeen.



Kuva 8. 9.3.2019 suoritettun HOB-menetelmän jälkeen permeabiliteetin nousu erottui piirrosta selkeästi. Permeabiliteetin näkyy kuvassa sinisellä.

HOB-menetelmää testattiin seuraavan kerran 2.7.2019 samanlaisella pesuliuoksella kuin ensimmäisellä kerralla. Lähtötilanne permeabiliteetin osalta oli 300 lnh/bar. Paine-ero kalvolla oli suhteellisen suuri; 0,07 bar. HOB-pesun jälkeen kalvopaine-ero saatiin jälleen 0,01 bar ja permeabiliteetti nousi jopa yli 1000 lnh/bar. Kuvassa 9 on esitetty 2.7.2019 tapahtunut permeabiliteetin muutos.



Kuva 9. Permeabiliteetin nousu 2.7.2019.

7.1 HOB:n tulokset

HOB-menetelmällä saatiin Mikkelin pilot-laitoksella ennennäkemättömiä tuloksia. Permeabiliteetti saatiin jopa viisinkertaiseksi lähtötilanteisiin verrattuna. Suodatussykli saatiin pysymään tasaisena, eli suodatuksen aikana permeabiliteetissä ei huomattu juuri yhtään muutosta.

Lisäksi huomattiin, että HOB-menetelmää pystyy soveltamaan eri suodatusolosuhteissa. Maaliskuussa tehdyssä testauksessa käsiteltävän jäteveden lämpötila oli noin 10 astetta, kun taas heinäkuussa lämpötila oli jopa 22 astetta. Puhdistustuloksessa ei huomattu eroavaisuuksia, kun pesu suoritettiin eri vuodenaikoina.

7.2 HOB:n edut tunnettuihin puhdistusmenetelmiin

HOB-puhdistusmenetelmä on monin tavoin tehokkaampi, ympäristöystävällisempi ja halvempi kuin aiemmat tunnetut menetelmät. HOB-menetelmällä saatiin aikaiseksi puhdistustulos, jota ei olla koskaan aikaisemmin saatu muilla menetelmillä. Kalvojen suodatuskyky, permeabiliteetti, saatiin palautettua lähes alkuperäiseen kuntoon.

Puhdistustuloksen saamiseksi käytettiin vain murto-osa kemikaalia muihin menetelmiin verrattuna. Kemikaalien vähäinen käyttö ei tappanut lietteen biologiaa ja näin ollen liete säilyi

suodatuskelpoisena. Kemikaalien vähäinen käyttö pienentää myös työtaturmien ja ympäristöongelmien tapahtumista. Koska kemikaaleja käytetään HOB-menetelmässä vähemmän se vaikuttaa automaattisesti myös pesusta aiheutuviin kustannuksiin, joita saadaan pienennettyä kyseistä menetelmää käytettäessä.

Suurin ero tunnettuihin ja aikaisemmin käytettyihin menetelmiin on, että HOB-menetelmä toimii ja sillä saadaan selkeästi näkyviä puhdistustuloksia. HOB-menetelmää käyttämällä kalvojen suodatuskyky saatiin palautettua lähes alkuperäiseen kuntoon.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

HOB-menetelmän testaus onnistui suunnitelmien mukaan ja lopputulos oli jopa parempi kuin mitä ennen testausta oletettiin. Kalvojen läpäisykyky, permeabiliteetti, saatiin nostettua selkeästi suuremmaksi HOB-menetelmällä kuin tunnetuilla menetelmillä. HOB-menetelmällä permeabiliteetti saatiin myös säilymään hyvänä paljon pidemmän aikaa kuin aikaisemmin tehdyillä tunnetuilla menetelmillä. Lisäksi kalvopaine-ero saatiin pysymään HOB-menetelmän avulla paljon maltillisempaan ja näin ollen permeaatin laatu parani.

Pesuvien lämpötilalla on suuri merkitys kalvopesun onnistumisen kannalta. Lämpimän veden avulla kalvot saadaan pestyä onnistuneesti ja läpäisykyky palautettua lähes alkuperäiseen kuntoon. Lämpimän veden käytöllä on muitakin myönteisiä vaikutuksia kalvosuodatusprosessiin kuin vain kalvojen läpäisykyvyn paraneminen.

Lämmintä vettä käytettäessä kemikaalien tarve pienenee ja tällä on suuria vaikutuksia niin suodatinkalvojen kuin biologisen prosessin kuntoon. Kemikaalien vähäinen käyttö ei rasita kalvoja ja näin niiden käyttöikä saadaan pidennettyä. Kemikaalien vähäinen käyttö ei myöskään vahingoita suodatettavan lietteen biologiaa ja kalvosuodatusprosessi toimii paremmin.

HOB-menetelmä on toimiva ja olosuhderiippumaton suodatinkalvojen puhdistusmenetelmä. HOB-menetelmää hyödyntämällä suodatinkalvot saadaan varmasti puhdistettua. Suodatinkalvojen pesutarve saadaan myös pieneneään eikä kalvoja tarvitse pestä niin usein kuin aikaisemmin.

Mikkelin pilot-laitoksella suoritettavat HOB-menetelmän testaukset onnistuivat niin hyvin, että menetelmää lähdetään tutkimaan ja optimoidaan tulevaisuudessa lisää ja menetelmä tullaan

ottamaan käyttöön Mikkeliin valmistuvassa uudessa kalvosuodatukseen perustuvassa jätevedenpuhdistamossa vuonna 2021.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Alfa Laval, 2019. MBR Module Installation and Operating Manual. Julkaisematon materiaali.

van Haandel, A., van der Lubbe, J., 2012. Handbook of Biological Wastewater Treatment. 2.painos. IWA Publishing.

Iorhemen, O., Hamza, R., Tay, J., 2016. Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling. [verkkodokumentti]. Saatavilla:

https://www.researchgate.net/publication/304029602_Membrane_Bioreactor_MBR_Technology_for_Wastewater_Treatment_and_Reclamation_Membrane_Fouling

Judd & Judd Ltd, 2018f. The MBR Site, Membrane Bioreactors – multitube configurations [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/mbr-multitube-configurations/>

Krzeminski, P., 2013. Activated sludge filterability and full-scale membrane bioreactor operation, väitöskirja [verkkodokumentti]. Puola, Technische Universiteit Delft, Saatavilla: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aec4e0320-82c8-42df-8b51-b616314ac96f>

Lignell, I., Mikola, A., Venejärvi, V., 2015. MBR-opas – MBR-prosessien suunnittelu, ohjaus ja hankinta Suomessa [verkkodokumentti]. Ramboll Finland Oy, Saatavilla: https://vvy.etapahtuma.fi/eTaika_Tiedostot/5/Hanke/1371/LOPPURAPORTTI_MBR_opas_Ramboll_Finland.pdf

Mikkelin vesilaitos, 2016. Jätevedenpuhdistamojen edelläkävijä Metsä-Sairilaan [verkkodokumentti]. Mikkelin vesilaitos, Saatavilla: <http://mipu.fi>

Pinnekamp, J., Friedrich, H., 2003. Membrane Technology for Waste Water Treatment, 2. painos [verkkodokumentti]. Saksa, Institute of Environmental Engineering of the RWTH Aachen University & Ministry for Environment and Nature Conservation, Agriculture and Consumer Protection of federal state North Rhine-Westphalia, Saatavilla: https://www.fiw.rwth-aachen.de/neo/fileadmin/pdf/membranbuch/GB_Membranbuch_300106.pdf