

Ramboll Finland Oy

MBR-OPAS

MBR-prosessien suunnittelu, ohjaus ja hankinta Suomessa



Ilari Lignell, Anna Mikola, Ville Venejärvi
15.5.2015

Sisältö

1. Johdanto.....	5
2. MBR-tekniikka.....	8
2.1 Kalvotyypit ja -materiaalit	8
2.2 Kalvosuodatuksen periaate	9
2.3 Kalvopaine-ero, vuo ja permeabiliteetti.....	10
2.4 Suodatuksen kapasiteettiin vaikuttavia asioita	12
3. MBR-prosessin toiminta.....	15
3.1 Kalvoreaktorin toteutus	15
3.1.1 Periaate.....	15
3.1.2 Sijoittelu.....	15
3.1.3 Kierrätys.....	16
3.1.4 Suodatus	16
3.2 Kalvojen tukkeutuminen ja puhdistus.....	16
3.2.1 Kalvojen tukkeutumistavat	16
3.2.2 Mekaaninen puhdistus – relaksaatio tai vastavirtapesu	19
3.2.3 Ilmakuplapuhdistus	19
3.2.4 Kemialliset pesut	20
3.3 MBR-prosessin energian tarve.....	21
3.4 Lietteen tuotto ja ominaisuudet	23
3.4.1 Biologisen lietteen kasvu MBR-prosessissa	24
3.4.2 Lietteen laskeutuvuus.....	26
3.4.3 Lietteen kuivattavuus	26
3.4.4 Flokkikoko lietteessä	26
3.4.5 Lietteen EPS-aineet	27
3.5 MBR-prosessissa saavutetut puhdistustulokset	27
3.5.1 Kiintoaine ja ravinteet	27
3.5.2 Haitta-aineet	28
3.5.3 Hygieeninen laatu.....	28
4. MBR-prosessin mitoitus	30
4.1. MBR-prosessin mitoitusperiaatteet.....	30
4.2. Tilantarve MBR vs. CAS.....	31
4.3 MBR:n hydraulinen suunnittelu.....	32

4.3.1 Tarvittava kalvoala	32
4.3.2 Ratkaisut huippuvirtaamien huomioimiseen.....	33
4.4 Ilmastuksen mitoitus	33
4.5 Kemikaalipesujen mitoitus	35
4.6 Käytettävät kemikaalit (pH:n säätö ja fosforin saostus).....	36
4.7 Esikäsittelyn tarve	38
4.8 Esiselkeytyksen käyttö MBR-prosessin yhteydessä	42
4.9 Lietteen tuotto ja käsittely	42
4.9.1 Lietteen ominaisuudet.....	42
4.9.2 MBR-pilotin lietekokeet.....	43
5. Käytön optimointi	45
5.1 Käyttökustannusten optimointi	45
5.1.1 Ilmamäärä	45
5.1.2 Esimerkkejä ilmamäärän optimoinnista	45
5.1.2 Kierrätysvirtaamien ja pumppausten optimointi	46
5.1.3 Käytettävien kalvoyksiköiden minimointi	46
5.1.4 Kemikaalipesujen minimointi.....	47
5.2 Lietteen käsittelyn optimointi.....	47
5.3. MBR-puhdistamon käyttö	48
5.3.1 MBR-puhdistamon työ määrä.....	48
5.3.2 Kalvojen toiminnan seuranta.....	48
5.3.3 Vaahtoamisen hallinta	48
6. MBR:n hankinta	50
6.1 Hankintakokonaisuus	50
6.2 Prosessivastuiden jakaminen.....	51
6.2 Takuuarvot.....	51
6.3 Esimerkki tarjouksen takuuarvoista	52
7. Yhteenveto	54
8. Kirjallisuus.....	56

Liitteet

LIITE 1 Yhteenveto selvityksen puhdistamoiden prosesseista

Oppaassa käytettyjen lyhenteiden ja termien selitykset

α	Ilmastuksen alpha-arvo, kuvaa hapensiirron suhdetta jätevedessä ja puhtaassa vedessä
AVL	Asukasvastineluku
BOD	biologinen hapenkulutus BHK (engl. biological oxygen demand)
CAS	perinteinen aktiivilieteprosessi (engl. conventional activated sludge)
CIP	altaassa tapahtuva kemikaalipesu (engl. cleaning in place)
clogging	kalvojen välitilan ja kalvomoduulien tukkeutuminen
COD	kemiallinen hapenkulutus KHK (engl. chemical oxygen demand)
CST	lietteen suodatuskoe (engl. Capillary suction time)
Da	Dalton, molekyyli­massan yksikkö
DSVI	laimennettu lieteindeksi (engl. diluted sludge volume index)
EPS	solun ulkopuoliset polymeerit (engl. extracellular polymeric substances)
EUROMBRA	EU-komission kehitysprojekti vuosina 2005-2008, Membrane bioreactor technology for advanced municipal wastewater treatment strategies
fouling	kalvohuokosten tukkeutuminen
HSY	Helsingin seuden ympäristöpalvelut -kuntayhtymä
LMH	kalvosuodatuksessa yleisesti käytetty kirjoitustapa vuon yksiköstä l/m ² h
MBR	kalvobioreaktori (engl. Membrane bioreactor)
MLSS	lietepitoisuus
NTU	Sameuden yksikkö (engl. Nephelometric Turbidity Unit)
PAC	polyalumiinikloridi
permeaatti	kalvon läpi suodattunut vesi
pmy	pesäkkeen muodostava yksikkö
Q_{kesk}	vuorokausikeskivirtaama
Q_{mit}	mitoitusvuorokausivirtaama
SAD_m	Kalvon ominaisilmastustarve puhdistukseen kalvoalaa kohden (engl. specific aeration demand)

SAD _p	Kalvon ominaisilmastustarve puhdistukseen permeaattivirtaamaa kohden (engl. specific aeration demand)
SMP	bakteerien tuottama liukoinen aine (engl. soluble microbial product)
SRT	lieteikä (engl. sludge retention time)
SS	kiintoaine (engl. suspended solids)
TMP	kalvopaine-ero (engl. transmembrane pressure), paine-ero kalvopinnan eri puolilla
TSS	Kiintoaine (engl. total suspended solids)
VSS	haihtuva osuus kiintoaineesta (engl. volatile suspended solids), kuvaa lietteen orgaanisen aineen määrää
vu	virtaama kalvopinta-alaa kohden aikayksikössä, (engl. flux)
VVY	Vesilaitosyhdistys
Y _{obs}	havaittu lietteen tuotto

1. Johdanto

Kalvobioreaktorit eli MBR (engl. Membrane Bioreactor)-prosessit ovat alkaneet yleistyä erityisesti Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Prosessin etuna on se, että biologinen osa puhdistamaa saadaan toteutettua huomattavasti pienemmässä tilavuudessa kuin perinteistä aktiivilieteprosessia (CAS, engl. Conventional Activated Sludge) käyttämällä. Tilan säästö perustuu kahteen asiaan: Jälkiselkeytysaltaiden tilavuus jää pois, koska kiintoaineen erotus tapahtuu kalvosuodatuksessa. Lisäksi ilmastusaltaan lietepitoisuutta voidaan kasvattaa huomattavasti, koska selkeytyksen kapasiteetti ei rajoita sitä. Tekniikan yleistyessä kalvosuodatusyksiköiden hinnat ovat laskeneet, mikä on edelleen kasvattanut kiinnostusta tekniikkaan. Myös käyttökustannukset ovat laskeneet erityisesti energiantarpeen osalta huomattavasti viimeisen viiden vuoden aikana. Kalvobioreaktorin etuna on myös se, että prosessista lähtevä vesi sisältää hyvin vähän kiintoainetta, sameus jopa alle 0,2 NTU. Lisäksi viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että nk. prioriteettiaineiden poistossa kalvobioreaktori on eduksi joko poistamalla aineita paremmin korkeamman lieteiän vuoksi tai antamalla paremmat edellytykset mahdollisien jatkokäsittelymenetelmien tehokkaalle toiminnalle.

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa MBR-tekniikkaa ei ole vielä juurikaan käytetty, Tanskaa lukuun ottamatta. Aivan lähiaikoina Suomessa on herännyt monessa paikassa kiinnostus tekniikkaa kohti. Suomessa ei voida kuitenkaan soveltaa Keski-Euroopassa tai Pohjois-Amerikassa yleisesti käytettyjä suunnittelu- ja ajotapaperiaatteita suoraan ilmasto-olosuhteiden ja osittain jätevedenkäsittelyn erityispiirteiden vuoksi. Kylmä ilmasto yhdistettynä runsaisiin hule- ja vuotovesiin johtaa niin alhaisiin jäteveden lämpötiloihin keväällä, ettei edes Alaskan MBR-laitoksilta löydy vastaavaa. Lisäksi Suomessa yleinen fosforin kemiallinen saostus ja tiukat fosforinpoistovaatimukset lisäävät mahdollisesti kalvojen tukkeutumista.

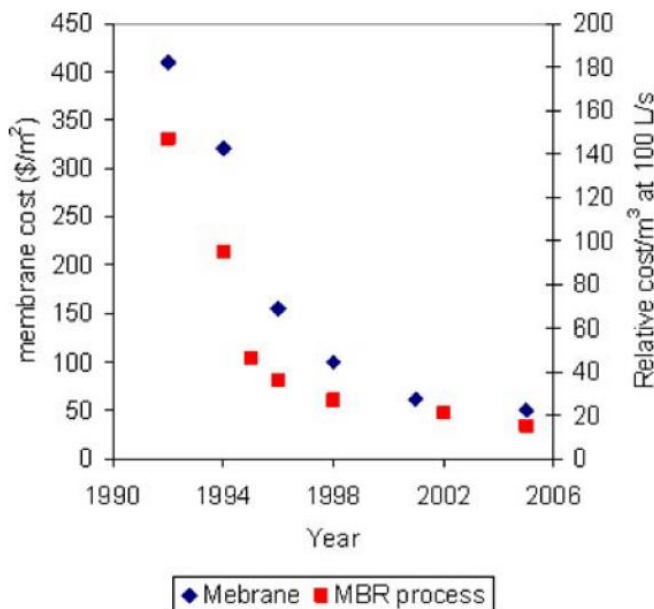
Tämä MBR-opas on toteutettu Ramboll Finland Oy:n kehitysprojektin yhteydessä. Työ toteutettiin diplomityönä ja opinnäytetyönä, joiden ohjaukseen osallistuvat aktiivisesti Rambollin asiantuntijat. Tällä oppaalla oli kolme tavoitetta:

- 1) esitellä suosituksia toteutus- ja mitoitusavoista MBR-prosesseille Suomen olosuhteisiin. Suositusten taustaksi esitetään tietoa toteutetuista MBR-laitoksista Pohjois-Euroopassa ja Ruotsissa sekä Suomessa toteutetuista piloteista. Tarkasteltavat kohteet on valittu niin, että prosessiveden lämpötila olisi mahdollisimman alhainen ja olosuhteet vastaisivat mahdollisimman paljon Suomen olosuhteita. Oppaassa esitellään erilaisia kalvovoyksikkötyyppejä, erilaisia reaktorityyppejä sekä hydraulisia ratkaisuja. Suomessa MBR-prosessin mitoitus maksimivirtaamalle johtaa suuriin investointeihin, varsinkin kun matalin lämpötila ja suurin virtaama ajoittuvat usein samalla jaksolle.
- 2) esitellä suosituksia prosessin ohjaukseen ja käyttöön. Prosessin energiankulutuksen kannalta erilaisilla ilmansyöttötavoilla kalvojen puhdistuksessa on suuri merkitys. Samoin suodatuksen ajotavoilla ja mitoituksella voidaan vaikuttaa tarvittavaan kemikaalipesumäärään.
- 3) antaa ohjeita MBR-prosessin hankinnassa tärkeistä erityispiirteistä. Koska monet MBR-prosessitoimittajat ottavat kokonaisvastuun prosessista, annetaan oppaan avulla kokonaisuudessaan myös edellytykset konsultille tai vesihuoltolaitoksille arvioida prosessitarjouksia.

Työn aikana vierailtiin Nordkanalin, Hünxen, Woffelsbachin ja Seelscheidin puhdistamoilla Saksassa sekä Nozay'n, Bettonin ja Avranches'n puhdistamoilla Ranskassa. Työn yhteydessä tutustuttiin myös pilot- tai demolaitoksiin Tukholmassa Henriksdalin puhdistamolla, Parikkalan, Vihdin Nummellan ja Mikkelin Kenkäveronniemen puhdistamoilla.

Tämä opas esittelee ensin kirjallisuuskatsauksen MBR-tekniikan yleisiin periaatteisiin ja toimintaan luvuissa 2 ja 3. MBR-prosessin mitoitukseen liittyviä asioita esitellään luvussa 4. Käytön optimointiin syvennyttään luvussa 5. Lukujen 4 ja 5 tiedot pohjautuvat pääosin tässä selvityksessä tarkasteltuihin MBR-laitoksiin, MBR-pilotlaitoksiin sekä selvityksen yhteydessä tehtyihin opinnäytetöihin erityisesti lietteen laadun osalta. Luvussa 6 esitellään MBR-prosessin hankintaan liittyviä erityisasiota. Lopuksi yhteenveto ja joitakin suosituksia esitetään luvussa 7. Oppaan lähdeluetteloon on pyritty keräämään tärkeimmät MBR-tekniikkaa käsittelevät kirjat ja julkaisut. Erityisen hyviä teoksia lisätiedon saamiseksi aiheesta ovat Judd & Juddin MBR Book vuodelta 2011, IWA:n julkaisu Membrane bioreactors for wastewater treatment vuodelta 2007 sekä Jelena Radjenovicin Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology vuodelta 2007. Lisätietoja MBR-lietteen laatuun liittyvissä kysymyksissä löytyy Ville Venejärven opinnäytetyöstä (<https://www.theseus.fi/handle/10024/87868>).

Oppaassa ei esitellä MBR-tekniikan kustannustietoja, koska niiden voidaan olettaa muuttuvan nopealla aikataululla. 1990-luvulta tähän asti kalvojen hinnat ovat laskeneet varsin nopeasti, kuten kuvasta 1 voidaan havaita. Tulevaa hintakehitystä investoinnin tai käyttökustannusten osalta on vaikea ennustaa, mutta jo nyt ollaan tilanteessa, että MBR-puhdistamo voidaan toteuttaa kustannuksiltaan samoin edellytyksin kuin perinteinen aktiivilieteprosessi.



Kuva 1. MBR-kalvojen hinnan kehitys vuodesta 1990. (Radjenovic ym 2008).

Kehitysprojektia rahoittivat työn toteuttaneen organisaation lisäksi Lappeenrannan energia, Mikkelin vesilaitos ja Tampereen vesi. Projekti sai myös VVY:n kehittämisrahaston avustusta. Projektin ohjausryhmässä toimivat seuraavat henkilöt:

Riitta Moisio	Lappeenrannan Energia Oy
Reijo Turkki ja Anne Bergman	Mikkelin Vesilaitos
Heikki Sandelin	Tampereen Vesi
Mari Heinonen	HSY (VVY:n nimeämä asiantuntija)

Ramboll Finland Oy:stä projektiin osallistuivat Ilari Lignell, Ville Venejärvi, Teemu Koskinen, Niko Rissanen, Jyri Rautiainen sekä Anna Mikola.

2. MBR-tekniikka

2.1 Kalvotyypit ja -materiaalit

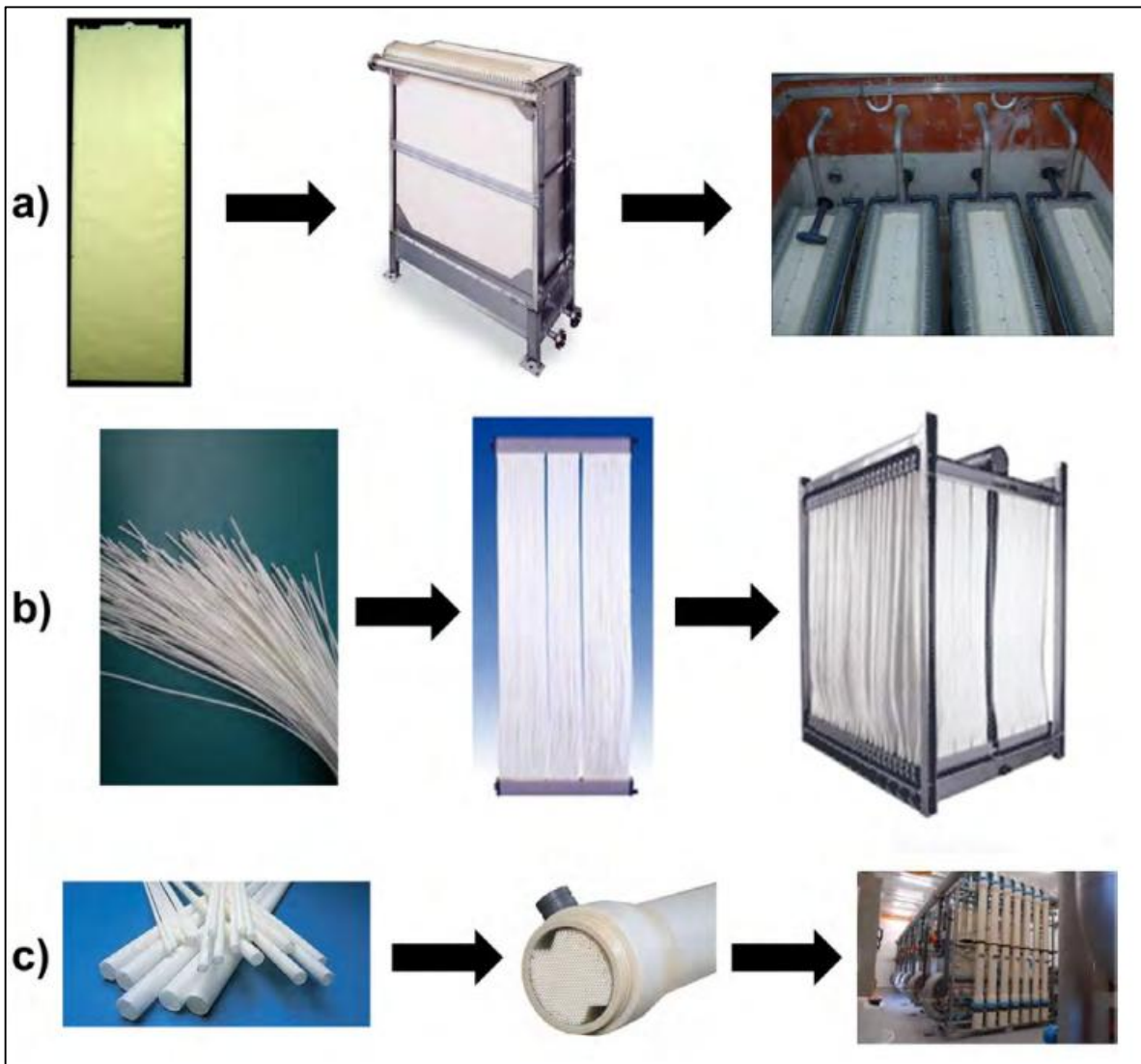
Kalvobioreaktorissa käytettävät suodatinkalvot voidaan jakaa

- tasomaisiin kalvoihin (flat sheet),
- onttokuitukalvoihin (hollow fiber) sekä
- putkimaisiin kalvoihin (multi tubular) (Judd ja Judd 2011).

Tasomaisia kalvoja valmistavat mm. Kubota sekä Toray ja onttokuitukalvoja mm. GE ja Puron. Lisäksi joitakin vuosia on markkinoilla ollut Alfa Lavalin nk. onttoasokalvo (Hollow sheet membrane), joka yhdistää tasomaisten ja onttokuitukalvojen ominaisuuksia. Myös Microdyn Nadir valmistaa tasomaisia kalvoja, joita käytetään onttokuitukalvojen toimintaperiaattein. Kalvojen geometrialla, asennustavalla sekä niiden sijainnilla ja asennolla veden virtaukseen nähden on suuri merkitys prosessin toiminnan kannalta. Näiden seikkojen lisäksi suodatusprosessiin vaikuttaa se, kuinka yksittäiset kalvot on asennettu ja sijoitettu kalvomoduuliin. Kalvojen muodostaman kalvomoduulin on oltava sellainen, että kalvopinnan tehokas (ilma)puhdistus on mahdollinen. Toisaalta kalvomoduuleissa tulee pyrkiä mahdollisimman suureen pakkaustiheyteen, joka määrittellään suodatuspinta-alana per tilavuusyksikkö. (Judd ja Judd 2011)

Nykyisin suosittavassa kalvobioreaktoriprosessissa, jossa kalvomoduulit upotetaan suoraan aktiivilietteeseen, käytetään tasomaisia ja onttokuitukalvoja. Putkimaisia kalvoja käytetään prosessissa, jossa suodatinyksikkö on erillään aktiivilietteestä. Kuvassa 2 on esitetty edellä mainitut kalvotyypit ja niistä muodostetut kalvomoduulit. Tasomaisissa ja onttokuitukalvoissa suodatus tapahtuu ulkoa-sisälle ja putkimaisissa kalvoissa päinvastoin (van Haandel ja van der Lubbe 2012).

Yleisemmin jätevedenpuhdistuksessa käytettävät kalvot valmistetaan orgaanisesta materiaalista, kuten selluloosapohjaisesta tai muunnelluista polymeereistä. Ensimmäiset markkinoille tulleet kalvot olivat yleensä valmistettu selluloosa asetaatista (CA), polysulfoonista (PS) tai polypropyleenistä (PP), mutta nykyisin valmistusmateriaalina suositaan polyvinyyliideenifluoridia (PVDF) tai polyeteenin (PE) muunnelmia (Judd ja Judd 2011). Erityisesti PVDF on jätevedenpuhdistukseen hyvin soveltuva materiaali, sillä se ei tukkeudu kovin helposti, verrattaessa muista materiaaleista valmistettuihin kalvoihin.



Kuva 2. Kalvomoduuleita, joissa tasomaisia kalvoja (a), onttokuitukalvoja (b) ja putkimaisia kalvoja (c) (Krzeminski, 2013)

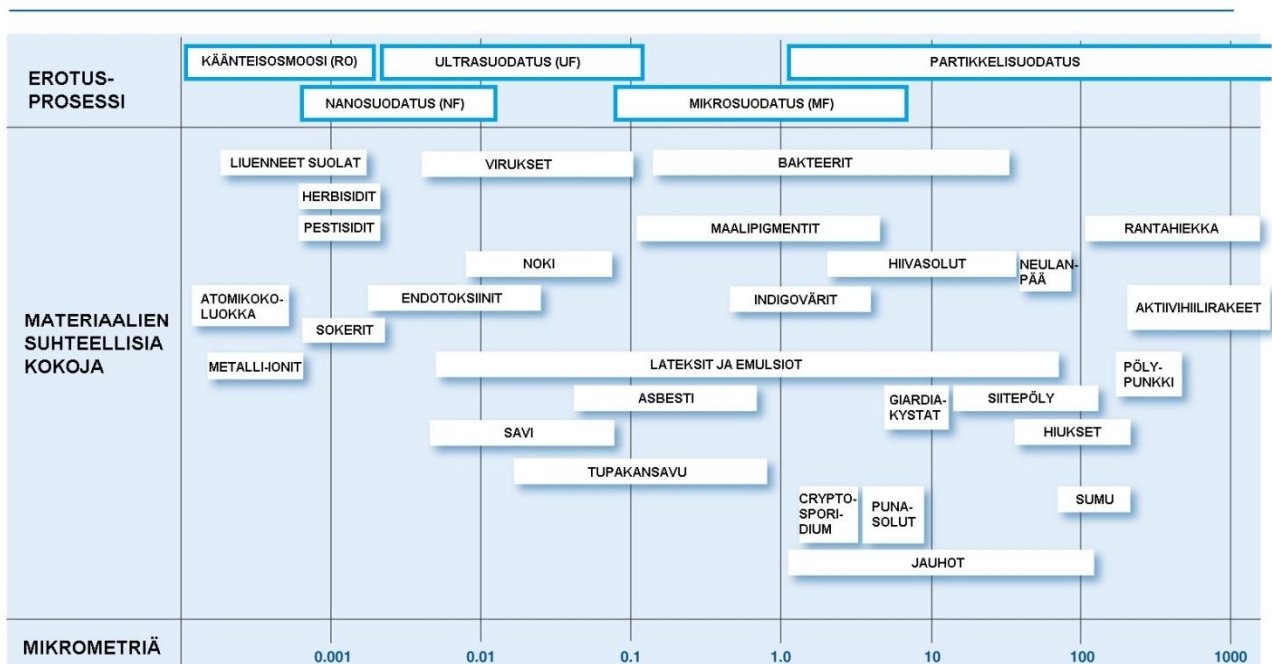
2.2 Kalvosuodatuksen periaate

Kalvobioreaktoriprosessissa käytettävien puoliläpäisevien kalvojen toiminta perustuu siihen, että suodatettaessa käsiteltävää jätevettä tietyt komponentit läpäisevät kalvon muiden pidäytyessä kalvon pintaan. Kalvosuodatuksella saadaan vedestä erotettua molekyylikokoisia, kolloidisia ja tarvittaessa jopa ionikokoisia epäpuhtauksia. Kalvon erotuskyky riippuu olennaisesti sen huokoskoosta. Huokoskoon perusteella suodatuskalvot voidaan jakaa neljään luokkaan: mikro-, ultra- ja nanosuodatus sekä käänteisosmoosi. Kalvot voidaan luokitella myös mm. pienimmän molekyyli­massan perusteella, jonka kalvo pystyy pidättämään. Molekyyli­massan yksikkö on Dalton (Da) ja 1 Da vastaa yhden vetyatomin massaa. (Judd ja Judd 2011)

Yhdyskuntajätevesien puhdistuksessa käytettävät kalvot toimivat yleensä mikro- tai ultrasuodatusalueella, huokoskoon ollessa tyypillisesti välillä 0,01 - 0,4 µm. Näin ollen kalvoilla saadaan erittäin tehokkaasti eroteltua kiintoaines sekä bakteerit. (van Haandel ja van der Lubbe 2012) On kuitenkin havaittu, että huokoskoon ollessa 0,2 µm tai pienempi, suodatuksessa erottuvat, bakteerien lisäksi, käytännöllisesti katsoen myös kaikki virukset (Rosenberg ym. 2001). Kalvon erotustehokkuus on huokoskoon lisäksi riippuvainen kalvon huokoisuudesta sekä materiaalista (Krzeminski 2013).

Mikrosuodatuksella saadaan tyypillisesti suodatettua makromolekyylejä, joiden molekyyli massa on suurempi kuin n. 50 000 Da, kun taas ultrasuodatuksella vastaava arvo on n. 5 000 Da. Käytettävien kalvojen huokoskoko vaikuttaa osaltaan suodatuksessa tarvittavaan paine-eroon, jonka avulla vesi saadaan suodatettua kalvon läpi. Kuvassa 3 on havainnollistettu eri suodatinkalvojen erotuskykyä.

VEDEN SUODATUSPEKTRI



Kuva 3. Eri kalvosuodatusprosessien erotuskyky.

2.3 Kalvopaine-ero, vuo ja permeabiliteetti

Kalvosuodatuksen keskeisimmät käsitteet ovat:

- kalvopaine-ero (TMP, transmembrane pressure)

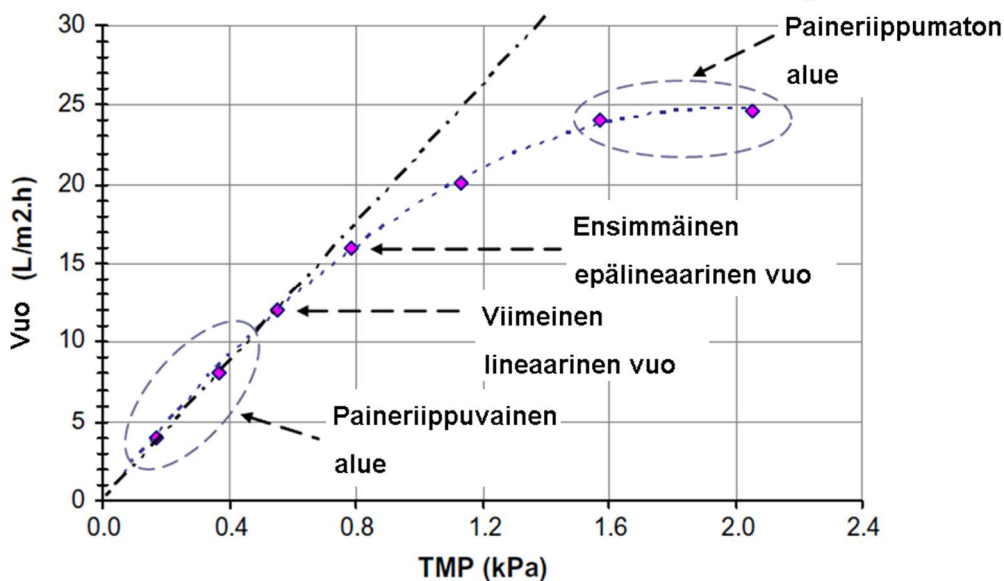
- vuo (FLUX)
- sekä permeabiliteetti (Judd ja Judd 2011).

Tyypillisesti suodatusprosessissa veden virtaus kalvon läpi saadaan aikaan paine-eron avulla, joka vallitsee kalvopinnan eri puolilla (Krzeminski 2013). Tätä paine-eroa kutsutaan kalvopaine-eroksi (transmembrane pressure). Kalvopaine-ero saadaan aikaan joko pumpaamalla tai painovoimaisesti.

Suodatuksessa permeaatin määrä ilmaistaan vuon avulla, joka määritellään yleensä virtaamana kalvoyksikön pinta-alaa kohden aikayksikössä. Vuo on voimakkaasti riippuvainen kalvopaine-erosta sekä kalvon hydraulisesta kokonaisvastuksesta, joka aiheutuu itse kalvosta sekä kalvon tukkeutumisesta aiheutuvasta vastuksesta. Kalvon aiheuttama vastus riippuu suuresti käytettävän kalvon huokoskoosta, mutta myös mm. kalvon valmistusmateriaalista sekä huokoisuudesta, eli huokosten pinta-alan suhteesta kalvon kokonaispinta-alaan. (Judd ja Judd 2011) Lisäksi suodatettavuuteen vaikuttaa olennaisesti myös suodatettavan aineen viskositeetti. Viskositeetin noustessa, suodatettavuus huononee ja päinvastoin.

MBR-prosessin mitoituksen kannalta tärkein parametri on kalvojen suodatuskapasiteetti eli vuo. Erytippisten kalvojen kapasiteettia kuvataan yleensä kriittisellä vuolla ja rajavuolla. Rajavuo on arvo, jonka yli vuota ei voi enää kasvattaa, vaikka painetta nostettaisiin. Rajavuo on suurin mahdollinen vuo, joka voidaan tietyissä olosuhteissa saavuttaa. Kriittinen vuo on taas suurin mahdollinen vuon arvo, joka ei vielä aiheuta kalvojen merkittävää tukkeutumista, vaan vuo ja kalvopaine-ero ovat lineaarisesti riippuvaisia toisistaan. Kuva 4 valottaa näitä kahta kalvojen kapasiteettia kuvaavaa arvoa. (Tiranuntakul ym., 2011, Judd ja Judd, 2011)

Tasokalvojen kriittiset vuot ovat kirjallisuuden tietojen perusteella välillä 15 – 20 LMH. (Achilli ym., 2011; Jhohir ym. 2011). Onttokuitukalvojen kriittiset vuot ovat samalla tasolla (Zsirai ym., 2013; Jinling ym., 2008; Navaratna ym. 2011).

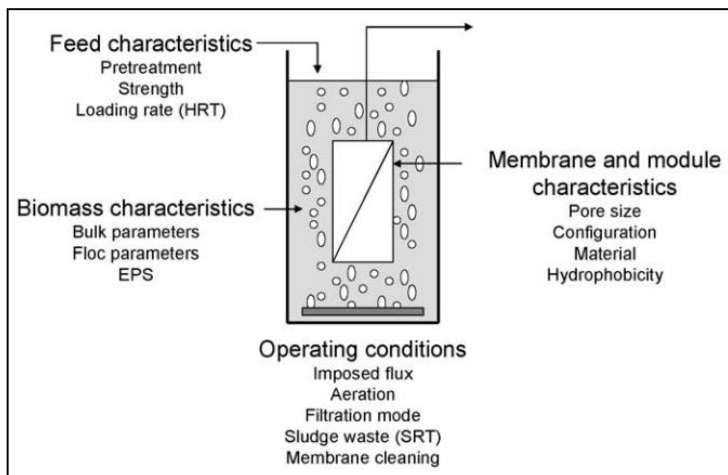


Kuva 4. Vuo ja kalvopaine-ero (TMP) kun vuota kasvatettiin 30 minuutin välein Kubotan tasomaisilla kalvoilla. (Tiranuntakul ym., 2011)

Permeabiliteetti eli kalvon läpäisykyky määritetään vuon ja kalvopaine-eron avulla. Koska permeabiliteetti ottaa huomioon vuon ja kalvopaine-eron, kuvaa se hyvin kalvon sen hetkistä suorituskykyä ja kuntoa, jolloin sen avulla on mahdollista optimoida prosessia ja esim. arvioida milloin kalvojen pesu on tarpeen suorittaa.

2.4 Suodatuksen kapasiteettiin vaikuttavia asioita

MBR-prosessissa suodatuksen aikana kalvon pintaan ja/tai sen huokosiin kertyy partikkeleita, jonka seurauksena kalvon suodatuskyky heikkenee. Tällaista kalvon tukkeutumista kutsutaan ns. fouling-ilmiöksi. Kalvojen tukkeutuminen näkyy näin ollen kasvavana kalvopaine-erona tai vähenevänä vuona eli permeaatin määränä, riippuen prosessin ajotavasta (Radjenovic ym. 2008). Suodatuksen kapasiteettiin vaikuttavat kolme päätekijää ovat tulevan jäteveden ja biomassan ominaisuudet, kalvon ominaisuudet sekä MBR-prosessin olosuhteet. Näin ollen MBR -prosessin suodatuksen tehokkuuteen vaikuttaa merkittävimmin prosessin aktiivilietteen suodatettavuus, joka määräytyy biomassan, tulevan jäteveden sekä prosessin ajotavan keskinäisestä vuorovaikutuksesta.. (Krzeminski 2013) Kuvassa 5 on havainnollistettu tukkeutumiseen vaikuttavia tekijöitä. Suurin vaikutus tukkeutumiseen on lieteillä, lämpötilalla sekä mikrobien tuottamisen solunulkopuolisten polymeerien määrällä. Lietepitoisuuden kasvu ei välttämättä lisää kalvojen tukkeutumista (LeClech ym. 2006). Lisäksi käsiteltävän jäteveden ominaisuudet vaikuttavat sen suodatettavuuteen. Ominaisuudet voivat vaihdella virtaamaolosuhteiden mukaan. Fosforin kemiallisen saostuksen esim. rautasuolalla on havaittu ainakin osittain parantavan suodatettavuutta (Dahlén, 2014).



Kuva 5. Tukkeutumiseen vaikuttavat tekijät (Le-Clech ym. 2006.)

Lieteikää pidetään erittäin merkittävänä tekijänä kalvojen tukkeutumisen kannalta, koska se vaikuttaa erittäin voimakkaasti biomassan ominaisuuksiin ja näin ollen myös suodatettavuuteen. On esimerkiksi havaittu, että pudottamalla prosessin lieteikä 10 päivästä 2 päivään, kalvojen tukkeutuminen on ollut jopa 10 kertaa runsaampaa.

Yksittäisistä parametreista, erityisesti solun ulkoisilla polymeereillä eli EPS-aineilla (extracellular polymeric substances) on havaittu olevan suuri merkitys kalvojen tukkeutumiselle. EPS-aineet ovat makromolekyylejä, joita bakteerit tuottavat metaboliensa seurauksena solujensa ympärille. Nämä EPS-aineet toimivat suojana, sitovat bakteereja yhteen biofilmissä ja tarvittaessa toimivat mm. hiililähteen tai energian varastona. EPS-aineet voidaan jakaa solun pinnalle sitoutuneeseen EPS-ainekseen sekä aktiivilietteessä vapaana olevaan liukoiseen EPS-ainekseen, jota kutsutaan usein SMP-aineksi (soluble microbial products). (LeClech ym. 2006)

Lämpötila vaikuttaa kalvojen kapasiteettiin muuttamalla viskositeettia. Kylmässä viskositeetti kasvaa. Permeabiliteetin on todettu kuitenkin laskevan enemmän kuin teoreettinen veden viskositeetin vaikutus. Tämän on arveltu johtuvan seuraavista seikoista:

- lietteen viskositeetti kasvaa enemmän kuin puhtaan veden viskositeetti
- flokkien hajoaminen alhaisessa lämpötilassa ja EPS-aineiden vapautuminen
- partikkeleiden kulkeutuminen pois kalvojen pinnalta hidastuu lineaarisesti lämpötilan laskiessa
- orgaanisen aineen hajoaminen hidastuu ja hajoamatonta liukoista tai kolloidista ainesta on enemmän. (Radjenovic ym. 2008).

Lisäksi lämpötilalla on havaittu selvä korrelaatio solun ulkopuolisten polymeerien määrään (EPS) MBR-prosesseissa niin, että kylmässä vedessä EPS-aineiden määrä kasvaa. Suurempaa EPS-aineiden määrää on selitetty liukoisten orgaanisten aineiden muodostumisella, EPS-aineiden hajoamisen hidastumisella sekä bakteeriston muuntumisella alhaisissa lämpötiloissa. EPS-aineiden määrän on havaittu kasvattavan kalvojen likaantumista ja sitä kautta vähentävän suodatuskapasiteettia. Viimeaikaisissa tutkimuksissa on todettu, että EPS-aineet voivat olla löyhästi tai tiukasti sidoksissa flokkiin. Erityisesti löyhästi sidoksissa olevat EPS-aineet aiheuttavat kalvojen tukkeutumista. (Wang ym. 2009) Kesällä tai muuten olosuhteissa, joissa mikrobien aktiivisuus ylittää tarjolla olevan ravinnon määrän, alkavat mikrobit hajottaa myös EPS-aineita. Talvella EPS-aineiden muodostumista voidaankin vähentää kasvattamalla lietepitoisuutta. Toisaalta runsaasti vaihtelevat prosessiolosuhteet voivat myös lisätä EPS-aineiden määrää mikrobien turvautuessa niihin ravinnevarastona. EPS-aineita voi myös vapautua lietteen laadun heikentyessä ja flokkien hajotessa.



PERUSASIAT KALVOSUODATUKSESTA MBR-PROSESSISSA

- MBR-prosesseissa yleisimmin käytössä tasomaiset ja onttokuitukalvot
- Tyypillinen MBR-kalvo erottaa vedestä kiintoaineen ja bakteerit, muttei kolloideja eikä liukoisia aineita
- Permeabiliteetti ottaa huomioon suodatetun veden määrän, kalvoalan ja tarvittavan paineen
- Kalvojen tukkeutuminen lisääntyy lyhyellä lieteiällä ja alhaisessa lämpötilassa. Myös jäteveden laatu vaikuttaa huomattavasti.

3. MBR-prosessin toiminta

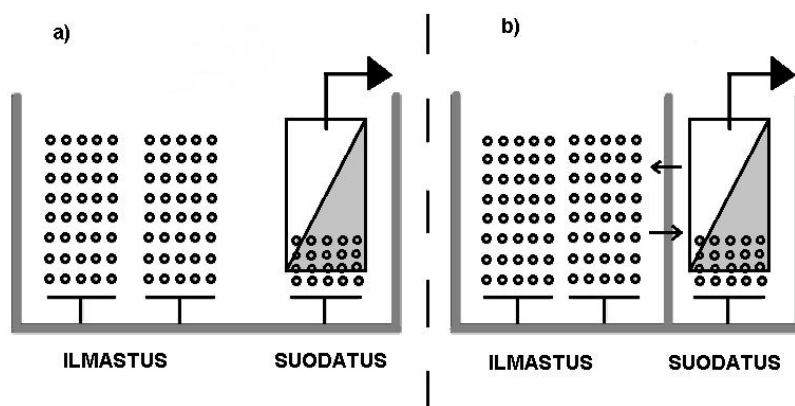
3.1 Kalvoreaktorin toteutus

3.1.1 Periaate

Kalvobioreaktori- eli MBR-prosessi on aktiivilieteprosessi, jossa lietteen ja veden erotus tapahtuu kalvosuodatuksen avulla. MBR-prosessissa käytettävillä suodatuskalvoilla siis korvataan perinteisessä aktiivilieteprosessissa käytettävät jälkiselkeytysaltaat. MBR-prosessin hapellisten ja anoksisien vaiheiden keskinäinen järjestys bioreaktorissa on prosessikohtainen ja määräytyy pitkälti puhdistustavoitteiden mukaan, aivan kuten perinteisessä aktiivilieteprosessissakin. Denitrifikaatioon tarvittavat anoksiset vaiheet on mahdollista sijoittaa ennen tai jälkeen ilmastettujen osioiden. Myös biologiseen fosforin poistoon tarkoitettu anaerobinen vaihe on mahdollista MBR-prosessissa. (Radjenovic ym. 2008) MBR-prosessin anoksiisiin tai anaerobisiin lohkoihin tuleviin palautuslietevirtoihin on kuitenkin kiinnitettävä enemmän huomiota kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa, koska MBR-altaassa on korkea happipitoisuus.

3.1.2 Sijoittelu

Ensimmäiset MBR-prosessit perustuivat erilliseen kalvosuodatukseseen, jossa suodatusyksikkö ei ollut upotettuna lietteeseen. Nykyään MBR-prosessit perustuvat yleensä lietteeseen upotettaviin kalvovyksiköihin (Lousada Ferreira 2011). Suurin yksittäinen syy tähän on upotettaviin kalvovyksiköihin perustuvan prosessin huomattavasti alhaisempi energiankulutus ja näin ollen parempi soveltuvuus suuren mittakaavan toteutuksiin (Judd ja Judd, 2011). Kalvovyksiköt on mahdollista upottaa joko suoraan ilmastusaltaaseen tai heti sen jälkeiseen erilliseen altaaseen (Krzeminski, 2013). Vaihtoehdot on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. MBR-prosessi, jossa kalvot ovat upotettuna suoraan ilmastusaltaaseen (a) sekä prosessi, jossa kalvot ovat erillisessä altaassa (b) (muokattu lähteestä Puhto, 2009).

MBR-prosessi voidaan suunnitella siten, että tarvittava suodatuskapasiteetti otetaan käyttöön tai pysäytetään perustuen tulevan veden määrään. Ohjaus perustuu yleensä vedenpinnan mittaukseen altaasta. Käytössä olevia suodatusyksiköitä vaihdellaan jatkuvasti. Prosessissa tulisi välttää kalvojen käyttöä matalalla vuolla, koska energiakustannukset nousevat tällöin korkeaksi. Suodatusyksiköitä ei tulisi kuitenkaan käynnistää ja pysäyttää turhan usein kulumisen välttämiseksi. (Alligood ja Cantu, 2009)

3.1.3 Kierrätys

Mikäli kalvot sijoitetaan erilliseen altaaseen, lietettä kierrätetään kalvosuodatusaltaista takaisin aktiivilietealtaisiin tyypillisesti yli 300 %, mutta usein kierrätysuhde on jopa 400–500 %, tulovirtaamaan nähden. Tällaista, erillistä lietteenkierrätystä ei tarvita, jos kalvot upotetaan suoraan ilmastusaltaisiin. Suoraan ilmastusaltaaseen upotettujen suodatusyksiköiden kohdalla joillain laitoksilla on kuitenkin ilmennyt ongelmia käyttö- ja kunnossapitotöiden kohdalla sekä prosessin ohjauksessa. (van Haandel ja van der Lubbe 2012). Teoreettisesti kierrätysvirtaama voidaan taseesta laskea niin, että jos kalvosäiliön lietepitoisuus sallitaan olevan 50 %:a korkeampi kuin biologisen säiliön lietepitoisuus, tarvitaan 200 % kierrätys. Jos ero halutaan pienentää esimerkiksi 20 %:in, pitää kierrätystä kasvattaa 500 %:in.

3.1.4 Suodatus

Kalvovyksiköissä kalvojen läpi suodatettu vesi eli permeaatti pumpataan suodatetun veden altaaseen. (van Haandel ja van der Lubbe 2012.) Permeaattia voidaan tuottaa myös staattisen paineen avulla, joka aiheutuu kalvovyksiköiden yläpuolella olevan aktiivilietteen aiheuttamasta hydrostaattisesta paineesta.

Suodatukseen vaadittavan kalvopaine-eron perusteella kalvot voidaan jakaa korkean paineen ja matalan paineen kalvoihin. Jätevesien puhdistuksessa käytettävät mikro- ja ultrasuodatuskalvot kuuluvat yleensä matalan paineen kalvoihin. Kalvobioreaktorissa kalvopaine-ero on tyypillisesti 0,05-0,5 bar (Krzeminski 2013), joka vastaa vedenpinnan eroa noin 50 cm:stä viiteen metriin. Tarvittava paine riippuu kalvon huokoskoosta, sekä kalvorakenteesta tukkeutumisasteesta ja veden viskositeetista.

3.2 Kalvojen tukkeutuminen ja puhdistus

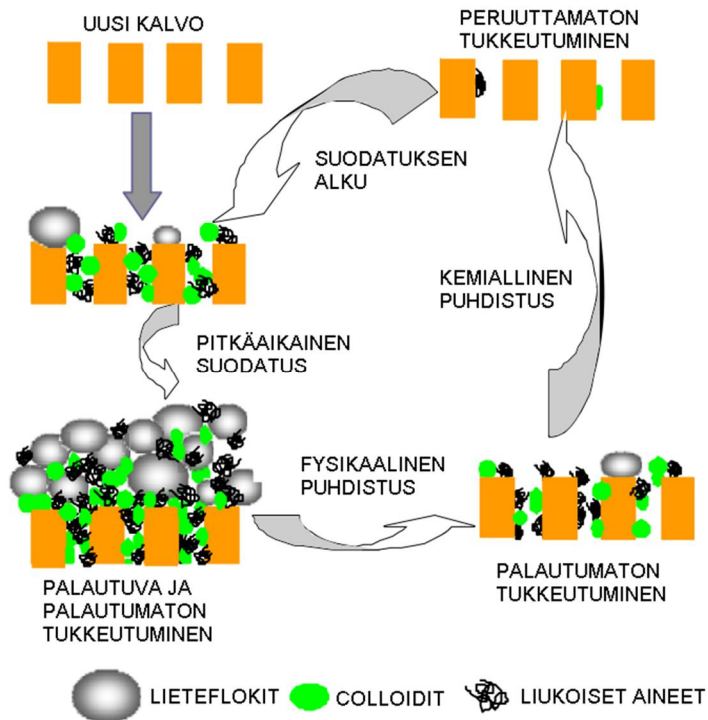
3.2.1 Kalvojen tukkeutumistavat

Kalvojen tukkeutuminen voidaan jakaa kahteen tyyppiin: pintatukkeutumiseen ja huokostukkeutumiseen. Pintatukkeutuminen aiheutuu, kun kalvon pintaan kertyy kiintoainetta, tukkien huokokset, jolloin myös kalvojen suodatuspinta-ala pienenee. Huokostukkeutuminen aiheutuu pääasiassa liukoisten orgaanisten

aineiden tukkiessa kalvon huokokset. Tällöinkin suodatuspinta-ala pienenee. Tyypillisesti kalvojen käyttöönoton jälkeen huokostukkeutuminen lisääntyy joidenkin kuukausien ajan, ja suodatuskapasiteetti laskee aluksi. Alussa kalvo tukkeutuu nopeasti niiltä osin, joita mekaanisella puhdistuksella ei saada tehokkaasti puhdistettua.. Mikäli kalvopaine-ero kasvaa yli 150 mbarin voi kalvon pinnalle muodostuneen suodatuskerroksen/lietekakun rakenne luhistua, mikä näkyy kalvopaine-eron äkillisenä kasvuna (TMP jump) (Radjenovic ym. 2008) Kalvojen tukkeutumista voidaan jaotella myös sen mukaan, kuinka vaikea tukkeutuminen on poistaa. Tällöin voidaan puhua kolmesta eri tukkeutumisesta:

- irrotettavasta (removable)
- pysyvästä- (irremovable)
- peruuttamattomasta (irreversible).

Irrotettava tukkeutuminen aiheutuu lähinnä pintatukkeutumisesta ja se saadaan helposti poistettua mekaanisella puhdistuksella (esim. vastavirtapesu tai relaksaatio). Pysyvä tukkeutuminen aiheutuu puolestaan pääsääntöisesti huokostukkeutumisesta sekä suodatuksessa tiukasti kalvoon kiinnittyneistä aineksista ja sen poistamiseksi kalvoille on suoritettava kemiallinen pesu. Sellaista tukkeutumista, jota ei saada poistettua millään puhdistusmenetelmällä, kutsutaan peruuttamattomaksi tukkeutumisiksi. (Meng ym. 2009) Kuvassa 7 on esitetty eri tukkeutumisasteet sekä niiden puhdistusmenetelmät. Kuvasta näkyy myös pintatukkeutumisen ja huokostukkeutumisen ero. Kalvon huokosiin tarttuneet kolloidiset ja liukoiset ainekset aiheuttavat huokostukkeutumisen, kun taas kalvon pinnalle kertynyt aines on pintatukkeutumista.



Kuva 7. Erilaiset kalvon tukkeutumistavat ja niiden poistamiseen vaadittava pesut (muokattu Meng ym. 2009).

Kalvojen tukkeutuminen (engl. fouling) on syytä erottaa kalvojen kannalta vakavammasta suodatusmoduulien tukkeutumisesta (engl. clogging), jolla tarkoitetaan kiintoaineen aiheuttamaa, kalvojen välisen tilan ja/tai suodatusmoduulien ilmastusaukkojen tukkeutumista. (Lousada Ferreira 2011) Tämä aiheutuu tyypillisesti heikosti biohajoavan tai biohajoamattoman aineksen kertymisestä lietteeseen esimerkiksi puutteellisen esikäsittelyn vuoksi. Tällaisia ovat esimerkiksi muovit ja hiukset. (van Haandel ja van der Lubbe 2012) Myös riittämätön ilmapuhdistus aiheuttaa pahimmillaan tämän tyyppistä tukkeutumista. Kalvomoduulien tukkeutumisen minimoimiseksi tehokas jäteveden esikäsittely on ensiarvoisen tärkeää (Judd ja Judd 2011).

MBR-prosessi vaatii tehokkaan esikäsittelyn. Useinkaan perinteisessä puhdistusprosessissa käytettävä esikäsittely, erityisesti välppäys, ei ole riittävän tehokas MBR-prosessiin. Onttokuitukalvoille erityisen vahingollisiksi ovat osoittautuneet hiukset. MBR-prosessissa suositellaan käytettäväksi reikäkooltaan tiheämpiä hienovälppiä. Ennen näitä reikä- tai verkkomallisia välppiä on prosessissa karkeammat, säleväliltään 3-6 mm olevat välpät (Judd ja Judd 2011). Moustafa (2011) havaitsi, että esiselkeytys oli tehokkaampi esikäsittely kuin 1mm:n tai 2mm:n hienovälppiä. Permeaatin laatu oli parempi kiintoaineen, orgaanisen aineen, typen ja fosforin osalta, kun MBR-prosessiin syötettiin esiselkeytettyä vettä.

3.2.2 Mekaaninen puhdistus – relaksaatio tai vastavirtapesu

Kalvojen säännöllinen pesu on tarpeen riittävän suodatustehokkuuden ylläpitämiseksi. Kalvojen pesu voidaan suorittaa, joko mekaanisena pesuna, tai kemiallisena pesuna. (Bugge ja Andersen 2009) Mekaanisia pesuja ovat pääasiassa suodatusjakson jälkeinen relaksaatiovaihe (jolloin suodatusta ei tapahdu) sekä vastavirtapesu (permeaattia pumpataan normaalin suodatussuunnan vastaisesti). Vastavirtapesua ei voida tehokkaasti suorittaa tavanomaisille tasomaisille kalvoille. (Le-Clech ym. 2006), mutta relaksaatiovaiheen avulla tukkeutumista aiheuttavat ainekset pääsevät irtautumaan kalvosta.

Mekaanisen pesun tehokkuuteen vaikuttavat keskeisesti pesujen tiheys, kesto ja intensiteetti. Relaksaatiovaiheessa ilmapuhdistus on syytä pitää käynnissä, jotta puhdistus toimisi mahdollisimman tehokkaasti. (LeClech ym. 2006) Käytettäessä vastavirtapesua suodatusjakso voi olla esimerkiksi 10 minuuttia, jonka jälkeen suoritetaan lyhyt vastavirtapesu (esim. 45 s). Tasomaisien kalvojen suodatusjakso voi olla esimerkiksi 10 minuuttia, jota seuraa 1-2 minuutin relaksaatiovaihe. (Radjenovic ym. 2008). Peruspesujen lisäksi kalvoille on tehtävä kemikaalipesuja.

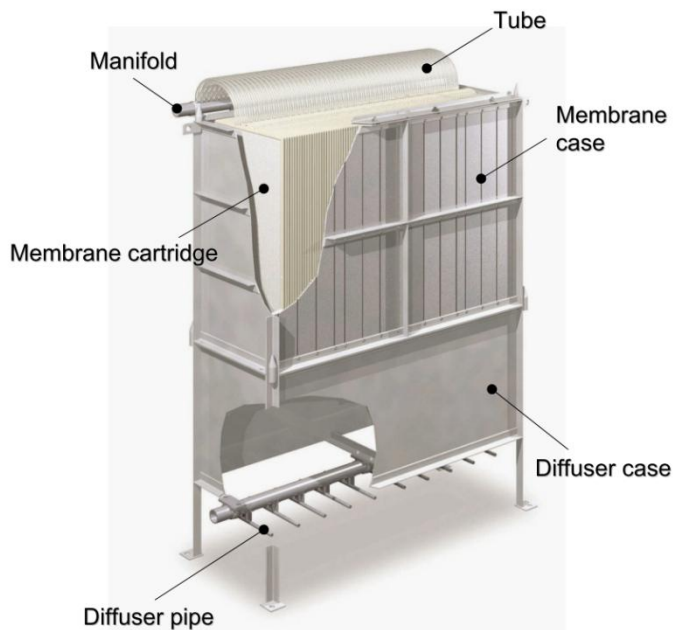
3.2.3 Ilmakuplapuhdistus

Suodatuksen aikana kalvojen pinnalle pyrkii kertymään kiintoainetta, joka heikentää kalvon suorituskykyä. Kiintoaineen kertymistä kalvon pintaan ja näin ollen kalvon tukkeutumista pyritään ennaltaehkäisemään kalvojen voimakkaalla ilmastuksella. Yleensä ilmapuhdistukseen käytetään karkeakuplailmastimia, jotka asennetaan kalvomoduulin pohjalle. Suuret kuplat aiheuttavat voimakasta turbulenssia kalvojen pintaa pitkin noustessaan ja pyyhkivät kiintoainetta mukaansa (Yang 2013).

Tarvittava ilmamäärä vaihtelee kalvovalmistajien välillä. Ilmamäärä ilmoitetaan yleensä ominaisilmastustarpeena eli SAD_m -lukuna (Specific aeration demand). Ominaisilmastustarve ilmoittaa, miten paljon ilmaa tarvitaan kalvopinta-alaa kohden tunnissa, jotta kalvot pysyvät riittävät puhtaina. Ilmastustarve voidaan myös ilmoittaa SAD_p -lukuna, joka ilmoittaa ilmatarpeen suhteessa suodatettuun vesimäärään. Ominaisilmastustarve vaihtelee välillä $0,2 - 0,8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$.

Tarvittava ilmamäärä riippuu pitkälti kalvosuodattimen rakenteesta, kalvomateriaalista, käytettävästä kalvovuosta sekä lietteen ominaisuuksista. Kalvosuodattimien korkeudet vaihtelevat valmistajasta riippuen noin 1,3 ja 4,3 metrin välillä ja korkeammissa suodattimissa saadaan puhdistettua suurempi kalvoala samalla ilmamäärällä. Aiemmin on valmistettu matalampia suodattimia, jotka on voitu sijoittaa olemassa oleviin altaisiin helpommin. Energiankulutuksen optimoinnin vuoksi on pyritty suosimaan korkeampia

suodattimia, jotka voivat vaatia allassyvyyttä jopa yli 5 metriä. Kuvassa 8 on esitetty Kubotan altaaseen upotettava kalvosuodatusyksikkö, jossa näkyy tukirakenteen sisällä yksittäiset kalvovelyt, niiden imuletkut ja kokoojaputki. Kalvojen alla on karkeakuplailmastuksen diffuusoriputket ja ilmakuplien nousua ohjaava kotelo. Toisen tasomaisia kalvosuodattimia valmistavan Alfa Lavalin ilmoittama ilmastustarve on yksikerroksiselle moduulille noin $8-9 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min}$, kaksikerroksiselle noin $4-5 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min}$ ja kolmikerroksiselle $3-4 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min}$. Hyvä nyrkkisääntö kolmikerroksisen flat sheet-suodattimen puhdistusilmatarpeesta (SAD_m) on noin $4 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min}$ eli noin $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$. Kalvovuon ollessa 24 LMH on puhdistusilmatarve (SAD_p) olisi $10 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{h}$, jota voidaan nykyisinkin vielä pitää jonkinlaisena optimoitujen suodatusjärjestelmien tavoitetasona (Ødegaard, 2014).



Kuva 8. Havainnekuva kalvoyksiköstä, jossa näkyy ilmanjakoputket ja permeaatin imuletkut (Kubota).

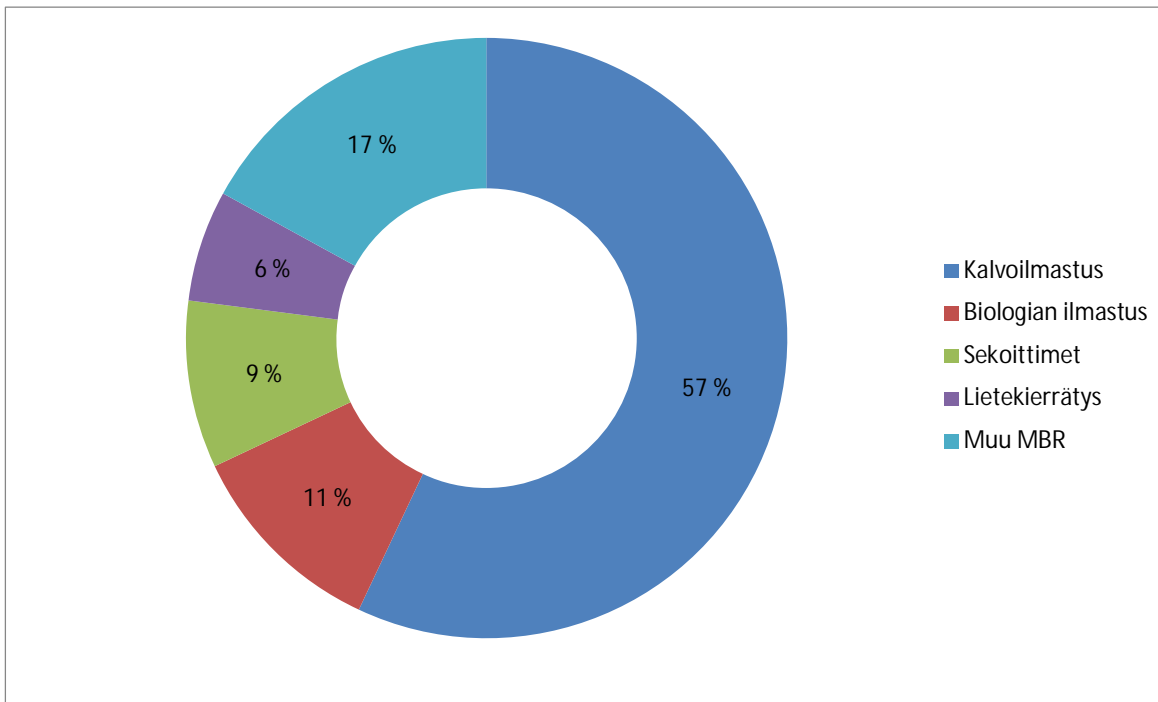
3.2.4 Kemialliset pesut

Suodatuksen aikana kalvojen pinnoille alkaa kerääntyä ainesta, joka ei poistu ilmapuhdistuksen, vastavirtapesun tai relaksaatiovaiheen avulla. Tällöin on syytä suorittaa kemiallinen pesu. Pesut voidaan toteuttaa täysin automaattisesti tai siten, että pesusykli käynnistetään manuaalisesti. Tyypillisesti pesukemikaaleina käytetään natriumhypokloriittia orgaanisen likaantumisen poistamiseksi ja sitruunahappoa epäorgaanisen likaantumisen poistamiseksi. Hypokloriitin asemesta voidaan käyttää myös vetyperoksidia tai lipeää ja sitruunahapon sijasta oksaalihappoa tai jopa suolahappoa. Kemiallisen pesun toteutustapa vaihtelee kalvotyyppien ja -valmistajien välillä. Kemikaalipesujen sykli vaihtelee päivittäin suoritettavista pesuista useamman kuukauden välein tehtäviin pesuihin. Onttokuitukalvoilla kemiallinen

pesu suoritetaan lisäämällä vastavirtapesuveteen sopivaa kemikaalia. Päivittäin tehtävissä kemikaalipesuissa käytettävät pitoisuudet ovat alhaisempia kuin ns. huoltopesuissa (maintenance cleaning), joita suoritetaan yleensä kerran viikossa. Tyypillisesti 1-2 kertaa vuodessa onttokuitukalvoille suoritetaan ns. palautuspesu (recovery cleaning), jonka avulla pyritään poistamaan tukkeutumista, joka ei poistu huoltopesuissa. Palautuspesussa kalvot pidetään upotettuina puhdistuskemikaaliin useamman tunnin ajan. Tätä varten kalvoallas pitää joko tyhjentää jätevedestä ja täyttää kemikaaliliuksella tai vaihtoehtoisesti kalvomoduuli pitää nostaa erilliseen pesusäiliöön. Palautuspesuissa käytetään yleensä huoltopesuja suurempaa kemikaalipitoisuutta. Huoltopesut kestävät yleensä n. 30 minuuttia ja palautuspesut n. 2-4 h. Tasomaisten kalvojen pesutarve on huomattavasti vähäisempi, yleensä 3-4 kertaa vuodessa. (Le-Clech ym. 2006)

3.3 MBR-prosessin energian tarve

MBR-puhdistamoiden kirjallisuudessa raportoidut energiankulutusarvojen vuosikeskiarvot vaihtelevat välillä 0,64 – 2 kWh/m³ (Krzeminski, 2011). Tästä kalvojen ilmapuhdistuksen osuus on noin puolet. Perinteiseen aktiivilieteprosessiin verrattuna energiantarpeen on biologisen prosessin osalta arvioitu olevan kaksi- tai kolminkertainen. Lisäksi ominaisenergiantarpeen on todettu kasvavan nopeasti, kun laitoksen hydraulisesta kapasiteettista on käytössä alle 25 % (Bolle & Pinnekamp, 2011). Alhaisin kirjallisuudesta löytynyt energiankulutus MBR-puhdistamolla on 0,54 kWh/m³ (Tao ym., 2008), mutta tällä puhdistamolla lämpötila oli 30 °C ja reaktoreissa lietepitoisuus oli ilmeisesti alle 8 g/l. Luku sisältää lisäksi vain biologisen prosessin ja kalvosuodatuksen energiankulutuksen. Nordkanalin MBR-puhdistamolla (AVL 80 000) on päästy puhdistamon kokonaisenergiankulutuksessa tasolle 0,67 kWh/m³, mikä sisältää myös lietteenkuivauksen (Drensla 2015). Kuvassa 9 on esitetty energiantarpeen jakautuminen Varsseveldin MBR-puhdistamolla vuosien 2008 – 2010 tietojen perusteella. Energiankulutus tässä tapauksessa oli 0,84 kWh/m³. (Krzeminski, 2011). Tässä selvityksessä kategoria "Muu MBR" sisälsi permeaattipumppauksen, sekoittimet, lietteen pumppauksen ja sakeutuksen, esikäsitteilyn sekä puhdistamon lämmityksen. Lietteiden kuivaus ei sisälly lukuihin, koska sitä ei tehty puhdistamolla.

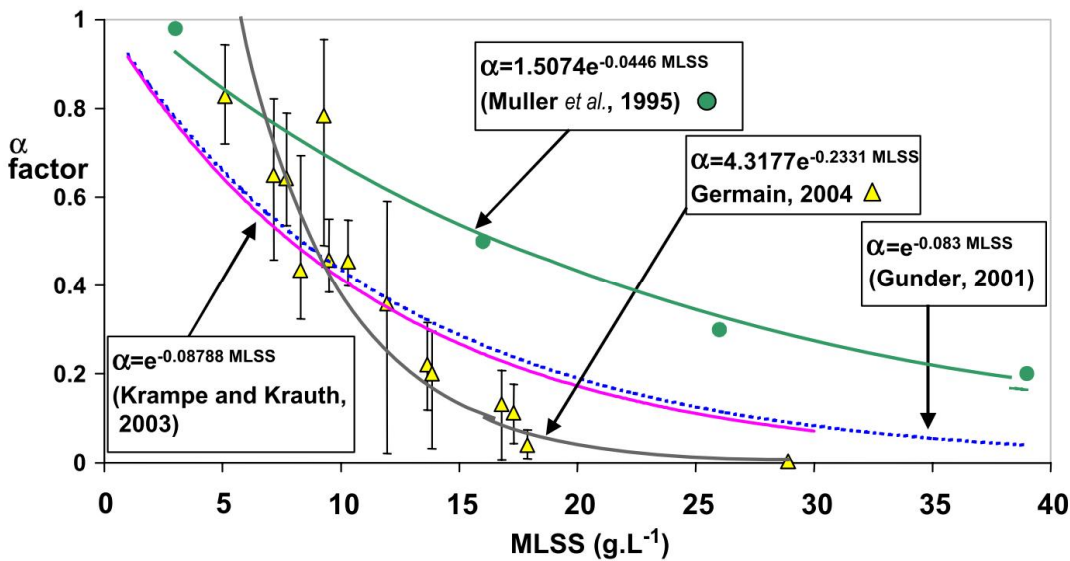


Kuva 9. Energiantarpeen jakautuminen MBR-puhdistamolla (Muokattu, Kreminski, 2011).

MBR-puhdistamoiden ja perinteisten puhdistamoiden energian kulutuksen vertailu on useassa lähteessä todettu olevan vaikeaa (Krzeminski, 2011; Bolle & Pinnekamp, 2011). Tämä johtuu osittain siitä, että kalvojen tarvitsema ilma tulee osittain käytettyä hyödyksi biologisessa prosessissa. Lisäksi energiantarpeeseen vaikuttaa tulevan veden laatu, puhdistusvaatimukset, paikalliset olosuhteet sekä laitteistojen tehokkuus. Kirjallisuudessa esitetyt energian kulutusarvot eivät myöskään aina sisällä samoja puhdistuksen yksikköoperaatioita. Tämä johtuu eri selvitysten rajauksista ja myös siitä, mitä toimintoja puhdistamon yhteydessä tehdään. Esimerkiksi lietteen kuivausta ei pienillä puhdistamoilla välttämättä tehdä. Krzeminski (2011) esittää väitöskirjassaan seuraavaa jakoa MBR-puhdistamon energian kulutukselle: Kalvosuodatuksen energiantarpeeseen tulisi lukea kalvojen ilmastus, kalvoyksikköön menevän lietteen pumppaus, lietteen kierrätys, permeaattipumppaus sekä vastavirtapesu ja kemiallinen puhdistus. Biologisen käsittelyn energiantarpeeseen tulisi laskea mukaan ilmastus, sekoitus ja lietteen kierrätykset. Puhdistamon muu energiankulutus tulisi sisältää tulopumppauksen, esikäsittelyn, lietteen käsittelyn, lämmityksen sekä valvomon ja instrumennoinnin tarpeen.

Aktiivilieteprosessin tarvitsema happi saadaan tuotettua parhaalla hapensiirtotehokkuudella käyttäen hienokuplailmastusta. Pienet kuplat eivät kuitenkaan ole tehokkaita kalvojen puhdistuksessa, vaan siinä käytetään karkeakuplailmastusta. Molempien ilmastusjärjestelmien energiatehokkuudella on suuri vaikutus koko puhdistamon energiantarpeeseen. Myös biologisen prosessin tarvitseman ilmamäärän tuottaminen voi

kuluttaa enemmän energiaa, jos lietepitoisuus on hyvin suuri. Hapensiirto ilmakehstä jäteveden heikkenee, kun lietepitoisuus kasvaa (Kuva 10)



Kuva 10. Lietepitoisuuden vaikutus hapensiirtotehokkuuteen (Judd ja Judd, 2011).

MBR-puhdistamon energiantarpeen pienentämisessä suurin vaikutus on kalvoilmastuksen pienentämisellä sekä lieteiän lyhentämisellä. Lieteikä vaikuttaa suoraan myös prosessin lietepitoisuuteen. Kierrätysvirtaaman suuruudella ei havaittu suurta vaikutusta prosessin energian kulutukseen. (Verrecht ym, 2008) General Electric (GE) on aktiivisesti kehittänyt jaksottaista ilmastusmenetelmää, jossa kalvoja ilmastetaan jaksottain 10 sekunnin ajan ja ilmastus pysäytetään 10 – 30 sekunniksi. Parhaimmillaan tällä tavalla voidaan laskea kalvojen ilmastuksen energiatarvetta neljännekseen. MBR-puhdistamot ovat toistaiseksi olleet pieniä tai keskikokoisia, eikä niillä ole yleensä käytetty esiselkeytystä. Esiselkeytys vähentää prosessin energiankulutusta ja lisäksi mahdollistaa paremman energian tuottopotentialin, jos raakalietettä mädätetään (Bolle & Pinnekamp, 2011).

3.4 Lietteen tuotto ja ominaisuudet

Lietteen ominaisuudet MBR-prosessissa ovat jonkin verran erilaiset verrattuna perinteiseen aktiivilieteprosessiin johtuen kalvosuodatukseen perustuvasta lietteen erotuksesta sekä erilaisesta lieteistä ja lietekuormasta (Massé ym. 2006). Näiden lisäksi myös kalvojen puhdistukseen käytettävä voimakas karkeakuplailmastus ja kierrätykset vaikuttavat lietteen ominaisuuksiin MBR-prosessissa (Merlo ym. 2004). MBR-prosessin biologisen lietteen kasvu vaihtelee erittäin paljon eri tutkimuksien välillä ja

selkeää johtopäätöstä siitä, onko MBR-prosessin lietteenkasvu alhaisempaa kuin CAS-prosessin, ei voida tehdä.

3.4.1 Biologisen lietteen kasvu MBR-prosessissa

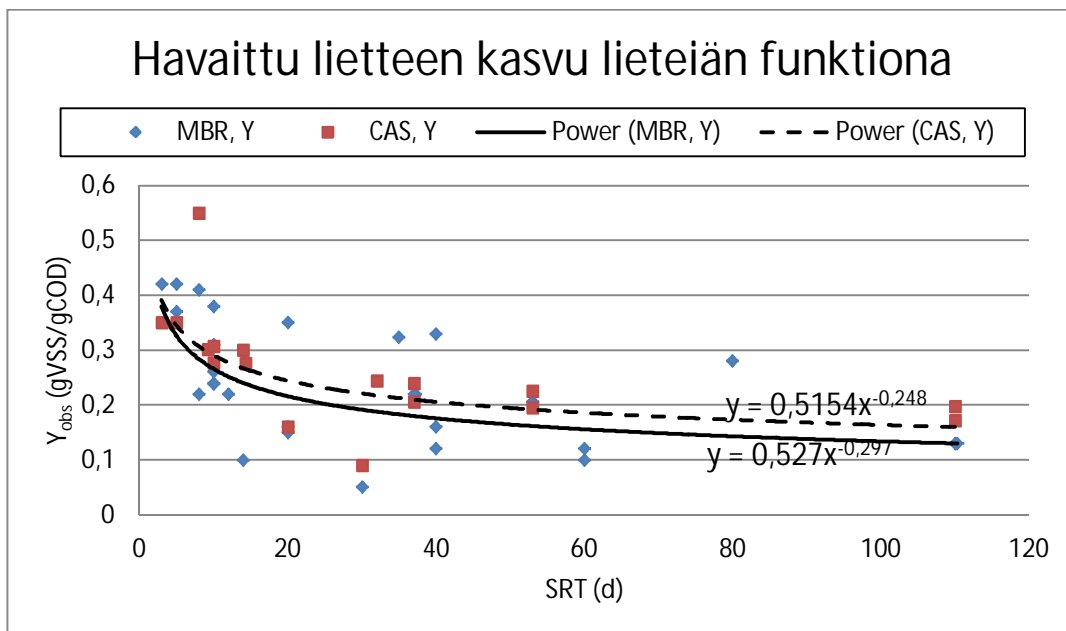
MBR-prosessissa, kuten CAS-prosessissakin, on tärkeää kyetä arvioimaan bioreaktorissa muodostuvan lietteen määrää ja näin ollen prosessista poistettavan biolietteen määrä. Tämän arvion tekemisen kannalta tärkeitä parametreja ovat: prosessin orgaanisen aineksen (BOD, engl. biological oxygen demand tai COD, engl. chemical oxygen demand) poistoteho, biomassan määrä reaktorissa ja inertin kiintoaineen määrä käsittelyyn tulevassa virtaamassa. (Turovskiy ja Mathai 2006) Tyypillinen lietteen kasvun vaihteluväli perinteiselle aktiivilieteprosessille ilman esiselkeytystä on 0,3-0,5 gVSS/gCOD (Turovskiy ja Mathai 2006). Lietteen tuotto riippuu kuitenkin merkittävästi lieteiästä ja lämpötilasta.

Smith ym. (2002, 3) tutkivat lietteenkasvua MBR- ja CAS-prosessissa eri lietei'illä (8-30 d). He havaitsivat MBR-prosessin lietteenkasvun olevan hieman alhaisempi kuin CAS-prosessissa, mutta totesivat eron olevan merkittävä ainoastaan lieteiän ollessa alhainen. Jo lieteiällä 20 d, ero oli käytännössä merkityksetön, kun MBR-prosessin lietteenkasvu oli 0,15 g VSS/g COD ja CAS-prosessissa 0,16 g VSS/g COD. Massé ym. (2006) havaitsivat myös, ettei samalla lieteiällä operoidessa lietteenkasvussa ole merkittäviä eroja MBR- ja CAS-prosessin välillä. Heidän tutkimuksessaan lietteenkasvu oli CAS-prosessissa lieteiällä 9,2 d 0,302 g VSS/g COD ja lieteiällä 32 d 0,244 g VSS/g COD. Vastaavasti MBR-prosessissa lietteenkasvu oli lieteiällä 10 d 0,310 g VSS/g COD ja lieteiällä 37,2 d 0,220 g VSS/g COD. He havaitsivat kuitenkin, että operoidessa MBR-prosessia erittäin pitkällä lieteiällä (110,3 d), lietteenkasvu putosi tasolle 0,13 gVSS/gCOD, joka on hyvin lähellä tulosta, jonka Spérandio ja Espinosa (2008) saivat omassa tutkimuksessaan (SRT 110 d, Y_{obs} 0,13 gVSS/gCOD). Al-Malack (2006) tutki MBR-prosessin lietteenkasvua 4-20 d lieteiällä ja havaitsi lietteenkasvun olevan samassa vaihteluvälissä kuin CAS-prosessienkin.

Lee ym. raportoivat pienemmästä MBR-prosessin lietteenkasvusta verrattuna CAS-prosessiin. Heidän tutkimuksessaan lietteenkasvu oli lieteiällä 20 d 0,16 gVSS/gCOD ja lieteiällä 60 d 0,10 gVSS/gCOD, joka on selvästi alhaisempi kuin tyypillisessä CAS-prosessissa. Ng ja Hermanowicz (2005) tulivat tutkimuksessaan tulokseen, että MBR-prosessin lietteenkasvu (0,42 gVSS/gCOD) oli suurempaa kuin CAS-prosessissa (0,35 gVSS/gCOD), lieteiän ollessa 5 d. Samanlaisen lietteenkasvun (0,41 gVSS/gCOD) MBR-prosessille havaitsivat myös Snider-Nevin ym.(2013). Ongelmana raportoiduissa tutkimuksissa on, että niissä CAS-prosessin lieteikä on oletettavasti laskettu vain ilmastusaltaan tilavuuden perustella. Mikäli CAS-prosessia ajetaan siten, että lietettä varastoituu merkittävässä määrin jälkiselkeytysaltaiden pohjalle, voi CAS-prosessin todellinen lieteikä olla huomattavasti suurempi ja vertailu prosessien välillä vääristyy.

Huang ym. (2001) tutkivat mikrobien nettokasvua sekä hajotusnopeutta MBR-prosessissa ja huomasivat mikrobien nettokasvun olevan samaa tasoa, mutta hajotusnopeuden merkittävästi suurempaa kuin CAS-prosessissa. Syyksi he arvelevat MBR-prosessin voimakkaampaa ilmastusta, joka saattaa kiihdyttää mikrobien aineenvaihduntaa ja näin ollen hajotusnopeutta. Saman seikan havaitsivat myös Smith ym. (2002). MBR-prosessin alhaisemmasta lietteenkasvusta verrattuna CAS-prosessiin on raportoitu useissa tutkimuksissa mm. Teck ym.(2009) ja Kraume ym.(2005). Kraume ym. (2005,) raportoivat kuitenkin, ettei täyden mittakaavan MBR-laitoksissa Markranstädtissä ja Rödingenissä Saksassa ole havaittu merkittävää lietteenkasvun alenemista lieteiän ollessa <30 d, vaan merkittävään lietteentuoton vähenemiseen tarvittaisiin selkeästi korkeampi lieteikä.

Kuvassa 11 on esitetty kootusti eri tutkimuksissa saatuja tuloksia lietteenkasvusta, Y_{obs} . Kuvasta 11 nähdään, että tulosten perusteella keskimääräinen lietteenkasvu MBR-prosessissa eri lieteiällä voi olla hieman alhaisempi kuin CAS-prosessissa. MBR-prosesseista saatujen tulosten suuren vaihtelun vuoksi kovin tarkkaa johtopäätöstä ei kuitenkaan voida tehdä. Yhteenvetona voidaan siis todeta, että biologisen lietteenkasvun arviointiin voidaan käyttää samoja arvoja kuin CAS-prosessissakin, varsinkin toimittaessa lieteiällä 10 – 30 d.



Kuva 11. Eri tutkimuksissa havaittuja lietteentuottoja lieteiän funktiona

3.4.2 Lietteen laskeutuvuus

Merlo ym. (2006) tutkivat MBR- ja CAS-prosessien lietteen laskeutuvuutta ja totesivat, että MBR-prosessin lieteindeksin DSVI-arvot olivat suurempia kuin CAS-prosessin. MBR-prosessin DSVI-arvot vaihtelivat välillä 190-400 ml/g ja CAS-prosessin 71-200 ml/g. He epäilevät MBR-lietteen suurempien arvojen johtuvan rihmamaisten bakteerien suuremmasta määrästä. Massé ym. (2006) raportoivat, ettei MBR- ja CAS-lietteiden DSVI-arvot eroa juurikaan toisistaan. He kuitenkin havaitsivat, että laskeutustestissä erottuvan vesifaasin sameus on MBR-lietteessä huomattavasti suurempi kuin CAS-lietteessä ja sakeus lisääntyi entisestään lieteiän kasvaessa. Neljän puhdistamon tutkimuksessa yhden CAS-puhdistamon lieteindeksi oli huonompi kuin MBR-puhdistamon ja kaksi CAS-puhdistamoa oli parempia (Zhang ym. 2015).

3.4.3 Lietteen kuivattavuus

EUROMBRA:n (2005) projektissa tutkittiin 17 (3 MBR-laitosta) täyden mittakaavan laitoksen lietteenkuivaustuloksia ja tultiin johtopäätökseen, etteivät kuivatun MBR-lietteen kuivaustulokset eroa CAS-prosessin lietteenkäsittelyn tuloksista. Myös Zhang ym. (2015) tutkivat kuivattavuutta yhdellä MBR-laitoksella ja kolmella CAS-laitoksella, joista yhdelle tuli samaa tulevaa jätevettä kuin MBR-laitokselle. Kokeet tehtiin polyroi-mattomille lietteille. Laitoksien välillä oli huomattavan suuria eroja ja MBR-laitos sijoittui välimaastoon. Tulokset MBR-laitoksella ja samaa jätevettä käsittelevällä CAS-laitoksella olivat samalla tasolla. Useat tutkimukset ovat osoittaneet positiivisen korrelaation EPS-aineiden ja lietteen kuivattavuutta kuvaavan Capillary suction Time (CST)-arvon välillä sekä MBR-, että CAS-prosessissa polyroi-mattomalla lietteellä. Näin ollen MBR-lietteen CST-arvo oli alhaisempi eli kuivattavuus oli parempi johtuen lähinnä alhaisemmasta EPS-aineiden pitoisuudesta. Toisaalta myös kolloidien määrä, flokkikoko, kuitujen määrä jne. vaikuttivat kuivattavuuteen. (Guglielmi ym.2010; Zhang ym. 2015; Merlo ym. 2006) Merlo ym.(2007) totesivat, että erot MBR- ja CAS-prosessin välillä tasoittuivat, kun polymeeriä syötettiin 2 g/kgTSS tai enemmän. Guglielmi ym. (2010) tutkivat polymeeriannostuksen vaikutusta MBR-lietteen kuivattavuuteen. He havaitsivat, että polymeeriannosta kasvattamalla oli mahdollista saavuttaa hyötyä polymeeriannostuksen tasolle 10 g/kgTSS. Sen jälkeen annostuksen kasvattamisesta ei ollut juurikaan etua.

3.4.4 Flokkikoko lietteessä

Vertailtaessa MBR- ja CAS-prosessin aktiivilietteen flokkikokoa on havaittu MBR-lietteen flokkikoon olevan pienempää. MBR-lietteen flokkikokojakaumassa on havaittu selkeästi kaksi piikkiä (5-20 μm ja 240 μm). Pienemmän kokoluokan piikin aiheuttaa pienien partikkeleiden, kolloidien ja vapaiden bakteerien tehokas

pidättyminen kalvosuodatuksen vuoksi. (Judd ja Judd, 2011) Flokkikoosta voidaan siis sanoa, että tyypillisesti se on MBR-lietteessä pienempää kuin CAS-prosessissa johtuen pienien partikkeleiden pidättymisestä lietteeseen. Lieteiän vaikutus flokkikokoon voi myös aiheuttaa eroa MBR- ja CAS-lietteen välille, johtuen MBR-prosessin mahdollisesta pidemmästä lieteiästä.

Myös lietteenkierrätysuhde vaikuttaa flokkikokoon. Wisniewski ja Grasmick (1998) tutkivat palautussuhteen vaikutusta flokkikokoon erilliseen suodatusyksikköön perustuvassa MBR-prosessissa ja havaitsivat flokkien hajoavan pääasiassa kierrätettäessä lietettä. Ilman palautuslietevirtaamaa ainoastaan 15 % flokeista oli alle 100 µm, kun taas palautuslietekierrolla 98 % flokeista oli alle 100 µm. Stricot ym. (2010) tutkivat hydrodynaamisten ominaisuuksien vaikutusta flokin rakenteeseen ja havaitsivat voimakkaan leikkausrasituksen aiheuttavan flokkien murtumisen. Näin ollen palautuslietekierrat sekä lietteen sekoituksella on siis flokkikokoa pienentävä vaikutus.

3.4.5 Lietteen EPS-aineet

EPS-aineilla on kenties suurin merkitys aktiivilietteen laatuun, sillä ne toimivat sideaineena bakteereille ja muille flokin aineksille ja näin ollen muodostavat keskeisen osan flokin rakenteesta. EPS-aineet ovat monimutkainen sekoitus polymeerejä, joita muodostuu mikrobien aineenvaihdunnasta, bakteerien hajoamistuotteista sekä adsorboitumalla jäteveden orgaanisesta aineksestä (Wilén ym. 2003). Lisäksi ne muodostavat bakteerien ympärille suojaavan kalvon sekä pidättävät vettä flokin rakenteeseen. (Le-Clech ym. 2006) EPS-aineet ovat hydrofobisia ja ne vuorovaikuttavat veden kanssa geelin tavoin (Wilén ym. 2003). Merlo ym. (2004) havaitsivat MBR-lietteen EPS-aineiden pitoisuuden olevan samalla lieteiällä alhaisempia kuin CAS-prosessin. Tämä ero oli suurimmillaan alhaisilla lietei'illä, mutta pitoisuudet laskivat molemmilla lietteillä lieteiän kasvaessa. Al-Halbouni ym. (2008) tutkivat EPS-pitoisuuksia Nordkanalin MBR-laitoksella Saksassa ja havaitsivat pitoisuuksissa suurta kausittaista vaihtelua. Kesäajan EPS-pitoisuudet (17 mg/TSS) olivat jopa alle puolet talviajan pitoisuuksista (51 mg/TSS). Tutkijat arvelevat lisääntyneen EPS-aineen tuoton kylmänä kautena johtuvan enemmän EPS-aineita tuottavien mikrobien, kuten filamenttisten bakteerien, suhteellisen lisääntymisenä. Yleensä MBR-prosessia operoidaan CAS-prosessia korkeammalla lieteiällä, jolloin MBR-lietteen EPS-pitoisuudet ovat tyypillisesti alhaisempia.

3.5 MBR-prosessissa saavutetut puhdistustulokset

3.5.1 Kiintoaine ja ravinteet

Kiintoaine ja orgaaninen aine poistuvat tyypillisesti erittäin hyvin MBR-prosessissa, koska permeaatti sisältää vain hyvin vähän kiintoainetta. Ravinteiden eli typen ja fosforin poistuminen riippuu ensisijaisesti

biologisen prosessin ja kemiallisen saostuksen onnistumisesta, kuten perinteisessä aktiivilieteprosessissakin. Ammoniumtyppi ja nitraatti- ja nitriittityppi pääsevät liukoisessa muodossa mikro- ja ultrakokoluokan kalvojen läpi, joten nitrifikaatio-denitrifikaatio on saatava tapahtumaan MBR-prosessissakin. Liukoinen fosfaattifosfori pääsee myös kalvon läpi, mutta kiintoaineeseen sitoutuneen fosforin osalta kalvosuodatus on eduksi.

3.5.2 Haitta-aineet

Viimeisten vuosikymmenien aikana on enenevässä määrin alettu kiinnittää huomiota myös muihin jäteveden sisältämiin haitallisiin aineisiin. Aineiden pitoisuudet voivat olla pieniä, mutta osalle niistä on tyypillistä, että ne vaikuttavat jo pieninä pitoisuuksina. Aineista käytetään yleisnimitystä prioriteettiaineet, mutta ryhmä sisältää suuren määrän erilaisia yhdisteitä esim. lääkeaineita, hajusteita, torjunta-aineita jne. Tässä vaiheessa yhdyskuntajätevedenpuhdistamoiden kannalta merkityksellisimmät aineet ovat tarkkailulistan lääkeaineet diklofenaakki, 17-beta-estradioli (E2) ja 17-alfa-etinyyliestradioli (EE2) sekä Suomessa kansallisiksi aineiksi asetukseen ehdotettu bisfenoli A. Kalvosuodatuksen voidaan olettaa poistavan myös kaikki havaittavat mikromuovit.

Vaarallisten ja haitallisten aineiden osalta MBR-prosessin poistotehon on todettu olevan yhtä hyvä, tai hieman parempi, kuin perinteisen aktiivilieteprosessin. Lääkeaineiden biohajoavuudessa on erittäin suuria ainekohtaisia eroja ja pidempi lieteikä tehostaa hajoamista. Hormoneiden ja antibioottien poistumisen on todettu olevan parempi MBR-prosessissa kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa (Le-Minh ym. 2010). MBR-prosessiin voi jalostua mikrobikanta, joka hyödyntää tehokkaammin vaikeasti biohajoavia aineita (Radjenovic ym. 2011). MBR:n parempi puhdistusteho perustuu osin pitkän lieteiän mahdollistamaan bakteeriston muuntumiseen, osin haitta-aineiden sitoutumiseen lietteeseen, joka suodattuu pois lähtevästä vedestä. MBR-prosessilla ei kuitenkaan saavuteta niin korkeita poistotehokkuuksia, että se yksin riittäisi käsittelyn tehostamiseen. Tällä hetkellä potentiaalisimmat menetelmät lääkeaineiden poistamiseksi vedestä ovat adsorptio aktiivihieillä tai otsonointi (mm. Björlenius ym. 2009; Høiby ym. 2007). MBR-prosessin merkitys tehokkaana kiintoaineen poistajana ennen näitä menetelmiä on osaltaan lisännyt kiinnostusta prosessia kohti.

3.5.3 Hygieeninen laatu

MBR-prosessin on havaittu poistavan indikaattoribakteereita tehokkaasti (5-7 log). Lähtevässä vedessä bakteereita ei yleensä havaita tai niiden määrä on alle 10 pmy/100 ml. (Ottoson ym. 2006; Zhang ja Farahbakhsh, 2007; Gurung, 2014). On myös todettu, että MBR-prosessi poistaa bakteereita paremmin kuin aktiivilieteprosessi yhdistettynä hiekkasuodatuksen ja klooraukseen (Ottoson ym. 2006; Zhang ja

Farahbakhsh, 2007). MBR-prosessin permeaatin hygieeninen laatu riippuu käytetystä kalvon huokoskoosta. Tyypillisesti käytetyillä huokoskoilla (0,2 -0,4 µm) viruksien ja kolifaagien poistuminen ei ole täydellistä (Ottoson ym. 2006, Zhang ja Farahbakhsh, 2007). Mikkelin MBR-pilotissa kuitenkin noro- ja adenovirukset poistuivat koko ajan tehokkaasti (Gurung, 2014). Toisaalta tutkimuksissa on viitteitä siitä, että pitkäaikaisessa käytössä myös löyhempien kalvojen poistoteho virusten osalta paranee. (Zheng ym. 2005) Mikro-suodatuskalvoilla, joiden huokoskoko on 0,2 µm, virukset (>0,02 µm) teoreettisesti mahtuvat kulkeutumaan huokosten läpi. On kuitenkin esitetty, että virukset suodattuvat joko huokosten päälle muodostuneeseen kiintoaineskakkuun tai ovat kiinnittyneenä isompiin mikrobeihin ja partikkeleihin, eivätkä siksi pääse kalvon läpi. (Radjenovic ym. 2008).



MBR-PROSESSIN PERUSFAKTAT

- MBR-prosesseissa on yleistynyt lietteeseen upotetut kalvosuodatusyksiköt
- Suodatus voidaan tehdä pumpaamalla tai hydrostaattisen paineen avulla
- Kalvojen puhdistamiseksi käytetään jaksottaista suodatusta tai vastavirtapesua, ilmakuplapuhdistusta sekä kemiallisia pesuja.
- Suurin osa MBR:n energian tarpeesta muodostuu ilmakuplapuhdistuksesta. MBR-prosessin energiantarve on suurempi kuin perinteisen aktiivilieteprosessin.
- MBR-prosessin lietteen tuotto on samalla tasolla kuin perinteisen aktiivilieteprosessin, jos lieteikä on sama.
- MBR-lietteen laskeutuvuus on huonompi kuin perinteisen aktiivilieteprosessin lietteen. Lietteen kuivattavuus on kirjallisuustietojen mukaan yhtä hyvä tai parempi.
- MBR-prosessi poistaa joitakin haitallisia aineita paremmin kuin aktiivilieteprosessi, muttei yksin riitä.
- MBR-prosessin lähtevä vesi täyttää yleensä uimavesidirektiivin vaatimukset hygieeniseltä laadultaan.

4. MBR-prosessin mitoitus

4.1. MBR-prosessin mitoituseriaatteet

MBR-prosessin biologisen osan mitoituksessa käytetään samoja periaatteita kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa. MBR-prosessin etu on se, että lietepitoisuutta ja lieteikää voidaan kasvattaa, koska lietettä ei voi karata prosessista. Mitoituseriaatteet MBR-prosessissa tulisivat olla seuraavat:

- 1) Lietepitoisuus: Prosessin lietepitoisuutta ei tulisi kasvattaa liian korkeaksi, koska prosessin energiankulutus kasvaa heikentyneestä hapensiirtotehokkuudesta johtuen. Kalvosuodatusosion optimilietepitoisuus voidaan arvioida olevan 10 – 12 g/l. Ilmastusosiossa lietepitoisuus voidaan pitää alhaisempana
- 2) Hydraulinen viipymä: MBR-prosessia ei tulisi soveltaa korkeakuormitteisissa prosesseissa, koska näissä osa orgaanisesta aineesta ei ole täysin hajonnut, vaan on liikaa liukoisessa ja kolloidissa muodossa. Liukoiset ja kolloidit aineet aiheuttavat haitallista kalvojen tukkeutumista.
- 3) Lieteikä: Puhdistamon mitoituksessa tulisi määrittellä lieteikä vain niin korkeaksi, että haluttu puhdistustulos saavutetaan (esim. nitrifikaatio). Yleinen suuntaus MBR-prosesseissa tuntuu tällä hetkellä olevan, että lieteikää kasvatetaan mahdollisimman korkeaksi tarpeettomastikin ja samalla kasvatetaan prosessin energiatarvetta. Hapensiirtotehokkuuteen eniten vaikuttava tekijä on todettu olevan lietepitoisuus, joka kasvaa lieteiän kasvaessa. Lieteikä tulisi optimoida lietteentuoton ja halutun puhdistustuloksen perusteella. Liian pitkä lieteikä voi johtaa permeaatin laadun heikentymiseen.
- 4) Kalvoala: Vuorokausivirtaamien ja lämpötilojen perusteella voidaan määrittää tarvittava kalvoala ja tuntivirtaamien perusteella määritetään tarvittavien linjojen ja tasauksen tarve. Sallitut vuot keskimäärin ja lyhytaikaisina maksimeina vaihtelevat kalvovalmistajilla. Tarvittava kalvoala kasvaa, kun lämpötila laskee. Nyrkkisääntönä voidaan pitää 1 m² kalvoa/ 1 AVL, jos suodatus suunnitellaan käsittelemään myös huippuvirtaamat.
- 5) Linjaisuus: Huollon ja kalvojen pesun kannalta miniminä voidaan pitää kahta linjaa. Jokaisessa altaassa voi olla yksi tai useampi kalvosuodatusyksikkö. Hyvä periaate varsinkin isommilla laitoksilla linjojen lukumäärän määrittämiseksi on maksimi- ja minimivirtaaman suhde, jolloin minimivirtaamalla on käytössä vain yksi linja ja maksimivirtaamalla kaikki kalvot ovat käytössä.
- 6) Altaiden mitat: Puhdistamon allasrakenteet kannattaa mitoittaa siten, että kaikkien kalvovalmistajien suodattimet mahtuvat käytettäviin altaisiin ja hydraulikka sekä kuormitukset kalvoille ovat mahdollisimman tasaista. Allassyvyys kalvosuodatuksessa ei tarvitse olla viittä metriä

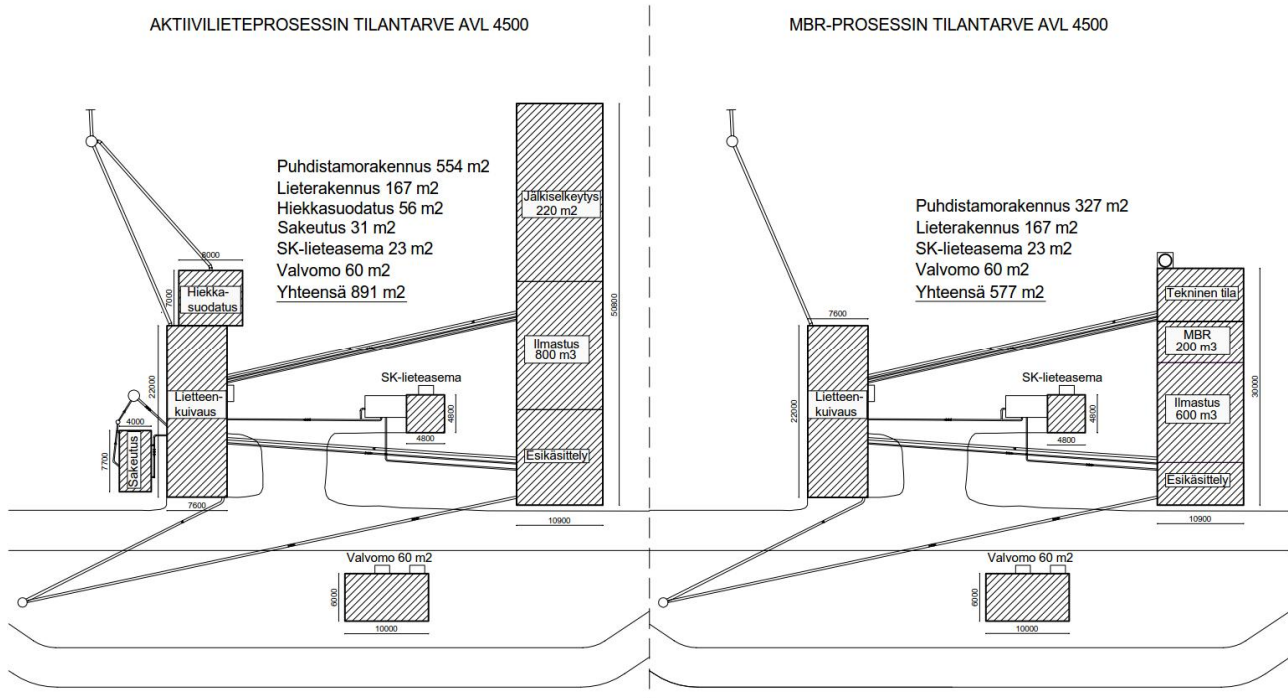
syvämpi. Ilmastuksessa allasyvyys voi olla suurempi ja ilmastusta voidaan ajaa hapensiirtotehokkuuden parantamiseksi kalvosuodatusta matalammalla lietepitoisuudella.

- 7) Prosessilaitteiden kahdentaminen: MBR-prosessissa tärkeimmät prosessilaitteet tulee olla toiminnaltaan täysin varmistettuja. Prosessin tärkein osa on kalvojen ilmapuhdistus ja sen toiminta on turvattava kaikissa tilanteissa. Kun kalvojen läpi ei suodateta vettä, ne voivat olla useita tunteja lietteessä tukkeutumatta, vaikka ilmasyöttö ei olisi päällä. Varavoimaa ei pääsääntöisesti ole varattu MBR-puhdistamoiden puhdistusilmalle. Kalvoilmastuksen keskeytyessä on suodattaminenkin keskeytettävä ja johdettava vettä esikäsittelyn jälkeen mahdolliseen ohitusvesien käsittelyyn.
- 8) Ohitustilanteisiin varautuminen: MBR-prosessissa tulee varautua biologisen osan ohitustilanteisiin kuten muissakin biologisissa prosesseissa. Nykyisten laitosten kokemusten perusteella kalvosuodatus on niin varmatoimista, ettei sen häiriöihin tarvitse varautua muuten kuin tyypillisin tasaus- ja ohitusjärjestelyin.
- 9) Varautuminen vaahtamiseen: Ajoittaiseen vaahtamiseen kannattaa varautua puhdistamon suunnitteluvaiheessa.

MBR-prosessi soveltuu hyvin matalakuormitteisiin prosesseihin, esimerkiksi typenpoistoprosessiksi. MBR-prosessin merkittävä etu on, ettei kevään huippuvirtaamia varten tarvitse vähentää lietettä prosessista, vaan enemmänkin lisätä sitä jäteveden lämpötilan laskua varten. Myöskään nitrifikaatiobakteerit eivät karkaa, jolloin nitrifikaatio käynnistyy ja palautuu nopeammin. MBR-prosesissa helposti toteutettavissa oleva pidempi lieteikä antaa mahdollisuuden hitaasti kasvavien bakteerien kehittymiselle.

4.2. Tilantarve MBR vs. CAS

MBR-tekniikan käyttö mahdollistaa pienemmän reaktorikoon ja tätä kautta vähäisemmän tilantarpeen puhdistamolle. Kansainvälisesti ajatellen MBR:n vaatima reaktoritilavuus on murto-osa CAS:n tilavuudesta, mutta vertailun tulos riippuu paljon käytettävästä lietepitoisuudesta. Suomessa on perinteisesti käytetty myös aktiivilieteprosessissa korkeita lietepitoisuuksia (6-10 g/l), jolloin MBR-tekniikan tuoma etu ei ole yhtä merkittävä. Reaktoritilavuuden lisäksi tulee tilantarpeessa huomioida myös muun teknisen tilan tarve ja prosessivaihtoehdon vaikutus muun prosessin tilavuuksiin. Kuvassa 12 on esitetty esimerkkinä vertailu puhdistamon (AVL 4500) tilantarpeesta käyttäen CAS-tekniikkaa ja MBR-tekniikkaa.



Kuva 12. Vertailu aktiivilieteprosessin ja MBR-prosessin tilantarpeesta. Esimerkki on todellisesta kohteesta.

Kuvasta voidaan todeta, että kalvosuodatusyksikön tarvitsema tilavuus olisi noin 200 m³ ja jälkiselkeyksaltaan tilavuus noin 800 m³. Ilmastusaltaan tilavuus oli 25 % pienempi MBR-tekniikalla. Kaiken kaikkiaan puhdistamon tilantarve MBR-tekniikalla oli 577 m², kun perinteisen tekniikan puhdistamo tarvitsisi 891 m². Tilantarve pieneni kokonaisuudessaan siis noin 35 %.

4.3 MBR:n hydraulinen suunnittelu

4.3.1 Tarvittava kalvoala

Kalvosuodatus mitoitetaan suoraan tulevan jätevesivirtaaman ja jäteveden lämpötilan perusteella. Karkeana nyrkkisääntönä kunnallisilla puhdistamoilla voidaan pitää neliö kalvopinta-alaa yhtä asukasvastineyksikköä kohti. Eli noin 10 000 AVL:n puhdistamossa tarvitaan noin 10 000 neliötä kalvopinta-alaa. Viemäriverkoston kunto sekä teollisuusjätevesien aiheuttama kuormitus vaikuttavat kuitenkin merkittävästi jätevesimääriin sekä jäteveden lämpötilaan ja puhdistamon tulokuormitus on pystyttävä selvittämään mahdollisimman tarkasti MBR-prosessia mitoitettaessa. Suuret ja kylmät virtaamapiikit keväisin lumien sulamisen yhteydessä kasvattavat kalvoalan tarvetta suhteessa keskimääräiseen virtaamaan ja lämpötilaan, jolloin kalvosuodatuksen investointi- ja käyttökustannukset muodostuvat korkeiksi. Kalvoalan tarve korreloi voimakkaasti virtaaman ja lämpötilan suhteen ja kullakin hetkellä kalvoalan tarve on karkeasti arvioiden 24 x tulovirtaama/jäteveden lämpötila. Kesäaikaan virtamaan ollessa 10 000 m³/d ja jäteveden lämpötilan ollessa 16 °C olisi tarvittava kalvoala noin 15 000 m². Keväällä, mikäli

tulovirtaama olisi 30 000 m³/d ja jäteveden lämpötila 8 °C, tarvittaisiin kalvoalaa noin 90 000 m², eli noin kuusinkertaisesti kesäajan virtaamaan nähden. Jäteveden alhainen lämpötila siis kasvattaa kalvoalan tarvetta erittäin merkittävästi.

4.3.2 Ratkaisut huippuvirtaamien huomioimiseen

Kalvoja voidaan kuormittaa lyhytaikaisesti suuremmillakin kalvovuon arvoilla. Kevätajan huippuvirtaamat ovat kestoltaan useimmiten alle kahden viikon pituisia jaksoja, jolloin kalvovuot voivat väliaikaisesti olla noin kolmanneksen vuosikeskiarvoa suurempia. Suuremmilla virtaamilla kalvot tosin likaantuvat nopeammin ja alhaisessa lämpötilassa jäteveden biologinen puhdistuminen on hitaampaa, mikä korostaa kalvojen likaantumisenopeutta. Kalvotoimittaja tekee tarkemmat kalvojen mitoitus- ja kuormitustietojen perusteella.

Kalvosuodatusta ei kuitenkaan välttämättä kannata mitoittaa varsin lyhyiden kevätajan maksimivirtaamien mukaan, vaan näille poikkeuksellisille virtaamahuipuille voidaan suunnitella tasausmahdollisuus tai ohitusvesien käsittely suoraan esikäsittelyn jälkeen. Näin tullaan toimimaan mm. Tukholman Henriksdalin puhdistamolla, jossa vanha tertiäärihiekkasuodatus jätetään käyttöön ohitusvesien käsittelyyn suurimpien virtaamien ajan. (Samuelsson ym. 2014) Myös Parikkalaan rakennettavalla MBR-puhdistamolla tullaan hyödyntämään vanhoja selkeytysaltaita ja hiekkasuodatusta ohitusvesien käsittelyssä. Hiekkasuodatusta paremmin ohitusvesien käsittelyyn voisivat soveltua tehostettu laskeutus tai flotaatio, jotka on helpommin otettavissa käyttöön nopeasti tarpeen vaatiessa. Tyypillisesti MBR-puhdistamoilla on varauduttu huippuvirtaamiin jollain tavoin. Esimerkiksi Hünxen ja Bettonin puhdistamoilla on laajennuksen yhteydessä lisätty MBR-tekniikkaan perustuva toinen prosessilinja ja vanha aktiivilieteprosessi on jäänyt käyttöön. Bettonin puhdistamolla MBR-linjalle ohjataan koko ajan tasainen virtaama ja aktiivilietelinjan virtaama vaihtelee. Monilla puhdistamoilla tai viemäriverkostossa on myös tasausaltaita, joilla joko tasataan virtaaman vuorokausivaihteluita (esim. Seelscheid, Betton) tai joihin varastoidaan virtaamahuippuja (esim. Seelscheid (puhdistamo), Betton (verkosto)).

4.4 Ilmastuksen mitoitus

Taulukossa 1 on esitetty eri kalvovalmistajien ominaisilmastustarvetta. Suuret vaihteluvälit joidenkin valmistajien kohdalla johtuvat siitä, että näiltä valmistajilta löytyy erikorkuisia kalvomoduuleja. Korkeissa moduuleissa ominaisilmastustarve on pienempi, koska ilmakuplat pystyvät puhdistamaan suuremman kalvoalan matkallaan pintaa kohti. On kuitenkin huomioitava, että syvemmissä altaissa ilma on syötettävä korkeammassa paineessa ja energiantarve on näin ollen suurempi.

Taulukko 1. Ominaisilmastustarve (SAD_m ja SAD_p) eri kalvotyypeille. (EUROMBRA 2006, Judd ja Judd 2011)

Kalvovalmistaja	SAD _m [m ³ /m ² *h]	SAD _p [m ³ ilma/m ³ permeaatti]
Tasomaiset kalvot		
Kubota	0,2 - 0,8	24 – 88
WW	0,75	
Toray	0,4 - 0,75	27
A3	0,30 - 0,45	
Alfa Laval	0,21 – 0,54	
Huber	0,35 – 0,48	16 – 19
Onttokuitukalvot		
Zenon (GE)	0,3 - 0,4	8 - 28
M. Rayon	0,65	
Asahi	0,25	9,3
Puron	0,25 - 0,35	15
Memcor	0,2 – 0,4	16 – 17

Ilmastuksen tarpeen minimoimiseksi tulisi käytössä olla vain tarvittava määrä kalvoja suhteessa virtaamaan tai puhdistamoja tulisi pyrkiä kuormittamaan mahdollisimman tasaisesti lähellä mitoitusvirtaamaa. Tämä voidaan huomioida varaamalla tasausmahdollisuuksia prosessiin. Kokemuksien perusteella monia MBR-puhdistamoita ajetaan iso osa ajasta varsin pienellä hydraulisella kuormalla, mutta tätä ei huomioida kalvojen ilmastuksessa vaan ilmapuhdistus on käytössä koko kalvoalalle melko samalla teholla.

Ajotavasta riippuen happipitoisuus kalvosuodatusaltaassa voi olla kyllästystasolla jatkuvasti tai ajoittain ja prosessin alkuun siirtyä siis runsaasti happea. Happi on ongelma typenpoiston denitrifikaatiolle, jonka vuoksi kierrätyslietteelle kannattaakin järjestää jonkinlainen deox-osasto, jossa happi kuluu loppuun ennen anoksista osioita.

4.5 Kemikaalipesujen mitoitus

Kalvojen puhdistamiseksi tehtävien kemiallisten pesujen määrät ja toteutustavat riippuvat paljon käytettävästä kalvotekniikasta. Perusajatuksena on puhdistaa kalvojen orgaanista likaantumista emäksisellä natriumhypokloriitilla ja epäorgaanisia saostumia sitruunahapolla. Suomen pintavedet ovat verrattain pehmeitä, joten jätevedetkin sisältävät vähemmän suoloja, jotka voivat saostua kalvojen pinnalle. Pehmeä vesi oletettavasti parantaa kalvosuodatuksen permeabiliteettia ja vähentää happopesujen tarvetta. Kalvojen puhdistaminen pyritään tekemään altaissa CIP (Cleaning in place)-menetelmällä, jolloin kalvoja ei tarvitsisi nostaa ylös, vaan pesukemikaali syötetään suoraan kalvojen permeaattitilaan. Putkimaisilla kalvoilla voidaan lisäksi joutua tekemään pidempikestoisia liuotuspesuja, joissa kalvot nostetaan ylös erilliseen lämmitettyyn kemikaalialtaaseen likoamaan. Kalvojen nosteleminen ylös altaasta on kuitenkin työlästä ja aikaa vievää ja siitä on pyritty eroon. Liuotuspesu voidaan myös tehdä vaivattomammin tyhjentämällä yksi suodatusosio lietteestä ja täyttämällä se pesukemikaalilla. Tällöin tyhjennettävä lietemäärä on kuitenkin saatava pumpattua ja suodatettua muilla linjoilla ja käytetylle kemikaalille tarvitaan erillinen tyhjennysallas, jotta se saadaan kierrätettyä tai hävitettyä hallitusti. Suodatusaltaat ja siellä olevat laitteistot on siis tällöin oltava kemikaalikestäviä.

Tasomaisilla kalvoilla muutaman kerran vuodessa tehtävissä palautuspesuissa käytetään yleensä noin 0,5 %:sta natriumhypokloriittiliuosta ja noin 1 %:sta sitruunahappoliuosta. Pesuliuosta tarvitaan alustavasti noin 5 litraa kalvoneliötä kohti, joten noin 10 000 asukkaan puhdistamossa tarvitaan permeaatilla laimennettua pesukemikaaliliuosta karkeasti arvioiden noin 50 m³/pesukerta ja noin 200 m³/vuodessa. Tasomaisilla kalvoilla altaassa tehtävien pesujen vaikutusaika on noin kaksi tuntia. Valmisteluineen sekä annosteluineen pesuihin on varattava tuplasti aikaa. Suodattimia pestään kuitenkin aina linja kerrallaan, jottei suodatusta jouduttaisi ohittamaan, joten kemikaalisäiliön tilavuus olisi kuudella linjalla enää noin 8,3 m³. Väkevää natriumhypokloriittia (15 %) tarvittaisiin siis noin 278 litraa/linja ja sitruunahappoa (50 %) noin 167 litraa/linja. Kaikkien linjojen pesu neljästi vuodessa kuluttaisi hypokloriittia siis noin 6,7 m³/a ja sitruunahappoa noin 4,0 m³/a. Pesukemikaalimäärät ovat varsin pieniä ja kemikaalit voidaankin usein toimittaa puhdistamolle 1 000 litran konteilla (Kuva 13). Karkeasti arvioiden kemikaalipesujen kustannukset olisivat 10 000 asukkaan puhdistamolla tasomaisia kalvoja käytettäessä noin 5 000 €/a. Kemikaaleja vastavirtapesujen yhteydessä käytävillä laitoksilla kustannukset voivat olla moninkertaisia. Kemikaalipesut pyritään tekemään aikana jolloin jäteveden lämpötila on korkeimmillaan, koska pesukemikaalintarpeen on todettu olevan tuolloin vähäisempää. Toisaalta pesurytmi määräytyy paljolti kalvojen likaantumisen mukaan ja varsinkin puhdistamoilla, joilla kylmä talvikausi on pitkä, joudutaan kylmänäkin kautena kalvoja pesemään.



Kuva 13. Vasemmalla tyypillisiä pesukemikaalien kontteja ja oikealla musta laimennussäiliö kemikaalien kierrättämiseen.

Kemikaalisäiliöt ja niiden investointikustannukset voivat olla merkittäviä ja ne on syytä huomioida esimerkiksi kalvotoimittajia vertailtaessa. Kemikaalipesu voidaan toteuttaa myös ilman kemikaalisäiliötä suoraan laimennusveteen annostellen. Tällöin käytetty kemikaali kuluu täysin lietealtaaseen ja sitä on laskettava purkuvesistöön. Suositeltavampi tapa on kuitenkin käyttää kemikaaliallasta, josta sitä voidaan kierrättää suodattimille useampaan kertaan ja käyttää samaa kemikaalia useamman linjan pesussa. Pesujen jälkeen käytetty kemikaali voidaan annostella pikkuhiljaa prosessiin, jolloin sen vaikutukset lietteen laatuun saadaan minimoitua. Natriumhypokloriitin käyttäminen suurina määrinä voi heikentää lietteen laatua, aiheuttaa vaahtoamista ja lisätä kalvon likaantumista. Pesukemikaalin laskeminen suoraan purkuvesistöön voi aiheuttaa ei-toivottuja vaikutuksia vesieliöstölle mm. korkean tai matalan pH:n sekä haitallisten klooriyhdisteiden vuoksi.

Mitä suurempaa kalvovuota käytetään, sitä nopeammin kalvo likaantuu ja sitä useammin kalvopesuja on tehtävä. Kemikaalipesut voidaan tehdä automaattisesti aikataulutettuna tai kun permeabiliteetti laskee riittävän alas. Ajoittain kalvon permeabiliteetti voi kuitenkin laskea normaalista poiketen ja palautua itsestään kun kalvoa likaava vaikutus on poistunut.

4.6 Käytettävät kemikaalit (pH:n säätö ja fosforin saostus)

Saostuskemikaalien on epäilty aiheuttavan epäorgaanista saostumaa ja tukkivan kalvohuokosia, jonka vuoksi saostuskemikaalien annostuspaikkaan ja syöttömäärään kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Saostuskemikaalin tarvittava annostustaso MBR-prosessissa ei poikkea aktiivilieteprosessista. Selvityksen puhdistamoilla eri saostuskemikaalien syöttömäärät vaihtelivat merkittävästi puhdistusvaatimuksien ja

prosessin mukaan (15-200 g/m³). Joillakin puhdistamoilla saostuskemikaalia annosteltiin vain ajoittain ja biologinen fosforinpoisto riitti pitämään fosforipitoisuuden vaatimuksien mukaisena. Saostuskemikaalin vähäisenkin annostelumäärän oli havaittu parantavan lietteen suodatettavuutta ja kuivattavuutta paremman flokkirakenteen vuoksi usealla biologisen fosforinpoiston laitoksella.

Monilla MBR-laitoksilla saostuskemikaalia syötetään suoraan ilmastusaltaaseen, jolloin kemikaalin sekoittuminen ei ole välttämättä optimaalista ja se voi reagoida osittain kiintoaineen kanssa. Saostuskemikaali kannattaa syöttää suoraan tulevaan jäteveeseen hyvissä sekoitusolosuhteissa, jolloin kemikaali pystyy reagoimaan fosforin kanssa. Annostuspiste voi olla esikäsittelyn alussa tai heti hienovälppäyksen jälkeen, mikäli kemikaali aiheuttaa ruostumis- ja likaantumisongelmia laitteistolle. Saostuskemikaaliksi soveltuu rautapohjainen kemikaali siinä missä alumiinipohjainenkin, joskin on viitteitä, että rautakemikaali tukkisi kalvoja enemmän. Toisaalta olemassa olevien laitoksien fosforinpoistovaatimukset eivät ole kovinkaan tiukkoja ja usein osa fosforinpoistosta toteutetaan biologisesti. Näin ollen pitkäaikaisia kokemuksia hyvin alhaisten pitoisuuksien saavuttamiseen tarvittavien suurien kemikaalimäärien käytöstä ei toistaiseksi ole. Esimerkiksi Kubota ja GE suosittelivat polyalumiinikloridin käyttöä. Ferrisulfaattia pidetään MBR-prosesseissa ferrikloridia parempana saostuskemikaalina vahvemman flokkirakenteensa vuoksi. Keski-Euroopassa saostuskemikaaleina käytetään yleisesti ferrikloridia ja polyalumiinikloridia. Myös natriumaluminaatti oli käytössä Woffelsbachin MBR-puhdistamolla korkean pH:nsa vuoksi. Saostuskemikaali voitaneen valita suoraan hinnan ja käytettävyyden perusteella. Suomessa ferrisulfaatin on alustavasti oletettu olevan sopiva saostuskemikaali MBR-prosesseihin. Jos on päästävä hyvin alhaisiin fosforipitoisuuksiin, MBR-prosessakin kannattaa varautua ns. kaksipistesyöttöön kahdella eri kemikaalilla, jolloin pääasiallinen saostuskemikaali (ferri) syötettäisiin esikäsittelyyn ja viimeistelevä kemikaali (PAC) syötettäisiin vain tarvittaessa pikasekoituksella ennen kalvosuodatusta. Kaksipistesyötöllä saavutetaan usein parempi yhteisvaikutus fosforin saostumiseen.

Nitrifioivassa aktiivilieteprosessissa tarvitaan usein pH:n laskun estämiseksi alkalointikemikaalin syöttö, joka on yleensä toteutettu käyttäen sammutettua kalkkia, kalkkikivijauhetta tai nk. Meesa-tuhkaa. MBR-prosessissa kalkkia sisältävien alkalointikemikaalien kalsiumsuolat voivat kuitenkin saostua kalvojen pinnalle ja aiheuttaa tukkeutumista. Jotkin kalvotoimittajat ovatkin asettaneet raja-arvoksi jäteveden kalsiumpitoisuudelle 250 mg/l. Alkalointikemikaalien käytöstä MBR-puhdistamoilla ei ole laajasti kokemuksia, koska alkalointikemikaalin lisäyksen tarve rajoittuu yleensä vain alueille, joissa vesi on luonnostaan pehmeää. Etenkin pienemmillä MBR-puhdistamoilla alkalointikemikaalina voi olla helpompaa käyttää nestemäistä lipeää, joka voidaan toimittaa puhdistamolle pesukemikaalien tapaan konteilla ja varastoida pesukemikaalien kanssa samassa tilassa. Nestemäisessä muodossa käyttövalmiina toimitettavan lipeän turvallisuus on parempi, sillä välttyään lipeäliuoksen valmistamiselta.

4.7 Esikäsitteilyn tarve

MBR-prosessi vaatii tavanomaista aktiivilieteprosessia tehokkaamman välppäyksen toimintavarmuuden parantamiseksi. Öljyjä ja biohajoamattomia silikoneja ei saa päästää MBR-prosessiin. Rasvapitoisuus tulee olla alle 50 mg/l. Kalvoille erityisen vahingollisiksi ovat osoittautuneet hiukset ja muut pidemmät kuidut. Hiukset voivat prosessiin päätyessään takertua onttokuitukalvonippujen juuruksiin estäen kalvojen liikumista ja heikentäen ilmapuhdistuksen tehokkuutta. Hiuksien ja kuitujen aiheuttamia tukkeumia ei saada poistettua vastavirtapesulla ja usein niiden poistaminen tapahtuukin käsityönä. Pahimmillaan hiukset voivat vahingoittaa onttokuitukalvoja kuroutumalla niiden ympärille ja leikkaamalla ajan myötä niitä poikki. (kuva 13) Myös tasomaisilla kalvoilla kuidut voivat aiheuttaa ongelmia tukkimalla ilmapuhdistuksen reikäputkia (kuva 14) tai kalvovälejä (kuva 15).



Kuva 13. Nordkanalin MBR-puhdistamolla havaittua kuitujen aiheuttamaa tukkeutumista ja kalvojen puhdistusta. (Erftverband)

MBR-laitoksilla on usein käytössä tavanomaisen karkeamman välppäyksen (3-6 mm) jälkeen vielä erillinen hienovälppäys, jolla poistetaan kalvosuodattimille hankalia kuituja ja muuta suurempaa kiintoainesta. Hienovälppät ovat ns. kaksidimensionaalisia välppiä, joissa reikäkoko on 0,5-2 mm. On havaittu, että rumpusiivilät ja levynauhavälppät, joissa käytetään pyöreitä reikiä verkkomaisen rakenteen sijaan, ovat toimintavarmempia ja helpommin puhdistettavia. Keski-Euroopan puhdistamoilla käytetään yleisesti rumpusiivilöitä. (kuva 16) Pohjoismaissa yleisesti käytetyt porraskvälppät eivät sovellu hyvin hienovälppäykseen yksidimensionaalisen rakenteensa vuoksi. Kuidut menevät helpommin pystysuorien

säleiden välistä etenkin, mikäli välppä padottaa (kuva 17). Porrasvälpät ovat käytössä mm. Woffelsbachin ja Seelcheidin MBR-puhdistamoilla, joilla on ilmennyt kuitujen aiheuttamia ongelmia.

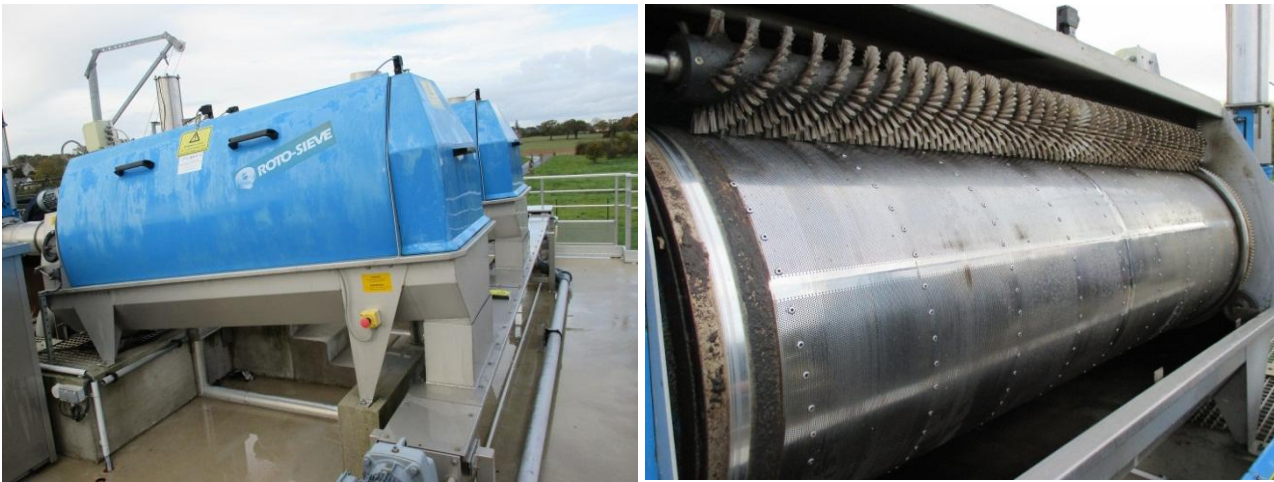


Kuva 14. Woffelsbachin MBR-laitoksella havaittu hienovälpeongelma (Kubota)

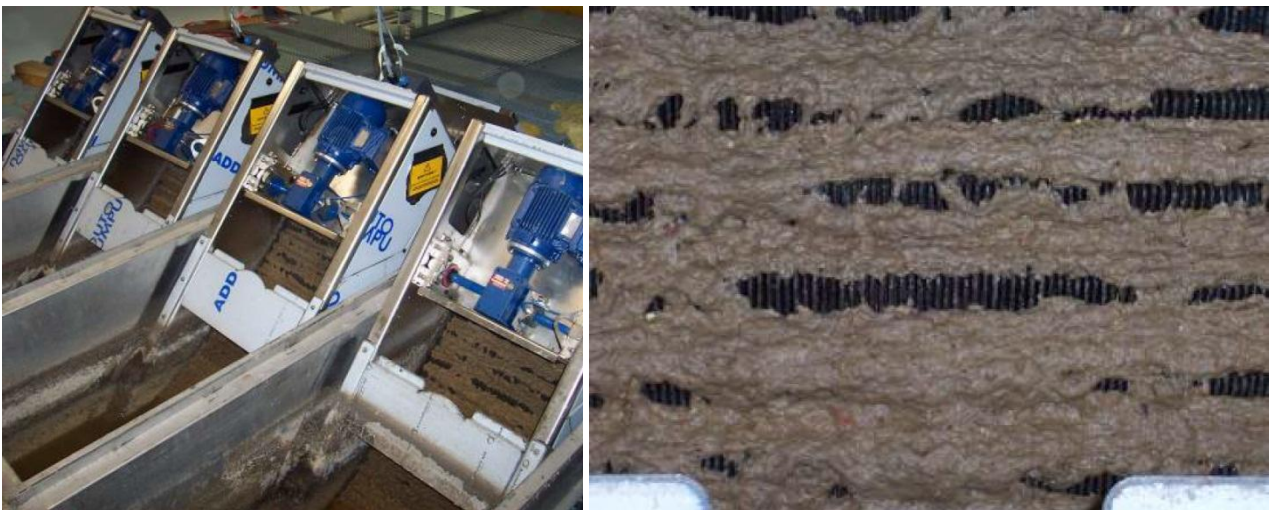


Kuva 15. Konzenin puhdistamon kalvovälien lietetukkeumia ja tukkeutuneita kalvoja ennen ja jälkeen huuhtelun (Kubota).

Hienovälppien muuttaminen jälkikäteen esim. rumpusiivilöiksi voi olla hankalaa hydraulisten ongelmien vuoksi ja välppäys voi tarvita uuden välipumppauksen. Bettonin puhdistamolla Ranskassa kuituja on jouduttu poistamaan käsityönä tasomaisten kalvojen väleistä altaisiin laskeutumalla, vaikka käytössä on 2mm rumpusiivilät. Hienovälppäyksessä kannattaa varmistaa, että välppien ja hienovälppien siirtojärjestelmän kapasiteetti riittää maksimivirtaamillakin. Nozayn puhdistamolla on tehty palautuslietekiertoon yhde hienovälpile, jolloin lietettä voidaan pumpata MBR-altaasta hienovälpile ja poistaa mahdollisia altaisiin kerääntyneitä kuituja.



Kuva 16. Nozayn MBR-puhdistamon rumpusiivilät.



Kuva 17. Woffelsbachin MBR-puhdistamolla käytössä olevat 0,5 mm:n porrasiivilät ja välppälle jäävää hienovälpettä (Kubota).

Hienovälpettä syntyy edeltävän välppäyksen tehosta, viemäriverkoston kunnosta ja jätevesikuormituksesta sekä hienovälppäyksen tiheydestä riippuen noin 0,3-3 m³/10 000 m³ jätevettä. Tiheämmillä 1 mm:n välpillä välpemäärä voi olla moninkertainen 2 mm:n välppiin verrattuna ja reikä/verkkovälpällä vastaavasti taas moninkertainen sälevälppiin verrattuna. Hienovälpeen muodostumismäärä voi olla suunnitteluvaiheessa arvioitua suurempaa ja osoittautua ongelmaksi käsittelylaitteiden tai varastoinnin ja loppukäsittelyn kannalta (kuva 18).

Hienovälpeen käsittelystä voi tulla merkittäviä kustannuksia, mikäli se hävitetään esimerkiksi monen saksalaisen puhdistamon tapaan polttamalla. Välpeen käsittely, varastointi ja kuljetus voivat aiheuttaa myös hajuhaittoja. Hienovälpeen pesu ja kuivaus ovat karkeampaa välpettä hankalampia. Hienovälppäyksen reikäkokoa ei kannata siis valita turhaan liian pieneksi, jolloin välpemäärä voi muodostua ongelmaksi. Helpoin tapa hienovälpeen käsittelemiseksi on sekoittaa se takaisin prosessista poistettavaan ylijäämä- tai pintalietteeseen, jolloin se menee lietteenkäsittelyyn ja kuivaukseen, jonne se normaalisti tavanomaisessakin aktiivilieteprosessissa menisi. Kuitupitoisen hienovälpeen on havaittu Nordkanalin puhdistamolla parantaneen lietteen kuivaustuloksia 26 %:sta jopa 31 %:iin. Hienovälpeen määrä esimerkkipuhdistamoilla vaihteli niin, että Nordkanalin puhdistamolla, jossa käytössä oli 1 mm:n välppä, syntyi 0,3 m³ välpettä 1000 m³ käsiteltyä jätevettä kohden. Hünxen puhdistamolla taas 2 mm:n välpällä syntyi 0,03 m³ välpettä vastaavaa jätevesimäärää kohden eli vain kymmenes osa Nordkanalin välpemäärästä. Avranches'n puhdistamolla 2 mm:n välppä tuotti noin 0,08 m³ välpettä 1000 m³ jätevettä kohden.



Kuva 18. Nordkanalin hienovälpettä viikonloppuna esiintyneen maksimivirtaaman jäljiltä (Frechen 2010).

4.8 Esiselkeytyksen käyttö MBR-prosessin yhteydessä

Kirjallisuustietojen perusteella voidaan arvioida, että tehokkaasti toimiva esiselkeytys toimisi paremmin kuin 2 mm:n välppä MBR-prosessin esikäsittelemenetelmänä. Esiselkeytys ei kuitenkaan poista hiuksia tehokkaasti, joten tältä osin käsittelyä pitäisi vielä täydentää välppällä erityisesti onttokuitukalvojen tapauksessa. Esiselkeytys oli käytössä selvityksen puhdistamoilla vain Seelscheidin puhdistamolla. Esiselkeytyksen käytön vähäisyys MBR-puhdistamoilla johtuikin kuitenkin enemmän puhdistamoiden keskimäärin pienestä koosta ja Keski-Euroopan suunnitteluperinteistä kuin itse tekniikan soveltumattomuudesta MBR-tekniikkaan. Seelscheidin puhdistamolla esiselkeytyksen käytöstä on hyviä kokemuksia. Esiselkeytyksen käyttö on perusteltua suuremmilla puhdistamoilla, koska sillä voidaan leikata ilmastusenergian tarvetta biologisessa prosessissa. Jos lietettä mädätetään puhdistusprosessin jälkeen, mahdollistaa esiselkeytys myös korkeamman metaanintuottopotentialin mädätyksessä.

4.9 Lietteen tuotto ja käsittely

4.91 Lietteen ominaisuudet

Selvityksessä mukana olleiden puhdistamoiden osalta käyttötietoja saatiin riittävällä tarkkuudella vain Woffelsbachin ja Nozay'n puhdistamoilta. Woffelsbachissa lietteentuotto oli 0,68 kgSS/kgBOD, kun lieteikä oli 41 päivää ja Nozay'ssa 1,07 kgSS/kgBOD, kun lieteikä oli 61 päivää. Muiden puhdistamoiden osalta laskelma tehtiin mitoistustietojen perusteella ja lietteen tuotot vaihtelivat välillä 0,3 – 1,2 kgSS/kgBOD. Suuruusluokka vahvistaa aikaisemmat kirjallisuustiedot siitä, että lietteentuotto ei poikkeakaan CAS-prosessista. Vaikka Nozay's ja Woffelsbachin puhdistamoilla lieteikä ei selittänyt lietteentuoton eroja, näkyi koko aineistossa selvä riippuvuus niin, että pidemmällä lieteikäällä lietteentuotto pieneni.

Lietteenkuivaintoimittajille lähetettiin kysely MBR-lietteen kuivattavuuskokemuksista. Kyselyyn saatiin vastauksia kolmelta kuivainvalmistajalta. Kaikki kuivainvalmistajat kertoivat kirjallisuustiedoista poiketen, että MBR-lietteen kuivauksessa tarvitaan suurempi polymeerimäärä MBR-prosessissa kuin CAS-prosessissa. Laitetoimittajien ilmoittamat polymeerimäärät MBR-lietteelle olivat noin 10-20 % suurempia kuin CAS-lietteille. Vastauksissa kaksi kuivaintoimittajaa ilmoitti MBR-lietteen kuivaustulosten (kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuus) olevan hieman huonompia kuin CAS-prosessin. GEA Westfalia on mitannut lietteen kuivaustuloksia ja polymeeriannostuksia puhdistamoilla, joissa lietteen kuivaus on toteutettu lingolla. Kanadan Albertassa sekä Alankomaiden Eemshavenissa lietteen kuivaus on toteutettu ilman polymerointia. Molemmilla laitoksilla saavutettu kuiva-ainepitoisuus on noin 15 %. Yksi valmistaja puolestaan ilmoitti, etteivät he ole havainneet merkittävää eroa MBR- ja CAS-lietteiden kuivaustulosten välillä, jos MBR-lietteen kuivauksessa käytetään noin 1 kg/t-lietettä enemmän polymeeriä. Saksassa Nordkanalin

jätevedenpuhdistamolla on päästy jopa kuiva-ainepitoisuuksiin 25,0-26,5 % polymeeriannostuksella 8-12 g/kg. Huber Technology tutki ruuvipuristimen toimivuutta MBR-lietteen kuivauksessa Saksassa Monheimin kunnallisella jätevedenpuhdistamolla. Syötettävän lietteen kuiva-ainepitoisuus oli 1 % ja sitä ei sakeutettu/tiivistetty ennen kuivaimelle johtamista. Kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuudet olivat 22 – 24 %, kun polymeeriannostus vaihteli välillä 6,6 – 8,8 g/kgTS. Kokeessa todettiin myös, että sakeutettu liete oli vaikeammin kuivattavaa. Tosin pitkä lietteen varastointi saattoi vaikuttaa kuivattavuuteen.

4.9.2 MBR-pilotin lietekokeet

Tämän työn yhteydessä tutkittiin Parikkalan MBR-pilottien lietteitä erilaisin laskeutuvuutta, suodatettavuutta ja kuivattavuutta kuvaavin menetelmin. Testeinä käytettiin lieteindeksiä DSVI, CST-testiä, kartiosuodatuskoetta sekä painesuodatuskoetta. Testattaviin lietteisiin ei lisätty polymeeriä. Testien perusteella voidaan todeta, että ilman apuaineiden käyttöä MBR-lietteen laskeutuvuus- sekä kuivattavuusominaisuudet olivat CAS-lietettä heikompia. Yhtäläillä voidaan todeta, että MBR-lietteen laskeutuvuus- ja kuivattavuusominaisuudet olivat parempia, kun lietteeseen lisättiin saostuskemikaalia. Tulokset vahvistavat kirjallisuudessa esitetyt tiedot laskeutuvuuden osalta, mutta ovat ristiriidassa kuivattavuuden osalta. Toisaalta kuivainvalmistajien kokemukset kuivattavuuden osalta ovat samansuuntaisia kuin tässä tutkimuksessa. Tällä perusteella voidaan todeta, että saman laskeutuvuuden ja kuivattavuuden saavuttamiseksi MBR-lietteeseen pitää lisätä enemmän polymeeriä.

Parikkalan MBR-pilotin ylijäämäliete poistettiin nitrifikaatio/kalvosuodatussäiliön ja denitrifikaatiosäiliön välisestä lietteenkierrätyslinjasta. Monilla puhdistamoilla ylijäämäliete poistetaan samankaltaisesti kalvosuodatuslohkosta, jolloin lieteflokkit ovat voimakkaan ilmaston vuoksi osittain hajonneet. Suositeltavampi tapa lietteen laskeutus- ja kuivattavuusominaisuuksien parantamiseksi voisi olla poistaa ylijäämäliete aikaisemmista lohkoista, joissa sekoitus ei ole yhtä voimakasta.

MBR-prosessin biologisen lietteen tiivistys perinteisessä painovoimaisessa tiivistämössä voi olla kyseenalaista. MBR-prosessista poistettavan lietteen kiintoainepitoisuus on usein suurempaa kuin CAS-prosessin vastaava ja mikäli sakeutuksella lietteen kiintoainepitoisuutta ei saada nostettua riittävästi voi saavutettu hyöty, lietteen kuivauksen kannalta, olla hyvin pieni. Saksassa ja Ranskassa useilla MBR-laitoksilla ei ole erillistä lietteen tiivistystä ennen kuivausta, vaan liete johdetaan suoraan kuivaimelle. Lisäksi on mahdollista, että sakeuttamosta karkaa vettä kevyempiä partikkeleita, jotka palautuvat rejektiveden mukana puhdistusprosessiin ja näin ollen ajan myötä rikastuvat prosessissa. Perinteisen sakeutuksen tehokkuutta voi olla kuitenkin mahdollista parantaa esim. polymeroinnilla. Laitoskierroksella selvisi myös, että lietteenkuivausta voi olla mahdollista tehostaa sekoittamalla hienovälpeitä

ylijäämälietteeseen. Nordkanalin laitoksella on päästy tällä tavoin jopa 31 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. Tosin lietteenkäsittelyssä voi olla merkittäviä eroja esim. lietteen varastointiajoissa, millä voi olla vaikutusta kuivattavuuteen.



SUOSITUKSET MBR-PROSESSIN TOTEUTUKSEEN

- Jäteveden tehokas esikäsittely on ensiarvoisen tärkeää. 1 tai 2 mm reikälevyvälpä on suositeltava ratkaisu.
- MBR-prosessin vaahtoamiseen on varauduttava suunnittelussa.
- MBR-prosessin mitoitus tehdään samoilla periaatteilla kuin aktiivilieteprosessin mitoitus
- MBR-puhdistamolla suurimpien virtaamapiikkien varastointi tai käsittely erikseen yleensä kannattaa, erityisesti kylmässä ilmastossa, koska varsinkin käyttökustannukset kasvavat ylimitoitetuilla puhdistamoilla.
- Isommilla MBR-puhdistamoilla esiselkeytys soveltuu hyvin esikäsittelyksi.
- MBR-prosessin lietteen tuotto on sama kuin aktiivilieteprosessissa, jos lieteikä on sama. Lietteen laskeutuvuus on heikompi, mutta lietettä ei ole välttämättä tarpeen sakeuttaa ennen kuivausta. Kuivauksessa on varauduttava suurempiin polymeeriannostuksiin kuin aktiivilieteprosessin lietteellä.
- Saostuskemikaalin syöttö toteutetaan aktiivilieteprosessin periaattein, mutta kemikaalien yliannostusta on syytä välttää kalvotukkeutumisen estämiseksi. pH:n säädössä kalkki saattaa nopeuttaa tukkeutumista.

5. Käytön optimointi

5.1 Käyttökustannusten optimointi

5.1.1 Ilmamäärä

MBR-prosessin suurin käyttökustannus muodostuu ilmasta, jota joudutaan syöttämään kalvomoduuleille niiden puhtaana pitämiseksi. Tästä syystä suurin vaikutus käyttökustannuksia minimoitaessa saadaan pienentämällä ilmantarvetta. Joillain puhdistamoilla, mm. Hünxen puhdistamolla Saksassa, tuotettiin kaikki biologisen prosessin tarvitsema happi kalvomoduulien keskikarkeakuplailmastimilla, vaikka niiden hapensiirtotehokkuus on huonompi kuin hienokuplailmastimien. On myös huomioitava, että pienien kuplien puhdistusteho on isoja kuplia heikompaa, mikä voi aiheuttaa tukkeutumisongelmia. Lohkojen ja kierrätysvirtaamien suunnittelussa on hyvä huomioida puhdistusilman hyödyntäminen biologian hapentarpeessa, mutta ilmastuksen optimointi tulisi tehdä erikseen biologisen osan hapensiirtoa ajatellen sekä kalvojen puhdistuksen kannalta.

Ilmantarvetta voidaan pienentää pysäyttämällä ilmapuhdistus niiltä kalvovyksiköiltä, joita ei alhaisen virtaaman aikaan tarvitse käyttää. Tällainen ajotapa oli käytössä mm. Seelscheidin puhdistamolla Saksassa. Kun kalvomoduulit eivät suodattaneet, niiden puhtaana pysyminen varmistettiin vain muutaman minuutin ilmansyötöllä tunnissa. Iso osa kalvomoduuleista oli yön aikana useita tunteja pois käytöstä. Ilmamäärää voidaan myös säätää esim. jäteveden lämpötilan mukaan. Mm. Tervurenin puhdistamolla Belgiassa ilmamäärää kalvomoduuleille kasvatetaan 20 %, kun lämpötila laskee alle 10 asteen. Ilmamäärän ajon aikaiseen ohjaukseen ja optimointiin on kehitetty erilaisia malleja ja järjestelmiä (mm. Plilippe ym., 2013). Ohjaus voi perustua suodatusvirtaaman mittaamiseen (Ferrero et al 2011) tai se voi sisältää myös edistyneempiä lietteen ominaisuuksien tai kalvojen kunnan mittauksia, mm. lietteen jatkuvatoiminen suodatettavuus mittaus (Marcano, 2012).

5.1.2 Esimerkkejä ilmamäärän optimoinnista

Nordkanalin puhdistamolla Saksassa on saatu optimoitua kalvoilmastusta $340 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot \text{kasetti tasolta}$ $275 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot \text{kasetti tasolle}$ eli säästöä oli noin 20 % GE:n käyttöönottovaiheeseen verrattuna. Nordkanalin puhdistamolla kalvoilmastuksen ominaisarvot ovat parhaimmillaan SAD_m $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ja SAD_p $14,6 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{h}$. Seelscheidissa on päästy ominaisilmastuksessa tasoille SAD_m $0,3 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ja SAD_p $11,7 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{h}$. Kubota oli ilmoittanut ilmapuhdistusmääräksi SAD_m $0,5-0,6 \text{ Nm}^3/\text{m}^2/\text{h}$. Ilmansyöttöä on siis voitu laskea noin 40–50 % kalvotoimittajan suosittelemasta arvosta. Parikkalaan prosessiurakoitsijan takuuarvo

puhdistusilmakompressoreiden energiankulutukselle on $0,43 \text{ kWh/m}^3$, jolloin ilmamäärät ovat noin $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ja $12,1 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$.

Joillakin selvityksen puhdistamoilla nykyisien kompressorien säätöalue ei salli ilmastuksen pienentämistä, vaikka kalvojen puhtaanapitoon se riittäisikin. Nordkanalin puhdistamon kokonaisenergiankulutus on nykyään noin $0,67 \text{ kWh/m}^3$ ja Seelscheidin noin $0,7 \text{ kWh/m}^3$, mutta ilmakompressorit vaihtamalla kulutusta voitaisiin vielä pudottaa. Prosessin optimointi on ollut kaikilla MBR-puhdistamoilla lähes täysin puhdistamon oman henkilökunnan ja osaamisen varassa. MBR-prosessia kilpailutettaessa kannattaakin kiinnittää huomiota kalvotoimittajien energiankulutuksen optimointiin takuuarvojen avulla sekä käyttöhenkilökunnan koulutukseen.

5.1.2 Kierrätysvirtaamien ja pumppausten optimointi

Lietteenkierrätys voidaan toteuttaa energiatehokkaasti käyttäen ns. airlift -pumppua. Kierrätys prosessilohkojen välillä perustuu MBR-säiliön voimakkaan ilmastuksen aiheuttamaan nosteeseen ilma-vesiseoksessa. Tällainen toteutus on käytössä mm. Bassussaryn puhdistamolla Etelä-Ranskassa. Ongelmaksi voi muodostus lietekiertojen tarkka säätö ja hallinta

Palautuslietettä kierrätetään tyypillisesti kalvosuodatuslohkosta, jossa happipitoisuus on erittäin korkea, jolloin lietteen happipitoisuutta täytyy saada laskettua ennen anoksiiniin tai anaerobisiin lohkoihin kierrättämistä. Tämä voi tapahtua esimerkiksi erillisessä Deox-altaassa, jossa lietteessä olevan ylimääräisen hapen annetaan kulua loppuun. Tällöin saadaan hyödynnettyä kalvoilmastuksen hapesta biologiassa noin 10-20 %..

5.1.3 Käytettävien kalvovyksiköiden minimointi

Käyttökustannusten minimoimiseksi suositeltava MBR-prosessin ajotapa olisi ottaa suodatuslinjoja käyttöön tulovirtaaman perusteella. Pienellä virtaamalla käytetään vain ajoittain yhtä linjaa yhden suodatusjakson verran (esim. 10 min), jonka jälkeen hyödynnetään vuorotellen seuraavia linjoja, jotta kaikkien kuormitus olisi mahdollisimman tasaista. Virtaaman kasvaessa vesipinta altaissa alkaa nousta ja muita linjoja otetaan automaattisesti käyttöön. 10 min suodatusjaksot ovat niin lyhyitä, että altaan vesipinnan vaihtelu voidaan rajoittaa muutaman senttimetrin välille. Mikäli tulovirtaama on yöaikaan erittäin pientä, voivat kalvot olla pitkiäkin aikoja käyttämättöminä, jolloin lietettä on ajoittain hyvä ilmastaa laskeutumisen estämiseksi ja hapellisten olosuhteiden takaamiseksi.

5.1.4 Kemikaalipesujen minimointi

Kemikaalipesujen todellinen tarve ja teho selviävät lopullisesti vasta käyttöönoton jälkeen. Alussa voi joutua kokeilemaan myös muita kemikaaleja sekä optimaalista pesun kestoa, pesukemikaalipitoisuutta ja pesujen jaksotusta. Mikäli lieteikä on pitkä, voi natriumhypokloriitin tarve olla vähäistä ja mikäli saostuskemikaaleja käytetään vähän ja hulevedet ovat pehmeitä voi myös happokemikaalin tarve olla vähäistä. Jos ilmapesun tai mekaanisen puhdistuksen teho jää heikoksi, joudutaan kemikaalipesuja tekemään useammin. Ranskan laitoksilla on pyritty minimoimaan kemiallisten pesujen määrää sekä henkilökunnan ja kemikaalien tarvetta pitämällä kalvoilmastusta varmuuden vuoksi suuremmalla teholla. Erilaisten puhdistustapojen osalta voidaan löytää optimi. Lisäksi käytössä oleva kalvopinta-ala tulee olla sellainen, että kalvoja käytetään aina alle kriittisen vuon. Tällöin myös kemikaalipesujen tarve minimoidaan. Kalvot likaantuvat myös seisossaan altaassa käyttämättöminä, sillä liukoiset ainekset pääsevät kulkeutumaan kalvon sisälle aiheuttaen biofilmien kasvua.

5.2 Lietteen käsittelyn optimointi

MBR-laitoksilla maailmalla lietteen kuivaukseen käytetään niin suotonauhapuristimia, ruuvipuristimia kuin linkojakin. Käytettävän kuivausmenetelmän osalta ei voida esittää selvää suositusta. Lietteenkuivausta voi olla myös mahdollista tehostaa sekoittamalla toisen välppäysvaiheen hienovälpe kuivattavaan lietteeseen. Lietteen kuivauksen ja myös laskeutuvuuden osalta tärkein optimointi tulisi tehdä käytettävän polymeerin valinnassa ja annostusmäärässä. Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla lietteenkuivausta ei käytännössä koskaan toteuteta ilman polymeerin syöttöä kuivattavaan lietteeseen. Lietteen kuivattavuus paranee huomattavasti polymeroinnin ansiosta ja sen avulla voidaan tasoittaa MBR- ja CAS-lietteiden kakun kiintoainepitoisuuksissa olevia eroja. MBR-lietteen laatu poikkeaa monin tavoin CAS-lietteen laadusta (kpl 3.4) ja sille ei välttämättä parhaiten sovellu samat polymeerit, jotka ovat osoittautuneet tehokkaiksi perinteisen aktiivilieteprosessin lietteille. Parhaan kuivaustuloksen saavuttamiseksi voidaan tutkia myös anionisen ja kationisen polymeerin yhdistelmää. MBR-lietteen kuivauksessa joudutaan turvautumaan CAS-lietteen kuivauksessa käytettyjä polymeeriannoksia suurempiin polymeerimääriin, joten oikean polymeerin tai polymeeriyhdistelmän valinnalla on vielä suurempi vaikutus prosessin käyttökustannuksiin. Lietteenkäsittelyn optimointi tulisi tehdä tapauskohtaisesti niin, että lietteen jatkokäsittely huomioidaan. Kustannustehokkain ratkaisu ei aina ole lietteen kuivaus mahdollisimman korkeaan kuiva-ainepitoisuuteen.

5.3. MBR-puhdistamon käyttö

5.3.1 MBR-puhdistamon työmäärä

Saksan ja Ranskan MBR-laitoksilla puhdistamon hoitotyötä on arvioitu olevan suurin piirtein saman verran tai hieman enemmän kuin CAS-puhdistamoillakin. Lisääntynyt hoitotyö voi johtua mm. väärin suunnitellun välppäyksen aiheuttamista ongelmista. MBR-puhdistamoilla hoitotyö on erilaista ja se on enemmän automatisoitua ja sisältää enemmän mm. mittalaitteiden kalibrointia ja kemikaalityöskentelyä.

5.3.2 Kalvojen toiminnan seuranta

Kalvoilmastuksen toimivuutta ja ilmanjakoa suodattimien alle olisi hyvä tarkkailla ja kalvosuodatusaltaaseen olisi hyvä olla suora näköyhteys hoitotasolta. Keski-Euroopan laitoksilla altaat oli yleensä katettu komposiittilevyillä, jolloin altaisiin ei nähnyt suoraan. Altaiden pintaa olisi pystyttävä tarkastustilanteissa laskemaan nopeasti esimerkiksi sulkemalla tulo- ja poistoluukut sekä lietekierto ja suodattaa vettä sekä pumpata lietettä ylijäämälietepumpulla hienovälpile. Suodattimien yläpinnan paljastuessa näkyy mahdolliset lietetukkeumat ja voidaan paremmin päätellä altaan tyhjennystarve. Lietetukkeumia voidaan myös yrittää poistaa yksinkertaisesti laskemalla vettä letkulla kalvoväleihin.

5.3.3 Vaahoamisen hallinta

MBR-prosesseissa muodostuu tyypillisesti pintavaahtoa noin 10–20 cm kerros, eikä siitä yleensä ole haittaa. Joillakin puhdistamoilla on kuitenkin ajoittain havaittu merkittävää vaahdon muodostumista ja sitä on yritetty poistaa erilaisien ryyppyruuhien, vesisuihkujen ja vaahdonestokemikaalien avulla. Kalvotoimittajat eivät kuitenkaan salli joidenkin vaahdonestokemikaalien ja pinta-aktiivisten aineiden käyttöä niiden kalvoja tukkivan vaikutuksen vuoksi. Pienimmissä prosesseissa pintavaahtoa voidaan poistaa yksinkertaisesti jopa märkäimurin avulla. Epätavallisen suuren vaahoamisen on arvioitu johtuvan mm. pesukemikaaleista, viemäriverkoston johdetuista haitta-aineista ja lietteen hydrolysoitumisesta sekä näiden yhteisvaikutuksista. Viemäriverkoston ei kannatakaan syöttää hajunpoistokemikaaleja, mikäli puhdistamolla on käytössä kalvosuodatus. Lietteeseen uskotaan vaahoavan vähiten kun lieteikä on lämpötilaan nähden sopiva ja kloori tai alumiinipohjaisten kemikaalien käyttö on vähäistä. Toisaalta haitallisten mikrobien (mm. *M. Parvicella*) poistaminen voi vaatia edellä mainittuja kemikaaleja.



MBR-PUHDISTAMON OPTIMOINTI

- Tärkein optimointikohta MBR-puhdistamolla on ilmapuhdistuksen minimointi.
- Biologian tarvitsema happi on energiatehokkaampaa tuottaa hienokuplailmastimilla kuin MBR:n karkeakuplailmastimilla. Kalvoille kannattaa syöttää vain puhdistukseen vaadittava ilma. On huolehdittava myös siitä, ettei happi kierrä anoksilohkoihin.
- Korkeampi vuo lisää puhdistustarvetta ja liian pieni puhdistusilman käyttö lisää kemikaalipesujen tarvetta. Ajotapaan on haettava optimi.
- Puhdistusilmatarve vaihtelee kalvotyypeittäin ja kalvotoimittajan suositus on yleensä "varman päälle".
- Sekoittamalla hienovälpe lietteeseen voidaan parantaa kuivattavuutta.
- Lietteenkuivaukseen voi soveltua paremmin toisenlaiset polymeerit kuin perinteisen aktiivilieteprosessin lietteelle.

6. MBR:n hankinta

6.1 Hankintakokonaisuus

MBR-prosessi on tavanomaista aktiivilieteprosessia vaativampi suunnitella. Kalvosuodatuksen prosessiurakka kannattaa kilpailuttaa erikseen ja muu puhdistamorakennusurakka erikseen. Tällä saavutetaan etua siitä, että saadaan prosessitoimitukseen enemmän kilpailua ja varmemmin laajempi otanta eri kalvovalmistajien tuotteita valittavaksi. Myös prosessitoimituksen kustannusrakenne saadaan tällöin paremmin selville. Prosessiurakoitsija hankkii kalvomodulit ja niiden mitoituksen sekä tiedot toteutusperiaatteista kalvotoimittajalta. Muu puhdistamo voidaan suunnitella huomioiden valitun kalvotoimittajan vaatimukset. Prosessiurakoitsijalla on myös hyvä tarkistuttaa muun puhdistamon kilpailutuksessa käytetyt suunnitelmat.

Prosessiurakan kilpailutuksessa on hyvä käyttää apuna asiantuntevaa ja puolueetonta suunnittelijaa, jolla on aiempaa kokemusta MBR-prosessien suunnittelusta. Suunnittelijan tehtävänä on valmistella alustavat mitoitukset sekä tarjouspyyntöaineistot ja varmistaa, että prosessi toteutetaan mahdollisimman käyttövarmaksi ja muunneltavaksi. Valitut ratkaisut eivät saisi sulkea pois muiden valmistajien kalvojen hyödyntämistä esim. 10 vuoden päästä. Suunnittelijalla on oltava käsitys käytettävien kalvojen toimintatavoista, energiankulutuksesta ja kemikaalitarpeista sekä työmäärästä. Pelkän energiankulutuksen vertaaminen ei kerro koko totuutta MBR-prosessin käyttökustannuksista, vaan lisäksi on huomioitava eri kemikaalipesujen aiheuttamat kustannukset sekä eri kalvotyyppien erilaiset huoltotoimenpiteet ja mahdollisesti eripituinen elinkaari.

Prosessiurakoitsija voi olla samaa organisaatiota kuin pääurakoitsijakin, mikä helpottaa projektin hallintaa rajapintojen vähenemisenä ja voi nopeuttaa urakan valmistumista. Suunnittelijan on kuitenkin annettava prosessiurakoitsijan suunnittelijalle tietyt reunaehdot, joiden mukaan prosessi suunnitellaan mahdollisimman hyvin soveltuvaksi myöhemmin myös muiden kalvovalmistajien tuotteille, eikä pääurakoitsijan oma prosessisuunnittelija voi vaatia kalliimpia tai vain heidän laitteistollensa soveltuvia rakenteita.

Automaatio on erittäin tärkeässä roolissa MBR-puhdistamoilla. MBR-prosessin osalta automaatio olisi syytä sisällyttää prosessiurakkaan ja huolehtia siitä, että automaatio saadaan mahdollisimman hyvin liitettyä jo olemassa oleviin järjestelmiin ja mahdollisimman käyttäjäystävälliseksi.

6.2 Prosessivastuiden jakaminen

Suomessa nyt käynnistyneissä MBR-hankkeissa on toimittu niin, että prosessiurakoitsija mitoittaa prosessin konsultin alustavan suunnitelman pohjalta. Suunnitelmien pohjalta kilpailutetaan pääurakoitsija, joka vastaa muista toteutus suunnitelmista.

Prosessiurakkaan sisältyy MBR-kalvosuodatusprosessin yksityiskohtainen prosessisuunnittelu, MBR-prosessin koneiston ja putkiston asennussuunnittelu, koneisto-, putkisto-, instrumentti ja laitehankinnat ja asennukset sekä käyttöönotto, prosessin käynnistys ja käyttöhenkilöstön koulutus. Urakkaan sisältyy lisäksi takuujot sekä takuuajan velvollisuudet.

Prosessiurakan toimituslaajuuden tulee olla sellainen, että kalvosuodatusprosessi on kokonaisuudessaan käyttövalmiina myös sähkö- ja automaation osalta. Prosessiurakkaan sisältyy kaikki kalvosuodatusprosessin käytön vaatimat laitteiden sähköistykset ja automatisoinnit suodatusprosessin omaan erilliseen automaatiokeskukseen. Keskuksen suunnittelu, hankinta ja asennus sisältyvät urakkaan kaikkine kaapelointineen ja kytkentöineen.

6.2 Takuuarvot

Kalvosuodatusprosessin takuuarvoiksi riittää vaadittava permeaattivirtaama sekä rajat kiintoaineelle ja ulosteperäisille mikrobeille, mikäli kalvotoimittajalta ei edellytetä koko prosessin mitoitusta. Tällöin varsinainen biologisen prosessin ja fosforin poiston mitoitusta tehdään erikseen. Virtaaman takuuarvo voi olla esim. biologisen prosessin mitoitustavirtaama minimilämpötilassa. Kalvosuodatuksella permeaatin kiintoainepitoisuus on käytännössä aina alle 1 mg/l ja E-coli-pitoisuus alle 1 pmy/100 ml. Permeaatti voi sisältää mikrobeja sekä kiintoainetta, mutta ne ovat todennäköisesti kasvaneet vasta putkistossa ja lähtöaltaassa. Ulosteperäisiä mikrobeja permeaatissa ei kuitenkaan pitäisi olla ja niiden havaitseminen indikoi vuotavasta kalvosta tai putkiliitoksesta ja on siksi hyvä tapa tarkkailla kalvorikkojen esiintyvyyttä. Mikrobirajaa ei kannata kuitenkaan asettaa liian tiukaksi. Takuuarvoille kannattaa asettaa tietyt virtaama- ja kuormitusrajat, joiden täytyessä takuuarvot ovat voimassa. Kalvotoimittaja ei voi ottaa vastuuta suunniteltua isommasta kuormituksesta tai tällaisessa tapauksessa väärin mitoitettu biologista.

Kalvosuodatuksen käyttökustannukset ovat aktiivilieteprosessia suurempia ja erot eri kalvotyyppien kesken voivat olla merkittäviä. Puhdistamon suunnitteluvaiheessa sekä kalvotoimittajan valinnassa kannattaakin

kiinnittää korostetusti huomiota prosessin energiatehokkuuteen. Yksinkertainen tapa käyttökustannusten vertailemiseksi on vaatia prosessiurakoitsijoita ilmoittamaan takuuarvoina kalvojen ilmapuhdistuksen ja mahdollisen permeaattipumppauksen energiakulutukset sekä pesukemikaalien tarve ja pesukertojen lukumäärät eri virtaamatasoilla. Takuuarvojen perusteella voidaan helposti laskea eri prosessitoimittajille esimerkiksi viiden vuoden ajalle lasketut vertailukustannukset, joiden perusteella voidaan valita kokonaistaloudellisesti edullisin prosessi. Annettujen takuuarvojen toteutuminen tulee varmistaa takuuajoilla käyttöönoton yhteydessä sekä myöhemmässä käyttövaiheessa. Jos takuuarvot jäävät saavuttamatta, tulee seurauksena olla sopivan suuruinen sakko tai laitteiston uusimis- tai korjaamisvelvollisuus. Näin vältetään se, ettei tarjouksissa esitetä liian optimistisia arvioita takuuarvoille. Kohdassa 6.3 on esitetty yksinkertaistettuna esimerkkejä mahdollisista urakkatarjouksessa hyödynnettävistä takuuarvoista ja vertailuperusteista.

6.3 Esimerkki tarjouksen takuuarvoista

Prosessiurakoitsijan tulee antaa tarjouksessaan MBR-prosessin osalta seuraavat takuuarvot:

- Permeaattivirtaama
- Kiintoaineen (SS) puhdistusteho
 - kiintoainepitoisuus permeaattissa enintään 2 mg/l
- Permeaatin indikaatoribakteerit
 - Suolistoperäiset enterokokit < xxx pmy/100 ml
 - Escherichia coli < xxxx pmy/100 ml
- MBR-kalvomoduulien mekaaninen takuu 5 vuotta

Poistoteho lasketaan MBR-kalvosuodatusaltaaseen tulevasta jätevedestä ja MBR-kalvosuodatusaltaasta poistuvasta jätevedestä. Esimerkki takuuajoille annettavista raja-arvoista käsiteltävän veden ja prosessiolosuhteiden suhteen on esitetty seuraavassa:

- Virtaama (10 vuorokautta) $\leq q_{mit}$
- Jäteveden lämpötila $\geq \text{min } ^\circ\text{C}$
- Lietepitoisuus MLSS 8...15 kg/m³
- BOD_{7-ATU} kuorma puhdistamolle $\leq \text{xxx kg/d}$
- Fosforikuorma (P) puhdistamolle $\leq \text{xx kg/d}$
- Kiintoainekuorma (SS) puhdistamolle $\leq \text{xxx kg/d}$
- Liukoinen BOD_{7ATU} pitoisuus kalvosuodatukseen < x,x mg/l

- Liukoinen ammoniumtyppipitoisuus kalvosuodatukseen < xx mg/l
- Saostuskemikalointi (Fe³⁺ tai Al³⁺) hiekanerotukseen xxx...xxx g/m³
- Saostuskemikalointi (Fe³⁺ tai Al³⁺) ennen kalvosuodatusta xx...xxx g/m³

Lisäksi voidaan käyttökustannusten vertailemiseksi edellyttää urakoitsijalta seuraavia energiankulutukseen ja kemikaalien käyttöön liittyviä takuuarvoja:

- MBR-kalvomoduulien puhdistusilmakompressorien ja permeaattipumppujen sähköenergian kulutus virtaamilla Q_{kesk}, Q_{mit}, 1,5xQ_{mit}
- MBR-kalvomoduulien puhdistusilmamäärä virtaamilla Q_{kesk}, Q_{mit}, 1,5xQ_{mit}
- MBR-kalvovyksiköissä tarvittavien pesukemikaalien kulutus, virtaamilla Q_{kesk}, Q_{mit}, 1,5xQ_{mit}
- MBR-kalvomoduulien kemiallisten pesujen määrä vuodessa, virtaamilla Q_{kesk}, Q_{mit}, 1,5xQ_{mit}

Käyttökustannuksiin liittyvien takuuarvojen todentamiseen liittyy ongelmia varsinkin siinä tapauksessa, että puhdistamon käyttöönoton jälkeen kapasiteetti ei ole kokonaan käytössä, vaan puhdistamolle johdettava kuormitus kasvaa vasta myöhemmin. Lisäksi takuuarvojen täyttyminen uusia kalvoja käyttäen on yleensä helppoa, mutta kalvojen vanhetessa ja tukkeutumisen edetessä käyttökustannukset voivat kasvaa. Hankinta-asiakirjoihin ja sopimukseen olisikin hyvä lisätä myös kalvojen pitkäaikaisempaa käyttöä koskevia vaatimuksia. Näin toimittaessa on kuitenkin huolehdittava siitä, että käsiteltävän veden laadusta ja ajotavasta tallentuu tiedot riittävän tiheästi niin, että voidaan osoittaa, ettei poikkeama johdu esim. väärästä ajotavasta.

7. Yhteenveto

Tässä oppaassa esiteltävä tieto perustuu Ville Venejärven opinnäytetyöhön ja Ilari Lignellin diplomityöhön sekä Ramboll Finlandin prosessiasiantuntijoiden työpanokseen. Työssä tutustuttiin kahdeksaan MBR-laitokseen Pohjois-Euroopassa. Lisäksi kerättiin kattavasti MBR-tekniikasta julkaistu tieteellinen ja tekninen kirjallisuus.

MBR-prosessi on biologinen aktiivilietteeseen perustuva käsittelymenetelmä, jossa kiintoaine erotetaan vedestä kalvosuodatuksen avulla. Biologisten ja kemiallisten puhdistusmekanismien osalta prosessi ei juurikaan poikkea perinteisestä aktiivilieteprosessista ja prosessin erityispiirteet liittyvätkin lietteen suodatettavuuteen ja kalvojen puhtaanapitoon. MBR-tekniikan etuna on se, että lietepitoisuutta ei rajoita jälkiselkeytysaltaan toiminta ja prosessin tilantarve on näin ollen pieni. Toisaalta ilmastuksen energiantarve kasvaa korkeissa lietepitoisuuksissa, joten mitoituksessa ylärajana voidaan pitää lietepitoisuutta 10 – 12 g/l. Kiinnostus MBR-prosessia kohtaan on viime aikoina lisääntynyt, koska tekniikan investointi- ja käyttökustannukset ovat laskeneet. Lisäksi puhdistusvaatimusten kiristyessä perinteinen aktiivilieteprosessi on mitoitettava hyvin väljäksi vaatimusten täyttämiseksi ja MBR on tullut näin ollen tullut kilpailukykyisemmäksi. Kalvosuodatus erottaa MBR-prosessissa kaiken kiintoaineen ja tuottaa myös hygieenisesti uimavesidirektiivin vaatimukset täyttävää vettä. MBR-tekniikalla on todettu olevan tiettyjä etuja myös uusien haitta-aineiden poistamisessa jätevedestä.

Selvityksen perusteella voitiin todeta, että kalvosuodattimet ovat toimintavarmoja ja useilla puhdistamoilla ne ovat jo ylittäneet niille asetetun 10 vuoden elinkaaren. Joillakin puhdistamoilla kalvojen odotetaan kestävän 15 vuotta. Kalvot eivät tukkeudu tai hajoa normaalilla kuormituksella ja normaalilla jätevedellä. Kalvosuodatus ei kuitenkaan sovellu lyhyen lieteiän prosesseihin, vaan lieteikä pitää olla nitrifikaatiolle riittävä, jotta orgaaninen tukkeutuminen saataisiin minimoitua. Joillakin puhdistamoilla jäteveden laatu on aiheuttanut oletettua nopeampaa tukkeutumista ja ennakoitua tiheämpää pesutarvetta. Selvityksen perusteella voidaan myös todeta, että permeaatin laatu säilyy samana kalvojen ikääntyessä. Jollain puhdistamoilla kalvon permeabiliteetti on kuitenkin pienentynyt, kun kalvojen peruuttamaton tukkeutuminen on lisääntynyt ajan myötä.

MBR-prosessin toteutus ja mitoitus tehdään pääpiirteittäin samoin periaattein kuin perinteinen aktiivilieteprosessi. MBR-prosessissa on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomioita jäteveden esikäsittelyyn, koska isommat partikkelit ja kuidut helposti tukkivat kalvomoduulit. MBR-prosessi vaatii

ohitusmahdollisuuden ennen ja jälkeen esikäsittelyä kuten aktiivilieteprosessikin varotoimenpiteenä laiterikkojen varalta. MBR-prosessi voidaan mitoittaa aktiivilieteprosessin biologian mitoituksen tapaan ja poikkeukselliset huippuvirtaamat johdetaan esikäsittelyn jälkeen ohitusvesien käsittelyyn.. Kalvojen puhdistusilman syöttö on kriittinen suodatuksen toiminnalle ja tämä tulisi huomioida mm. varakompressorilla. Varavoima ei ole kuitenkaan tätä varten tarpeen, koska kalvot eivät tarvitse jatkuvaa ilmansyöttöä suodatuksen ollessa pysähdyksissä. MBR-puhdistamon prosessin ohjaus on huomattavasti monimutkaisempaa kuin perinteisen aktiivilieteprosessin. Automaatioon on syytä kiinnittää huomiota jo suunnitteluvaiheessa.

MBR-prosessin energian tarve on merkittävästi suurempi kuin pelkän aktiivilieteprosessin. Jos kuitenkin aktiivilietteen perässä joudutaan käyttämään paljon energiaa kuluttavia käsittelymenetelmiä esim. veden hygienisoimiseksi, tasoittuu ero energiankulutuksessa. MBR-prosessin suurin energiankuluttaja on ilmasyöttö, jolla pidetään kalvot puhtaana. Viime aikoina on kehitelty useita ratkaisuita tämän energiankulutuksen pienentämiseksi ja tämä on näkynyt prosessin energiantarpeen vähenemisenä.

MBR-liete eroaa hieman käsiteltävyydeltään perinteisen aktiivilieteprosessin lietteestä. MBR-lietteen laskeutuvuus on hieman huonompaa kuin perinteisen prosessin lietteen ja selkeytyneen veden sameus suurempaa. Varsinaiseen MBR-prosessiin lietteen laskeutuvuus ei vaikuta, mutta mikäli lietteenkäsittelyssä käytetään perinteistä gravitaatioon perustuvaa sakeuttamoa, lietteen laskeutuvuudella on merkitystä. MBR-prosessin suuremman lietepitoisuuden vuoksi lietteen johtaminen ilman erillistä tiivistystä suoraan kuivaimelle on myös mahdollista. MBR-lietteen kuivattavuuden osalta kokemukset ovat vaihtelevia, mutta on hyvä varautua hieman huonompaan kuivattavuuteen ja 10–20 % suurempaan polymeerin tarpeeseen lietteen kuivauksessa.

Yhteenvedona voidaan todeta, että kalvosuodatus vaikuttaa olevan kilpailukykyinen silloin, kun jätevedenkäsittelylle on asetettu tiukat puhdistusvaatimukset tai kun altaita on tarve kattaa ja puhdistamotiloja lämmittää. Voidaan odottaa lisäksi, että tekniikan kehitys vielä jatkuu ja seuraavan sukupolven kalvomoduulit ovat käyttöominaisuuksiltaan ja –kustannuksiltaan parempia kuin nykyiset. Prosessin kustannusten ja toimivuuden kannalta on suuri merkitys sillä, miten käyttö on optimoitu. Tältä osin on odotettavissa vielä runsaasti kehitystä ja yksi askel on pyritty tekemään kokoamalla tähän oppaaseen hyviä periaatteita ja käytäntöjä.

8. Kirjallisuus

- Achille, A., Marchand, E.A., Childress, A.E., 2011. A performance evaluation of three membrane bioreactor systems: aerobic, anaerobic and attached-growth. *Water Science & Technology* 63(12), 2999-3005.
- Al-Halbouni, D., Traber, J., Lyko, S., Wintgens, Thomas, Melin, Thomas, Tacke, Daniela, Janot, Andreas, Dott, Wolfgang ja Hollender, Juliane 2008. Correlation of EPS content in activated sludge at different sludge retention times with membrane fouling phenomena. *Water research* 42 (2008), 1475-1488.
- Alligood, J., Cantu, G. (2009) Simulation for MBR Optimization *Water & Wastes Digest* 6/2009
- Al-Malack, Muhammad H. 2006. Determination of biokinetic coefficient of an immersed membrane bioreactor. *Journal of membrane science* 271 (2006), 47-58.
- Björlenius, B., Wahlberg, C., Carlsson, A. 2009 En jämförelse av olika reningsmetoder för avskiljning av läkemedelrester – Resultat från Stockholms Vattens project Den 11. Nordiske/NORDIWA Spildevandskonference 10. – 12. november 2009 Odense, Tanska
- Bolle, F.-W., Pinnekamp, J. 2011 Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen – Phase 1 Abschlussbericht, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Aktenzeichen IV-7-042 600 003 1
- Dahlén, Niklas, 2014 Development engineer, Stockholm Vatten VA AB SFAR – Stockholms Future Wastewater Treatment Henriksdals Reningsverk, Suullinen tiedoksiänto 16.6.2014
- Dresla, Kinga 2015 Erftverband, sähköpostitse saatu tieto 8.1.2015
- EUROMBRA 2009. D30 – Completion of study of filterability (SRF) and dewaterability (CST) for AS and MBR plants: pilot scale belt press tests. Membrane bioreactor technology (MBR) with an EU perspective for advanced municipal wastewater treatment strategies for the 21st century. Project no: 018480.
- Frechen, Franz-Bernd. 2010. Optimierung der mechanischen Vorreinigungsstufe kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen. Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel.
- Guglielmi, Giuseppe, Chiaran, Daniele, Prakash Sahroj, Devandra ja Andreottola, Gianni 2010. Sludge filterability and dewaterability in a membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Desalination* 250 (2010), 660-665.
- Gurung, Khum Bahadur 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, Master Thesis Lappeenranta University of Technology School of Technology
- Huang, Xia, Gui, Ping ja Qian, Yi 2001. Effect of sludge retention time on microbial behavior in a submerged membrane bioreactor. *Process biochemistry* 36 (2001), 1001-1006.

- Høiby, L., Clauson-Kaas, J., Wenzel, H., Larsen, H.F., Jacobsen, B.N., Dalgaard, O. 2007 Sustainability assessment of advanced wastewater treatment technologies Den 10. Nordiske/NORDIWA avløpskonferansen 12.-14. November 2007 Hamar, Norja
- Jinling, W., Huang, X. 2008. Effect of dosing polymeric ferric sulfate on fouling characteristics, mixed liquor properties and performance in a long-term running membrane bioreactor. Separation and Purification Technology. Vol. 63, 45-52.
- Johir, M.A.H., George, J., Vigneswaran, s., Kandasamy, J., Sathasivan, A., Grasmick, A. 2012. Effect of imposed flux on fouling behavior in high rate membrane bioreactor. Bioresources Technology. Vol. 122, 42-49
- Judd, Simon ja Judd, Claire 2011. MBR Book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment. 3. painos. Oxford: Elsevier.
- Kraume, Matthias, Bracklow, Ute, Vocks, Martin ja Drews, Anja 2005. Nutrients removal in MBRs for municipal wastewater treatment. Wat. Sci. Tech. 51 (2005), 391-402.
- Krzeminski, Pawel (2013) Activated sludge filterability and full-scale membrane bioreactors operation. Väitöskirja Technische Universiteit Delft ISBN/EAN: 978-94-6186-092-7
- Le-Clech, Pierre, Chen, Vicki, Fane ja Tony A.G. 2006. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. Journal of membrane science 284 (2006), 17-53. [
- Le-Minh, N., Coleman, H.M., Khan, S.J., van Luer, Y- Trang, T.T.T., Watkins, G., Stuetz, R.M. 2010 The application of membrane bioreactors as decentralized systems for removal of endocrine disrupting chemicals and pharmaceuticals Wat. Sci. Tech. 61 (5) 1081-1088
- Lousada-Ferreira, Maria 2011. Filterability and sludge concentration in membrane bioreactors. New university of Lisbon. Environmental engineer, branch environment. Väitöskirja.
- Marcano, L.A. 2012 Energy optimization of membrane bioreactors Lund University Water and Environmental Engineering Department of Chemical Engineering Master Thesis 2012
- Massé, Anthony, Spérandio, Mathieu ja Cabassaud, Corinne 2006. Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time. Water Research 40 (2006), 2405-2415.
- Meng, F., Chae, S., Drews, A., Kraume, M., Shin, H., Yang, F. 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. Water Research. Vol 43, 1489-1512.
- Merlo, Rion, Trussell, Shane, ... (2007) The Thickening and Dewatering of Submerged Membrane Bioreactor and Activated Sludges , Publication of Trusselltech Ltd.
http://www.trusselltech.com/uploads/media_items/differences-in-thickening-of-asp-and-mbr-sludge.original.pdf
- Merlo, Rion P., Trussell, Shane, Hermanowicz, Slawomir W., Jenkins, David 2004. Physical, chemical and biological properties of submerged membrane bioreactor and conventional activated sludges. Water Environmental Federation.
- Moustafa, M.A.E. (2011) Effect of the pre-treatment on the performance of MBR, Berghausen WWTP. Germany *Alexandria Engineering Journal* 50 (2) 197-202

- Navaratna, D. & Jegatheesan, V. 2011. Implications of short and long term critical flux experiments for laboratory-scale MBR operations. *Bioresource Technology*. Vol. 102, 5361-5369.
- Ottoson, J., Hansen, A., Björlenius, B., Norder, H., Stenström, T.A. 2006 Removal of viruses, parasitic protozoa and microbial indicators in conventional and membrane processes in a wastewater pilot plant *Water Research* 40 1449-1457
- Philippe, N., Stricker, A.-M., Racault, Y., Husson, A., Sperandio, M., Vanrolleghem, P. 2013 *Desalination* 325 7-15
- Puhto, Eeva 2009. Kalvosuodatustekniikan soveltuminen yhdyskuntajätevesien käsittelyn tehostamiseen. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. [Viitattu 2014-10-16.] Saatavissa: <http://civil.aalto.fi/midcom-serveattachmentguid-1e388d46c8da1d688d411e3a7a359e2bfc806370637/puhto2009.pdf>
- Radjenovic, Jelena, Matosic, Marin, Mijatovic, Ivan, Petrovic, Mira ja Barcelo, Damia 2008. Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology. *Hdb env chem vol. 5, part S/2 (2008)*, 37-101 [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-10-20.] Saatavissa: http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/RADJENOVIC%202008%20MBR%20as%20an%20Advanced%20Wastewater%20Treatment%20Technology.pdf
- Rosenberg, S, Kruger, U, Witzig, R, Manz, W, Szewyk, U ja Kraume, M 2002. Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water. *Water research* 36 (2002), 413-420.
- Samuelsson, O., Royen, H., Ottoson, E., Baresel, C., Westling, K., Bergström, R., Bengtsson, L., Yang, J.-J., Dahlén, N., Laurell, C., Lindblom, E., Grundestam, J. 2014 Pilotförsök med membranbioreaktor för avloppsvattenrening Delrapport 1 - Försöksår 1 NR B 2215 IVL Svenska Miljöinstitutet 2014
- Snider-Nevin, Jeffrey, Adams, Nick, Suresh, Kiran ja Zhou, Hongde 2013. Evaluation of membrane bioreactors with short sludge retention times on performance, biomass characteristics and membrane fouling. *Water environment federation* 2013.
- Stricot, M., Filali, A., Lesage, N., Spérandio, M. ja Cabassaud, C 2010. Side-stream membrane bioreactors: influence of stress generated by hydrodynamics on floc structure, supernatant quality and fouling propensity. *Water research* 44 (2010), 2113-2124.
- Spérandio M. ja Espinosa, M.C. 2008. Modelling an aerobic submerged membrane bioreactor with ASM models on a large range of sludge retention time. *Desalination* 231 (2008), 82-90.
- Tao, G., Kekre, K., Visvanath, B., Oo, M.H., Seah, H. (2008) Towards less than 0,4 kWh/m³ energy consumption of membrane bioreactor for water reclamation *Proceedings of IWA World Water Congress and Exhibition, 7-12 September 2008 Vienna Austria*
- Teck, H. C., Loong, K. S., Sun, D. D. and Leckie, J. O., 2009, Influence of a prolonged solid retention time environment on nitrification/denitrification and sludge production in a submerged membrane bioreactor, *Desalin.*, 245, 28-43
- Tiranuntakul, M., Schneider, P.A., Jegatheesan, V. 2011. Assesments of critical flux in a pilot-scale membrane bioreactor. *Bioresource Technology*. Vol. 102, 5370-5374.

- Turovskiy, I. ja Mathai, P.K. 2006. Wastewater sludge processing. Hoboken [New Jersey]: John Wiley & Sons, Inc.
- Van Haandel, Adrianus ja Van der Lubbe, Jeroen 2012. Handbook of biological wastewater treatment: Design and optimisation of activated sludge systems. 2. painos. Lontoo: IWA Publishing
- Wang, Z., Wu, Z., Tang, S. 2009 Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor *Wat.Res.* 43 2504 – 2512
- Verrecht, B., Judd, S., Guglielmi, G., Brepols, C. and Mulder, J. W. (2008) An aeration energy model for an immersed membrane bioreactor', *Water Research* 42(19) 4761-4770
- Vistisen Bugge, Thomas ja Andersen, Morten 2009. Characterization of sludge in a submerged membrane bioreactor. Aalborg university. Chemistry and environmental engineering. Diplomityö
- Wilén, Britt-Marie, Jin, Bo ja Lant, Paul 2003. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties. *Water research* 37 (2003), 2127-2139.
- Wisniewski, C, Grasmick, A. 1998 Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 138 (2-3) 403-411
- Yang, Jixiang 2013. Membrane bioreactor for wastewater treatment. [Viitattu 2014-10-15.] Saatavissa: www.bookboon.com
- Zhang, K., Farahbakhsh, K. 2007 Removal of native coliphages and coliform bacteria from municipal wastewater by various wastewater treatment processes: Implications to water reuse *Water Research* 41 2816-2824
- Zhang, Weijun, Yang, Peng, Xiao, Ping, Xu, Shiwei, Liu, Yuanyuan, Liu, Fei ja Wang, Dongsheng 2015. Dynamic variation in physicochemical properties of activated sludge floc from different WWTPs and its influence on sludge dewaterability and settleability. *Colloids and surfaces a: Physicochemical and engineering aspects* 467 (2015), 124-134.
- Zheng, X., Lü, w., Yang, M., Liu, J. 2005 Evaluation of virus removal in MBR using coliphages T4 *Chinese Science Bulletin* 50 (9) 862-867
- Zsirai, T., Aerts, P., Judd, S. 2013. Reproducibility and applicability of the flux step test for a hollow fibre membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology*. Vol. 107, 144-149.
- Ødegaard, H. 2014 A nordic perspective on the use of membrane technology in wastewater treatment *Membranteknologi - framtiden för kommunal avloppsvattenrening?* Stockholm, Desember 2014

