

Opinnäytetyö (AMK)

Bio- ja elintarviketekniikka

Elintarviketekniikka

2011

Alexi Virta

# BIOKAASUTUOTANNON PROSESSIT JA BIOKAASUN TUOTANTO



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

Turun ammattikorkeakoulu

Bio- ja elintarviketekniikka | Elintarviketekniikka

2011 | 40 sivua

Ohjaaja: Jukka Kaitaranta

Alexi Virta

## BIOKAASUTUOTANNON PROSESSIT JA BIOKAASUN TUOTANTO

Työ on tehty Turun ammattikorkeakoululle ja opinnäytetyö toimii osana ammattikorkeakoulun T&K-hanketta. Opinnäytetyön teoreettisessa osuudessa on kuvattu anaerobinen mädätysprosessi kokonaisuutena ja selvitetty mädätysprosessin yksittäisten parametrien merkitystä biokaasutuotannon suhteen. Työn kokeellisessa osuudessa on suoritettu anaerobisen mädätysprosessin ylösajo pilotmittakaavan biokaasureaktorille.

Työn kokeellinen osuus toteutettiin ammattikorkeakoulun omistamalla 4000 l:n biokaasu-reaktorilla. Syntyvä biokaasu tuotettiin jätevesilietteellä. Reaktorissa tapahtuvaa mädätysprosessia optimoitiin ylösajon aikana ja kun prosessin parametrit saatiin stabiiliin tilaan biokaasutuotannon suhteen, ylösajovaihe päättyi. Prosessin stabiiliutta arvioitiin ylösajon aikana reaktorimädätteestä tehtyjen analyysien ja tuotetun biokaasun analysoinnin avulla.

Prosessin tilaa arvioitiin pH-, VFA/alkaliniteetti-, kokonaishiili-, kokonaistyyppi- ja kaasuprofiili-analyysien avulla. Mädäteanalyysien ohella muodostunutta biokaasua analysoitiin.

Ylösajo päättyi prosessin muodostuttua stabiiliksi kuormituksella  $0,8 \text{ kgVS/r-m}^3/\text{d}$ , jolloin päivittäinen biokaasusaanto oli 2000 litraa, kaasun metaanipitoisuuden ollessa 69 %.

ASIASANAT:

biokaasu, biojäte, anaerobinen mädätys, jätevesiliete

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Biotechnology and Food Technology | Food Technology

2011 | 40 pages

Instructor: Jukka Kaitaranta

Aleksi Virta

# BIOGAS PROCESSES AND BIOGAS PRODUCTION

This thesis was commissioned by Turku University of Applied Sciences (TUAS) and is part of a research and development project. The literature part of the thesis focuses on describing anaerobic digestion as a process and the importance of its parameters. The experimental part is about the start-up process of a pilot-scale biogas plant.

The experimental part was executed on a 4000 l pilot-scale biogas reactor owned by TUAS. Biogas was produced using sludge from the local municipal WWTP as feedstock for anaerobic digestion. While the start-up process was being carried out, the process parameters were continuously monitored. During the start-up, the process conditions were measured by performing analyses of the digested mass. The gas production was also measured.

The analyses on the digested mass comprised pH measurements, alkalinity/VFA ratio tests, total carbon and total nitrogen measurements and gas profile analyses. The composition of the produced biogas was also analysed.

The start-up process ended when the digestion process became stable. The final organic load of the process was  $0.8 \text{ kgVS/r-m}^3/\text{d}$  which led to a daily yield of 2000 l of biogas with a methane content of 69 %.

## KEYWORDS:

biogas, biowaste, anaerobic digestion, municipal sludge.

# SISÄLTÖ

<b>SANASTO</b>	<b>5</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>2 BIOKAASUTUOTANNON SYÖTTEET</b>	<b>7</b>
2.1 Kunnalliset jätevesilietteet	7
2.2 Eläinlanta	7
2.3 Ruokajätteet	8
2.4 Orgaaniset jätevesilietteet	8
<b>3 ANAEROBINEN MÄDÄTYSPROSESSI</b>	<b>8</b>
3.1 Mädätysprosessin vaiheet	9
3.1.1 Hydrolyyttiset bakteerit	10
3.1.2 Asetogeeniset bakteerit	11
3.1.3 Metanogeeniset bakteerit	11
<b>4 MÄDÄTYSPROSESSIN HALLINTA</b>	<b>12</b>
4.1 pH	12
4.2 Hiilen ja typen suhde	13
4.3 Prosessia inhiboivat tekijät	13
4.3.1 Haihtuvat rasvahapot	14
4.3.2 Alkaliniteetti	14
4.3.3 Ammoniakki	15
4.3.4 Sulfidit	15
4.3.5 Raskasmetallit	15
4.4 Reaktorin olosuhteet	16
4.5 Lämpötilan vaikutus	16
4.6 Orgaaninen kuormitus	16
4.7 Viipymäaika	17
<b>5 KOEJÄRJESTELYT</b>	<b>17</b>
5.1 Kooreaktori	18
5.2 Syöte	20
5.3 Prosessin ylösajo	20
<b>6 PROSESSIN TILAN SEURANTA</b>	<b>23</b>
6.1 Reaktorimädätteen mittaukset	23

6.2 Biokaasun mittaukset	24
<b>7 ANALYYSITULOKSET</b>	<b>24</b>
7.1 Reaktorin mädätteelle tehdyt mittaustulokset	24
7.1.1 pH-mittausten tulokset	25
7.1.2 VFA:n ja alkaliniteetin mittaustulokset	25
7.1.3 Hiilen ja typen suhde	27
7.1.4 Kuiva-ainepitoisuus	27
7.2 Biokaasun tuotto profiilit	28
<b>8 TULOSTEN ARVIOINTI</b>	<b>30</b>
<b>9 JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>32</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>34</b>

## **LIITTEET**

Liite 1. Ylösajon mittaustulokset taulukoituna

Liite 2. Kaaviokuva biokaasulaitteistosta

## **KUVAT**

Kuva 1. Mädätysprosessin osa-alueet	10
Kuva 2. Reaktorin hallintalaitteisto	19
Kuva 3. Reaktori	19

## **KUVIOT**

Kuvio 1. pH-arvojen vaihtelut	25
Kuvio 2. VFA/alkaliniteetti -suhteen vaihtelut	26
Kuvio 3. VFA- ja alkaliniteettiarvot	26
Kuvio 4. Biokaasun päivittäinen saanto	28
Kuvio 5. Biokaasun koostumus	29

## **TAULUKOT**

Taulukko 1. Orgaanisen kuormituksen noston vaiheet	22
Taulukko 2. Reaktorimädätteen hiilen ja typen suhdearvot	27
Taulukko 3. Optimaaliset prosessiolosuhteet	30
Taulukko 4. Yleisiä biokaasuparametrejä	31

## SANASTO

VFA	VFA-termi tulee englanninkielisistä sanoista "Volatile Fatty Acids", joka tarkoittaa haihtuvia rasvahappoja.
VS	VS-termi tulee englanninkielisistä sanoista "Volatile Solids", joka tarkoittaa lietteen sisältämää orgaanista ainetta.
Alkaliniteetti	Alkaliniteetilla tarkoitetaan veden puskurointikykyä eli veden kapasiteettia neutraloida happoja.
Biokaasu	Biokaasu on kaasua, jota syntyy orgaanisen aineksen hajotessa hapettomissa olosuhteissa.
Ympäri	Ympäri tarkoittaa kasvatettua bakteeriviljelmää. Kun opinnäytetyössä viitataan "ympäriin", tarkoitetaan sillä anaerobisen mädätysprosessin läpikäynyttä mädätettä.
THP	THP-termi tulee sanoista "Thermal Hydrolysis Process". THP-prosessi tarkoittaa lietteelle tehtävää paineistettua höyryesikäsittelyä.

# 1 JOHDANTO

Biohajoavaa jätettä muodostuu jatkuvasti enemmän, niin teollisuuden kuin kuluttajienkin toimesta. Kun biohajoava jäte hajoaa, muodostuu kyseisessä mädätysprosessissa myös biokaasua. Mikäli biokaasu kerätään talteen ja hajoamisprosessi toteutetaan tehokkaasti, on syntyvällä biokaasulla kaupallista arvoa.

Biohajoavasta jätteestä syntyvää biokaasua voidaan hyödyntää muun muassa lämmön ja sähkön tuotantoon tai biopolttoainetarkoituksiin. Suomen biokaasulaitokset voidaan jakaa neljään päätyyppiin. Nämä koostuvat jätevedenpuhdistamoiden biokaasulaitoksista, maatilojen yhteyteen liitetystä laitosmalleista, yhteiskäsittelylaitoksista ja teollisuuden biokaasulaitoksista (Latvala 2009).

Opinnäytetyö toimii osana Turun ammattikorkeakoulun SUSBIO-nimistä T&K-hanketta. Työ koostuu kahdesta osasta. Työn teoreettisessa osassa on käsitelty biokaasun tuottamiseen liittyvän anaerobisen mädätysprosessin teoriaa. Teoriassa on kuvailtu anaerobinen mädätysprosessi kokonaisuutena ja sen yksittäisten parametrien aiheuttamaa vaikutusta biokaasun tuottoon. Työn kokeellinen osa keskittyy Turun ammattikorkeakoulun omistaman pilot-mittakaavaisen biokaasureaktorin ylösajoprosessiin.

Ylösajoprosessin tavoitteena oli saada ylösajo päätökseen kolmen kuukauden aikataulussa. Ylösajo katsottiin päättyneen, kun mädätysprosessi saatiin vakaaseen tilaan. Kaasuntuotantoprosessia tarkkailtiin ylösajon aikana erilaisten mädäteanalyysien avulla. Lisäksi prosessin kaasuntuotantoa tarkkailtiin ja tuotettua kaasua analysoitiin. Reaktorin syötteenä hyödynnettiin Cambi THP-prosessin (Cambi, Norja) läpikäynyttä jätevesilietettä.

## 2 BIOKAASUTUOTANNON SYÖTTEET

Anaerobiselle mädätysprosessille on olemassa monenlaisia syötevaihtoehtoja. Käytännössä kaikkea biomassaa voidaan hyödyntää tähän tarkoitukseen, mutta etenkin syötemallit, joissa on suhteellisen korkea vesipitoisuus (> 50 %), ovat yleisimmin käytettyjä syötteitä anaerobiselle mädätysprosessille. Seuraavaksi on käsitelty neljää tyypillistä biokaasun tuotantoon soveltuvaa syötemallia (Yu *et al.* 2009). Mikäli biokaasun tuotossa käytetään samaan aikaan useampaa syötettä, käytetään tällöin termiä yhteismädätys. Esimerkiksi jätevesilietteen mädätysprosessiin voidaan lisätä elintarviketuotannon jätteitä. Etenkin Ruotsissa yhteismädättäminen on yleistynyt. (Latvala 2005)

### 2.1 Kunnalliset jätevesilietteet

Kunnallinen jätevesiliete sisältää korkean vesipitoisuuden (95 – 99 %), alhaisen pitoisuuden mädätyksessä hyödynnettävää orgaanista ainetta (15 – 20 % kokonaiskuiva-aineesta). Tästä huolimatta syöte sisältää hyvin ja tasapainoisesti ravinteita kuten typpeä ja fosforia. Syöte sisältää korkeita bakteeripitoisuuksia, joista osa on yleensä patogeenisia ihmisille ja eläimille. Syötteen biokaasun tuottopotentiaali on pieni verrattuna muihin yleisiin syötemalleihin (Yu *et al.* 2009). Tämän syötemallin esikäsittelystä kerrotaan tarkemmin luvussa 5.2.

### 2.2 Eläinlanta

Eläinlannalla on hyvä kaasuntuotantokapasiteetti. Eläinlannan lähteenä on esimerkiksi maatilat, joilta lanta on helposti kerättävissä. Eläinlantojen fysikaaliset ominaisuudet vaihtelevat riippuen siitä mikä eläinlaji on kyseessä. Yleisesti eläinlannan vesipitoisuus vaihtelee 75 % ja 92 % välillä. Eläinlanta sisältää korkeita pitoisuuksia orgaanista materiaa arvojen vaihdellessa 72 % ja 93% välillä, kun osuus lasketaan kokonaiskuiva-aineesta. Epäorgaanisia ravinteita kuten typpeä, fosforia ja kaliumia on eläinlannassa. Syötteen hiilihydraattipitoisuus on pieni, koska suurin osa sen mahdollisista hiilihydraateista on jo imeytynyt eläimiin näiden ruuansulatuksessa.



Eläinlannassa on korkeita pitoisuuksia ureaa ja ammoniumia. Nämä antavat hyvän puskurointikapasiteetin happoja vastaan, mutta ne voivat myös toimia inhiboivina tekijöinä anaerobiselle prosessille. Lisäksi eläinlannoissa on korkeina pitoisuuksina mikrobeja. (Yu *et al.* 2009)

### 2.3 Ruokajätteet

Näillä jätteillä on vaihteleva vesipitoisuus, mutta yleisesti ruokajätteissä on korkeina pitoisuuksina mädätykseen soveltuvaa orgaanista materiaa (> 95 % laskettuna kokonaiskuiva-ainepitoisuudesta). Suurin osa ruokajätteistä sisältää tasapainoisen ravinnepitoisuuden ja suuria määriä hiilihydraatteja. Ruokajätteet saattavat sisältää jätteitä paperista, kuorintajätteitä tai mahdollisesti lehtiä, jolloin jätettä voidaan joutua esikäsittämään mädätyksen tehostamiseksi. Esimerkiksi jätteen partikkelikokoa voidaan joutua pienentämään. (Yu *et al.* 2009)

### 2.4 Orgaaniset jätevesilietteet

Orgaaniset jätevesilietteet ovat peräisin elintarvike- ja juomateollisuudesta. Kyseisellä syötetyypillä on korkeita pitoisuuksia liuenneita orgaanisia ravinteita kuten tärkkelystä, sokereita ja proteiineja. Tyypillisiä lähteitä syötteelle ovat muun muassa juustolat, viinitilat, teurastamot, tislaamot ja jäätelötehtaat. (Yu *et al.* 2009)

## 3 ANAEROBINEN MÄDÄTYSPROSESSI

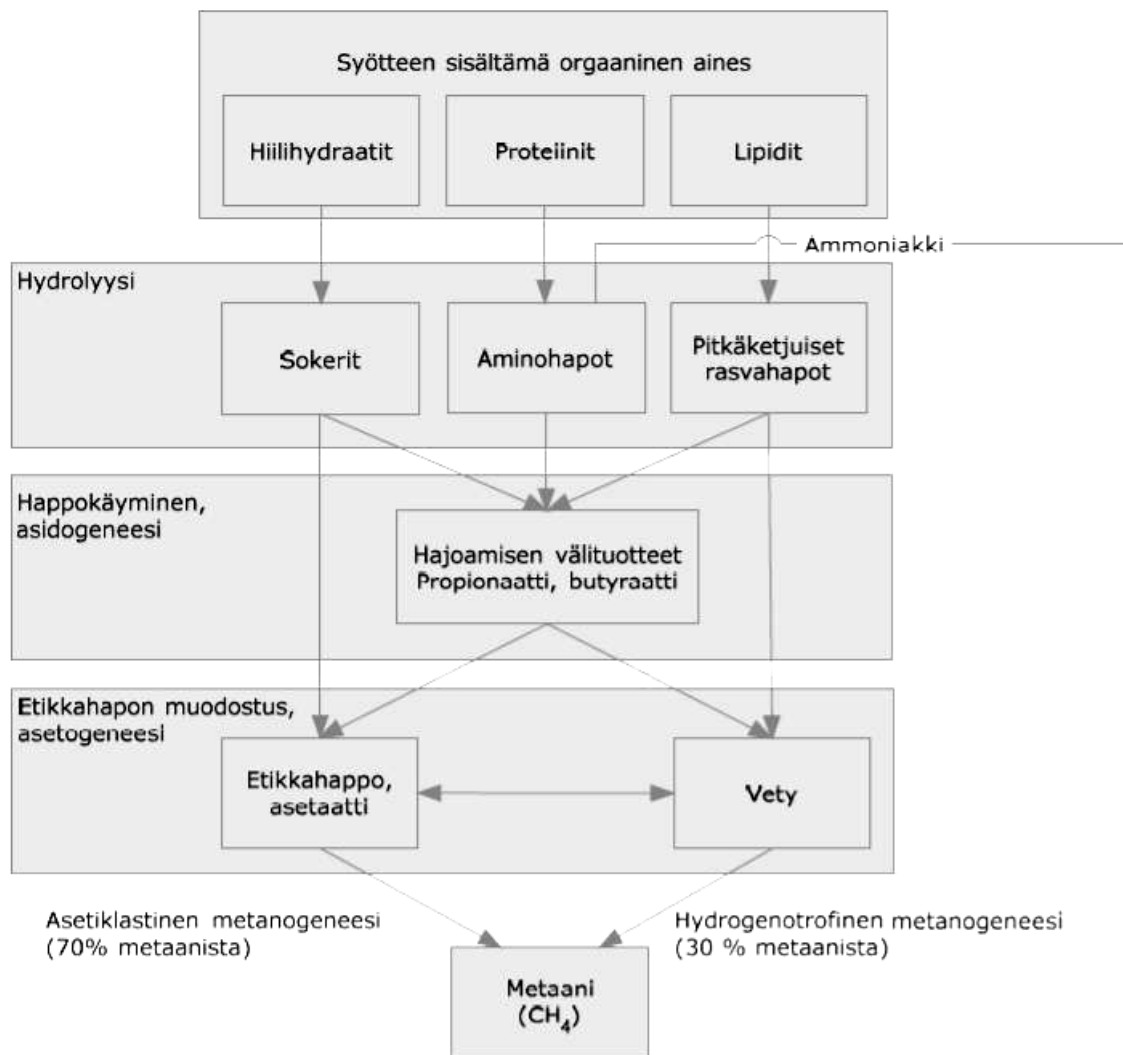
Anaerobista mädätysprosessia voidaan vaihtoehtoisesti kutsua biokaasutukseksi, biometanoinniksi tai anaerobiseksi hajotukseksi. Anaerobinen mädätys tarkoittaa hapettomissa olosuhteissa syntyvää mikro-organismien tuottamaa biokemiallista reaktiota, jossa orgaaninen materia (muun muassa jätevesiliete, biojätteet) hajoaa. Mädätysprosessissa muodostuu mädätettä ja biokaasua, jonka pääkomponentit ovat metaani ja hiilidioksidi. Mädätysprosessissa muodostuneen mädätteen hajuhaitat ovat vähentyneet ja sen sisältämien patogeenisten bakteerien määrä on myös vähentynyt. Prosessissa

syntyvää mädätettä voidaan hyödyntää maanparannusaineena ja lannoitus-tarkoituksiin. (Latvala 2009)

Mädätysprosessit voidaan jakaa kahteen yleiseen malliin. Tämä jako tapahtuu sen perusteella millä lämpötila-alueella mädätysprosessi toteutetaan. Suomessa puhdistamolietettä käsitellään pääosin mesofiilisella mädätyksellä (lämpötila 35 - 37 Celciusastetta). Mesofiilinen malli on helpommin kontrol-loitavissa, kuin toinen niin sanottu termofiilinen malli (50 - 55 Celciusastetta), joka on herkempi prosessiolosuhteiden vaihteluille. Vaikka termofiilinen mädätysprosessi ei ole Suomessa laajasti käytetty, ulkomailla sitä kuitenkin hyödynnetään. (Latvala 2009)

### 3.1 Mädätysprosessin vaiheet

Anaerobinen mädätysprosessi pitää sisällään hydrolyyttisiä, asetogeenisiä ja metanogeenisiä bakteereja. Nämä bakteerit hajottavat prosessissa orgaanisen materian muun muassa metaaniksi, hiilidioksidiksi, vedyksi, ammoniakiksi ja rikkivedyksi. Orgaanisen materian anaerobinen mädätysprosessi voidaan jakaa hydrolyysi-vaiheeseen, happokäymiseen ja etikkahapon muodostumiseen ja lopuksi biokaasun muodostumiseen (Latvala 2009). Mädätysprosessin vaiheiden jakautuminen ja niiden järjestys on nähtävissä kuvasta 1.



**Kuva 1.** Mädätysprosessin osa-alueet (Latvala 2009)

Mädätysprosessin eri osa-alueissa vaikuttavat eri bakteerit. Prosessiin vaikuttavat bakteerit voidaan jakaa hydrolyyttisiin bakteereihin, asetogeenisiin bakteereihin ja metanogeenisiin bakteereihin.

### 3.1.1 Hydrolyyttiset bakteerit

Hydrolyysivaiheessa keskeisessä osassa ovat hydrolyyttiset bakteerit, joita kutsutaan myös fermentatiivisiksi bakteereiksi. Nämä hydrolysoivat orgaanista materiaa yksinkertaisempaan muotoon, jota muut bakteerit hyödyntävät prosessin myöhemmässä vaiheessa. Ensimmäinen vaihe mädätyksessä on entsymaattinen hydrolyysi. Entsymaattisen hydrolyysin vaikutus syötteen

sisältämiin hiilihydraatteihin, proteiineihin ja rasvoihin. Lisäksi liukenevat orgaaniset yhdisteet muuntuvat käymisen kautta muun muassa asetaatiksi, propionaatiksi, etanoliksi, hiilidioksidiksi ja vetykaasuksi. (Dohányos *et al.* 2001)

Hydrolyysi-vaihetta katalysoivat solujen ulkopuoliset entsyymit kuten amylaasit, sellulaasit, xylanaasit, proteaasit ja lipaasit, joita hydrolyyttiset bakteerit erittävät. Vaiheen nopeus riippuu siitä, mitä raaka-ainetta hydrolyysivaiheessa mädätetään. (Yu *et al.* 2009)

### 3.1.2 Asetogeeniset bakteerit

Happokäymiseen ja etikkahapon muodostumiseen vaikuttavat asetogeeniset bakteerit. Aikaisemmin muodostuneet reaktiotuotteet kuten sokerit, aminohapot ja rasvahapot osallistuvat happokäymiseen. Happokäymisen kautta asetogeeniset bakteerit tuottavat asetaatteja, hiilidioksidia ja vetykaasua. (Dohányos *et al.* 2001)

### 3.1.3 Metanogeeniset bakteerit

Prosessissa muodostuva metaani muodostuu metanogeenisten bakteerien avulla. Metanogeeniset bakteerit muodostavat metaania kahdella tavalla. Ensimmäisessä mallissa (noin 70 % mädätysprosessissa muodostuvasta metaanista) syntyy, kun metanogeeniset bakteerit muodostavat asetaatista metaania. Toisessa mallissa metanogeeniset bakteerit muodostavat metaania vedystä ja hiilidioksidista. Vaikka vedystä ja hiilidioksidista muodostuva metaani kattaa vain pienen osan bakteerien tuottamasta kokonaismetaanimäärästä, on sen muodostumisreaktiolla suuri merkitys anaerobiselle prosessille, sillä se poistaa prosessiympäristöstä vetyä. Kun prosessista poistuu vetyä, se mahdollistaa prosessiin alhaisen vetypitoisuuden, mikä on tärkeää prosessin fermentatiivisten bakteerien kannalta. Mikäli vetypitoisuus prosessissa kohoaa korkeaksi, on riskinä että fermentatiiviset bakteerit alkavat mädätyksen ensivaiheessa tuottamaan happoja asetaatin sijaan. Tämä johtaa asetogeenisten bakteerien toiminnan pysähtymiseen. Lisäksi prosessissa syntyvän metaanin määrä olisi huomattavasti pienempi, sillä suurin osa

metaanista muodostuu metanogeenien muuntaessa asetaattia. Metanogeeniset bakteerit ovat herkkiä prosessiolosuhteiden muutoksille ja ne kasvavat hitaasti. Tämän vuoksi lämpötila- ja pH-arvot olisi hyvä pitää optimissa. Solutason happi on toksista metanogeeneille ja myös nitraattien kaltaisten ei-orgaanisten happilähteiden läsnäolo voi inhiboida metanogeenien kasvua. (Dohányos *et al.* 2001)

Metanogeenejä, jotka muodostavat metaanin asetaattia pilkkomalla, kutsutaan asetotrofisiksi metanogeeneiksi. Metanogeenejä, jotka muodostavat metaanin hiilidioksidista ja vedystä tai muuntamalla esimerkiksi metanolia ja metyyliamiineja, kutsutaan hydrogenotrofisiksi metanogeeneiksi. Yleisesti voidaan todeta, että neutraalit kasvuympäristöt ovat optimaalisia metanogeenisille bakteereille. (Yu *et al.* 2009)

## 4 MÄDÄTYSPROSESSIN HALLINTA

Luvussa käsitellään anaerobiseen mädätysprosessiin yleisesti vaikuttavia tekijöitä, jotka on hyvä huomioida prosessin kontrolloinnissa ja optimoinnissa.

### 4.1 pH

Pääosa prosessin mikrobeista elää parhaiten neutraaleissa (pH 7) kasvuympäristöissä. Siitä poikkeavat pH-arvot saattavat aiheuttaa ongelmia organismien metaboliaan. Esimerkiksi entsyymireaktioiden tasapaino voi muuntua. Anaerobisessa prosessissa etenkin metanogeenisten bakteerien toiminta heikentyy, mikäli pH-taso poikkeaa neutraalista. Yleisin syy prosessissa pH:n laskuun on orgaanisten happojen pitoisuuden nouseminen liian korkeaksi. Alhaisissa pH-tasoissa metanogeeniset bakteerit eivät kykene muuntamaan syntyneitä happoja kaasuksi. Alhainen pH-taso ei korjautuisi metanogeenien avulla, vaan jouduttaisiin miettimään muita keinoja prosessin pH-tason nostamiseksi. (Dohányos *et al.* 2001)

Alhainen pH voi johtua prosessissa tapahtuvasta liian nopeasta syöttösyklistä, jonka johdosta mädätysprosessille syntyy ylikuormitusta. Prosessin

ylikuormituksessa happojen kerääntyminen johtuu usein siitä, että käymisbakteereja muodostuu reaktoriin nopeammin kuin metanogeenisiä bakteereja. (Dohányos *et al.* 2001)

Yksinkertainen keino pH-arvon nostamiseen takaisin optimiin on syötteen syöttämisen tilapäinen lopetus. Syöttö lopetetaan ja annetaan prosessin metanobakteereille kasvuaikaa. Metanobakteerien määrän kohottua ne lopulta kykenevät alentamaan prosessin happopitoisuutta, jolloin pH-arvo nousee. Kun pH-arvo on noussut lähelle neutraalia, voidaan jatkaa syöttöä. Mikäli halutaan vaikuttaa pH-arvoon nopeammin, voidaan lisätä esimerkiksi vahvoja emäksiä, kuten NaOH:a, mikä kohottaa pH-arvoa. Mikäli pH-arvoa halutaan laskea, voidaan käyttää vastaavasti vahvoja happoja. (Dohányos *et al.* 2001)

#### 4.2 Hiilen ja typen suhde

Optimi hiili/typpi-suhde anaerobiselle mädätysprosessille on 25:1, kun käytetään jätevesilietettä mädätysprosessissa. Prosessissa käytettävästä syötteestä riippuen, suhdearvo vaihtelee 20:1 – 30:1 välillä. Jos C/N-suhdearvot poikkeavat paljon optimi-arvoista, voi tämä johtaa korkeaan kokonaisammoniumtyypen määrään prosessissa ja/tai korkeaan VFA-kerääntymiseen. Molemmat tekijät voivat toimia inhiboivina prosessin toimivuudelle. (Li *et al.* 2011)

#### 4.3 Prosessia inhiboivat tekijät

Prosessia haittaavat tekijät ovat joko kemiallisia tai fysikaalisia. Muun muassa suuret VFA-, ammoniakki- ja sulfidikonsentraatiot inhiboivat mädätysprosessia. Lisäksi vääränlaiset reaktio-olosuhteet, kuten vääränlainen VFA/alkaliniteetti-suhde, heikentävät prosessin toimivuutta. Myös raskasmetallien suuret pitoisuudet aiheuttavat inhiboivia vaikutuksia mädätykselle. Inhibiittorit vaikuttavat niin prosessin yksittäisiin parametreihin kuin koko prosessiinkin. Inhibiittorit ovat tulleet osaksi prosessia joko syötteen mukana tai niitä on voinut muodostua mädätysprosessin välituotteista.

#### 4.3.1 Haihtuvat rasvahapot

Prosessin happokäymisen aikana muodostuu haihtuvia rasvahappoja (VFA). Lyhytketjuiset karboksyylihapot kuten etikkappo, voihapo, propionihappo ja muurahaishappo luetaan haihtuviin rasvahappoihin. Näistä hapoista propionihapon on todettu inhiboivan mädätysprosessia. (Latvala 2009)

Haihtuvien rasvahappojen liialliseen muodostumiseen liittyy usein liian suuri orgaaninen kuormitus. Rasvahappojen kokonaiskonsentraatio prosessissa on normaaliolosuhteissa 8-300 mmol/l. (Dohányos *et al.* 2001)

Haihtuvien rasvahappojen konsentraatio vaikuttaa käymisen tehokkuuteen prosessissa. Mädätysprosessin haihtuvien rasvahappojen ominaisuuksiin liittyvässä tutkimuksessa etanolin, etikkahapon ja voihamon konsentraatioiden ollessa 2400, 2400 ja 1800 mg/l metanogeenisten bakteerien toiminta ei heikentynyt. Kun propionihapon konsentraatio ylitti 900 mg/l, inhibiitiota ilmeni ja metanogeenisten bakteerien kanta pieneni. Bakteerien aktiivisuuden heikennyttyä, etanolia ja haihtuvia rasvahappoja kerääntyi prosessiin ja metaanin tuotto oli alhaisella tasolla. Optimointi-analyysit osoittivat etanolin, etikkahapon, propionihapon ja voihamon 1600, 1600, 300 ja 1800 mg/l konsentraatioiden johtavan parhaimpaan metaanin tuottoon ja suurimpaan metanogeenisten bakteerien konsentraatioon. (Wang *et al.* 2009)

#### 4.3.2 Alkaliniteetti

Alkaliniteettiarvo (mgCaCO<sub>3</sub>/l tai mmol/l) kertoo reaktorin puskurikapasiteetista. Biokaasulaitoksissa sen suositeltava taso vaihtelee 3500-5000 mgCaCO<sub>3</sub>/l välillä. Haihtuvien rasvahappojen ja kokonaisalkaliniteetin suhde kuvaa prosessin toimivuutta. Suhteesta voidaan päätellä prosessin mahdollinen häiriötilanne ennen kuin kyseinen tekijä vaikuttaa esimerkiksi pH-arvoon ja kaasun tuottoon. VFA/alkaliniteetti suhteen ollessa noin 0,25 tai pienempi, prosessi toimii hyvin. (Latvala 2009)

### 4.3.3 Ammoniakki

Vapaan ammoniakkin on todettu olevan toksisempaa mädätysprosessille kuin ammoniumionit. Ammoniakin ja ammoniumin konsentraatioiden on todettu olevan riippuvaisia mädätysreaktioiden tasapainosta ja prosessin pH-tasosta. Ammoniakille hyvä pitoisuus on alle 80 mg/l samalla, kun ammoniumioneiden hyvä konsentraatio on 1500 mg/l tai vähemmän. (Dohányos *et al.* 2001)

Tutkimuksista on löydetty eri ratkaisuja ammoniakkin vähentämiseksi. Muun muassa  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ja  $\text{Mg}^{2+}$  -ionien lisääminen prosessiin on todettu olevan hyvä keino vähentää ammoniumin aiheuttamaa toksisuutta prosessissa. Tutkimuksessa pelkän 0,002 – 0,05 M  $\text{Na}^+$  lisääminen johti 5% metaanintuoton kasvuun. Lisäksi tutkimuksen analyysituloksissa todettiin  $\text{Na}^+$ :n ja  $\text{K}^+$ :n lisäämisen tai  $\text{Na}^+$ :n ja  $\text{Mg}^{2+}$ :n lisäämisen johtaneen 10% metaanintuoton kasvuun. (Chen *et al.* 2008)

### 4.3.4 Sulfidit

Sulfideja voi esiintyä mädätysprosessissa joko liukoisessa muodossa tai kaasuna. Mikäli liukoisten sulfidien konsentraatio kohoaa yli 200 mg/l, metanobakteerien metabolia vahingoittuu, mikä näkyy mädätysprosessin heikentymisenä. (Dohányos *et al.* 2001)

### 4.3.5 Raskasmetallit

Toisin kuin monet muut prosessille toksiset aineet, raskasmetallit eivät ole biohajoavia. Niiden liiallinen kertyminen prosessiympäristöön johtaa toksisiin ominaisuuksiin. Liuenneessa muodossa olevat raskasmetallit ovat toksisia mikro-organismeille. Mikäli prosessi altistuu esimerkiksi suurelle kupari-konsentraatiolle, voidaan tätä vaikutusta poistaa sulfidien lisäämisellä prosessiin. Hyvä lisättävä sulfidi-muoto raskasmetallin aiheuttaman inhibiition poistoon on esimerkiksi FeS, sillä jäljelle jäävä  $\text{Fe}^{2+}$  ei ole toksinen prosessille kuin vasta suurina pitoisuuksina. (Chen *et al.* 2008)



#### 4.4 Reaktorin olosuhteet

Mikäli mädätysprosessin tehokkuus heikentyy prosessin aikana, syinä voivat esimerkiksi olla reaktorissa olevan seoksen pinnalle muodostuva kuiva kerros, reaktorin pohjalle laskeutuvat raskaat materiaalit tai seoksen vaahtoaminen. Raskaat materiat, jotka laskeutuvat reaktorin pohjalle ja pienentävät nestetilavuutta, saadaan poistettua reaktorista tyhjennysventtiilin avulla. Vaahtoaminen voi johtua muun muassa ylisyötöstä, syötteen sisältämistä pinta-aktiivisista yhdisteistä, syötteen mukana tulleista mikrobeista tai hydrofobisista aineista. Vaahtoamisen ehkäisemiseksi voidaan joutua lisäämään prosessiin pinta-aktiivisuuteen vaikuttavia vaahdonestoaineita. Myös vääränlainen sekoitus voi johtaa vaahdon syntyyn. Reaktorin sisältämän orgaanisen massan sekoitus on hyvällä tasolla, kun sekoitus takaa mikrobien ja lämmön tasaisen jakaantumisen reaktorin sisällä. Tämä vähentää muun muassa prosessin inhibitiota ja reaktorisyötteen pintakerroksen mahdollista kovettumista. (Latvala 2009)

#### 4.5 Lämpötilan vaikutus

Anaerobinen prosessi toimii laajalla lämpötilasektorilla. Kylmimmät arvot ovat 10 Celciusasteessa ja kuumimmat 70 Celciusasteen tasolla. Etenkin anaerobisen prosessin metanogeneesin tehokkuus riippuu vallitsevasta lämpötilasta. Anaerobiselle mädätysprosessille on määritelty kaksi optimilämpötilaa. Mikäli kyseessä on mesofiilinen prosessi, optimilämpötila on noin 35 Celciusastetta. Jos kyseessä on termofiilinen prosessi, optimilämpötila on noin 55 Celciusastetta. Käytännön tilanteet ovat osoittaneet, että termofiilinen mädätys voi toimia tehokkaammin kuin mesofiilinen. Tällöin kuitenkin termofiilisen prosessin haitaksi muodostuu samalla prosessiin liittyviä lämmityskustannuksia. (Mata-Alvarez 2003)

#### 4.6 Orgaaninen kuormitus

Jotta mädätysprosessi toimii tehokkaasti, tulee syötteen sisältämän orgaanisen materian hajota hyvin prosessissa. Syötteen sisältämän kuiva-ainepitoisuuden

orgaanisen aineen osuus on suoraan verrannollinen siihen, kuinka paljon prosessissa voi muodostua biokaasua. Tyypillisesti biokaasulaitosten orgaaninen kuormitus vaihtelee 3 – 9 kgVS/r-m<sup>3</sup>/d (orgaanista ainetta reaktorin nestetilavuutta ja vuorokautta kohden) välillä. Kun verrataan saatua biokaasumäärää käytettävän syöteseoksen teoreettiseen biokaasuntuottopotentiaaliin, saadaan käsitys siitä, kuinka tehokkaasti prosessi toimii (Latvala 2009).

#### 4.7 Viipymäaika

Optimaalinen viipymäaika on riippuvainen prosessiolosuhteista. Siihen vaikuttavat muun muassa syötteen kuiva-ainepitoisuus, orgaanisen materian määrä, prosessilämpötila ja reaktorin tilavuus sekä syötteen sekoittuminen biokaasureaktorissa. Kun viipymäaika on pitkä, se johtaa tehokkaampaan orgaanisen aineen reduktioon ja biokaasun tuottoon. Liian lyhyt viipymäaika johtaa reaktorin ylikuormitukseen, joka näkyy biokaasun tuoton laskuna käytetyn syötteen epätehokkaan hajoamisen johdosta. Yleisesti viipymäaika suomalaisilla biokaasulaitoksilla on noin 12-30 vrk. Mesofiilisen prosessille suositeltu viipymäaika on 21 vrk. Mikäli käsittelyjäännöksen orgaanisen aineen reduktio on 50 – 60 % ja biokaasun tuotanto tasaista, voidaan viipymäaikaa pitää riittävänä. (Latvala 2009)

## 5 KOEJÄRJESTELYT

Kokeellinen osuus keskittyy pilotmittakaavan biokaasureaktorin ylösajoon. Ylösajon aikatauluksi asetettiin tavoitearvoksi kolme kuukautta, jonka aikana prosessin operointi suoritettiin manuaalisesti. Ylösajovaihe voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan: täyttövaiheeseen ja orgaanisen kuormituksen nostoon. Tämän jälkeen on vuorossa optimointivaihe, jossa ylösajetun biokaasuprosessin parametreja optimoidaan, jotta mädätysprosessi toimisi tehokkaammin. Tässä luvussa kerrotaan yleisesti työssä suoritettujen ylösajon toteutuksesta. Prosessin tilaa kyettiin arvioimaan ylösajon aikana erityyppisten mittauslaitteiden avulla, joista kerrotaan luvussa 6.

## 5.1 Kooreaktori

Kooreaktorina toimi Turku AMK:n omistama pilotmittakaavan biokaasureaktori. Reaktorin tilavuus on 4000 litraa. Kokeen aikana kooreaktori pidettiin täytettynä 3500 litran kapasiteetilla. Reaktorin sisälle jätettiin 500 litran suuruinen tyhjä tila mahdollisesti reaktorissa syntyvien tilavuusmuutoksien varalle.

Reaktorissa mädätettävää ainesta sekoitettiin jatkuvatoimisesti reaktorin sisälle rakennetun lapasekoittimen avulla. Lapasekoittimen sekoitusnopeutta on mahdollista säätää reaktorilaitteistoon kuuluvan ohjausyksikön avulla.

Reaktorin lämmitys tapahtui reaktorin rakenteisiin liitetyn lämmitysvesijärjestelmän avulla. Lämmitys tapahtui automaattisesti laitteiston ohjausyksikköön asetettujen parametrien mukaisesti.

Reaktorilaitteiston ohjausyksikössä on kosketusnäyttö, jonka kautta prosessin toimintoja kyettiin säätämään. Reaktorin hallintalaitteisto on nähtävissä kuvasta 2 ja käytetty sekoitusreaktori on nähtävissä kuvasta 3.



**Kuva 2.** Reaktorin hallintalaitteisto.



**Kuva 3.** Kooreaktori.

## 5.2 Syöte

Työssäni käytettävä jätevesiliete on lähtöisin Turun kaupungin jätevedenpuhdistamolta. Tämän jälkeen liete on toimitettu Biovakka Suomi Oy:lle, missä liete esikäsiteltiin Cambin THP-prosessissa. Cambin THP-prosessi on paineistettu höyryesikäsitely, joka soveltuu hyvin teollisuuden jätelietteen ja biojätteen käsittelyyn. THP-esikäsitelyssä biomateriaa lämmitetään 170 celsiusasteessa 20 minuuttia 5 barin paineessa, mikä johtaa patogeenivapaaseen lietteeseen. Lisäksi THP-prosessi hajoittaa syötteen solurakenteita ja muuntaa orgaanista materiaa helpommin mätänevään muotoon. Tämä johtaa siihen, että anaerobinen prosessi toimii nopeammin. Hygienenisyyden lisäksi, esikäsitely tuhoaa myös ei-toivottuja mikro-organismeja syötteestä, kuten kaasuntuottoreaktorin vaahtoamista aiheuttavia bakteereja. (Cambi 2011)

Ylösajon ensivaiheilla käytettiin Biovakka Suomi Oy:n anaerobisen mädätysprosessin läpikäynyttä mädätettä (ymppiä) prosessin käynnistämateriaalina.

## 5.3 Prosessin ylösajo

Ylösajoprosessi lähti liikkeelle täyttövaiheella. Täyttövaiheessa kooreaktori täytettiin vedellä 2500 kg asti. Kun reaktori oli täyttynyt, asetettiin prosessin ohjausyksikköön halutut lähtöparametrit. Parametreina oli muun muassa lämpötila ja reaktorin sekoitusnopeus. Sekoitusnopeudeksi asetettiin 9 rpm ja prosessin lämpötilaksi asetettiin 37 Celsiusastetta. Lämpötilan piti teoreettisesti olla optimaalinen ylösajettavalle mesofiiliselle mädätysprosessille. Kun laitteiston käyttö oli sisäistetty, mädätysprosessi aloitettiin heti vesitäytön jälkeen, jolloin reaktoriin lisättiin Biovakka Suomi Oy:n anaerobisen mädätysprosessin läpikäynyttä ymppiä. Ymppiä lisättiin, jotta pilotreaktoriin saataisiin tarvittava mikrobikanta anaerobiselle mädätysprosessille.

Ensimmäisenä syöttöpäivänä ymppiä lisättiin 675 kg. Tämän jälkeen odotettiin seitsemän päivää ja syötteeksi otettiin Cambin THP-prosessin läpikäynyttä

jätevesilietettä. Koska reaktorin pH-taso kääntyi laskuun, syöttäminen pysäytettiin kolmen päivän ajaksi, jonka jälkeen reaktoriin syötettiin lisää ymppiä 50 kg. Tämän jälkeen syöttäminen pysäytettiin ja annettiin prosessin olosuhteiden tasaantua. Tässä vaiheessa pH-taso kääntyi voimakkaasti laskuun. Alhaisen pH-tason vuoksi ei haluttu lisätä uutta orgaanista materiaa reaktoriin.

Samassa vaiheessa päätettiin nostaa prosessin lämpötilaa. Tämä päätös perustui siihen, että prosessiin lisätty ymppi ja Cambin THP-prosessin läpikäynyt liete olivat molemmat peräisin korkeammista lämpötiloista mitä kooreaktorissa vallitsi. Kooreaktorin lämpötilaa päätettiin nostaa 37 Celciusasteesta 41 Celciusasteeseen saakka. Ylösajoa oli kulunut 27. päivää, kunnes reaktorin lämpötilaa nostettiin yhdellä asteella. 30. päivänä lämpötilaa nostettiin 38. Celsiusasteesta yhdellä asteella. 35. päivänä lämpötilaa nostettiin 39. asteesta yhdellä asteella. Kun prosessi oli jatkunut 40. päivää, nostettiin lämpötilaa vielä 40. asteesta 41. asteeseen, joka jäi vallitsevaksi lämpötilaksi prosessille. Samalla kun prosessin lämpötilaa kohotettiin, syötettiin reaktoriin kahdesti ymppiä 20 kg:n syötteinä. Ympin lisäksi reaktoriin lisättiin tuolloin myös Cambin THP-prosessin läpikäynyttä jätevesilietettä kahdesti 20 kg:n syötteinä. Kun reaktorin lämpötila oli kohonnut 41 celciusasteeseen, syötettiin reaktoriin vielä kerran Biovakan prosessista peräisin ollutta ymppiä 50 kg. Prosessin myöhemmissä syötöissä käytettiin tämän jälkeen vain Cambin THP-prosessin läpikäynyttä jätevesilietettä. Kun kooreaktorin vaaka osoitti arvoksi 3500 kg, reaktorin täyttövaihe päättyi. Tässä vaiheessa prosessi oli toiminut toistaiseksi vielä hyvin epästabiiilisti. Täyttövaihe kesti yhteensä 46 vuorokautta. Kun täyttövaihe oli ohi, alkoi prosessin orgaanisen kuormituksen nostovaihe.

Prosessin kuormituksen nostossa päämääränä oli saada anaerobinen mädätysprosessi biokaasutuotannon ja pH-tason suhteen vakaaksi. Mikäli biokaasutuotanto olisi tasaista ja pH-taso pysyisi hyvällä alueella, kyettäisiin manuaalinen ylösajo lopettamaan ja siirtämään prosessi toimimaan automaattisesti prosessin ohjausyksikköön asetettavien parametrien mukaisesti. Kuormituksen nostossa mädätettävän orgaanisen aineen määrää

pyrittiin lisäämään suurentamalla päivittäisen reaktorisyötön määrää tasaisin väliajoin. Vaiheittain edennyt orgaanisen kuormituksen nosto on nähtävissä taulukosta 1.

**Taulukko 1.** Orgaanisen kuormituksen noston vaiheet.

Päivä	Päivittäinen syttö/poisto
47	Mädätteen poisto 24 kg, Syöttö 15 kg
48	Mädätteen poisto 10 kg, Syöttö 23 kg
49 – 50	Syöttö 15 kg
51	Mädätteen poisto 20 kg, Syöttö 26 kg
52	Syöttö 15 kg
53	Mädätteen poisto 40 kg, Syöttö 15 kg
54 – 58	Mädätteen poisto 30 kg, Syöttö 30 kg
59 – 65	Mädätteen poisto 60 kg, Syöttö 60 kg
66 – 70	Mädätteen poisto 30+30 kg, Syöttö 30+30 kg
71 – 72	Mädätteen poisto 38 kg, Syöttö 40 kg
73 – 76	Mädätteen poisto 40+40 kg , Syöttö 40+40 kg
77 – 80	Mädätteen poisto 40 kg, Syöttö 40 kg
81 – 83	Mädätteen poisto 40+40 kg, Syöttö 40+40 kg
84 – 87	Mädätteen poisto 60 kg, Syöttö 80 kg
88 – 90	Mädätteen poisto 40+40 kg, Syöttö 40+40 kg
91 – 93	Mädätteen poisto 80 kg, Syöttö 80 kg
94	AUTOSEKVENSSI (20 kg x 6)

Kuormituksen nostovaiheen lopussa tehtiin päivittäiset syötöt/poistot kahdesti päivässä. Tämä johtui siitä, että kun prosessi saataisiin lopulta stabiiliin tilaan, tultaisiin aktivoimaan reaktorin ohjausyksikössä oleva autosekvenssi. Tämä automatisoi prosessin syötöt ja poistot toimimaan tasaisesti vuorokauden ympäri. Ja kun manuaalisesti ylösajettu stabiili prosessi olisi myös jaksotetumpi, niin muutos manuaalisesta automaattiseksi ei olisi mädätysprosessin kannalta niin suuri. Manuaalinen kuormituksen nosto kesti 48 päivää, jonka jälkeen prosessi automatisoitiin ohjausyksikön autosekvenssin avulla. Manuaalisen ylösajon päättyessä prosessin orgaaninen kuormitus oli 0,8 kgVS/r-m<sup>3</sup>/d.

## 6 PROSESSIN TILAN SEURANTA

Prosessin ylösajon aikana prosessia tarkkailtiin erityyppisten analysointimenetelmien avulla. Prosessia tarkkailtiin niin ohjausyksiköstä luettavien lukuarvojen, kuin mädäteanalyysienkin avulla. Ohjausyksikön kosketusnäytöltä oli mahdollista lukea reaktorin lämpötila ja mahdolliset vajeet reaktoritilavuudessa. Varsinaisista mittaustuloksista kerrotaan tarkemmin luvussa 7.

### 6.1 Reaktorimädätteen mittaukset

Reaktorimädätteestä tehtyjen mittausten avulla kyettiin selvittämään prosessin tilaa ylösajon eri vaiheissa. Mädätteelle suoritettiin päivittäin pH-arvomittauksia pH-mitarin avulla. Mikäli pH-arvo osoittautui mitattaessa alle neutraalin pH-tason, ei tällöin haluttu lisätä orgaanista kuormitusta tuon päivän syötöllä, vaan annettiin pH-lukeman nousta takaisin neutraalille pH-tasolle ajan kanssa.

Mädätteestä määriteltiin myös viikottain kokonaistyyppi- ja hiilipitoisuudet ja VFA/alkaliniteetti-suhde. Kokonaistyyppi- ja hiilipitoisuudet määriteltiin Dr Lange LCK 238- ja LCK 381-testien avulla (Hach Lange, Sveitsi). Näissä testeissä reaktorista otettuja mädätenäytteitä pipetoidaan Dr Langen kyvetteihin, jotka asetetaan Dr Langen HT200S lämmityslaitteeseen. Lämmityksen jälkeen kyvetit jäähdytetään ja asetetaan Dr Lange LASA 100 spektrofotometriin (Hach Lange), joka mittaa kyveteissä olevien mädätenäytteiden kokonaistyyppi- ja hiilipitoisuudet. Alkaliniteetti määriteltiin SFS 3005 standardin mukaisesti ja VFA-arvot määritettiin titrausmenetelmällä.

VFA:n määrittämiseen käytettiin sentrifugoitua reaktorimädätettä. Sentrifugointi suoritettiin 6000 g:n voimakkuudessa. Tämän jälkeen näyte suodatettiin ja jaettiin kolmeen 50 ml:n näyteastiaan. Näytteisiin lisättiin 0,1 M HCl-liuosta siten, että näytteen pH-arvo laski alle 3,5. Tämän jälkeen näytteitä keitettiin viiden minuutin ajan. Keiton jälkeen astia peitettiin ja jäähdytettiin. Kun astia oli jäähtynyt, lisättiin näytteeseen 0,05 M NaOH-liuosta siihen asti, että pH-arvo oli 4. Tämän jälkeen näyte titrattiin 0,05 M NaOH-liuoksella siihen asti, että pH-



arvoksi saatiin 7. Kulutusarvon avulla kyettiin laskemaan VFA-arvo seuraavan kaavan avulla:  $VFA [mmol/l] = 1000 \cdot C_{NaOH} \cdot V_{NaOH} / V_{NaOH}$  (Lund 2010).

Lisäksi mädätteestä määritettiin ylösajon ensimmäisen kuukauden aikana kolmesti sen kuiva-ainepitoisuus. Tämä tehtiin, jotta saatiin vertailuarvo prosessin myöhempää optimointia varten. Kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen tehtiin SFS-EN 12880 standardin mukaisesti.

Vakaasti toimivassa prosessissa olisi hyvä verrata myös syötteen ja mädätteen kuiva-ainepitoisuuksia, jotta kyettäisiin arvioimaan mädätysprosessin tehokkuutta. Koska kyseessä oli reaktorin ylösajoon liittyvää näytteiden ottoa, ei haluttu kuluttaa resursseja prosessin tehokkuuden määrittämiseen. Reaktorimädätteen mittaustuloksia on analysoitu seuraavassa luvussa.

## 6.2 Biokaasun mittaukset

Prosessin tuottamaa biokaasumäärää tarkkailtiin päivittäin laitteistoon kuuluvan kaasumittarin avulla. Kaasutuotanto oli suoranaisesti sidoksissa prosessissa vallitseviin olosuhteisiin ja se vaihteli muutaman sadan litran tuotosta kahden tuhannen litran tuottoon.

Kooreaktorin tuottamaa kaasua analysoitiin Ibrix MX-6 (Industrial Scientific, USA) kaasuanalysointilaitteen avulla. Biokaasusta luettiin metaani-, happi-, hiilidioksidi- ja rikkivetytypitoisuudet.

# 7 ANALYYSITULOKSET

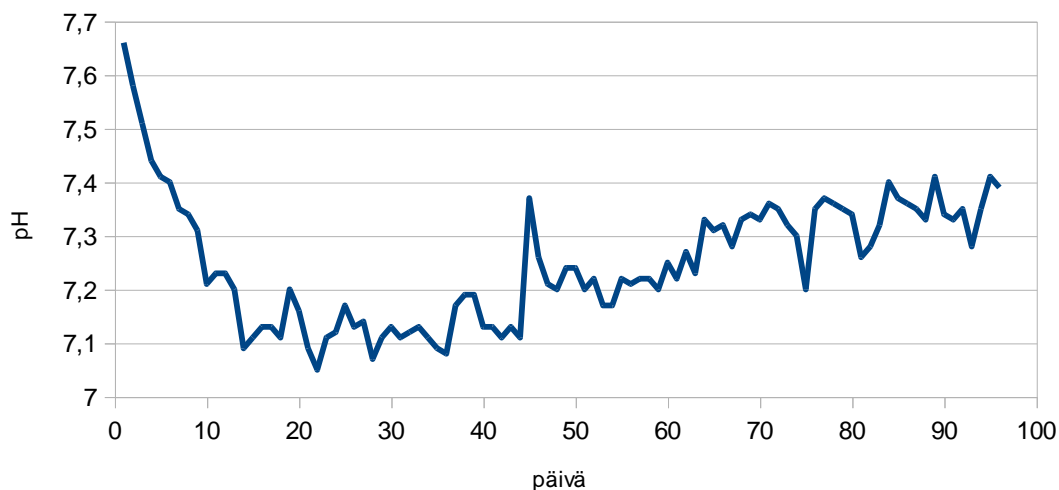
Luvussa on analysoitu suoritetuista mittauksista saatuja tuloksia. Tulokset ovat suoraan verrannollisia anaerobisen prosessin tilaan.

## 7.1 Reaktorin mädätteelle tehdyt mittaustulokset

Seuraavaksi käsitellään mädätteelle tehtyjen mittausten tuloksia. Mädätteelle tehtiin pH-mittaukset, VFA/alkaliniteetti-mittaukset, hiili/typpi-mittaukset ja kuiva-ainepitoisuusmittaukset.

### 7.1.1 pH-mittausten tulokset.

Reaktorimädätteelle päivittäin suoritettujen pH-mittausten tulokset on koottu kuvioon 1.

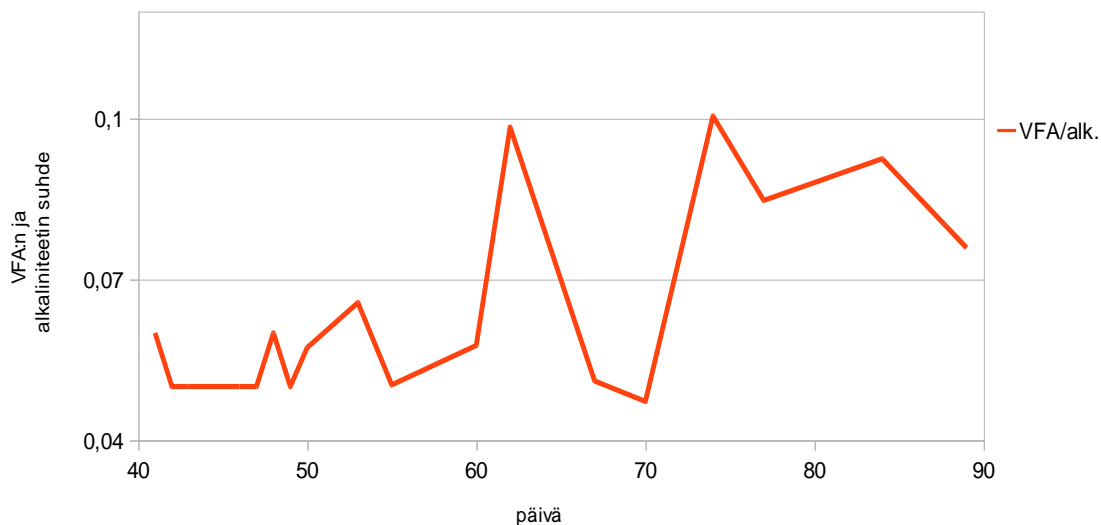


**Kuvio 1.** pH-arvojen vaihtelut.

Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että etenkin 14 ensimmäisen päivän aikana, pH-arvot eivät pysyneet stabiililla tasolla. Arvo laski korkeasta arvosta systemaattisesti alaspäin ja alhaiset pH-arvot vaikuttivat negatiivisesti päivittäisiin orgaanisen materian syöttämiseen, sillä pH-arvoa ei haluttu päästä laskemaan alle 7. Tämä siitä syystä, että pH-arvon haluttiin pysyvän lähellä teoreettista optimia metaanintuoton kannalta ja tällöin myöskään ns. ylisyyttöä ei pääsisi helposti syntymään. Ylösajon 40 – 50 päivän välillä pH-taso oli vielä hieman epätasaisesti poukkoilevaa, mutta se saatiin pysymään kuitenkin 7,2 yläpuolella. Vasta prosessin stabiloiduttua ylösajon loppuvaiheilla, pH-arvot vakiintuivat 7,3 - 7,4:n tasolle.

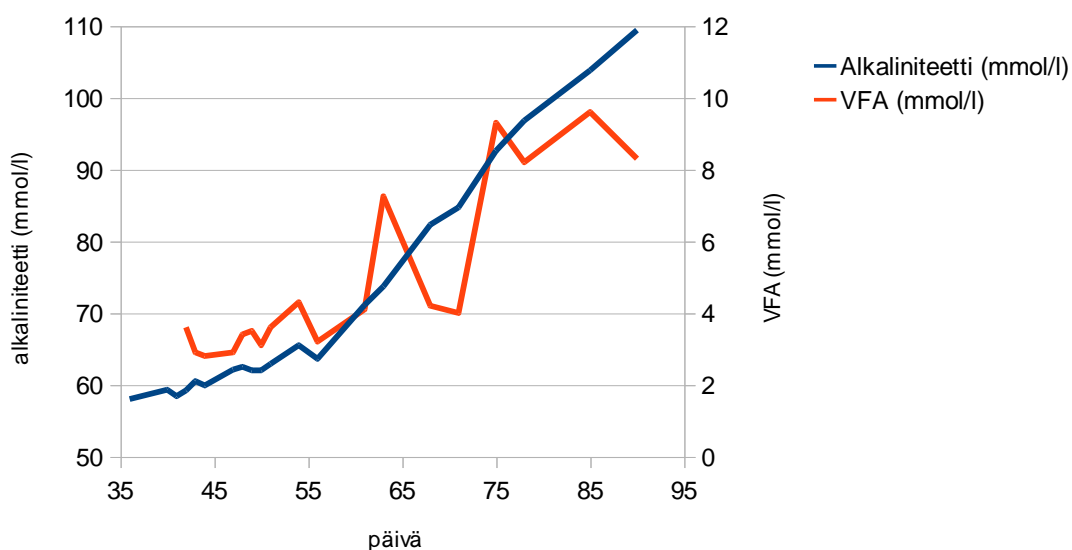
### 7.1.2 VFA:n ja alkaliniteetin mittaustulokset

Mädätteestä otetut viikottaiset VFA- ja alkaliniteettimittausten tulokset on koottu kuvioihin 2 ja 3.



**Kuvio 2.** VFA/alkaliniteetti –suhde.

VFA/alkaliniteetti-suhde on kasvanut ylösajon aikana. Koko ylösajon aikana suurin arvo oli vain 0,1. Mikäli VFA/alkaliniteetti-arvo nousee yli 0,25, prosessi ei toimi hyvin (Latvala 2009). Voidaan olettaa, että ylösajon aikana VFA/alkaliniteetti-suhde ei vaikuttanut negatiivisesti prosessiin. Mittaukset aloitettiin vasta 40. päivän jälkeen, sillä ennen tätä sille soveltuvaa laitteistoa ei ollut.



**Kuvio 3.** VFA- ja alkaliniteettiarvot. Arvot on sijoitettu kuvioon ajan funktiona.

Mädätteen VFA- ja alkaliniteettiarvot nousivat ylösajon aikana. Kuviosta on nähtävissä, että alkaliniteetin käyrä on kasvanut tasaisemmin mitä VFA-käyrä, sillä alkaliniteetin käyrässä ei sen nousuvaiheessa esiintynyt suuria poikkeamia.

VFA-arvot vaihtelivat ylösajon lopussa 8-10 mmol/l välillä. Alkaniliniteettiarvo nousi ylösajon lopussa arvoon 109 mmol/l.

### 7.1.3 Hiilen ja typen suhde

Mädätteestä viikoittain Dr Langen spektrofotometrillä mitattujen hiilipitoisuuksien ja typpipitoisuuksien suhdearvot on koottu taulukkoon 2.

**Taulukko 2.** Reaktorimädätteen hiilen ja typen suhdearvot.

Päivä	C:N
20	3,2:1
36	4,5:1
43	3,7:1
50	3,7:1
56	3,9:1
63	4,3:1
71	4,1:1
78	3,9:1
85	3,5:1

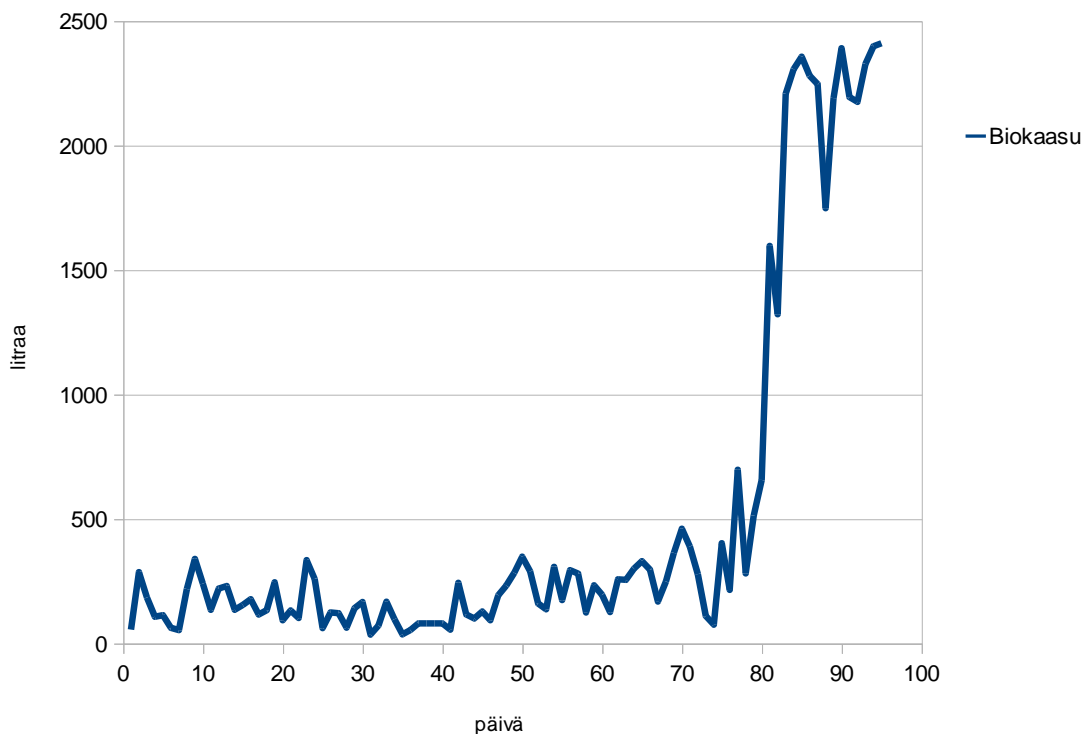
Taulukosta on nähtävissä suhdearvojen vaihtelut. Lisäksi voidaan todeta, että hiilen ja typen suhdearvo on ollut koko ajan selvästi optimiarvon alapuolella.

### 7.1.4 Kuiva-ainepitoisuus

Mädätteen kuiva-ainepitoisuus määritettiin kolmesti ylösajon aikana. Määritettyjä pitoisuusarvoja voidaan käyttää vertailulukuina prosessin optimointivaiheessa. Ensimmäinen kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen suoritettiin ylösajon päivänä 36 ja arvoksi saatiin 2,1 %. Toinen kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen suoritettiin päivänä 44 ja arvoksi saatiin 2,2 %. Kolmas kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen suoritettiin päivänä 50 ja arvoksi saatiin 1,9 %.

## 7.2 Biokaasun tuottoprofiilit

Biokaasun kertymämittaukset on kerätty kuvioon 4. Sen sijaan biokaasulle kaasuanalysaattorilla tehtyjen mittausten tulokset on koottu kuvioon 6.

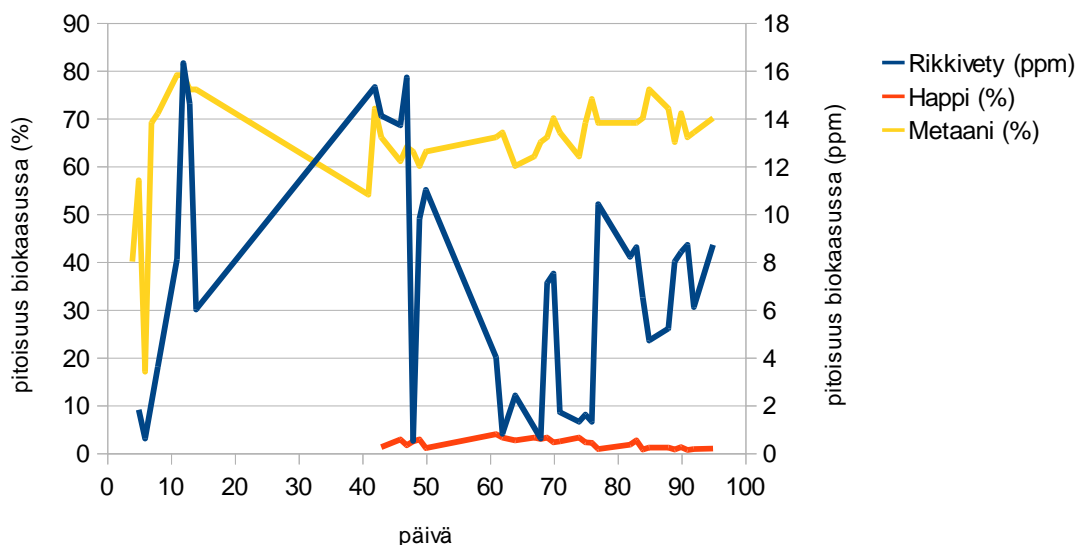


**Kuvio 4.** Biokaasun päivittäinen saanto.

Biokaasun saantomittauksista on helposti analysoitavissa, että kooreaktorin anaerobinen prosessi tehostui kaasuntuotannon suhteen vasta, kun ylösajo oli edennyt yli 80 vrk. Kun ylösajo eteni täyttövaiheessa (ensimmäiset 46 vrk), päivittäinen saanto vaihteli 300 litran lukemista alle 100 litran tuottoihin. Tässä vaiheessa kaasun tuottoon vaikutti negatiivisesti vähäinen orgaaninen kuormitus ja vaihtuvat reaktoriolosuhteet kuten epästabiili pH-taso. Alhaisten pH-tasojen vuoksi reaktoriin myös syötettiin biomateriaalia epätasaisella syklillä.

Kaasuntuotanto kuitenkin muuntui huomattavasti stabiilimpaan suuntaan, kun siirryttiin orgaanisen kuormituksen nostovaiheeseen (47. vrk lähtien). Kuormituksen noston 30 ensimmäisen päivän suurimmat päiväkohtaiset kaasutuotot olivat 450 litran luokkaa ja alhaisimmat 200 litran tasolla. Vasta ylösajon lopussa viimeisten 14 päivän aikana kaasuntuotanto parani

merkittävästi, sillä päivittäinen kaasuntuotanto oli pysyvästi yli 2000 litraa. Kun manuaalinen kuormituksen nosto lopetettiin ja prosessi asetettiin toimimaan ohjausyksikön autosekvenssin mukaisesti, päivän biokaasun saantolukema oli 2410 litraa. Suurentuneeseen saantoon on vaikuttanut etenkin orgaanisen kuormituksen tasainen lisäys ylösajon aikana.



**Kuvio 6.** Biokaasun koostumus.

Biokaasun metaanipitoisuus oli ylösajon ensimmäisten päivien aikana vielä alhaisella tasolla. Tässä vaiheessa prosessi myös toimi kaikkein epävakaaimmin. Kun ylösajo oli edennyt 42 päivää, alkoi biokaasun metaanipitoisuus vakiintumaan 60 - 66 % arvoihin. Ylösajon viimeisten 26 päivän aikana, metaanipitoisuus vaihteli 60 - 75 % välillä.

Biokaasun happipitoisuutta kyettiin arvioimaan vasta ylösajon jälkimmäisellä puoliskolla, kun ylösajo oli ennättänyt edetä 43 päivää, sillä aikaisemmin käytetty kaasuanalysaattori ei pystynyt happea analysoimaan happianturin vaatiessa kalibrointia. Hapen osuus biokaasusta oli ylösajon lopussa 1 - 2 %. Hapen osuus biokaasusta on tärkeä arvo, koska anaerobisen mädätysprosessin on määrä olla hapeton. Happea on voinut joutua reaktoriin ylösajossa syötteen mukana tai vääränlaisella syöttämistavalla. Esimerkiksi jos syötettä

imee pumpulla reaktoriin siten, että syöttösäiliö imeytyy tyhjäksi asti, imeytyy putkistoihin ja reaktoriin samalla myös ilmaa.

Rikkivedyn määrä vaihteli paljon ylösajon aikana. Ylösajon viimeisten päivien aikana rikkivedyn arvo vaihteli 8,0 – 8,7 ppm:n välillä.

## 8 TULOSTEN ARVIOINTI

Tässä luvussa arvioidaan opinnäytetyön kokeellisen osuuden mittausten tuottamia analyysilukuja siihen, miten niiden tulisi teoriassa olla, jotta mesofiilinen anaerobinen mädätysprosessi toimisi optimaalisesti. Taulukkoon 3 on koottu optimaaliset prosessiparametrit (Dohányos *et al.* 2001, Latvala 2009, Mata-Alvarez 2003 ja Li *et al.* 2011) ja pilotreaktorin vastaavat arvot ylösajon päätyttyä.

**Taulukko 3.** Optimaaliset prosessiolosuhteet.

Parametrit	Lukuarvo	Pilotreaktori	Yksikkö
pH	6,8 – 7,4	7,4	pH
VFA	0,8 – 8,0	8,3	mmol/l
Alkaliniteetti	70 – 100	109,4	mmol/l
VFA/alkaliniteetti-suhde	< 0,25	0,08	luku
Hiili/typpi-suhde	25:1	3,5:1	luku
Lämpötila	35	41	Celciusaste

Kun tarkastellaan pH-lukemien suhteen ylösajossa päästiin hyvälle teoreettiselle optimitasolle. Loppuvaiheessa pH-arvot olivat 7,4 tasolla, joka sijoittuu mesofiilisen prosessin optimialueen ylärajalle. Puskurikapasiteettia kuvaava alkaliniteetti-arvo ylösajon loppupisteessä on lähellä optimiarvoa, sillä se oli 109,4 mmol/l. VFA-lukemien kannalta ylösajossa päästiin hyvälle tasolle. Vaikka VFA:n arvot ylösajossa ylittivät lopussa lievästi taulukon optimitason, voidaan työn viimeistä 8,3 mmol/l arvoa pitää hyvänä, sillä yleisesti VFA:n arvo on 8 – 300 mmol/l (Dohányos *et a.* 2001).

Sen sijaan hiilen ja typen suhde on prosessissa vielä epäoptimaalisella tasolla. Tulokset osoittivat, että reaktoriin syntyi korkea typpipitoisuus, kun tätä verrataan hiilen määrään. Optimitasolla C:N-suhteen tulisi olla 25:1 (Li *et al.* 2011), kun suhde kooreaktorissa oli työn loppuvaiheessa. 3,5:1. Hyvä tapa kasvattaa hiilipitoisuutta on hyödyntää esimerkiksi runsashiilisiä syötevaihtoehtoja.

Lämpötila-arvoksi prosessiin jäi 41 celciusastetta. Lämpötila prosessissa ei ole teorian mukaan optimissa, kun tarkastellaan yleisesti mesofiilisen prosessin optimilämpöä, joka on 35 celciusastetta (Mata-Alvarez 2003). Kooreaktorille soveltuvaa optimilämpöä on mahdollista selvittää prosessin optimointivaiheessa. Taulukkoon 4 on koottu suomalaisten jätevesipuhdistamoiden biokaasuparametrejä (Latvala 2009) ja opinnäytetyön pilotreaktorin vastaavat arvot ylösajon päätyttyä.

**Taulukko 4.** Yleiset biokaasuparametrit.

Parametrit	Vaihteluväli	Pilotreaktori	Yksikkö
Metaani	55 – 70	70	%
Hiilidioksidi	30 – 45	Ei arvoa	%
Happi	< 0,5	1 – 2	%
Rikkivety	10 – 40	8,7	ppm

Kun arvoja tarkastelee, voidaan todeta, että ylösajovaiheessa kooreaktorin tuottaman biokaasun metaanipitoisuus on hyvällä tasolla, sen ollessa 69% luokkaa. Happilukemat ovat jäivät korkeammiksi mitä suomalaisten jätevesipuhdistamojen biokaasuissa yleensä on, sillä kooreaktorissa lukemat vaihtelivat 1 – 2 % välillä. Prosessin optimointivaiheessa hapen osuutta biokaasusta voidaan mahdollisesti pienentää. Rikkivedyn arvoissa sijoitutaan taulukkoon verrattuna vaihteluvälin alapäähän, mikä on hyvä asia, sillä liiallinen rikkivedyn määrä inhiboi prosessia. Ylösajon lopussa rikkivedyn määrä oli 8,7 ppm.

Kaasusta ei analysoitu hiilidioksidin tai ammoniakkin määrää, sillä analysointia tähän ei ollut. Myöskään kaasusta ei analysoitu siinä mahdollisesti esiintyvien



siloksaanien määrää. Näiden arvoja olisi biokaasun teollisessa valmistuksessa hyvä tarkkailla, etenkin jos kaasua on vielä joskus tarkoitus hyödyntää esimerkiksi kaasumoottoreissa. Mikäli moottorikäyttöön tarkoitettun kaasun puhdistus- ja jalostustoimet eivät ole oikeanlaisia, voi kaasun sisältämät siloksaanit esimerkiksi aiheuttaa muutoksia kaasumoottoreiden käynnissä, huoltoväleissä ja öljynvaihtoväleissä (Latvala 2009).

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Yleisesti voidaan todeta, että ylösajoprosessissa saavutettiin stabiilit olosuhteet mesofiiliselle mädätysprosessille, kun orgaaninen kuormitus oli  $0,8 \text{ kgVS/r-m}^3/\text{d}$ . Tässä vaiheessa päivittäinen biokaasutuotanto oli noin 2000 litraa. Biokaasun saantoa pitäisi kyetä kasvattamaan samalla, kun orgaanista kuormitusta kasvatetaan optimaalisemmaksi, tavallisen kuormitustason ollessa 3 – 9  $\text{kgVS/r-m}^3/\text{d}$  välillä.

Ylösajossa päästiin työnantajan haluamaan lopputulokseen, sillä ylösajo päättyi noin kolmen kuukauden kuluessa ja kuormituksen nostovaiheen viimeinen osa kyettäisiin toteuttamaan prosessin autosekvenssin avulla.

Kun ylösajettua mädätysprosessia ryhdytään optimoimaan, ehdotukseni on, että siinä otettaisiin ensisijaiseksi lähtökohdaksi prosessiolosuhteiden saattaminen optimaaliselle tasolle, tällöin prosessin pitäisi toimia tehokkaasti ja se näkyy myös kaasuntuotannossa. Tällä tarkoitan sitä, että tarkasteltuja prosessi-parametreja, joiden tuloksiin jäi vielä puutteita, pyrittäisiin säätämään oikeammalle tasolle. Esimerksi bioreaktorin lämpötilan suhteen, olisi hyvä selvittää optimilämpötila Cambi THP-prosessin läpikäyneelle lietteelle. Lisäksi optimointijärjestelyissä olisi hyvä suorittaa mittauksia, joilla kyettäisiin arvioimaan kuinka tehokkaasti mädätysprosessi hyödyntää syötteessä olevan biomassan. Tällöin voidaan arvioida, kuinka tehokkaasti prosessi toimii ja jääkö mahdollisesti orgaanista materiaa käyttämättä. Lisäksi mädätteestä olisi hyvä tutkia säännöllisesti sen ammonium-pitoisuuksia, sillä ammonium voi toimia prosessille merkittävänä inhiboivana tekijänä. Myös biokaasun sisältämiä

parametreja olisi hyvä tarkkailla tehokkaammin, esimerkiksi CO<sub>2</sub>-pitoisuudet jäivät arvioimatta ylösajossa.

## LÄHTEET

Cambi, Unleash The Power of Anaerobic Digestion. [Viitattu 22.6.2011]  
<http://www.cambi.no/wip4/detail.epl?cat=10636>

Cambi, Biosolids brochure. Turbocharge Your Digester. [Viitattu 22.6.2011]  
<http://www.cambi.no/photoalbum/view2/P3NpemU9b3JnJmlkPTM2NTY0MSZ0eXBIPTE>

Chen, Y. & Cheng, J. J. & Creamer, K. S. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process. Teos: Bioresource Technology, volume 99. ss. 4044 – 4064. Elsevier.

Dohányos, M. & Zábranská, J. 2001. Anaerobic digestion. Teos: Spinosa, L. & Vesilid, A. Sludge into biosolids. Processing, disposal and utilization. ss. 221 – 241. Iwa Publishing, UK.

Latvala, M. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT). ss. 29 – 43. Suomen ympäristökeskus 24/2009.

Latvala, M. 2005. Jätevesilietteen anaerobinen käsittely ja biokaasun hyötykäyttö. ss. 9 – 10. Binova Engineering. [Viitattu 22.6.2011]  
[http://www.bionova.fi/files/jatevesilietteen\\_anaerobinen\\_kasittely\\_ja\\_biokaasun\\_hyotykaytto.pdf](http://www.bionova.fi/files/jatevesilietteen_anaerobinen_kasittely_ja_biokaasun_hyotykaytto.pdf)

Li, Y. & Park, Y. S. & Zhu J. 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Teos: Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 15. ss. 821 – 826. Elsevier.

Lund, C. 2010. Mesofiilisen ja termofiilisen biokaasulaitoksen kuormitusvertailu ja optimointi. Diplomityö. Aalto-yliopisto. ss. 71 – 72.

Mata-Alvarez, J. 2003. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. ss. 1 – 18. Iwa Publishing, UK.

Wang, Y. & Zhang, Y. & Wang, J. & Meng, L. 2009. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. Teos: Biomass and Bioenergy, volume 33. ss. 848 – 853. Elsevier.

Yu, Z. & Schanbacher, F. L. 2009. Production of Methane Biogas as Fuel Through Anaerobic Digestion. Teos: Singh, O. V. & Harvey, S. P. Sustainable Biotechnology Sources of Renewable Energy. ss. 110 – 117. Springer, UK.

## Liite 1. Ylösajon mittaustulokset taulukoituna

Päivittäiset mittaukset, helmikuu 2011.							
pH = reaktorimädätteen pH-arvo Paino = reaktorivaa'an näyttämä massa reaktorissa mädätettävälle seokselle Kaasu = tuotettu biokaasu, Metaani, happi, rikkivety = biokaasu-analysointi							
Päivämäärä	pH	Kaasu (m <sup>3</sup> )	Paino (kg)	Metaani (%)	Happi (%)	Rikkivety (ppm)	Huom.
3.2.	7,66	1,283	3269				
4.2.	7,58	1,338	3266				
5.2.	7,51	1,624	3260				
6.2.	7,44	1,808	3260				
7.2.	7,41	1,915	3257	40			
8.2.	7,40	2,028	3257	57		1,8	
9.2.	7,35	2,090	3257	17		0,6	
10.2.	7,34	2,143	3257	69		0	
11.2.	7,31	2,361	3295	71		3,6	
12.2.	7,21	2,700	3295				
13.2.	7,23	2,940	3295				
14.2.	7,23	3,075	3295	79		8,1	
15.2.	7,20	3,295	3310	79		16,3	
16.2.	7,09	3,525	3326	76		14,6	
17.2.	7,11	3,660	3322	76		6,0	
18.2.	7,13	3,814	3319				Ei kaasuanalysointia
19.2.	7,13	3,991	3316				
20.2.	7,11	4,107	3313				
21.2.	7,20	4,240	3313				
22.2.	7,16	4,485	3326				
23.2.	7,09	4,578	3338				
24.2.	7,05	4,710	3335				
25.2.	7,11	4,812	3332				
26.2.	7,12	5,146	3379				
27.2.	7,17	5,405	3376				
28.2.	7,13	5,466	3376				

Päivittäiset mittaukset, maaliskuu 2011.							
pH = reaktorimädätteen pH-arvo Paino = reaktorivaa'an näyttämä massa reaktorissa mädätettävälle seokselle Kaasu = tuotettu biokaasu, Metaani, happi, rikkivety = biokaasu-analysointi							
Päivämäärä	pH	Kaasu (m3)	Paino (kg)	Metaani (%)	Happi (%)	Rikkivety (ppm)	Huom.
1.3.	7,14	5,590	3376				
2.3.	7,07	5,711	3369				Lämpötilaa nostettiin (38)
3.3.	7,11	5,774	3366				
4.3.	7,13	5,915	3363				Lämpötilaa nostettiin (39)
5.3.	7,11	6,081	3360				
6.3.	7,12	6,116	3360				
7.3.	7,13	6,187	3357				
8.3.	7,11	6,354	3397				
9.3.	7,09	6,451	3441				Lämpötilaa nostettiin (40)
10.3.	7,08	6,487	3438				
11.3.	7,17	6,540	3435				
12.3.	7,19	6,620	3432				
13.3.	7,19	6,700	3432				
14.3.	7,13	6,780	3432				Lämpötilaa nostettiin (41)
15.3.	7,13	6,860	3432				
16.3.	7,11	6,915	3432	54			
17.3.	7,13	7,158	3476	72		15,3	
18.3.	7,11	7,274	3473	66	1,2	14,1	Analysaattori kalibroitiin
19.3.	7,37	7,374	3473				
20.3.	7,26	7,502	3473				
21.3.	7,21	7,595	3479	61	2,8	13,7	Reaktori tänä
22.3.	7,20	7,788	3498	64	1,6	15,7	Ulos 24 kg, Syöttö 15 kg
23.3.	7,24	8,020	3491	63	2,4	0,5	Ulos 10 kg, Syöttö 23 kg
24.3.	7,24	8,303	3498	60	2,8	9,8	Syöttö 15 kg
25.3.	7,20	8,651	3491	63	1,0	11,0	Syöttö 15 kg
26.3.	7,22	8,94	3502				Ulos 20 kg, Syöttö 26 kg
27.3.	7,17	9,100	3510				Syöttö 15 kg
28.3.	7,17	9,237	3525				Ulos 40 kg, Syöttö 15 kg
29.3.	7,22	9,544	3494				Ulos 25 kg, Syöttö 30 kg
30.3.	7,21	9,718	3501				Ulos 30 kg, Syöttö 30 kg
31.3.	7,22	10,012	3498				Ulos 30 kg, Syöttö 30 kg

Päivittäiset mittaukset, huhtikuu 2011.							
pH = reaktorimädätteen pH-arvo Paino = reaktorivaa'an näyttämä massa reaktorissa mädätettävälle seokselle Kaasu = tuotettu biokaasu, Metaani, happi, rikkivety = biokaasu-analysointi							
Päivämäärä	pH	Kaasu (m3)	Paino (kg)	Metaani (%)	Happi (%)	Rikkivety (ppm)	Huom.
1.4.	7,22	10,292	3498				Ulos 30 kg, Syöttö 30 kg
2.4.	7,20	10,416	3498				Ulos 30 kg, Syöttö 30 kg
3.4.	7,25	10,649	3498				Ulos 30 kg, Syöttö 30 kg
4.4.	7,22	10,844	3498				Ulos 60 kg, Syöttö 60 kg
5.4.	7,27	10,970	3491	66	3,9	4	Ulos 50 kg, Syöttö 60 kg
6.4.	7,23	11,227	3501	67	3,2	0,8	Ulos 60 kg, Syöttö 60 kg
7.4.	7,33	11,482	3491				Ulos 60 kg, Syöttö 60 kg
8.4.	7,31	11,782	3488	60	2,6	2,4	Ulos 50 kg, Syöttö 60 kg
9.4.	7,32	12,112	3491				Ulos 60 kg, Syöttö 60 kg
10.4.	7,28	12,408	3482				Ulos 60 kg, Syöttö 35 kg
11.4.	7,33	12,576	3476	62	3,2	0	Ulos 30+30 kg, Syöttö 30+30 kg
12.4.	7,34	12,824	3501	65	2,9	0,6	Ulos 30+30 kg, Syöttö 30+30 kg
13.4.	7,33	13,187	3501	66	3,2	7,1	Ulos 30+30 kg, Syöttö 30+30 kg
14.4.	7,36	13,647	3494	70	2,2	7,5	Ulos 30+30 kg, Syöttö 30+30 kg
15.4.	7,35	14,036	3494	67	2,4	1,7	Ulos 30+31 kg, Syöttö 30+30 kg
16.4.	7,32	14,314	3494				Ulos 38 kg, Syöttö 40 kg
17.4.	7,30	14,424	3491				Ulos 40 kg, Syöttö 40 kg
18.4.	7,20	14,499	3498	62	3,2	1,3	Ulos 40+40 kg , Syöttö 40+40 kg
19.4.	7,35	14,901	3498	69	2,2	1,6	Ulos 40+40 kg , Syöttö 40+40 kg
20.4.	7,37	15,116	3494	74	2,1	1,3	Ulos 40+40 kg , Syöttö 40+40 kg
21.4.	7,36	15,813	3491	69	0,8	10,4	Ulos 40+40 kg , Syöttö 40+40 kg
22.4.	7,35	16,094	3491				Ulos 40 kg, Syöttö 40 kg
23.4.	7,34	16,607	3498				Ulos 40 kg, Syöttö 40 kg
24.4.	7,26	17,263	3491				Ulos 40 kg, Syöttö 40 kg
25.4.	7,28	18,859	3501				Ulos 40 kg, Syöttö 40 kg
26.4.	7,32	20,181	3498	69	1,7	8,2	Ulos 40+40 kg, Syöttö 40+40 kg
27.4.	7,40	22,388	3494	69	2,6	8,6	Ulos 40+40 kg, Syöttö 40+40 kg
28.4.	7,37	24,694	3501	70	0,7	6,5	Ulos 40+40 kg, Syöttö 40+40 kg
29.4.	7,36	27,050	3480	76	1,1	4,7	Ulos 60 kg, Syöttö 80 kg
30.4.	7,35	29,330	3504				Ulos 80 kg, Syöttö 80 kg

Päivittäiset mittaukset, toukokuu 2011.							
pH = reaktorimädätteen pH-arvo Paino = reaktorivaa'an näytämä massa reaktorissa mädätettävälle seokselle Kaasu = tuotettu biokaasu, Metaani, happi, rikkivety = biokaasu-analysointi							
Päivämäärä	pH	Kaasu (m3)	Paino (kg)	Metaani (%)	Happi (%)	Rikkivety (ppm)	Huom.
1.5.	7,33	31,576	3494				Ulos 80 kg, Syöttö 80 kg
2.5.	7,41	33,324	3466	72	1,1	5,2	Ulos 80 kg, Syöttö 50 kg
3.5.	7,34	35,514	3504	65	0,7	8	Ulos 40+40 kg, Syöttö 40+40 kg
4.5.	7,33	37,904	3501	71	1,2	8,4	Ulos 40+40 kg, Syöttö 40+40 kg
5.5.	7,35	40,098	3498	66	0,6	8,7	Ulos 40+40 kg, Syöttö 40+40 kg
6.5.	7,28	42,273	3494	67	0,8	6,1	Ulos 80 kg, Syöttö 80 kg
7.5.	7,35	44,600	3501				Ulos 80 kg, Syöttö 80 kg
8.5.	7,41	46,998	3501				Ulos 80 kg, Syöttö 80 kg
9.5.	7,39	49,408	3507	70	0,9	8,7	AUTOSEKVENSSI (20 kg x 6)
Viikottaiset mittaukset 2011							
VFA = mädätteen VFA-pitoisuus Alk = mädätteen alkaliniteettipitoisuus Hiili = mädätteen hiilipitoisuus Typpi = mädätteen typpipitoisuus C:N = hiilen ja typen suhde							
Päivämäärä	VFA (mmol/l)	Alk. (mmol/l)	VFA/alk.	Hiili (mg/l)	Typpi (mg/l)	C:N	
21.2.				3410	1077	3,2	
10.3.		58,0		5250	1174	4,5	
14.3.		59,3					
15.3.		58,4					
16.3.	3,6	59,2	0,06				
17.3.	2,9	60,5	0,05	5422	1453	3,7	
18.3.	2,8	59,9	0,05				
21.3.	2,9	62,1	0,05				
22.3.	3,4	62,5	0,05				
23.3.	3,5	62,0	0,06				
24.3.	3,1	62,0	0,05	5645	1539	3,7	
25.3.	3,6	62,9	0,06				
28.3.	4,3	65,5	0,07				
30.3.	3,2	63,6	0,05	6199	1609	3,9	
4.4.	4,1	71,1	0,06				
6.4.	7,3	73,7	0,10	7664	1784	4,3	
11.4.	4,2	82,3	0,05				
14.4.	4,0	84,7	0,05	7300	1702	4,3	
18.4.	9,3	92,6	0,10				
21.4.	8,2	96,8	0,08	11000	2810	3,9	
28.4.	9,6	103,8	0,09	10280	2909	3,5	
3.5.	8,3	109,4	0,08				
6.5.				3196	3029	1,1	

## Liite 2. Kaaviokuva biokaasulaitteistosta

