



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

METSÄTEOLLISUUDEN JÄTEVEDEN COD:N POISTO TÄYTEKAPPALEKOLONNI- REAKTORILLA

TEKIJÄ: Antti Koskenlahti

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Antti Koskenlahti			
Työn nimi Metsäteollisuuden jäteveden COD:n poisto täytekappalekolonnireaktorilla			
Päiväys	9.3.2017	Sivumäärä/Liitteet	38/2
Ohjaajat Maarit Janhunen, projekti-insinööri ja Juha-Matti Aalto, sivutoiminen tuntiopettaja			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Savonia-ammattikorkeakoulu oy/Stora Enso Oyj			
Tiivistelmä <p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Savonia-ammattikorkeakoululle, jonka toiminta koostuu opetus- ja TKI- eli tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminnasta. Työ toteutettiin METVI-hankkeessa (EURA 2014/2028/09 02 01 01/2015/PSL), jossa tutkitaan metsäteollisuuden jätevesien energiatehokasta esikäsittelyä. Tämä opinnäytetyö keskittyy laboratorio mittakaavan täytekappalekolonnireaktorin koeajon toteutukseen, johon kuuluivat anaerobisen prosessin ylösajo, ylläpito ja seurattavien parametrien mittaaminen. Lisäksi tavoitteeksi oli asetettu mahdollisimman tehokas orgaanisen aineen poisto (reduktio) sekä tuottaa kirjallinen raportti tuloksista.</p> <p>Opinnäytetyön teoriaosuudessa tarkasteltiin biokaasun tuotantoa sekä perehdyttiin täytekappalekolonnireaktorin toimintaan. Työn kokeellinen osuus suoritettiin laboratoriomittakaavan täytekappalekolonnireaktorilla, joka oli rakennettu Savonia-ammattikorkeakoulun Microkadun kampuksen jätevesilaboratorioon. Koeajon tarkoituksena oli selvittää täytekappalekolonnireaktorin käyttöä esikäsittelyä metsäteollisuuden jätevesien orgaanisen aineen poistajana. Laitteistoa operoitiin säätämällä anaerobiproessiin vaikuttavia tekijöitä saatujen mittaustulosten perusteella. Reaktorista otettiin näytteitä ja tehtiin anaerobiproessiin liittyviä analyyskejä päivittäin.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksina saatiin mikrobiologinen prosessi toimimaan hyvin täytekappalekolonnireaktorissa ja kokemusperäistä tietoa täytekappalekolonnireaktorin toiminnasta. Lisäksi orgaanisen aineen reduktio oli koeajon aikana korkea, vaihdellen välillä 75 %:sta 85 %:iin. Kerättyä kokemusta ja tietoa voidaan hyödyntää varsinaisessa tehdaspilotoinnissa myöhemmin tänä keväänä.</p>			
Avainsanat metsäteollisuus, biokaasu, anaerobinen hajoaminen, täytekappalekolonnireaktori, jäteveden esikäsittely			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author Antti Koskenlahti			
Title of Thesis COD Removal from Forest Industry Wastewater with Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor			
Date	9 March 2017	Pages/Appendices	38/2
Supervisors Ms Maarit Janhunen, M.Sc, Project Engineer & Ph.D. Juha-Matti Aalto, Part-Time Teacher			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences/Stora Enso Oy			
<p>Abstract</p> <p>This thesis was made for Savonia University of Applied Sciences, whose area of operation consists of education and RDI which stands for research, development and innovation. This thesis is part of the METVI project (EURA 2014/2028/09 02 01 01/2015/PSL) which researches energy efficient pretreatment of forest industry wastewaters. The aim of this thesis was to implement an anaerobic process start-up and to maintain the laboratory scale upflow anaerobic sludge blanket reactor and to measure the monitored parameters from the anaerobic process. The second aim of this thesis was to get as effective as possible a reduction of organic matter in the reactor.</p> <p>In the theory part of the thesis, the biogas production and the principles of upflow anaerobic sludge blanket reactor were reviewed. The experimental part of the thesis was carried out with a laboratory scale upflow anaerobic sludge blanket reactor that had been built into the wastewater treatment laboratory of Savonia University of Applied Sciences on Microkatu Campus. The purpose of the test drive was to solve how the upflow anaerobic sludge blanket reactor reduces organic matter when used in pretreatment of forest industry wastewaters. The reactor was sampled daily and the results of the analyses were used to adjust and operate the anaerobic process.</p> <p>As a result of this thesis, an active and efficient microbiological process was obtained as well as experimental knowledge from the operation of the laboratory scale upflow anaerobic sludge blanket reactor. The reduction of organic matter was also high during the trial run, varying between 75 to 85 %. The results of this thesis can be utilized in the actual factory pilot test drive later this spring.</p>			
Keywords forest industry, biogas, anaerobic digestion, upflow anaerobic sludge blanket reactor, wastewater pretreatment			

ESIPUHE

Kiitän Savonia-ammattikorkeakoulua mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta. Erityisesti haluan kiittää METVI-hankkeen projektipäällikköä Maarit Janhusta, joka on ohjannut minua opinnäytetyöhöni liittyvissä tehtävissä ammattitaitoisesti ja on luonut uskoa tekemiseeni omalla esimerkillisellä toiminnallaan. Haluan kiittää myös Savonia-ammattikorkeakoulun henkilökuntaa hyvästä yhteishengestä ja työilmapiiristä.

Kuopiossa 20.02.2017,

Antti Koskenlahti

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	STORA ENSON VARKAUDEN TEHDAS	9
2.1	Stora Enson Varkauden tehtaan jätevedenpuhdistamo.....	9
2.2	Metsäteollisuus Suomessa	10
3	METVI-HANKE.....	12
4	BIOKAASUN TUOTANTO	13
4.1	Biokaasun koostumus ja ominaisuudet.....	13
4.2	Biokaasuprosessi eli anaerobinen hajoamisprosessi	13
4.2.1	Hydrolyysi.....	14
4.2.2	Asidogeneesi eli happokäyminen.....	15
4.2.3	Asetogeneesi eli etikkahappokäyminen.....	15
4.2.4	Metanogeneesi	15
4.3	Biokaasuprosessin hallinta.....	16
4.3.1	Anaerobiset olosuhteet	16
4.3.2	Lämpötila.....	16
4.3.3	pH	17
4.3.4	Orgaaninen kuormitus	17
4.3.5	Viipymäaika.....	17
4.3.6	Haihtuvat rasvahapot	18
4.3.7	Alkaliteetti.....	18
4.4	Ravinteet	18
5	TÄYTEKAPPALEKOLONNIREAKTORIN TOIMINTAPERIAATE	20
5.1	Täytekappalekolonnireaktori	20
5.2	Granulaatio.....	21
6	LABORATORIO MITTAKAAVAN KOEAJON JÄRJESTELYT JA NIIDEN TOTEUTUS.....	23
6.1	Ylösajo.....	25
6.2	Anaerobisen prosessin ylläpito ja seurattavat parametrit	25
7	TULOKSET	28
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT.....	34
	LIITE 1: 2-VAIHEINEN TÄYTEKAPPALEKOLONNIREAKTORI.....	37

LIITE 2: PROESSIN YLÖSAJON AIKATAULU..... 38

KÄSITTEET JA KÄYTETYT LYHENTEET

COD (Chemical Oxygen Demand) = Kemiallinen hapenkulutus, mg O₂/l

Effluentti = Prosessin läpikäynyt jätevesi

Granulaatio = Mikrobin kiinnittyminen ja kasvaminen reaktorissa olevien partikkeleiden pinnalle

HRT (Hydraulic Retention Time) = hydraulinen viipymä

Influentti = Täytekappalekolonnireaktoriin tuleva jätevesi eli syöte

Inhibitio = Prosessin toimintaa heikentävä tekijä

Metanogeeni = Bakteeri, joka tuottaa lopputuotteena metaania

NTP (Normal Temperature and Pressure) = normaalilämpötila ja -paine, 20 °C ja 101 325 Pa

OLR (Organic Loading Rate) = Orgaaninen kuormitus, kg COD/Rm³vrk, jossa kg COD on orgaanisen aineen määrä kiloina, Rm³ on reaktorikuutiometri ja vrk on vuorokausi

RFC-sameasuodosvesi = Kierrätyskuitulaitoksen jätevesi

TOC (Total Organic Carbon) = Orgaanisen hiilen kokonaismäärä, mg/l

UASB-reaktori (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) = Täytekappalekolonnireaktori

VFA (Volatile Fatty Acids) = Haihtuvat rasvahapot

VS = Orgaanisen aineen määrä

Ymppi = Bakterisiirros, joka on anaerobiprosessin läpikäynyttä mädätettä

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehdään Savonia-ammattikorkeakoululle ja se liittyy METVI-hankkeeseen, jossa tutkitaan metsäteollisuuden jäteveden energiatehokasta esikäsittelyä. Työssä käsitellään laboratoriomittakaavan täytekappalekolonnireaktorin anaerobisen prosessin ylösajoa, ylläpitoa ja prosessista seurattavien parametrien mittaamista. Opinnäytetyöstä saatavia tuloksia voidaan hyödyntää varsinaisessa tehdas pilotoinnissa keväällä 2017.

Metsäteollisuudessa syntyy paljon jätevettä vuosittain ja se kuormittaa tehtaiden jätevedenpuhdistamoja sekä lisää kustannuksia jäteveden käsittelyssä. Osa metsäteollisuuden jätevesistä sisältää paljon orgaanista ainetta eli COD:ta (Chemical Oxygen Demand), jota voidaan hyödyntää anaerobisessa prosessissa mikrobien ravinteena. Stora Enso Oyj:n Varkauden tehtaan kierrätyskuitulaitoksen RCF-sameasuodos jätevesi on alustavien tutkimusten mukaan osoittautunut sopivaksi syötteenä anaerobiprosessille. Täytekappalekolonnireaktorilla suoritettava esikäsittely vähentää jätevedessä olevaa orgaanisen aineen määrää, joka vähentää varsinaisessa jätevesikäsittelyssä syntyvän lietteen määrää. Lisäksi samalla tuotetaan biokaasua energian tarpeen hyödyntämiseen. Jäteveden esikäsittelyllä voidaan saada aikaan säästöjä selkeytys kemikaalien käytössä orgaanisen kuormituksen pienentyessä sekä samalla hyödyntäen esikäsittelyssä muodostuvaa biokaasua energian tuotannossa.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsitellään biokaasun tuotantoa ja täytekappalekolonnireaktorin toimintaa. Työn kokeellinen osuus koostuu laboratorio mittakaavan täytekappalekolonnireaktorin anaerobisen prosessin ylösajosta, ylläpidosta ja prosessista seurattavien parametrien mittaamisesta. Täytekappalekolonnireaktorin koeajo suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun Microkadun kampuksen jätevesilaboratoriossa.

Opinnäytetyön tavoitteena on suorittaa laboratorio mittakaavan täytekappalekolonnireaktorin pitkäaikainen koeajo, jolloin päästään arvioimaan jäteveden ominaisuuksien vaihtelun vaikutusta orgaanisen kuorman leikkautumiseen. Tavoitteena on saada kokemuseräistä tietoa laitteiston toiminnasta, mikrobiologiasta ja jäteveden ominaisuuksien vaihtelusta sekä tuottaa mahdollisimman paljon biokaasua. Opinnäytetyöstä saatavia tuloksia voidaan hyödyntää varsinaisessa tehdas koeajossa myöhemmin tänä keväänä.

2 STORA ENSON VARKAUDEN TEHDAS

Stora Enso Oyj on johtava uusiutuvien ratkaisujen tarjoaja pakkaus- ja biomaateriaaleissa, sekä puutuotteissa ja paperissa. Stora Enson markkinat ovat maailmanlaajuiset ja asiakaskunta koostuu muun muassa pakkaus- ja rakennusalojen sekä kustannus-, paino- ja paperimyyntialojen toimijoista. Stora Enso Oyj:n tavoitteena on kehittää uusia tuotteita ja palveluja, jotka perustuvat puuhun ja muihin uusiutuviin materiaaleihin. Stora Enso Oyj työllistää noin 26 000 ihmistä yli 35 eri maassa. Yrityksen liikevaihto oli 10,0 miljardia euroa vuonna 2015. (Storaenso.com.)

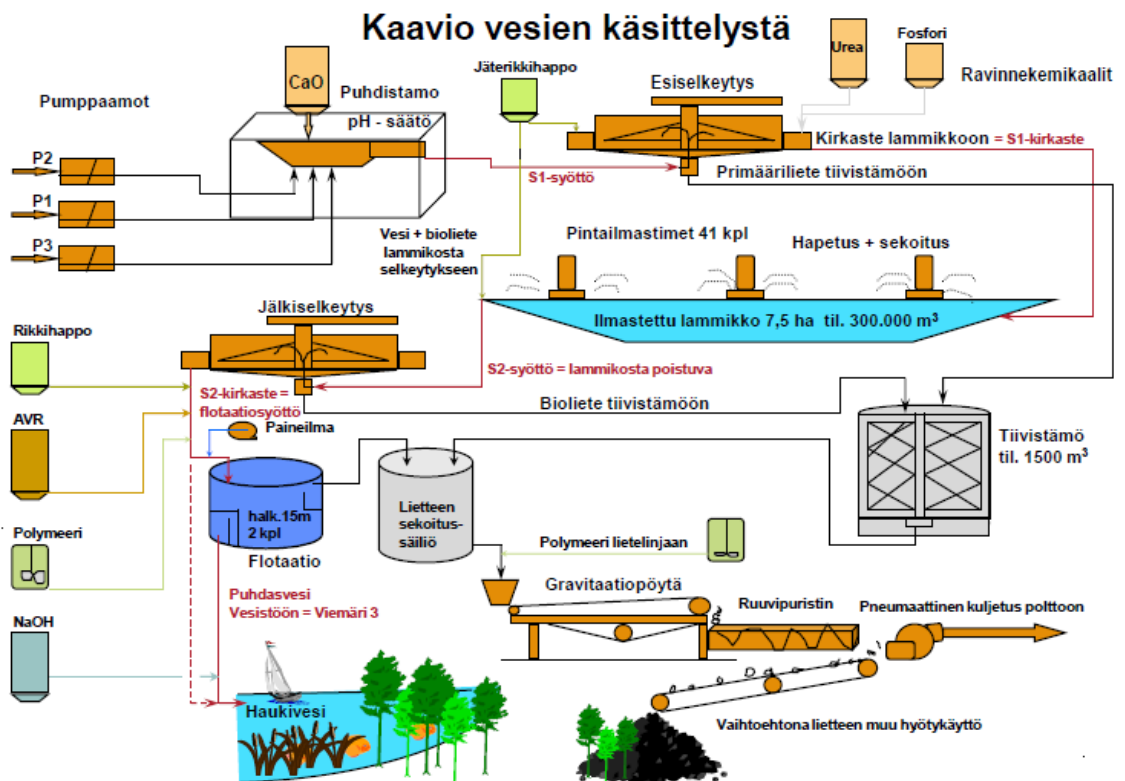
Stora Enso Oyj:n Varkauden tehtaalla valmistetaan pakkauskartonkia. Tehtaaseen kuuluvat pakkauskartonkilaitos, saha ja viilupuun tuotantolinjat. Pakkauskartongin valmistusketju koostuu puun käsittelylaitoksesta, sellutehtaasta ja yhdestä paperikoneesta. Kartonkitehtaan ylläpito ja huolto työllistää noin 300 vakituista ja väliaikaista työntekijää. Sellutehdas tuottaa vuosittain vuosittain 310 000 tonnia valkaisuamatonta sellua paikallisesta kuusesta ja männystä. Tehdas on energian suhteen oma-varainen ja käyttää 95 % bio- ja kierrätyspoltoaineita energiatehokkuuden maksimoimiseksi ja hiilidioksidin päästöjen minimoimiseksi. Kartonkitehdas noudattaa sertifioituja laatu-, ympäristö-, työterveys- ja turvallisuusjärjestelmiä sekä on sitoutunut järjestelmien jatkuvaan parantamiseen. (Storaenso.com.)

2.1 Stora Enson Varkauden tehtaan jätevedenpuhdistamo

Varkauden tehtaan jätevedet puhdistetaan biologisella puhdistamolla mekaanisesti ja biologisesti sekä tarvittaessa kemiallisesti. Biologinen puhdistus tapahtuu ilmastusaltaassa, joka on 7,5 ha suuruisen rakennettu allas. Altaan kapasiteetti on 300 000 m³ ja viipymä altaassa on noin 4 - 5 vuorokautta. Ilmastusaltaan toimintaa tehostetaan pintailmaisimien avulla, joita on 35 kappaletta. Kemiallista saostusta kaksilinjaisella flotaatolaitoksella käytetään silloin, jos altaan puhdistustehokkuus ei ole riittävän hyvä fosforin ja orgaanisen aineen poistoon. Puhdistustehokkuutta heikentävät esimerkiksi sellutehtaan prosessihäiriöt, jotka kasvattavat puhdistamolle tulevia jätevesipäästöjä ja talviaika, jolloin lämpötilan lasku heikentää mikrobien toimintaa altaassa. Kuvassa 1 on kaavio tehtaan jätevedenpuhdistusprosessista. (Pakarinen 2011, 1.)

Puhdistettavan veden pH on säädettävä sopivaksi ennen selkeytystä. Se tapahtuu poltetun kalkin (CaO) tai sellutehtaalla syntyvän jätehapon avulla. Mekaaninen puhdistus tehdään selkeyttimissä ja esiselkeyttimissä, joissa vedestä poistetaan helposti laskeutuvaa kiintoainetta, kuten esimerkiksi puukuitua, täyteaineita, lipeäsakkoja, kuorta ja purua. Biologinen puhdistus tapahtuu puhdistamon altaissa elävien, luonnosta peräisin olevien pieneliöiden eli mikrobien avulla. Nämä mikrobit käyttävät ravinnokseen vedessä olevaa orgaanista ainesta, jonka ne muuttavat vedeksi, hiilidioksidiksi ja lietteeksi. Mikrobit tarvitsevat happea ja ravinteita toimiakseen tehokkaasti. Happea lisätään altaisiin pintailmaisimilla, jotta varmistetaan mikrobien riittävä hapen saanti. Tarvittaessa altaisiin lisätään myös mikrobien tarvitsemia ravinteita kuten typpeä (urea) ja fosforia (fosforihappo). (Pakarinen 2011, 2.)

Ilmastusaltaasta vesi johdetaan jälkiselkeyttimeen, jossa veden sisältämä kiintoaine (kuollut biomass) laskeutuu selkeyttimen pohjalle. Esi- ja jälkiselkeyttimiltä tuleva liete pumpataan tiivistämön kautta ruuvipuristimelle, jossa se puristetaan niin kuivaksi, että sitä voidaan hyötykäyttää voimalaitoksessa energiana. Stora Enson tehtaan puhdistettu vesi lasketaan Haukiveteen. Veden määrää ja laatua mitataan jatkuvasti. Tärkeimmät määritykset, joilla seurataan puhdistamon toimintaa ja veden laatua ovat: fosforin, typen ja kiintoaineen määrä sekä kemiallinen (COD) ja biologinen hapenkulutus (BOD). (Pakarinen 2011, 1 - 3.)



Kuva 1. Kaavio Stora Enson jäteveden puhdistusprosessista (Pakarinen 2011, 1)

2.2 Metsäteollisuus Suomessa

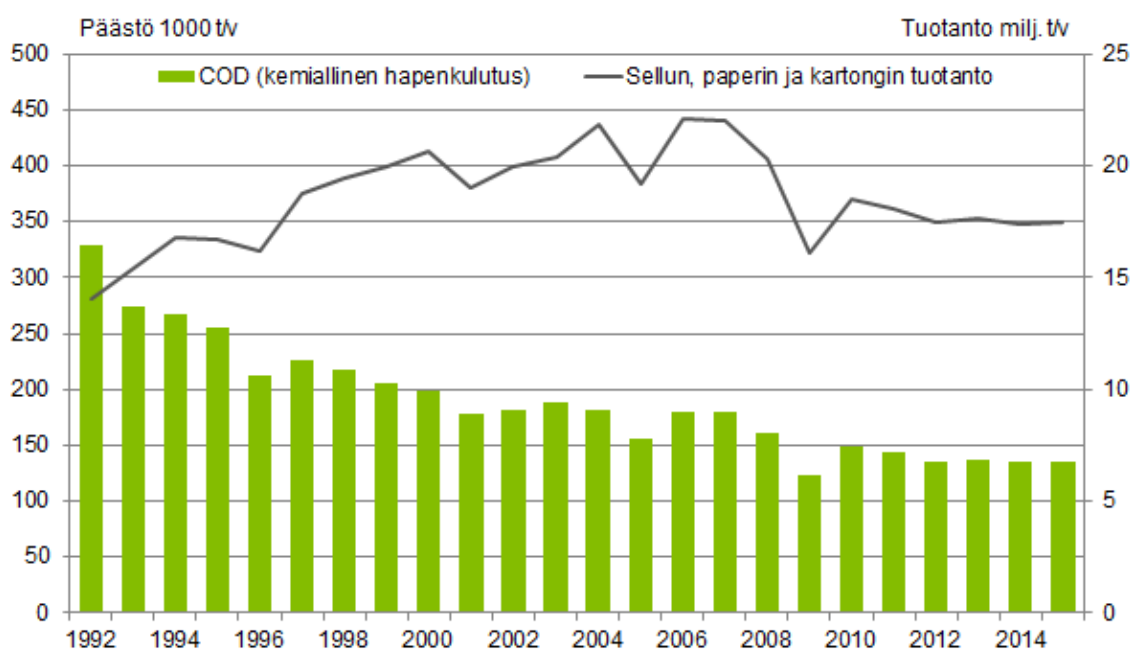
Metsäteollisuus on yksi suurimmista teollisuuden aloista Suomessa. Vuonna 2015 Metsäteollisuuden osuus Suomen tehdasteollisuudesta oli noin 19 %. Suurin osa Suomen metsäteollisuuden tuotannosta menee vientiin ulkomaille. Metsäteollisuuden viennistä 68 % kohdistuu Eurooppaan ja 17 % Aasiaan. Suurin yksittäinen vientimaa on Saksa, jonka viennin osuus on 16,1 %. Taulukossa 1 on esitetty Suomen metsäteollisuuden tuotantomääriä ja viennin osuuksia tuotannosta. (Metsäteollisuus.fi.)

Taulukko 1. Suomen metsäteollisuus vuonna 2015 (Metsäteollisuus.fi)

Tuoteryhmä	Tuotanto 1 000 t/m ³	Vienti 1 000 t/m ³	Viennin osuus tuotannosta, %
Paperi, t	7 250	6 850	95 %
Kartonki, t	3 050	3 000	99 %
Sellu, t	7 150	2 900	41 %
Havusahatavara, m ³	10 600	7 900	75 %
Vaneri, m ³	1 150	1 000	85 %

Metsäteollisuudessa käytetään paljon kemikaaleja, noin yli miljardin euron arvosta, mutta Suomessa siirrytään jatkuvasti ympäristölle harmittomimpiin kemikaaleihin. Näistä kemikaaleista noin 75 % on vaarattomia luonnonaineita. Metsäteollisuudesta syntyy myös useita tuhansia tonneja päästöjä vesistöihin ja ilmaan. Vaikka tuotannon määrä on pysynyt viime vuosina samana, on metsäteollisuuden päästöjä ympäristöön vähennetty jatkuvasti. Vaikka päästöt ympäristöön ovat vähentyneet, niitä syntyy edelleen suuria määriä ja uusia teknologioita niiden hyödyntämiseen kehitetään jatkuvasti. (Metsäteollisuus.fi 2016.)

Suomen massa- ja paperiteollisuudessa muodostuu paljon jätevesiä. Suurin vesistöihin vaikuttava päästö tuotantotonna kohden on COD:n eli kemiallisen hapenkulutuksen määrä (Metsäteollisuus.fi). Biokaasun valmistuksessa syötteen COD-arvo vaikuttaa biokaasun mahdolliseen tuotantomäärään, sillä se kuvaa sitä osaa, joka voidaan prosessissa muuttaa biokaasuksi (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 14). Kemiallisen hapenkulutuksen määrä jätevedessä oli noin 136 000 tonnia vuonna 2015 ja tätä päästöä voitaisiin vähentää lisäämällä biokaasuprosessilla toimiva esikäsittely ennen varsinaista jäteveden puhdistusta. Kuviossa 1. nähdään kuinka kemiallista hapenkulutusta on saatu vähennettyä viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana.



Kuvio 1. Suomen massa- ja paperiteollisuuden COD-päästöt (Metsäteollisuus.fi)

3 METVI-HANKE

Metvi-hanke toimii jatkohankkeena Metli-hankkeelle, jossa tutkittiin mahdollisuuksia tuottaa biokaasua ja biohiiltä metsäteollisuuden lietteistä. Lietejakeita muodostuu metsäteollisuuden jäteveden puhdistusprosessissa. Prosessissa muodostunut liete oli tutkimusten mukaan ravinteiden suhteen yksipuolista. Lietettä käytettäessä mikrobiologisessa prosessissa syötteenä, tarvittaisiin ennalta määritetty ravinnelisiä, jotta biokaasua saataisiin tuotettua. Biokaasun ja biohiilen tuottaminen lietejakeista on vielä nykyteknologialla taloudellisesti haastavaa. Metli-hankkeen aikana ilmeni mahdollisuus vaikuttaa lietteen syntymääriin ennalta ehkäisevästi jo ennen varsinaista puhdistusta. (Huopana, Raatikainen, Kolehmainen, Janhunen ja Antikainen 2014, 68.)

Metli-hankkeen tutkimustulosten mukaan on tarve kehittää anaerobista esikäsittelyä siten, että mahdollisimman iso osa jäteveden sisältämästä orgaanisesta aineesta saataisiin leikattua jo erillisellä esikäsittely-yksiköllä. Esikäsittely-yksiköksi sopiva olisi UASB-reaktori (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) eli täytekappalekolonnireaktori, jossa jätevedestä tuotetaan biokaasua ja jonka jälkeen jätevesi johdetaan varsinaiselle jäteveden puhdistamolle. Täytekappalekolonnireaktorilla voidaan tuottaa biokaasua ja samalla saadaan leikattua orgaanista kuormitusta. Tämä vähentäisi varsinaisen jäteveden puhdistamon energiankulutusta ja selkeytyskemikaalien tarvetta. Lisäksi se mahdollistaisi bioenergian tuottamisen jätevedestä. Nämä muutokset kehittäisivät merkittävästi metsäteollisuuden jäteveden käsittelyn kustannustehokkuutta sekä puhdistusprosessin energiatehokkuuden kehittyessä sillä olisi merkittäviä ilmastovaikutuksia. (Janhunen 2017-01-09.)

Metvi-hankkeessa on tavoitteena muun muassa kehittää energiatehokasta jätevesien käsittelykonseptia metsäteollisuuden jätevesien esikäsittelyyn. Esikäsittelyssä sovelletaan anaerobista jätevesiprosessia UASB-teknologiaa, jolla saadaan leikkattua orgaanista kuormitusta ja vähennettyä jätevesiprosessissa muodostuvan lietteen määrää. Esikäsittely vähentää myös jäteveden puhdistamon energia- ja kemikaalikulutusta sekä parantaa jätevesien käsittelyn kustannustehokkuutta. Metvi-hankkeessa on tarkoitus kehittää ja pilotoida UASB-teknologian sovellettavuutta metsäteollisuuden jätevesien esikäsittelyyn kahdessa eri tehdaskohteessa. Selvitykset tehdään sekä laboratorion esikoikeilla, että tehdas mittakaavan pilotoinneilla. Lisäksi tarkastellaan vaihtoehtoisia mahdollisuuksia prosessoitavan veden sisältämien rikkiyhdisteiden poistamiseksi. (Janhunen 2017-01-09.)

Metvi-hankkeessa tehdään myös laboratoriomittakaavan esiselvitys, jossa pyritään määrittämään käsiteltävien jätevesien koostumus, sen kausivaihtelut sekä pitoisuusvaihtelut. Lisäksi tutkitaan käsiteltävien vesien ominaisuuksia mikrobiologian näkökulmasta keskittyen erityisesti mahdollisiin inhibitoita aiheuttaviin tekijöihin. Samalla selvitetään varsinaisten pilot-koeajojen toteutus suunnitelmia ja ajoparametreja, kuten viipymäaikoja, kierrätysuhdetta, mitoitusvirtoja sekä kartoitetaan mahdollisten lisäravinteiden ja pH:n säätökemikaalien tarvetta. (Janhunen 2017-01-09.)

4 BIOKAASUN TUOTANTO

Biokaasu on kaasuseos, jota syntyy orgaanisen eli eloperäisen aineen hajotessa hapettomissa olosuhteissa. Biokaasua muodostuu luonnossa muun muassa hapettomissa järvien ja soiden pohjasedimenteissä sekä märehitijöiden pöteissä. Biokaasu on uusiutuvaa energiaa ja sitä tuotetaan biokaasureaktoreilla biomassasta, jota voi olla muun muassa liete, lanta, jätteet ja peltobiomassat. Biokaasua voidaan hyödyntää lämmöntuotannon polttoaineena kaasukattiloissa tai voimalaitoksissa lämmön ja sähköntuotannossa. Biokaasua voidaan jalostaa myös liikennepolttoaineeksi. (Motiva Oy 2013, 3.; Motiva.fi.)

4.1 Biokaasun koostumus ja ominaisuudet

Biokaasu on palava kaasuseos, joka koostuu pääasiassa metaanista (CH₄) ja hiilidioksidista (CO₂). Sitä muodostuu hapettomissa oloissa, kun anaerobiset mikrobit hajoittavat orgaanisia yhdisteitä. (Jorgensen 2009, 4.) Biokaasun koostumukseen ja laatuun vaikuttavat syöte, mädätystekniikan valinta, viipymäaika ja prosessin olosuhteet (Al Saedi, Rutz, Prassl, Köttner, Finsterwalder, Volk ja Janssen 2008, 41). Metaanin ja hiilidioksidin lisäksi biokaasu sisältää pieniä määriä hiilimonoksidia, typpeä, vetyä ja rikkivetyä sekä jonkin verran kosteutta. Taulukossa 2 on esitetty biokaasun sisältämät aineet ja niiden osuudet tilavuus prosentteina.

Taulukko 2. Biokaasun koostumus (Motiva Oy 2013, 3)

Aine	Osuus %
Metaani, CH ₄	55-75
Hiilidioksidi, CO ₂	25-45
Typpi, N ₂	1-5
Vety, H ₂	0-3
Kosteus, H ₂ O	2-4
Rikkivety, H ₂ S	0,1-0,5
Hiilimonoksidi, CO	0-0,3

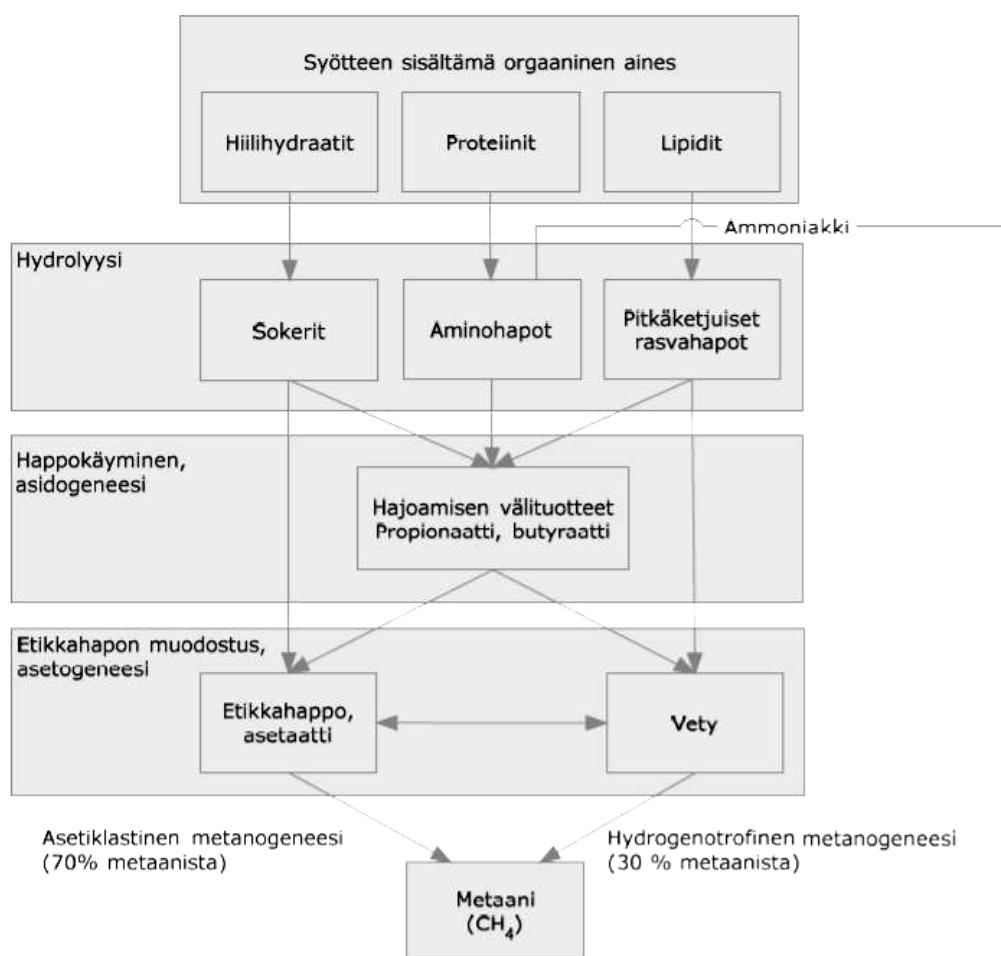
Metaani on biokaasun palava osa. Se on väritön ja hajuton kaasu, joka palaa sinisellä liekillä. Metaani on yksinkertaisin alkaani, ja NTP olosuhteissa sen tiheys on 0,75 kg/m³. Biokaasu sisältää myös raskaampaa hiilidioksidia, jolloin sen tiheys on 1,15 kg/m³. (Jorgensen 2009, 4.) Metaanin tehollinen lämpöarvo on noin 10 kWh/m³ ja biokaasun 4 - 6 kWh/m³ (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama ja Korhonen 2016, 188–189).

4.2 Biokaasuprosessi eli anaerobinen hajoamisprosessi

Biokaasua muodostuu anaerobisissa oloissa erilaisten mikrobin hajottaessa orgaanista ainesta. Tähän prosessiin osallistuu useita erilaisia mikrobeja. Biokaasuprosessin eri mikrobit toimivat hajoamisketjun eri vaiheissa ja toisistaan riippumattomina pyrkivät optimoimaan oman toimintansa parhaalla mahdollisella tavalla. Mikrobit ovat myös toisistaan riippuvaisia, sillä yhden mikrobin lopputuote on

toisen mikrobin ravintoa. Hyvin toimivassa biokaasuprosessissa hajoaminen etenee tasapainossa, siten että kun edellisen vaiheen lopputuote toimii välimolekyylinä seuraavalle vaiheelle eikä hajoamisen välituotteita pääse konsentroitumaan ja aiheuttamaan inhibitiota. Jotta mikrobit pystyvät toimimaan optimaalisesti, on olosuhteiden oltava kaikille sopivat. (Luostarinen 2013, 10; Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 60.)

Kuviossa 2 on havainnollistettu biokaasuprosessin neljä eri vaihetta, joita ovat hydrolyysi, asidogeneesi eli happokäyminen, asetogeneesi eli etikkahappokäyminen ja metanogeneesi. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 60).



Kuvio 2. Anaerobinen hajoamisprosessi (Latvala 2009, 30)

4.2.1 Hydrolyysi

Hydrolyysi on biokaasuprosessissa partikkelimaisten raaka-aineiden hajoamista rajoittava tekijä. Hydrolyysiä pyritään edistämään syötemateriaalia pienentämällä, joko pilkkomalla tai jauhamalla. Näin maksimoidaan materiaalien pinta-ala hydrolyyttisten entsyymien hajotukselle, jolloin yhdisteiden pilkkoutuimen tehostuu. (Luostarinen 2013, 11.) Prosessiin syötettävän seoksen orgaaninen aines sisältää pitkäketjuisia yhdisteitä, kuten hiilihydraatteja, proteiineja ja lipidejä eli rasvoja (Latvala 2009, 29). Nämä syötteen molekyylit ovat liian suuria, jotta mikrobisolut voisivat ottaa niitä ravinnokseen, joten solut tuottavat ulkopuolelleen entsyymejä, jotka hoitavat hajotuksen. Näitä entsyymejä tuottavia mikrobeja kutsutaan hydrolyyttisiksi bakteereiksi. Hiilihydraatteja hajottavat amylaa-

si-entsyymit tuottaen sokereita, proteiineja hajottavat proteaasit, jolloin muodostuu aminohappoja. Lipaasit hajottavat rasvoja tuottaen rasvahappoja ja glyserolia. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 61.)

4.2.2 Asidogeneesi eli happokäyminen

Hydrolyysissä muodostuneet monomeerit hajoitetaan vielä pienemmiksi osiksi asidogeneesissä eli happokäymisessä. Fermentoivat mikrobit pilkkovat hydrolyysissä muodostuneet sokerit, aminohapot ja rasvahapot omaan kasvuunsa ja lopputuotteina muodostuu asetaattia (etikkahappoa), hiilidioksidia ja vetyä (70 %) sekä lyhytketjuisia, haihtuvia rasvahappoja (volatile fatty acids, VFA), kuten voi-, propioni- ja valeerihappoa ja alkoholeja (30 %) (Al Saedi, ym. 2017, 22.) Asidogeneesi-vaiheeseen osallistuu useita eri mikrobeja ja osa niistä on samoja kuin hydrolyysivaiheessa. Syötteen koostumus, reaktorin olosuhteet ja mikrobipopulaatio vaikuttavat ratkaisevasti missä suhteessa lopputuotteita syntyy. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 62.)

4.2.3 Asetogeneesi eli etikkahappokäyminen

Asidogeneesissä muodostuneet lopputuotteet, joita metaanintuottajabakteerit eli metanogeenit eivät voi hyödyntää, muutetaan asetogeneesissä metanogeenille sopiviksi. Haihtuvat rasvahapot ja alkoholit hapetetaan asetaatiksi ja vedyksi. (Al Saedi, ym. 2017, 22 - 23.) Asetogeneesivaiheelle on tyypillistä, että asetogeeniset bakteerit toimivat symbioosissa vetyä kuluttavien metanogeenien kanssa. Asetogeeniset bakteerit tuottavat vetyä, josta metanogeenit muodostavat metaania. Metanogeenien tulee käyttää vetyä heti kun sitä on muodostunut, sillä asetogeeniset bakteerit eivät toimi, jos vetyä on prosessissa liikaa. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 62.)

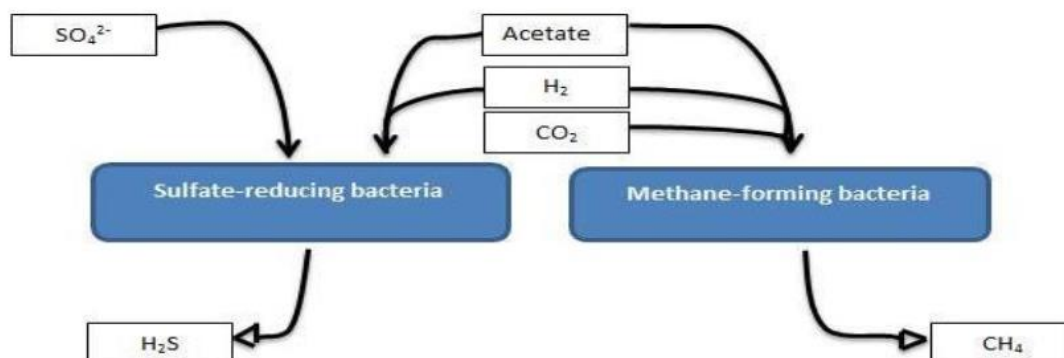
4.2.4 Metanogeneesi

Metanogeneesi on metaanin tuotannon viimeinen vaihe, jossa metanogeenit muodostavat metaania kahden eri reitin kautta. Biokaasuprosessissa muodostuneesta metaanista noin 70 % muodostuu, kun asetaattia pilkkotaan metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Asetaattia pilkkovia mikrobeja kutsutaan asetiklastisiksi tai asetotrofisiksi. Loput noin 30 % tuotetaan reaktiolla, jossa vety ja hiilidioksidi reagoivat, jolloin lopputuotteena syntyy metaania ja vettä. Vetyä käyttäviä mikrobeja kutsutaan hydrogenotrofisiksi. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 62 - 63.)

Metanogeneesi on biokaasuprosessin kriittisin vaihe, sillä metanogeenit ovat hitaita lisääntymään (Al Saedi, ym. 2017, 23). Asetotrofiset metanogeenit kasvavat hitaasti ja niiden jakaantuminen kestää 2 – 12 vuorokautta. Tällä on vaikutusta biokaasuprosessin ylösajo vaiheessa sekä prosessin viipymäaika sunnitellessa, sillä liian lyhyt viipymäaika voi huuhtoa metanogeeniä ulos prosessista, jolloin niiden kasvu hidastuu tai loppuu jopa kokonaan. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 63.)

Biokaasuprosessissa on myös sulfaatin pelkistäjä bakteereja, jos prosessissa on sulfaattia. Sulfaatin pelkistäjä bakteerit käyttävät ravinnokseen metanogeenien tapaan asetaattia ja vetyä. Tämä aiheuttaa kilpailun asetaatista ja vedystä metanogeenien ja sulfaatin pelkistäjä bakteerien välille (kuva 2).

(Mattsson, Rundstedt ja Karlsson 2011, 9.) RCF-sameasuodos jätevesi sisältää vähän sulfaattia ja täytekappalekolonnireaktorin prosessiin syötettynä sulfaatin pelkistäjä bakteerit hajottavat sen nopeasti, joten kilpailun prosessissa olevista asetaatista ja vedystä voittaa metanogeenit.



Kuva 2. Sulfaatin pelkistäjä bakteerit ja metanogeenit kilpailevat samasta ravinnosta (Mattsson, ym 2011, 9.)

4.3 Biokaasuprosessin hallinta

Biokaasuprosesseja on monenlaisia, mutta kaikille yhteistä on prosessin seuranta ja hallinta. Biokaasuprosessiin vaikuttavat useat tekijät, jotka kaikki on otettava huomioon, jotta prosessi pystyy toimimaan tehokkaasti, luotettavasti ja tuottavasti. (Latvala 2009, 34.) Lisäksi saatetaan tarvita ravinteiden syöttöä prosessin mikrobeille. Ravinteiden tarve määräytyy syötteen koostumuksen ja hajoaamisen perusteella. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 63.)

4.3.1 Anaerobiset olosuhteet

Reaktorin tulee olla ilmatiivis, koska metanogeenit ovat obligatorisesti eli ehdottomasti anaerobisia mikrobeja. Reaktoriin pääsee kuitenkin pieniä määriä happea syötteen mukana, mutta se ei haittaa, koska prosessin alkuvaiheessa on mukana fakultatiivisesti eli mahdollisesti anaerobejamikrobeja, jotka voivat kasvaa sekä hapettomissa ja hapellisissa olosuhteissa ja voivat käyttää syötteen mukana tulevan hapen. (Jorgensen 2009, 11.)

4.3.2 Lämpötila

Lämpötila on yksi merkittävin biokaasuprosessiin vaikuttava tekijä. Biokaasuprosessissa olevat mikrobit toimivat lämpötilan suhteen psykoofiilissä (lämpötila 4 - 25 °C), mesofiilissä (lämpötila 20 - 40 °C) tai termofiilissä (lämpötila 50 - 60 °C) olosuhteissa. Prosessin lämpötila tulisi pitää mahdollisimman tasaisena, sillä lämpötilan vaihtelut vaikuttavat metanogeenien toimintaan. Lämpötilan vaihtelu olisi hyvä pitää +/- 0,5 °C ja saisi maksimissaan olla +/- 2 - 3 °C. (Schnurer ja Jarvis 2009, 30 - 33.) Anaerobisessa hajoamisessa energiaa sitoutuu pääosin metaaniin, eikä vapaudu lämpönä, joten prosessi tarvitsee yleensä ulkoisen lämmönlähteen. Prosessin lämmitys voidaan hoitaa joko esilämmittämällä syötettä tai käyttämällä reaktorilämmitystä. Reaktorin eristäminen ja prosessin sekoittaminen vaikuttavat myönteisesti lämpötilan tasaisuuteen. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 63 - 64.)

4.3.3 pH

Biokaasuprosessin pH on yleensä välillä 7 - 8 ja prosessin mikrobit ovat aktiivisimmillaan lähellä neutraaleja olosuhteita. Eri mikrobeilla on kuitenkin erilainen optimi pH. Biokaasuprosessin alkuvaiheessa (hydrolyysi, asidogeneesi) mikrobien pH-optimi on välillä 4,5 - 6 eli happaman puolella. Metanogeenien pH-optimi on 6,7 - 8,5. Prosessin kestävyuden ja tasapainon kannalta pH-optimi on 7,2, sillä silloin prosessin puskurikyky on hyvä. Hyvällä puskurikyvyllä tarkoitetaan prosessinkykyä neutraloida muodostuvia happoja ja näin estäen niiden vaikutuksen pH-arvoon. (Jorgensen 2009, 11; Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 64 - 65.)

4.3.4 Orgaaninen kuormitus

Biokaasuprosessin orgaanisella kuormituksella (OLR, Organic Loading Rate) tarkoitetaan reaktorin toimintatilavuutta (Rm^3) kohden syötettyä orgaanisen aineen määrää vuorokaudessa ($kgVS(Rm^3/vrk)$). Orgaaninen kuormitus lasketaan kaavalla:

$$OLR = m * \frac{c}{V_R} \quad (1)$$

jossa OLR on orgaaninen kuormitus, m on syötteen määrä päivässä (l/vrk), c on syötteen orgaanisen aineen pitoisuus prosentteina (%) ja V_R on reaktorin tilavuus (Rm^3). (Al Saedi, ym. 2017, 28.)

Arvioitaessa orgaanista kuormitusta tulee huomioida metanogeenien kasvuvauhti ja se, että mikrobit ehtivät hajottaa orgaaniset hapot heti niiden synnyttyä. Jos orgaaninen kuormitus on liian suuri, prosessi happamoituu. (Jorgensen 2009, 12.) Biokaasureaktorin syötön tulisi olla mahdollisimman tasainen, jotta prosessissa on saatavilla riittävästi orgaanista ainetta (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 73).

Kemiallinen hapenkulutus (COD) kuvaa vedessä olevien kemiallisesti hapetettavien orgaanisten aineiden määrää. Sitä voidaan pitää teoreettisen hapenkulutuksen eli orgaanisen aineksen kokonaismäärän mittana. Kemiallisen hapenkulutuksen yksikkö on $mg\ O_2/l\ H_2O$. (Jorgensen 2009, 12.) Täytekappalekolonnireaktori kestää korkeaa orgaanista kuormitusta suhteutettuna sen kokoon. Orgaaninen kuormitus voi olla luokkaa 5 - 15 $kg\ COD/Rm^3vrk$. Tämä perustuu täytekappalekolonnireaktorin orgaanista ainesta poistavien mikrobien suureen määrään ja tiheyteen. (Lotti 2013, 28.)

4.3.5 Viipymäaika

Viipymäaika (HRT, Hydraulic Retention Time) kuvaa sitä aikaa, jonka syöte viipyy reaktorissa. Se määritetään reaktorintilavuuden (Rm^3) ja syöttötilavuuden (m^3/vrk) suhteena, eli jos syöttötilavuutta kasvatetaan, niin viipymäaika pienenee. Viipymäaika kuvataan yleensä vuorokausina. Viipymäajan tulee olla riittävän pitkä, jotta mikrobeja muodostuu enemmän kuin niitä poistuu reaktorista effluen-

tin mukana. Anaerobisten bakteerien jakaantuminen kestää yleensä 10 vuorokautta tai enemmän. (Al Saedi, ym. 2008, 28.)

Sopiva viipymäaika riippuu syötteestä, olosuhteista, reaktorintyypistä ja prosessin tavoitteesta. Mitä helpommin hajoavaa syöte on, sitä lyhyempi viipymä riittää saavuttamaan haluttu hajoamisaste ja sitä vastaava biokaasuntuotto. Esimerkiksi jätevesissä metaanintuottoon osallistuva orgaaninen aine on valmiiksi liuenneena, joten viipymäksi riittää 1 - 2 vuorokautta, kun taas kuitumainen raaka-aine, kuten peltobiomassa vaatii hajotukseen yleensä jopa 30 - 50 vuorokautta. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 74.)

4.3.6 Haihtuvat rasvahapot

Haihtuvat rasvahapot (VFA, Volatile Fatty Acids) ovat lyhytketjuisia (voi-, propioni- ja valeerihappo) ja ne muodostuvat biokaasuprosessissa asidogeneesi ja asetogeneesi vaiheissa. Metanogeenit käyttävät haihtuvia rasvahappoja ravinnokseen. Biokaasuprosessin vakautta voidaan tarkastella haihtuvien rasvahappojen määrän perusteella. (Al Saedi, ym. 2008, 26.) Prosessiin voi kertyä liikaa haihtuvia rasvahappoja, jolloin prosessin pH-arvo laskee ja se inhiboi mikrobien toimintaa. Liiallinen orgaanisen aineen syöttö prosessiin lisää haihtuvien rasvahappojen muodostumista. Metanogeenien tulisi käyttää haihtuvia rasvahappoja heti niiden muodostuttua, jottei niitä pääse kertymään prosessiin. (Latvala 2009, 36.)

4.3.7 Alkaliteetti

Alkaliteetti kertoo biokaasureaktorin puskurikapasiteetista eli sen kyvystä vastustaa pH:n muutosta. Hyvällä puskurikyvyllä saadaan biokaasuprosessi vakaammaksi ja lisäksi se ei ole niin herkkä olosuhteiden muutoksille. Biokaasuprosessin alkaliteetti muodostuu bikarbonaatti-ioneista, jotka ovat tasapainossa hiilidioksidin kanssa. Alkaliteetin yksikkö on mgCaCO₃/l tai mmol/l. (Latvala 2009, 36.) Biokaasureaktorien alkaliteettiarvoissa on suurta vaihtelua syötteestä riippuen välillä 2000 - 13 000 mgCaCO₃/l. VFA:n ja alkaliteetin suhdetta seuraamalla voidaan havaita muutokset prosessissa jo ennen kuin häiriintynyt prosessi vaikuttaa pH-arvoon. Lisäksi suhdeluku kertoo mikrobiologisesta kuormituksesta, sen ollessa liian korkea, mikrobit ovat ylikylläisiä ja päinvastoin. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 65.) Alkaliteettiarvoa suhteutetaan VFA-pitoisuuteen, joten stabiilin hajoamisprosessin varmistamiseksi VFA:n ja alkaliteetin suhteen suositellaan olevan 0,1 - 2,5. VFA:n ja alkaliteetin suhdeluvun optimi riippuu syötteestä ja sen ominaisuuksista. Jos suhdeluku lähtee nousuun se viittaa prosessin häiriintymiseen. (Mattsson, ym. 2011, 14.)

4.4 Ravinteet

Biokaasuprosessin mikro-organismit tarvitsevat ravinteita energian lähteeksi ja rakennusaineiksi. Pääravinteet ovat hiili (C), typpi (N), fosfori (P) ja rikki (S). Entsyymitoiminnan ylläpitämiseksi tarvitaan myös hivenaineita ja vitamiineja. Ravinteiden olisi hyvä tulla luontaisesti syötteen mukana prosessiin, jolloin ravinnelisiä ei tarvita. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 26.)

Mikrobit tarvitsevat typpeä proteiinien tuotantoon. Typpipitoisuus esitetään yleensä suhteessa hiileen, koska se kertoo, kuinka paljon typpeä on saatavilla. (Jorgensen 2009, 12.) Biokaasuprosessissa sopivaksi hiili/typpi -suhteeksi on esitetty 10 - 30, ja optimaaliseksi 15 - 25. Korkea typen määrä suhteessa hiileen, eli matala suhdearvo, voi johtaa prosessia inhiboivaan ammoniakkipitoisuuteen, koska ammoniakki on typen päänajoamistuote. Korkea suhdearvo voi aiheuttaa typen puutetta mikrobitoiminnalle, jolloin tuestä tulee rajoittava tekijä niiden kasvuille. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 26.)

Prosessiin lisätään tarvittaessa hivenaineita mikrobien toimintakyvyn varmistamiseksi. Syötteen sisältämä ainekoostumus voidaan määrittää ja sen perusteella päätellä, mitä hivenaineita prosessiin tarvitsee lisätä. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 27.) Taulukossa 3 on esitetty biokaasuprosessille tärkeitä hivenaineita ja niiden optimaalisia pitoisuuksia.

Taulukko 3. Biokaasuprosessille tärkeitä hivenaineita ja niiden optimaalisia pitoisuuksia (Jorgensen 2009, 12)

Hivenaine	Optimaalinen pitoisuus mg/m³
Barium (Ba)	50
Rauta (Fe)	200
Kalsium (Ca)	30
Koboltti (Co)	5
Magnesium (Mg)	20
Molybdeeni (Mo)	5
Nikkeli (Ni)	10

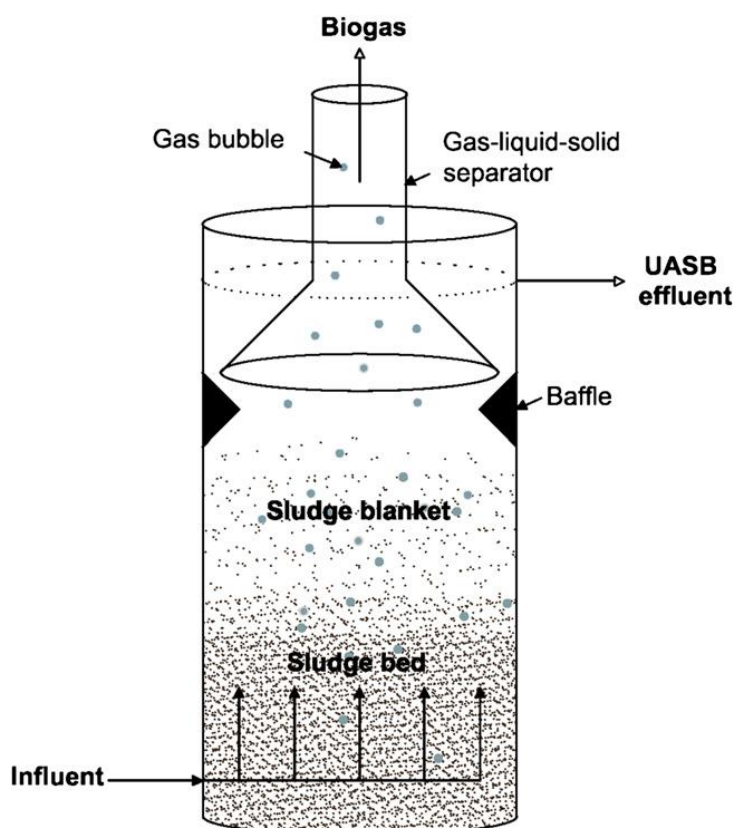
Mikrobit käyttävät hivenaineita muun muassa solujen rakennusaineina ja entsyymitoimintaansa. Biokaasuprosessin eri vaiheiden mikrobit tarvitsevat eri hivenaineita toimiakseen optimaalisesti. Meta-nogeeneille välttämättömiä hivenaineita ovat nikkeli, koboltti, molybdeeni, rauta ja seleeni. Hydrolyysivaiheen mikrobeille välttämättömiä ovat taas sinkki, kupari ja mangaani. Prosessiin tulee lisätä hivenaineita vain, jos niitä ei ole luontaisesti syötteessä, sillä liian suurina pitoisuuksina hivenaineet voivat inhiboida prosessia. (Kymäläinen ja Pakarinen 2015, 27.)

5 TÄYTEKAPPALEKOLONNIREAKTORIN TOIMINTAPERIAATE

Täytekappalekolonnireaktorilla tehtävä jätevesien esikäsittely perustuu orgaanisen aineen muuntamiseksi biokaasuksi. Täytekappalekolonnireaktorilla voidaan vähentää jätevesien käsittelyssä syntyvien lietteiden määrää. Täytekappalekolonnireaktori soveltuu parhaiten suuriin laitoksiin, missä orgaaniset jätteet ja jätevedet käsitellän samassa prosessissa. (Lehto, Salo, Sorvala, Kempainen, Vanhala, Sipilä ja Puumala 2007, 22.) Stora Enson Varkauden tehtaalla käsiteltävät jätevedet sisältävät paljon orgaanista ainetta, joten täytekappalekolonnireaktoria voidaan hyödyntää ennen varsinaista jätevesien käsittelyä.

5.1 Täytekappalekolonnireaktori

Reaktori koostuu kahdesta osasta, kolonnista joka on lieriömäinen tai suorakulmainen ja kaasuneste-kiinteä -erottimesta (kuva 3). Reaktoriin siirretään aluksi metanogeneeniä sisältävä bakteerisiirros reaktorin alaosaan (kuva 3), joka on anaerobista, granulaista ja aktivoitua lietettä eli ymppeä. Kun reaktoriin on siirretty ymppeä ja se on käynnistetty, reaktorissa virtaa jätevesi ylöspäin lietepedissä olevien ja täytekappaleisiin kiinnittyneiden mikrobien läpi. Kevyet ja hajonneet partikkelit peseytyvät pois lietteestä, kun taas raskaammat komponentit säilyvät. Tällöin minimoidaan hienoksi hajonneen lietteen kasvua ja samaan aikaan muodostetaan esilietteestä granuloita eli flokkeja, jotka koostuvat inertistä eli reaktiokyvyttömästä orgaanisesta aineesta, epäorgaanisesta aineesta ja pienistä mikrobipopulaatioista. (Chong, Sen, Kayaalp, Ang. 2012, 4.)



Kuva 3. Täytekappalekolonnireaktorin toimintaperiaate (Chong ym. 2012, 4)

Reaktorin pohjalle muodostuu tiheä biomassa eli lietepeti (sludge bed) (kuva 3). Sen muodostumiseen vaikuttavat reaktorin olosuhteet, jäteveden ominaisuudet sekä bakteerisiirroksen mikrobit. Muodostuminen kestää yleensä 2 - 8 kuukautta. Lietepeti voi olla granulainen tai hiutalemainen ja sillä on hyvät laskeutumisominaisuudet. Lietepeti painuu reaktorin pohjalle, jolloin mikrobit pysyvät reaktorin lietepedissä paremmin, eivätkä poistu reaktorista virtauksen mukana. Lietepedin päälle muodostuu lietepeitto (sludge blanket), jossa on vähemmän biomassaa ja matalimmat hiukkasten asettumisnopeudet. (Chong ym. 2012, 4.)

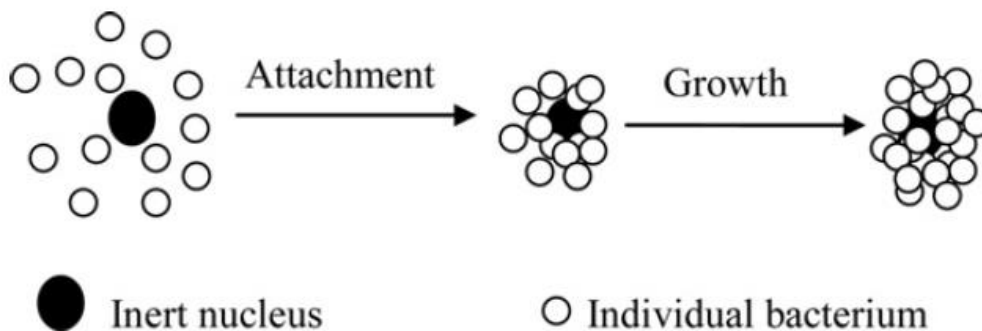
Täytekappalekolonnireaktorin toiminta perustuu biomassasta muodostuneeseen lietepetiin, jonka läpi jätevesi ohjataan, jolloin biologinen puhdistusprosessi tapahtuu. Influentti syötetään reaktorin alaosaan lietepetiin, jossa mikrobit hajottavat jäteveden orgaanista ainetta. Biologista hajoamista tapahtuu myös lietepeittoalueella. Liukoiset orgaaniset yhdisteet muuttuvat mädätysprosessissa biokaasuksi eli pääasiassa metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Muodostunut biokaasu ja liete, joka on jäänyt kaasukuplien sisään, nousevat ylöspäin kohti reaktoriin upotettua kaasu-neste-kiinteä -erotinta (kuva 3). Kuvan 3 ohjauslevyt (baffle) pyrkivät estämään elinkelpoisen bakteeraiineksen ja kelluvan rakeisen lietteen poistumisen reaktorista effluentin mukana, ohjaamalla ne takaisin reaktioalueelle. Ohjauslevyt ohjaavat myös kaasukuplia kohti erotinta, jolloin saadaan aikaan parempi sekoittuminen ja näin vähennetään vaahdon muodostumista reaktorissa. Täytekappalekolonnireaktorissa on myös pumpuilla toteutettu sisäinen kierto, jolla jätevettä kierrätetään lietepedin läpi uudelleen. Sisäinen kierto lisää orgaanisen aineen poistoa, koska jätevesi on paremmin kontaktissa lietepedissä olevien mikrobien kanssa. Lisäksi sisäisellä kierrolla vähennetään jäteveden mukana tulevien suspendoituneiden kiintoaineiden akkumulaatiota. Sisäinen kierto kasvattaa myös puskurikapasiteettia reaktorin sisällä, silloin kun metanogeenien aktiivisuus on korkea luokkaa. Tämä johtuu hiilidioksidin, bikarbonaatin ja ammoniakkin noususta. Käsittely jätevesi poistetaan reaktorista (effluent) ylivuotona. (Chong ym. 2012, 4; Lotti 2013, 29 - 30.)

5.2 Granulaatio

Anaerobinen liete, joka tarjoaa kiinnityskohdan mikroflooralle eli pieneliökasvustolle reaktorissa, on oleellinen osa täytekappalekolonnireaktorin toimintaa. Se mahdollistaa jatkuvan vuorovaikutuksen jäteveden ja lietteeseen kiinnittyneiden mikrobien välillä, ja näin mahdollistaa jäteveden tehokkaan käsittelyn. Reaktorin käsittelytehokkuuteen vaikuttavat suoraan mikrobien elinvoimaisuus, lietepartikkeleiden koko, muoto ja tiheys. Lietteen granulat tukevat aktiivisia biofilmejä, tarjoavat tarpeellista nostetta ja vakautta, jotta saadaan aikaan hyvä kontakti nesteen ja granuloiden välille. (Abbasi ja Abbasi 2012, 3.)

Granulaatio eli rakeiden muodostuminen alkaa heti, mutta voi olla alkuun hidasta. Granulaatio edellyttää anaerobiprosessille sopivia olosuhteita ravinteiden saatavuuden ja ylösvirtausnopeuden sekä pH:n suhteen. Vähitellen yksittäiset bakteerit kiinnittyvät ytimeen (attachment) ja muodostavat palloomaisia ryhmittymiä (kuva 4). Näin muodostuneita ryhmittymiä kutsutaan granuloiksi, joiden koko vaihtelee välillä 0,1 - 5 mm ja ne omaavat paremman leikkauslujuuden kuin hiutalemainen liete. Granuloitunut liete omaa paremmat laskeutumisominaisuudet, joten se kestää korkeampaa kuormi-

tusnopeutta, joka parantaa reaktorin tehokkuutta. Lisäksi granulat voivat kestää hajoamatta kaasun ja nesteen leikkausrasitusta sekä tarjota vakaammat olosuhteet prosessin häiriöitä ja myrkyjä vastaan kuin yksittäiset mikro-organismit. (Abbasi ja Abbasi 2012, 3 - 4.)



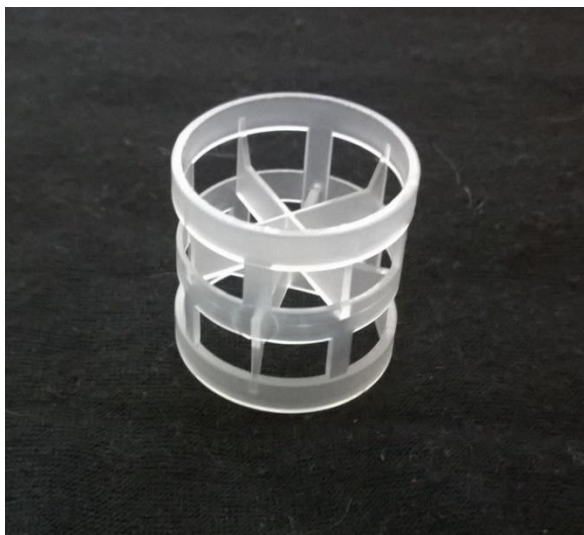
Kuva 4. Granulaatio eli rakeen muodostuminen bakteerien kiinnittyessä ytimen ympärille (Abbasi ja Abbasi 2012, 3)

Granulan tulisi sisältää samankaltaisia kerroksia, joilla on erilaisia bakteeri trofia ryhmiä (tuottajat, kuluttajat ja hajottajat). Jokaisen näistä bakteeriryhmistä odotetaan hoitavan oman osansa jäteveden hajottamisessa sekä biomassan ja solunulkopuolisten polymeeristen aineiden tuottamisessa lähiympäristöönsä. Solunulkopuoliset polymeerit vahvistavat biofilmiä toiminnallista ja rakenteellista kokonaisuutta. Metanogeenit ovat avainasemassa granulaation järjestymisessä, koska nämä rihmaiset mikro-organismit muodostavat kasauman, jotka toimivat granulaation käynnistäjänä. Tätä seuraa asetogeeisten bakteerien ja metanogeenien kolonisaatio, joka johtaa kerroksittaiseen granulaatioon (kuva 4) (growth). (Abbasi ja Abbasi 2012, 4.)

Granulaatioon vaikuttavat samat tekijät kuin biokaasuprosessiin eli prosessin olosuhteet, lämpötila, pH ja alkaliteetti. Granuloiden koostumukseen vaikuttaa lämpötila, sillä eri mikrobit saavuttavat optimaalisen kasvunopeutensa eri lämpötiloissa, mutta nopeat lämpötilan muutokset voivat aiheuttaa granuloiden hajoamisen. Lisäksi neutraali pH lisää granulaatiota. Orgaanisen kuormituksen ja viipymäärän optimoinnilla, voidaan vaikuttaa granulaatioon positiivisesti. Myös oikeat ravinteet lisäävät granulaation tehokkuutta, esimerkiksi kalsium ja rauta voivat tehostaa sitä. (Abbasi ja Abbasi 2012, 9.)

6 LABORATORIO MITTAKAAVAN KOEAJON JÄRJESTELYT JA NIIDEN TOTEUTUS

Opinnäytetyössä selvitettiin laboratoriomittakaavan täytekappalekolonnireaktorin toimintaa ja mikrobiologiaa sekä RCF-sameasuodos jäteveden soveltuvuutta prosessin syötteeksi. Laboratorio mittakaavan täytekappalekolonnireaktori on rakennettu Savonia-ammattikorkeakoulun Microkadun kampuksen jätevesilaboratorioon. Täytekappalekolonnireaktori on 2-osainen eli se koostuu kahdesta reaktorista, reaktorista 1 ja reaktorista 2. Reaktorit 1 ja 2 ovat ominaisuuksiltaan samanlaiset. Molemmissa reaktoreissa on kaasu-neste-kiinteä -erottimet, sisäinen kierto pumpulla, reaktorin ulkoinen lämmitys ja nesteen tehollinen tilavuus 27 litraa. Täytekappaleet (kuva 5) on sijoitettu reaktoreihin Liitteen 1 mukaisesti (rasteroitu alue), siten että pohjalle on jätetty tilaa lietteen muodostumiselle. Täytekappaleet ovat polypropeeni muovia. Liitteessä 1 on esitetty täytekappalekolonnireaktori kaavakuvana.



Kuva 5. Reaktorissa käytettävä muovinen täytekappale (Koskenlahti, 2017)

Kuvassa 6 on esitetty laboratorio mittakaavan täytekappalekolonnireaktori, jolla koeajo toteutettiin. Influentti ja effluenttitankeet ovat tilavuudeltaan 100 litran säiliöitä. Influenttitankeissa on sekoitus, jotta prosessiin saataisiin syötettyä mahdollisimman tasalaatuista syötettä ja kiintoaine ei laskeudu säiliön pohjalle. Influenttina käytettiin RCF-sameasuodos jätevettä, joka sisältää jonkin verran kiintoainetta. Influenttitankeiden sekoituksella vähennetään myös syöttöletkun tukkeutumista, sillä muuten kiintoaineet painuisivat tankin pohjalle ja lisäisivät tukkeutumisriskiä. Influenttitankeet täytettiin kolme kertaa viikossa, sillä influenttien kulutus oli prosessin ylösajon jälkeen 27 litraa vuorokaudessa. Influenttitankeet täytettiin suuremmasta 1 000 lirtan säiliöstä uppopumpun avulla. Influenttia haettiin 1 000 lirtan säiliöön noin kolmen viikon välein Stora Enso Oyj:n Varkauden tehtaan kierrätyskuitulaitokselta. Influenttien syöttöä ei voitu järjestää suoraan 1 000 lirtan kontista tilan puutteen vuoksi, joten influenttia jouduttiin lisäämään 100 litran säiliöön.



Kuva 6. Laboratorio mittakaavan tätekappalekolonnireaktori laitteisto(Koskenlahti, 2017)

Prosessin pH:n säätö tapahtui säätämällä influenttin pH:ta, nostamalla sitä natriumhydroksidilla. Prosessin ravinteiden ja hivenaineiden syöttö tapahtui lisäämällä ne suoraan influenttiin. Ravinteiden ja hivenaineiden määrä laskettiin syötteen sisältämien ainemäärien mukaan, siten että jokaista hivenainetta olisi prosessissa optimimäärä. Koeajon aikana prosessiin lisättiin alumiinia (Al), kuparia (Cu), kobolttia (Co), sinkkiä (Zn), molybdeeniä (Mo), mangaania (Mn) ja rautaa (Fe).

Influentti syötettiin reaktorin 1 puoleen väliin influenttitankista pumpun avulla. Reaktoreissa oli sisäinen kierto, joka oli järjestetty alipainepumpulla, jolla influenttia pumpattiin reaktorin yläosasta reaktorin alaosaan. Näin saadaan aikaan influenttin liike reaktorissa alhaalta ylös, jolloin influentti saadaan hyvään kontaktiin lietepedissä olevien mikrobien kanssa. Samalla saadaan aikaan sekoitusta, jolla autetaan lietepetiin muodostuneiden kaasukuplien irtoamista, ohjataan influenttia lietepetiin koko ajan uudelleen ja estetään suspendoituneiden kiintoaineiden akkumulaatiota. Sisäisellä kierrolla saadaan prosessiin tehokkuutta ja vakautta. Reaktorissa muodostuneet kaasukuplat kerätään talteen kaasupusseihin reaktorin yläosassa olevalla kaasu-neste-kiinteä -erottimella. Reaktorissa 1 käsittely

materiaali poistetaan ylivuotona reaktorin 2 puoli väliin. Reaktori 2 toimii samalla tavalla kuin reaktori 1 ja reaktorista 2 käsitelty materiaali poistuu ylivuotona effluenttitankkiin.

6.1 Ylösajo

Täytekappalekolonnireaktorin ylösajo aloitettiin 7.9.2016. Reaktoriin 1 siirrettiin 5 lirtaa bakteerisiir-
rosta eli ympästä ja reaktoriin 2, 3 litraa. Ympin tarkoituksena on tuoda reaktoriin tarvittava mikrobi-
kanta, jolla anaerobinen prosessi saadaan toimimaan. Reaktorit täytettiin influentilla, joka oli RCF-
sameasudon jätevettä, johon oli lisätty hivenaineita. Kun reaktorit oli täytetty, laitettiin sisäinen kier-
to ja lämmitys päälle vajaan viikon ajaksi. Tämän jälkeen prosessi ajettiin hitaasti ylös neljän viikon
aikana. Tarkoituksena oli antaa riittävästi aikaa granulaatiolle ja mikrobien kasvulle, jotta prosessin
olosuhteet saataisiin vakaiksi ja mikrobeja olisi riittävästi hajottamaan syötteen orgaanista ainetta,
kun varsinainen koeajo aloitetaan.

19.9.2016 käynnistettiin syöttö reaktoriin 1. Liittessä 2 on kuvattu ylösajo päivä päivältä. Syöttöä
nostettiin vähän kerrallaan joka arkipäivä neljä viikonajan. Hitaalla syötön kasvattamisella prosessiin
luodaan vakaat olosuhteet mikrobien kasvun kannalta. Liian nopea syötön lisääminen voi hidastaa
mikrobien kasvua sekä aiheuttaa prosessin happamoitumisen, jonka seuraksena prosessi pysähtyy.
Prosessin optimaaliseksi viipymäajaksi oli laskettu 24 tuntia, joka tarkoittaa, että prosessiin syötet-
tiin 27 litraa influenttia päivässä. Neljän viikon syötön noston jälkeen prosessi oli ylösajettu, ja pro-
sessin syöttö pidettiin optimaalisena joulukuun puoleen väliin asti. Influentti syötettiin prosessiin si-
ten, että pumpattiin influenttia reaktoriin 20 minuutin ajan joka toinen tunti. Prosessin kannalta jat-
kuva syöttö olisi parempi, mutta pumpun pienet kierrokset olisivat lisänneet syöttöhäiriöitä.

Joulukuussa pidettiin joulutauko koeajoviikolla 15, jonka aikana prosessiin syötettiin vain 6,25 lirtaa
jätevettä päivässä. Tarkoituksena oli pitää prosessin mikrobit hengissä, jotta tammikuussa voidaan
suorittaa prosessin ylösajo nopeammin. Tammikuussa prosessi ajettiin ylös kahdessa viikossa.
Tammikuun lopulla huomattiin vähäinen kaasun tuotanto heikosta influentin COD-pitoisuudesta joh-
tuen ja päätettiin kokeilla nostaa syöttöä 30 litraan vuorokaudessa. Syötön nostolla oli positiivinen
vaikutus biokaasun tuottavuuteen, ja COD reduktio pysyi samalla tasolla, joten syöttö pidettiin 30 lit-
rassa koeajon loppuun asti.

6.2 Anaerobisen prosessin ylläpito ja seurattavat parametrit

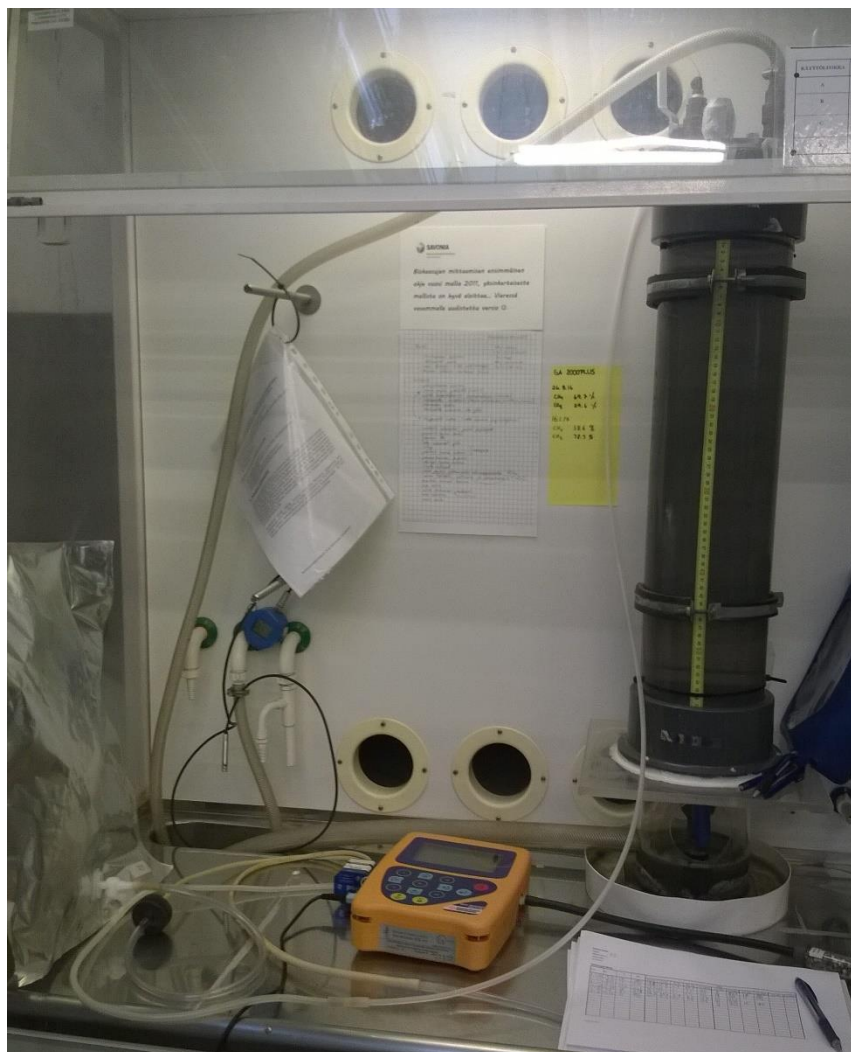
Täytekappalekolonnireaktorin anaerobisesta prosessista tehtiin analyysyjä viikottain, jotta mahdolli-
set prosessin muutokset huomattaisiin heti ja niihin voitaisiin reagoida mahdollisimman nopeasti.
Näin minimoidaan prosessille vahingolliset muutokset ja saadaan prosessi palautumaan normaaliksi
mahdollisimman nopeasti. Taulukossa 4 on kuvattu, mitä parametrejä prosessista seurattiin ja mitä
menetelmää analyysseissä käytettiin. Lisäksi tehtiin partikkelijakauma määrittäykset jokaisesta RCF-
sameasuodosta jätevesi erästä, joka haettiin Stora Enson Oyj:n Varkauden tehtaalta.

Taulukko 4. Prosessista seurattavat parametrit ja niiden menetelmät tai käytetty laitteisto

Parametri	Menetelmä tai laitteisto
COD, mg O ₂ /l	HACH LCK 014/514/914
TOC, mg/l	SFS 1484:1997 Vesianalyysi
Alkaliteetti määrittäminen, mg CaCO ₃ /l	Talon sisäinen menetelmäohje
VFA määrittäminen, mg CH ₃ COOH/l	Talon sisäinen menetelmäohje
Kaasupitoisuus	GA2000PLUS analysaattori
Sulfaatti, mg/l	HACH 8051
Fosfaatti ja kokonaisfosfori, mg/l	HACH LCK 349
Ammonium typpi, mg/l	HACH Nessler 8038
pH	WTW pH 3210 käsimittarilla
Partikkeli jakauma	PAMAS S4031

Prosessista otettiin näytteet analyysijä varten influentista, reaktorin 1 ja reaktorin 2 puolivälistä sekä effluentista. Näytteistä tehtiin taulukon 4 osoittamia määrittämyksiä. COD, TOC (Total Organic Carbon) ja pH määrittämykset tehtiin prosessin jokaisesta nesteestä kolme kertaa viikossa. Influentista, reaktorista 1 ja reaktorista 2 otetuista näytteistä tehtiin alkaliteetti, sulfaatti, fosfaatti, kokonais fosfori ja ammonium typpi määrittämykset kerran viikossa. VFA määrittämykset tehtiin pelkästään reaktoreista 1 ja 2.

Kaasupitoisuus mitattiin Savonia-ammattikorkeakoulun pilot-halliin rakennetulla kaasumittaus laitteistolla (kuva 7). Kaasun pitoisuudet mitataan GA2000PLUS analysaattorilla, joka mittaa biokaasusta metaanin, hiilidioksidin ja hapen pitoisuudet sekä biokaasun sisältämät muut kaasut yhtenä pitoisuus arvona, mutta rikkivedyn ppm-pitoisuutena. Pitoisuudet esitetään tilavuusprosentteina. Muodostuneen kaasun määrä saatiin mitattua, kun kaasu imettiin kuvan 7 oikeassa laidassa olevalla tilavuudenmittasäiliöllä ja mitattiin, kuinka paljon vedenpinta säiliössä laski. Kaasun määrä saatiin laskeamalla, siten että vedenpinnan korkeuden muutos kerrottiin säiliön pohjan pinta-alalla.



Kuva 7. Kaasujen mittaus laitteisto (Koskenlahti, 2017)

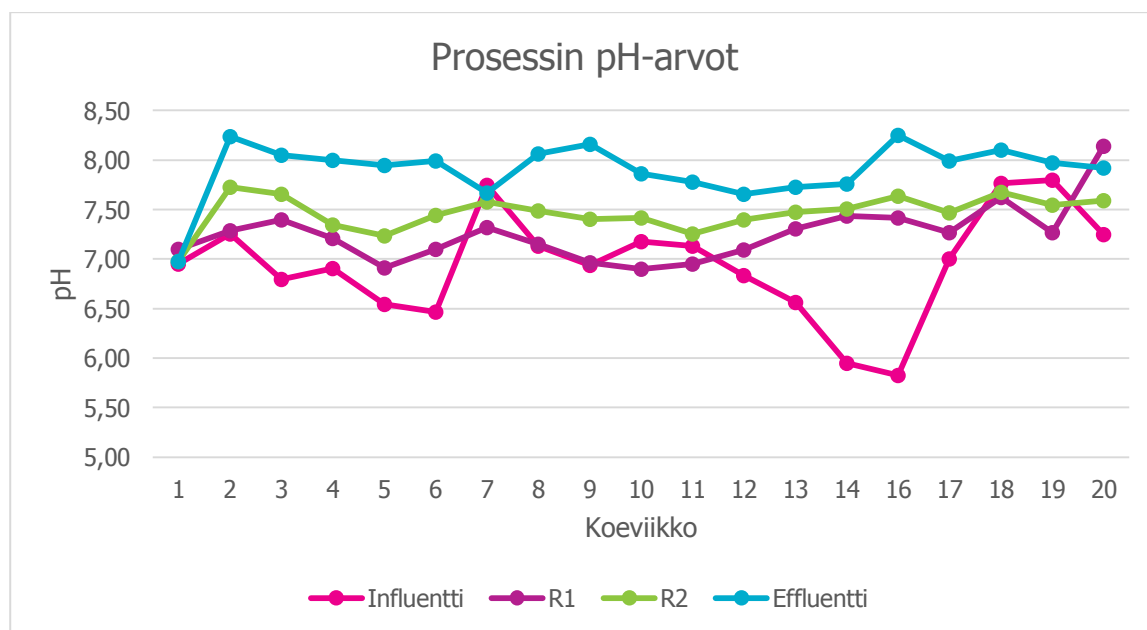
Täytekappalekolonnireaktorin prosessin olosuhteita seuraattiin myös ulkoisesti. Reaktorit olivat katamattomia, joten niiden nestepintaan muodostuvia seoksia pystyttiin seuraamaan. Reaktoreiden nestepinnalle muodostui kiinteää seosta, joka poistettiin, ettei se tukkisi ylivuotoputkia. Ylivuotoputkia puhdistettiin noin kuukauden välein, ettei niihin kertynyt liikaa kiintoaineita. Reaktoreiden lämpötilaa säädettiin automaattisesti ja lämpötilaa seurattiin ulkoisten mittareiden avulla. Reaktoreiden lämpötila pidettiin 37 °C:ssa. Lämpötila vaihteluja syntyi reaktoriin 1 silloin, kun prosessiin syötettiin influenttia, sillä influentti pidettiin huoneen lämmössä, eikä sitä esilämmitetty ennen prosessia. Reaktorin 1 lämpötila nousi kuitenkin nopeasti takaisin 37 °C, eikä syöttö tavalla ollut suurta vaikutusta prosessin olosuhteisiin.

Reaktoreihin muodostuu lietettä anaerobisen prosessin seuraksena ja liiallinen liete inhiboi prosessia. Lietettä poistettiin reaktorista 1 silloin kuin näyte sisälsi paljon lietettä. Liete kerättiin talteen ja punnittiin, jotta tiedetään, paljonko sitä on poistettu prosessista. Liete säilöttiin jatkotutkimuksia varten. Jatkotutkimuksissa lietteestä selvitetään sen sisältämien yhdisteiden ja aineiden määrät sekä lietteeseen suspendoituneen hiilen määrä. Lietettä poistettiin ainoastaan ensimmäisen kerran joulukuussa ja sitä poistettiin keskimäärin kilo kerrallaan. Koeajon aikana lietettä poistettiin yhteensä noin 10 kiloa. Reaktoriin 2 muodostui lietettä vain vähän, eikä sitä tarvinnut koeajon aikana poistaa.

7 TULOKSET

Täytekappalekolonnireaktorin anaerobista prosessia seurattiin opinnäytetyössä 20 viikon ajan. Koeajo jatkuu yhteensä 26 viikkoa. Tuloksia saatiin jokaiselta koeajoviikolta lukuun ottamatta joulutaukoa koeajoviikkoa 15. Saadut tulokset kirjattiin excel-taulukoon, jossa ne ovat helposti käsiteltävissä ja analysoitavissa. Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää koeajon loppuun saattamisessa sekä varsinaisessa tehdas pilotoinnissa myöhemmin keväällä 2017.

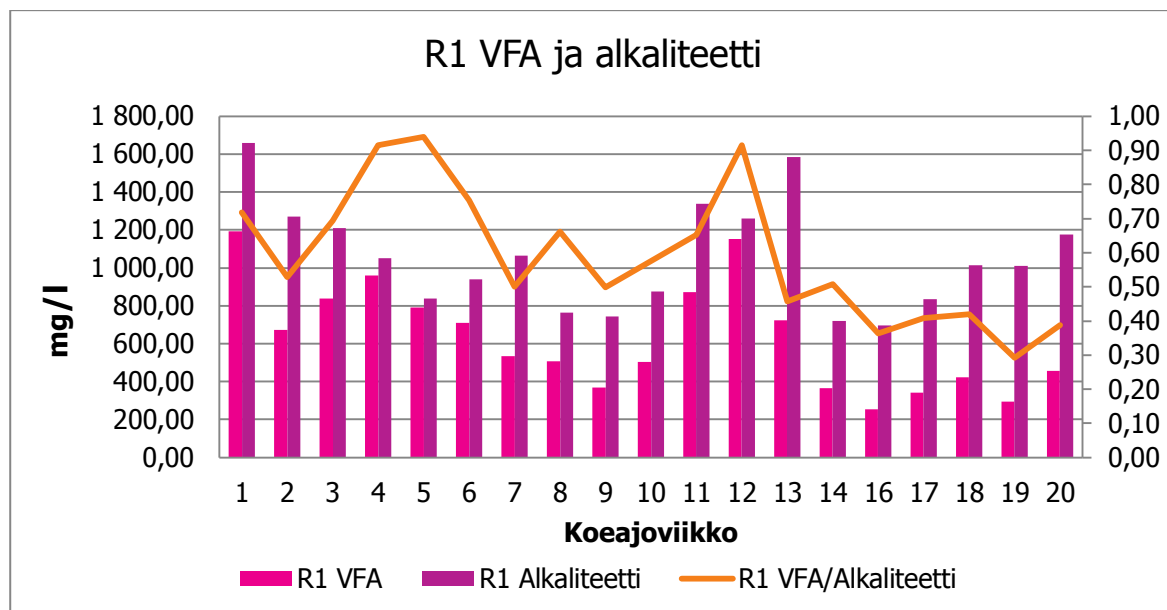
Prosessin olosuhteet pysyivät hyvin tasapainossa, vaikka syötteen laatu vaihteli koeajon aikana ja syöttöhäiriöitä esiintyi silloin tällöin. Prosessista seurattiin pH:ta kolme kertaa viikossa, jotta voidaan arvioida prosessin tilaa ja reagoida mahdollisiin muutoksiin. Kuviossa 3 on koeajon pH-arvojen mitausten viikkokohtaiset keskiarvo tulokset. pH-arvot pysyivät reaktoreissa hyvällä tasolla eikä suuria heilahduksia tullut koeajon aikana. Biokaasuprosessin pH-arvon tulisi olla 7 - 8. Kuviossa 3 nähdään, että molempien reaktoreiden (R1 ja R2) pH-arvot ovat pysyneet lähes koko koeajon ajan välillä 7 - 8. Vaikka influenti pH-arvo on laskenut alle kuuden viikoilla 14 ja 16, se ei ole vaikuttanut reaktoreiden pH-arvoon, joka kertoo prosessin vakaudesta.



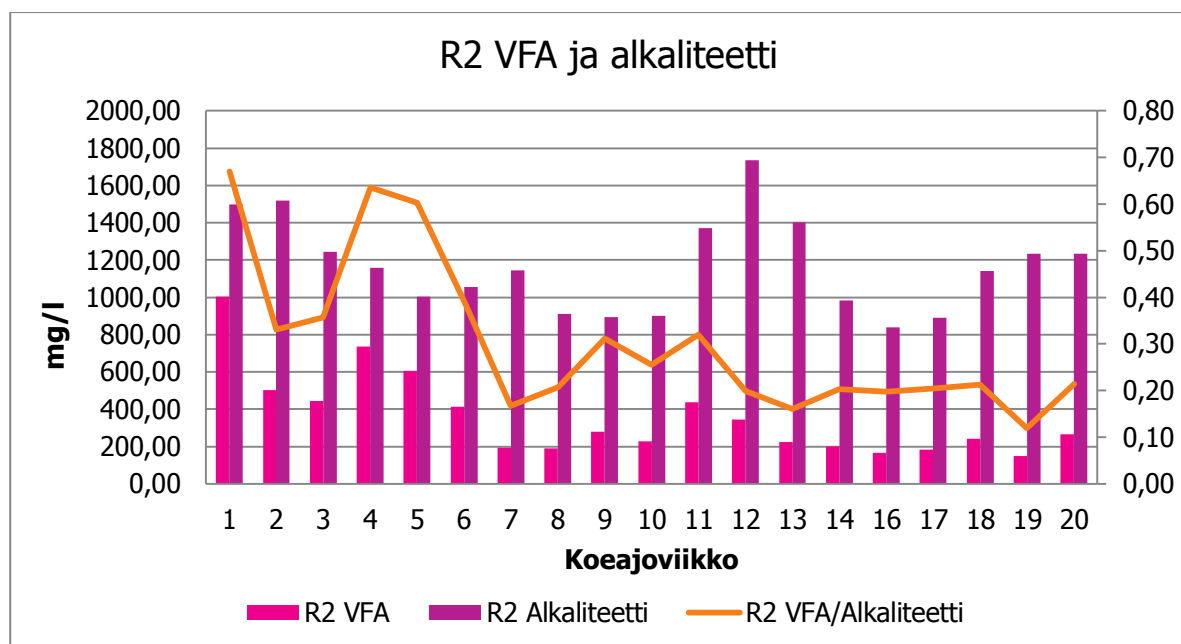
Kuvio 3. pH-arvot prosessin eri vaiheista koko koeajon ajalta

Koeajon aikana seurattiin myös reaktoreiden alkaliteetti ja VFA arvoja. Alkaliteetti kertoo prosessin puskurikapasiteetista eli sen kyvystä vastustaa pH:n muutosta. Hyvällä puskurikyvyllä saadaan prosessi vakaammaksi, eikä prosessi ole niin herkkä olosuhteiden muutoksille. VFA kuvaa prosessissa olevien haihtuvien rasvahappojen määrää. VFA:n ja alkaliteetin suhdearvoa seuraamalla voidaan huomata prosessin muutokset ennen kuin häiriintynyt prosessi on vaikuttanut pH-arvoon. Reaktorin 1 VFA:n ja alkaliteetin arvot heilahtelivat enemmän (kuvio 4) kuin reaktorin 2 (kuvio 5), koska reaktoriin 1 syötetyn influentin laatu vaihteli koeajon aikana. Reaktoriin 2 menevä syöte on biokaasuprosessin läpikäynyt, jolloin sen sisältämä orgaaninen aine on huomattavasti alhaisempi, jolloin syöte

pysyy tasalaatuisempuna. Molempien reaktoreiden olosuhteet pysyivät koeajon aikana hyvänä ja vaikka heilahduksia tuli, niin prosessi korjasi tilanteen itse, eikä toimenpiteisiin tarvinnut ryhtyä.



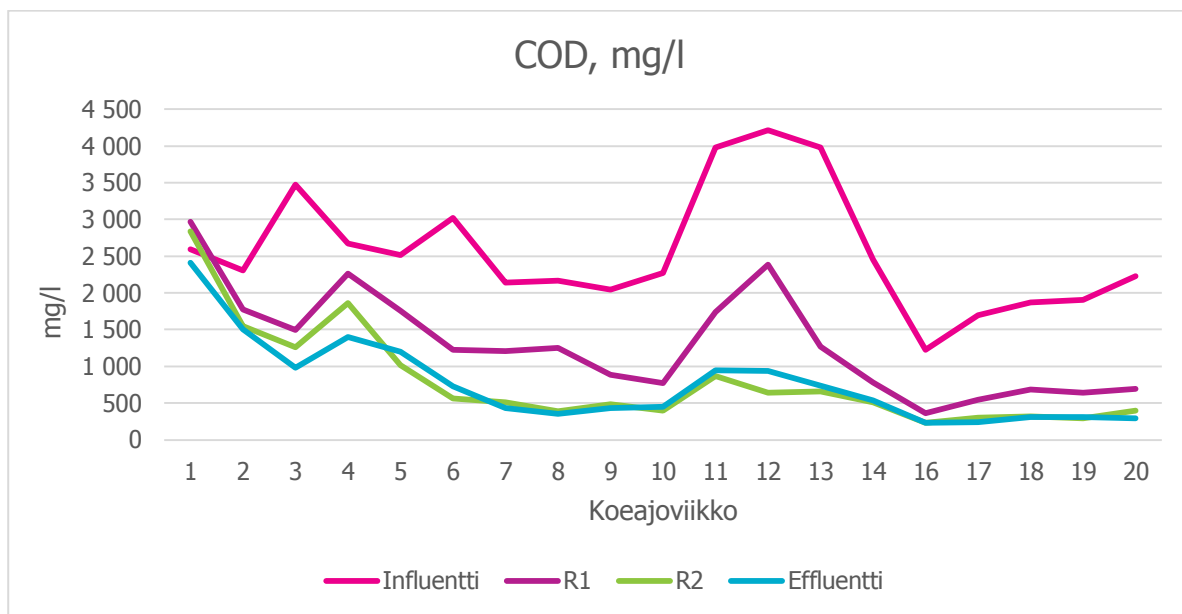
Kuvio 4. Reaktorin 1 VFA ja alkaliteetti tuloksia sekä niiden suhdearvo



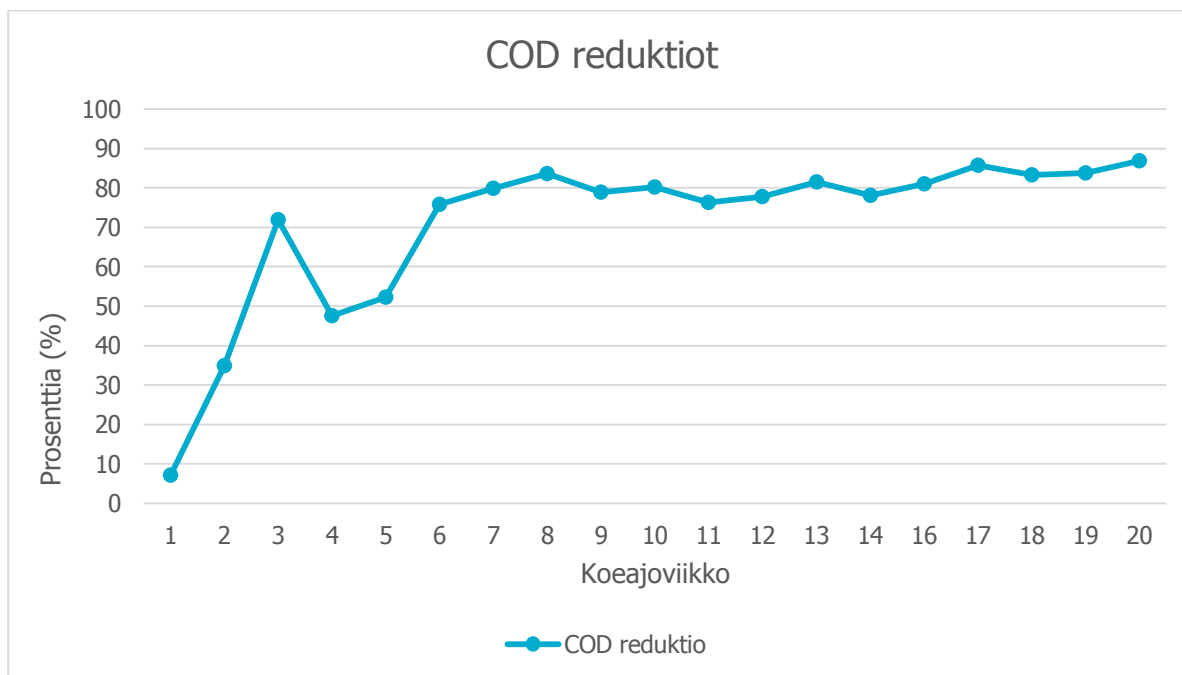
Kuvio 5. Reaktorin 2 VFA ja alkaliteetti tuloksia sekä niiden suhdearvo

Influentista ja molemmista reaktoreista seurattiin myös sulfaatin, fosfaatin, kokonaisfosforin ja ammonium typhen määrää. Sulfaatin mittaus lopetettiin viiden viikon seurannan jälkeen, koska influentti sulfaattipitoisuus oli alhainen ja mikrobit käyttivät rikin ravintonaan, eikä sulfaattia esiintynyt enää reaktoreissa. Kokonaisfosfori sisältää kaiken näytteessä olevan fosforin riippumatta missä muodossa se esiintyy ja fosfaatin tuloksiin on huomiota happiatomien massat. Saaduista tuloksista selvisi, että kokonaisfosforin, fosfaatin ja ammonium typhen määrät nousivat, kun reaktoriin oli muodostunut paljon lietettä.

Koeajon aikana COD reduktio oli erittäin hyvä, influentin COD pitoisuudet vaihtelivat paljon koeajon aikana. Kuviossa 6 on esitetty koeajoviikkokohtaiset keskiarvotulokset COD pitoisuudesta prosessin eri vaiheissa. Kuviossa 6 huomataan, että COD poisto on pysynyt tehokkaana, vaikka influentin COD arvo on vaihdellut, sillä effluentin COD arvo pysyy alle 1 000 mg/l koko koeajon ajan lukuun ottamatta ylösajoa. Kuviossa 7 on esitetty koeajon COD reduktiot koeajoviikko keskiarvotuloksista. Ensimmäisten viikkojen aikana reduktio on heikompi, koska prosessin ylösajo kesti ensimmäiset 4 viikkoa. Kun prosessin ylösajo oli valmis, COD reduktio vaihteli välillä 75 - 85 % (kuvio 7).

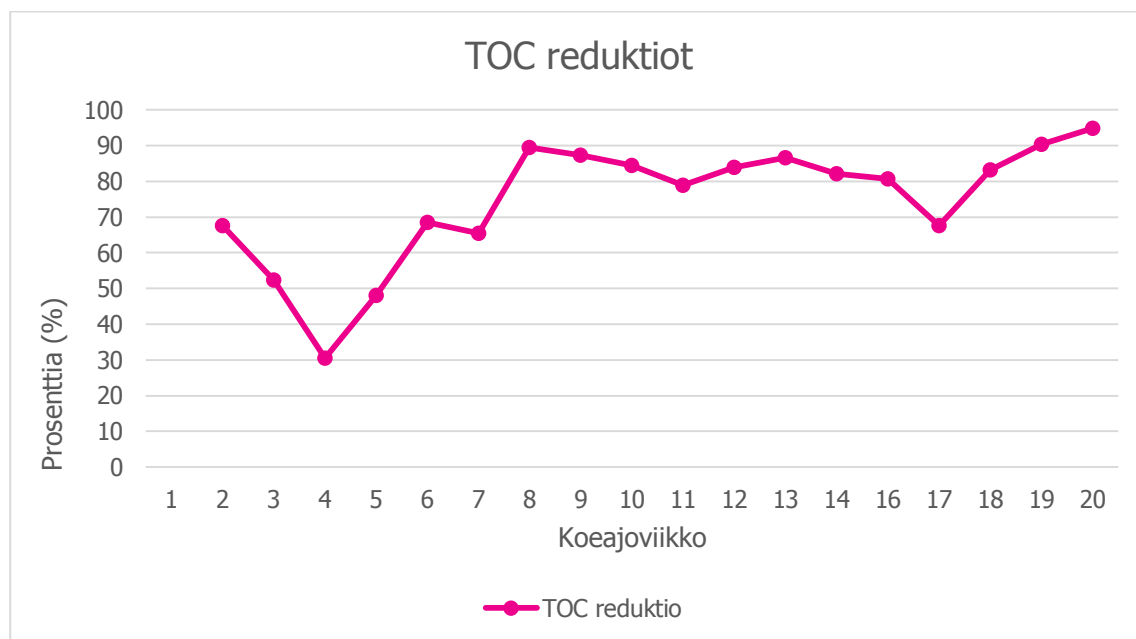


Kuvio 6. Prosessin eri vaiheiden COD määriä koko koeajon ajalta



Kuvio 7. COD reduktiot koko koeajon ajalta

Proessista seurattiin myös kokonais orgaanisenhiilen määrää (TOC) ja sen reduktiota. TOC määrittelyt aloitettiin toisella koeajoviikolla ja ne tehtiin SFS 1484:1997 VESIANALYYSI standardin mukaan. Kuvio 8 nähdään, että TOC reduktiot ovat pysyneet tehokkaalla tasolla ylösajon jälkeen.



Kuvio 8. TOC reduktiot koko koeajon ajalta

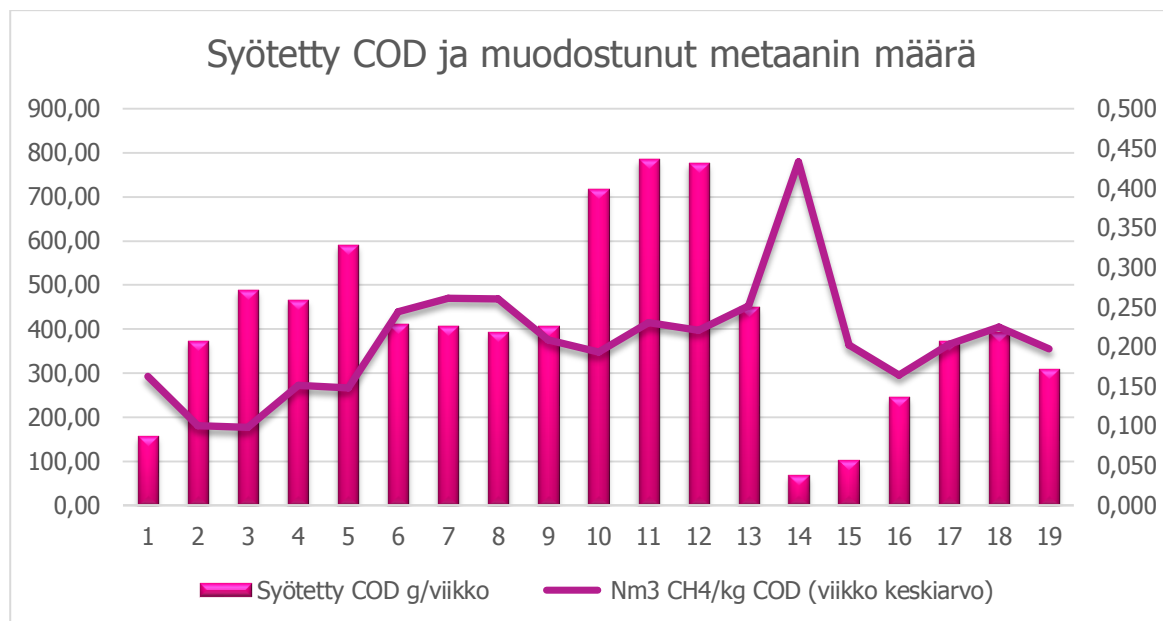
Prosessi tuotti hyvin biokaasua koko koeajon ajan, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Biokaasun tuottoon vaikuttivat RCF-sameasuodos jäteveden laatu ja influenttiin syöttöhäiriöt. Influentti sisälsi COD:ta koeajon alussa 2000 - 3500 mg/l (kuvio 6). Koeajoviikoilla 11 - 14 influentti sisälsi huomattavasti enemmän COD:ta, noin 4 500 mg/l ja näinä viikkoina biokaasun tuotanto oli huipussaan. Joulutauon jälkeen influentti on sisältänyt vähän COD:ta, mikä on vähentänyt biokaasun tuotantoa. Taulukossa 5 on esitetty biokaasun koostumus koko koeajon tulosten keskiarvona.

Taulukko 5. Tuotetun biokaasun koostumus koeajon tulosten keskiarvona

Kaasu	Pitoisuus
Metaani (CH ₄)	75 %
Hiilidioksidi (CO ₂)	19,4 %
Happi (O ₂)	0,6 %
Rikkivety (H ₂ S)	0,4 %
Muut kaasut	4,6 %

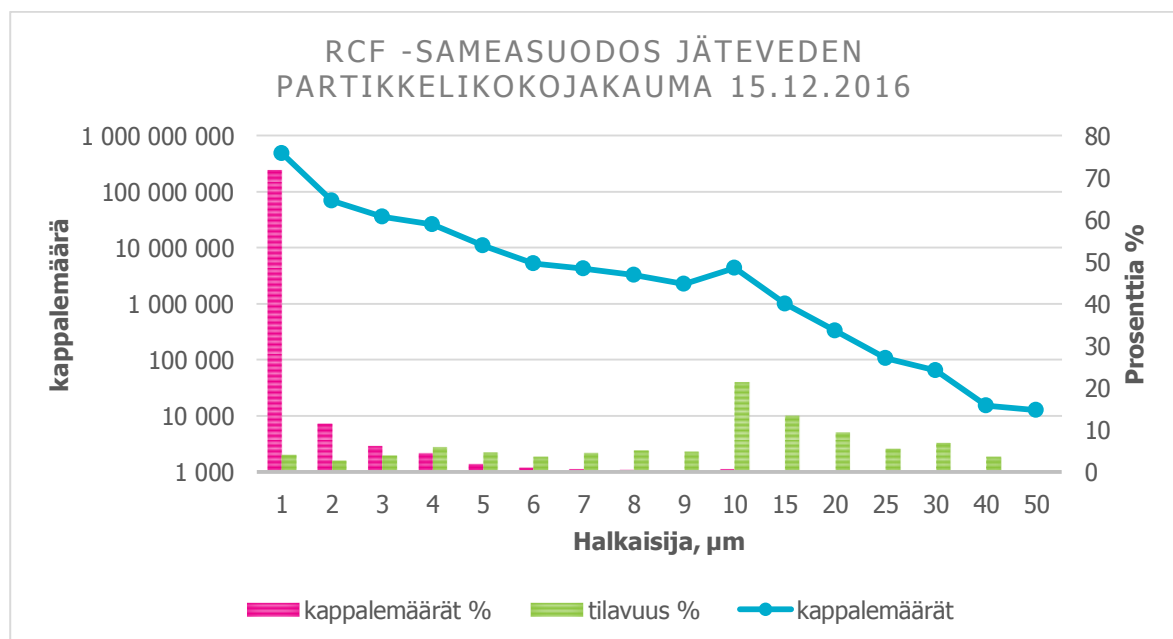
Tuotettu biokaasu on hyvin metaanipitoista, mikä tarkoittaa biokaasun korkeaa tehollista lämpöarvoa ja jäteveden korkeaa hiilipitoisuutta. Saatujen keskiarvo tulosten perusteella muodostuneen biokaasun lämpöarvo on 7,5 kWh/m³. Prosessista tehtyjen mittausten perusteella laskettiin prosessin metaanin tuotanto potentiaali. Kuviossa 9 on esitetty koeajo viikkojen COD:n syöttö grammoina ja kuinka paljon metaania muodostuu kilogrammasta COD:ta. Kuviossa 9 on viikoilla 14 ja 15 suurta virhettä joulutauosta johtuen, koska silloin mittauksia ei tehty lainkaan ja laskuissa jouduttiin käyttämään paljon approksimaatiota. Prosessi tuotti metaania keskimäärin 0,2 Nm³/kg COD eli yhdestä

kilosta COD:ta saatiin 0,2 m³ metaania. Viikon aikana tuotettiin siis keskimäärin 0,09 m³ metaania eli 90 litraa. Koko koeajon aikana metaania tuotettiin noin 1,73 m³.



Kuvio 9. Koeajon aikana syötetyt COD määrät ja metaanin tuotanto määrät kiloa COD:ta kohti

Prosessista mitattiin myös RCF-sameasuodos jätevesi erien partikkelikokojakaumat. Partikkelikokojakauma määrittymiset tehtiin PAMAS S4031 laitteistolla. Kuviossa 10 on esitetty yhden RCF-sameasuodos jätevesi erän mittaustulokset. Tuloksista saatiin selville, että RCF-sameasuodos sisältää paljon pieniä 1 µm halkaisijaltaan olevia partikkeleita. Pienten partikkeleiden osuus kaikista partikkeleista on noin 72 %. Mielenkiintoinen tulos tuli tilavuus prosentteja verratessa, sillä RCF-sameasuodos jätevesi sisälsi tilavuudeltaan eniten 10 µm halkaisijaltaan olevia bakteereja. Noin 21 % RCF-sameasuodos jäteveden partikkelien tilavuudesta muodostui 10 µm halkaisijaltaan olevista partikkeleista.



Kuvio 10. 15.12.2016 otetun RCF-sameasuodoksen partikkelikokojakauma

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Täytekappalekolonnireaktorin anaerobista prosessia seurattiin opinnäytetyössä 20 viikon ajan. Tavoitteena oli saada pitkäaikainen koeajo, jolloin päästään arvioimaan jäteveden ominaisuuksien vaihtelun vaikutusta orgaanisen kuorman leikkautumiseen. Lisäksi tavoitteena oli saada kokemukseräistä tietoa laitteiston toiminnasta, mikrobiologiasta ja jäteveden ominaisuuksien vaihtelusta sekä tuottaa mahdollisimman paljon biokaasua.

Täytekappalekolonnireaktorin ylösajo onnistui hyvin ja prosessi saatiin suunnitelmien mukaan ajettua ylös. Joulutauolla prosessi tuotti vähemmän biokaasua, koska syöttökin oli vähäistä, mutta prosessi saatiin ajettua ylös hyvin joulutauon jälkeen. Prosessiin ei tarvinnut koeajon aikana tehdä pH:n muutoksia. Suurin haaste koeajon aikana oli syötön häiriöt, joita ilmaantui, kun muutama RCF-sameasuodos jätevesi erä sisälsi paljon kiintoainetta. Toinen syy syöttöhäiriöiden syntyyn oli sekoittajan toimintahäiriöt ja lopulta sekoittajan hajoaminen. Sekoittaja uusittiin ja ongelmia sen suhteen ei enää syntynyt, mutta syöttöhäiriöitä esiintyi välillä silti. Syöttöhäiriöt eivät vaikuttaneet prosessin olosuhteisiin, sillä häiriöt olivat yleensä lyhyt kestoisia. Biokaasun tuotanto oli heikompaa syöttöhäiriöiden aikaan, koska prosessiin ei mennyt orgaanista ainetta mikrobeille hajotettavaksi.

Tavoitteena oli pitkäaikainen koeajo, jotta päästään arvioimaan jäteveden ominaisuuksien vaihtelujen vaikutusta orgaanisen kuorman leikkautumiseen. Tavoitteeseen päästiin, koska saatiin ajettua koko koeajon ilman prosessin hiipumista tai kaatumista. Koeajon tuloksista voidaan päätellä, että koeajon COD reduktio pysyy korkealla, vaikka syötteen ominaisuudet vaihtelevat (kuvio 6). Lisäksi prosessi oli hyvin vakaa, sillä syöttöhäiriöt ja influentin laadun vaihtelut eivät muuttaneet prosessin olosuhteita, eivätkä vaikuttaneet prosessin tuottavuuteen merkittävästi.

Tavoitteena oli myös saada kokemukseräistä tietoa laitteiston toiminnasta, mikrobiologiasta ja jäteveden ominaisuuksien vaihtelusta sekä tuottaa mahdollisimman paljon biokaasua. 20 viikon aikana laitteiston toiminnasta opittiin paljon ja influentin sekoittaminen huomattiin oletettua tärkeämmäksi. Koeajon aikana opittiin mihin prosessissa kannattaa kiinnittää huomiota ja mihin varautua varsinaisessa koeajossa. Esimerkiksi syöttö kannattaa järjestää siten, että prosessiin syötetään koko ajan tasaisella nopeudella influenttia, jolloin prosessin olosuhteille ei tule hetkellisiä nopeita muutoksia. Prosessin mikrobiologiasta opittiin, että hitaalla prosessin ylösajolla saadaan luotua mikrobeille hyvät kasvuolosuhteet ja prosessista tulee vakaa. Prosessista saatiin tuotettua hyvin myös biokaasua ja huomattiin influentin COD määrän muutosten vaikuttavan kaasun määrän tuottoon.

Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet täyttyivät, koska prosessin ylösajo onnistui ja saatiin paljon tietoa laitteiston toiminnasta ja mikrobiologiasta. COD reduktio oli koko prosessin ajan korkea välillä 75 - 85 %, eikä siihen vaikuttanut syötteen ominaisuuden vaihtelut eikä syöttöhäiriöt. Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää varsinaisessa tehdaspilotoinnissa, joka alkaa myöhemmin tänä keväänä.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

ABBASI, S. ja ABBASI T. 2012. Formation and impact of granules in fostering clean energy production and wastewater treatment in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16:2012. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-02-19.] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111005533>

AL SAEDI, T., RUTZ, D., PRASSL, H., KÖTTNER, M., FINSTERWALDER, T., VOLK, S. ja JANSSEN, R. 2008. *Biogashandbook*. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-02-19.] Saatavissa: <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>

ALAKANGAS, E., HURSKAINEN, M., LAATIKAINEN-LUNTAMA, J. ja KORHONEN, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-01-05.] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

CHONG, S., SEN, T., KAYAALP, A. ja ANG, H. 2012. The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment – A State-of-art review. *WaterResearch* 46:2012. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-02-19.] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412002400>

HUOPANA, T., RAATIKAINEN, O., KOLEHMAINEN, M., JANHUNEN, M. ja ANTIKAINEN, E. 2014. METLI-hankkeen loppuraportti. Suomi: Itä-Suomen yliopisto ja Savonia-ammattikorkeakoulu. [Viitattu 2017-01-26.] Saatavissa: <http://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/ajankohtaista/Metli%20loppuraportti.pdf>

JANHUNEN, Maarit 2017-01-09. Projekti-insinööri. [Haastattelu.] Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu

JORGENSEN, Peter Jacob 2009. *Biogas – green energy*. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-01-24.] Saatavissa: <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasPJJuk.pdf>

KOSKENLAHTI, Antti 2017-02-16. [Digitaaliset kuvat]. Sijainti: Kuopio.

KYMÄLÄINEN, Maritta ja PAKARINEN, Outi. 2005. *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessintoi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeenlinna: Suomen Biokaasuyhdistys ry. ISBN 978-951-784-770-4.

LATVALA, Markus 2009. *Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä*. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-02-08.] Saatavissa: http://www.bionova.fi/sites/default/files/sy_24_2009.pdf

LEHTO, M., SALO, T., SORVALA, S., KEMPPAINEN, R., VANHALA, P., SIPILÄ, I. ja PUUMALA, M. 2007. Peruna- ja juureskuorimon jätteet ja jätevedet. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-02-08.] Saatavissa: <http://www.mtt.fi/met/pdf/met94.pdf>

LOTTI, Outi 2013. Etikkahappopitoisen lauhteen anaerobinen käsittely. Aalto-yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu. Puunjalostustekniikan tutkinto-ohjelma. Diplomityö [Viitattu 2017-02-19.]

LUOSTARINEN, Sari 2013. Biokaasuteknologiaa maataloilla 1. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-01-26.] Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/481263/mtrraportti113.pdf?sequence=1>

MATTSSON, M., RUNDSTEDT, J. ja KARLSSON, N. 2011. IMPROVING BIOGAS PRODUCTION BY ANAEROBIC DIGESTION OF DIFFERENT SUBSTRATES – Calculation of Potential Energy Outcomes. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-02-20.] Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:436104/FULLTEXT01.pdf>

METSÄTEOLLISUUS RY. Metsäteollisuuden tilastoja [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-01-18] Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/toimialat/10-Mets%C3%A4teollisuus>

METSÄTEOLLISUUS RY. Metsäteollisuuden tilastoja [verkoaineisto]. [Viitattu 2017-01-18] Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/resurssit/60-Ymp%C3%A4rist%C3%B6>

Metsäteollisuus.fi 2016. Metsäteollisuus on maltillinen kemikaalien käyttäjä [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-01-18] Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/painopisteet/ymparisto/tehtaiden-ymparistoasiat/Metsateollisuus-on-maltillinen-kemikaalien-kayttaja--92.html>

MOTIVA 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-01-05.] Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf

Motiva.fi 2015. Biokaasu. [verkoaineisto]. [Viitattu 2017-01-26.] Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/energiaa_pelloilta/biokaasu

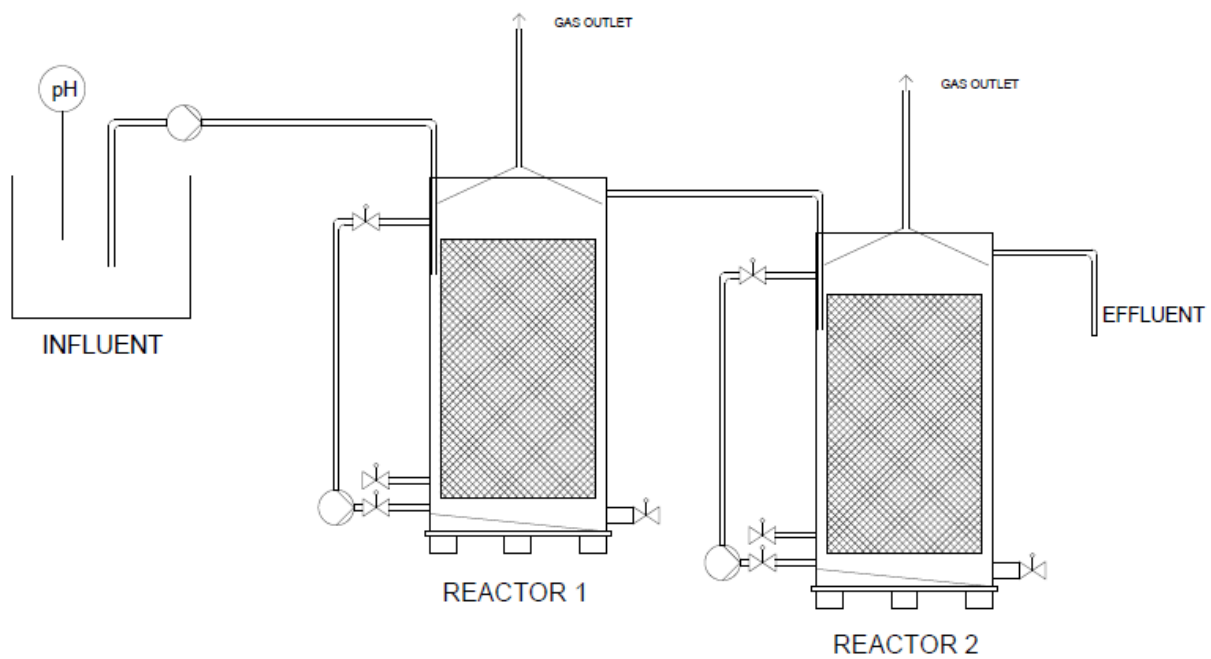
PAKARINEN, Tenho 2011. Jätevesi puhdistamon toiminta.

SCHNÜRER, A. ja JARVIS, Å. 2009. Microbiological Handbook for Biogas Plants. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2017-02-20.] Saatavissa: http://www.eac-quality.net/fileadmin/eac_quality/user_documents/3_pdf/Microbiological_handbook_for_biogas_plants.pdf

Storaenso.com. [verkoaineisto]. [Viitattu 2017-01-16] Saatavissa: <http://www.storaenso.com/lang/finland/about/Pages/stora-enso-brief.aspx>

Storaenso.com. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-01-18.] Saatavissa:
<http://renewablepackaging.storaenso.com/about-us/mills/varkaus-mill>

LIITE 1: 2-VAIHEINEN TÄYTEKAPPALEKOLONNIREAKTORI



LIITE 2: PROESSIN YLÖSAJON AIKATAULU

Koeviikko	PVM	Syöttö, l/d	Syöttö, l/h	HRT, h	Org. Kuorm., kgCOD/Rm3/d
1	19.9.2016	1,35	0,056	480,00	0,25
1	20.9.2016	2,70	0,113	240,00	0,50
1	21.9.2016	4,05	0,169	160,00	0,75
1	22.9.2016	5,40	0,225	120,00	1,00
1	23.9.2016	6,75	0,281	96,00	1,25
2	26.9.2016	8,10	0,338	80,00	1,50
2	27.9.2016	9,45	0,394	68,57	1,75
2	28.9.2016	10,80	0,450	60,00	2,00
2	29.9.2016	12,15	0,506	53,33	2,25
2	30.9.2016	13,50	0,563	48,00	2,50
3	3.10.2016	14,85	0,619	43,64	2,75
3	4.10.2016	16,20	0,675	40,00	3,00
3	5.10.2016	17,55	0,731	36,92	3,25
3	6.10.2016	18,90	0,788	34,29	3,50
3	7.10.2016	20,25	0,844	32,00	3,75
4	10.10.2016	21,60	0,900	30,00	4,00
4	11.10.2016	22,95	0,956	28,24	4,25
4	12.10.2016	24,30	1,013	26,67	4,50
4	13.10.2016	25,65	1,069	25,26	4,75
4	14.10.2016	27,00	1,125	24,00	5,00