

Heli Pirhonen

MBR-TEKNOLOGIAN ENERGIA- JA
YMPÄRISTÖTEHOKKUUTTA
MITTAAVIEN TUNNUSLUKIJEN
SELVITYS JA VERTAILU
PERINTEISEEN
AKTIIVILIIETEPROSESSIIN

Opinnäytetyö
Ympäristötekniologia


Toukokuu 2016




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	<p>Opinnäytetyön päivämäärä</p> <p>3.5.2016</p>
<p>Tekijä</p> <p>Heli Pirhonen</p>	<p>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</p> <p>Ympäristötekniikan (AMK) insinööri</p>
<p>Nimeke</p> <p>MBR-tekniikan energia- ja ympäristötehokkuutta mittaavien tunnuslukujen selvitys ja vertailu perinteiseen aktiivilieteprosessiin</p>	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Ympäristötietoisuuden lisääntyessä ja puhdistustekniikoiden kehittyessä on alettu kiinnittämään entistä enemmän huomiota jäteveden käsittelyn puhdistustuloksiin, esimerkiksi tehokkaampaan ravinteiden poistoon, ravinteiden kierrätykseen ja mikropollutanttien poistoon. Ohjausjärjestelmien kehittäminen on yksi potentiaalinen keino vähentää prosessissa tarvittavien materiaalien käyttöä ja tehostaa puhdistustulosta. Tämä opinnäytetyö on tehty auttamaan ohjausjärjestelmien kehitystyötä. Jätevesiprosessin ohjauksessa tärkeää on tietää, mihin asioihin tulee kiinnittää huomiota ja tuntea tietyn jätevedenkäsittelymenetelmän erityispiirteet. Jätevedenkäsittelyn tehokkuutta voidaan seurata tapauskohtaisesti määritettyjen suorituskykykymittareiden avulla. Suorituskykykymittarit eli tunnusluvut antavat tärkeää tietoa prosessin toiminnasta ja auttavat jätevedenpuhdistuslaitoksen optimoinnissa. Opinnäytetyön tuloksia käytetään hyödyksi Mipro Oy:n vesihuollon ohjausjärjestelmien tuotekehityksessä.</p> <p>Suomessa tällä hetkellä yleisesti käytössä oleva jätevedenpuhdistusmenetelmä on perinteinen aktiivilieteprosessi (CAS). Kyseisessä prosessissa on tehostamisen tarvetta, useilla laitoksilla puhdistetun jäteveden laatu ei yllä ympäristöluvassa vaaditulle tasolle. Membraanibioreaktorilla (MBR) on potentiaalia tehostaa puhdistustuloksia. Membraanibioreaktori yhdistää aktiivilieteprosessin ja kalvosuodatuksen. Suomalaisilla puhdistamoilla on eniten parannettavaa typenpoistossa. Lisäksi perinteisellä aktiivilieteprosessilla lääkejäämien puhdistusteho on osittain heikko. MBR-puhdistetun jäteveden hygieeninen laatu on hyvällä tasolla, paremmalla kuin CAS-puhdistetulla jätevedellä. MBR:llä on saatu lupaavia tuloksia lääkejäämien ja haitta-aineiden poistosta. MBR:ssä tapahtuu myös typen poiston tehostuminen korkeamman lieteiän ja kiintoainepitoisuuden vuoksi. Pidempi viipymä edesauttaa MBR:lle ominaisen mikrobikannan syntyä.</p> <p>MBR-prosessin energiankulutus on melko samalla tasolla kuin CAS, johon on yhdistetty tertiäärinen puhdistus. Tällä tavalla vertailtaessa MBR:n energiankulutus on kirjallisuustietojen mukaan 10–30 % korkeampi kuin CAS:in. Opinnäytetyöhön liittyvässä selvityksessä selvisi, että MBR:n energiankulutus on noin 0,5–1,1 kWh/m³ ja CAS:n 0,13–2,16 kWh/m³. MBR:n käyttöön siirtyminen ei välttämättä lisää energiankulutusta. Se kenties joissain tapauksissa jopa tehostaisi energiankäyttöä, koska puhdistamoille voitaisiin asentaa uutta energiatehokkaampaa tekniikkaa vanhentuneen tilalle.</p>	
<p>Asiasanat (avainsanat)</p> <p>energiankulutus, energiatehokkuus, membraanibioreaktori, perinteinen aktiivilieteprosessi, puhdistustulos, ympäristötehokkuus</p>	
<p>Sivumäärä</p> <p>63</p>	<p>Kieli</p> <p>Suomi</p>
<p>Huomautus (huomautukset liitteistä)</p>	
<p>Ohjaavan opettajan nimi</p> <p>Marjatta Lehesvaara & Heikki Särkkä</p>	<p>Opinnäytetyön toimeksiantaja</p> <p>Mipro Oy</p>

DESCRIPTION

	Date of the bachelor's thesis 3.5.2016
Author Heli Pirhonen	Degree programme and option Bachelor of Environmental Engineering
Name of the bachelor's thesis Environmental and energy efficiency of membrane bioreactor & comparison with CAS	
Abstract <p>Environmental awareness regarding waste water purification is increasing and modern technologies are already available. Membrane bioreactor (MBR) is one of those advanced technologies. It combines activated sludge process and membrane filtration unit. Membrane technology has a potential to increase the efficiency of conventional activated sludge (CAS) purification process (more efficient removal of nutrients and micro-pollutants).</p> <p>Key performance indicators are important part of monitoring any process. They are a handy aid evaluating where to address resources and how to optimize processes. Automated management systems are effective tools to optimize waste water treatment and they have potential to significantly reduce pollution and spare valuable resources. The results of this thesis will be utilized developing the automated water management system of Mipro Oy.</p> <p>Energy requirements of CAS and MBR cannot be compared directly. CAS complemented with tertiary purification produces similar quality effluent than MBR. Based on literature, the energy expenditure of MBR is usually around 10–30 % higher than of CAS which is complemented with tertiary purification. Energy consumption of membrane bioreactor is approximately 0,5–1,1 kWh/m³ based on literary review. Energy consumption of conventional activated sludge process is circa 0,13–2,16 kWh/m³. In some cases introduction of MBR decreases energy consumption if the CAS technology is outdated and less energy efficient than the newest MBR innovations.</p> <p>Reduction of pharmaceutical residues and other micro-pollutants is partially weak using CAS. Upgrading waste water treatment to MBR enhances the removal of micro-pollutants. Removal of nitrogen is on average at low level at Finnish waste water treatment facilities, at those facilities that did not meet the standards of their environmental permit. With MBR the reduction of nitrogen may be enhanced. That occurs because using MBR purification it is possible to maintain long sludge time and high levels of suspended solids. Also typical microbes of MBR remove more nitrogen than in CAS. Longer sludge time improves the growth of nitrifying microbes. MBR produces hygienically higher quality effluent than CAS.</p>	
Subject headings, (keywords) conventional activated sludge process, energy consumption, energy efficiency, effluent quality, environmental efficiency, membrane bioreactor	
Pages 63	Language Finnish
Remarks, notes on appendices	
Tutor Marjatta Lehesvaara & Heikki Särkkä	Bachelor's thesis assigned by Mipro Oy

TERMI- JA LYHENNELUETTELO

AS	Activated sludge, aktiiviliete. Liete, joka sisältää bakteereja ja muita mikro-organismeja, jotka käyttävät ravinnokseen jäteveden orgaanista ainetta ja epäpuhtauksia.
CAS	Conventional activated sludge system, perinteinen aktiivilieteprosessi.
Effluentti	Tämän opinnäytetyön kontekstissa tarkoittaa puhdistettua jätevettä eli laitokselta poistuvaa vettä.
FS	Flat sheet, tasomembraani.
HF	Hollow fibre, onttokuitumembraani.
Lääkejäämä	Hyvin pieni lääkeaineen jäännöspitoisuus vedessä.
Haitta-aine	Aine, jolla on haitallisia vaikutuksia luonnossa.
KPI	Key Performance Indicator, keskeinen suorituskykymittari, tunnusluku. Tunnuslukujen avulla mitataan ja seurataan tietyn prosessin toiminnalle tärkeitä suureita.
kWh/m ³	Kilowattituntia per puhdistettu jätevesikuutio/ kilowattituntia per tuotettu permeaattikuutio. Ilmaisee jäteveden puhdistuksen energiankulutuksen.
MBR	Membrane bio reactor, membraanibioreaktori, kalvobioreaktori.
MBR-prosessi	Membraanibioreaktoriin perustuva jätevedenpuhdistusprosessi.
MBR-teknologia	Erilaiset membraanibioreaktorisovellukset, eli aktiivilieteprosessin ja kalvosuodatuksen yhdistelmät.
Membraani	Huokoinen puhdistuskalvo, joka mekaanisesti suodattaa jätevedestä epäpuhtauksia.
Membraaniteknologia	Yläkäsite erilaisille kalvosovelluksille. Sisältää muun muassa erityyppisiä membraanibioreaktoreja ja tertiäärinen membraanipuhdistuksen sovelluksia. Myös pelkkä kalvosuodatus ilman aktiivilieteprosessia.
MF	Micro filtration, mikrosuodatus. Suodattaa mikrokoon partikkeleita, kuten bakteereja ja maalipigmenttejä.
mg/L, µg/L	Milligrammaa litrassa, mikrogrammaa litrassa. Tulevassa tai lähtevässä jätevedessä olevan epäpuhtauden pitoisuus.

Mikromuovi	Halkaisijaltaan alle 5 millimetrin kokoinen muovikappale.
Mikropollutantti	Pienimolekyyliset aineet, joiden pitoisuus vedessä on pieni.
Permeaatti	Membranin huokosia pienemmät partikkelit läpäisevät sen ja tätä veden ja pienten partikkelien seosta kutsutaan permeaatiksi.
Reduktio [%]	Vähennemä, puhdistusteho. Ilmaisee, kuinka monta prosenttia tiettyä ainetta poistuu jätevedestä puhdistuksen aikana.
Retentaatti	Kalvon syöttöpuolelle jäävät huokosia isommat yhdisteet ja tätä kutsutaan retentaatiksi.
Tertiäärinen puhdistus	Varsinaisen puhdistuksen jälkeen olevat lisäksittelyt, esimerkiksi hiekkasuodatus ja desinfiointi.
UF	Ultra filtration, ultrasuodatus. Suodattaa muun muassa virusten ja tupakansavun kokoluokkaa olevia aineita.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	MIPRON VESIHUOLLON JÄRJESTELMÄT	2
3	JÄTEVEDEN LAITOSPUHDISTAMINEN.....	3
3.1	Perinteinen aktiivilieteprosessi	4
3.1.1	Mekaaninen ja kemiallinen käsittely	5
3.1.2	Biologinen käsittely ja jälkiselkeytys	6
3.2	Membraaniteknologia	8
3.3	MBR Suomessa ja maailmalla.....	12
3.4	Jätevedenpuhdistuksen tunnusluvut.....	13
4	MENETELMÄT	15
5	MEMBRAANIBIOREAKTORIN SUORITUSKYKY JA VERTAILU PERINTEISEEN AKTIIVILIIETEPROSESSIIN	16
5.1	Energiankulutus	16
5.1.1	Energiankulutus ja puhdistustulos	17
5.1.2	Energiankulutuksen jakauma	19
5.2	Lupaehtojen täytyminen	23
5.2.1	Lupaehdot	23
5.2.2	Lupaindeksi suomalaisilla puhdistamoilla.....	24
5.2.3	Suomalaisten puhdistamoiden tunnuslukutilastojen tarkastelua.....	26
5.3	Ympäristötehokkuus	29
5.3.1	Haitta-aineet	30
5.3.2	Lääkejäämät	31
5.3.3	Mikromuovit	32
5.4	MBR-prosessin tunnuslukuja.....	34
5.4.1	Viranomaisvelvoitteisiin liittyvät.....	35
5.4.2	Toiminnanohjaukseen liittyvät.....	35
5.4.3	Ympäristötunnuslukuja	37
5.4.4	MBR-tekniikan tärkeimmät energia- ja ympäristötunnusluvut ...	38
6	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET	42

LIITTEET

- 1 Selvitysten vesihuoltolaitokset
- 2 Puhdistustulos selvitys
- 3 Energiankulutus- ja ohitusindeksiselvitys
- 4 Membraanibioreaktorin teho poistamaan lääkkeitä
- 5 MBR-prosessista mitattavia asioita

1 JOHDANTO

Ympäristöön kohdistuviin paineisiin kiinnitetään entistä enemmän huomiota ja tulevaisuudessa on ennustettavissa jätevedenpuhdistuslaitosten lupa-ehtoihin tiukempia raja-arvoja, sillä useiden puhdistamoiden ympäristöluvut vanhenevat seuraavan 10 vuoden kuluessa. Membraanibioreaktori yhdistää aktiivilieteprosessin ja kalvosuodatusmekaniikan. MBR-tekniikan avulla on mahdollista poistaa vedestä sellaisia haitallisia yhdisteitä, joita perinteisillä menetelmillä ei saa eroteltua, kuten lääkkeitä. Ravinteiden, kiintoaineen ja mikrobien puhdistaminen on tehokkaampaa membraanibioreaktorissa kuin aktiivilieteprosessissa.

Työskentelin Mipro Oy:lle tehdessäni opinnäytetyötäni. Mipro Oy on turvallisuus- ja ympäristötekniikan asiantuntijayritys. Se on uranuurtaja rautateiden turvallisuusjärjestelmien toimittajana Suomessa. Lisäksi Miprolla on yli 35 vuoden kokemus ja asiantuntemus vesihuollon prosessien ohjausjärjestelmiin liittyen. Opinnäytetyön tuloksia käytetään hyödyksi Mipro Oy:n vesihuollon ohjausjärjestelmien kehitystyössä. Opinnäytetyöni liittyy Smart Effluents TEKES -hankkeeseen, jossa tutkitaan muun muassa membraanibioreaktorin käyttöä jäteveden puhdistuksessa ja MBR-lietteen hyödynnettävyyttä. Hanke toteutetaan aikavälillä 1.10.2015–30.9.2017.

Tässä opinnäytetyössä tuotettiin Miproille ja hankkeelle tietoa MBR-tekniikan suorituskykyarvoinnista eli tunnusluvuista. Tunnusluvuilla mitataan esimerkiksi yrityksen toiminnan, jäteveden käsittelyn tai teollisuuden prosessien suorituskykyä tarkastelemalla tiettyjä tärkeitä menestystekijöitä. Suorituskykyarvoinnista voidaan käyttää apuna prosessien toiminnan optimoinnissa. Opinnäytetyön tuloksena on tietopaketti membraaniteknologian ominaispiirteistä energiankulutuksen, puhdistustuloksen ja ympäristötehokkuuden osalta verrattuna perinteiseen aktiivilieteprosessiin.

Opinnäytetyössä on kolme yläkäsitettä: MRB-tekniikka, perinteinen aktiivilieteprosessi ja suorituskykyarvoinnissa eli tunnusluvut. Luvussa 3 näiden kolmen taustateoriat ja nykytila on esitelty. Myöhemmissä luvuissa nämä kolme aihealuetta limittyvät ja niiden välisiä suhteita analysoidaan. Tulokset esitellään luvussa 5. Luvuissa 5.4.1.-5.4.4. ovat ehdotukseni tunnusluvuista, joita voidaan käyttää membraanipuhdistusprosessin seurannassa ja ohjauksessa apuvälineenä.

Perinteistä aktiivilieteprosessia ja membraanibioreaktoripuhdistusta voidaan suurelta osin seurata samankaltaisilla suorituskykymittareilla, onhan näiden kahden prosessin rakenteessa monia yhteneväisyyksiä. Molemmissa esikäsitteily on samanlainen ja molemmissa prosesseissa on aktiivilietepuhdistus ilmastusaltaassa. Suurimmat eroavaisuudet ovat prosessin loppupäässä. Membraanibioreaktorissa on kalvosuodatusyksikkö ja perinteisessä aktiivilieteprosessissa jälkiselkeytysallas ja mahdolliset jälkikäsitteilyt. Mitkä ovat membraanibioreaktorin ja perinteisen aktiivilieteprosessin eroavaisuudet ja yhtäläisyydet? Miten ne vaikuttavat energiankulutukseen, puhdistustulokseen ja ympäristötehokkuuteen? Minkälaisilla tunnusluvuilla ja mittauksilla jätevedenpuhdistusta voidaan seurata ja ohjata? Näihin kysymyksiin on vastattu opinnäytetyössä ja sen liitteissä.

2 MIPRON VESIHUOLLON JÄRJESTELMÄT

Mipro Oy on suomalainen turvallisuuteen ja ympäristötekniikkaan keskittyvä asiantuntijayritys. Sen pääkonttori on Mikkelissä, mutta toimintaa on myös muilla paikkakunnilla Suomessa ja lisäksi muun muassa Euroopassa ja Lähi-Idässä. Mipro kehittää ja toimittaa kokonaisvaltaisia järjestelmäratkaisuja rautatie- ja metrolinjojen ja teollisuuden turvallisuuden hallintaan sekä vesi- ja energihuollon prosessien ohjaukseen ja valvontaan. Mipron toiminnan punainen lanka on asiakaslähtöisyys ja yhteistyö asiakkaan kanssa niin järjestelmien kehitystyössä kuin elinkaaren hallinnassa. Mipro panostaa innovatiiviseen tuotekehitykseen. Oman osaamisen ohella Mipro hyödyntää parhaita teknologiaratkaisuja sekä teollisuudessa koeteltuja standardikomponentteja. (Mipro Oy d.)

Mipron vesihuollon automaatiojärjestelmät kattavat jäteveden puhdistuksen, puhtaan veden tuotannon ja kaukokäytön toiminnot (Kakko 2016). Mipron järjestelmät ovat laitteisto- ja ohjelmistoriippumattomia, joten ne soveltuvat sekä uusiin että saneerattaviin kohteisiin niiden automaatioasteesta ja koosta riippumatta. (Mipro Oy a; Mipro Oy b.)

Automaatiojärjestelmällä ohjataan jäteveden puhdistusprosesseja ja jälkikäsitteilyjä. Järjestelmä hyödyntää ohjauksessa nykyaikaista mittausteknologiaa. Jatkuvat toimiset mittaukset mahdollistavat tehokkaan ja automaattisen typenpoiston. Järjestelmällä

varmistetaan laitoksen optimaalinen toiminta ja viranomaisvaatimusten täyttyminen. Se parantaa prosessien energiatehokkuutta, minimoi kemikaalien kulutusta, tehostaa henkilöresurssien käyttöä ja auttaa organisoimaan laitoksen huoltotoimintaa. (Mipro Oy a.)

Mipron kaukokäyttö kokoaa vesihuollon prosessit yhteen järjestelmään ja tarjoaa toimintojen keskitettyyn valvontaan ja ohjaukseen yhtenäisen käyttöliittymän. Kaukokäyttöjärjestelmä valvoo, ohjaa ja säätää vesilaitoksen tuotantoyksiköitä kuten vedenottamoita, vedenkäsittelylaitoksia, vesisäiliöitä, jätevesipumppaamoita ja niin edelleen. Keskitetty käytön hallinta säästää aikaa ja kustannuksia. Vesilaitoksen toiminta-alueen kohteita voidaan hallita keskitetysti ja reaaliajassa yhden järjestelmän kautta. (Mipro Oy b.)

Mipro REGO-palvelukokonaisuuden ydin on älykäs tilannekuva. Se kokoaa yhteen kriittisen tilannetiedon reaaliaikaisesti eri järjestelmistä ja jalostaa sen KPI-mittareiksi. Tavoitteisiin sidotut mittarit (KPI= Key Performance Indicators) luovat pohjan paremmalle päätöksenteolle ja konkreettiselle kehitystyölle, ottaen huomioon käytössä olevat resurssit. (Mipro Oy c.)

3 JÄTEVEDEN LAITOSPUHDISTAMINEN

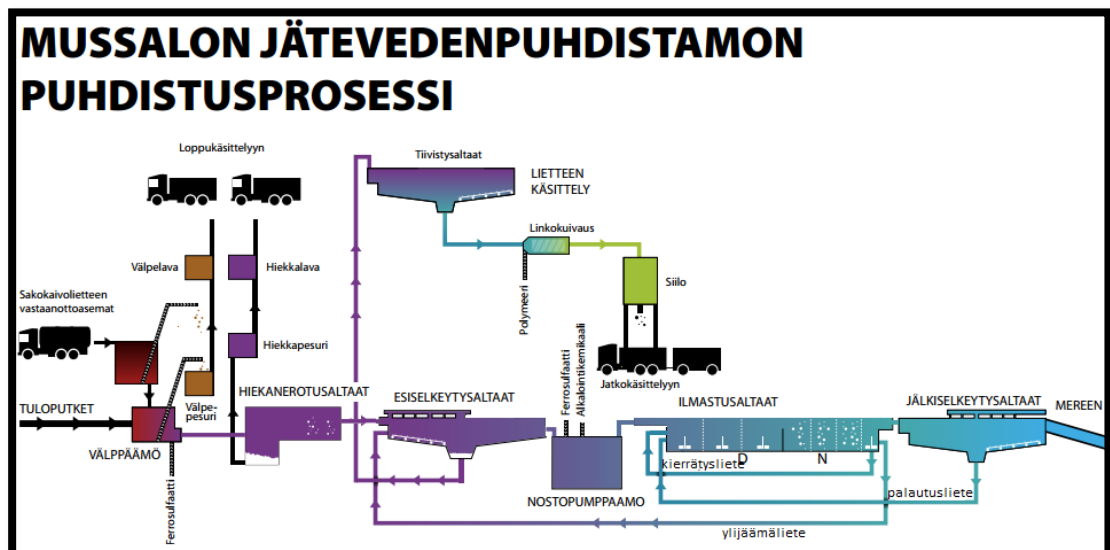
Jätevesiä syntyy kotitalouksissa muun muassa peseytymisestä, siivoamisesta, ruuanlaitosta ja wc:n käytöstä. Harmaaksi jätevedeksi kutsutaan kaikkea sitä jätevettä, joka ei sisällä käymälän huuhteluvettä tai käymäläjätettä. (Ympäristöhallinto 2013 b.) Mustalla jätevedellä tarkoitetaan kaikkia kotitalouden jätevesiä, mukaan luettuna käymälästä tulevat vedet (Ympäristöhallinto 2013 a). Teollisuusjätevesi poikkeaa normaalista asumajätevedestä. Sitä syntyy muun muassa tekstiili- ja kemianteollisuudessa sekä elintarvike-, pintakäsittely- ja maalliteollisuudessa. Teollisuuden jätevesien johtamiseksi viemäriverkostoon on sovittava sijaintipaikkakunnan ympäristöpalveluiden kanssa. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2015.)

Vaatimusten lisääntyessä ja puhdistustekniikoiden kehittyessä on alettava kiinnittää enemmän huomiota jäteveden käsittelyn puhdistustuloksiin, esimerkiksi tehokkaampaan ravinteiden poistoon, ravinteiden kierrätykseen ja mikropollutanttien poistoon.

Mikropollutantit ovat sellaisia haitta-aineita vedessä, jotka voivat aiheuttaa haittaa ympäristölle ja organismeille. Ne ovat pieniä partikkeleita, kuten lääkejäämät, hormo- nit, raskasmetallit ja patogeenit. Jo yli 100 vuotta käytössä olleen aktiivilieteprosessin rinnalle on alettu ottamaan käyttöön uudenlaisia puhdistusmenetelmiä. Yksi tällainen Suomeenkin tällä hetkellä rantautumassa oleva ja Suomessa vielä harvinainen tekniikka on membraanipuhdistus. (Teollisuuden Vesi 2014.)

3.1 Perinteinen aktiivilieteprosessi

Hyvä esimerkki perinteisestä aktiivilieteprosessista on Kymen Vesi Oy:n Mussalon jätevedenpuhdistusprosessi. Kotkassa Mussalon kaupunginosassa sijaitseva jätevedenpuhdistuslaitos on Suomen neljänneksi suurin, ja sen järjestelmä on saneerattu vuonna 2009 (Kymen Vesi Oy 2012). Puhdistamolla käsitellään Kotkan, Pyhtään ja Haminan jätevedet. Puhdistamon kuormituksesta noin puolet on peräisin teollisuudesta. Laitoksen puhdistustehoja ovat: BOD 98 %, fosfori 96 % ja typpi yli 70 %. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry 2016 b.) Kyseiset puhdistustehot täyttävät laitokselle myönnetyn ympäristöluvan vaatimukset. Luvassa on vaadittu edellä mainittujen aineiden osalta BOD:lle 90 % puhdistustehoa ja fosforille 90 % (typelle ei raja-arvoa). (Päätös 137/05/1.)



KUVA 1. Mussalon jätevedenpuhdistamon prosessikaavio (Kymen Vesi Oy)

Laitoksella on biologiseen typenpoistoon perustuva hienovälppäyksellä ja esiselkeytyksellä varustettu aktiivilieteprosessi. Puhdistusprosessissa on mekaaninen, kemialli-

nen ja biologinen puhdistus. (Kymen Vesi Oy 2012.) Kuvassa 1 on Mussalon jätevedenpuhdistamon prosessikaavio. Siitä voi nähdä laitoksen toiminto-osat ja prosessit: muun muassa välppäämö, hiekanerotus, esiselkeytys, ilmastusaltaat, jälkiselkeytys ja lietteen käsittely.

3.1.1 Mekaaninen ja kemiallinen käsittely

Jäteveden tullessa puhdistamolle se johdetaan välppäämöö. Välppä erottelee mekaanisesti melko karkearakenteisen kelluvan ja laskeutuvan kiintoaineen jätevesivirtaamasta (esimerkiksi vessapaperin, isommat roskat ja niin edelleen). Levynauhavälppässä on reikälevystä valmistettuja porrspaneeleja, jotka on kiinnitetty välppän reunoissa oleviin ketjuihin. Ketjut pyörittävät sähkömoottorin avulla välppää kuljettavia porrspaneeleita. Kiintoaine nousee ylös kanaalista ja putoaa välpekuljettimeen tai välpepesuriin. (Aprotech 2016.) Välppiä on olemassa myös muun mallisia, esimerkiksi porrsvälppä. Siinä liikkuvat portaat kuljettavat kiintoainetta pois jätevedestä. (Huber Technology 2016.) Välppäyksen jälkeen veteen syötetään ferrosulfaattia, joka on fosforin saostuskemikaali (kemiallinen puhdistus) (Kymen Vesi Oy 2016).

Välppäyksen jälkeen jätevesi johdetaan hiekanerotusaltaaseen. Siellä hiekka laskeutuu painovoimaisesti altaan pohjaan, josta se pumpataan pois. Hiekanerotuksessa tapahtuu myös rasvanerotus. Rasva nostetaan veteen johdetun hapen avulla pintaan ja poistetaan pintakaavintana. Samalla hiekanerotus toimii jäteveden esi-ilmastuksena. Hiekanerotuksessa eroteltu hiekka menee hiekkapesurille, joka erottelee hiekasta pois orgaanisen aineksen. (Kymen Vesi Oy 2012.)

Jätevesi syötetään hiekanerotusaltaalta esiselkeytysaltaisiin (kuva 2). Vesi virtaa hiltalleen altaaseen ja poistuu altaan ylivuotokourujen kautta. Virtauksen on oltava riittävästi pieni, jotta hienojakoisempikin kiintoaine laskeutuu pohjalle. Suuri osa kiinteästä aineksesta laskeutuu pohjalle ja se kootaan kaapimilla suppilonmuotoisiin lietetaskuihin. Ferrosulfaatti-kemikaali alkaa reagoida jäteveden fosforin kanssa ja saostaa liukoisessa muodossa olevaa fosforia kiinteään olomuotoon. Esiselkeytyksessä tapahtuu suurin osa fosforinpoistosta. Esiselkeytyksen lietetaskuihin kertynyt liete pumpataan varastoaltaan kautta lietteen kuivaukseen. (Kymen Vesi Oy 2012.)



KUVA 2. Esiselkeytysallas (Mipro markkinointi)

Lietteen tiivistys tapahtuu gravitaatiosakeutuksella ja sen jälkeen se pumpataan kuivauslingoille, jotka sijaitsevat erillisessä lietteenkuivatustornissa. Linkokuivattu liete kuljetetaan kuorma-autoilla loppusijoitukseen. (Kymen Vesi Oy 2012.) Liete toimitetaan hyötykäyttöön. Ulkopuolisen urakoitsijan toimesta liete mädätetään, jolloin saadaan tuotettua biokaasua. Tämän jälkeen lietteestä voi tehdä maanparannusainetta. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry 2016 b.)

3.1.2 Biologinen käsittely ja jälkiselkeytys

Esiselkeytyksestä vesi johdetaan ilmastuslinjoille (kuva 3). Ennen ilmastuslinjoille johtamista, jäteveden syötetään vielä fosforinsaostuskemikaali ferrosulfaattia ja alkalointikemikaalia. Ilmastuksessa ja aktiivilieteprosessissa tapahtuu biologista orgaanisen aineksen ja typen poistoa. (Kymen Vesi Oy 2012.) Biologisessa puhdistuksessa hyödynnetään jätevedessä olevia bakteereja. Kun ilmastuksessa veteen johdetaan ilmaa pieninä kuplina, bakteerit alkavat kasvaa ja lisääntyä. Muodostuu aktiivilietettä. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2015.) Aktiivilieteprosessissa jäteveden myös sekoitetaan mikrobeja sisältävää palautuslietettä prosessista. Aktiivilietteen bakteerimassa käyttää ravintonaan jäteveden epäpuhtauksia hajottaen niitä. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2016 a.)



KUVA 3. Ilmastusallas (Mipro markkinointi)

Typpi on merkityksellinen ravinne vesistöjen rehevöitymisen kannalta. Erityisesti Itämeren alueella typen määrä vedessä on osoittautunut rehevöitymisen minimiteki-jäksi. Sisävesissä rajoittava minimiravinne on useimmiten fosfori. Typenpoisto perustuu denitrifikaatio-nitrifikaatioprosessiin. Ilmastusaltan loppupäässä hapellisissa olosuhteissa tapahtuu ammoniumtypen nitrifikaatio. Nitrifioivat bakteerit muuttavat ammoniumtyppeä nitriitin kautta nitraatiksi. Nitrifikaatio: ammoniumtyppi → nitriitti → nitraatti. Nitraattipitoista puhdistettavaa jätevettä kierrätetään ilmastuksen alkupäähän denitrifikaatioon, jossa typpikaasua poistuu. Denitrifikaatio tapahtuu hapettomissa olosuhteissa. Tällöin typenpoistoon erikoistunut mikrobikanta käyttää jäteveden nitraattia hapen sijaan soluhengitykseensä. Denitrifikaatio: Nitraatti → nitriitti → typpi-kaasu. (Paronen 2012, 19–20, 25.)

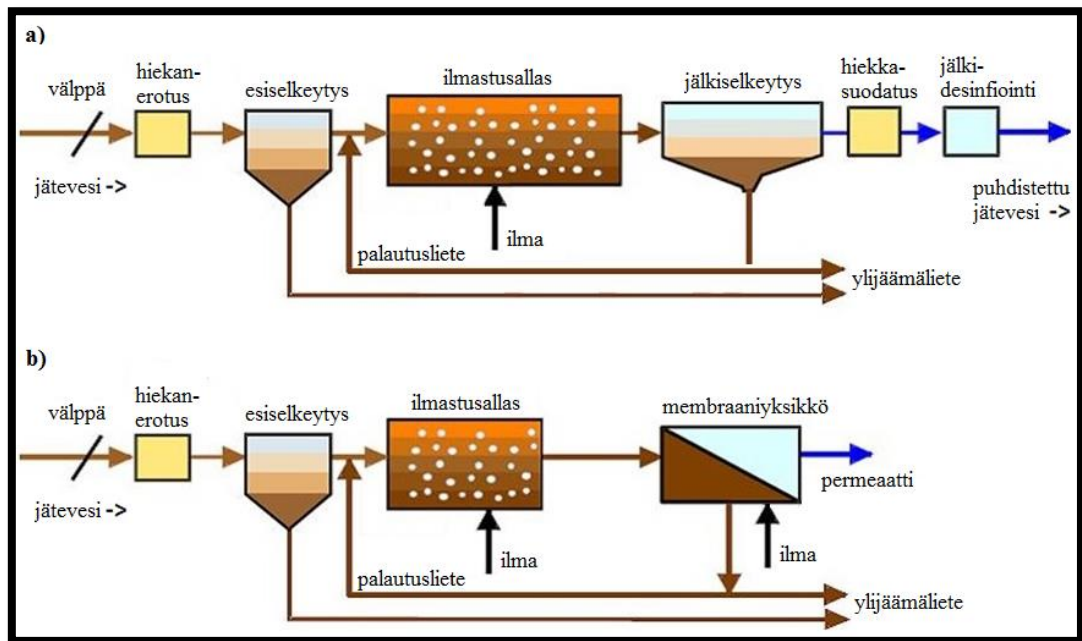
Ilmastuksen jälkeen jätevesi johdetaan suuriin jälkiselkeytysaltaisiin. Siellä vedessä oleva liete laskeutuu painovoimaisesti altaan pohjalle. Esiselkeytys- ja jälkiselkeytysaltaat ovat samantyyppisiä. Jälkiselkeytysallas on vain kooltaan suurempi kuin esiselkeytysallas, koska laskeutettava liete on prosessin lopussa hienojakoisempaa kuin alussa. Altaat ovat suuria, koska veden viipymäajan tulee olla pitkä, jotta hienojakoiset lietehiukkaset ehtisivät laskeutua altaan pohjalla olevaan suppilonmuotoiseen liete-taskuun. Näin ollen virtausnopeus on pieni. Laahaimet työntävät lietettä altaan pohjal-la poistosuppiloa kohti. Jälkiselkeytysaltaista johdetaan ylivuotokourujen kautta vesi

purkuputkilla mereen. Kerätty liete palautetaan ilmastusaltaisiin, tätä lietettä kutsutaankin palautuslietteeksi. Jälkiselkeyttimissä on myös pintalietteen poisto, poistettu pintaliete pumpataan hiekanerotuksen purkukanavaan. (Kymen Vesi Oy 2012.)

3.2 Membraaniteknologia

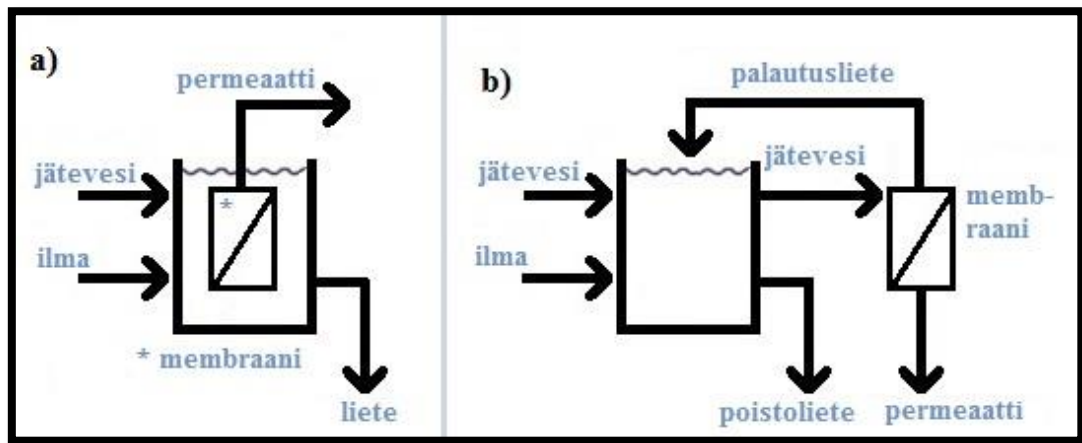
Membraaniteknologiaa on ollut jo vuosikymmeniä teollisuuden käytössä, mutta kunnallisen jäteveden puhdistuksessa vasta joitakin vuosia (Pinnekamp & Friedrich 2003, 62). MBR:ssä yhdistyvät aktiivilieteprosessi ja kalvosuodatus. Kalvossa eli membraanissa on pieniä huokosia, jotka poistavat kiintoainetta ja haitallisia aineita, kuten bakteereja, lääkkeitä ja ravinteita. MBR korvaa jätevedenpuhdistusprosessissa jälkiselkeytyksen ja hiekkasuodatuksen. Myöskään jälkidesinfointia ei MBR:n kanssa yleensä tarvita. Membraanibioreaktorissa ilmastusaltalla oleva vesi ajetaan puoliläpäisevän kalvon läpi. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014.) Jätevettä ajetaan kalvon läpi yleensä paine-eron avulla, joko ali- tai ylipaineella. Membraanin huokosia pienemmät partikkelit läpäisevät sen ja tätä vettä ja pienten partikkelien seosta kutsutaan permeaatiksi. Kalvon syöttöpuolelle jäävät huokosia isommat yhdisteet ja tätä kutsutaan retentaatiksi. (Nissinen 2014, 7.)

Kuvassa 4 on yksinkertaisella kaaviokuvalla havainnollistettu perinteisen aktiivilieteprosessin ja MBR-puhdistusprosessin toiminto-osat. Prosessit ovat alkupäästä samantyyppiset: jätevesi ensin välpätään, seuraavaksi johdetaan hiekanerotukseen ja esiselkeytykseen. MBR:ssä ja CAS:ssa on myös molemmissa ilmastusallas, jossa tapahtuu biologinen puhdistaminen aktiivilietteen avulla. Ilmastusaltan koko kuitenkin eroaa. Membraanibioreaktorissa tarvitaan pienempi ilmastusallas kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa, sillä biologinen puhdistus on MBR:ssä tehokkaampaa. Typen poisto tehostuu pitkän lieteiän ja korkean kiintoainepitoisuuden ansiosta. MBR:ssä tarvittava ilmastusaltan aktiivisuus on vain noin 30 % perinteisen aktiivilieteprosessin altan tilavuudesta. (Pinnekamp & Friedrich 2003, 24.)



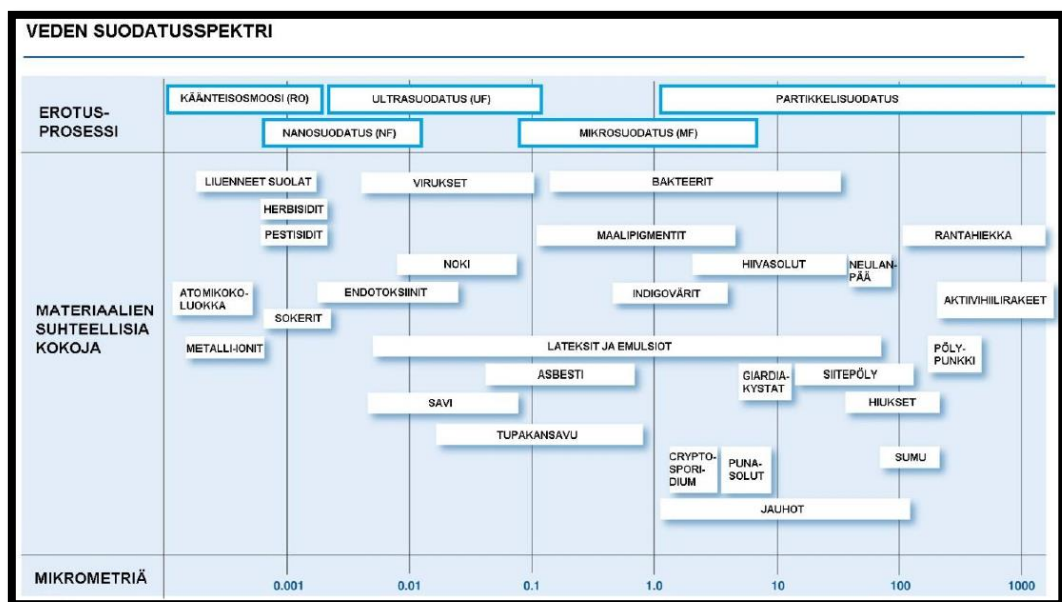
KUVA 4. Kaaviokuvat: a) Perinteinen aktiivilieteprosessi ja b) Membraanibio-reaktori, jossa on ulkoinen membraaniyksikkö (muokattu Wikimedia Commons 2016)

Membranipuhdistus voidaan toteuttaa ilmastusaltaaseen upotettavalla moduulilla tai ilmastusaltaan jälkeen olevalla ulkoisella yksiköllä (kuva 5). Moduuli voidaan upottaa olemassa olevan ilmastusaltaan loppupäähän, jolloin päästään pienimmillä mahdollisilla investointikustannuksilla ja järjestelmän rakenne on yksinkertainen. Upotettu yksikkö kuluttaa vähemmän energiaa kuin ulkoinen yksikkö, sillä bioreaktorin ja membraanin välissä ei ole putkistoa, joka aiheuttaisi painehäviöitä. Ulkoinen yksikkö yhdistetään putkistolla. Toisaalta, kun tehdään membranipuhdistukselle oma, ulkoinen yksikkönsä, laitteiden puhdistaminen onnistuu häiritsemättä aktiivilietealtaan biomassan toimintaa. (Nylander 2015, 35.) MBR:n jälkikäsitteilyksi on mahdollista lisätä nanosuodatus- tai käänteisosmoosikalvo puhdistusta tehostamaan (Pinnekamp & Friedrich 2003, 24).



KUVA 5. (a) Upotettu membraaniyksikkö ja (b) ulkoinen membraaniyksikkö

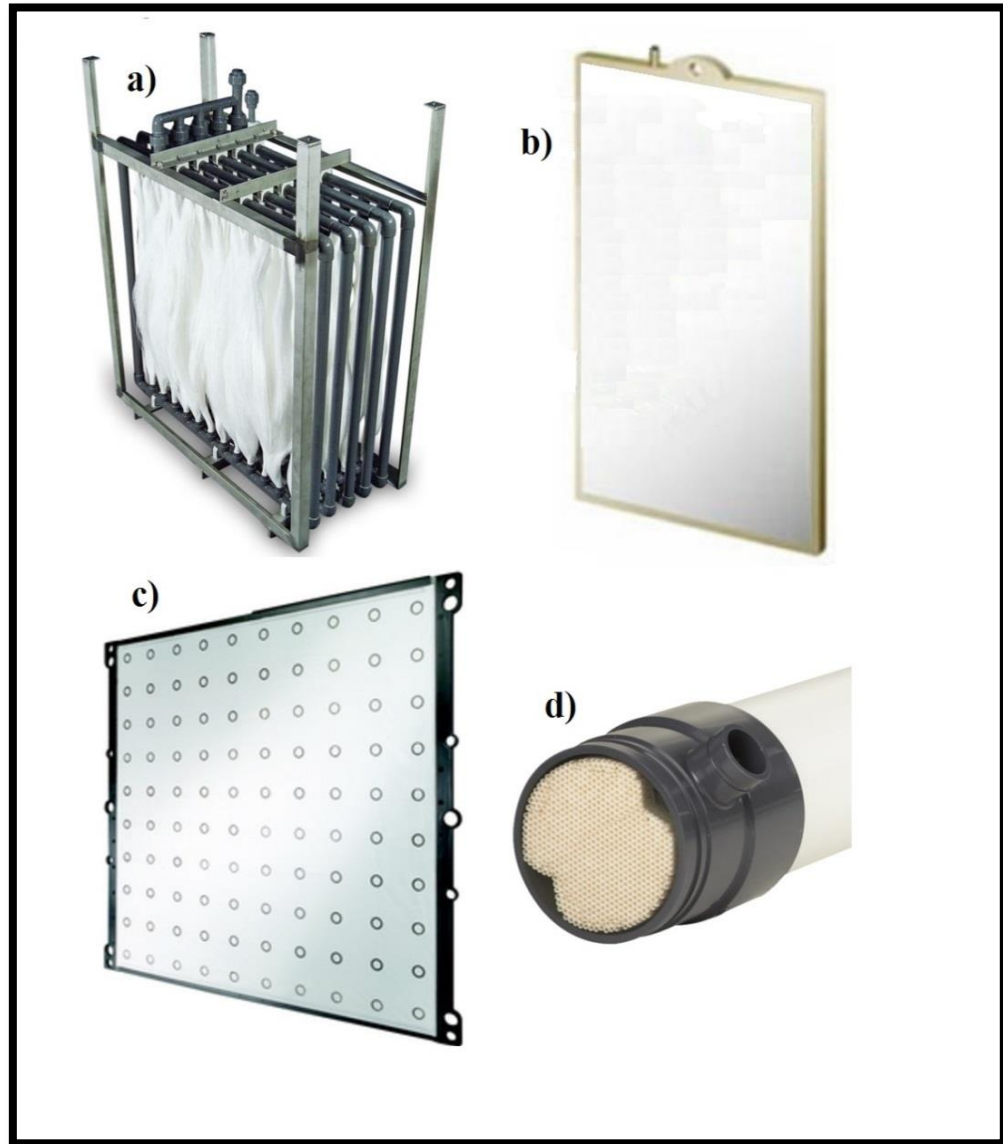
Membraanit voidaan jakaa karkeasti mikro-, ultra-, nano- ja käänteisosmoosikalvoihin niiden huokoskoon perusteella (Lignell ym. 2015, 10). Huokoskoko määrittelee, mitä partikkeleita kalvo suodattaa (kuva 6). Jäteveden puhdistuksessa kalvojen keskimääräinen huokoskoko on alle $0,1 \mu\text{m}$ Simon Juddin (2011) mukaan (Nissinen 2014, 7). Lignell ym. (2015, 10) mukaan yhdyskuntajätevesien puhdistuksessa käytetään tyypillisesti mikro- ja ultrasuodatuskalvoja, joiden huokoskoot $0,01\text{--}0,4 \mu\text{m}$. Kalvon erotustehokkuus riippuu huokoskoosta, kalvon huokoisuudesta ja materiaalista.



KUVA 6. Eri huokoskoon kalvojen erottelemat partikkelit (Lignell ym. 2015, 10)

Membraanit ovat usein taso- tai onttokuitumembraaneja (Nissinen 2014, 7). On myös olemassa näiden välimuoto, joka yhdistää taso- ja onttokuitumembraanin ominaisuuks-

sia. Esimerkkinä tällaisesta on Alfa Lavalin hollow sheet -membraani. Lisäksi on olemassa putkimaisia membraaneja. (Kuva 7.) Sovelluksessa, jossa suodatusmoduulit upotetaan suoraan aktiivilietteeseen, käytetään tasomaisia ja onttokuitumembraaneja. Mikäli suodatinyksikkö on erillään aktiivilietteestä, käytetään putkimaisia membraaneja. (Lignell ym. 2015, 8.)



KUVA 7. Membraanityyppejä: a) onttokuitumembraani, b) tasomembraani, c) hollow sheet membraani ja d) putkimainen membraani (Alfa Laval 2016; Pentair 2016; Xena membranes 2016)

Membraanin materiaali jäteveden puhdistuksessa on useimmiten polymeeria edullisuutensa vuoksi, mutta myös keraamisia ja metallisia membraaneja on olemassa (Nissinen 2014, 7). Polymeereistä nykyisin valmistusmateriaalina suositaan polyvinyyli-

deenifluoridia (PVDF) tai polyeteenin (PE) muunnelmia. PVDF soveltuu hyvin jäteveden puhdistukseen, sillä se ei tukkeudu kovin helposti. (Lignell ym. 2015, 8.)

3.3 MBR Suomessa ja maailmalla

Pohjoismaissa on perinteisesti jätevedenkäsittely ollut melko hyvällä tasolla, mutta membraaniteknologiaa ei ole vielä käytössä. Tässä asiassa Suomessa ja muualla Pohjoismaissa ollaan kehityksestä jäljessä, mutta viime vuosina kiinnostusta membraaniteknologiaan on herännyt. Maailmanlaajuisesti MBR-markkinoiden arvioidaan kasvavan vuosittain 10–15 % jätevedenkäsittelyjärjestelmien osalta ja juomaveden valmistuksessa 20 %. Vuoteen 2012 mennessä Euroopassa oli jo yli 800 MBR-prosessia asennettuna. (Krzeminski ym. 2012, 380). Membraanimateriaaleja ja moduuleja kehitellään ja prosessisuunnittelua parannetaan jatkuvasti. Kehitystyön tuloksena saadaan uusia MBR-sovelluksia. Membraaniteknologian kustannustehokkuus paranee jatkuvasti, sillä membraanien hinta on laskusuunnassa ja veden sekä jäteveden käsittelyn kustannukset ovat kasvusuunnassa. (Pinnekamp & Friedrich 2003.)

Suomessa ei ole toukokuussa 2016 vielä käytössä täyden mittakaavan kalvobioreaktorilaitosta, mutta pilottimittakaavan testilaitoksia on useammalla paikkakunnalla. Vihdin Vesi investoi vuonna 2014 pilottimittakaavan laitteistoon, sillä Nummelan jäteveden puhdistamolla on saneeraustarvetta. Pilotoinnin tavoitteena on typenpoiston tehostaminen. MBR-prosessissa on pelkkää aktiivilietepuhdistusta korkeampi lietepitoisuus ja pidempi lieteikä, mikä mahdollistaa typenpoiston tehostumisen jopa alhaisissa lämpötiloissa. (Envieno 2014.)

Mikkelissä on toiminut Kenkäveronniemessä jätevedenpuhdistamo vuodesta 1960 lähtien, ja sitä on uudistettu useita kertoja säädösten tiukennuttua (Mikkelin Vesilaitos). Nyt onkin suuri uudistus käsillä, sillä aivan uusi laitos on rakenteilla Mikkelin Metsä-Sairilan kaupunginosaan. Uusi puhdistamo korvaa entisen. Kenkäveronniemen puhdistamolla on testattu MBR-tekniikkaa pilottilaitosten muodossa vuodesta 2014 (Lignell 2016, 2) ja uudelle Metsä-Sairilaan tulevalle laitokselle on tehty täyden mittakaavan MBR-prosessin hankintailmoitus 13.1.2016 (Turkki 2016).

Parikkalan jätevedenpuhdistamolla toteutettiin 2014 puolen vuoden mittainen koejakso MBR-pilottilaitteistolla ja testattiin tätä teknologiaa uuden puhdistamon perusta-

mista varten. Tuloksena syntyi Parikkalan kunnalle uutta tietoa päätöksenteon avuksi helpottamaan uudelle puhdistamolle tulevan tekniikan valintaa. Parikkalan kunta teki vuoden 2014 lopulla päätöksen MBR-tekniikkaan perustuvan uuden jätevedenpuhdistamon rakentamisesta. Tavoitteena on, että uusi jäteveden puhdistamo on toiminnassa vuoden 2016 lopulla. (Parikkalan kunta ym. 2015, 5.)

Täyden mittakaavan MBR-puhdistamoja on muun muassa Saksassa, Unkarissa, Venäjällä, Isossa-Britanniassa, Italiassa, Ranskassa, Kiinassa, Yhdysvalloissa, Marokossa, Etelä-Afrikassa ja monessa muussa maassa. Ruotsiin Henriksdaliin on rakenteilla maailman suurin MBR-puhdistamo 2016–2019. (Judd & Judd Ltd 2015; Judd & Judd Ltd 2014.)

3.4 Jätevedenpuhdistuksen tunnusluvut

Tunnusluvuilla (KPI= Key Performance Indicators) mitataan esimerkiksi yrityksen toiminnan suorituskykyä tarkastelemalla tiettyjä tärkeitä menestystekijöitä. KPI:lla voidaan tarkkailla myös teollisuuden prosesseja tai vaikkapa jäteveden käsittelyä. Mittareiksi valitaan sellaiset tekijät, jotka ovat kaikkein kriittisimpiä ja tärkeimpiä tarkasteltavan toiminnan kannalta. (Aho 2012.)

Tunnuslukujen määrittelyssä kannattaa ottaa muutama seikka huomioon. Ensinnäkin kannattaa keskittyä mittamaan muutamaa tärkeää asiaa. Jos mitataan liian montaa asiaa, jää epäselväksi, mitkä olivat oikeasti tärkeitä. KPI-mittareilla tulee olla yhteys strategiaan. Niiden tulee kertoa strategisten tavoitteiden saavuttamisen kannalta tärkeitä kohteista. (Siljamäki 2012.)

Mittausdatan laatu on varmistettava, jotta mittausjärjestelmän tuottama tieto on ajantasaista ja luotettavaa. Kun KPI-mittarit on määritelty, niihin liittyvät tavoitteet annetaan tietyn henkilön vastuulle. On tärkeää, että kyseisellä henkilöllä on myös tarpeeksi valtaa tarvittaessa tehdä tarpeellisia muutoksia, jotta tavoitteet saavutetaan. (Siljamäki 2012.)

Vesilaitosyhdistys on julkaissut vuonna 2014 dokumentin: ”Vesihuoltolaitosten tunnuslukujärjestelmän raportti 2013”. Siinä on esitelty Suomessa vesihuoltolaitoksilla yleisesti käytössä olevat tunnusluvut ja raportoitu niihin liittyvää tietoa ja tilastoja.

Jätevesipuolen tunnuslukuja raportin mukaan ovat: OCP-indeksi, lupaindeksi, ohi-tusindeksi, jäteveden puhdistuksen energiankulutus ja viemäriverkoston tuottavuus.

OCP-indeksi (Oxygen Consumption Potential) kuvaa ohitettujen eli puhdistettujen ja puhdistamatta vesistöön johdettujen jätevesien hapenkulutuspotentiaalia vesistössä. OCP -indeksi ei kuvaa jätevesien vesistövaikutusta, koska se ei huomioi eri vesihuoltolaitosten toisistaan poikkeavia lupamääräyksiä tai vastaanottavan vesistön vaatimuksia. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 18.)

Lupaindeksi kuvaa jätevedenpuhdistuksen ympäristöluvan raja-arvojen täyttymistä (Suomen Vesi-huoltolaitos ry 2013, 20). Tämä tunnusluku kertoo laitoksen toiminnan tasosta ja ympäristötehokkuudesta. Lupaindeksi ilmaisee lupa-arvojen saavuttamisen vuosi-, puolivuosi- tai neljännesvuosikeskiarvona määriteltynä. Täyttyneiden lupaehtojen määrää verrataan kaikkien lupaehtojen määrään. (Pöyry Finland Oy 2011, 4, liite 2.) Tunnusluku lasketaan jakamalla jätevedenpuhdistamon saavutetut raja-arvot ympäristöluvan raja-arvojen lukumäärällä. Indeksien lukuarvon tulisi olla 100 % laitokselta otetuista näytteistä. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 75). Jos lupaindeksi on alle 100 %, jokin puhdistamon raja-arvoista ei ole täyttynyt. Raja-arvoja on puhdistamoilla lähtevän jäteveden fosfori- typpi-, ammoniumtyppi-, kiintoaine-, BOD₇_{ATU} ja COD_{Cr}-pitoisuuksille ja reduktioille.

Lupaindeksi-tunnusluku voi olla kaikkien jätevedenpuhdistamojen summa tai kertoa yksittäisen puhdistamon tilanteen. Pitää huomioida, että summa antaa suuren painoarvon pienelle puhdistamolle. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 20.) Lupaindeksin ongelmana voivat olla pienet näytemäärät pienillä jätevedenpuhdistamoilla, jolloin yhdenkin lupaehdon täyttymättömyys johtaa suuriin muutoksiin tunnusluvussa. Jätevedenpuhdistamoille ympäristöluvassa määritellyt valvottavien aineiden raja-arvot ja puhdistustehovaatimukset ovat laitoskohtaisia ja ne on määritelty muun muassa purkuvesistön kuormituskyvyn mukaan. (Pöyry Finland Oy 2011, 4.)

Ohitusindeksi kuvaa jätevesien johtamista poikkeustilanteissa puhdistuksen ohi suoraan vesistöön, viemäriverkoston kuntoa ja sekaviemärien osuutta viemäriverkostosta. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 22). Se että jätevesi ohittaa puhdistusjärjestelmän tavalla tai toisella, aiheuttaa ympäristön kuormittumista. Kaikki jätevesi tulisi käsitellä, joten tämän arvon pitäisi olla nolla (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 22).

Jätevedenpuhdistuksen energiankulutus [kWh/m^3] -tunnusluku liittyy sekä energia-että ympäristötehokkuuteen. Tunnusluvun yksikkönä on yksi kilowattitunti per puhdistamolle tuleva jätevesikuutio Koska energiantuotanto kuluttaa luonnonvaroja ja resursseja, energiankulutuksella on ympäristövaikutuksia. Jäteveden puhdistuslaitosten koko, erot puhdistusvaatimuksissa ja laitoksille tulevan kuormituksen määrässä vaikuttavat laitosten energiantarpeeseen. Suuremmat laitokset saavat yleensä puhdistettua jäteveden suhteessa vähemmällä energialla kuin pienemmät laitokset. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 60.)

Jäteveden puhdistuksen energiatehokkuuteen liittyy myös tunnusluku: viemäroinnin energiankulutus [kWh/m^3]. Se kertoo energiankulutuksen, joka aiheutuu jäteveden johtamisesta viemäriverkostossa. Jäteveden johtaminen suoritetaan ensisijaisesti painovoimaisesti ja toissijaisesti pumppaamalla veden käyttäjiltä puhdistamolle. Yksikkönä on kilowattituntia per vastaanotettu jätevesikuutio. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 60.) Viemäriverkoston tuottavuus -tunnusluku kertoo tuottavuudesta ja taloudellisuudesta. Tehokas laitos pystyy minimoimaan kustannuksensa. Kyseinen tunnusluku vesihuollossa tarkoittaa verkostopituuteen suhteutettua myyntiä [m^3/m]. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 66.)

4 MENETELMÄT

Opinnäytetyö on suurelta osin kirjallisuustutkimusta. Kirjallisuustutkimuksen avulla on löydettävissä muun muassa asiaan liittyvää taustatietoa ja esimerkkejä erilaisista ratkaisuista (Routio 2007). Opinnäytetyössä on keskitytty membraanibioreaktorin suorituskykyyn; energia- ja ympäristötehokkuuden tunnuslukuihin ja aihetta avaaviin sivuteemoihin sekä Miprolle ja Smart Effluents -hankkeelle hyödyllisen tiedon tuottamiseen.

MBR-tekniikan tunnuslukuselvityksessä osana tutkimusaineistoa olivat aiheesta tehdyt täyden skaalan tutkimukset Elsevier-tietokannassa, josta tutkimuksia voi etsiä muun muassa Science Directin Freedom Collectionin ja Research-gate:n kautta. Tämän lisäksi on hyödynnetty erinäisissä väitöskirjoissa, diplomitöissä ja opinnäytetöissä sekä jäteveden puhdistamoiden sivuilla ja vesiaiheisissa julkaisuissa aiheesta ollutta

tietoa. MBR-tunnuslukujen selvityksen aikana on tehty vertailua MBR-prosessin ja perinteisen prosessin välillä. Luvussa 5 ja liitteissä 2–5 on esitelty opinnäytetyön tulokset, joiden perusteella olen listannut lukuihin 5.4.1.-5.4.4. ehdotukseni membraanibioreaktorin tunnusluvuista.

Perinteisen aktiivilieteprosessin tunnuslukujen selvityksen aineistona pääosin olivat ympäristöhallinnon verkkopalvelusta saatavilla olleet vesihuoltotilastot, joiden dataa analysoitiin. Raporteista poimittiin energiankulutuslukemia, puhdistustuloksia ja käsitellyt vesimäärät ja ohitusvesien määrät. Näiden tietojen perusteella laskettiin tunnusluvut: jätevedenpuhdistuksen energiankulutus ja ohitusindeksi. Puhdistustuloksia tarkasteltiin vertaamalla niitä referenssiarvoon, joka kuvasi likimain tavoiteltavaa puhdistustulosta. Perinteisen aktiivilieteprosessin tunnuslukutarkastelussa on myös hyödynnetty Suomen vesihuoltolaitos VVY ry:n raportteja. Perinteiseen aktiivilieteprosessiin liittyvien selvitysten tarkemmat tulokset on taulukoitu liitteissä 2 ja 3. Selvityksen tuloksia on käsitelty sanallisesti luvussa 5.2.3.

5 MEMBRAANIBIOREAKTORIN SUORITUSKYKY JA VERTAILU PERINTEISEEN AKTIIVILIETEPROSESSIIN

5.1 Energiankulutus

Lukuisissa tutkimuksissa on vertailtu MBR-puhdistusprosessin energiankulutusta CAS:iin. Aina vertailun tuloksena on ollut, että MBR kuluttaa enemmän energiaa kuin CAS, jopa moninkertaisesti. Tällainen suora vertailu käytössä olevien MBR- ja CAS-prosessien välillä ei ole kuitenkaan tasavertainen, koska tulisi vertailla puhdistustulokseltaan samanlaisia prosesseja keskenään. (Krzeminski ym. 2012, 381.)

Jotta perinteinen aktiivilieteprosessi ylittäisi puhdistustuloksiltaan samaan kuin membraanibioreaktori, siihen tulee liittää jälkikäsittelyjä. CAS, johon on yhdistetty ultrasuodatus ja UV-desinfiointi tuottaa suurin piirtein yhtä laadukasta effluenttia kuin MBR. (Fenu ym. 2010, 121.) MBR-prosessin energiankulutus on melko samalla tasolla kuin CAS, johon on yhdistetty tertiäärinen puhdistus. Tällä tavalla vertailtaessa MBR:n energiankulutus on 10–30 % korkeampi kuin CASin. Korkeat ilmastusmäärät

membraanin ilmapuhdistuksen vuoksi ovat haasteita energiansäästön ja MBR:n optimoinnin kannalta. (Krzeminski ym. 2012, 380, 381.)

5.1.1 Energiankulutus ja puhdistustulos

Monessa paikassa CAS ei yksinään riitä enää takaamaan riittävää, ympäristöluvassa vaadittua puhdistustulosta. Parempi puhdistustulos vaatii ainakin tällä hetkellä useimmiten enemmän energiaa, jos vertaa perinteistä aktiivilieteprosessia MBR:ään. Tämä energiapanostus on kuitenkin järkevää, sillä ympäristötehokkuus paranee. Tosin nykytekniikallakin on mahdollista saavuttaa sama energiankulutuksen taso MBR:ssä kuin joillain perinteisen aktiivilieteprosessin laitoksilla. (Krzeminski ym. 2012, 381.)

MBR:ssä on useita etuja verrattuna perinteiseen aktiivilieteprosessiin. Membraanisuoitus korvaa jälkiselkeytyksen, hiekkasuoituksen ja UV-desinfiointin. Se on myös kompaktia tekniikkaa. Koska membraanibioreaktorissa biomassan pitoisuus on suurempi kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa, MBR:ssä tarvitaan pienempi aktiivilietevalas biologisen puhdistuksen toimintaan kuin CAS:issa. (Pinnekamp & Friedrich 2003, 24, 66–67.) MBR:ssä typen poisto on tehokkaampaa kuin CAS:issa korkeamman lieteiän ja MBR:lle ominaisen mikrobiston ansiosta. Pidempi viipymä edesauttaa MBR:lle ominaisen mikrobikannan syntyä. Nitrifioivat bakteerit kasvavat hitaasti, joten pitkä lieteikä on eduksi nitrifikaatiolle. (Nissinen 2014, 27.)

TAULUKKO 1. Vertailua MBR- ja CAS-prosessien päästöistä (mukailtu Pinnekamp & Friedrich 2003, 67)

Parametri (mitattu puhdistetusta jätevedestä)	Perinteinen aktiivilieteprosessi	Membraanibioreaktori
Kiintoaine [mg/l]	10–15	0
COD [mg/l]	40–50	< 30
Kokonaisfosfori [mg/l]	0,8–1,0	< 0,3
Kuiva-ainepitoisuus aktiivilietevalaassa [g/l]	< 5	< 20
Energiankulutus [kWh/m ³]	0,2–0,4	0,7–1,5
Mikrobiologinen laatu	hygieenisesti arveluttava	kylpyvesilaatu

Taulukkoon 1 liittyvässä vertailussa MBR:n energiankulutus oli korkeampi kuin CAS:in, mutta puhdistustulokset huomattavasti paremmat. MBR:ssä fosforinpoisto

tehostuu ja effluentti on mikrobiologisesti laadukkaampaa kuin CAS:issa. Perinteisen aktiivilieteprosessin lähtevän veden kokonaisfosforipitoisuus on 0,8–1,0 mg/l, kun taas membraanibioreaktorin vastaava arvo on 0,3 mg/l. MBR erottelee täydellisesti tietyn kokoiset partikkelit ja bakteerit, ja huokoskoosta riippuen jopa virukset. MBR puhdistaa CAS:ia paremmin orgaanisia jäänösaineita pidemmän lieteiän ja MBR:lle ominaisten mikro-organismien ansiosta. Kiintoaine poistuu MBR:ssä jopa täysin kun taas CAS:issa puhdistetun jäteveden pitoisuus on 10–15 mg/l. (Pinnekamp & Friedrich 2003, 24, 66–67.)

TAULUKKO 2. Alankomaalaisten täyden skaalan MBR-laitosten puhdistustuloksia ja energiankulutuslukumia (mukailtu Krzeminski ym. 2012, 385)

Laitos	Energiankulutus (2010) kWh/m ³	Puhdistustehokkuus 2009 [%]			
		COD	BOD	Kokonaisfosfori	Kokonaistyyppi
Heenvliet (FS)	1,05	93	99	73	97
Varsseveld (HF)	0,84	96	99,7	94	96

Taulukossa 2 on kahden Alankomaissa sijaitsevan MBR-laitoksen energiankulutuslukumat ja puhdistustuloksia. Vaikka Varsseveldissä MBR-prosessi vei vähemmän energiaa, puhdistustulokset olivat keskimäärin paremmat kuin Heenvlietissä. Parempi puhdistustulos ei aina vaadi korkeampaa energiankulutusta. Energiankulutustaso on hyvinkin riippuvainen teknologian kehittyneisyydestä, puhdistamon suunnittelusta ja operoinnista ja niin edelleen, ei niinkään aina suoraan korreloi puhdistustehokkuuden kanssa. Tuloksia tarkastellessa tulee ottaa huomioon, että energiankulutus ja puhdistustulos vaihtelevat hieman esimerkiksi olosuhteiden mukaan. Lisäksi energiankulutuslukumat olivat vuodelta 2010 ja puhdistustulokset vuodelta 2009, joten nämä yksittäiset tulokset eivät kerro absoluuttista totuutta laitosten energiankulutuksen vertaustamisesta, mutta ovat suuntaa antavia.

Mizutan ja Shimadan (2010) mukaan japanilaisten CAS-laitosten energiankulutus oli 0,3–1,9 kWh/m³. Lukemaa 0,3 kWh/m³ membraaniteknologialla ei ole mahdollista vielä saavuttaa, mutta useimmilla hyvin toimivilla MBR-laitoksilla energiankulutus on alle 1,9 kWh/m³ (energiankulutus tuotettua permeaattiakuutiota kohden). Gnrissin ja Dittrichin (2000) mukaan CAS:in energiankulutus on 0,4–0,6 kWh/m³, Juddin (2006) mukaan keskimäärin 0,5 kWh/m³. Teollisuussovelluksissa energiaa kuluu 0,9–2,9 kWh/m³ Cummingsin ja Frenkelin (2008) mukaan. (Krzeminski ym. 2012, 381.)

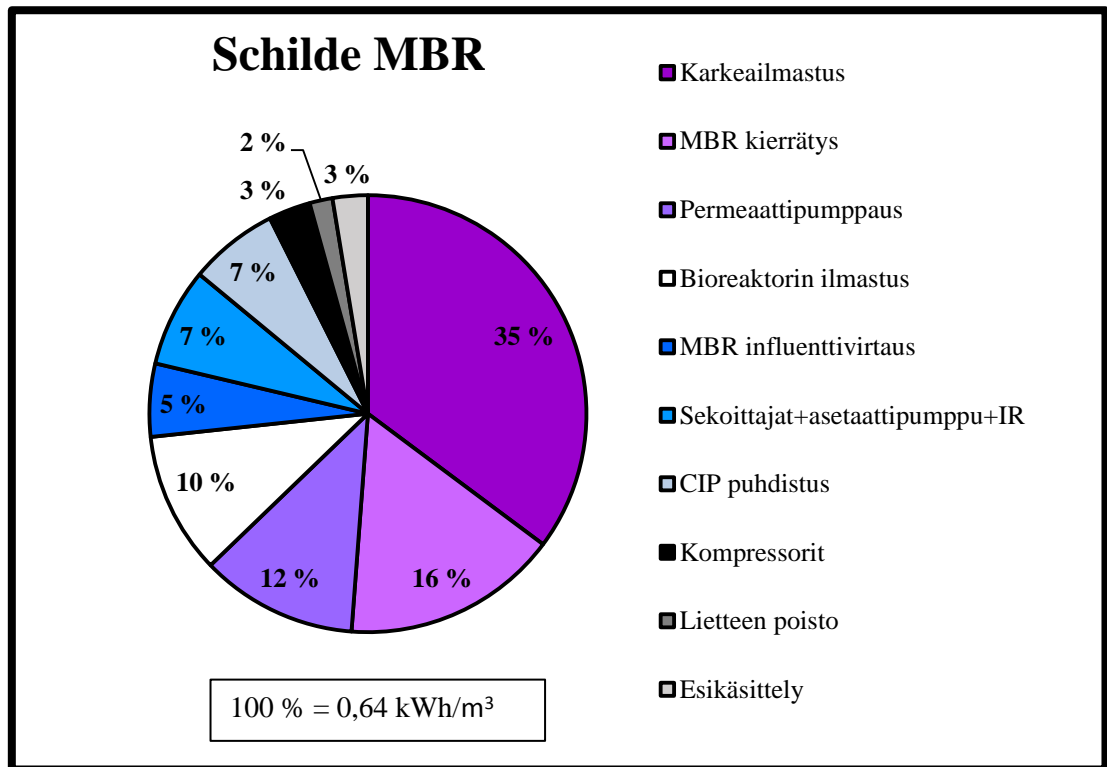
Krzeminski ym. (2012, 380, 390) tekivät kirjallisuuskatsauksen täyden skaalan MBR-puhdistamoiden energiankulutuksesta ja siihen liittyvistä tekijöistä. Lisäksi he tutkivat tapaustutkimuksen keinoin neljän alankomaalaisen MBR-laitoksen energiankulutukseen liittyviä asioita. MBR-prosessin ominaisenergiankulutus on riippuvainen monista asioista, kuten prosessin suunnittelusta ja sijoittelusta (layout), puhdistettavan jäteveden virtaamamääristä, membraanin käyttöasteesta ja prosessin ohjauksen strategiasta.

Optimaalisissa olosuhteissa eli suunnitellulla virtaamalla [m^3/d] kuivan sään olosuhteissa MBR:n ominaissähkökulutus on $0,5\text{--}0,7 \text{ kWh}/\text{m}^3$. Ilmastuksen energiankulutus on usein yli 50 % MBR:n energiankulutuksesta, ja membraanin ilmastuksen eli karkeailmastuksella puhdistuksen osuus tästä on noin 35 %. Karkeailmapuhdistuksen energiankulutus on tärkeä kohde energiansäästötoimille. (Krzeminski ym. 2012, 390.)

Krzeminskin ym. (2012) tutkimat kunnalliset MBR-puhdistamot ovat yleisesti ottaen hyvin operoituja, mutta toimivat usein ali-optimaalisesti, kuluttaen energiaa $0,8\text{--}1,1 \text{ kWh}/\text{m}^3$. Laitoksilla on energiansäästöpotentiaalia. Tasomaisten membraanien (FS= Flat sheet) ominaisenergiankulutus on 33–37 % korkeampi kuin onttokuitumembraaneilla (HF= Hollow fibre), mutta MBR-puhdistusprosessin kokonaisenergiankulutuksessa eroa näillä kahdella erilaisella membraanilla on vain noin $0,2 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

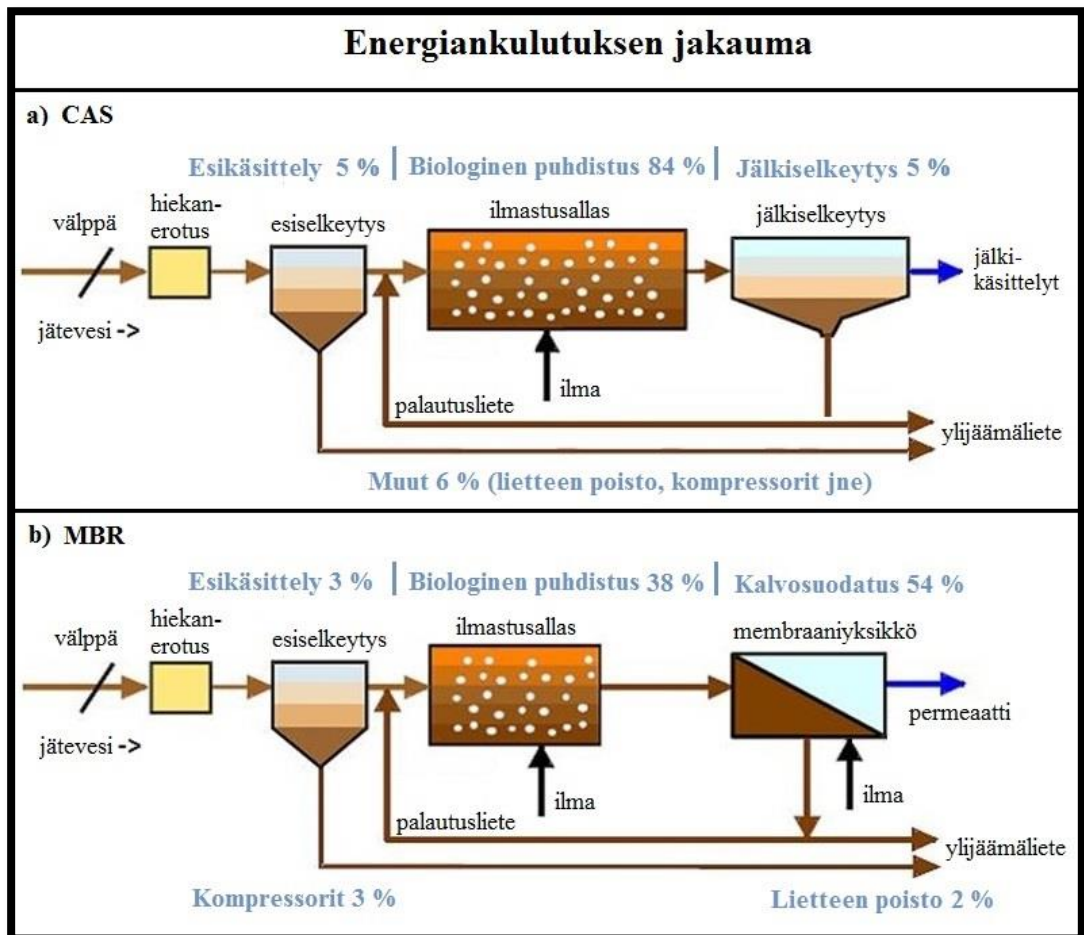
5.1.2 Energiankulutuksen jakauma

Energiankulutuksen jakautuminen on hieman erilaista MBR- ja CAS-prosesseissa (Fenu ym. 2010). Jakaumassa on myös eroja samaa puhdistusprosessia, mutta eri teknologiaa hyödyntävien eri laitosten välillä. Kuitenkin yhteisenä nimittäjänä näkyy olevan, että ilmastus vie useimmiten eniten resursseja. MBR-sivuvirtasovelluksissa (ks. kuva 10 Terneuzen) energiaa kuluu paljon pumppaamiseen.



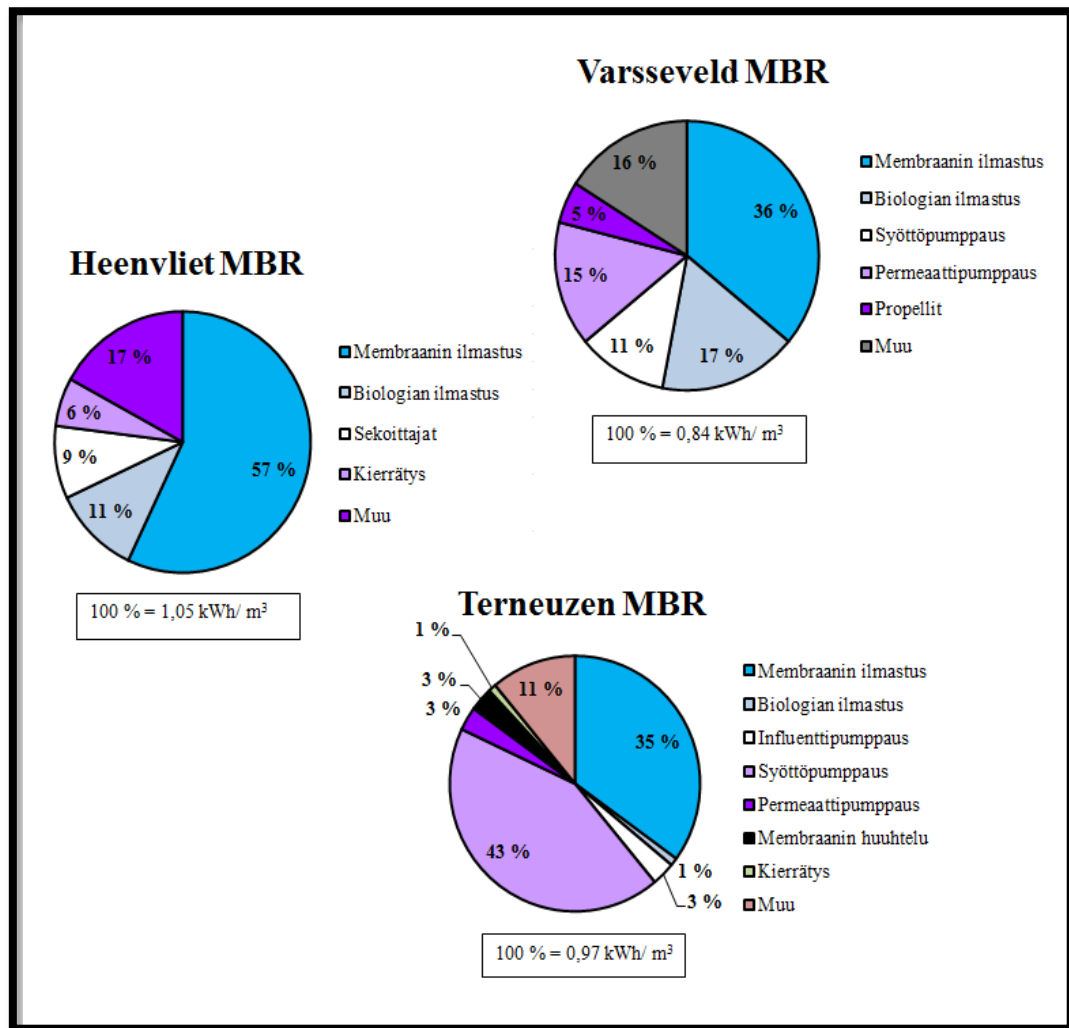
KUVA 8. Schilden MBR:n energiankulutusjakauma (mukailtu Fenu ym. 2010, 124)

Belgiassa tehdyssä tutkimuksessa CAS-prosessin energiankulutuksen jakauma on seuraavanlainen: ilmastus vie 35–50 % kokonaisenergiasta, influenttivirtaus 15–20 %, lietteen kierrätys 10–15 % ja sekoittajat ja propellit 5–15 %. Belgiassa Schildessä sijaitsevan täyden skaalan MBR-prosessin vastaavat lukemat ovat: ilmastus 47 %, influenttivirtaus 5 %, lietteen kierrätys 16 %, sekoittajat ynnä muut 7 % (kuva 8). Schilden MBR-prosessin energiankulutus per tuotettu permeaattikuutio on yhteensä 0,64 kWh/m³. Edellä olevien tietojen perusteella kuvassa 9 on havainnollistettu likimain CAS- ja MBR-puhdistuksen energiankulutuksen jakauma prosessin osien kesken. (Fenu ym. 2010, 123–124.)



KUVA 9. CAS ja MBR energiankulutuksen jakauma prosessien osien kesken (Mukailtu Wikimedia Commons 2016; Fenu ym. 2010, 123–124)

Kuvan 9 MBR-prosessissa on ulkoinen membraaniyksikkö, ja puhdistusprosessin suurin energiankuluttaja on kalvosuodatus. Ulkoisessa membraaniyksikössä jätevesi täytyy pumpata suodatusyksikköön ja permeaatti pumpata membraanin läpi. Lisäksi membraanin puhdistukseen pumpataan ilmaa ja lietettä kierrätetään takaisin ilmastusaltaaseen. Upotetussa membraaniyksikössä energiankulutuksen osuus kokonaisenergiankulutuksesta olisi alhaisempi kuin ulkoisessa yksikössä, sillä pumppausta ei tarvita niin paljoa. Upotetussa yksikössä energiaa kuluu eniten ilmastukseen. CAS:ssa eniten energiaa kuluu biologiseen puhdistukseen, eli aktiivilietepuhdistukseen. Kiintoaineen erotus gravitaation avulla (selkeytyks) kuluttaa vähemmän energiaa kuin kalvosuodatus. Tämän vuoksi perinteisen aktiivilieteprosessin energiankulutuksesta vain pieni osa kuluu jälkiselkeytykseen.



KUVA 10. Kolmen alankomaalaisen täyden skaalan MBR-prosessin energiankulutus (mukailtu Krzeminski ym. 2012, 387)

Kuvassa 10 on kolmen alankomaalaisen täyden skaalan MBR-prosessin energiankultusjakaumat. Heenvlietissä ja Varsseveldissä membraanin ilmastus vie suurimman osan energiasta, Terneuzenissa syöttöpumppaus. Yhteensä Heenvlietissä ilmastus (membraanin karkeailmastus + aktiivilieteprosessin ilmastus) kuluttaa noin 70 % käytetystä energiasta, Varsseveldissä 53 % ja Terneuzenissa 36 %. (Krzeminski ym. 2012, 387–388.)

Kuvan 10 kolmesta laitoksesta MBR kuluttaa vähiten energiaa Varsseveldissä. Varsseveldissä on pelkkä MBR, upotettu Zenon-GE onttokuitumembraanimoduuli. Kahdessa muussa laitoksessa on CAS ja MBR. Heenvlietissä on aktiivilieteprosessiin upotettu Toray tasomembraani, Terneuzenissa on ulkoinen Norit membraanipuhdistus. Ulkoinen yksikkö selittää suuren pumppaukseen kuluvan energiamäärän. (Krzeminski ym. 2012, 387–388.)

Varsseveldissä käytössä olevassa prosessiin upotettavassa Zenon-GE moduulissa on ”eko-ilmastus”, joka perustuu 10/30 intervalleihin (vuoronperään 10 sekuntia pois päältä ja 30 sekuntia ilmastusta). Potentiaalinen säästö ilmastuskuluissa tällä systeemillä tarkoittaisi sitä, että teoreettisesti MBR kuluttaisi energiaa $0,7 \text{ kWh/m}^3$. Varsseveldissä toteutunut energiankulutus on hieman suurempi, $0,84 \text{ kWh/m}^3$. Ero selittynee sillä, että jäteveden puhdistusprosessi ei käytännössä toimi aina yhtä optimaalisesti kuin teoriassa. Ja itse asiassa pieni yli-ilmastus Juddin (2011) mukaan voi olla hyödyksi prosessin ohjauksen kannalta. Se vähentää manuaalisen väliintulon tarvetta, sillä membraanien likaantuminen ja tukkeutuminen vähenevät. (Krzeminski ym 2012, 387.)

5.2 Lupaehtojen täytyminen

5.2.1 Lupaehdot

Ympäristöluvassa määritetään puhdistamokohtaisesti puhdistuksen vähimmäisvaatimukset fosforille, $\text{BOD}_{7\text{ATU}}$:lle, kiintoainepitoisuudelle, COD_{Cr} -arvolle, typenpoistolle ja nykyään mahdollisesti myös fekaalisten koliformien ja enterokokkien poistumalle. Ympäristöluvassa on määritelty raja-arvot puhdistetun jäteveden sisältämille aineille ja vähimmäispuhdistusteho, eli kuinka monta prosenttia esimerkiksi fosforin tulee vähentyä puhdistusprosessissa.

Esimerkiksi Mikkeliissä on viisi jätevedenpuhdistamo: Kenkäveronniemessä, Hauki-vuorella, Anttolassa, Suomenniemessä ja Ristiinassa. Lisäksi Mikkelin Metsä-Sairilaan rakenteilla olevalle jäteveden puhdistamolle on myönnetty ympäristölupa, joten myös sen lupa-arvot on otettu huomioon alla olevassa listauksessa. Mikkelin jätevedenpuhdistamoiden lupa-arvojen vaihteluväli on seuraavanlainen:

- Fosforipitoisuus 0,3–1 mg/l
- Fosfori vähimmäispuhdistusteho 90–96 %
- $\text{BOD}_{7\text{ATU}}$ -pitoisuus 10–15 mg/l
- $\text{BOD}_{7\text{ATU}}$ vähimmäispuhdistusteho 90–96 %
- Kiintoainepitoisuus 15–35 mg/l

- Kiintoaine vähimmäispuhdistusteho 90 %
- COD_{Cr}-arvo 60–125 mg/l
- COD_{Cr} vähimmäispuhdistusteho 75–85 %
- Kokonaistyyppi vähimmäispuhdistusteho 70 %
- Ammoniumtyyppipitoisuus 4 mg/l
- Ammoniumtyyppi vähimmäispuhdistusteho 90 %
- Fekaalisten koliformien ja enterokokkien poistuma 90 %

(Päätös ESA-2004-Y-111-121; Päätös ESA-2005_Y-107-121; Päätös KAS-2005-Y-461-121; Päätös 39/2011/1; Päätös 87/2011/1; Päätös 1/2012/1)

TAULUKKO 3. Mikkelin Metsä-Sairilaan rakennettavan puhdistamon ympäristöluvan raja-arvot ja arviot MBR-prosessin puhdistustuloksesta (Mikkelin kaupunginvaltuusto 2015)

	Ympäristölupa-määräykset		MBR-prosessi		
	mg/l	%	mg/l	%	kg/d
BOD ₇	10	96	2,5	99	41
kok.P	0,30	96	0,16	98	2,8
kok.N		70	12,1	76	199
NH ₄ -N	4	90	0,40	99	6,0
Kiintoaine	15	90	1,4	99,5	24

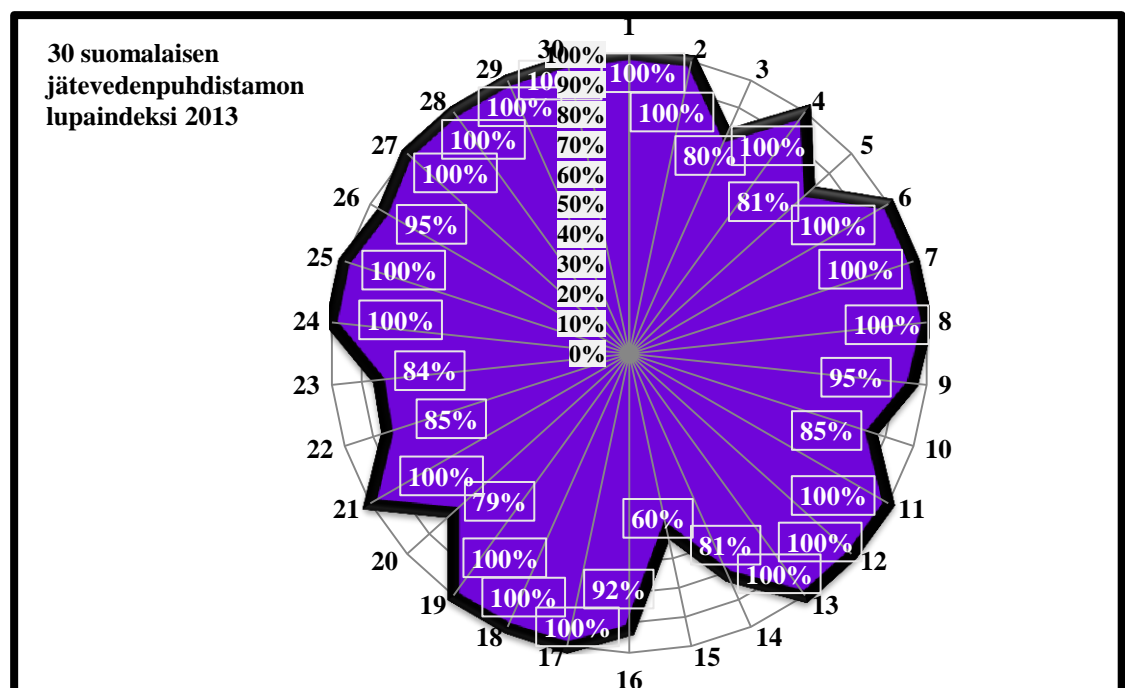
Taulukossa 3 on esitetty Mikkelin Metsä-Sairilaan rakennettavan uuden MBR-puhdistamon ympäristöluvassa määrättyt raja-arvot ja arviot MBR-prosessin puhdistustuloksesta. Taulukosta voi nähdä, että MBR:llä on mahdollista saavuttaa jopa luparvoja parempi puhdistustulos. (Mikkelin kaupunginvaltuusto 2015.) Tosin tällaiset teoreettiset, optimaaliset puhdistustulosarviot saattavat erota käytännössä toteutuvista arvoista. Membraanien puhdistustulosarviot perustuvat kuitenkin tuotekehityksessä ja testauksessa saatuihin arvoihin, ja niitä voidaan pitää suuntaa antavina.

5.2.2 Lupaindeksi suomalaisilla puhdistamoilla

Suomen vesilaitosyhdistys ry:n (VVY) vuonna 2014 julkaisemassa tunnuslukuraportissa on ilmaistu 30 suomalaisen vesihuoltolaitoksen lupaindeksin arvot. Lupaindeksin arvon tulisi olla 100 %, koska jäteveden puhdistuksen tulisi tapahtua ympäristöluvassa

määrättyjen raja-arvojen puitteissa. Kaikilla vesihuoltolaitoksilla lupaindeksin arvo ei kuitenkaan ole 100 %. Vuosina 2011–2013 keskiarvo on jäänyt alle 95 %. (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 20.) Tehostamisen varaa siis olisi, jotta kaikilla puhdistamoilla tavoitettaisiin määräystenmukainen puhdistustulos.

Kuvassa 11 on havainnollistettu 30 suomalaisen vesihuoltolaitoksen lupaindeksin arvot vuodelta 2013. Ihanteellisessa tilanteessa ympyrä olisi täydellisen pyöreä, mikä tarkoittaisi sitä, että jokainen tarkasteltavasta 30 vesihuoltolaitoksen puhdistamosta täyttäisi lupaehtot täysin ja lupaindeksin arvo olisi täten 100 %. Mutta kuten kuvasta 11 voi huomata, ulkokehällä on ”sahalaitaa”.



KUVA 11. 30 suomalaisen vesihuoltolaitoksen jäteveden puhdistuksen lupaindeksi vuodelta 2013

Koska lupaindeksin arvo alittaa 100 % vaikka vain yksi lupaehtoista jää toteutumatta, pienin reduktioprosentti ja suurin pitoisuus eri aineille ovat merkitseviä tietoja. Jos vesihuoltolaitoksilla on useita puhdistamoita, ne kaikki vaikuttavat lupaindeksiin. Vesihuoltolaitoskohtainen tunnusluku on tällöin puhdistamoiden summa (saavutettujen lupa-ehtojen lukumäärä yhteensä jaettuna kaikkien lupa-ehtojen määrällä). Puhdistamoille voidaan myös määrittää lupaindeksi erikseen.

Teoreettinen esimerkki: Vesihuoltolaitoksen toiminta-alueella on neljä puhdistamoita. Puhdistamoiden kokonaisfosforin reduktiot ovat 95 %, 88 %, 93 % ja 96 %. Kaikille

puhdistamoille fosforin vähimmäispoistotehoksi on ympäristöluvassa asetettu 90 %. Yksi puhdistamo ei täytä lupaehtoa tältä osin (88 %). Kaikki muut lupaehdot (COD_{Cr} -, $\text{BOD}_{7\text{ATU}}$ -, kiintoaine- ja ammoniumtyppipitoisuudet sekä reduktioprosentit) ovat raja-arvojen sisällä. Määrävä tekijä on tällöin yhden puhdistamon fosforinpoistoprosentti 88 %, joka alittaa ympäristöluvan raja-arvon. Lupaindeksi on tällöin alle 100 %. Yksinkertaistaen: Koska tarkkailtavia tekijöitä on viisi ja niille on asetettu myös vähimmäispuhdistustehot, yhdelle puhdistamolle lupaehtojen määrä on 10. Yhteensä neljän puhdistamon lupaehtojen määrä on siis 40. Koska vain yksi lupaehto (LE) jäi täyttymättä (39 täyttyi), lupaindeksin arvo on 97,5 % (yhtälö 1).

$$LI = \frac{LE_T}{LE_{YHT}} * 100\% = \frac{39kpl}{40kpl} * 100\% = 97,5\% \quad (1)$$

jossa

$LI = \text{lupaindeksi } [\%]$

$LE_T = \text{lupaehtoja toteutunut } [kpl]$

$LE_{YHT} = \text{lupaehtoja yhteensä } [kpl]$

5.2.3 Suomalaisen puhdistamoiden tunnuslukutilastojen tarkastelua

VVY:n tunnuslukuraportissa ei ole eritelty, mitkä puhdistetussa jätevedessä olleet yhdisteet/ aineet ovat ylittäneet raja-arvon tai alittaneet vähimmäispuhdistustehon tarkastelluilla puhdistamoilla. Tämän tiedon löytääkseen piti tarkastella ympäristöhallinnon verkkopalvelusta saatavilla olevia tunnuslukuraportteja. Tarkasteluvoodeksi valikoitui 2013, sillä VVY:n tunnuslukuraportissa uusimmat tiedot lupaindeksistä olivat siltä vuodelta.

Opinnäytetyössä tutkittiin puhdistamoiden puhdistustuloksia viiden eri muuttujan vähimmäispuhdistustehon osalta: $\text{BOD}_{7\text{ATU}}$, COD_{Cr} , kiintoaine, kokonaistyyppi, ammoniumtyppi ja kokonaisfosfori. Monilla tarkastelluilla vesihuoltolaitoksilla oli useita puhdistamoita ja jokaiselle oma ympäristölupansa. Tässä opinnäytetyössä ei tarkasteltu jokaisen puhdistamon puhdistustuloksia verraten ympäristölupansa, vaan kaikille vesihuoltolaitoksille käytettiin referenssiarvoina Mikkelin puhdistamoiden raja-arvojen vaihteluväliä (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Referenssiarvot: Mikkelin jätevedenpuhdistamoiden vähimmäispuhdistustehon vaihteluväli (ks. luku 5.2.1.)

Lupaehto	Vähimmäisreduktio [%]
Kokonaistyyppi	70
Ammoniumtyppi NH ₄ ⁺	90
Kokonaisfosfori	90–96
BOD _{7ATU}	90–96
COD _{Cr}	75–85
Kiintoaine	90

Opinnäytetyön otoksena olleiden kolmenkymmenen vesihuoltolaitoksen joukosta yhdellätoista lupaindeksi ei saavuttanut arvoa 100 % vuonna 2013 (ks. kuva 11). Liitteessä 2 on puhdistustuloselvityksen tulokset. Selvittelyn perusteella tehdyssä yhteenvetotaulukossa (liite 2) on ilmaistu vesihuoltolaitoskohtaisesti, missä on eniten parannettavaa reduktioprosentin suhteen. Eri aineille on tarkasteltu vuosikeskiarvoa vuodelta 2013. Taulukkoon on merkitty vaihteluväli, eli millä välillä vuosikeskiarvot olivat tietyn vesihuoltolaitoksen puhdistamoilla, mikäli niitä siis oli useampia. Liitteessä 1 luettelo vesihuoltolaitoksista, jotka olivat opinnäytetyön selvityksen otoksena.

Selvityksen tuloksena näyttäisi siltä, että eniten parannettavaa olisi typenpoistossa (kokonaistyyppi ja ammoniumtyppi). Osalla puhdistamoista fosforin ja kiintoaineen poiston taso oli hieman referenssiarvoa huonompi. Vesihuoltolaitoksella numero 15, jonka puhdistamoiden (yhteensä 4 kpl) lupaindeksi oli vain 60 %, oli parannettavaa kaikkien tutkittavien aineiden osalta yhdellä puhdistamolla sekä typenpoistossa kaikilla puhdistamoilla.

Suomessa yhdyskuntajätevesi muodostaa fosforin vesistöön kohdistuvasta kokonaiskuormituksesta 4 % ja typen kokonaiskuormituksesta 15 %. Typen osalta puhdistuspotentiaalia on runsaasti, sillä monilla laitoksilla typen puhdistusprosentti on alhainen. (Ympäristöministeriö 2012.) Keskimäärin suomalaisilla puhdistamoilla typen poistuma on 56 % (Suomen Vesilaitosyhdistys ry c). Puhdistamoiden välillä typenpoistossa on huomattavaakin vaihtelua. Fosforinpoisto on suomalaisissa jätevedenpuhdistuslaitoksissa yleisesti ottaen hyvällä tasolla, noin 96 prosentissa (Ympäristöministeriö 2012).

Typenpoiston kustannukset ovat alhaisemmat kuin aiemmin on oletettu. Raja-kustannukset yli 10 000 asukasvastineluvun laitoksissa ovat 5,5 euroa per puhdistettu kilo, jos typestä puhdistetaan 70 %. Jos typenpoistoprosentti on 90 %, kustannukset ovat noin 12 e per puhdistettu kilo. Vastaavasti fosforin raja-kustannukset ovat nykytasolla noin 17 euroa puhdistettua kiloa kohden. (Ympäristöministeriö 2012.) Perinteisen aktiivilieteprosessin kustannukset per puhdistettu jätevesikuutio ovat 0,20–0,22 euroa/m³ ja MBR-prosessin kustannukset per tuotettu permeaattikuutio ovat 0,24–0,25 euroa/m³ (Pinnekamp & Friedrich 2003, 95).

Seuraavaksi tarkastelussa olivat 30 vesihuoltolaitoksen jätevedenpuhdistamoiden energiankulutus ja ohitukset (ks. liite 3) (Ympäristöhallinto 2013 c). Osalle puhdistamoista oli mahdollista laskea ohitusindeksi ja sähköenergiankulutus per käsitelty vesikuutio, vuodelle 2013. Liitteessä 3 on listattu raporteista saatavilla olleet tiedot ja tunnuslukulaskennan tulokset. Vesihuoltolaitosten kaikkien puhdistamoiden tiedot on listattu erikseen, eikä vesihuoltolaitoksen keskiarvona, sillä raporteissa oli hyvin vajavaiset tiedot tutkittujen arvojen osalta. Energiankulutukseen liittyviä lukemia ei ollut kaikkien puhdistamoiden raportissa. Energiankulutukseen liittyvän tunnusluvun (energiankulutus per käsitelty jätevesikuutio) pystyi laskemaan seitsemäntoista vesihuoltolaitoksen osalta.

Jätevedenkäsittelyn energiankulutus -tunnuslukuun lasketaan mukaan kaikki käytetyt energiamuodot (kuten sähkö, kaukolämpö, raskas polttoöljy, kevyt polttoöljy ja niin edelleen) (Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 77). Seitsemän vesihuoltolaitoksen raportissa oli ilmoitettu ostettu sähkö, kolmessa ostettu sähkö ja ostettu lämpö. Muita energiamuotoja ei ollut tilastoissa. Niissä ei myöskään ollut merkintää, tuottiko puhdistamo ostoenergian lisäksi osan tarvitsemastaan energiasta itse. Näin ollen jätevedenpuhdistusprosessin energiankulutus per käsitelty vesikuutio saattaa olla todellisudessa suurempikin kuin minkä lukeman sai laskemalla raporteissa olleiden tietojen mukaan. (Ympäristöhallinto 2013 c.)

Esimerkiksi liitteen 3 vesilaitoksen numero 9 sähköenergiankulutuksen tunnusluku oli vuonna 2013 0,27 kWh/m³. Vesihuoltolaitos nro 22 puhdistamoilla vastaavia lukuja olivat 0,51 kWh/m³ ja 1,94 kWh/m³. Vesihuoltolaitoksella nro 29 sähkö- ja lämpöenergiankulutus oli 1,66 kWh/m³. Laskettujen energiankulutus -tunnuslukujen arvot

olivat välillä 0,13–2,16. Yksittäinen maksimiarvo oli 6,85 kWh/m³. Keskiarvo oli 1,26 kWh/m³ ja mediaani 0,66 kWh/m³.

MBR-puhdistuksen energiankulutus optimaalisissa oloissa on 0,5–0,7 kWh/m³ ja vähemmän optimaalisissa keskimäärin 0,8–1,1 kWh/m³. (ks. luku 5.1.1.) Koska selvityksen mukaan suomalaisten puhdistamoiden perinteisen aktiivilieteprosessin energiankulutus on likimäärin välillä 0,13–2,16 kWh/m³, MBR:n käyttöönotto ei välttämättä lisää energiankulutusta. Joissain tapauksissa se jopa tehostaisi energiankäyttöä, sillä vanhoilla laitoksilla on vanhaa, paljon energiaa kuluttavaa tekniikkaa, ja sen korvaaminen uusimmilla MBR-ratkaisuilla voisi tuoda energiasäästöjä.

Ohituksia tarkasteltiin liittyen ympäristötehokkuuteen; ympäristön kannalta on huono asia, mikäli jätevettä päätyy puhdistamatta vesistöön. Ohituksia saatetaan joutua jätevedenpuhdistamolla tekemään, mikäli syystä tai toisesta hetkellisesti kaikkia tulevia jätevesiä ei ehditä tai pystytä prosessissa käsittelemään. Näin ehkäistään esimerkiksi puhdistusprosessin tulviminen. Ohitusvesien määrä oli tilastoitu vain osalle tarkastelluista 30 puhdistamosta. Tosin mistään ei käy ilmi, mitä tarkoittaa, kun ”ohitukset” kohtaan on kirjattu ”-”. Tilastojen tutkimisen kannalta helpottaisi, jos merkittäisiin ”nolla”, mikäli ohituksia ei ole ollenkaan.

Ohitusindeksi oli alle 1 % niiden puhdistamoiden osalta, joiden raportissa oli ilmoitettu ohitusvesimäärä. Ohitusindeksin tavoitearvo on 0, mutta alle yhden prosentin arvo on myös melko hyvä. Aina ei valitettavasti pystytä jäteveden puhdistusta hoitamaan teoreettisen täydellisesti, yleisimmin yllättävien tilanteiden vuoksi.

5.3 Ympäristötehokkuus

Lääkeaineiden ja hormonien kulutus on runsasta ja jäämiä niistä päätyy jäteveeteen. Suomessa ei ole tällä hetkellä yhtäkään lääkejäämien puhdistamiseen suunniteltua jätevedenpuhdistamoita. Lähitulevaisuudessa EU tulee myös asettamaan isoille puhdistamoille tarkkailumääräyksiä tiettyjen prioriteettiaineiden osalta. Joillekin aineille on jo asetettu tarkkailuvaatimuksia. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2015.) Globaali ongelma merissä ovat mikromuovit. Jätevedenpuhdistamoidenkin kautta mikromuoveja päätyy vesistöihin ja mereen, lähteenä ovat muun muassa kosmetiikkatuotteet ja

keinokuituvaatteet. (Gesamp 2014, 2–3.) Sopivalla suodatuskalvolla mikromuovien päätyminen jätevedenpuhdistamoiden kautta luontoon voitaisiin estää.

5.3.1 Haitta-aineet

EU on julkaissut prioriteettiainedirektiivin, jossa säädetään tiettyjen prioriteettiaineiden osalta ympäristölaatu­normit. Uusin direktiivin päivitys on tehty vuonna 2013. Ympäristölaatu­normit määräävät prioriteettiaineille suurimman sallitun vuosikeskiarvon ja hetkellisen pitoisuuden pintavesissä. Tarkkailtavia prioriteettiaineita on 45, muun muassa bentseeni, cadmium ja naftaleeni. Prioriteettidirektiivin päivityksessä (2013/39/EU) on asetettu vaatimus tarkkailulistan laatimiseksi. Listalle valittaisiin uusia haitta-aineita, joita olisi tärkeää tarkkailla vesistöistä, ja jotka Euroopan komissio mahdollisesti myöhemmin esittää sisällytettäväksi direktiiviin. (Laitinen ym. 2014, 19.)

EU on julkaissut alkuvuodesta 2015 ehdotuksen kaikista ensimmäisen tarkkailulistan aineista. Tarkkailulistan aineita on yhteensä yksitoista: hormonit 17- β -estradioli, estroni ja 17- α -etinyyliestradioli, tulehduskipulääke diklofenaakki, rikkakasvimyrkky triallaatti, hyönteismyrkky neonikotinoidi, antioksidantti BHT (butyylihydroksitolu­eeni), makrolidi-antibiootit sekä kosmetiikan UV-suoja EHMC (etyyliheksyyli­sinna­maatti). (Envieno 2015.) Jäsenvaltioiden on täytynyt monitoroida näitä aineita pinta­vesistä vähintään vuoden ajanjaksolta, alkaen viimeistään vuoden 2015 lopulta. Edellä mainituille haitta-aineille ei ole vielä ympäristölaatu­normia. Toisin sanoen niiden käytölle ei ole EU:ssa asetettu vähentämis- tai lopettamisvaatimuksia eikä myöskään ole asetettu raja-arvoja. (Envieno 2013.)

Likimain seuraavat 10 vuotta tulevat olemaan siirtymävaihetta tehostetumpaan puhdistukseen, sillä monien puhdistamoiden ympäristöluvut ovat vanhenumassa sen ajan sisällä. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2015.) MBR-tekniikka soveltuu tehostamaan haitta-aineiden poistoa. Suodatuskalvo erottelee hiukkasia paremmin kuin jälkiselkeytysallas, joten haitallisten aineiden erottelukyky on MBR:llä parempi kuin perinteisellä aktiivilietelaitoksella. Erotuskyky on hyvä erityisesti aineilla, jotka ovat kiinteässä muodossa tai tarttuvat lietteeseen. (Laitinen ym. 2014, 67.) MBR:ssä haitta-aineet voivat hajota myös biologisesti aktiivilietelaitoksella.

5.3.2 Lääkejäämät

Yksi tärkeimmistä membraaniteknologian eduista on sen kyky erotella lääkejäämiä vedestä. Nykyään lääkkeiden käyttö on runsasta ja lääkejäämiä ja lääkeaineiden hajoamistuotteita joutuu ihmisen ruuansulatuselimistön kautta jäteveeseen. Tiedetyt vedenpuhdistusmenetelmät poistavat mikrogrammujen luokkaa olevia lääkejäämiä huonosti tai eivät ollenkaan (Vieno 2007), joten uusien menetelmien käyttöönotolle on tarvetta, jotta jäämät eivät kulkeutuisi jätevedenpuhdistamoilta vesiympäristöön aiheuttamaan haittoja, ja lopulta ihmisten juomaveteen.

Niina Vienon (2007) tekemän väitöskirjan mukaan jätevedenpuhdistamoille menevän jäteveden lääkejäämäpitoisuus vaihtelee välillä $<0,02\text{--}29\ \mu\text{g/l}$. Puhdistetussa vedessä pitoisuus on korkeimmillaan $3,9\ \mu\text{g L}^{-1}$. Jätevedenpuhdistamoiden prosessit on suunniteltu poistamaan vedestä eroteltua kiinteää ainetta, biohajoavaa orgaanista ainetta, patogeenejä ja ravinteita. Perinteistä biologis-kemiallista prosessia käyttämällä lääkeaineet voivat joko hajota, muuttaa muotoaan tai tarttua puhdistuksen aikana syntyvään lietteeseen. Biohajoaminen tapahtuu bakteerien avulla. Osa aineista läpäisee puhdistuksen ja päätyy luonnonvesiin. (Vieno 2007.) Esimerkiksi metoprololin ja diklofenaakin poistuma perinteisessä aktiivilietepuhdistuksessa on alle 20 % ja ne biohajoavat hitaasti, siprofloksasiinin poistuma on yli 80 % ja se tarttuu lietteeseen. Karbamatsapiinia poistuu vain alle 5 % ja se ei biohajoa tai tartu lietteeseen. Ibuprofeeni on erittäin biohajoavaa, ja se poistuu yli 90-prosenttisesti. (Vieno 2010.)

Lääkejäämiin paremmin tehoavia menetelmiä ovat kehittyneet hapetusmenetelmät, otsonointi, käänteisosmoosi, aktiivihiilisuodatus, nanosuodatus ja membraanibioreaktorit (Guo ym. 2014). Lääkejäämien poistaminen on tehokasta aktiivihiilisuodatuksella ja otsonoinnilla, ne poistavat enimmillään 75 % lääkejäämistä (Pauli 2011), mutta menetelmien kalleuden vuoksi niitä käytetään lähinnä juomaveden valmistukseen, ei jäteveden puhdistukseen (Vieno 2007.)

Lääkeaineet ovat mikropartikkeleita (Guo ym. 2014), joiden poistamiseksi vedestä voidaan käyttää kalvosuodatustekniikoita, joissa suodattimen huokosten koko on erittäin pieni, eli nanosuodatusta ja käänteisosmoosia. Nanosuodatus poistaa partikkeleita, joiden koko on $0,01\text{--}0,001\ \mu\text{m}$ ja käänteisosmoosi partikkeleita, joiden koko on $0,001\text{--}0,0001\ \mu\text{m}$. Käänteisosmoosi poistaa siis ionien ja nanosuodatus mikromole-

kyilien kokoisia partikkeleita. (Lehmonen 2012, 80.) Nanosuodatus poistaa ibuprofeenia ja diklofenaakkia 60-prosenttisesti ja estradiolia 90-prosenttisesti. Käänteisosmoosissa poistumat ovat: ibuprofeeni yli 99 %, diklofenaakki 95 %, makrolidit (esimerkiksi antibiootit) yli 99 %. (Guo ym. 2014). Membraanibioreaktori yhdistää kalvosuodatuksen ja aktiivilieteprosessin. Tällä menetelmällä saadaan poistettua erittäin tehokkaasti monia lääkeaineita, hormoneja ja mikropollutanteja. Ultrasuodatus poistaa 0,005–0,2 µm kokoisia ja mikrosuodatus 0,08–2 µg kokoisia partikkeleita. (Lehmonen 2012, 80.)

Liitteessä 4 on esimerkkejä membraanibioreaktorin lääkejäämien puhdistustehoista. Tieteellisistä julkaisuista on poimittu tietoja täyden skaalan membraanipuhdistuksesta ja pilottiskaalan laitoksista. Esimerkiksi täyden skaalan Koch Buron tasomembraanilla ibuprofeenin, estriolin ja bisfenoli-A:n poistuma on 100 %. Toisia lääkeaineita menetelmä poistaa heikommin, kuten karbamatsepiinia (poistuma 24 %). (Guo ym. 2014.) Osa puhdistustehoista on negatiivisia. Tämä tarkoittaa sitä, että jätevedenpuhdistusprosessin aikana lääkeaineen pitoisuus on noussut. Se selittyy sillä, että inaktiivisessa muodossa olleet lääkeaineen osaset muuttuvat aktiiviseen muotoon. Esimerkiksi pilottiskaalan LF Kubota -tasomembraanilla karbamatsepiinin määrä kaksinkertaistui puhdistusprosessissa. (Gurung 2014, 91–93.) Karbamatsepiinin poisto onkin haaste niin perinteiselle aktiivilieteprosessille kuin MBR:llekin.

5.3.3 Mikromuovit

Mikromuovit ovat halkaisijaltaan alle 5 millimetrin kokoisia muovikappaleita. On olemassa primaarisia ja sekundaarisia mikromuoveja. Primaariset mikromuovit ovat alun perin pienen kokoluokan partikkeleiksi tuotettua muovia. Sekundaarista mikromuovia syntyy merissä suurempien muovikappaleiden hienontuessa UV-valon, lämmön ja mekaanisen hankauksen seurauksena pienemmiksi partikkeleiksi. (Gesamp 2014, 2–4.) Kuvassa 12 a) on muovipellettiä, joka on primaarista mikromuovia. Kuvassa 12 b) on rannalta kerättyä muovipellettiä ja sekundaarista mikromuovia. Kuva 12 c) on otettu Safagassa Egyptissä Punaisenmeren rannalta. Rannalle on kerääntynyt runsaasti muovijätettä, pääosin muovipulloja. Tämä muoviroska hajoaa pikkuhiljaa ja muodostaa sekundaarista mikromuovia.



KUVA 12. Mikromuovit ja meri; a) muovipellettejä, b) rannalta kerättyä mikromuovia, c) meren ranta Sahagassa Egyptissä (Oregon State University 2016; Wikipedia 2008; Wikipedia 2010)

Primaarista mikromuovia lisätään esimerkiksi puhdistusaineisiin, ja kosmetiikkatuotteisiin kuten hammastahnaan ja kuorintavoiteisiin. Mikromuoveja irtoaa myös keino-
kuituvaatteista pesun yhteydessä, ja tällöin kyseessä on sekundaarinen mikromuovi. Mikromuovipartikkeleita valmistetaan myös muoviteollisuuden tarpeisiin (primaarinen mikromuovi). Muovipellettejä kuljetetaan tehtaalta toiselle muun muassa laivoilla, ja toisinaan huolimattoman käsittelyn tai vahinkojen seurauksena näistä lasteista purkautuu osa mereen. Pellettejä esiintyykin yleisesti teollistuneiden alueiden satamien läheisyydessä olevilla rannoilla. (Gesamp 2014, 2–4.)

Muovien parhaimpia puolia ovat niiden monipuoliset käyttökohteet ja käyttökestävyys. Nämä ovat myös muovituotteiden huonoimpia puolia ympäristön kannalta. Muovi hajoaa pienemmiksi kappaleiksi luonnossa, mutta ei käytännössä häviä kokonaan. Hyvin pienet muovipartikkelit voivat joutua merieliöstön ruuansulatukseen tai kiduksiin ja sitä kautta ravintoketjuun. Lisäksi muovit sitovat ympäristömyrkyjä ja saattavat jo itsessäänkin sisältää myrkyllisiä yhdisteitä. (Svahn 2013.)

Eräs mikromuovien väylä mereen ovat jätevedenpuhdistamot. Puhdistamoille tulevas-
sa jätevedessä on nykyisin huomattavia määriä hyvin pientä muoviainesta. Ruotsin
ympäristöntutkimusinstituutin vuonna 2014 teettämässä tutkimuksessa jätevedenpuh-
distamoiden roolia mikromuovien mereen päätymsväylänä tutkittiin analysoimalla
näytteitä ennen puhdistusta ja sen jälkeen. Tutkittava Långviksverketin puhdistamo oli
suhteellisen pieni, asukasvastineluvun ollessa 14 000. Puhdistamosta puretaan käsitel-
ty jätevesi suoraan mereen. Jätevedenkäsittelymenetelmänä on mekaaninen, kemialli-
nen ja biologinen puhdistus, eli käytännössä perinteinen aktiivilieteprosessi. (Magnus-
son & Norèn 2014, 3.)

Långviksverketin puhdistamolle tulevassa jätevedessä mikroluokan muovipartikkelei-
ta todettiin olevan $15\,000\text{ kpl/m}^3$. Puhdistusprosessissa 99 % partikkeleista tarttui liet-
teeseen ja poistui jätevedestä. 1 % mikromuoveista kuitenkin vielä jäi laitokselta läh-
teevään jäteveteen. Purkuveden virtaamassa mikromuovia oli 1 770 kpl/h. (Magnusson
& Norèn 2014, 3.) Tällä tahdilla puhdistamolla syntyy mikromuovipäästöä 15 505 200
kpl/a. Kyseessä on siis pienen jätevedenpuhdistamon tulos, suuremmilla puhdistamoil-
la päästöt ovat monikertaiset.

Sopivalla huokoskolla oleva suodatuskalvo poistaisi jätevedestä myös mikromuovit.
Mikromuovien poistossa perinteistä aktiivilieteprosessia voisi tehostaa ottamalla käyt-
töön membraanibioreaktori tai aktiivilieteprosessin jälkikäsittelyksi suodatuskalvoyk-
sikkö. Membraanibioreaktorissa on yleensä joko ultra- tai mikrosuodatuskalvo, jotka
erottelevat partikkelikooltaan $0,01\text{--}0,4\ \mu\text{m}$ olevat mikromuovit. Tästä pienempien,
kokoluokaltaan $0,01\text{--}0,001\ \mu\text{m}$ olevien muovipartikkeleiden erottelemiseen tarvitaan
nanosuodatuskalvo. (ks. kuva 6.)

5.4 MBR-prosessin tunnuslukuja

Tunnusluvut valitaan tilanteen ja kohteen mukaan. Mitä halutaan mitata ja mitä tavoit-
teita saavuttaa? Opinnäytetyöprosessin aikana koko ajan oli pohdinnassa, minkälaisia
tunnuslukuja juuri MBR-prosessia varten voisi olla, jotta prosessille ominaisia asioita
voitaisiin seurata. Tunnuslukuihin liittyen liitteessä 5 on esitetty mahdollisia mitatta-
via asioita MBR-prosessista sekä on listattu mitä parametreja voidaan mitata online-
mittareilla.

Tunnusluvuista osa on tietenkin samoja niin membraanibioreaktorissa kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa, sillä onhan membraanibioreaktori aktiivilietepuhdistuksen ja suodatusyksikön yhdistelmä. Tärkeimpinä asioina toistuvasti nousivat esiin energiankulutuksen ja kalvon likaantumisen minimointi sekä perinteistä prosessia parempi puhdistusteho. MBR-prosessin tunnusluvuiksi ehdotan seuraavat:

5.4.1 Viranomaisvelvoitteisiin liittyvät

- Lupaindeksi
 - Fosforin, typen, kiintoaineen, BOD_{7ATU} ja COD_{Cr} pitoisuudet effluentissa ja puhdistustehot. Voi olla muitakin seurattavia parametreja riippuen puhdistamon ympäristöluvasta.
- Vesistötarkkailu
 - Kuormitustaso verrattuna määriteltyihin tavoitearvoihin ja/ tai edellisvuosiin.
- Ohitusindeksi

Jäteveden käsittelyssä on tärkeää, että purkuvesi on mahdollisimman puhdasta. Myöskään puhdistamatonta jätevettä ei tulisi päästä luontoon. Puhdistamon ympäristöluvassa on määritelty raja-arvot tiettyjen aineiden vähimmäispuhdistusteholle sekä pitoisuuksille purkuvedessä. Ympäristöluvassa on myös veloitettu vesistötarkkailuun. Jätevedenpuhdistamon velvoitteisiin liittyen merkittäviä tunnuslukuja ovat lupaindeksi ja ohitusindeksi sekä vesistötarkkailuun liittyen esimerkiksi kuormitustaso verrattuna edellisvuosiin tai määriteltyihin raja-arvoihin. Näiden tunnuslukujen avulla puhdistamolla voidaan seurata puhdistusprosessin tehoa ja kehitystä halutulla aikavälillä, esimerkiksi viiden vuoden ajalta. Seurantatiedon avulla voidaan tehdä kehittämistoimenpiteitä.

5.4.2 Toiminnanohjaukseen liittyvät

- Energiankulutus per poistettu kilo fosforia [kWh/kg]
- Energiankulutus per poistettu kilo BOD:ia [kWh/kg]
- Energiankulutus per puhdistettu jätevesikuutio [kWh/m³]
- Energiankulutus per kuivattu lietetonni [kWh/tkg]
- Polymeerin kulutus per kuivattu lietetonni [m³/tkg]

- Energiankäytön hinta
- Energiankulutuksen trendi
- Energiankulutuksen jakautuminen laitoksella
- Ferrosulfaatin/ muun saostuskemikaalin kulutus per poistettu kilo fosforia
- Membraanin puhdistuskemikaalin käyttö per puhdistettu jätevesikuutio
- Membraanin karkeailmapuhdistuksen ilmamäärä per puhdistettu jätevesikuutio
- Membraanin ilmastuksen energiankulutus per puhdistettu jätevesikuutio [kWh/m³]
- Membraanin energiankulutuksen osuus prosessin kokonaisenergiankulutuksesta [%]
- Pumppujen energiankulutus
- Membraanin käyttöikä
- Membraanin likaantumistaso/ puhdistusväli
- Käyttökustannukset [€], vuosittain, kuukausittain tai muulla halutulla aikavälillä

Tunnuslukuja voidaan määrittää koskemaan hyvinkin pieniä osia puhdistusprosessista. Voidaan seurata, kuinka paljon energiaa kuluu esimerkiksi fosfori- tai BOD-kilogramman poistamiseen jätevedestä tai kuinka paljon fosforinsaostuskemikaalia kuluu per poistettu kilo fosforia. Kun seurataan energian- tai kemikaalien kulutusta prosessin eri toiminnoissa, voidaan paikantaa eniten resursseja vievät toiminnot. Tämän perusteella on mahdollista tehdä säästötoimenpiteitä. Resurssien säästyminen säästää myös käyttökustannuksissa. Käyttökustannuksia seuraamalla voidaan havainnoida kehityksen suuntaa, että ovatko kustannukset vähentyneet vai lisääntyneet tietyn ajan kuluessa.

Membraanibioreaktorissa erityisesti membraanin karkeailmapuhdistus vie paljon energiaa. Onkin järkevää seurata karkeailmastukseen syötettävän ilman määrää ja energiankulutusta, jotta voidaan arvioida erilaisten prosessinohjaustapojen vaikutusta. MBR:ssä toinen energiaa paljon kuluttava toiminto on pumppaus. Esimerkiksi jätevetä pumpataan paineella membraanin lävitse ja syntynyt permeaatti pumpataan purkuvedeksi. Prosessin sisällä myös pumpataan lietettä. Pumppauksen energiankulutusta onkin hyödyllistä seurata, jotta varmistetaan, että pumput toimivat hyvän hyötysuhteen alueella. MBR:ssä membraanin likaantumistaso ja käyttöikä ovat tärkeitä tekijöitä. On tärkeää seurata, kuinka likainen membraani on, jotta sitä voidaan sopivilla syk-

leillä puhdistaa ja ehkäistä pysyvä likaantuminen. Näin menetellen myös membraanin käyttöikä pitenee.

5.4.3 Ympäristötunnuslukuja

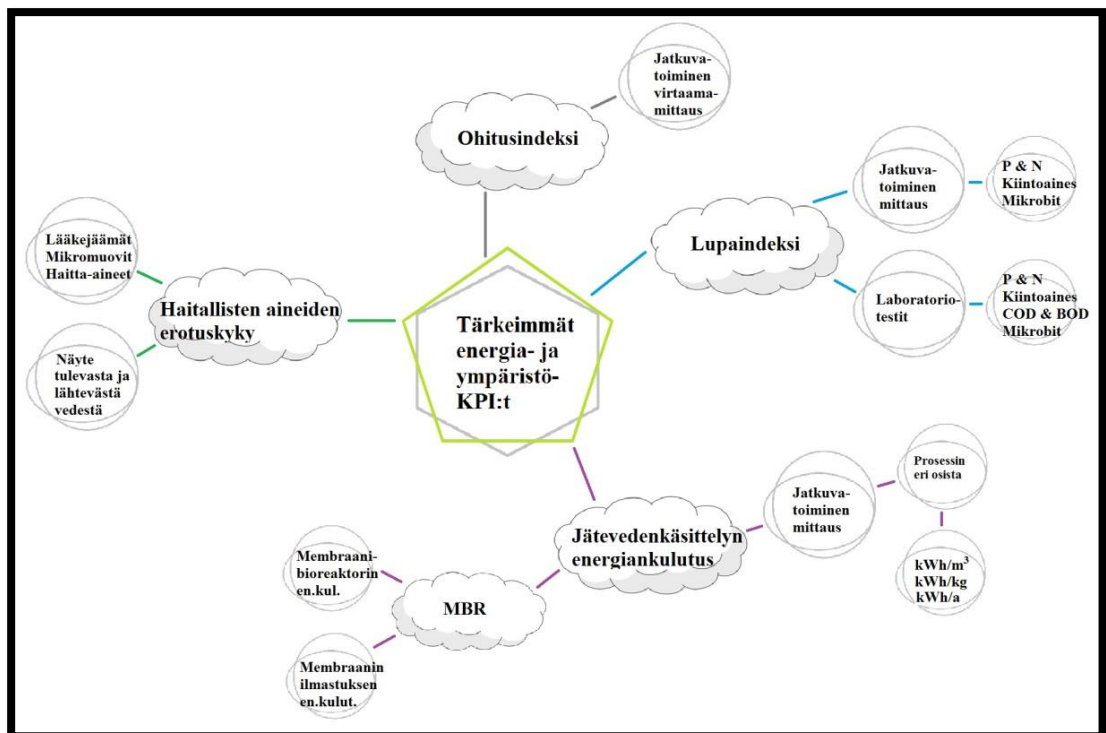
- Haitta-aineiden pitoisuudet ja erotusteho
- Lääkeaineiden pitoisuudet ja erotusteho
- Puhdistusprosessin hiilijalanjälki
- Fossiilisten lannoitteiden korvaaminen lietepäisellä lannoitteella [%] JA Fossiilisen energian korvaaminen lietepäisellä biokaasulla [%]
 - Kun jätevesilietettä hyötykäytetään
- Lietteen hyödynnettävyys [%]
- MBR puhdistetun veden puhtaus tietyn parametrin osalta verrattuna purkuvesistön luonnonvesiin

MBR:n suurin etu verrattuna CAS:iin on nimenomaan vaikeasti puhdistettavien aineiden puhdistustehokkuuden osalta. MBR puhdistaa lääkkeitä, muita haitta-aineita sekä mikromuoveja CAS:ia tehokkaammin. Edellä mainittujen aineiden erotustehokkuutta ja pitoisuuksia monitoroimalla voidaan varmistaa puhdistusprosessin tehokkuus ja havaitaan, mikäli puhdistusteho jostain syystä heikkenee. Tutkimusmielessä voidaan MBR-puhdistetun jäteveden puhtautta verrata purkuvesistön luonnonvesiin, jotta selviää, onko MBR-puhdistettu jätevesi jopa puhtaampaa tiettyjen parametrien osalta kuin purkuvesistön vesi.

Jätevedenpuhdistusprosessin hiilijalanjälkeä voidaan seurata osana ympäristötehokkuuden seuranta. Mikäli jätevedenpuhdistuslaitokselta lähtee hyötykäyttäväksi lietettä lannoitteen tai biokaasun raaka-aineena, voidaan laskea kuinka paljon fossiilista lannoitetta ja fossiilista energiaa korvautuu uusiutuvilla muodoilla. Ennen lietteen hyötykäyttöä on selvitettävä sen hyödynnettävyys. Lietteen hyödynnettävyyteen vaikuttaa muun muassa sen raskasmetallipitoisuus. Mikäli lietteen hyödynnettävyysprosentti on riittävällä tasolla, sitä voidaan hyötykäyttää.

5.4.4 MBR-teknologian tärkeimmät energia- ja ympäristötunnusluvut

Kuvassa 13 on yhteenvetona käsittekartta tärkeimmistä energia- ja ympäristötunnusluvuista, koskien nimenomaan jäteveden MBR-puhdistusta pois lukien lietteen käsittely. Ympäristön kannalta on tärkeintä, että jätevesi puhdistuu prosessissa mahdollisimman hyvin ja puhdistamatonta jätevettä ei pääse luontoon. Siksi lupaindeksi, haitallisten aineiden erotuskyky ja ohitusindeksi ovat keskeisiä ympäristösuorituskykymittareita. Osa tarvittavista mittauksista voidaan suorittaa jatkuvatoimisilla mittareilla.



KUVA 13. MBR-teknologian tärkeimmät jätevedenpuhdistuksen energia- ja ympäristötunnusluvut

Jätevedenpuhdistamoilla voidaan energiankulutusta mitata prosessin eri osista. Yleisellä tasolla laitoksen kokonaisenergiankulutus per vuosi [kWh/a] antaa tietoa siitä, miten energiankulutus kehittyy verrattuna edellisvuosiin. Kun mitataan prosessin eri osien energiankulutusta, voidaan arvioida, kuinka resursseja voitaisiin optimoida. Saadaan selville puhdistusprosessin eniten resursseja kuluttavat osiot. (Kuva 13.)

6 YHTEENVETO

Perinteisen aktiivilieteprosessin ja membraanibioreaktorin energiankulutuslukemat ovat melko samansuuruiset. Kun vertaillaan CAS:in ja MBR:n energiankulutusta toisiinsa, on otettava huomioon puhdistetun jäteveden laatu. Pelkkä aktiivilieteprosessi ilman lisäkäsittelyjä tuottaa huonolaatuisempaa puhdistettua jätevettä kuin membraanibioreaktori. Effluentin laatu on likimain MBR:ää vastaava, kun CASiin on yhdistetty tertiäärinen puhdistus.

Suomalaisilla puhdistamoilla energiankulutus vuonna 2013 oli likimäärin 0,13–2,16 kWh/m³. Toisinaan CAS-prosessin energiankulutuslukema on hyvinkin korkea, opinäytetyön selvityksessä maksimi oli 6,85 kWh/m³. MBR-puhdistuksen energiankulutus optimaalisissa oloissa on 0,5–0,7 kWh/m³ ja vähemmän optimaalisissa keskimäärin 0,8–1,1 kWh/m³. MBR:n käyttöönotto ei välttämättä lisää energiankulutusta. Se voisi joissain tapauksissa jopa tehostaa energiankäyttöä, kun korvataan vanhentunutta tekniikkaa uudella energiatehokkaammalla tekniikalla.

Perinteiseen aktiivilieteprosessiin tarvitaan tehostusta, jotta puhdistetun jäteveden laatu vastaisi nykypäivää. Suomalaisilla puhdistamoilla on eniten parannettavaa typenpoistossa. Myös fosforin ja kiintoaineen poistossa oli joillain puhdistamoilla pientä parantamisen varaa eli saavutetaan puhdistustaso, joka jää hiukan ympäristöluvan vaatimuksia alemmaksi. MBR:ssä typen poisto tehostuu korkeamman lieteiän ja kiintoainepitoisuuden vuoksi. Pidempi viipymä edesauttaa MBR:lle ominaisen mikrobikannan syntyä. MBR-puhdistetun jäteveden hygieeninen laatu on hyvällä tasolla, laadussa on parannusta CAS:iin verrattuna. MBR:llä kiintoaineen erotusteho on parempi kuin CAS:lla.

Perinteisellä aktiivilieteprosessilla lääkejäämien puhdistusteho on osittain heikko. Membraanibioreaktorilla on saatu lupaavia tuloksia lääkejäämien ja muiden haitta-aineiden poistossa. Esimerkiksi ibuprofeenin, estronin, estriolin, testosteronin, naprokseenin ja bisfenoli-A:n poistuma on likimain 100 %. Membraanibioreaktorissa lääkeaineiden poistuma tapahtuu biologisen hajoamisen ja fysikaalisen suodatuksen avulla. Suodatuskalvoilla voidaan erotella myös mikromuovipartikkelit jätevedestä.

Membraanibioreaktori on käyttökelpoinen päivitys perinteiseen aktiivilieteprosessiin. Sen suunnitteluun, mitoitukseen ja ohjaukseen tulee vain kiinnittää huomiota, jotta saavutetaan optimaalinen suorituskyky. Uusien teknologioiden käyttöönotossa tärkeää on kouluttautuminen, jotta prosessien toteutus ja ohjaus tapahtuu oikealla tavalla, ja jotta resursseja ei tuhleta tiedon puutteen vuoksi.

Yli sata vuotta sitten Suomessa yleistynyt perinteinen aktiivilieteprosessikin on aikoihin ollut uutta tekniikkaa, ja vuosikymmenten käyttökokemuksen myötä sen käytöstä jäteveden puhdistuksessa on tullut arkipäivää. Samoin membraaniteknologiakin tulee pikkuhiljaa juurtumaan suomalaiseen jäteveden puhdistukseen, nyt tarvitaan vain innostunutta, uudistushenkistä jätevesialan porukkaa toteuttamaan tätä murrosta. Membraanitekniikan koko ajan kehittyessä ja hintojen muuttuessa edullisemmiksi sen yleistymiseen alkaa olla hyvät mahdollisuudet. Käyttökokemuksia ja tutkimuksia tästä tekniikasta on jo maailmalta runsaasti.

Kirjallisuustutkimuksessa tietoa ja erilaisia tutkimuksia oli saatavilla hyvin runsaasti, mutta tieto oli hajanaista ja juuri suorituskykyyn ja suorituskykymittareihin liittyvää täsmällistä tietoa hankalasti saatavilla. Suomenkielistä materiaalia nimenomaan membraaniteknologian suorituskykyyn liittyen oli saatavilla todella niukasti. Tällä opinnäytetyöllä paikattiin tuota vajetta.

Perinteisen aktiivilieteprosessin selvityksen aineistot olivat helposti saatavilla ympäristöhallinnon verkkopalvelussa. Pientä haastetta tunnuslukutilastojen analysoinnille kuitenkin toi sellainen seikka, että tilastot olivat osin puutteelliset. Kaikkia tarvittavia tietoja ei löytynyt kaikilta puhdistamoilta, varsinkin energiankulutuslukemat puuttuivat monen puhdistamon tilastosta. Opinnäytetyössä vertailtiin membraanibioreaktoria ja perinteistä aktiivilieteprosessia toisiinsa. Näiden kahden jätevedenpuhdistusmenetelmän suorituskyvyn selvityksen menetelmät olivat erilaiset. Kirjallisuustutkimuksen ja tunnuslukutilastojen analysoinnin yhteensovittaminen vaatikin paljon pohtimista.

Membraaniteknologian suorituskykyyn liittyy hyvin monenlaisia tekijöitä, mutta aivan joka näkökulmasta aihetta ei pystynyt käsittelemään opinnäytetyön laajuudessa. Muun muassa membraanin likaantumista, kustannuksia ja lietteen käsittelyä suorituskyvyn näkökulmasta ei ehtinyt käsitellä opinnäytetyöprosessin aikana kuin aihetta sivuten ja näiden aiheiden selvitys voisi olla jatkotutkimuksena. Liittyen opinnäytetyössä käsi-

teltyihin aihealueisiin (energiankulutus, puhdistustulos ja ympäristötehokkuus) jatkotutkimuksena voidaan suorittaa tunnuslukulaskentaa membraanibioreaktorista saatavasta raakadatasta, ja testata tunnuslukuja käytännössä prosessinohjauksen apuvälineenä.

Opinnäytetyön tärkein tavoite oli tuottaa Mipro Oy:lle sellaista tietoa, josta on hyötyä vesihuollon ohjausjärjestelmien kehitystyössä. Tavoite täyttyi, sillä opinnäytetyön tuloksia käytetään hyödyksi tuotekehityksessä. Henkilökohtaisina tavoitteinani olivat jätevesialan osaamiseni syventäminen, MBR-tekнологiaan perehtyminen ja jätevesitietämykseni osoittaminen. Nämä tavoitteet täyttyivät.

LÄHTEET

Aho, Mika 2012. Pari Sanaa mittareista. Www-artikkeli. Espoo. Rongo Oy.
<http://www.rongo.fi/2012/06/pari-sanaa-mittareista/>. Päivitetty 5.6.2012. Luettu 21.1.2016.

Arola, Kimmo & Mänttari, Mika 2013. Membraanisuodatuksen hyödyntäminen kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa. Case: Parikkalan Särkisalmen jätevedenpuhdistamo. Erotustekniikan laboratorio. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kirjallisuusselvitys. <http://www.parikkala.fi/loader.aspx?id=c564a7fe-a069-48c1-8b49-51dfa7a61832>. 6.6.2013. Luettu 3.3.2016.

Artas. Arambar Packaged Membrane Bioreactor Systems. Www-esite.
<http://artas.com.tr/atik-su-aritma-tesisleri.html>. Ei päivitystietoa. Luettu 21.1.2016.

Bergman, Anne 2016. Keskustelu Mikkelin Vesilaitoksella. 18.1.2016.

Brozinski, Jenny-Maria, Kronberg, Leif & Tuomio, Jaakko 2012. Mihin lääkeaineet päätyvät ympäristössä. Duodecim. http://www.duodecimlehti.fi/web/guest/arkisto?p_p_id=Article_WAR_DL6_Articleportlet&p_p_action=1&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&p_p_col_id=column1&p_p_col_count=1&viewType=viewArticle&tunnus=duo10367. Päivitetty 2012. Luettu 26.2.2016.

Christian Berner. WTW on-line mittalaitteet. <http://www.christianberner.fi/product-areas-list/instrumentit/wtw-on-line-mittalaitteet>. Ei päivitystietoa. Luettu 1.4.2016.

Envieno 2013. EU:n uusi prioriteettiainedirektiivi julkaistu. Blogi..
<http://www.envieno.com/2013/08/eun-uusi-prioriteettiainedirektiivi-julkaistu/>. Päivitetty 29.8.2015. Luettu 22.3.2016.

Envieno 2014. Envieno mukana tehostamassa Vihdin jätevesien puhdistamista. Www-tiedote. <http://www.envieno.com/news/envieno-mukana-tehostamassa-vihdin-jatevesien-puhdistamista/>. Päivitetty 17.6.2016. Luettu 10.2.2016.

Envieno 2015. EU:n säätämien tarkkailuaineiden ensimmäinen lista julki. Blogi.
<http://www.envieno.com/2015/02/eun-saatamien-tarkkailuaineiden-ensimmainen-lista-julki/#more-1111>. Päivitetty 10.2.2015. Luettu 22.3.2016.

Fenu ym. 2010. Energy audit of a full scale MBR system. Desalination. Volume 262. Issues 1-3. Www-artikkeli.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916410003747>. Päivitetty 31.3.2010. Luettu 23.2.2016.

Gesamp 2014. Microplastics in the ocean. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Www-esite.
http://www.gesamp.org/data/gesamp/files/media/Publications/WG_40_Brochure_Microplastic_in_the_ocean/gallery_2191/object_2404_large.pdf. Päivitetty 28.11.2014. Luettu 31.3.2016.

Guo, Wenshan, Hai, Faisal Ibney, Liang, Shuang, Luo, Yunlong, Nghiem, Long Duc, Ngo, Huu Hao, Wang, Xiaochang C. & Zhang, Jian. A review on the occurrence of

micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. Ww-raportti. <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.mikkeli.amk.fi:2048/science/article/pii/S0048969713015465>. Päivitetty maaliskuu 2014. Luettu 27.1.2016.

Gurung, Khum 2014. Feasibility study of submerged membrane bioreactor (mbr) as an alternative to conventional activated sludge process (casp) for municipal wastewater treatment: a pilot scale study. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2014081432828>. Ei päivitystietoa. Luettu 17.3.2016.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2015. Puhdistamme jätevedet tehokkaasti. Ww-esittely. <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Sivut/default.aspx>. Päivitetty 26.6.2015. Luettu 26.1.2016.

Huber Technology. Step Screen porrasvälppä. Ww-esite. <http://www.huber.fi/STEP-SCREEN-L-porrasvaelpae.htm>. Ei päivitystietoa. Luettu 26.1.2016.

Judd & Judd Ltd 2014. Largest MBR plants – Africa. <http://www.thembrsite.com/about-mbrs/largest-mbr-plants/largest-mbr-plants-africa/>. Päivitetty tammikuu 2014. Luettu 11.2.2016.

Judd & Judd Ltd 2015. Largest MBR- plants worldwide. <http://www.thembrsite.com/about-mbrs/largest-mbr-plants/>. Päivitetty maaliskuu 2015. Luettu 11.2.2016.

Kakko, Timo 2016. Keskustelu 8.2.2016.

Krzeminski ym. 2012. Specific energy consumption of membrane bioreactor (MBR) for sewage treatment. Water Science and Technology. IWA Publishing 2012. https://www.researchgate.net/publication/221737301_Specific_energy_consumption_of_membrane_bioreactor_MBR_for_sewage_treatment. Päivitetty 2012. Luettu 22.2.2016.

Kymen Vesi Oy 2012. Jäteveden käsittely. Ww-sivu. Ww-video. <http://www.kymenvesi.fi/tietoa-vedesta/jatevesi>. Päivitetty 4.12.2012. Luettu 26.1.2016.

Kymen Vesi Oy. Mussalon jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessi. Ww-prosessikaavio. http://www.kymenvesi.fi/sites/default/files/pdf/Prosessikaavio_Mussalo.pdf. Ei päivitystietoa. Luettu 26.1.2016.

Laitinen ym 2014. Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. Ympäristöministeriö. Suomen ympäristö –julkaisusarja 3/2014. https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiJpMqkstTLAhXGd5oKHUEYDngQFggqMAI&url=https%3A%2F%2Fhelda.helsinki.fi%2Fbitstream%2Fhandle%2F10138%2F43199%2F5Y_3_2014.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AFQjCNFZQwd2nVdxZVc3mZa6NiRN3yBraA. Päivitetty 19.3.2014. Luettu 22.3.2016.

Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014. Kunnallisen jäteveden puhdistuksen uusi tekniikka käyttöön pian myös Suomessa. Www-uutinen. http://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/kunnalliseen-jatevedenpuhdistukseen-uusi-tekniikka-kayttoon-pian-myo-suomessa. Päivitetty 31.10.2014. Luettu 21.1.2016.

Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2015. Lääkejäämät voidaan poistaa jätevedestä yli 95-prosenttisesti. Www-uutinen. http://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/laakeainejaamat-voidaan-poistaa-jatevedesta-yli-95-prosenttisesti. Päivitetty 23.3.2016. Luettu 31.3.2016.

Lehmonen, Elina 2012. Kehittyneet jätevedenpuhdistusmenetelmät haitallisten aineiden poistossa. Aalto-Yliopisto. Diplomityö. http://civil.aalto.fi/fi/research/water_and_environment/theses/water_engineering/#Ma_w_2012. Päivitetty 2.4.2012. Luettu 27.1.2016.

Lignell, Ilari. Mbr-opas prosessien hankintaan, mitoittamiseen ja käytön optimointiin. Www-PowerPoint. http://www.vvy.fi/files/4558/01_Lignell_Ilari.pdf. Ei päivitystietoa. Luettu 10.2.2016.

Lignell ym. 2015. MBR-opas. MBR-prosessien suunnittelu, ohjaus ja hankinta Suomessa.. Ramboll Finland Oy. Www-opas. https://vvy.etapahtuma.fi/eTaika_Tiedostot/5/Hanke/1371/LOPPURAPORTTI_MBR_opas_Ramboll_Finland.pdf. Ei päivitystietoa. Luettu 10.2.2016.

Magnusson, Kerstin & Norèn Fredrik. Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant. Swedish Environmental Research Institute IVL. Www-raportti. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:773505/FULLTEXT01.pdf>. Päivitetty 19.12.2014. Luettu 31.3.2016.

Mikkelin kaupunginvaltuusto 2015. <http://mikkeli.cloudnc.fi/download/noname/%7Bdce9d941-6f48-48a0-9981-e16233df84a3%7D/11340>. Päivitetty 31.8.2016. Luettu 1.3.2016.

Mikkelin Vesilaitos. Vesilaitoksen historiaa. Www-historiikki. <http://www.mikkelinvesi.fi/historia>. Ei päivitystietoa. Luettu 10.2.2016.

Mipro markkinointi. Kuvia jätevesiprosessista.

Mipro Oy a. MiSO-puhdistamo. Esite.

Mipro Oy b. MiSO-kaukokäyttö. Esite.

Mipro Oy c. REGO. Esite.

Mipro Oy d. Turvallisuuden ja ympäristötekniikan luotettava osaaaja ja yhteistyökumppani. Www-yritysesittely. Mikkelin. <http://www.mipro.fi/yritys>. Ei päivitystietoa. Luettu 19.1.2016.

Nissinen Miia 2014. Typenpoiston tehostaminen kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa membraanibioreaktorin avulla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Lappeenranta. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2014120350401>. Päivitetty 3.12.2014. Luettu 21.1.2016.

Nastolan kunta. Vesihuoltolaitos. Www-tiedote. <http://www.nastola.fi/fi/palvelut/vesihuoltolaitos>. Ei päivitystietoa. Luettu 14.3.2016.

Nylander, Joni 2015. Jätevesien käsittely laivalla. Opinnäytetyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/87865/Nylander_Joni.pdf?sequence=1

Oregon State University. Microplastic. Www-kuva. <https://www.flickr.com/photos/oregonstateuniversity/21282786668>. Ei päivitystietoa. Lainattu 1.4.2016.

Parikkalan kunta ym. 2015. Membraanitekniikan hyödyntäminen kunnallisten jätevesien puhdistuksessa. Www-raportti. <http://www.parikkala.fi/loader.aspx?id=4ad37d89-b03f-4ff9-aafb-79661417d99e>. Päivitetty 3.3.2015. Luettu 10.2.2016.

Pentair. X-Flow Compact 33V membrane module by Pentair. Www-kuva. <http://xflow.pentair.com/~media/websites/x-flow/products/compact%2033v/compact33v%20square%20image.png>. Päivitetty 23.9.2015. Lainattu 22.3.2016.

Pinnekamp, Johannes & Friedrich, Harald 2003. Membrane Technology for Waste Water Treatment. 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. http://www.fiw.rwth-aachen.de/neo/fileadmin/pdf/membranbuch/GB_Membranbuch_300106.pdf. Päivitetty 2003. Luettu 9.2.2016.

Prioriteettiainedirektiivi 2013/39/EU. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:226:0001:0017:EN:PDF>. Julkaistu 28.4.2013. Luettu 26.4.2016.

Päätös ESA-2004-Y-111-121. Anttolan jätevedenpuhdistamon ympäristölupa. <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BA0342521-810D-401D-BD93-34A548BD8E7C%7D/89822>. Annettu 11.3.2005.

Päätös 137/05/1. Sunilan ja Mussalon jätevedenpuhdistamoiden ympäristölupa. <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B7AE4394E-70AE-4F5C-B23C-F5E8F73E2BEF%7D/83522>. Annettu 16.12.2005. Luettu 26.1.2016.

Päätös ESA-2005_Y-107-121. Haukivuoren jätevedenpuhdistamon ympäristölupa. <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B4592BB2D-FCF5-47D7-B060-910C8BEC3F88%7D/89771>. Annettu 21.3.2006. Luettu 26.2.2016.

Päätös KAS-2005-Y-461-121. Suomenniemen jätevedenpuhdistamon ympäristölupapäätös. <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BD593C97-BF28-408B-B4D0-C5950255BD31%7D/82765>. Annettu 20.6.2006. Luettu 26.2.2016.

Päätös 39/2011/1. Ristiinan jätevedenpuhdistamon ympäristölupapäätös.
http://www.avi.fi/documents/10191/56914/isavi_paatos_39_2011_1-2011-4-8.pdf.
 Annettu 8.4.2011. Luettu 26.2.2016.

Päätös 87/2011/1. Mikkelin Kenkäveronniemen jätevedenpuhdistamon ympäristölupapäätös. http://www.avi.fi/documents/10191/56914/isavi_paatos_87_2011_1-2011-9-22.pdf. Annettu 22.9.2011. Luettu 26.2.2016.

Päätös 1/2012/1. Mikkelin Metsä-Sairilan jätevedenpuhdistamo.
http://www.avi.fi/documents/10191/56912/isavi_paatos_1_2012_1-2012-1-12.pdf.
 Annettu 12.1.2012. Luettu 26.2.2016.

Pöyry Finland Oy 2011. Vesihuoltolaitosten toimintakertomukseen liitettävät perustiedot ja tunnusluvut. Raportti. Maa- ja metsätalousministeriö.

Routio, Pekka 2007. Tiedon hakeminen teksteistä. Aalto-yliopiston taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu. <http://www2.uiah.fi/projects/metodi/040.htm>. Päivitetty 3.8.2007. Luettu 30.3.2016.

Siljamäki, Heikki 2012. Muista nämä 5 sääntöä, kun valitset KPI-mittareita.
<http://www.tekniikkatalous.fi/tyoelama/2012-11-06/Muista-n%C3%A4m%C3%A4-5-s%C3%A4nt%C3%A4nt%C3%B6%C3%A4-kun-valitset-kpi-mittareita-3311404.html>.
 Päivitetty 6.11.2012. Luettu 27.1.2016.

Suomen Vesihuoltolaitos ry a. Miten jätevesi puhdistetaan? Www-sivu.
http://www.vvy.fi/vesihuolto_linkit_lainsaadanto/jatevedet/jatevesien_puhdistaminen/jatevedenpuhdistus. Ei päivitystietoa. Luettu 27.1.2016.

Suomen Vesilaitosyhdistys ry b. Kotkan Mussalon puhdistamo. Www-sivu.
http://www.vvy.fi/vesihuolto_linkit_lainsaadanto/jatevedet/jatevesien_puhdistaminen/mussalo. Ei päivitystietoa. Luettu 26.1.2016.

Suomen Vesihuoltolaitos ry c. Jätevesien käsittely.
http://www.vvy.fi/vesihuolto_linkit_lainsaadanto/jatevedet/uusi_opas_kalvobioreaktoriden_eli_mbr-reaktoreiden_suunnitteluun_ohjaukseen_ja_hankintaan.4425.news. Ei päivitystietoa. Luettu 1.2.2016.

Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013. Vesihuoltojärjestelmän tunnuslukujärjestelmän raportti 2013. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 36. ISBN 978-952-6697-05-5.

Svahn, Nina 2013. Mikromuovi on Itämeren uusi uhka. Www-artikkeli.
http://yle.fi/uutiset/mikromuovi_on_itameren_uusin_uhka/6757478. Päivitetty 18.7.2016. Luettu 1.4.2016.

Tekes. Smart Effluents- Uuden sukupolven jäteveden käsittelyn ratkaisut vastaamaan vuoden 2050 vaatimuksia. Www-hankekuvaus.
https://extranet.tekes.fi/ibi_apps/WFServlet?IBIF_webapp=/ibi_apps&IBIC_server=EDASERVE&IBIWF_msgviewer=OFF&IBIF_ex=O_PROJEKTI_RAP1&CLICKED_ON=&YPROJEKTI=12174260&YTARKASTELU=Z&YKIELI=E&YHANKETYY PPI=11&IBIAPP_app=opendata&YMUOTO=HTML. Ei päivitystietoa. Luettu 21.1.2016.

Teollisuuden Vesi 2014. Aktiivilietelaitos – Vanhaa vai uutta tekniikkaa? Www-tiedote. <http://www.teollisuudenvesi.fi/fi/tiedote/essen/>. Päivitetty 19.6.2014. Luettu 27.1.2016.

Turkki, Reijo 2016. Hankintailmoitus. Hilma julkiset hankinnat. <http://www.hankintailmoitukset.fi/fi/notice/view/2016-000711/>. Päivitetty 13.1.2016. Luettu 10.2.2016.

Vieno, Niina 2007. Occurrence of Pharmaceuticals in Finnish Sewage Treatment Plants, Surface Waters, and Their Elimination in Drinking Water Treatment Processes. Väitöskirja. Tampereen Teknillinen Yliopisto. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-200810021012>. Luettu 28.1.2014.

Vieno, Niina 2010. Lääkeaineet vesistöjemme kuormittajina. Vesitalous-lehti. 4/2010. Artikkelit. http://www.vesitalous.fi/wp-content/uploads/2013/05/4_2010.pdf. Päivitetty 2010. Luettu 26.5.2016.

Vieno, Niina 2013. Suomalaiset syövät kipulääkkeitä kuin leipää! Blogi-kirjoitus. <http://www.envieno.com/2013/03/suomalaiset-syovat-kipulaakkeita-kuin-leipaa/>. Päivitetty 5.3.2013. Luettu 28.1.2016.

Wikipedia 2008. Plastic pellets. Www-kuva. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nurdles_01_gentlemanrook.jpg. Päivitetty 12.4.2008. Luettu 1.4.2016.

Wikipedia 2013. Beach in Sharm el-Naga. Www-kuva. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/be/Beach_in_Sharm_el-Naga03.jpg/800px-Beach_in_Sharm_el-Naga03.jpg. Päivitetty 3.12.2010. Lainattu 1.4.2016.

Wikimedia commons. MBR ja CAS kaaviokuva. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/MBRvsASP_Schematic.png. Päivitetty 8.10.2014. Lainattu 16.3.2016.

Yli-Kyyny, Timo 2014. Hiekanerotuksen ja hiekkapesuprosessin kehittäminen Turun seudun Puhdistamo Oy:ssä. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73230/Yli-Kyyny_Timo.pdf?sequence=1. Luettu 26.1.2016.

Ympäristöhallinto 2013 a. Harmaiden jätevesien käsittely. http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset_jarjestelmat_LVI/Kiinteiston_jatevesien_kasittely/Puhdistamosivusto_jatevesien_kasittelymenetelmista/Harmaiden_jatevesien_kasittely. Päivitetty 2.11.2015. Luettu 27.1.2016.

Ympäristöhallinto 2013 b. Kaikkien jätevesien käsittely. http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset_jarjestelmat_LVI/Kiinteiston_jatevesien_kasittely/Puhdistamosivusto_jatevesien_kasittelymenetelmista/Kaikkien_jatevesien_kasittely. Päivitetty 28.10.2015. Luettu 27.1.2016.

Ympäristöhallinto 2013 c. Tietoa yhdyskuntien jätevesien puhdistuksesta. Puhdistamon tunnusluvut. Verkkopalvelu.

https://raportit.ymparisto.fi/Raportit/_layouts/ReportServer/RSViewerPage.aspx?rv:RelativeReportUrl=/Raportit/SYKE/Puhdistamon%20tunnusluvut.rdl&Source=https%3A%2F%2Fraportit.ymparisto.fi%2Fraportit%2FSYKE%2FForms%2FAllItems.aspx&DefaultItemOpen=1&rs:Command=Render&rv:Toolbar=Full&rv:HeaderArea=None. Ei päivitystietoa. Luettu 1.3.2016.

Ympäristöministeriö 2012. "Itämeren suojelun kustannusten, hyötyjen ja ohjauskeinojen arviointi" ja "Kustannustehokkaat ohjauskeinot Itämeren suojelussa". Hankkeiden yhteenveto. <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BD709FEF5-3B19-4ECA-8A31-8C973CE39464%7D/24072>. 8.11.2012. Luettu 28.1.2016.

Zena membranes. Standard hollow fiber membrane module. Www-kuva. <http://www.zena-membranes.cz/index.php/news>. Ei päivitystietoa. Lainattu 25.1.2016.

Selvitysten vesihuoltolaitokset

Nro	Vesihuoltolaitos
1	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY
2	Hyvinkään Vesi
3	Hämeenlinnan seudun Vesi Oy
4	Iisalmen Vesilaitos
5	Imatran Vesi
6	Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy
7	Joensuun Vesi
8	Kajaanin Vesi
9	Kemin Vesi Oy
10	Liikelaitos Kouvolan Vesi
11	Kuopion Vesi Liikelaitos
12	Kymen Vesi Oy
13	Lahti Aqua Oy
14	Lappeenrannan Energia Oy
15	Oulun Vesi
16	Pietarsaaren Vesi
17	Porin Vesi
18	Porvoon Vesi
19	Raahen Vesi Oy
20	Riihimäen Vesi
21	Savonlinnan Vesi
22	Seinäjoen Vesi
23	Tampereen Vesi
24	Turun seudun puhdistamo Oy
25	Inarin Lapin Vesi Oy
26	Janakkalan Vesi
27	Kemijärven kaupungin vesi- ja viemärlaitos
28	Nastolan vesihuoltolaitos*
29	Taivalkosken kunnan vesihuoltolaitos
30	Tervolan Vesi Oy

*1.1.2016 lähtien osa Lahti Aqua Oy:tä (Nastolan kunta)

Puhdistustulosselvitys

Vesihuoltolaitos	Lupaindeksi [%]	Huonoin puhdistustulos [%]	Referenssiarvo [%]
3	80	Kokonaistypen reduktio 19–62	70
		NH ₄ ⁺ nitrifikaatioaste 26–99	90
5	81	Kokonaistypen reduktio 11	70
		NH ₄ ⁺ nitrifikaatioaste 54	90
9	95	Kokonaistypen reduktio 8	70
		NH ₄ ⁺ nitrifikaatioaste 14	90
10	85	Kokonaistypen reduktio 42–74	70
		Kokonaifosforin reduktio 85–94	90–96
14	81	Kokonaistypen reduktio 1–70	70
		NH ₄ ⁺ nitrifikaatioaste 8–88	90
		Kokonaifosforin reduktio 85–96	90–96
		Kiintoaineen reduktio 80–97	90
15	60	Kokonaistypen reduktio 7–95	70
		NH ₄ ⁺ nitrifikaatioaste 10–49	90
		Kokonaifosforin reduktio 50–95	90–96
		BOD _{7ATU} reduktio 48–98	90–96
		COD _{Cr} reduktio 48–92	75–85
		Kiintoaineen reduktio 49–98	90
16	92	Kokonaistypen reduktio 29	70
		NH ₄ ⁺ nitrifikaatioaste 27	90
20	79	-*	-
22	85	Kokonaistypen reduktio 44–64	70
		NH ₄ ⁺ nitrifikaatioaste 76–90	90
23	84	Kokonaistypen reduktio 17–73	70
		NH ₄ ⁺ nitrifikaatioaste 29–81	90
26	95	-*	-

*ei ollut selvästi referenssiarvoista poikkeavia arvoja

Energiankulutus- ja ohitusindeksiselvitys

Nro	Energian käyttö [kWh/a]	Käsitelty jätevesi [m ³ /a]	Ohitusvesi [m ³ /a]	Ohitusindeksi [%] (2)	Energian- kulutus [kWh/m ³] (3)
1	12 120 000 (os)	96 320 553	-	-	0,13
2	-	3 745 420	19	0,00051	-
	-	15 538	-		
3	-	282 488	434	0,15	-
	-	354 772	-	-	-
	-	9 035 100	1 420	0,016	-
4	-	2 046 340	2 220	0,11	-
5	-	4 759 290	-	-	-
6	-	226 341	155	0,068	-
		14 205 101	5 100	0,036	
7	-	6 400 804	-	-	-
	-	114 821	-	-	-
	-	108 836	-	-	-
	-	277 747	-	-	-
8	-	100 740	-	-	-
	-	3 267 596	-	-	-
9	820 000 (os)	3 072 288	-	-	0,27
10	-	4 906 600	-	-	-
	-	6 008 388	-	-	-
11	-	136 136	-	-	-
	-	45 489	-	-	-
	2 200 000	7 268 100	619		
	-	37 716	1	0,0027	-
	-	42 913	-	-	-
12	-	142 446	-	-	-
	-	312 405	-	-	-
	-	22 325	-	-	-
13	-	5 872 799	8 183	0,14	-
	-	6 861 521	7 730		-
	-	1 200 124	-	-	-
14	-	38 325	-	-	-

Energiankulutus- ja ohitusindeksiselvitys

Nro	Energian käyttö [kWh/a]	Käsitelty jätevesi [m ³ /a]	Ohitusvesi [m ³ /a]	Ohitusindeksi [%] (2)	Energian- kulutus [kWh/m ³] (3)
	-	326 074	1	0,00031	-
	-	5 438 300	-	-	-
	-	51 224	-	-	-
15	80 000 (os)	554 712	-	-	0,14
	-	118 800	-	-	-
	6 060 000 (os) + 1 320 000 (ol)	17 476 933	-	-	0,42
	50 000 (os)	72 002	-	-	0,69
16	990 000 (os) + 770 000 (ol)	3 367 653	-	-	0,52
17	-	100 421	4	0,0040	-
	-	54 505	-	-	-
	-	11 165 361	-	-	-
	-	115 582	-	-	-
18	1 580 000 (os)	4 067 118	-	-	0,39
	60 000 (os)	27 740	-	-	2,16
	40 000 (os)	57 420	-	-	0,70
	40 000 (os)	5 840	-	-	6,85
19	710 000 (os) + 370 000 (ol)	1 646 104	-	-	0,66
20	-	4 608 600	1 889	0,041	-
21	1 410 000 (os)	3 247 488	-	-	0,43
22	2 970 000 (os)	5 796 657	-	-	0,51
	290 000 (os)	149 325	-	-	1,94
23	-	58 768	-	-	-
	-	577 770	-	-	-
	-	6 007 406	-	-	-
	-	27 104 987	-	-	-
24	_*	_*	_*	_*	_*
25	-	56 165	-	-	-
	-	395 207	-	-	-

Energiankulutus- ja ohitusindeksiselvitys

Nro	Energian käyttö [kWh/a]	Käsitelty jätevesi [m ³ /a]	Ohitusvesi [m ³ /a]	Ohitusindeksi [%] (2)	Energian- kulutus [kWh/m ³] (3)
26	-	1 340 090	618	0,046	-
27	290 000 (os) + 150 000 (ol)	907 094	-	-	0,49
28	-	1 200 124	-	-	-
29	130 000 (os) + 180 000 (ol)	187 026	-	-	1,66
30	200 000 (os)	132 860	-	-	1,51

(os)= ostettu sähkö, (ol)= ostettu lämpö

*raporttipalvelu ei näyttänyt ollenkaan vuoden 2013 raporttia puhdistamolta

$$OI = \frac{OV \left[\frac{m^3}{a} \right]}{(OV + JV_K) \left[\frac{m^3}{a} \right]} * 100\% \quad (2)$$

jossa

OI= ohitusindeksi

OV= Ohitusvesi

JV_K= Käsitelty jätevesi

$$EJV_K = \frac{E \left[\frac{kWh}{a} \right]}{JV_K \left[\frac{m^3}{a} \right]} = X \frac{kWh}{m^3} \quad (3)$$

jossa

EJV_K= Energiankulutus per käsitelty jätevesikuutio

E= Energiankulutus vuodessa

JV_K= Käsitelty jätevesi vuodessa

(Yhtälöt (2) ja (3) mukailtu: Suomen Vesihuoltolaitos ry 2013, 71, 7)

Membraanibioreaktorin teho poistamaan lääkaineita

Vesityyppi	Membraanin tiedot ja olosuhteet	Yhdiste	Reduktio [%]
Jätevesi	Täyden skaalan onttokuitumembraani Koch Buron, MA 235 m ² , huokoskoko 0,1–0,2µm, SRT: 10–15 pv, HRT= 1 pv, MLSS= 7,5–8,5 g/l	Ibuprofeeni	~100
		Karbamatsepiini	24
		Diklofenaakki	43
		Trimetropiini	30
		Sulfametoksatsoli	60
		Estroni	~100
		Estrioli	~100
		Bisfenoli-A	~100
Sairaalan jätevesi	Pilotti-skaalan upotettu PES ultrasuodatus tasomembraani, MA 7 m ² , huokoskoko 38 nm, SRT: 30–50 pv; MLSS: 2 g/l	Karbamatsepiini	-6
		Trimetropiini	96
		Sulfametoksatsoli	7
		Atenololi	99
Sairaalan jätevesi	Täyden skaalan 5 Kubota EK 400 tasomembraani, virtausnopeus 130 m ³ /d	Ibuprofeeni	>80
		Karbamatsepiini	<20
		Diklofenaakki	<20
Jätevesi	Pilotti-skaalan upotettu LF Kubota SMU tasomembraani, MA 8 m ² , huokoskoko 0,40 µm, MLSS 9–20 g/l, virtausnopeus 3 m ³ /d	Ibuprofeeni	~100
		Karbamatsepiini	~ -100
		Diklofenaakki	~75
		Trimetropiini	~0
		Estroni	~100
		Estrioli	~100
		Testosteroni	~100
		Naprokseeni	~100
		Tetrasykliini	~96
		Furosemiidi	~90
		Hydroklooritiatsidi	~40
Metoprololi	~42		

MA= membrane area, membraanin pinta-ala

SRT= Sludge retention time, lieteikä

HRT= hydraulic retention time, hydraulinen retentioaika

MLSS= Mixed liquor suspended solids

MBR-prosessista mitattavia asioita

Mitattava asia	Lisätietoa
Lähtevästä vedestä liukoinen fosfori	Kertoo puhdistusprosessin fosforin saostuksen tehokkuudesta. Kiinnostus fosforinpoiston tehostamiseen liittyy ympäristötehokkuuteen ja kiristyviin lupaehtoihin
Fosforin, kiintoaineen yms. reduktio	Mittaus tulevasta ja lähtevästä vedestä (lupa-arvo) tai mittaus ennen ja jälkeen kalvon (kalvon erotuskyky)
Lähtevän veden typpipitoisuus, typen reduktion mittaukset	Tulevaisuudessa myös typenpoistoa tulee tehostaa, varsinkin uusille puhdistamoille asetetaan tiukempia ehtoja. Puhdistustekniikka on kehittynyt vuosikymmenten saatossa. Typenpoiston taso on suomalaisilla puhdistamoilla tällä hetkellä keskimäärin alhainen. (ks luku 5.2.3.)
Lähtevän veden sameus/ väri (Bergman 2016)	Puhdas vesi on kirkasta ja väritöntä. Väriä voi aiheuttaa esimerkiksi rauta ja sameutta kiintoaine.
Kalvon puhdistukseen syötetty ilma	Ilmamäärät eri suuttimilla. Tästä voidaan nähdä, toimivatko kaikki suuttimet asianmukaisesti ja jos jokin suutin esimerkiksi on tukossa.
Kalvon karkeailmapuhdistuksen energiankulutus	Usein eniten energiaa MBR:ssä vie membraanin ilmastus (ks luku 5.1.2.)
Membraanibioreaktorin ilmastuksen energiankulutus yhteensä	Membraanin ilmastus + biologian ilmastus
Membraanibioreaktorin energiankulutus	Voidaan seurata, kuinka ison osan koko laitoksen energiankulutuksesta vie membraanibioreaktori
Pumppujen energiankulutus	Mittausten perusteella voidaan arvioida, toimivatko pumput hyvän hyötysuhteen alueella. Pumppaus on yksi merkittävä energiankuluttaja MBR:ssä, varsinkin ulkoisissa membraaniyksiköissä (permeaattipumppaus, influenttivirtaus, syöttöpumppaus ja niin edelleen) (ks luku 5.1.2.)
Lietteen kierrätyksen energiankulutus	Membraanibioreaktorissa merkittävä energiankuluttaja (ks luku 5.1.2.)
Kokonaisprosessin energiankulutus (siitä kun jätevesi tulee puhdistamolle siihen kun liete lähtee puhdistamolta)	Tämän avulla pystytään seuraamaan laitoksen energiankulutuksen kehitystä
Kalvon puhdistuskemikaalin syöttömäärä ja kaikki prosessiin syötettävien kemikaalien määrät	Voidaan seurata kemikaalinkulutusta ja kohdistaa säästötoimia
Lämpötila, pH, liuenneen hapen ja liuenneen kiintoaineen määrä eri osissa ilmastusallasta	Vaikuttavat aktiivilieteprosessin toimintaan (Nissinen 2014, 27–28, 67–68).
Lähtevän veden mikrobimittaus	Liittyy ympäristötehokkuuteen, hygieeninen vesi on turvallista purkaa vesistöön.

MBR-prosessista mitattavia asioita

Mitattava asia	Lisätieto
Lähtevän veden mikropollutanttimääri-tykset	Lääkejäämät, raskasmetallit ja niin edelleen, laboratorionko-keella. Kertoo MBR-prosessin toimintatehosta ja ympäristö-tehokkuudesta.
Kalvon likaantumista mittaava TMP-mittaus (Nissinen, 64).	Kalvon (pysyvän ja pitkäaikaisen) likaantumisen ehkäisy ja kalvon riittävä puhdistaminen on tärkeää MBR:n toimintaky-vyn ja membraanien käyttöiän pidentämisen vuoksi

Jatkuvatoimisin online-mittarein mitattavissa olevia asioita:

- Ammoniumtyppi
- Kokonaistyyppi
- Kokonaisfosfori
- Fosfaatti PO₄-P
- COD
- Johtokyky
- Kiintoainepitoisuus
- Klooripitoisuus
- Lietepatjan korkeus ja profiili
- Liukoinen fosfori
- Typpiyhdisteet NO_x
- Liuenneen hapen pitoisuus
- Sameus

(Christian Berner 2016.)