



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**LÄMPÖTILAN VAIKUTUS
AKTIIVILIIETEPROSESSIN TOIMINTAAN JA
OHJAUKSEEN**

Sini Luhtaniemi

PROSESSITEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2017



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**LÄMPÖTILAN VAIKUTUS
AKTIIVILIIETEPROSESSIN TOIMINTAAN JA
OHJAUKSEEN**

Sini Luhtaniemi

Ohjaajat: Jani Tomperi & Aki Sorsa

PROSESSITEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2017

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma			
Prosessitekniikan koulutusohjelma			
Tekijä		Työn ohjaajat yliopistolla	
Luhtaniemi, Sini		Tomperi J, tohtorikoulutettava Sorsa A, tutkijatohtori	
Työn nimi			
Lämpötilan vaikutus aktiivilieteprosessin toimintaan ja ohjaukseen			
	Työn laji	Aika	Sivumäärä
	Kandidaatintyö	Huhtikuu 2017	41
<p>Aktiivilieteprosessi on jäteveden biologinen puhdistusmenetelmä, jota käytetään laajasti yhdyskunta- ja teollisuusjätevesien puhdistuksessa. Sen avulla jätevesistä voidaan poistaa suurin osa fosfori- ja typpiravinteista sekä happea kuluttavista orgaanisista yhdisteistä. Kokonaisprosessi koostuu mekaanisista, kemiallisista ja biologisista vaiheista. Ympäristöolosuhteilla ja jäteveden ominaisuuksilla on suuri merkitys puhdistustuloksiin.</p> <p>Aktiivilieteprosessissa hyödynnetään jätevedessä olevia mikrobeja. Prosessiin tuodaan happea ja tarvittavia ravinteita, jotta mikrobit voivat kasvaa ja lisääntyä. Kasvatavat mikrobit muodostavat aktiivilietettä ja hajottavat jäteveden epäpuhtauksia. Jälkiselkeyttimessä liete kerätään altaan pohjalta ja ylitteenä saadaan puhdistettua vettä. Aktiivilieteprosessissa tärkeitä tekijöitä ovat happi, flokkulaatio, ympäristöolosuhteet ja lieteikä.</p> <p>Tämän kandidaatintyön aiheena oli lämpötilan vaikutus aktiivilieteprosessin toimintaan ja ohjaukseen. Työn tavoitteena oli löytää korrelaatioita lämpötilan ja eri prosessisuureiden välillä sekä teollisessa että kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa. Esimerkkiprosesseina oli Viikinmäen aktiivilietelaitos ja erään sellutehtaan aktiivilieteprosessi.</p> <p>Esimerkkiprosesseista kerätyn datan graafisessa analysoinnissa löydettiin useita yhteyksiä lämpötilan ja prosessisuureiden väliltä. Tulosten perusteella lämpötilalla on suurin vaikutus happi- ja typpipitoisuuksiin sekä kemialliseen hapenkulutukseen. Lämpötilan nousu pienentää liuenneen hapen ja typen määrää, mutta lisää kemiallista hapenkulutusta. Myös kirjallisuusselvitys tukee saatuja tuloksia.</p>			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme Process engineering			
Author Luhtaniemi, Sini		Thesis Supervisor Tomperi J, Doctoral Candidate Sorsa A, Postdoctoral Researcher	
Title of Thesis The effect of temperature on the operation and control of the activated sludge process			
	Type of Thesis Bachelor's Thesis	Submission Date April 2017	Number of Pages 41
<p>Activated sludge process is a biological purification method for waste water. It is widely used for purification of urban and industrial wastewaters. With activated sludge process the majority of phosphorus and nitrogen fertilizers and oxygen-consuming organic compounds can be discharged from waste water. The process consists of mechanical, chemical and biological operations. Environmental conditions and wastewater properties have a significant impact on purification results.</p> <p>The activated sludge process utilizes microbes in wastewater. By bringing oxygen and nutrients into the process microbes can grow and multiply. Growing microbes form sludge and disintegrate wastewater contaminants. After the activated sludge process, the sludge is collected from the bottom of the clarification pool and purified water is removed as an overflow. Oxygen, flocculation, environmental conditions and sludge age are major factors in the activated sludge process.</p> <p>The subject of this bachelor's thesis was the effect of temperature on the operation and control of the activated sludge process. The aim of the thesis was to find correlations between temperature and different process factors both in industrial and municipal wastewater treatment. Example processes used in this thesis were the activated sludge plant of Viikinmäki and the activated sludge process of a pulp mill.</p> <p>In the graphical analysis of the data collected from the example processes, several connections were found between the temperature and the process factors. Based on the results, the temperature has the greatest influence on oxygen and nitrogen concentrations as well as on chemical oxygen demand. Increasing temperature reduces dissolved oxygen and nitrogen but increases chemical oxygen demand. Also, the literature review supports the results obtained.</p>			

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
2 JÄTEVEDEN BIOLOGIA	8
2.1 Johdatus mikrobiologiaan	8
2.1.1 Mikrobien biologiaa.....	8
2.1.2 Kasvuolosuhteet.....	9
2.1.3 Aineenvaihdunta	10
2.1.4 Ravinnevaatimukset.....	10
2.2 Puhdistuksen tavoitteet ja seurattavat parametrit.....	11
2.2.1 Jäteveden komponentit	11
2.2.2 Puhdistustavoitteet.....	12
3 PROSESSIKUVAUS.....	14
3.1 Mekaaniset operaatiot	14
3.2 Kemiallinen puhdistus.....	14
3.3 Jäteveden biologinen puhdistus.....	15
3.3.1 Aktiivilietemenetelmä.....	15
3.3.2 Mikrobipopulaatio	17
3.3.3 Biologisen puhdistuksen merkitys.....	18
4 AKTIIVILIETEPROSESSIN HALLINTA	20
4.1 Tärkeät muuttujat ja niiden vaikutukset.....	20
4.1.1 Happi.....	20
4.1.2 Flokkulaatio	20
4.1.3 Ympäristötekijät	21
4.1.4 Biologinen kuorma	21
4.1.5 Lietekä	22
4.2 Mittaukset.....	22
4.2.1 Virtaamat	22
4.2.2 Ilmastusallas	23
4.3 Ohjaus ja säätö	25
5 LÄMPÖTILAN VAIKUTUS AKTIIVILIETEPROSESSIIN.....	26

6 MATERIAALIT JA METODIT	28
6.1 Viikinmäen puhdistuslaitos	28
6.2 Sellutehtaan jätevedenpuhdistus	28
6.3 Aineiston kuvaus ja analysointimenetelmät	29
7 TULOKSET JA POHDINTA	30
8 YHTEENVETO	37
LÄHDELUETTELO	38

MERKINNÄT JA LYHENTEET

BOD	biologinen hapenkulutus
COD	kemiallinen hapenkulutus
DO	liuennut happi
IIM	liukenematon epäorgaaninen aines
IOM	liukenematon orgaaninen aines
MLSS	lietepitoisuus
SIM	liukeneva epäorgaaninen aines
SOM	liukeneva orgaaninen aines
SS	kiintoainepitoisuus
TOC	orgaaninen hiili

1 JOHDANTO

Viemäriin päätyy sekä tavallista kotitalouksien jätevettä että teollisuusjätevesiä. Poikkeavan jäteveden laskeminen viemäriin on luvanvaraista ja vaatii teollisuusjätevesisopimuksen. Puhdistettava vesi sisältää runsaasti fosfori- ja typpiravinteita, jotka aiheuttavat voimakasta rehevöitymistä vesistöissä. Jäteveteen päätyvä runsas fosforin määrä on peräisin pääosin ruuasta ja pesuaineista. (Castrén et al. 2016, 19; HSY 2016)

Jäteveden puhdistuksessa käytetään usein aktiivilietemenetelmää, joka perustuu elävien mikrobien kykyyn sitoa ja hajottaa jätevedessä olevia yhdisteitä harmittomampaan muotoon. Tämän työn tarkoituksena oli selvittää lämpötilan vaikutusta aktiivilieteprosessin toimintaan ja ohjaukseen. Työssä vertaillaan kunnallista ja teollista jätevedenpuhdistusta esimerkkiprosesseista kerätyn datan avulla sekä pyritään selvittämään ympäristöolosuhteiden vaikutusta prosessiin. Esimerkkiprosesseiksi on valittu Helsingissä sijaitseva Viikinmäen aktiivilietelaitos sekä erään sellutehtaan jätevedenpuhdistus.

Jätevedenpuhdistuksen tavoitteena on poistaa jätevedestä ympäristölle haitallisia komponentteja lainsäädännön asettamien puhdistusvaatimusten mukaisesti. Merkittäviä seurattavia parametreja ovat typpi- ja fosforipitoisuudet sekä biologinen ja kemiallinen hapenkulutus (BOD ja COD). Prosessidatan graafisen analysoinnin tavoitteena oli löytää vuorovaikutuksia lämpötilan ja eri parametrien välillä. Kirjallisuuskatsauksen perusteella selvitetään saatujen analysointitulosten merkitystä aktiivilieteprosessin kannalta.

2 JÄTEVEDEN BIOLOGIA

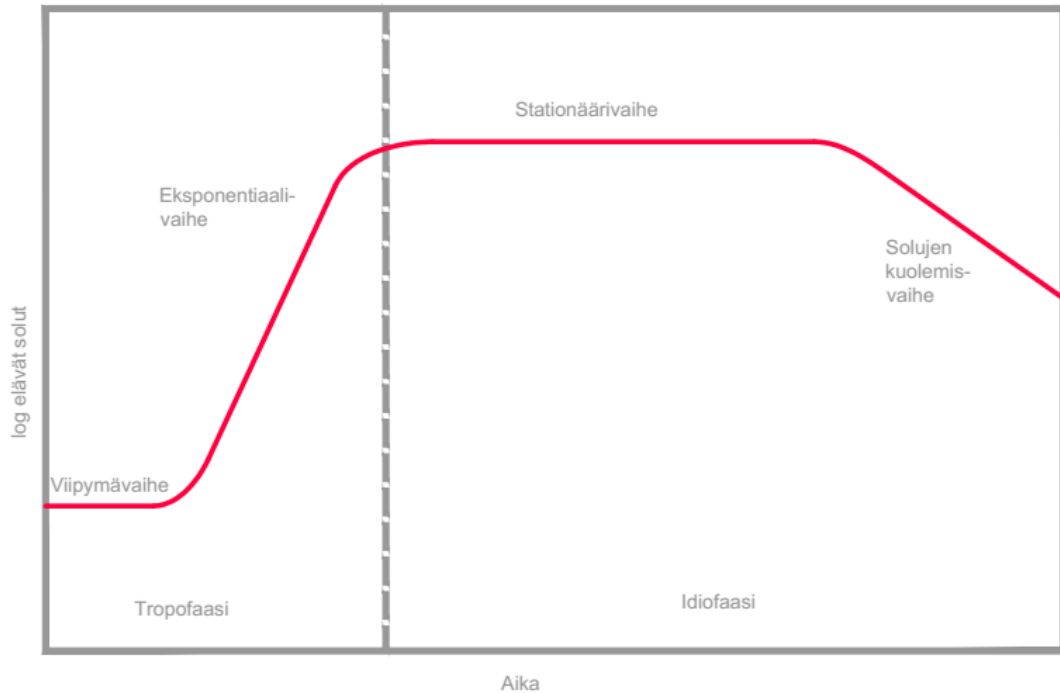
Aktiivilieteprosessi on biologinen prosessi, joka perustuu elävien mikro-organismien toimintaan. Jotta prosessin käyttäytymistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä voidaan ymmärtää, täytyy ensin tuntea sen biologinen tausta. Tässä kappaleessa esitellään biologisissa prosesseissa esiintyvien mikrobien perusominaisuuksia.

2.1 Johdatus mikrobiologiaan

2.1.1 Mikrobien biologiaa

Prokaryootit ovat esitumallisia eliöitä, joilla ei ole tumaa eikä solun sisäisiä soluelimiä. Yksisoluiset mikrobit (bakteerit ja arkit) ovat prokaryootteja. Prokaryoottien solukalvossa olevat proteiinit ottavat sisään ja erittävät aineita, huolehtivat soluhengityksestä ja viestivät ympäristön kanssa. Bakteerit voivat liikkua siimojen (flagella) avulla ja tarttua toisiinsa pilusten välityksellä. Eläin-, kasvi-, hiiva- ja sienisolut ovat eukaryoottisia. Niiden perintöaines (DNA) on tumassa. Eukaryoottisoluilla on myös muita erikoistuneita soluelimiä. (Aittomäki et al. 2002, 22-24)

Solut lisääntyvät jakaantumalla. Solujen kasvun ja jakaantumisen seurauksena biomassa kasvaa. Bioprosessien näkökulmasta tärkeimmät parametrit biomassan kasvussa ovat kahden solujakaantumisen välinen aika eli generaatioaika sekä solujakautumisten määrä tunnissa eli spesifinen nopeus. Kuvassa 1 on esitetty biomassan kasvussa esiintyvät neljä päävaihetta: alun viipymävaihe, eksponentiaalisen kasvun vaihe, stationäärivaihe (kasvun pysähtyminen) sekä solujen kuolemisvaihe. Tropofaasissa solujen kasvu on aktiivisessa vaiheessa, jolloin biomassa kasvaa ja solujen aineenvaihdunta on vilkasta. Idiofaasissa kasvu pysähtyy esimerkiksi energialähteen ehtymisen johdosta. (Aittomäki et al. 2002, 28)



Kuva 1. Solujen kasvukäyrä panoskasvatuksessa (mukaiillen Aittomäki et al. 2002, 28).

2.1.2 Kasvuolosuhteet

Lähes kaikissa olosuhteissa voidaan havaita eläviä mikrobeja. 15-45 °C:n lämpötilassa elävät mikrobit ovat mesofiilisiä. Psykrofiilit kasvavat 0-20 °C:n ja termofiilit 45-80 °C:n lämpötilassa. Emäksisiä olosuhteita sietäviä kutsutaan alkalifiileiksi ja happamassa ympäristössä eläviä asidofiileiksi. Lähellä neutraalia happamuusaluetta (pH 7) viihtyvät ovat neutrofiilejä. Luonnossa kaikista elävistä organismeista nämä erilaiset mikrobit ovat myös kaikkein monipuolisimpia ja hajaantuneimpia ravitsemustarpeiltaan. Jotkut mikrobit tulevat toimeen muutamalla epäorgaanisella yhdisteellä, kun taas toiset tarvitsevat monimutkaisia orgaanisia yhdisteitä. Kaikki mikrobit tarvitsevat hiiltä ja typpeä. (Aittomäki et al. 2002, 29; Cheremisinof 2002, 43; Mara & Horan 2003, 3)

Biomassan kasvuympäristö voi olla joko hapellinen (aerobinen), anoksinen (nitraatti elektronien vastaanottajana) tai anaerobinen (ei happea eikä nitraattia). Aerobisissa olosuhteissa tapahtuvia reaktioita ovat orgaaninen hajotus ja nitrifikaatio (ammoniumtyypen hapettaminen nitraatiksi). Anoksisissa olosuhteissa tapahtuvassa denitrifikaatiossa typpeä poistetaan pelkistämällä nitraattia typpikaasuksi. Mädätys (orgaanisen aineen hajotus) on anaerobinen prosessi. (Laukkanen 1990, 27)

2.1.3 Aineenvaihdunta

Yli 95 % solun kuivapainosta koostuu muutamasta pääelementistä, joita ovat hiili (C), happi (O), vety (H), rikki (S), fosfori (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg) ja rauta (Fe). Kaikkia näitä aineita tarvitaan biosynteesissä solumassan muodostamiseen ja energialähteiksi. Aineenvaihdunta tarkoittaa mikrobien biokemiallisten toimintojen kokonaisuutta. Tällaista, yleensä entsyymien katalysoimaa toimintaa on kahdenlaista: energiaa tuottavaa ja sitä käyttävää. (Mara & Horan 2003, 3)

Katabolisissa reaktioissa yhdisteiden hajottaminen tuottaa energiaa ja rakennusaineita solulle. Pääasiallista energialähdettä kutsutaan kasvusubstraatiksi tai hiililähteeksi. Esimerkiksi glykolyysi (glukoosin hajotus) on merkittävä katabolinen reaktiotie. Anabolisilla reaktioilla mikrobi valmistaa kasvuun tarvittavia yhdisteitä, kuten proteiineja, nukleiinihappoja, hiilihydraatteja ja lipidejä. Tarvittavan energian anabolisiin reaktioihin saadaan katabolisista reaktioista vapautuvasta energiasta. (Aittomäki et al. 2002, 31)

Aerobisessa ympäristössä mikrobit käyttävät ilmassa olevaa molekulaarista happea elektronien vastaanottajana. Aerobisissa prosesseissa syntyy vettä, hiilidioksidia ja energiaa. Anaerobisessa ympäristössä mikrobi ei pysty saamaan substraatista kaikkea energiaa irti eikä substraatti hajoa täydellisesti. Anaerobisen aineenvaihdunnan lopputuotteena syntyy substraatin hajoamistuotteita, kuten etanolia, asetonia tai maitohappoa. Aerobiseen aineenvaihduntaan verrattuna myös energiaa muodostuu vähemmän. (Aittomäki et al. 2002, 31)

2.1.4 Ravinnevaatimukset

Mikrobeilla on kolme olennaista ravitsemustarvetta: vesi, energia ja kemialliset yhdisteet. Kemiallisten energianlähteiden ja yhdisteiden on liuettava veteen, koska se kuljettaa yhdisteet mikrobisolujen sisälle. Solussa vesi on liuotin, jossa biokemialliset reaktiot tapahtuvat. Ravinteiden sisältämät kemialliset elementit ovat tarpeellisia sekä solumateriaalin synteesissä että solukomponenttien, kuten entsyymien normaalissa toiminnassa. Kasvaakseen mikrobit tarvitsevat myös tiettyjä alkuaineita. Solun kasvun kannalta tärkeimpiä alkuaineita ovat C, N (typpi), H, O, S ja P. (Mara & Horan 2003, 5)

Hiili on yksi tärkeimmistä kemiallisista tekijöistä solun kasvun kannalta. Hiili muodostaa perustan kolmelle orgaanisten ravinteiden pääluokalle, joita ovat hiilihydraatit, lipidit ja proteiinit. Nämä komponentit antavat energiaa solun kasvulle ja toimivat solumateriaalin rakennuspalikoina. Orgaanisia yhdisteitä energialähteenään käyttäviä mikrobeja kutsutaan heterotrofeiksi. Mikrobeja, jotka käyttävät hiililähteenään pääasiassa hiilidioksidia, kutsutaan autotrofeiksi. (Mara & Horan 2003, 5)

Mikrobit käyttävät suuria määriä makroelementtejä (C, H, N, S ja P). Mikroelementtejä K, Ca, Mg, Na (natrium) ja Fe tarvitaan pienempiä määriä ja hivenaineita vielä paljon vähemmän. Mikrobin käyttämät elementtien määrät eivät kuitenkaan korreloi niiden tärkeyden suhteen, vaan jopa ihan pieni määrä jotain tiettyä ainetta voi olla välttämätöntä solun kasvulle ja elämälle. (Mara & Horan 2003, 5)

Kaikki mikrobit tarvitsevat typpeä jossain muodossa. Monet prokaryootit käyttävät epäorgaanisia typen komponentteja, kuten nitraatteja, nitriittejä ja ammoniumsuoloja. Toisin kuin eukaryootisolut, jotkut bakteerit voivat käyttää ilmakehän kaasumaista typpeä solujen synteeseissä typensidontaprosessin avulla. Tiettyt mikrobit vaativat orgaanisia typpiyhdisteitä, ja jotkut käyttävät nitraattia vaihtoehtoisena elektronien vastaanottajana. (Mara & Horan 2003, 5)

Muita olennaisia ravitsemustekijöitä ovat vety, happi, rikki ja fosfori. Vety ja happi ovat komponentteina monissa orgaanisissa yhdisteissä. Tämän vuoksi vaatimukset hiilen, vedyn ja hapen suhteen täyttyvät usein yhdessä, kun saatavilla on orgaanisia yhdisteitä. Vapaa happi on myrkyllistä kaikkein vaativimmille bakteereille ja joillekin arkeille. Rikkiä tarvitaan aminohappojen synteeseissä. Fosfori taas on olennainen nukleiinihappojen ja adenosiinitrifosfaatin synteeseissä. (Mara & Horan 2003, 5)

2.2 Puhdistuksen tavoitteet ja seurattavat parametrit

2.2.1 Jäteveden komponentit

Kemiallisesta näkökulmasta kunnallinen jätevesi sisältää (1) orgaanisia komponentteja, kuten hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja, (2) typpeä pääasiassa ammoniakkin muodossa ja (3) fosforia enimmäkseen fosfaatin muodossa. Jätevesi sisältää myös monia muita ainesosia hiukkasina tai liuenneessa muodossa, kuten taudinaiheuttajia, muoveja, hiekkaa, soraa, eläviä organismeja ja metalleja. Kaikki nämä komponentit tulee käsitellä

puhdistamossa, mutta kaikki eivät ole tärkeitä jätevedenpuhdistamon suunnittelun ja mallinnuksen kannalta. Enemmän huomiota kiinnitetään hiili-, typpi- ja fosforipitoisiin ainesosiin, koska niillä on suurin vaikutus biologiseen aktiivisuuteen ja vesien rehevöitymiseen. Seurattavat perusparametrit ovat biologinen hapenkulutus (BOD), kokonaistyyppi, kokonaisfosfori, kemiallinen hapenkulutus (COD) ja kiintoainepitoisuus (SS). (Aluehallintovirasto 2015, 33; Castrén et al. 2016, 21; HSY 11A 2013; Mara & Horan 2003, 150)

Jätevesien epäpuhtaudet voidaan luokitella esimerkiksi fysikaalisten ominaisuuksien (liukoinen tai liukenematon), kemiallisten ominaisuuksien (orgaaninen tai epäorgaaninen), mikrobien vaikutuksille alttiuden (biohajoava tai biohajoamaton), alkuperän (biogeeninen tai ihmisen aiheuttama) ja vaikutusten (myrkyllinen tai myrkytön) perusteella. Usein epäpuhtaudella on useita erilaisia ominaisuuksia yhtä aikaa; se voi olla esimerkiksi liukeneva ja biologisesti hajoava. (Grady et al. 2011, 3)

2.2.2 Puhdistustavoitteet

Jäteveden käsittelyn tarkoitus on poistaa jätevedestä epäpuhtauksia, jotka voivat vahingoittaa vesiympäristöä sinne päästessään. Koska alhaisella liuenneen hapen (DO) määrällä vesistöissä on haitallisia vaikutuksia vesieliöihin, on jäteveden käsittelyssä keskitytty poistamaan niitä epäpuhtauksia, jotka heikentävät vesistöjen DO-pitoisuutta. Nämä epäpuhtaudet toimivat ravinnonlähteenä vesistöjen mikro-organismeille, jotka kykenevät selviytymään pienemmillä DO-pitoisuuksilla kuin korkeammat elämänmuodot. Suurin osa happea vaativista epäpuhtauksista on orgaanisia komponentteja, mutta ammoniumtyppi on tärkeä epäorgaaninen esimerkki. (Cheremisinof 2002, 496; Grady et al. 2011, 3)

Tavallisesti puhdistuslaitoksen suunnittelun lähtökohtana on orgaanisen aineksen poistaminen ja ammoniumtyypen hapettaminen nitraattitypeksi jätevedestä. Teollistumisen ja populaation kasvun jatkuessa on havaittu vesistöjen rehevöitymisongelmia, jotka johtuvat ravintoaineiden, kuten fosforin ja typen, purkautumisesta vesistöihin. Tämän vuoksi jätevesien käsittelyn suunnittelussa ollaan keskitytty kehittämään kustannustehokasta tapaa poistaa erityisesti näitä epäpuhtauksia. Viime aikoina ollaan kuitenkin yhä enemmän oltu huolestuneita myrkyllisten orgaanisten kemikaalien pääsystä ympäristöön. Koska ne ovat orgaanisia, happea vaativien

materiaalien poistamiseen kehitetyt prosessit ovat tehokkaita myös niitä vastaan. (HSY 12 2013; Grady et al. 2011, 3)

Kun jätevettä pääsee vesistöön, orgaaniset yhdisteet stimuloivat heterotrofisten eliöiden kasvua, mikä vähentää liuenneen hapen määrää vedessä. Hapen ollessa läsnä nitrifikaatio-organismit muodostavat ammoniakista, joka on myrkyllistä esimerkiksi kaloille ja hyönteisille, nitraattia. Tämä aiheuttaa lisääntyvää hapentarvetta. Purkautuvan jäteveden ja saatavilla olevasta hapen määrästä riippuen vesistöstä voi tulla hapeton, jolloin ammoniakin nitrifikaatio nitraatiksi loppuu. Jätevedestä peräisin olevan orgaanisen energian loppuessa vesistö ajan kuluessa elpyy, selkeytyy ja tulee taas aerobiseksi. Jäljelle jäävät ravinteet stimuloivat yhdessä auringonvalon kanssa vesikasvien kasvua. Levät tuovat uudelleen orgaanista materiaalia veteen ja saastumisen sykli alkaa alusta. Ainoastaan silloin, kun typpi- ja fosforiravinteet loppuvat, voidaan vesistöä kutsua taas eutrofisesti vakaaksi. Näistä seikoista muodostuvat selkeät tavoitteet vedenpuhdistukselle:

- 1) Pienennetään orgaanisesti sitoutunut energia sellaiselle tasolle, missä ei enää tapahdu heterotrofista kasvua ja estetään siten hapen loppuminen.
- 2) Hapetetaan ammoniakki nitraatiksi vähentämään sen myrkyllisyyttä ja hapen vähenemisen vaikutuksia.
- 3) Pienennetään rehevöitymistä aiheuttavien aineiden, kuten ammoniakin, nitraatin ja erityisesti fosfaatin määrä sellaiselle tasolle, että fotosynteettisten mikro-organismien kasvu rajoittuu ja edelleen niiden kyky sitoa kemiallista energiaa auringonvalosta vähenee. (Mara & Horan 2003, 150)

3 PROSESSIKUVAUS

Yksikköoperaatiot ovat komponentteja, jotka muodostavat prosessisarjan. Yksikköoperaatiot jaetaan yleensä perusmekanismien perusteella (fysikaalinen, kemiallinen ja biologinen). Fysikaaliset operaatiot, kuten laskeutus, perustuvat fysiikan lakeihin. Kemiallisissa operaatioissa, esimerkiksi saostuksessa, esiintyy kemiallisia reaktioita. Biologisissa operaatioissa puolestaan käytetään eläviä mikrobeja hajottamaan tai muuntamaan epäpuhtauksia entsyymaattisesti katalysoiduissa kemiallisissa reaktioissa. Koska biologisiin prosesseihin liittyy usein kemiallisia vaiheita, voidaan prosesseja kutsua myös biokemiallisiksi. (Grady et al. 2011, 3)

3.1 Mekaaniset operaatiot

Mekaanisella puhdistuksella erotetaan kiinteät materiaalit, kuten hiekka, sora, rasva ja muu sekajäte pois jätevedestä. Sekajätteestä käytetään myös nimeä välpe. Jotta vedenpuhdistus onnistuisi mahdollisimman hyvin ja laitteisto kestäisi, mekaaninen puhdistus heti prosessin alussa on tärkeää. Mekaanisen puhdistuksen lopuksi on usein esiselkeytys, jossa hienompijakoisempi kiintoainne pyritään poistamaan ja näin pienentämään seuraavaksi tulevan biologisen käsittelyn kuormitusta. (HSY 2016)

Tavoitteena on poistaa saasteet tehokkaimmalla tavalla ja pienentää käsiteltäviä vesimääriä. Iso osa liukenemattomasta materiaalista saadaan poistettua painovoiman avulla fysikaalisella operaatiolla, laskeutuksella, joka on usein ensimmäisiä yksikköoperaatioita vedenpuhdistuksessa. Laskeutusaltaan ylite sisältää kaiken liuenneen materiaalin lisäksi pienet liukenemattomat ainekset. Laskeutusaltaan pohjalta alite poistetaan paksuna lietteenä. Sekä ylite- että alitevirtaukset tarvitsevat jatkokäsittelyä, jotka usein ovat biokemiallisia operaatioita. (Cheremisinof 2002, 276; Grady et al. 2011, 4)

3.2 Kemiallinen puhdistus

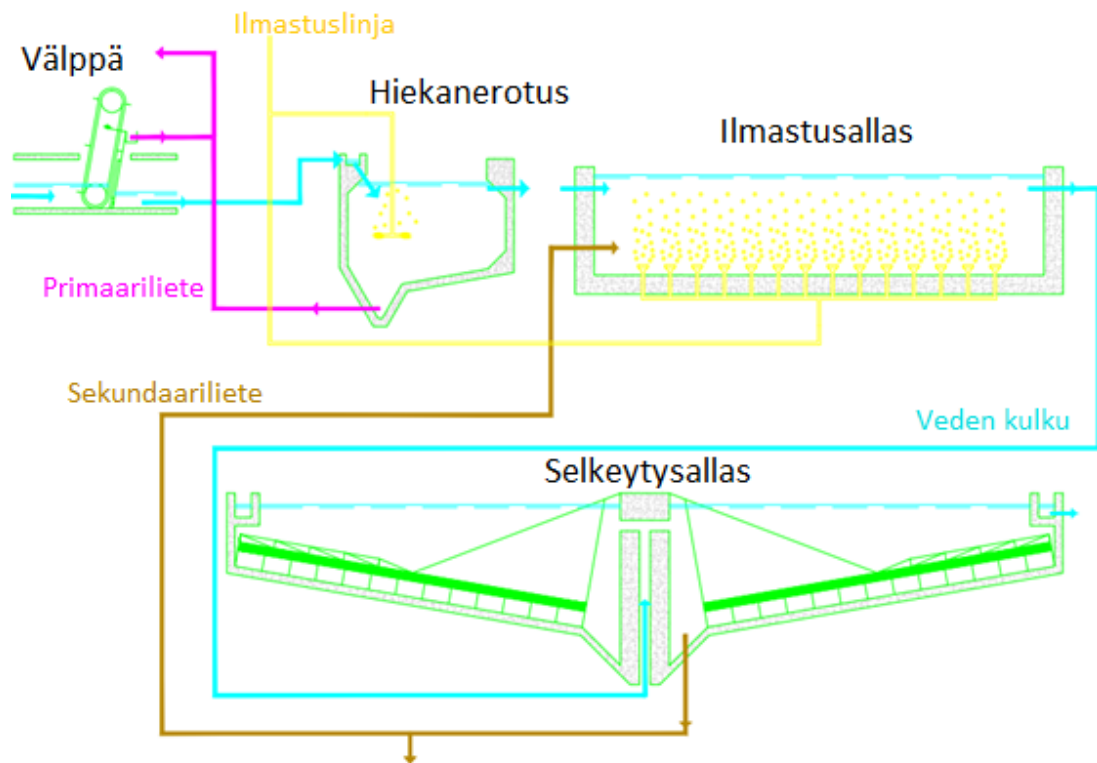
Kunnallinen jätevesi sisältää runsaasti fosforia. Kemiallisessa puhdistuksessa fosfori saostetaan biofosforiksi lisäämällä jäteveteen saostuskemikaalia, esimerkiksi ferrosulfaattia (FeSO_4). Biofosfori painuu saostusaltaan pohjalle, josta muodostunut liete ja siihen sitoutunut biofosfori kerätään jatkokäsittelyyn. (HSY 2016)

3.3 Jäteveden biologinen puhdistus

Biologisessa puhdistuksessa hyödynnetään jätevedessä olevia mikrobeja. Vesi ilmastetaan johtamalla siihen pieninä kuplina ilmaa, jolloin mikrobit voivat kasvaa ja lisääntyä. Prosessissa muodostuu aktiivilietettä, jossa mikrobit kuluttavat jäteveden eloperäistä ainetta vapauttaen typpeä ilmaan. Aktiivilieteprosessissa mikrobit tarvitsevat kasvaakseen typpeä, josta pääosa poistuu kaasuna ilmaan mikrobien aineenvaihdunnan seurauksena. Puhdistusta voidaan jatkaa esimerkiksi biologisilla typensuodattimilla typenpoiston tehostamiseksi. (HSY 2016)

3.3.1 Aktiivilietemenetelmä

Aktiivilietemenetelmään kuuluu ilmastusallas (aktiivilieteallas), selkeytysallas (laskeutusallas) sekä lietteen palautus- ja poistojärjestelmä. Menetelmän avulla tavoitellaan mahdollisimman nopeaa orgaanisten aineiden hajoamista. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistettu kaaviokuva aktiivilietemenetelmää soveltavasta vedenpuhdistusprosessista, josta nähdään puhdistusprosessin tavanomainen kulku. Ensin laitokselle saapuva vesi kulkee väljän kautta, jossa suurimmat partikkelit erotetaan. Sen jälkeen hiekanerotuksessa altaan pohjalle laskeutuu hiekka, sora ja muut raskaammat partikkelit. Hiekanerotuksessa jätevesi ilmastetaan ja pinnalle nouseva rasva ja kevyt kiintoainne voidaan kaapia pois. Hiekanerotuksen jälkeen voi olla myös hienovälppäys ja muita selkeytysvaiheita ennen aktiivilieteprosessia. Jäteveden käsittelyn varsinainen ydin on biologinen käsittely, aktiivilieteprosessi. (Gray 2004, 136-141; HSY 2016; HSY 12 2013)

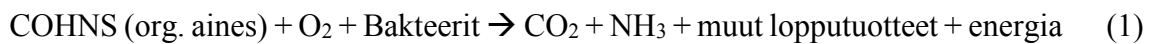


Kuva 2. Yksinkertaistettu aktiivilietepohjaisen vedenpuhdistuksen prosessikaavio.

Aktiiviliete koostuu mikrobeista ja muusta biomassasta, jossa elävät mikro-organismit hyödyntävät jäteveden liuenneita ravinteita ja orgaanisia yhdisteitä. Aktiivilieteprosessissa liuenneet ravinteet siirtyvät mikrobisolujen sisään. Näin suurin osa vesistöissä happea kuluttavista orgaanisista yhdisteistä saadaan poistettua. Mikrobin lisääntymisen ja selviytymisen kannalta tärkeää on huolehtia riittävästä happipitoisuudesta. Aktiivilieteprosessiin saadaan liuennutta happea puhaltamalla aktiivilietealtaan pohjalle ilmaa pieninä kuplina. Ilmastus saa myös veden liikkumaan, jolloin mikrobin hapensaanti ja niiden kyky sitoa epäpuhtauksia tehostuvat. Aktiivilieteprosessissa muodostunut liete johdetaan edelleen jälkiselkeytysaltaaseen, jossa biomassa laskeutetaan altaan pohjalle. Yleensä osa biolietteestä johdetaan takaisin aktiivilietealtaan alkupäähän. Jälkiselkeytyksen jälkeen vedelle tehdään vielä tarvittavat lisäksittelyt ennen vesistöön laskua. (Cheremisinof 2002, 280; Gray 2004, 136-141; Karttunen 2004)

Mikrobit hajottavat hapellisesti orgaanista ainesta kahdella tavalla, biologisessa hapetuksessa ja biosynteesissä. Jos orgaanisessa muodossa olevan ravinnon määrä rajoittuu, mikro-organismit saavat energiaa endogeenisen hengityksen (auto-oksidaatio) avulla. Nämä prosessit on esitetty alla reaktioyhtälöinä (1), (2) ja (3). (Gray 2004, 174)

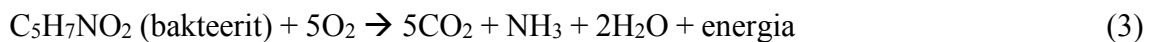
Hapetus:



Biosynteesi:



Auto-oksidaatio:



Aerobinen mädätys on jatkoa aktiivilietteen ilmastusprosessille, jossa lietettä jatkuvasti ilmastetaan pitkiä aikoja. Siinä mikrobit pääsevät endogeenisen hengityksen vaiheeseen, jossa niiden aiemmin varastoimat materiaalit hapetetaan hiilidioksidiksi, vedeksi ja ammoniakiksi. Samalla biologisesti hajoavan orgaanisen aineksen määrä vähenee. Mädätysprosessin edetessä ammoniakki muunnetaan edelleen nitraatiksi. Aerobinen mädätys tuottaa biologisesti stabiilia lopputuotetta, joka soveltuu jatkokäsiteltäväksi erilaisissa prosesseissa. (Cheremisinof 2002, 503)

3.3.2 Mikrobipopulaatio

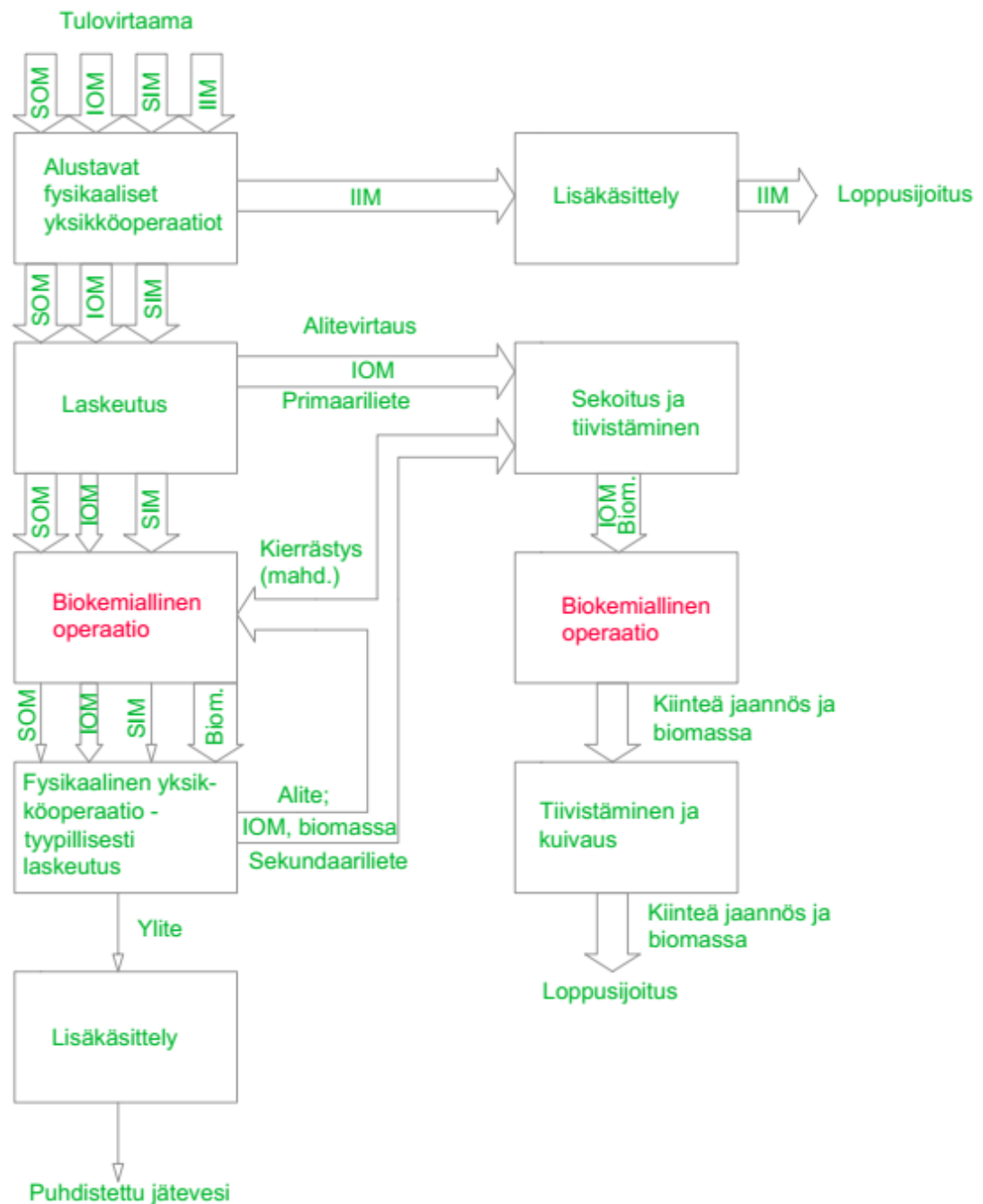
Valikoituminen on mekanismi, joka suosii tietyn lajiryhmän mikrobien kasvua. Se perustuu riittävään lajien monimuotoisuuteen ja sopeutumiseen. Biologinen vedenpuhdistus perustuu pääasiassa valikoitumiseen. Biologiseen käsittelyyn saapuvassa vedessä on niin laaja kirjo erilaisia mikrobilajeja, että biologinen käsittely tapahtuu lähes itsestään, vaikka vallitseviin olosuhteisiin ei kiinnitettäisi suurempaa huomiota. Käsittelyn laatu kuitenkin riippuu olosuhteista, jotka luodaan. (Henze et al. 2000, 69)

Aktiivilieteprosessin kannalta merkittävimmät mikrobityypit ovat flokinmuodostajat ja rihmamaiset bakteerit (filamentit). Valikoinnin avulla pyritään suosimaan erityisesti flokinmuodostajia hyvän puhdistustuloksen saamiseksi. Rihmamaiset bakteerit ovat usein syynä paisuntalietteen syntyyn, jonka seurauksena liete on löyhää ja huonosti laskeutuvaa. Paisuntaliete aiheuttaa myös päästöjen kasvamista. Filamentit ja flokinmuodostajat kilpailevat samasta ravinnosta. Yleensä mikrobien valikoituminen on helppoa, mutta jätevedessä olevat tuntemattomat ja kompleksiset orgaaniset ja epäorgaaniset yhdisteet vaikeuttavat sitä. (Doran 2012, 220; Laukkanen 1990, 45)

3.3.3 Biologisen puhdistuksen merkitys

Biokemiallisten operaatioiden merkitys vedenpuhdistuksessa voidaan selkeästi havaita tyypillisestä prosessin virtauskaaviosta kuvan 3 mukaisesti. Neljään ryhmään jaetut epäpuhtaudet kulkevat kokonaisprosessin läpi, ja nuolten paksuus korreloi massavirtausten kanssa. Eri ryhmät muodostuvat liukenevasta orgaanisesta (SOM), liukenemattomasta orgaanisesta (IOM), liukenevasta epäorgaanisesta (SIM) ja liukenemattomasta epäorgaanisesta (IIM) materiaalista. Liukenemattoman epäorgaanisen aineksen muuntumisnopeus mikrobien avulla on enimmäkseen liian alhainen, jotta sillä olisi käytännön merkitystä. Sen vuoksi kyseinen materiaali poistetaan tyypillisesti alussa fysikaalisilla yksikköoperaatioilla ja toimitetaan muualle jatkokäsittelyyn ja hävitettäväksi. (Cheremisinof 2002, 276; Grady et al. 2011, 4)

Kuten kuvasta 3 voidaan nähdä, suurin osa ylitteen liukoisille epäpuhtauksille tehtävistä yksikköoperaatioista on biokemiallisia. Ne toimivat kemiallisia ja fysikaalisia operaatioita tehokkaammin reagoivien ainesosien pitoisuuksien ollessa alhaisia. Biokemiallisissa operaatioissa liukoiset epäpuhtaudet muunnetaan joko harmittomaan muotoon, kuten hiilidioksidiksi tai typpikaasuksi, tai uudeksi mikrobibiomassaksi, joka voidaan poistaa fysikaalisella operaatiolla. Kun mikrobit kasvavat, ne saavat kiinni myös ylitevirtauksen mukana karannutta liukenematonta orgaanista ainesta. (Grady et al. 2011, 5)



Kuva 3. Tyypillinen vedenpuhdistusprosessin lohkokaavio (mukaillen Grady et al. 2011, 4).

Biokemiallisia operaatioita käytetään myös paljon lietteiden käsittelyssä, kuten kuvasta 3 voidaan havaita. Primaarilietteeseen päätyy monipuolinen aineiden kirjo monista eri lähteistä, kun taas sekundaariliete on yhdenmukaisempaa ja pääasiassa mikrobien muodostamaa biomassaa. Joskus nämä eri lietteet sekoitetaan keskenään ja käsitellään yhdessä, kuten myös kuvassa 3 on esitetty. Muulloin molemmat lietteet käsitellään erikseen. Biokemiallisten operaatioiden tehokkuus riippuu hyvin paljon lietteessä olevien materiaalien luonteesta. (Grady et al. 2011, 5)

4 AKTIIVILIETEPROSESSIN HALLINTA

4.1 Tärkeät muuttujat ja niiden vaikutukset

Aktiivilieteprosessin tarkastelussa todettiin, että kyseessä on veden biologinen puhdistusprosessi, joka perustuu mikrobien aerobiseen aineenvaihduntaan. Prosessi tapahtuu ilmastusaltaassa, jonka olosuhteet säädetään sopiviksi siten, että mikrobipopulaatio voi kehittyä niin kauan, kun happea ja ravinteita on saatavilla. Liukoisen materiaalin biologinen muuntuminen tiheäksi mikrobimassaksi puhdistaa olennaisesti jätevettä. (Gray 2004, 147)

4.1.1 Happi

Kemian insinöörit ovat pystyneet manipuloimaan itsepuhdistuksen luonnollista prosessia. Tarjoamalla ihanteelliset olosuhteet ja rajoittamattomat mahdollisuudet mikrobien aineenvaihduntaan ja kasvuun, biologinen prosessi nopeutuu ja tarjoaa erilaisia mahdollisuuksia vedenpuhdistukselle. Jotta saavutetaan huomattavasti nopeampi hapettuminen luonnossa esiintyvään prosessiin verrattuna, ilmastusaltaassa on oltava paljon tiheämpi biomassa (solua per tilavuusyksikkö). Tämä johtaa lisääntyneeseen hapenkulutukseen, joka on katettava kokonaan, jotta mikrobien hapettuminen ei rajoittuisi. Tämä voidaan varmistaa lisäämällä ilma-vesi-rajapintaa. Puhdistettava vesi on saatettava ylimäärän hapen kanssa kosketuksiin mikrobien kanssa riittävän pitkäksi aikaa, jotta hapettuminen ja epäpuhtauksien poisto saadaan halutulle tasolle. On myös huolehdittava, että myrkylliset aineet ja inhibiittorit eivät saavuta haitallisia pitoisuuksia. (Gray 2004, 176)

4.1.2 Flokkulaatio

Aktiivilieteprosessissa tärkeä tekijä on mikrobibiomassan flokkuloituva luonne. Flokkien on oltava tehokkaita kaappaamaan epäpuhtauksia vedestä ja laskeutusaltaassa erotuksen pitää tapahtua nopeasti ja tehokkaasti. Prosessiolosuhteiden muutokset voivat vaikuttaa flokkien toimintaan, mikä voi haitata prosessia monin tavoin. Tavallisimmat seuraukset ovat paisuntalietteen muodostuminen, lietteen laskeutumiskyvyn heikkeneminen ja biomassan väheneminen. (Gray 2004, 468)

Flokki on monimutkainen biokemiallinen yksikkö. Se voi koostua useasta miljoonasta heterotrofisesta mikrobista, jotka ovat sitoutuneet toisiinsa. Mikroskoopilla aktiivilietteestä voidaan havaita erillisiä mikrobimöhkäleitä, flokkeja, joiden koko ja muoto vaihtelevat. Flokkien hyvä kasvu on tärkeää onnistuneen prosessin kannalta, koska suspendoituneiden ja kolloidisten komponenttien nopea agglomeroituminen flokkeihin heti aktiivilietteen ja veden sekoitusvaiheen alussa johtaa jäteveden BOD:n nopeaan vähenemiseen. (Gray 2004, 469)

Kationit, kuten kalsium ja magnesium parantavat merkittävästi aktiivilietteen laskeutumisominaisuuksia. Ne myös vahvistavat sidoksia, joiden avulla flokit muodostuvat. Ioninvaihto tapahtuu jätevedessä flokkien ja kationien välillä. Flokkien ikääntyessä hitaammin kasvavat autotrofit, kuten nitrifioivat bakteerit, vakiintuvat. Tämän vuoksi lieteikä on tärkeä tekijä prosessin kokonaistehokkuuden kannalta. Hyvin flokkuloituva liete on dynaamisessa tasapainossa, jossa flokkien yhdistyminen muodostaa suurempia flokkeja, ja ne hajoavat pienemmiksi ilmastussysteemin aiheuttamien jännitysten vuoksi. (Gray 2004, 475; Sanin & Vesilind 2000, 1411)

4.1.3 Ympäristötekijät

Aktiivilieteprosessiin vaikuttavat puhdistettavan veden luonteen lisäksi ympäristö, ilmasto ja hydrologiset tekijät. Jäteveden koostumus vaikuttaa lietteen flokkien biologiseen aktiivisuuteen ja laskeutumisominaisuuksiin. Tavanomaisessa aktiivilietteessä BOD:N:P-suhde on 100:6:1, mikä vaaditaan ylläpitämään optimaalista ravintetasapainoa heterotrofisten mikrobien kasvuun. Myrkylliset tai inhiboivat aineet vaikuttavat heterotrofien aerobiseen aineenvaihduntaan, mutta koska systeemi sopeutuu pieniin pitoisuuksiin ajan kanssa, voidaan aktiivilieteprosessia käyttää myös tällaisten saasteiden poistoon jätevedestä. Ravintoaineiden, energian ja substraatin saatavuus sekä sopivan kasvuympäristön luominen ovat tärkeitä tekijöitä prosessissa. Kasvuympäristön tekijöitä ovat muun muassa lämpötila, pH ja paine. (Eckenfelder & Grau 1992, 2-3; Gray 2004, 488)

4.1.4 Biologinen kuorma

Jätevedessä on erilaisia orgaanisia komponentteja, joiden kokonaiskuormitus on hyödyllistä ilmaista biologisen hapenkulutuksen eli BOD:n muodossa. BOD ilmaisee

vuorokauden kuormituksen yksikössä massa/tilavuus. Mitä suurempi veden biologinen kuormitus on, sitä suurempi on lopullinen BOD:n arvo. (Gray 2004, 481)

Lietepitoisuus (MLSS) ilmastusaltaassa on biomassan karkea mitta. Normaalisti MLSS-pitoisuudet vaihtelevat 1,5-8,0 mg/l välillä. MLSS-pitoisuutta säädetään poistolietteen määrän avulla. Teoriassa suurempi MLSS-pitoisuus ilmastusaltaassa takaa tehokkaamman prosessin, koska silloin suurempi biomassa on hyödyntämässä jäteveden ravinteita. Korkeat MLSS-arvot kuitenkin rajoittavat hapen saatavuutta ja laskeutuksen kapasiteettia erottaa ja kierrättää aktiivilietettä. (Gray 2004, 478)

4.1.5 Lietekä

Lietteen viipymäaika eli lieteikä vaikuttaa aktiivilietteen flokkien toimintaan. Lietekä voidaan laskea palautussuhteesta tai lietepitoisuuksista ja sen yksikkö on päivä. Lietekä on toiminnallinen tekijä, jonka avulla voidaan ohjata lietteen toimintaa ja aktiivisuutta. Alhainen lieteikä (alle 0,5 päivää) osoittaa, että mikrobien kasvu on nopeaa ja lietettä käytetään todennäköisesti nopeissa esikäsittelyissä. Korkea lieteikä (yli 5 päivää) kertoo mikrobien hitaasta kasvunopeudesta. Tavallisesti lieteikä on 3-4 päivää, jolloin laskeutumisominaisuudet ovat hyvät. (Gray 2004, 478)

4.2 Mittaukset

4.2.1 Virtaamat

Mitattavat, ohjattavat ja säädettävät kohteet vaihtelevat erilaisissa prosessiratkaisuissa. Käsittelyyn saapuvan jäteveden määrän ja laadun vaihtelu vaikuttaa voimakkaasti käsittelyn lopputulokseen, minkä vuoksi tulovirtaaman säätelyssä tulee ottaa huomioon tärkeimmät pumppaamot ja mahdolliset tasausaltaat. Virtaamien säädöllä saadaan nostettua laitoksen maksimikapasiteettia. On todettu, että toimivat tasausaltaat poistavat suurimman osan laitoksen ohjausongelmista, kun taas huonosti toimivat tasausaltaat voivat haitata prosessin toimintaa. Bioprosessit ovat herkkiä ympäristön kuormitusvaihteluille, mikä tulee ottaa huomioon virtaamien säätelyssä. Korkeammilla lämpötiloilla kuormituksen kasvunopeus on paljon suurempi. (Laukkanen 1990, 17)

Välppäys, hiekanerotus ja esiselkeytys kuuluvat jäteveden esikäsittelyyn. Välppäämössä mitataan välppien padotuskorkeudet. Välppien käyttöä ohjaa tulovirtaama ja

padotuskorkeudet, joten ohjauksen kohteena on virtaamien jaosta huolehtivat luukut. Ilmastettu hiekanerotus on vakiotoiminen eikä mitattavia kohteita ole. Ennen ilmastettua hiekanerotusta syötetään saostuskemikaali, jonka syöttö vaatii yleensä vain virtaamamittauksen ja kellonajan, sillä annostus vaihtelee huomattavasti vuorokauden eri aikoina. Virtaamatietojen lisäksi tarvitaan mittauksia poistettavan primaarilietteen ja aktiivilieteprosessiin johdettavan veden kiintoainepitoisuuksista. (Laukkanen 1990, 18)

Virtausmittauksissa tavallisesti käytetyt mittausmenetelmät ovat magneettinen virtausmittaus ja ultraäänivirtausmittaus. Magneettinen mittaus soveltuu putkistomittauksiin, mutta ultraäänimittaus onnistuu myös avokanavista. Ultraäänimittausta käytetään mieluummin isommissa putkissa, koska magneettinen mittausmenetelmän hinta kasvaa putkikoon kasvaessa. Faradayn lakiin perustuvassa magneettisessa virtausmittauksessa virtaava vesi toimii sähköä johtavana johtimena. Sen nopeus määrittää magneetikentässä syntyvän jännitteen. Mittari koostuu putken vastakkaisilla puolilla olevasta elektrodiparista ja magneetista. (Laukkanen 1990, 129)

Ultraäänivirtausmittaus perustuu virtauksen läpi lähetetyn ääni-impulssin kulkuaikaeroon. Ääni-impulssi kulkee vuorotellen myötä- ja vastavirtaan ja virtausnopeus saadaan, kun kerrotaan saatu kulkuaikero putken poikkipinta-alalla. Mittariin kuuluu yksi tai kaksi lähetinparia. Virtausmittauksien luotettavuutta heikentävät esimerkiksi kiintoaineen tarttuminen antureihin, ilmakuplat nesteessä ja sähköiset häiriöt. (Laukkanen 1990, 129)

4.2.2 Ilmastusallas

Aktiivilieteprosessissa käytetyimpiä menetelmiä orgaanisen aineen pitoisuuden mittaamiseen ovat biologinen hapenkulutus BOD, orgaaninen hiili TOC ja kemiallinen hapenkulutus COD. Orgaaninen aine voi olla biologisesti hajoavaa tai hajoamatonta sekä liukenevaa tai liukenematonta. Jätevedessä olevat typpiyhdisteet voidaan niin ikään jakaa biologisesti hajoaviin ja hajoamattomiin. Biologisesti hajoamattomat typpiyhdisteet tarttuvat kiinteään orgaaniseen (hajoamattomaan) ainekseen, ja hajoamattomat liukoiset yhdisteet ovat osa kokonaistyyppiä. (Laukkanen 1990, 21)

Ilmastusaltaassa mitattavia kohteita ovat liuennut happi, ilmastusilman virtaama ja ilmastuslinjan paine. Riippumatta siitä, ohjataan biologista prosessia lietepitoisuuden, -kuorman vai -iän mukaan, tulee lietepitoisuutta aina mitata. Optimaalinen lieteikä

vaihtelee olosuhteiden mukaan, joten myös esimerkiksi lämpötilan ja virtaaman seurantaan tarvitaan. Ilmastuksen kuormituksen ja biologisen toiminnan ohjauksen kannalta lämpötilan seuraaminen on merkittävää. Lietteen liialliset viipymääjat estetään palautussuhteen ohjauksella. Alkaliteetin avulla tarkastellaan pH:n pysyvyyttä. Alkaliteettia muuttavat kaikki reaktiot, jotka lisäävät tai vähentävät protonien määrää. Liian alhainen pH ehkäisee nitrifikaatiota ja aiheuttaa muun muassa paisuntalietettä. Alkaliteetin mittauksen avulla voidaan arvioida tarvittava kalkin syöttö pH:n muuttamiseksi. (Henze et al. 2000, 58; Laukkanen 1990, 19-33)

Happipitoisuuden muutokset ilmastusaltaan pystysuunnassa ovat yleensä niin pieniä, että pinnalla kelluva mittalaite soveltuu hyvin. Kiintoainetta voidaan mitata optisella menetelmällä. Lähettimeltä vastaanottimelle lähetetty signaali pienenee kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Myös laitteiden likaantuminen pienentää signaalia, mikä johtaa virheelliseen mittaustulokseen. Yleensä tarvitaankin useampi mittauspari kompensoimaan ulkopuolista valoa ja mittausvirheitä. Kiintoainemittareita voidaan hyödyntää sekä vesi- että lietepuolella. (Laukkanen 1990, 129-131)

Tavanomainen pH:n mittausjärjestelmä koostuu mittaus- ja vertailuelektrodista sekä vahvistimesta. Mittausanturissa käytetään täyttönesteinä Cl-ioneja sisältävää puskuriliuosta. Ideana on, että vertailuelektrodi saa galvaanisen yhteyden tutkittavasta nesteestä mittarille. Lämpötilan vaikutusta voidaan kompensoida kompensointivastuksella. Respiometrillä mitataan hapenkulutusta suljetussa astiassa, johon on johdettu joko aktiivilietettä tai aktiivilietteen lisäksi jätevettä. Mittauksen avulla seurataan jäteveden orgaanisen aineen pitoisuutta BOD:n tai COD:n muodossa. (Laukkanen 1990, 131-132)

Kolorimetrillä voidaan mitata COD(Cr), fosfaatti-, ammoniumtyppi-, nitraattityppi- ja nitriittityppipitoisuudet. Menetelmä perustuu näyteliuoksen kemialliseen käsittelyyn, jossa lopputuloksena saatavan värillisen liuoksen värin voimakkuudesta saadaan mitattavan yhdisteen pitoisuus. Ammoniumtyypeä, nitraattityppeä ja nitriittityppeä voidaan mitata myös ioniselektiivisellä elektrodilla. Ioniselektiiviset elektrodit mittaavat vain tiettyä ionia näytteestä ja vertailuelektrodiin verrattava potentiaaliero riippuu mitattavan aineen pitoisuudesta. Titraattorimittauksessa näyteveteen lisätään reagensseja, jonka jälkeen titrauksen loppupiste voidaan todeta pH- tai redoximittauksella tai kolorimetrillä. Tutkittavan aineen pitoisuus saadaan titrausliuoksen kulutuksesta.

Titraattorilla voidaan määrittää ammoniumtyppi, nitraattityppi, nitriittityppi ja alkaliteetti. (Laukkanen 1990, 134-135)

4.3 Ohjaus ja säätö

Toimilaitte muuntaa ohjaimelta tulevan ohjausviestin toimitusmuotoon, jota tarvitaan prosessin ohjaukseen. Tavallisimpia toimilaitteita ovat säätöventtiilit ja sähkömoottorit. Taajuudenmuuttajat ovat elektronisia moottoriohjaimia. Niillä voidaan ohjata kolmivaiheisten vaihtovirtamoottoreiden kierroslukua ja vääntömomenttia muuttamalla syöttöverkon kiinteä taajuus ja jännite portaattomasti muuttuviin arvoihin. Moottorin nopeutta säädetään hetkellisen tarpeen mukaan. Esimerkiksi ilmastusta vähennetään tai lisätään happimittauksen ja asetusarvon perusteella. (Laukkanen 1990, 144)

Kriittisen happipitoisuuden säilyttämiseksi ilmastusaltaassa liuenneen hapen konsentraatiota ylläpidetään automaattisesti happielektrodien avulla, jotka säätävät ilmastuksen hapen käyttöasteen mukaan. Halvin ja eniten käytetty järjestelmä ajoittain kytkee ilmastimet päälle ja pois liuenneen hapen pitoisuuden alittaessa tai ylittäessä kriittisen rajan. Usein käytetään myös ajastimella toimivia järjestelmiä, joissa ilmastimet toimivat automaattisesti esimerkiksi 30 minuutin sykleissä. (Gray 2004, 494)

Kalvo- ja mäntäpumput ovat yleisimpiä nestemäisten kemikaalien annostelussa käytetyistä annostelupumpuista. Moottoritoimisten kalvopumppujen toimintaa säädetään taajuusmuuttajan avulla. Magneettitoimisissa pumpuissa säädön kohteena on vetoimpulssien määrä ja painetoimisissa paineilman paine. Mäntäpumpun toiminta on muuten samanlainen, kuin moottoritoimisessa kalvopumpussa, mutta kalvon tilalla on mäntä. Toimielin on se osa toimiyksiköstä, joka vaikuttaa toimitusmuotoon. Tärkein toimielin on säätöventtiili. Säädintyypeistä eniten on käytössä PID-tyyppiset säätimet. (Laukkanen 1990, 144-147)

5 LÄMPÖTILAN VAIKUTUS AKTIIVILIIETEPROSESSIIN

Yksi tärkeimmistä mitattavista parametreista biokemiallisissa prosesseissa on lämpötila. Se vaikuttaa kemiallisen reaktion nopeuteen, mikrobien aineenvaihduntaan, entsyymiaktiivisuuteen ja tuottotasoihin. Lämpötila vaikuttaa sekä mikrobien aineenvaihdunnan aktiivisuuteen, että kaasujen kulkeutumiseen ja kiintoaineiden laskeutuvuuteen vedessä. Biologinen aktiivisuus kasvaa lämpötilan noustessa, mutta liian korkea lämpötila vaikuttaa päinvastoin. Alhaisessa lämpötilassa bakteerien toiminta on hyvin hidasta ja biologinen aktiivisuus vähäistä. Nitrifikaatioon vaikuttavista ympäristötekijöistä lämpötilalla on kaikkein suurin vaikutus. Osittainen nitrifikaatio nitriitiksi saavutetaan usein korkeissa lämpötiloissa, mutta se on osoittautunut vaikeaksi alhaisissa lämpötiloissa. Lämpötilan laskiessa ammoniakkin hapetus pienenee. Nitrifikaatioprosessin kannalta optimaalinen lämpötila on 28-32 °C. (Aittomäki et al. 2002, 230; Metcalf & Eddy 2003, 585; Guo et al. 2010; Pellikka 2007, 15)

Kunnallisella puolella lietteen lämpötilan nousu kesällä lisää metabolista aktiivisuutta. Vaikka lämpötilan nousu parantaa BOD:n pienentämistä jätevedestä, käytännössä se johtaa ongelmiin lisääntyvän hapentarpeen kanssa. Lämpimällä säällä esiintyy myös merkittävästi enemmän paisuntalietetettä. Lämpötilan avulla voidaan selittää aktiivilietesysteemin suorituskyvyn vaihtelua. On esitetty, että ilmastusaltaiden pitäisi olla suurempia alemman lämpötilan prosesseille ja että kuuman paineilman käyttäminen ilmastuksessa johtaisi parempaan suorituskykyyn. Happi on vain hieman liukoinen veteen. Sen kylläinen pitoisuus 20 °C:ssa on 9,07 mg/l. Liukoisuus pienenee, jos veden lämpötila kasvaa, paine pienenee tai suolapitoisuus kasvaa. Lämpötilan on havaittu vaikuttavan huomattavasti vallitsevaan mikrobipopulaatioon ja sen toimintaan. (Gray 2004, 489; Wang et al. 2016)

Tutkimustulokset ovat osoittaneet, että lämpötilan nopea tai hidas vaihtelu 15-22 °C:n välillä ei vaikuta suuresti typen ja fosforin poistoon. Kuitenkin alle 12 °C:n lämpötilassa biokemialliset reaktiot inhiboituvat selvästi. Mikrobien sopeutuminen uuteen lämpötilaan vie aikaa, mikä hidastaa muun muassa fosforinpoistoprosessia. Lämpötilan jyrkkä muutos heikentää myös lietteen laskeutumiskykyä. Tutkimuksessa, jossa selvitettiin lämpötilan vaikutusta flokkulaatioon ja aktiivilietteen laskeutumiseen, havaittiin, että termofiilisellä lietteellä on huonompi flokkulaatio- ja laskeutumiskyky. Termofiilinen liete oli myös löyhemmin sitoutunutta. (Huang et al. 2012; Peng et al. 2011)

Suomessa jätevesien lämpötila on alle 12 °C suurimman osan vuodesta, joten vuodenaajoille on selkeä vaikutus flokkien muodostumiseen kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa. Kesällä flokit ovat suurempia ja pyöreämpiä ja niissä on vähemmän filamentteja ja pieniä hiukkasia. Puhdistuksen teho on parempi kesällä. Talviolosuhteet parantavat rihmamaisten bakteerien kasvua, mikä heikentää puhdistustulosta. Mikrobit toimivat hyvin hitaasti matalissa lämpötiloissa, joten lieteiän on oltava korkeampi ja käsittelyaltaiden tarpeeksi suuria. Kunnallisella puolella suuret virtausmäärät ja sateet yleensä laskevat prosessin lämpötilaa, kun taas teollisella puolella lämpimät jätevesivirrat vaikuttavat päinvastoin. (Karttunen 2004, 213; Koivuranta et al. 2017; Lindquist 2003, 80)

Lämpötilan nousu sellu- ja paperitehtaan jätevesien käsittelyssä nostaa puhdistetun veden kiintoainepitoisuutta ja lisää jäljelle jäävää COD-pitoisuutta. Lämpötilan vaihtelu huonontaa lietteen laskeutumiskykyä. Liian korkeilla lämpötiloilla on negatiivinen vaikutus mikrobien aktiivisuuteen, hapen siirtoon ja lietteen laskeutumisominaisuuksiin. (Martínez-Delgadillo et al. 2005; Morgan-Sagastume & Allen 2002)

6 MATERIAALIT JA METODIT

6.1 Viikinmäen puhdistuslaitos

Pohjoismaiden suurin jätevedenpuhdistamo sijaitsee Helsingin Viikinmäessä. Sen kalliopuhdistamossa käsitellään Helsingin, Vantaan keski- ja itäosien, Keravan, Tuusulan, Järvenpään ja Sipoon asukkaiden sekä teollisuuden jätevedet. Saapuvasta jätevedestä noin 85 % on yhdyskuntajätevesiä ja 15 % on peräisin teollisuudesta. Puhdistamo on rakennettu pääosin kalliion sisään ja se otettiin käyttöön vuonna 1994. Vuorokaudessa puhdistamon kokonaisvirtaama on noin 270 000 kuutiometriä ja vuosittain jätevettä puhdistetaan keskimäärin 100 miljoonaa kuutiometriä. Puhdistetun jäteveden loppusijoitus on yli 20 metrin syvyydessä Katajaluodon edustalla. (Aluehallintovirasto 2015, 8; Castrén et al. 2016, 12-18; HSY 2016)

Viikinmäen puhdistamon prosessi perustuu aktiivilietemenetelmään, joka on kuvattu tarkemmin kappaleessa 3.3. Denitrifikaatiobakteerin toimintaan perustuvaa biologista suodatinta käytetään tehostamaan typenpoistoa. Aktiivilieteprosessin jälkeen jätevesi ohjataan jälkiselkeytimeen, jossa altaan yläosaan jäävä puhdas vesi päästetään mereen ja liete painuu altaan pohjalle. Suurin osa lietteestä kierrätetään uudestaan biologisen puhdistusprosessin alkuun ja pieni osa poistetaan jatkuvasti lietteenkäsittelyyn. Mädätyksessä lietteen orgaaninen aines hyödynnetään tuottamaan biokaasua, jota käytetään lämpö- ja sähköenergian tuotantoon laitoksen tarpeisiin. Jatkojalostettavaa kuivattua jätevesilietettä syntyy noin 60 000 tonnia vuodessa, josta valmistetaan multatuotteita kompostoimalla. Puhdistuksessa saadaan poistettua kiinteät ja happea kuluttavat aineet sekä fosfori 95-prosenttisesti ja typpi 90-prosenttisesti. (Castrén et al. 2016, 12-18; HSY 2016)

6.2 Sellutehtaan jätevedenpuhdistus

Jätevesien määrät voivat vaihdella huomattavasti tehdaskohtaisesti. Keskimääräinen prosessijäteveden määrä on 20-40 m³/tonni kuivaa sellua. Suurin osa sellutehtaan jätevesistä muodostuu valkaisulinjalla, koska sen suodosten hyötykäyttö on hankalaa. Lipeäkiertoon kertyvät suolat (lähinnä kalsium, kloridi ja oksalaatit) ovat peräisin puusta ja valkaisukemikaaleista. Jätevesien käsittelyssä käytetään tavallisesti rauta- ja alumiinisulfaatteja sekä polymeerejä. Eniten kemiallisen metsäteollisuuden jätevesiä

käsitellään biologisesti aktiivilieteprosessia hyödyntämällä. (Matilainen et al. 2014, 13-14)

Tässä työssä tutkitaan vertailun vuoksi myös teollisuuden jätevesien käsittelyä ja vertailukohteeksi on valittu erään sellutehtaan aktiivilietemenetelmää hyödyntävä jätevedenpuhdistusprosessi. Prosessin pääperiaate on hyvin samankaltainen kunnallisiin puhdistuslaitoksiin verrattuna ja mukailee kuvan 2 (kpl 3.3) prosessia, mutta hiekanerotuksen tilalla on esiselkeytys. Kokonaisprosessiin kuuluu välppäys, esiselkeytys, tasausallas, lietteen ilmastus, ilmastusallas, jälkiselkeytin, tiivistin ja lietteen jatkokäsittely. Aktiivilietteestä suurin osa kierrätetään takaisin ilmastusaltaaseen.

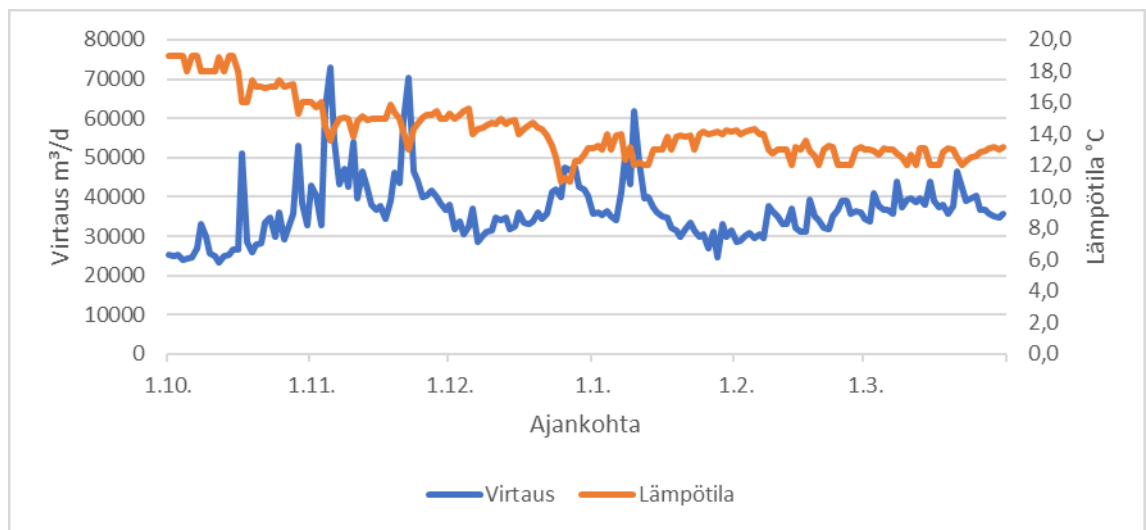
Ennen ilmastusta jätevesi neutraloidaan pH-tasolle 6-8 yleensä kalkilla tai rikkihapolla (H_2SO_4) ja siihen lisätään tarvittavat ravinteet. Käsitelty vesi voidaan ottaa takaisin prosessiin tai se voidaan purkaa vesistöihin. Nykyteknologialla vedestä saadaan puhdistettua kiintoaineesta 98-99 %, BOD:sta 98-99 %, COD:sta 80-90 %, fosforista 80-95 % ja typestä 75-85 %. Edellä mainitut ravinteet saadaan poistettua jätevedestä kiintoaineen mukana, mutta prosessissa syntyy paljon kuitu- ja biolietettä. Lietteitä voidaan hyödyntää kuivattuna esimerkiksi polttoaineena. (Matilainen et al. 2014, 14)

6.3 Aineiston kuvaus ja analysointimenetelmät

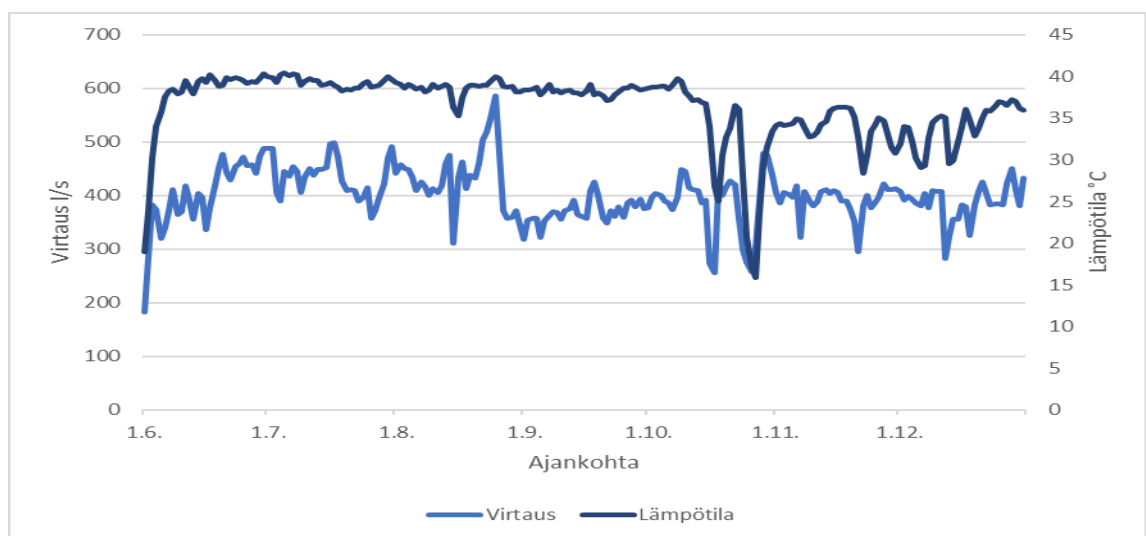
Tässä työssä hyödynnetään Viikinmäen puhdistuslaitoksen ja erään sellutehtaan aktiivilieteprosesseista kerättyä dataa. Yhdyskuntajätevesien käsittelyssä vuodenajoilla ja ympäristöolosuhteilla voi olla suuri merkitys puhdistusprosessin lopputulokseen. Teollisuudessa ympäristön vaikutukset ja olosuhteet voidaan helpommin vakioida, mutta virtausmäärät, kemiallinen koostumus ja erityisesti lämpötilat voivat vaihdella paljon, vaikka suurimpia muutoksia pyritään kompensoimaan tasausaltailla. Prosesseista kerätyn datan pohjalta selvitetään erityisesti lämpötilan vaihtelun vaikutuksia aktiivilieteprosessiin. Graafiseen tarkasteluun on Viikinmäen prosessista valittu dataa aikaväleiltä lokakuu-maaliskuu ja toukokuu-syyskuu, jotta vuodenaikojen vaikutukset voidaan havaita. Molempien laitosten datasta on suodatettu pois häiriömittauksia, kuten nolla-arvoja ja negatiivisia tuloksia.

7 TULOKSET JA POHDINTA

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty puhdistukseen saapuvan virtausmäärän ja lämpötilan välinen yhteys. Viikinmäen prosessista on selvästi havaittavissa lämpötilan lasku talvella. Kuvasta 4 nähdään myös, että virtausmäärän kasvaessa lämpötila laskee. Tämä johtuu siitä, että tulevat yhdyskuntajätevedet ovat viileitä erityisesti talvella. Sellutehtaan prosessista kerätyn datan perusteella lämpötilan ja virtauksen välinen yhteys on täysin päinvastainen, koska selluteollisuuden jätevedet ovat huomattavasti lämpimämpiä.

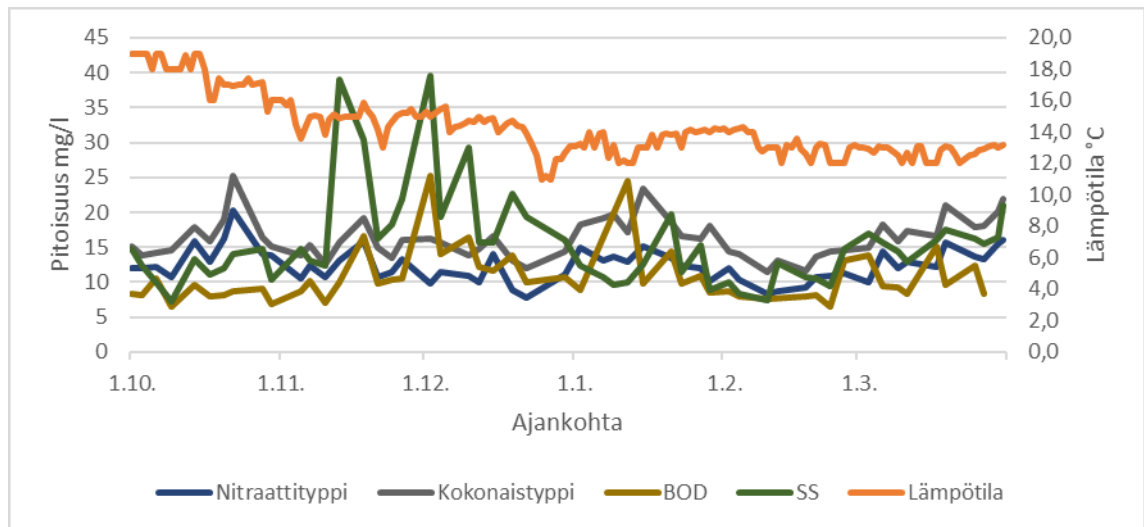


Kuva 4. Viikinmäen aktiivilieteprosessin virtaus ja lämpötila.

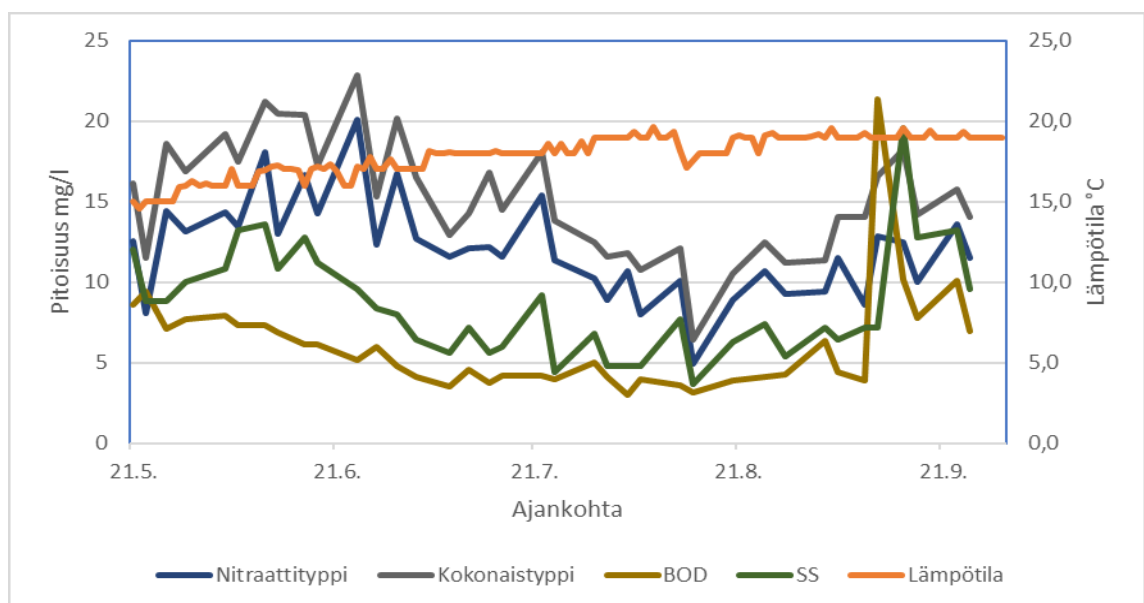


Kuva 5. Sellutehtaan aktiivilieteprosessin virtaus ja lämpötila.

Kuvissa 6 ja 7 tarkastellaan nitraattitypen, kokonaistypen, BOD:n ja kiintoaineen pitoisuuksia eri vuodenaikoina sekä niiden yhteyttä lämpötilaan. Kuvista huomataan, että talvella edellä mainittujen parametrien kokonaismäärä on suurempi kuin kesällä. Myös kirjallisuusselvityksessä todettiin, että talviolosuhteissa puhdistustulos heikkenee. Kuvassa 6 lämpötilan pienentyessä tarkasteltavat pitoisuudet kasvavat. Erityisesti BOD- ja typpipitoisuudet käyttäytyvät tällä tavalla. Kuvasta 7 tämä ilmiö ei ole niin selvästi havaittavissa, mutta tarkasteltavien pitoisuuksien keskinäinen yhteys on huomattava.

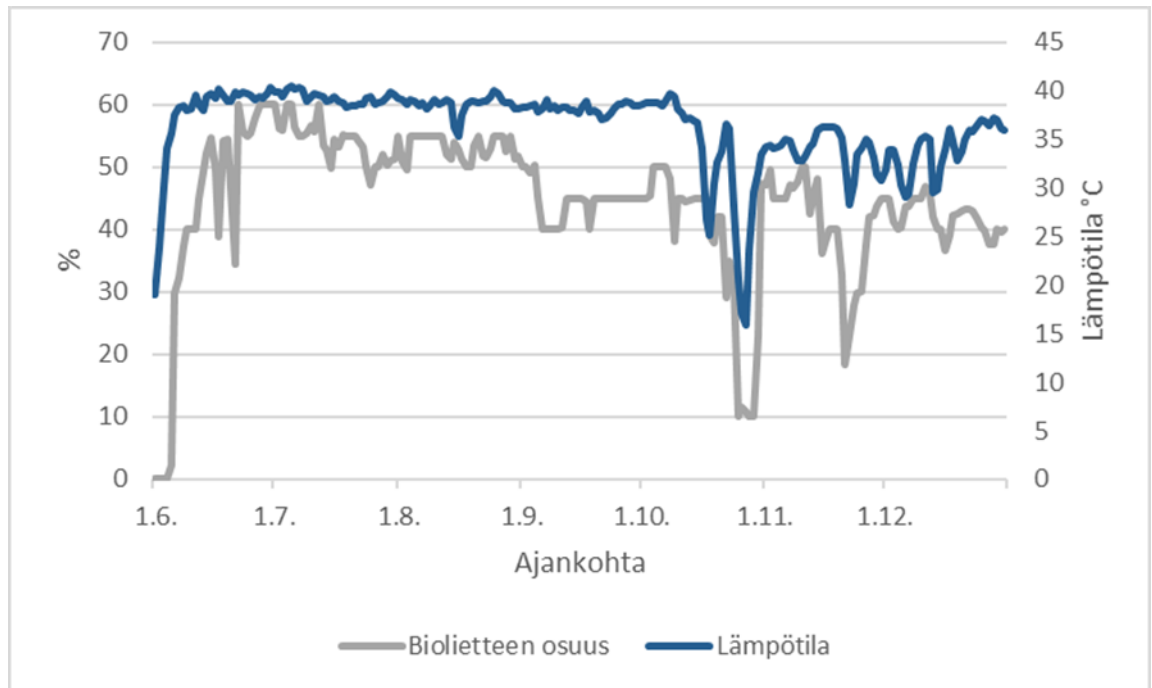


Kuva 6. Viikinmäen prosessin ravinnepitoisuudet ja lämpötila talvella.



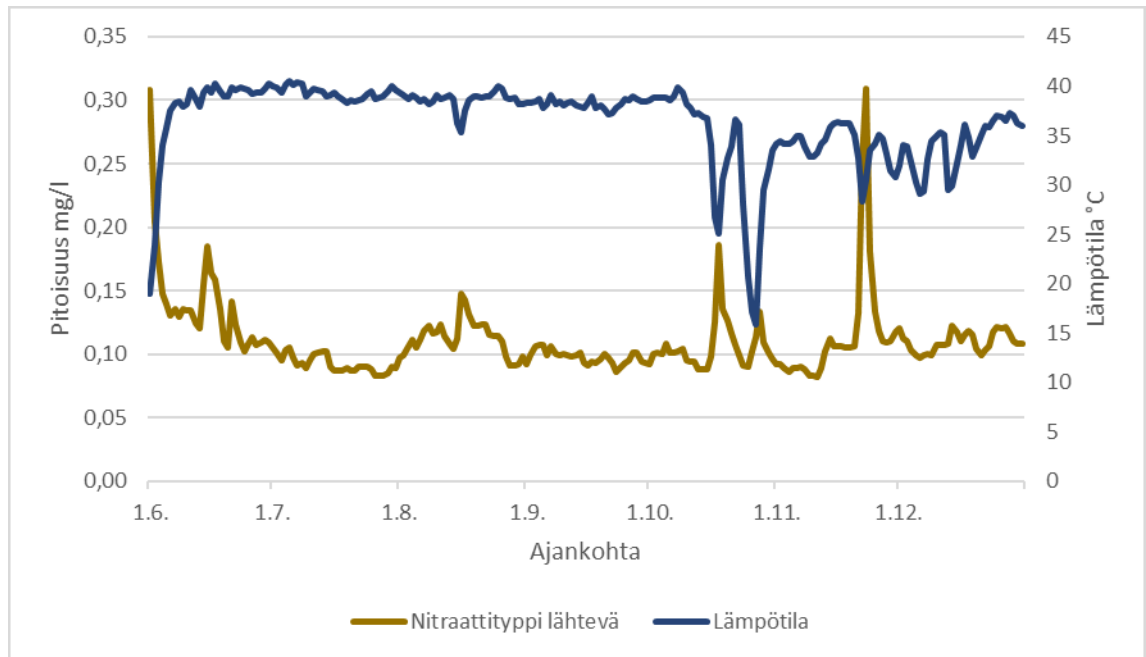
Kuva 7. Viikinmäen prosessin ravinnepitoisuudet ja lämpötila kesällä.

Kuva 8 esittää biolietteen osuuden ja lämpötilan yhteyden sellutehtaan aktiivilieteprosessissa. Siitä nähdään selvästi, että lämpötilan laskiessa lietepitoisuus pienenee. Viikinmäen prosessista yhteys ei ollut havaittavissa.

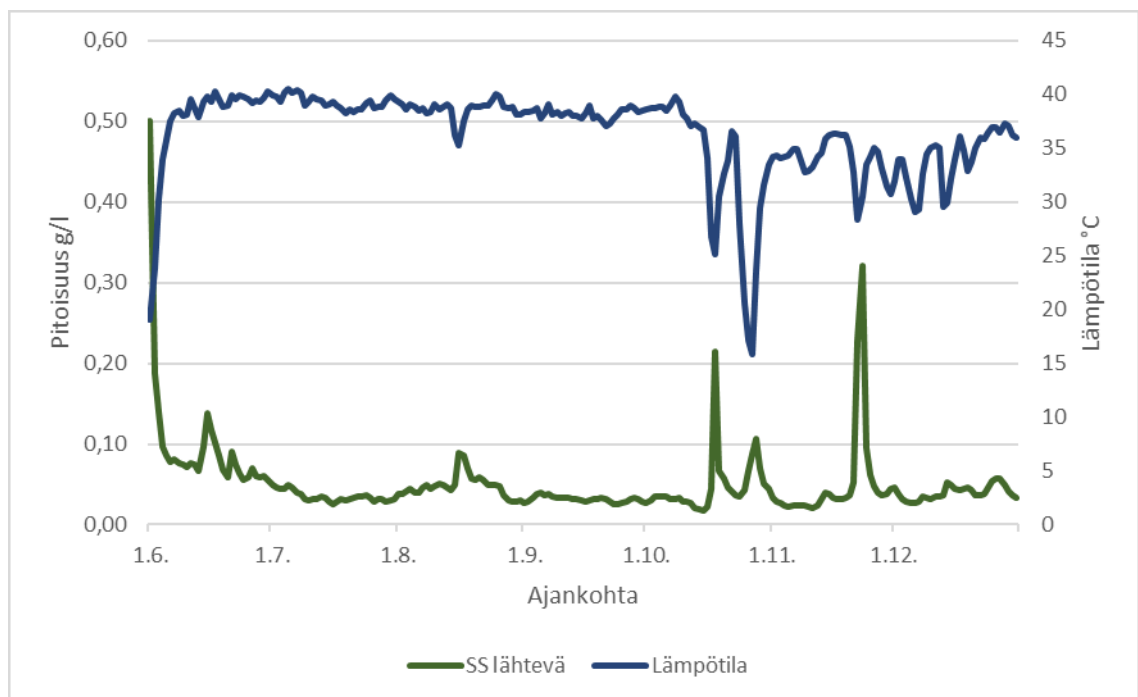


Kuva 8. Sellutehtaan prosessin biolietteen osuus ja lämpötila.

Selkeimmät vaikutukset lämpötilalla vaikuttaisi kuvien 9 ja 10 perusteella olevan nitraattityppi- ja SS-pitoisuuksiin teollisella puolella. Sekä SS- että nitraattityppipitoisuudet kasvavat lämpötilan laskiessa. Tämä havaitaan helposti käyrien minimi- ja maksimipisteistä. Kirjallisuuskatsauksen perusteella SS-pitoisuuden pitäisi laskea lämpötilan laskiessa, mutta saatu tulos on täysin päinvastainen. Nitraattitypen poisto tapahtuu parhaiten vähähappisissa olosuhteissa. Koska hapen liukoisuus veteen on suurempi alemmissa lämpötiloissa, nitraattitypen poisto paranee lämpötilan noustessa. Teoria tukee myös saatua tulosta.

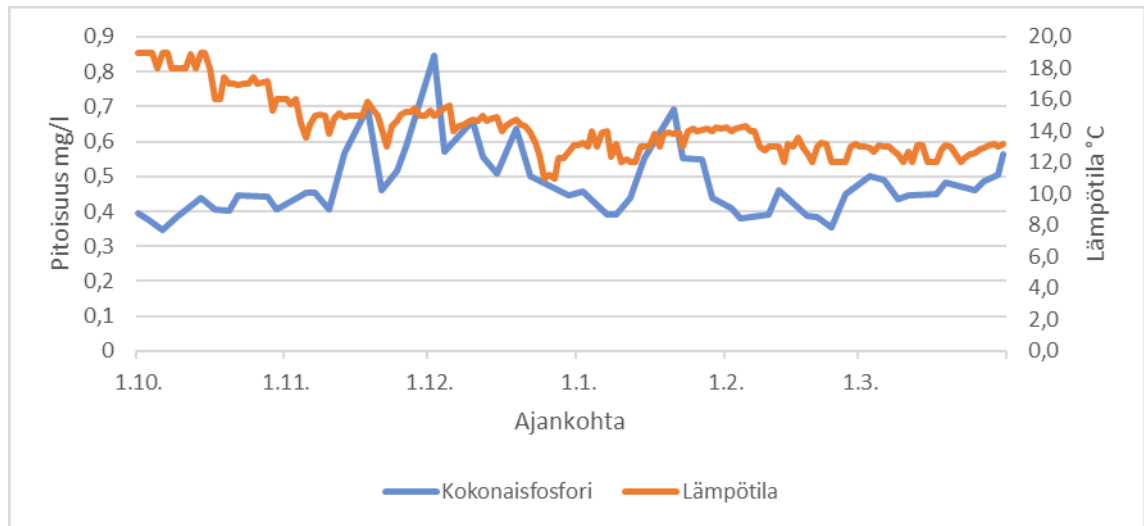


Kuva 9. Sellutehtaan prosessin lähtevä nitraattityppi ja lämpötilä.

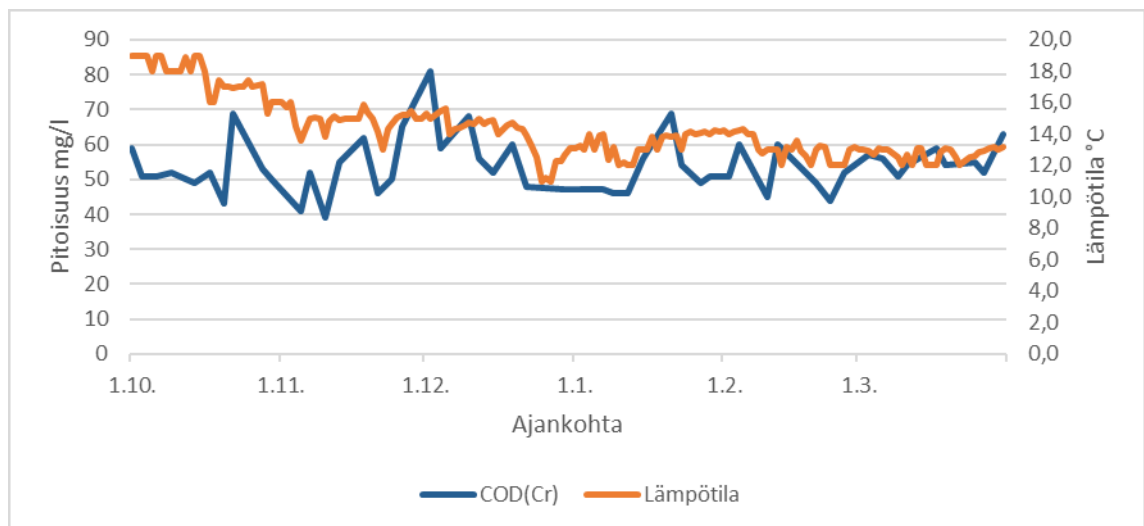


Kuva 10. Sellutehtaan prosessista lähtevän veden SS-pitoisuus ja lämpötilä.

Viikinmäen prosessidatan perusteella kokonaisfosforin määrä näyttäisi pienenevän lämpötilan laskiessa. Kuvasta 11 kuitenkin nähdään, että vaikutus on välillä päinvastainen, joten vuorovaikutus ei ole täysin selkeä. Kuvassa 12 seurataan kemiallisen hapenkulutuksen ja lämpötilan välistä yhteyttä Viikinmäen prosessissa. Siitä voidaan selkeämmin havaita, että COD-pitoisuus kasvaa lämpötilan laskiessa.

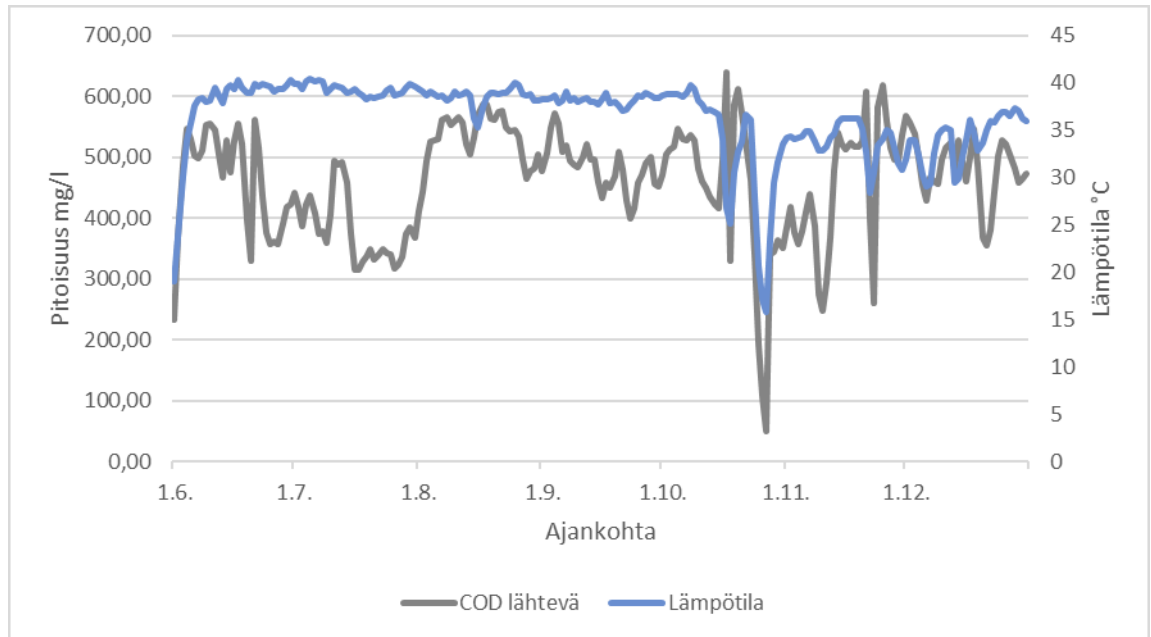


Kuva 11. Viikinmäen prosessin kokonaisfosfori ja lämpötila talvella.

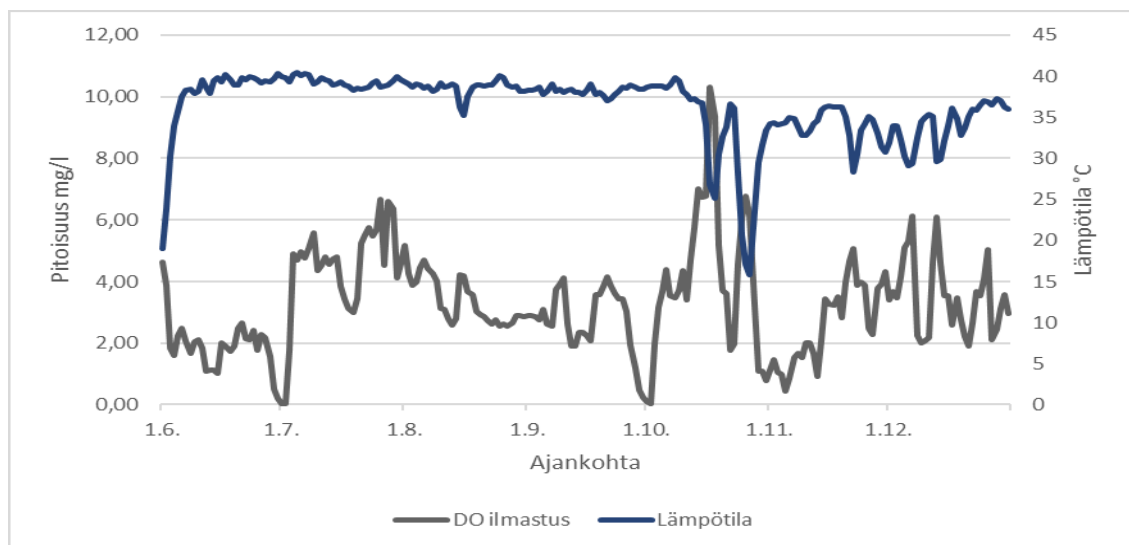


Kuva 12. Viikinmäen prosessin COD-pitoisuus ja lämpötila.

Kirjallisuusselvityksen perusteella selluteollisuuden jätevedenpuhdistuksessa COD-pitoisuuden pitäisi kasvaa lämpötilan noustessa. Tämä ilmiö näkyy myös kuvassa 13 erityisesti oikeanpuoleisessa reunassa. Tällöin käyrien huiput ja minimit ovat samoissa kohdissa. Kuvassa 14 nähdään liuenneen hapen ja lämpötilan välinen yhteys sellutehtaan prosessissa. Kirjallisuudesta löytyy tukea myös kuvan 14 ilmiölle, jossa liuenneen hapen määrä kasvaa lämpötilan laskiessa.



Kuva 13. Sellutehtaan prosessista lähtevän veden COD-pitoisuus ja lämpötila.



Kuva 14. Sellutehtaan prosessin ilmastusaltaan DO-pitoisuus ja lämpötila.

Analysoinnissa saadut tulokset mukailevat pääosin kirjallisuudesta saatavaa tietoa. Prosessidataan sisältyy kuitenkin aina mittausvirheitä, häiriöitä ja viiveitä, jotka voivat vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Biologiset prosessit ovat myös erittäin monimutkaisia, joten vuorovaikutukset eivät aina näy oletetulla tavalla. Valitulla prosessidatalla voi olla myös suuri merkitys tuloksiin. Tässä tarkastelussa data on pyritty valitsemaan siten, että tarkasteltavien komponenttien väliset vuorovaikutukset olisivat helposti havaittavissa. Graafisessa tarkastelussa selkeimmät yhteydet lämpötilan kanssa oli DO-, COD- ja nitraattityypipitoisuuksilla. Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että lämpötilan säädöllä on mahdollista ohjata aktiivilieteprosessia haluttuun suuntaan. Prosessin ohjaaminen lämpötilaa säätämällä on kuitenkin käytännössä erittäin haastavaa ja kallista

8 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin lämpötilan vaikutusta aktiivilieteprosessiin kunnallisessa ja teollisessa jätevedenpuhdistuksessa. Jätevesiin päätyy huomattava määrä ympäristölle haitallisia komponentteja sekä kunnallisella että teollisella puolella. Vaikka jätevesien laatu vaihtelee paljon, puhdistusprosessit ovat hyvin samankaltaisia. Jätevedenpuhdistuksen kokonaisprosessi koostuu mekaanisista, kemiallisista ja biologisista vaiheista. Mekaanisilla esikäsittelyillä laitokselle saapuvasta jätevedestä poistetaan suurimmat kiintoainepartikkelit ja liukenemattomat ainekset. Kemiallisessa vaiheessa jäteveteen lisätään saostuskemikaalia, jonka jälkeen saostunut materiaali poistetaan mekaanisesti. Aktiivilieteprosessissa elävät mikrobit käyttävät jätevedessä olevia ravinteita kasvuun ja lisääntymiseen. Mekaanisessa jälkiselkeytyksessä liete laskeutetaan altaan pohjalle ja puhdistettu vesi poistetaan ylitevirtauksena. Liette voidaan kierrättää takaisin prosessiin tai sille voidaan tehdä biologisia jatkokäsittelyjä.

Aktiivilieteprosessissa on tärkeää huomioida mikrobien ravinne- ja happivaatimukset. Jätevedessä on yleensä runsaasti tarvittavia ravinteita, mutta happea joudutaan lisäämään ilmastuksen avulla. Mikrobeista pyritään suosimaan erityisesti flokinmuodostajia, joiden avulla saavutetaan hyviä puhdistustuloksia. Kunnallisella puolella vuodenajoilla ja ympäristöolosuhteilla on suuri merkitys puhdistustuloksiin. Erityisesti talvella suuret virtaamat viilentävät prosessia huomattavasti, mikä hidastaa mikrobien toimintaa. Teollisuudessa ympäristöolosuhteet ovat stabiilimmat ja virtaukset yleensä lämpimiä.

Esimerkkiprosesseista kerätyn datan graafisessa analysoinnissa havaittiin, että lämpötilalla on huomattava vaikutus aktiivilieteprosessiin. Huomattiin, että kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa talviolosuhteissa puhdistustulokset ovat heikommat kuin kesällä. Selvimät tulokset saatiin DO-, COD- ja typpipitoisuuksilla. Lämpötilan nousu pienentää DO- ja typpipitoisuuksia mutta lisää COD-pitoisuutta. Saaduille tuloksille löytyy tukea myös aiemmin tehdyistä tutkimuksista. Kirjallisuusselvityksen ja saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että lämpötilalla voidaan periaatteessa ohjata aktiivilieteprosessia haluttuun suuntaan, mutta sen käytännön toteutus on haastavaa ja kallista. Mittaukset voivat kuitenkin sisältää virheitä ja häiriöitä, mitkä voivat vaikuttaa tuloksiin. Aiheesta ei myöskään ole saatavilla kovin paljon tuoreita tutkimuksia, jotta tulokset olisivat yleistettäviä.

LÄHDELUETTELO

Aittomäki, E., Eerikäinen, T., Leisola, M., Ojamo, H., Suominen, I. & von Weyman, N., 2002. Bioprosessitekniikka. Porvoo: WSOY, 445 s. ISBN 951-0-26995-6

Aluehallintovirasto, 2015. Viikinmäen jätevedenpuhdistamon ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen [verkkodokumentti]. Helsinki: Aluehallintovirasto. 75 s. Saatavissa:

<https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Viikinmaki/Documents/avilupa240-2015.viikinmaki.pdf>

Amaral, A. L., Mesquita, D. P. & Ferreira, E. C., 2013. Automatic identification of activated sludge disturbances and assessment of operational parameters. *Chemosphere*, 91 (5), s. 705-710.

Castrén, J., Korhonen, R, Kuokkanen, A., Lallukka, S., Lehtinen, E., Urho, A., 2016. Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2015 - Viikinmäen ja Suomenojan puhdistamot, 4. Helsinki: Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, 69 s.

Cheremisinof, N. P., 2002. Handbook of water and wastewater technologies. Boston: Butterworth-Heinemann, 636 s. ISBN 978-0- 7506-7498-0

Doran, P. M., 2012. Bioprocess Engineering Principles. 2. painos. Academic Press, 928 s.

Eckenfelder, W. W. & Grau, P., 1992. Activated sludge process design and control – theory and practice. Lancaster: Technomic Publishing Company, 268 s. ISBN 87762-889-0

Grady, C. P. L. Jr., Daigger, G. T., Love, N. G. & Filipe, C. D. M., 2011. Biological wastewater treatment. 3. painos. Lontoo: IWA Publishing, 963 s. ISBN 978-1-4200-0963-7

Gray, N. F., 2004. Biology of wastewater treatment. 2. painos. Lontoo: Imperial College Press, 1421 s.

Guo, J., Peng, Y., Huang, H., Zhang, J. & Wang, Z., 2010. Short- and long-term effects of temperature on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 179(1-3), s. 471-479

Henze, M., Harremoës, P., Arvin, E., & Jansen, J., 2000. *Wastewater Treatment – Biological and Chemical Processes*. 3. painos. Springer, 188 s. ISBN 3-540-42228-5

HSY, 2016. Asiantuntijalle, vesihuolto [verkkodokumentti]. Helsinki: Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY. Saatavissa: <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Sivut/default.aspx> [viitattu 22.2.2017]

HSY, 2013. Liite 11 A. Tulokuorma ja päästöt vesistöön - Viikinmäen jätevedenpuhdistamon ympäristölupahakemus 2013 [verkkodokumentti]. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY. Saatavissa: <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Viikinmaki/Documents/Liite%2011A%20Tulokuorma%20ja%20p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6t%20vesist%C3%B6n.pdf>

HSY, 2013. Liite 12. Jätteiden määrät, varastointi ja hyödyntäminen- Viikinmäen jätevedenpuhdistamon ympäristölupahakemus 2013 [verkkodokumentti]. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY. Saatavissa: <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Viikinmaki/Documents/Liite%2012%20J%C3%A4tteiden%20m%C3%A4r%C3%A4t,%20varastointi%20ja%20hy%C3%B6dynt%C3%A4minen.pdf>

Huang, J., Wen, Y., Cao, A., Li, H. & Zhou, Q., 2012. The influence of temperature on bioflocculation and settling of activated sludge and their flocculation mechanisms involved. *Advanced Materials Research* 518-523, s. 1817-1824

Karttunen, E., 2004. RIL 124-2 Vesihuolto 2. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 683 s. ISBN 951-758-438-5

Koivuranta, E., Suopajarvi, T., Hattuniemi, J., Stoor, T. & Illikainen, M., 2017. The effect of seasonal variations on floc morphology in the activated sludge process. *Environmental Technology (United Kingdom)* s. 1-7

Laukkanen, R. & Laukkanen, M., 1990. RIL 186-1990 Prosessiautomaatio jäteveden biologisessa käsittelyssä. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 161 s. ISBN 951-758-234-X

Lindquist, A., 2003. About water treatment. Helsingborg: Kemira Kemwater. 220 s. ISBN 91-631-4344-5

Mara, D. & Horan, N., 2003. Handbook of Water and Wastewater Microbiology. Lontoo: Academic Press, 797 s.

Martínez-Delgadillo, S. A., Morales-Mora, M. A., Rodríguez-Rosales, M. G. & Aguilar-López, R., 2005. The effect of temperature on the performance of a biological wastewater treatment system of a petrochemical company. *Ingenieria Hidraulica en Mexico* 20(4), s. 33-43

Matilainen, M., Pisto, S., Rinnepelto, P. & Kinnunen, N., 2014. Metsäteollisuuden ravinteet - Metsäteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen lannoitevalmisteina [verkkojulkaisu]. Joensuu: Apila Group Oy Ab 40 s. Saatavissa: <http://www.apilagroup.fi/wp-content/uploads/2016/06/Metsäteollisuuden-ravinteet-Selvitys.pdf>

Metcalf & Eddy, 2003. Wastewater engineering, treatment and reuse. 4. painos. Boston, Mc Graw-Hill cop. 1819 s. ISBN 0-07-041878-0

Morgan-Sagastume, F. & Allen, D. G., 2002. Effects of temperature variations on activated sludge performance treating pulp and paper mill effluent. *International Environmental Conference* s. 189-207

Pellikka, K., 2007. Kylmien asumajätevesien typenpoisto. Diplomityö. Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto. 102 s.

Peng, Z., Peng, Y., Liu, X., Yu, Z., & Chai, T., 2011. Effects of low temperature on sludge settleability and nutrients removal performance treating domestic wastewater. *Journal of Harbin Institute of Technology* 18(5), s. 55-60

Sanin, D. & Vesilind, P. A., 2000. Bioflocculation of Activated Sludge: The Role of Calcium Ions and Extracellular Polymers. *Environmental Technology* 21 (12), s. 1405-1412

Wang, J., Peng, Y.-Z., Yang, X., Wang, S.-Y. & Zhang, J.-W., 2016. Effect of temperature on activated sludge settleability and microbial community structure. *Zhongguo Huanjing Kexue/China Environmental Science* 36(1), s. 109-116