

# **Jäteveden biokaasutus ja lietteen kaasun tuottavuuden määrittäminen**

**Maarit Janhunen**

Opinnäytetyö

---



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Maarit Janhunen	
Työn nimi Jäteveden biokaasutus ja lietteen kaasun tuottavuuden määrittäminen	
Päiväys 24.04.2012	Sivumäärä/Liitteet 66/4
Ohjaaja Ari Mikkonen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu, Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikkö, Kuopio	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämä tutkimus on osana suurempaa esiselvitystä ja opinnäytetyössä keskitytään Lapinlahdella toteutettaviin koeajoihin siirrettävällä biokaasulaitoksella. Syötettävänä jätejakeina käytettiin Lapinlahden, Iisalmen ja Kiuruveden jätevesilietteitä. Koelaitoksen kahteen samansuuruiseen reaktoriin syötettiin samat jätejakeet. Toista reaktoria operoitiin mesofiilisellä (37 °C) ja toista termofiilisellä (55 °C) lämpötila-alueella. Lisäksi samaisista jätejakeista tehtiin vertailuna biokaasupanoskokeet laboratorio-olosuhteissa mesofiilisellä lämpötila-alueella.</p> <p>Koeajojen tutkimussuunnitelma laadittiin ennalta määritettyjen näytteiden kuiva-aineen ja orgaanisen kuiva-aineen perusteella. Tutkimustuloksia vertailtiin niin reaktoreiden tuottavuuden ja metaanipitoisuuden suhteen kuin biokaasupanoskokeisiin. Lisäksi lämpötilaloggereitten avulla seurattiin kaasun lämpötilaa kaasulinjoissa sekä kaasun koostumusta analysoitiin FTIR-tekniikalla.</p> <p>Termofiilinen prosessi tuotti kaasua lähes kaksi kertaa enemmän kuin mesofiilinen prosessi. Termofiilisen prosessin tulos oli 83 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS, kun se mesofiilisessä prosessissa jäi 46 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS. Viipymänä käytettiin 20 vuorokautta ja orgaaniseksi kuormitukseksi oli määritetty 1,8 kgVS/m<sup>3</sup>d. Vertailuna mesofiilisestä pullopanoskokeista saatiin edellä mainituilla syötteillä metaanin tuottavuudeksi 196 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS 20 vuorokauden kokeissa. Koelaitoksella oli enemmän teknisiä ja opeointi ongelmia mesofiilisessä reaktorissa. Lisäksi syötettävien jätejakeiden kuiva-aineen pitoisuudet ja orgaanisen aineen osuus vaihteli voimakkaasti koeajojen aikana heijastuen koelaitoksen tuloksiin.</p>	
Avainsanat siirrettävä biokaasutuslaitos, lietteen biokaasutus, käsittelyjäännös, orgaaninen kuormitus, viipymä	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Energy Technology			
Author Maarit Janhunen			
Title of Thesis Biogasification on waste water and quantify productiveness of sewage sludge			
Date	24.04.2012	Pages/Appendices	66/4
Supervisor Ari Mikkonen			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences, Kuopio			
<p><b>Abstract</b></p> <p>This study is part of a larger preliminary study and the theses focused on the Lapinlahti carried out a test run in a portable biogas plant. An input fraction was used Lapinlahti, Iisalmi and Kiuruvesi sewage sludge. Pilot plant reactors in two equal fractions were fed the same. The second reactor was operated mesophilic (37 ° C) and the other thermophilic (55 °c) temperature range. In addition methane production potentials were made as comparison of same fraction laboratory conditions in mesophilic temperature range.</p> <p>Series of tests, the research plan was drawn up predetermined samples specified in dry matter and organic dry matter basis. Research results of reactors productivity of biogas and methane content were compared to content of biogas as input tests. The gas temperature in the gas lines was monitored by temperature logger and gas composition was analyzed by FTIR-technique.</p> <p>Productiveness of thermophilic process was twice as much mesophilic process. Thermophilic process, the result was 83 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS, while the mesophilic process was 46 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS. Hydraulic retention time was used for 20 days, and the organic loading rate was determined 1,8 kgVS/m<sup>3</sup>d . Comparison mesophilic bottle of input tests was ahead of these feeds methane productivity 196 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS 20-day test. Testing unit was more technical and operating problems mesophilic reactor. Dry matter content and organic matter percentage of the feeding waste ranged a lot. Those affected to the results given by the testing unit.</p>			
<p><b>Keywords</b></p> <p>portable testing unit, biogasification of sludge, stabilised end-product, organic loading rate, hydraulic retention time</p>			



## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	8
2	TEOREETTISET LÄHTÖKOHDAT .....	9
2.1	Biokaasun koostumus ja kaasutuksessa huomioitavat tekijät.....	9
2.2	Biokaasun hyödyntämismuutokset .....	12
2.3	Biokaasun käsittely.....	15
2.4	Biokaasutuotannon toimintaa ohjaava lainsäädäntö.....	16
2.5	Anaerobinen hajoamisprosessi ja mikrobiologia.....	17
2.5.1	Hydrolyysi.....	18
2.5.2	Asidogeneesi.....	18
2.5.3	Asetogeneesi.....	19
2.5.4	Metanogeneesi .....	19
2.6	Mikrobien aineenvaihdunta, kasvu ja optimiolosuhteet .....	20
2.6.1	Ravinteet .....	20
2.6.2	Aineenvaihdunta.....	21
2.6.3	Biokaasutusprosessin optimiolosuhteet .....	22
2.6.3.1	Lämpötila.....	23
2.6.3.2	Lämmitys.....	24
2.6.3.3	Syöttö ja ravinteet.....	24
2.6.3.4	pH/Alkaliteetti .....	25
2.6.3.5	Inhibitio/toksiset yhdisteet.....	26
2.6.3.6	Sekoitus .....	27
2.6.3.7	Viipymä .....	30
2.6.3.8	Orgaaninen kuormitus .....	31
2.6.4	Biokaasutusprosessin valvonta.....	33
2.7	Kohdelaitoksen kuvaus .....	35
2.7.1	Siirrettävän koelaitoksen toimintaperiaate.....	35
2.7.2	Suoniemen puhdistamon puhdistustekniikat ja jätevesivirtaamat.....	39
3	KOEJÄRJESTELYT .....	42
3.1	Koejärjestelyjen ennakkovalmistelut, suunnittelu ja toteutus.....	42
3.2	Koelaitoksen päivittäinen seuranta.....	46
3.3	Laboratoriokokeet .....	47
4	TULOKSET .....	48
4.1	Kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuus.....	48
4.2	Kaasuntuottavuus Mobiilikoelaitoksella .....	51
4.3	Mobiilikoelaitoksen kaasunkoostumuksen mittaukset .....	55

4.4 Biokaasupanoskoe .....	56
5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSEN TARVE .....	58
LÄHTEET .....	60

## LIITTEET

- Liite 1 Siirrettävän koelaitoksen PI-kaavio
- Liite 2 Koelaitokseen syötettävien jätejakeiden TS/VS-määritysten tulokset
- Liite 3 Esimerkki mittauspöytäkirjasta
- Liite 4 Mobiilikoelaitoksen seurantaraportti

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni on osa suurempaa hanketta, jota kutsutaan työnimellä ” *Selvitys Lapinlahden jätevesilietteen ja mahdollisten muiden orgaanisten jakeiden yhteisbiokaasulaitoksesta ja käsittelyjäännöksen hyötykäyttömahdollisuuksista Ylä-Savon alueella.*” Työni keskittyy Lapinlahden puhdistamolla toteutettaviin koeajoihin siirrettävällä koelaitoksella sekä Kuopion laboratoriossa tehtäviin biokaasupanoskokeisiin. Syötettävät jätejakeet ovat Lapinlahden, Iisalmen ja Kiuruveden jätevesilietteet. Edellä mainittujen kuntien lisäksi hankkeessa mukana ovat Kemira Operon Oy, Ylä-Savon Jätehuolto Oy ja Savon Voima Oyj. Hankkeen vetäjänä toimii Savonia-ammattikorkeakoulu. Tutkimuksen tavoitteena on löytää pitkäjänteinen ratkaisu alueelle, jossa käsitellään suuria määriä teollisuudesta ja yhdyskunnista tulevaa jätevesilietettä. Opinnäytetyön tekijän roolina on koeajojen operointi Lapinlahdella ja tulosten analysointi koeajojen osalta.

Biokaasun energiasisältö riippuu sen sisältämän metaanin osuudesta ja energiasisältö voi vaihdella välillä 20–30 MJ/m<sup>3</sup>. Metaani on kasvihuonekaasu, joka itseksensä voimistaa kasvihuoneilmiötä vapautuessaan ilmakehään. Metaanin ollessa sidottuna biokaasuun tuotetaan bioenergiaa, jonka palamisen ei katsota vapauttavan hiilidioksidia yhtä paljon kuin fossiilisten polttoaineiden käyttö. Biokaasun sisältämä metaani on hiilidioksidia yli 20 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu, joten sen hyötykäytöllä voidaan merkittävästi vähentää kasvihuonepäästöjä. Bioenergian käyttöä on lisättävä tulevaisuudessa voimistuvan kasvihuoneilmiön ja uhkaavan öljypulan takia.

Biokaasua muodostuu orgaanisen eli eloperäisen aineen hajotessa mikrobien vaikutuksesta hapettomissa olosuhteissa. Biokaasu on uusiutuva ja ympäristöystävällinen polttoaine. Sillä voidaan tuottaa niin sähköä, lämpöä kuin mekaanista energiaa suhteellisin pienin kustannuksin. Myös käyttö liikenteen polttoaineena on mahdollista. Biokaasun tuottaminen hallitusti on mahdollista biokaasureaktoreissa ja kaatopaikoilla. Luonnostaan hajoamisprosessia ilmenee esimerkiksi valtamerissä ja suoalueilla.

Tämän työn tavoitteena on vertailla siirrettävän biokaasulaitoksen kaasun tuottavuutta kahdessa eri lämpötilassa: mesofiilinen (37 °C) ja termofiilinen (55 °C). Syötettävänä jätejakeina käytetään kolmen paikkakunnan puhdistamoilla käsiteltäviä teollisuuden ja yhdyskunnanjätevesilietettä. Tutkimuksessa arvioidaan syötettävien jätejakeiden epätasalaatuisuuden vaikutusta itse biokaasutusprosessiin sekä siirrettävään koelaitokseen.

## 2 TEOREETTISET LÄHTÖKOHDAT

Biokaasutus on stabiili prosessi, jossa vähennetään lietteen hajua. Biokaasutuksessa sekä tilavuus- että massareduktio pienenee, mikä vähentää lietteen loppukäsittely ja -sijoituskustannuksia. Biokaasutuksessa on myös kyse lietteen hygienisoinnista. Valtaosa patogeeneista tuhoutuu prosessissa. Hygienisoitu liete kelpaa usein ravinnerikkaaksi maanparannusaineeksi. Lietteän käsittely hygienisoinnilla on kuitenkin prosessina hidas. Investointikustannukset ovat merkittävät, sillä hygienisointi vaatii suuret reaktiotilavuudet, lietepumppuja, lämmönvaihtimia sekä kaasukompressoreita yms. Biokaasutuksella ei voida hyödyntää kaikkea lietteen sisältämää orgaanista materiaalia verrattuna esimerkiksi polttoon. Poltto on kuitenkin energian nettokuluttamista lietteen suuren vesipitoisuuden vuoksi. Esikäsittelyvaiheilla voidaan parantaa reduktiota, jolla on mahdollisesti negatiivinen vaikutus energiataseeseen (Lund 2010, 22–23).

Tässä luvussa keskitytään tarkastelemaan biokaasutuksessa huomioitavia osatekijöitä sekä itse mikrobiologiaa. Lisäksi käydään lyhykäisyydessään läpi biokaasutusta koskevaa lainsäädäntöä, hyödyntämisvaihtoehtoja ja nykyaikaisia käsittelymenetelmiä biokaasun jatkokäyttöä ajatellen. Tarkastelun kohteena on myös biokaasun energiatehokkuus ja sen sisältämä energiapotentiaali. Biokaasuprosessin eri vaiheissa vaikuttavat kemialliset reaktiot ja inhibitio ovat myös tarkastelun kohteina.

### 2.1 Biokaasun koostumus ja kaasutuksessa huomioitavat tekijät

Biokaasu on uusiutuva ja ympäristöystävällinen polttoaine, josta voidaan tuottaa sähköä, lämpöä ja mekaanista energiaa suhteellisin pienin kustannuksin. Biokaasun tuotannon teknologia ei ole vielä optimoitu muiden kaupallisten polttoaineiden tasolle. Biokaasuprosessin hapettomissa olosuhteissa muodostuu biokaasua orgaanisen eli eloperäisen materiaalin hajotessa mikrobien vaikutuksesta. Luonnossa samanlainen prosessi tapahtuu esimerkiksi eläinten suolistoissa, valtamerten ja muiden vesistöjen pohjissa sekä suoalueilla. Biokaasu on kaasuseosta, joka koostuu pääosin metaanista (45 – 75 %) ja hiilidioksidista (30 – 55 %). Lisäksi se sisältää jonkin verran seuraavia komponentteja:

- typpi,  $N_2$  (1 – 5 %)
- vety,  $H_2$  (0- 3 %)
- rikkivety,  $H_2S$  (< 0,5 %)
- happi,  $O_2$  (< 0,5 %)
- kosteus,  $H_2O$  (2-4 %)

- sekä havaittavissa määrin (ppm-pitoisuuksina) ammoniakkia, hiukkasia, metyylimerkaptania ( $\text{CH}_3\text{SH}$ ), dimetyylisulfidia ( $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ), metyylisulfidia ( $\text{CH}_3\text{SSCH}_3$ ) ja fluoria (F) sekä klooria (Cl) (Lund 2010, 53–54; Manu 2011, 15–18).

Biokaasu on väritön ja lähes hajuton kaasuseos, jonka tiheys on noin  $1,22 \text{ kg/m}^3$ , itsesyttymispiste  $650\text{--}750 \text{ }^\circ\text{C}$  ja tehollinen lämpöarvo  $14,4\text{--}21,6 \text{ MJ/m}^3$  (NTP). Yhdestä kuutiosta biokaasua saadaan energiaa 4-6 kWh ja palamistuotteina syntyy ainoastaan hiilidioksidia ja vesihöyryä (Kastensson 2011, 2; Manu 2011, 9, 15–18).

Biokaasu pyritään hyödyntämään ensisijaisesti biokaasulaitoksen välittömässä läheisyydessä. Sitä voidaan hyödyntää lisäksi lämmöntuotannossa, CHP-laitoksissa, mekaanisena energiana ja ajoneuvopolttoaineena. Ennen biokaasunhyötykäytön mahdollisuutta siitä on poistettava vesi eli biokaasulle on suoritettava ns. kuivaaminen. Lisäksi biokaasutusprosessissa muodostuu ravinnerikasta käsittelyjäännöstä, jota voidaan hyödyntää suoraan lannoitteena. Lannasta tuotetun biokaasun käsittelyjäännös soveltuu sellaisenaan lannoitteeksi, kun taas puhdistamolietteen maatalouskäyttö vaatii käsittelyn, joka voidaan tehdä kalkkistabiloinnilla, termisellä kuivauksella tai kemiallisella hydrolyysillä. Biokaasutuksessa muodostuva käsittelyjäännös tulisi hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti esimerkiksi lannoitteena tai vastaavina tuotteina (Kastensson 2011, 2; Manu 2011, 15–18).

Biokaasutuksessa on kyse anaerobisesta hajoamisprosessista, jossa mikroorganismit hajottavat hiilyhdisteitä hapettomissa olosuhteissa. Prosessissa vapautuu energiaa, joka sitoutuu lopputuotteena muodostuvaan metaaniin. Biokaasutuksen raaka-aineina voidaan käyttää eläintuotannon jätteitä, peltobiomassaa, yhdyskuntien biojätteitä, jätevedenpuhdistamoiden lietteitä ja teollisuuden biohajoavia jätteitä. Lisäksi voidaan kasvattaa energiakasveja. On järkevää käyttää erilaisia orgaanisia jätteitä jo pelkästään niiden saatavuuden ja edullisuuden takia. (Toivanen 2008, 8-9; Manu 2011, 15–18).

Biokaasutusprosessia voidaan toteuttaa kolmella eri lämpötila-alueella:

- psykrofiilinen 0-15 °C
- mesofiilinen 35–37 °C ja
- termofiilinen 50–55 °C.

Psykrofiiliselle prosessille on ominaista suuret reaktiivilavuudet ja vähäinen kaasuntuotto. Vastaavasti mesofiilinen prosessi ei ole herkkä prosessihäiriöille ja lisälämmityksen tarve on alhainen. Prosessi on lisäksi vakaa ja viipymä on 20–30 vuorokautta. Termofiilisessä prosessissa hajoaminen tapahtuu kaikkein täydellisimmin. Viipymä on vain 10–18 vuorokautta, mutta jo asteen lämpötilan muutos voi häiritä mikrobien toimintaa (Manu 2011, 15–18).

Hajoamisprosessi määräytyy käytettävän mädätyslämpötilan ja syötteen tai syöteseoksen kuiva-ainepitoisuuden (TS, Total Solids) mukaan. Prosessi voi olla joko panostyyppinen tai jatkuvatoiminen. Panosprosessi vaatii useamman reaktorin rinnakkaisen käytön. Jatkuvatoimisissa kaasua muodostuu keskeytyksettä, koska syötettä lisätään jatkuvasti ja säännöllisesti (Manu 2011, 15–18).

Hajoamisprosessin toimivuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- pH
- lämpötila
- kosteus
- ravinteet
- inhibitio
- syöttömateriaali
- syöttösuhde
- viipymä reaktoreissa (HRT, Hydraulic Retention Time)
- orgaaninen kuormitus (OLR, Organic Loading Rate, kgVS/m<sup>3</sup>d).

Prosessin eri vaiheissa toimivat eri bakteeriryhmät, joilla on omat optimaaliset pH-alueensa. Metaanibakteerilla se on 6,5–7,5 ja haponmuodostaja bakteerilla se on vastaavasti 5,2–6,3. Mikäli pH:n vaihteluita ilmenee prosessissa liian paljon, voi prosessi pahimmillaan keskeytyä (Manu 2011, 15–18).

Prosessiin vaikuttavat tekijät liittyvät myös toisiinsa:

- liiallinen orgaaninen kuormitus laskee pH:ta
- liian vähäinen syöttö voi nostaa pH:ta ja
- liiallinen haihtuvien rasvahappojen kertyminen reaktoriin happokäymisvaiheessa voi aiheuttaa pH:n laskemista
- lämpötilan vakaus on ratkaisevaa prosessin toimivuuden kannalta
- liian suuret lämpötilan vaihtelut voivat hävittää koko mikrobikannan ja pysäyttää prosessin
- lämpötila vaikuttaa ammoniakkin myrkyllisyyteen ja prosessissa muodostuvien yhdisteiden liukoisuuteen

- kosteus vaikuttaa lähinnä vain syötteiden ja syöteseosten liikuteltavuuteen ja
- inhiboivat aineet, kuten liialliset ravinteet, ammoniakki tai antibiootit häiritsevät prosessia ja ne tulee pyrkiä poistamaan prosessista (Manu 2011, 15–18).

Hajoamisprosessissa hajottavia orgaanisia yhdisteitä ovat proteiinit, hiilihydraatit ja lipidit. Prosessi itse koostuu neljästä päävaiheesta, jotka ovat

- hydrolyysi
- happokäyminen eli asidogeneesi
- etikkahapon muodostuminen eli asetogeneesi ja
- metaanin muodostuminen eli metanogeneesi (Manu 2011, 15–18).

Hydrolyysissä (pH 5-6) orgaaniset yhdisteet hajoavat veden avulla liukoiseen muotoon. Lopputuotteena saadaan aminohappoja, sokereita ja rasvahappoja. Hydrolyysissä metaania muodostuu melko vähän ja vaiheen edellytyksenä on vähintään 50 % vesipitoisuus. Happokäymisessä hydrolyysituotteet hajoavat lyhytketjuisiksi karboksyylihapoiksi, kuten etikka-, propioni- ja voihapoiksi. Kunkin hydrolyysituotteen hajoamista edistävät niihin erikoistuneet bakteerit. Etikkahapon muodostumisvaiheessa asetogeneettiset bakteerit pilkkovat karboksyylihappoja ja alkoholeja etikkahapoksi, hiilidioksidiksi ja vedyksi. Asetogeneesin optimaalinen pH-alue on vastaava kuin hydrolyysilläkin. Metanogeneesi vaiheessa metaania muodostuu asetaatti- ja vetyioneista sekä vedystä ja hiilidioksidista seuraavien reaktioyhtälöiden mukaisesti:



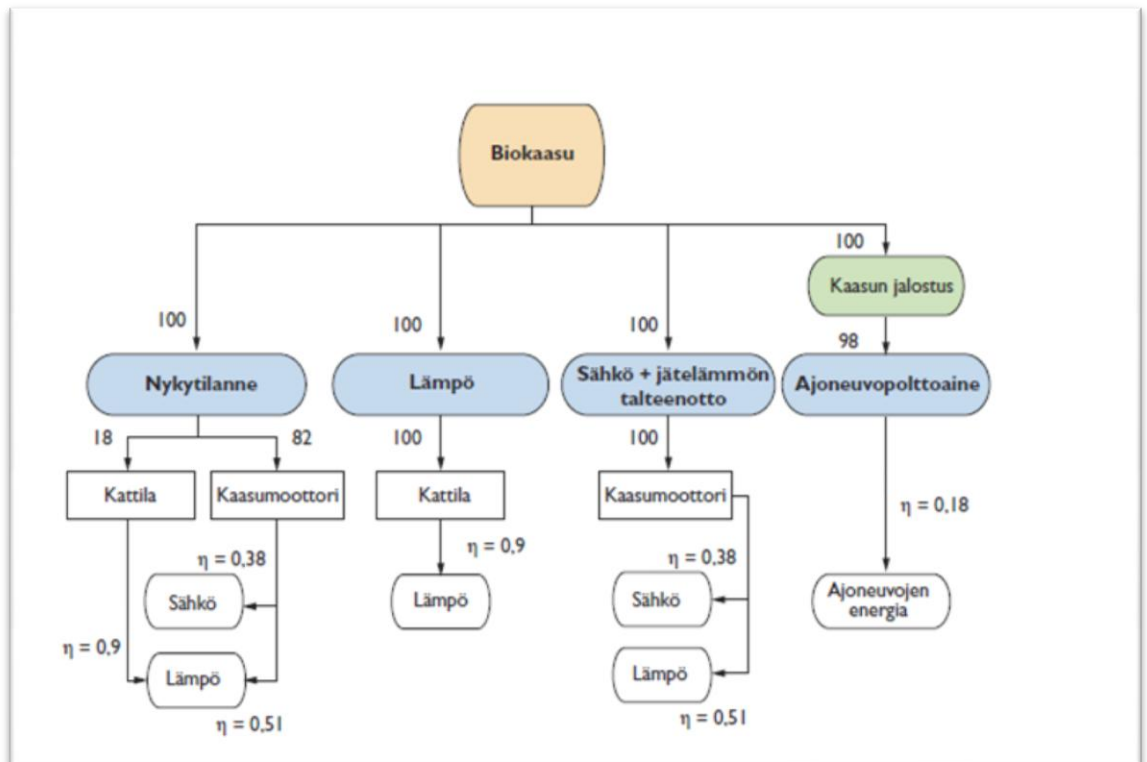
Biokaasutuksen mikrobiologiaa käydään tarkemmin läpi luvussa 2.5 ja optimiolosuhteita luvussa 2.6 (Manu 2011, 15–18).

## 2.2 Biokaasun hyödyntämismuutokset

Biokaasutuksen etuna on sen kaasun tuottavuus, mikä tekee prosessista energian suhteen nettotuottavan. Reaktoreiden tuottamalla energialla voidaan lämmittää itse prosessia ja pitää yllä sekoitusta. Lisäksi prosessista saatavalla energialla voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä (Lund 2010, 22–23).

Biokaasua voidaan tuottaa hapettomissa olosuhteissa biohajoavasta jätteestä tai lannasta, jolloin saadaan polttoaineeksi soveltuvaa metaania. Biokaasu soveltuu sekä lämmön että sähkön tuotantoon ja pienillä muutoksilla autojen moottorien polttoaineeksi. Tällä hetkellä biokaasusta tuotetaan energiaa 0,2 TWh. Teknisen potentiaalin ollessa 14 TWh. Biokaasun hyödyntämismuutoksia on esitetty kuvassa 1, jossa on

oletuksena 100 prosenttinen kaasun hyödyntäminen. Kaavion laadinnassa on oletettu, että valtaosa kaasusta johdetaan kaasumoottorille ja pienempi osa kattilaan. Ajoneuvopolttoaineen tapauksessa, kaasu jalostetaan biometaaniksi ja hyödynnetään kaasukäyttöisten bussien polttoaineena. Biometaanilla tarkoitetaan jalostusprosessissa lämpöarvoltaan maakaasuun verrattavissa olevaa kaasua. Kaasun jalostusmenetelmäksi vesipesun oletettiin riittävän, jolloin saadaan metaanipitoisuudeltaan 97 prosenttista biokaasua (Kangas ym. 2011, 56–57; WWF:n www-sivusto).



Kuva 1. Biokaasun hyödyntämismuutokset hyötysuhteineen (Kangas ym. 2011, 57).

Biokaasua tuotetaan niin kaatopaikoilla kuin erillisissä biokaasureaktoreissa. Tuotetun kaasun hyödyntämistavan valintaan vaikuttaa eniten laitoksen sijainti suhteessa energian loppukäyttäjiin. Edullisinta biokaasun hyödyntäminen on luonnollisesti biokaasulaitoksen välittömässä läheisyydessä. Kaasun hyödyntämismuutoksina ovat:

- lämmöntuotanto
- yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto (CHP, Combined Heat and Power)
- mekaaninen energia
- ajoneuvopolttoaine (Manu 2011, 12–13; WWF:n www-sivusto).

Maatilakohtaisissa laitoksissa tuotetulla biokaasulla lämmitetään tyypillisesti eläinsuojia. Esimerkiksi 100 naudan maatilalla syntyvästä lannasta voidaan tuottaa sähkö ja lämpö sekä lämmin vesi viidelle rakennukselle. Lisäksi saadaan polttoainetta kahdelle autolle. Lämmöntuotannossa investointikustannukset ovat pienet, hyötysuhde on noin 95 %. Lämmöntuotanto on hyvin toimintavarma vaihtoehto. Energiantuotan-

non investoinnin takaisinmaksuaika on alle 10 vuotta. Käytännössä tuotetulle kaasulle tehdään vain veden poisto, minkä jälkeen se voidaan polttaa kaasukattilassa. Poltossa hyödynnetään kaasun sisältämä kemiallinen energia, joka muuntuu lämpö- ja liike-energiaksi. Muun muassa Saksassa on käytössä tällaisia maatilareaktoreita, joiden arvioitu biokaasun tekninen sähköntuotanto potentiaali on 17 TWh vuodessa eli noin 4,4 miljoonan kotitalouksien kulutuksen verran (Lund 2010, 57, Manu 2011, 12–13; WWF:n [www-sivusto](http://www.sivusto)).

Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa voidaan saavuttaa jopa 90 prosentin hyötysuhde. CHP-laitoksissa tuotettu kaasu johdetaan kuivatuksen jälkeen kaasumoottorille tai mikroturbiineille. Mikroturbiinit ovat teholuokaltaan alle 1 MW. Kaasumoottorien kokonaisteho on 0,1-2 MW. Mikroturbiineja voidaan asentaa useita rinnakkain, jolloin tehot saadaan nousemaan kaasumoottorien tasolle. Kaasumootoreilla on mahdollista tuottaa mekaanista energiaa, jota mm. jätevedenpuhdistamolla tarvitaan ilmastusprosessissa. Mikroturbiinit ovat investointikustannuksiltaan arvokkaampia kuin kaasumoottorit, mutta käyttö- ja huoltokustannuksiltaan edullisempia (Manu 2011, 12–13).

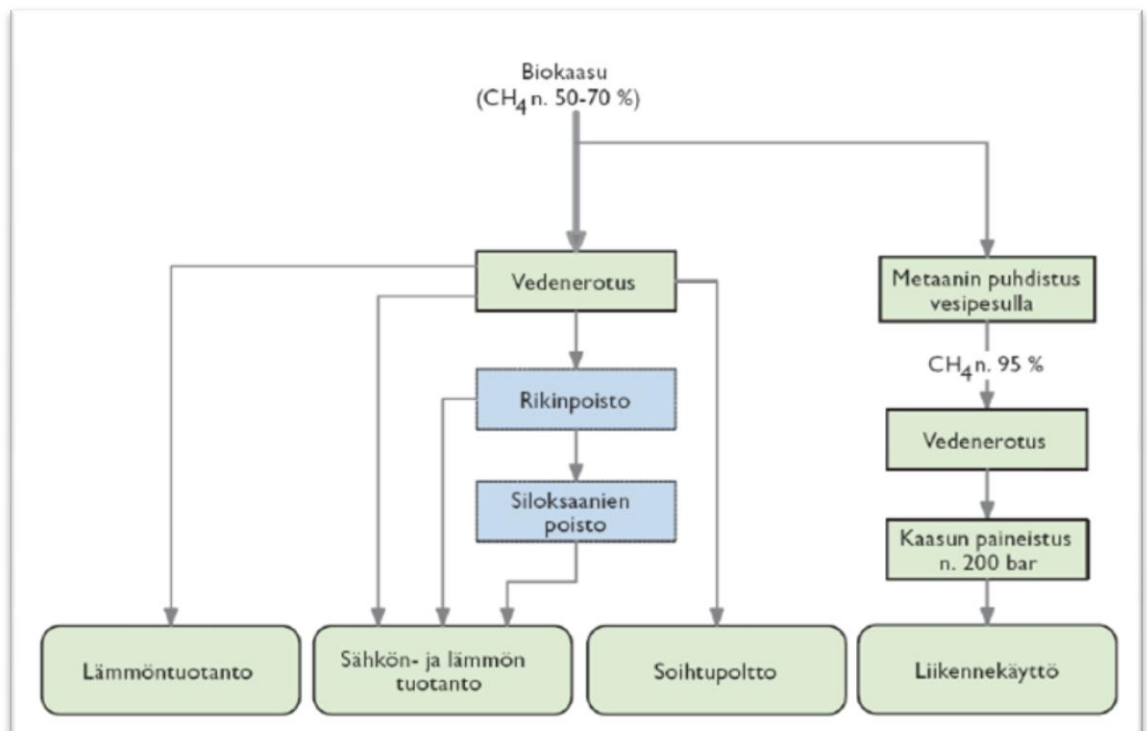
Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa Suomessa eniten käytetty menetelmä on kaasumoottori. Siinä generaattorin avulla tuotetaan sähköä. Muodostuvasta savukaasuista ja jäähdytysvedestä on mahdollista ottaa lämpöä talteen. Kaasumoottoreita on mahdollista hyödyntää suuren mittakaavan energian tuotannossa (Kangas ym. 2011, 14).

Biokaasua voidaan käyttää liikennepolttoaineena silloin, kun se on jalostettu maa-kaasua vastaavaksi. Tämä tarkoittaa epäpuhtauksien, kuten hiilidioksidin ja rikkiyhdisteiden poistoa pesemällä kaasua jalostuskolonnissa. Puhdistettu ja kuivattu kaasu varastoidaan 200–300 bar:n paineessa. Liikennebiokaasu on yleensä yhteensopivaa nykyaikaisten bensiinimoottorien kanssa. Raskaat ajoneuvot vaativat vielä erilliset kaasumoottorit. Liikennebiokaasun käyttö Suomessa ei ole kovin yleistä harvan jakeluverkoston sekä ajoneuvon vaatiman paineistetun polttoainesäiliön vuoksi (Manu 2011, 12–13).

### 2.3 Biokaasun käsittely

Biokaasutusprosessissa tuotettu biokaasu sisältää metaanin ja hiilidioksidin lisäksi rikkivetyä, typpeä, pölyhiukkasia ja vesihöyryä epäpuhtautena. Tästä syystä biokaasu on johdettava kuivan tai märän kaasupesurin läpi ennen käyttöä. Biokaasun yleisimmät käsittelytavat on esitetty kuvassa 2. Rikkivety aiheuttaa poltettaessa korroosiota sekä putkistoissa että laitteistoissa, lisäksi rikkivety muodostaa palaessaan rikinoksideja ( $\text{SO}_x$ ). Rikkivedyn poisto on mahdollista suorittaa kaasupesurilla, adsorptiolla, biosuodatuksella tai lisäämällä rautasuolaa lietteeseen. Jätevedenpuhdistamoilla rikkivedyn muodostuminen ei kuitenkaan usein ole ongelmana, koska niissä käytetään rautasulfaattia fosforin poistamiseen ja täten lietteeseen sitoutuva rauta ehkäisee rikkivedyn muodostumista (Lund 2010, 56–59).

Puhdistamoiden käsittelemien jätevesien joukkoon voi ajautua kotitalouksista kosmetiikka- ja hiustenhoitotuotteista peräisin olevia siloksaaneja. Näiden poistaminen pidentää kaasumoottorien ikää ja vähentää huoltotöiden tarpeellisuutta. Siloksaanit hapettuvat palaessaan piidioksidiksi ( $\text{SiO}_2$ ), joka kerääntyy kaasumoottoareiden sytytystulppiin, mänttiin ja sylinterirenkaisiin sekä öljyyn. Kaikki nämä osatekijät voivat aiheuttaa moottorien käyntiongelmia. Siloksaanien poistaminen onnistuu parhaiten aktiivihillisuodatuksella (Lund 2010, 56–59).



Kuva 2. Biokaasun yleisimmät käsittelytavat ja käyttötarkoitukset (Lund 2010, 57).

Reaktorin ollessa sylinterinmuotoinen kaasu kerääntyy reaktorin kannen alle lietepinnan yläpuolelle. Kansi voi olla kiinteä, kelluva tai membraani. Kelluvan kannen hyvänä puolena on kaasutilan tilavuuden vaihtelevuuden mahdollisuus. Membraanikansi on vuorostaan joustavaa materiaalia ja biokaasu pysyy membraanin sisällä kuten ilma ilmapallossa. Kaasuturvallisuuden huomioiminen on ensisijaisen tärkeää, sillä biokaasu muodostaa ilman kanssa räjähtävän seoksen. Kaasuputkissa ja varoventtiilissä tulisi olla liekinetsimet. Kiinteäkantiset reaktorit vaativat erillisen kaasuväestön (Lund 2010, 56–59).

#### 2.4 Biokaasutuotannon toimintaa ohjaava lainsäädäntö

Suomessa jätteiden käsittely kuuluu tehdä asianmukaisesti ja biokaasutus on yksi jätteiden käsittelymuoto. Biokaasun tuottaminen ja kerääminen on yleensä luvanvaraista toimintaa, vaikka sillä voidaankin jätteitä hygienisoida. Biokaasulaitoksen rakentaminen vaatii rakennusluvut sekä toiminta ympäristöluvan. Jätelain mukaan jätteestä on pyrittävä hyödyntämään ensisijaisesti sen sisältämä materiaali ja toissijaisesti sen sisältämä energia. Biokaasun tuotannossa tämä ehto täyttyy tavallisesti käänteisessä järjestyksessä (Manu 2011, 20–21).

Biokaasu luokitellaan koostumuksensa perusteella erittäin herkästi syttyväksi kaasuksi. Tuotannossa on sovellettava asetusta vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista (59/1999). Lisäksi valtioneuvoston asetuksesta maakaasun turvallisuudesta (551/2009) sovelletaan biokaasun talteenottoon, siirtoon ja jakeluun. Mikäli biokaasu tuotetaan reaktoreissa, asetusta ei sovelleta (Manu 2011, 20–21).

Euroopan Unionin ns. *RES-direktiivi* (*Renewable Energy Sources, uusiutuvat energialähteet*) määrää uusiutuvan energian käytön edistämistä (2009/28/EY). Tämä tarkoittaa, että Euroopan yhteisön alueella 20 % energian loppukulutuksesta ja 10 % liikennepolttoaineesta tulee olla peräisin uusiutuvista energialähteistä (Manu 2011, 20–21).

Suomen yksi suurimmista biovoimala hankkeista on Nastolassa oleva Biovakka Suomi Oy, jonka on tarkoitus käsitellä 120 000 tonnin kiintoainemäärää tuottaen 50 GWh vuodessa energiaa. Biokaasulaitoksen on tarkoitus aloittaa toiminta kevään 2012 aikana tuottaen täysin kotimaista ja uusiutuvaa liikennepolttoainetta. Energiaalan tavoitteena on saada biokaasulle tariffiksi 8- 10 senttiä kilowattitunnilta. Lisäksi hallitusohjelmaan on kirjattu sähkönsyöttötariffi, jossa sähköyhtiöt veloitettaisiin ostamaan biokaasulla tuotettua sähköä tiettyyn hintaan. Esimerkkinä, Saksassa tuote-

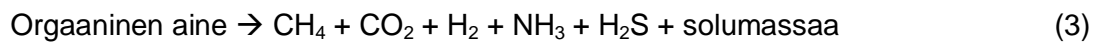
taan biokaasusta energiaa ja kyseisessä maassa on myös tariffit selkeästi korkeammat (Biovakka Oy:n www-sivusto; Pervilä T&T 2007).

Puhdistamolietteen käytöstä maataloudessa säättää neuvoston direktiivi (86/278/ETY), jonka mukaan liete on käsiteltävä ennen sen käyttöä maanviljelyksessä. Erityisesti termofiilistä biokaasutusprosessia pidetään hygienisoivana käsittelymenetelmänä. Eläinperäisiä jätteitä vastaavasti on käsiteltävä vähintään 70 °C:een lämpötilassa (Manu 2011, 20–21).

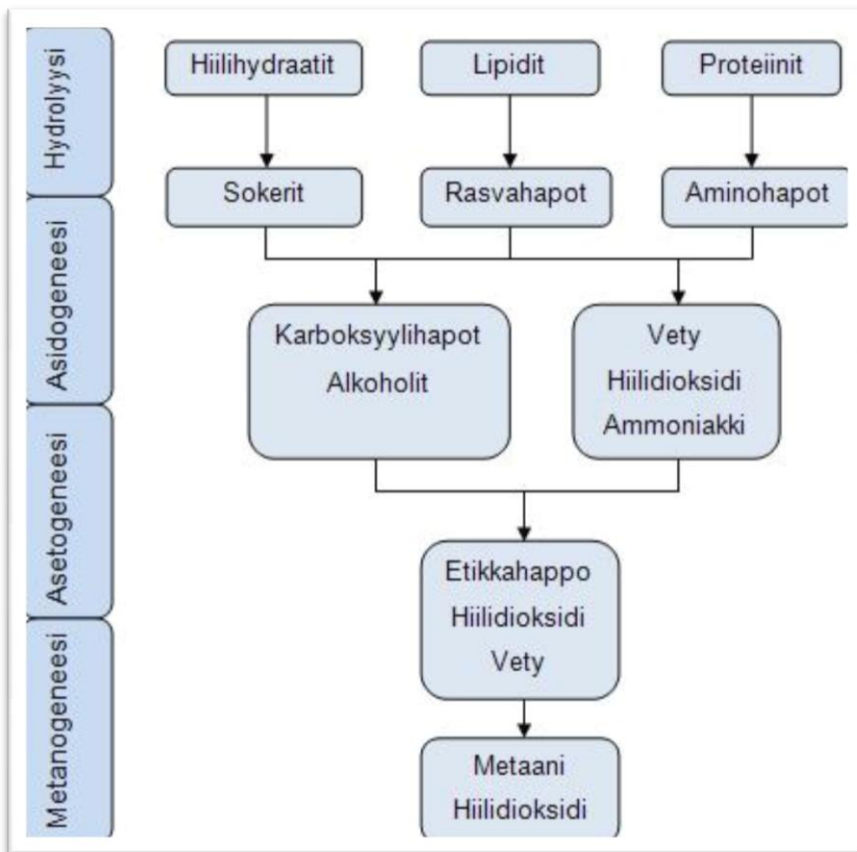
Puhdistamoliete on hyvin nestepitoista, joten sen käyttö orgaanisena lannoitteena tai maanparannusaineena ei ole soveliasta. Maanparannusaineeksi luokitellaan ainoastaan sellainen valmiste, jonka kuiva-ainepitoisuus on riittävä ylläpitämään maan fyysikaalisia ominaisuuksia ja lisäämään sen biologista toimintaa. Puhdistamolietteestä soveltuu maanparannusaineeksi ainoastaan lietteestä erotettu kuiva-aines (Toivanen 2008, 15–16).

## 2.5 Anaerobinen hajoamisprosessi ja mikrobiologia

Biokaasutus on monivaiheinen prosessi, jossa monimutkaiset ja suuret orgaaniset molekyylit muuttuvat metaanikaasuksi ja muiksi tuotteiksi. Biokaasutus tapahtuu bakteeritoiminnan tuloksena. Kokonaisreaktio voidaan esittää seuraavasti:



Biokaasutusreaktio on pääsääntöisesti bakteerien toimintaa, mutta reaktoreista saatavaa löytyä pieniä määriä sieniä ja alkueläimiä. Prosessista erottuu neljä eri vaihetta, jotka ovat kaikki riippuvaisia toisistaan. Lisäksi jokaisessa vaiheessa on oma ominainen bakteeriryhmä. Biokaasutusprosessin vaiheet ovat esitetty kuvassa 3 (Lund 2010, 10–13; Manu 2011, 17).



Kuva 3. Biokaasutusprosessin osavaiheet (Manu 2011, 17).

### 2.5.1 Hydrolyysi

Ensimmäisessä vaiheessa, *hydrolyysissä*, hydrolyyttinen bakteeriryhmä pilkkoo isoja, monimutkaisia orgaanisia yhdisteitä, kuten proteiineja, selluloosaa, ligniiniä ja lipidejä tuottamalla solunulkoisia hydrolyysientsyymejä, kuten sellulaasia, proteaasia ja lipaasia. Hydrolyysissä muodostuu aminohappoja, glukoosia, rasvahappoja ja glyserolia. Tämä vaihe on hidas ja esimerkiksi vaikeasti pilkottavien molekyylien kuten selluloosan ja ligniinin läsnäolo, rajoittavat prosessin tehokkuutta. Hydrolyysiä suorittava bakteeriryhmä on laaja ja monipuolinen, sillä erilaisten aineiden pilkkominen vaatii erilaisia entsyymejä. Hydrolyysissä työskentelevät sekä fakultatiivisesti anaerobiset että obligatorisesti anaerobiset bakteerit (Lund 2010, 10–13).

### 2.5.2 Asidogeneesi

Seuraavassa vaiheessa, *asidogeneesissä* eli happokäymisessä, hajotetaan hydrolyysivaiheen lopputuotteita. Haponmuodostaja bakteerit, fakultatiivisesti anaerobiset sekä obliigaattianaerobit, muuttavat sokerimolekyyliä, aminohappoja ja rasvahappoja orgaanisiksi hapoiksi, alkoholeiksi, ketoneiksi, asetaatiksi, hiilidioksidiksi ja vedyksi.

Asidogeneesin päätuote on etikkahappo, jonka lisäksi syntyy muita orgaanisia happoja kuten esimerkiksi propionihappoa, muurahaishappoa, maitohappoa, voi-happoa ja meripihkahappoa. Reaktiossa muodostuvia alkoholeja ja ketoneja ovat esimerkiksi etanoli, metanoli, glyseroli ja asetoni (Lund 2010, 10–13).

### 2.5.3 Asetogeneesi

Kolmannessa vaiheessa, *asetogeneesissä*, ns. asetogeneettiset bakteerit muuttavat rasvahappoja ja alkoholeja etikkahapoksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. Tämän bakteerikannan toiminnan edellytyksenä on alhainen vetytiteisyys, mikäli vety akkumuloituu niiden ympäristöön ja vedyn osapaine kasvaa liian suureksi, bakteerien kasvu inhiboituu ja asetogeneesi lakkaa. Raja-arvona vedyn osapaineelle voidaan pitää  $10^{-4}$  bar. Asetogeenien tuottamaa vetyä kuluttavat metanogeenit ja nämä kaksi bakteeriryhmää elävät symbioosissa. Vedyn tuottajien ja kuluttajien välillä vallitsee siis tasapaino, jota kutsutaan lajien väliseksi vedyn siirroksi. Mikäli asetogeneesi lakkaa toimimasta, metanogeenit jäävät ilman substraattia ja myös metanogeneesi loppuu (Lund 2010, 10–13).

Osan asetogeneesin tuottamasta vedystä kuluttavat sulfaattia pelkistävät bakteerit ja näin kilpailevat siitä metanogeenien kanssa. Metanogeenit ovat vallitsevia asetaattipitoisuuden ollessa korkea ja vastaavasti asetaattipitoisuuden ollessa matala, sulfaattia pelkistävät bakteerit ovat vallitsevia ja tuottavat rikkivetyä. Tällä saattaa olla inhiboiva vaikutus metanogeenien ja asetogeenien toimintaan (Lund 2010, 10–13).

### 2.5.4 Metanogeneesi

Neljännessä vaiheessa, *metanogeneesissä*, muodostuu metaania. Metanogeenit tai metaanin muodostajat ovat obliigaattiaerobeja. Näillä bakteereilla on ohut soluseinä, mikä tekee niistä tavallisia bakteereja herkempiä. Luonnossa näitä bakteereja esiintyy märehijöiden pötsissä ja orgaanisessa sedimentissä. Ulkomuodoltaan tähän ryhmään kuuluvat bakteerit ovat hyvin erilaisia ja ne voivat olla gram-positiivisia tai gram-negatiivisia ja ne voivat olla sauvamaisia, kierukkamuotoisia tai pallomuotoisia. Metanogeenit ovat täysin ainutlaatuisia, sillä mikään muu organismi ei pysty metaania tuottamaan (Lund 2010, 10–13).

Biokaasutusprosessia ajatellen, on olemassa kaksi tärkeää metanogeeniryhmää. Näistä ensimmäinen ryhmä on hydrogenotrofiset metanogeenit, jotka muuttavat hiilidioksidia ja vetyä metaaniksi ja vedeksi seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



Edeltävän vaiheen bakteeriryhmän eli asetogeenien toiminnan edellytyksenä oli riittävän alhainen vedyn osapaine, jota yllä esitetty reaktio kontrolloi. Toisen ryhmän muodostavat asetotrofiset metanogeenit, jotka pilkkovat asetaattia metaaniksi ja hiilidioksidiksi seuraavasti (Lund 2010, 10–13):



Tätä kutsutaan asetoklastiseksi metanogeneesiksi, jolla tuotetaan 70 % metaanista ja loput 30 % tuotetaan hydrogenotrofisesti. Metanogeenit ovat obligaattianaerobeja, jotka kuolevat jos niiden elinympäristössä esiintyy happea. Molemmilla tavoilla muodostuneet metanogeeniryhmät kasvavat hitaasti ja ovat herkkiä olosuhteiden muutoksille. Generaatioaika eli aika, joka kuluu solupopulaation tai solumassan kaksinkertaistumiseen, on lämpötila riippuvainen. Esimerkiksi 35 celsiusasteessa generaatioaika on 3 päivää, kun se 10 celsiusasteessa on jopa 50 päivää (Lund 2010, 10–13).

## 2.6 Mikrobien aineenvaihdunta, kasvu ja optimiolosuhteet

### 2.6.1 Ravinteet

Mikrobit tarvitsevat kasvaakseen ja lisääntyäkseen energiaa, jota ne saavat hiililähteistä sekä erilaisista orgaanisista ja epäorgaanisista ravinteista. Hiili- ja energialähteitä kutsutaan substraateiksi. Hiiltä mikrobit saavat orgaanisesta materiaalista tai hiilidioksidista. Tämän mukaan mikrobit jaetaan heterotrofeiksi, mikäli ne käyttävät orgaanista materiaalia ja autotrofeiksi, mikäli käyttävät hiilidioksidia. Mikrobit, jotka hyödyntävät valoa, kutsutaan fototrofeiksi ja kemiallisia reaktioita hyödyntäviä mikrobeja kutsutaan kemotrofeiksi. Mikrobit pystyvät muuttamaan hiilen solumassaksi energian avulla, jota saadaan kemiallisista reaktioista, kuten hapetus-pelkistysreaktioista tai valoenergiasta. Biokaasutettavan materiaalin homogeenisuudella ja täten mahdollisella esikäsitteilyllä on suora vaikutus prosessin metaanin tuottavuuteen (Kastensson 2011, 2; Lund 2010, 8 - 9).

## 2.6.2 Aineenvaihdunta

Aineenvaihdunnan näkökulmasta katsottuna, mikrobit voidaan jakaa kahteen pääryhmään. Ensimmäisellä ryhmällä on hengitysaineenvaihdunta. Kyseiset mikrobit tuottavat energian entsyymaattisten reaktioiden kautta, jossa substraatin hajoamisreaktiossa syntyneet elektronit siirtyvät solun ulkoiseen elektroniakseptoriin. Kyseessä on aerobinen hengitys, mikäli happimolekyyli toimii elektroniakseptorina hengitysaineenvaihdunnassa. Tällaisia aerobisesti hengittäviä mikrobeja kutsutaan obligatorisesti aerobisiksi mikrobeiksi ja nämä ovat riippuvaisia molekyylimolekyylihapen läsnäolosta (Lund 2010, 8 - 9).

Toinen ryhmä käyttää käymisaineenvaihduntaa eli fermentoivaa aineenvaihduntaa. Nämä mikrobit eivät tarvitse ulkoista elektroniakseptoria vaan elektronien siirto tapahtuu kokonaan solunsisäisesti. Fermentoivat mikrobit tuottavat vähemmän energiaa ja enemmän sivutuotteita kuin aerobinen aineenvaihdunta. Käymisaineenvaihdunnan eli fermentoivan aineenvaihdunnan tuottaessa vähemmän energiaa kuin hengitysaineenvaihdunnan, anaerobiset mikrobikannat kasvavat ja lisääntyvät aerobisia mikrobeja hitaammin ja tuottavat vähemmän solumassaa. Tällaiset mikrobit jotka tuottavat energiansa fermentoinnilla ja jotka pystyvät elämään vain täysin hapettomissa olosuhteissa kutsutaan obligatorisesti anaerobisiksi mikrobeiksi. Metaania tuottavat bakteerit ovat esimerkki obligatorisesti anaerobisista mikrobeista. Kyseisten mikrobien olemassa olo voi häiriintyä hapetus-pelkistyspotentiaalın kasvaessa, mikä voi tapahtua happea sisältävien yhdisteiden läsnä ollessa (Lund 2010, 8 - 9).

Fakultatiivisesti anaerobiset mikrobit pystyvät elämään sekä hapellisissa että hapettomissa olosuhteissa. Mikrobit sopeuttavat aineenvaihduntansa hapen saatavuuden mukaan käyttämällä hapetettuja epäorgaanisia yhdisteitä ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{CO}_2$ ) elektroniakseptorina hapen sijaan. Denitrifikaatiobakteerit lukeutuvat tähän ryhmään ja ne käyttävät nitraattia elektroniakseptorina. Lisäksi on vielä olemassa aerotolerantteja anaerobisia bakteereja, joilla on täysin fermentoiva aineenvaihdunta, mutta sievät happea elinympäristössään. Taulukossa 1 on esitetty eri mikrobien jako toiminnan mukaan (Lund 2010, 8 - 9).

Taulukko 1. Mikro-organismien luokitus elektronin luovuttajan, elektroniakseptorin, hiililähteen ja lopputuotteen perusteella (Lund 2010, 8 - 9).

Bakteerityyppi	Reaktio	Hiililähde	Elektronin luovuttaja	Elektroniakseptori	Lopputuote
Aerobinen, heterotrofinen	Aerobinen hapettuminen	Orgaaninen yhdiste	Orgaaninen yhdiste	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
Aerobinen, autotrofinen	Nitrifikaatio	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Fakultaatiivinen, heterotrofinen	Denitrifikaatio	Orgaaninen yhdiste	Orgaaninen yhdiste	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
Anaerobinen, heterotrofinen	Happokäyminen	Orgaaninen yhdiste	Orgaaninen yhdiste	Orgaaninen yhdiste	Haihtuvat rasvahapot (VFA)
	Metanogeneesi	Orgaaninen yhdiste	Haihtuvat rasvahapot (VFA)	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>

### 2.6.3 Biokaasutusprosessin optimiolosuhteet

Biokaasutuksessa tulisi kaikkien osavaiheiden ja bakteeriryhmien toimia tasapainossa keskenään. Bakteeriryhmien kokoonpano vaikuttaa suoraan eri vaiheisiin ja lopputuotteisiin. Mikäli vallitsevat olosuhteet muuttuvat, saattaa tämä tasapaino häiriintyä koska optimiolosuhteet eroavat jonkin verran toisistaan. Tällä on suora vaikutus muodostuviin välituotteisiin ja koska metaanin muodostuminen on riippuvainen näistä välituotteista, vaikutukset näkyvät myös metaanin tuotannossa määrällisesti ja laadullisesti. Pahimmillaan metanogeenien toiminta lakkaa ja prosessi pysähtyy. Prosessin uudelleen käynnistäminen ja stabilointi vievät runsaasti aikaa, joten optimiolosuhteiden ylläpito on hyvin tärkeää (Lund 2010, 13–21).

Optimiolosuhteilla tarkoitetaan tässä olosuhteita, jossa prosessi on tasapainossa ja metaanin tuotto on mahdollisimman suuri. Optimiolosuhteiden ylläpitäminen on haasteellista, sillä niin moni parametri vaikuttaa siihen. Yhden parametrin muuttuessa vaikutus prosessiin voi olla epäsuora tai suora (Lund 2010, 13–21).

### 2.6.3.1 Lämpötila

Lämpötila on yksi pääparametreista toimivalle biokaasutusprosessille. Lämpötilan tulisi olla tasaista, mikä voidaan varmistaa riittävällä sekoituksella. Jo muutaman asteen lämpötilan vaihtelut voivat inhiboida etenkin metanogeenien toimintaa. Metanogeenit ovat aktiivisia mesofiilisellä (35 – 38 °C) ja termofiilisellä (50 – 55 °C) lämpötila-alueella. Lisäksi on olemassa vielä psykrofiilinen (5 – 25 °C) ja ääritermofiilinen (> 65 °C) lämpötila-alue (Lund 2010, 13–21).

Metanogeenien toiminta on inhiboitunut lämpötila välillä 40 – 50 °C. Lämpötilan pudotessa hapon muodostus jatkuu mutta metanogeneesi inhiboituu. Metanogeenit ovat hyvin herkkiä lämpötilan muutoksille ja onkin tärkeämpää pyrkiä ylläpitämään tasainen lämpötila kuin jatkuvasti tavoitella optimilämpötilaa. Lämpötilojen vaihtelu vaikuttaa suoraan mikrobien toimintaan (Lund 2010, 13–21).

Tässä tutkimuksessa vertailtiin mesofiilistä ja termofiilistä prosessia, joiden edut ja haitat on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Mesofiilinen prosessi on huomattavasti suositumpi ja käytetympi luultavasti pienemmän lämmitystarpeensa vuoksi. Termofiilinen prosessi vaatii kaksinkertaisen lämmitysenergiämäärän mesofiiliin verrattuna. Prosessina se on kuitenkin niin paljon tehokkaampi ja vaatii täten pienemmän reaktiivilavuuden (Lund 2010, 37–38).

Taulukko 2. Mesofiilisen prosessin edut ja haitat (Lund 2010, 37).

<b>Edut</b>	<b>Haitat</b>
Helppo ajaa	Korkeat investointikustannukset (suuri reaktori)
Suosituin ja tunnetuin prosessi	Vaatii suuremman reaktorin/pidemmän viipymääjan
Homogenisointi	Huonompi lietteen hygienisointi
Tuotetusta energiasta pienempi osa menee reaktorin lämmittämiseen	Herkkä kuormituspiikeille ja ylikuormitukselle (kestää vain noin +8 – 15 % päivittäistä ylikuormitusta riippuen olosuhteista)

Taulukko 3. Termofiilisen prosessin edut ja haitat (Lund 2010, 37)

Edut	Haitat
Alhaisemmat investointikustannukset pienemmän reaktorikoon takia	Tuotetusta energiasta suurempi osa menee reaktorin lämmittämiseen
Paremmat vedenpoisto-ominaisuudet	Laitoksen sisäinen COD-kuormitus kasvaa
Hieman parempi orgaanisen aineen reduktio	Vaikea operoida, epästabiliimpi, herkkempi lämpötilan vaihteluille ja inhiboineille
Parempi patogeenien tuhoaminen	Biokaasutetulla lietteellä voimakkaampi haju kuin mesofiilisesti biokaasutetulla lietteellä
	Lietteen kuivauksessa tarvitaan enemmän kemikaaleja

### 2.6.3.2 Lämmitys

Tasaisella lämmityksellä varmistetaan prosessin tasaisuus. Reaktorille voidaan laskea lämmityshäviöt eli lämmityksen tarve seuraavalla kaavalla:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

missä  $q$  on lämpöhäviö, J/s = W

$U$  on kokonaislämmönsiirtokerroin, W/Km<sup>2</sup>

$A$  on pinta-ala, jonka kautta lämmönhäviö tapahtuu, m<sup>2</sup>

$\Delta T$  on lämpötilaero pinnan molempien puolien välillä, K

Aiemmin on käytetty paljon lämmityskierukoita, mutta tästä on luovuttu kierukoiden likaantumisongelmien takia. Reaktoreita voidaan lämmittää sisäisesti, mutta tällöin reaktorit on tyhjennettävä kokonaan huollon ajaksi. Nykyisin reaktoreita lämmitetään pumppaamalla liete reaktorin ulkopuolella olevan lämmönvaihtimen läpi. Tähän tarkoitukseen soveltuu esimerkiksi spiraalilämmönvaihdin tai uppokuumennin. Lämmitysvesi pidetään yleensä 68 °C:na, jolloin lämmönvaihtimen pinta ei likaannu lietteestä.

### 2.6.3.3 Syöttö ja ravinteet

Mikrobit tarvitsevat erilaisia ravinteita ja tärkeimpiä makroravinteita ovat hiili, fosfori ja typpi. Erityisen tärkeä on oikea C/N – suhde, jonka olisi oltava vähintään 25:1 opti-

maalisen kaasun tuottavuuden saavuttamiseksi. Kuvattaessa syötteen hiilipitoisuutta, puhutaan yleensä COD- luvusta. Mädätysprosessin orgaaninen kuormitus vaikuttaa suoraan prosessin vaatimien ravinteiden suhteeseen (Lund 2010, 13–21).

Epäorgaaniset aineet ovat myös tärkeitä mikrobien aineenvaihdunnan kannalta. Näitä ovat muun muassa typpi (N), rikki (S), fosfori (P), kalium (K), magnesium (Mg), kalsium (Ca), rauta (Fe), natrium (Na) ja kloori (Cl). Lisäksi hivenaineita tarvitaan hyvin pienissä määrin ja näitä ovat esimerkiksi sinkki (Zn), mangaani (Mn), molybdeeni (Mo), seleeni (Se), koboltti (Co), kupari (Cu), nikkeli (Ni), vanadiini (V) ja wolframi (W). Kolmanneksi jotkut mikrobit tarvitsevat näiden lisäksi eräitä orgaanisia yhdisteitä joita eivät pysty itse syntetisoimaan. Näitä ovat aminohapot, puriini ja pyrimidiini sekä vitamiinit kuten esimerkiksi riboflaviini, tiamiini, niasiini, B6- ja B12 – vitamiinit, foolihappo ja biotiini (Lund 2010, 13–21).

#### 2.6.3.4 pH/Alkaliteetti

Biokaasutuksessa optimaalinen pH on neutraalin paikkeilla eli alueella 6,8 – 7,2. Metanogeenit ovat erittäin herkkiä pH:n suhteen, mutta hydrolyysissä ja asidogeneesissä bakteerien optimi pH on 5 – 6. Jos prosessia ylikuormitetaan, häiriintyy metanogeenien toiminta ja pH laskee. Tällöin vetyä ei kuluteta prosessista, asetogeneesien toiminta häiriintyy ja propaanihappoa alkaa muodostua. Koko prosessi menee tämän seurauksena happaman puolelle (Lund 2010, 13–21).

Alkaliteetilla kuvataan puskurikapasiteettiä eli kykyä vastustaa pH:n muutosta. Alkaliteetti riippuu pääosin liukoisesta bikarbonaatti-ionista ( $\text{HCO}_3^-$ ), joka on tasapainossa ilman hiilidioksidin kanssa. Jos alkaliteetti on korkea, hapon lisäys ei aiheuta rajua pH:n alenemaa. Kuitenkin happo kuluttaa alkaliteettiä. Mikäli biokaasutusprosessi toimii normaalisti, riittävä alkaliteetti muodostuu automaattisesti ja prosessi on itsepuskuroituva. Alkaliteetti ilmoitetaan yleensä yksikössä  $\text{mgCaCO}_3/\text{l}$  tai  $\text{mmol/l}$  ja suositeltava taso on 3500 – 5000  $\text{mgCaCO}_3/\text{l}$ . Prosessin häiriintyessä alkaliteettiä voidaan ylläpitää kemikaalilisäysten avulla (Lund 2010, 13–21).

## 2.6.3.5 Inhibitio/toksiset yhdisteet

Inhibitiota aiheuttavat aineet rajapitoisuuksineen on lueteltu taulukossa 4.

Taulukko 4. Inhiboivat yhdisteet ja niiden rajatapaukset (Lund 2010, 13–21).

Inhiboiva yhdiste	Rajapitoisuus	Yksikkö
Propionihappo	1000	mg/l
NH <sub>3</sub> (liuennut)	➤ 80	mg/l
	➤ 50	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1500 – 3000	mg/l
	1500 – 8000	
HS <sup>-</sup> , S <sup>2-</sup>	200	mg/l
	150	
Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> ja Mg <sup>2+</sup>	➤ 1500	mg/l
	1000 – 5500 (lievä)	
	3000 – 12 000 (voimakas)	

Biokaasua muodostuu hapettomissa olosuhteissa ja hapen läsnäolo reaktorissa voi muodostaa metaanin kanssa räjähtävän seoksen. Metanogeenit eli metaaninmuodostajat eivät siedä hapen läsnäoloa ympäristössään (obligatorisesti anaerobisia) ja hapetetut epäorgaaniset yhdisteet, kuten nitraatit voivat inhiboida niiden kasvua (Lund 2010, 13–21).

Kuormituksen kasvaessa liian suureksi, mikrobien aineenvaihdunnan tuotteet saattavat inhiboida niiden kasvua. Tällainen voi tapahtua esimerkiksi asetogeneesissä bakteerien tuottamalla vedyllä. Vastaavasti pitkäketjuisten rasvahappojen hajotessa inhiboiva vaikutus korostuu kalvon muodostuksella bakteerien ympärille. Haihtuvat hapot, kuten propionihappo, voivat inhiboida prosessia esiintyessään runsaina määrinä. Toksiset vaikutukset kuitenkin laimenevat pH:n pysytellessä neutraalina. Kaasumainen liuennut ammoniakki (NH<sub>3</sub>) on toksista metanogeenille ja tätä muodostuu ainoastaan pH:n ollessa koholla. Vastaavasti ammoniumioneja (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) bakteerit käyttävät ravintonaan (Lund 2010, 13–21).

Liukoista sulfidia (HS<sup>-</sup> ja S<sup>2-</sup>) bakteerit hyödyntävät rikkilähteenä, mutta suuret sulfidipitoisuudet ovat haitaksi. Rikkivety (H<sub>2</sub>S) aiheuttaa myös toksisuutta sekä asidogeenille että metanogeenille. Kaikkien rikkiyhdisteiden pitoisuudet riippuvat pH:sta, metallien läsnäolosta sekä kaasufaasin koostumuksesta (Lund 2010, 13–21).

Raskasmetallit, kuten koboltti ja kupari, lasketaan hivenaineisiin, mutta vapaina niillä voi olla prosessin kannalta toksisia vaikutuksia. Useimmiten ne eivät kuitenkaan aiheuta ongelmia, koska kyseiset aineet saostuvat suoloina. Kuitenkin suurilla suolapitoisuuksilla voi olla inhiboiva vaikutus. Lisäksi toksisia yhdisteitä ovat klooratut hiilivedyt, bentseeniyhdisteet, syanidit, tanniinit, erilaiset desinfiointi- ja puhdistusaineet sekä antibiootit (Lund 2010, 13–21).

Prosessin stabiilit olosuhteet auttavat mikrobeja sietämään pitkäaikaisiakin toksisia olosuhteita. Mikrobien sietokyky riippuu prosessin kokonaishallinnasta ja mädätysprosessin lieteistä (Lund 2010, 13–21).

#### 2.6.3.6 Sekoitus

Riittäväällä sekoituksella varmistetaan, että ravintoaineet jakaantuvat tasaisesti ja kaasu vapautuu kaasutilaan. Lisäksi sekoituksen tarkoituksena on pitää reaktorin sisältöä fysikaalisesti ja kemiallisesti homogeenisena. Tällöin vältetään lämpötila- ja konsentraatiogradienttien muodostuminen sekä saatetaan käsiteltävä materiaali tehokkaasti kosketuksiin mikrobien kanssa. Sekoituksen ansiosta myös epäedulliset, kuten toksiset yhdisteet, jakaantuvat prosessissa tasaisesti aiheuttaen vähemmän vahinkoa (Lund 2010, 13–21).

Reaktorin muodolla on suora vaikutus prosessin kulkuun. Muoto yhdessä sekoituksen kanssa vaikuttaa suoraan reaktorin sisällä vallitseviin olosuhteisiin. Huonossa tapauksessa voi muodostua ”kuolleita” alueita, mikä lyhentää suoraan lietteen viipymää ja pienentää reaktorin hyötytilavuutta. Epäedullinen muotoilu lisäksi hankaloittaa operointia sekä kasvattaa huolto- ja kunnossapitokustannuksia (Lund 2010, 13–21, 37–38).

Sekoituksen ollessa riittämätön, prosessissa voi ilmetä vaahdon muodostusta, kiintoaineiden kertymistä reaktorin pohjalle, kerrostumista sekä kaasun muodostuksen heikkenemistä. Kiintoaineiden kerrostuneisuus pienentää tilavuutta reaktorissa ja lyhentää merkittävästi viipymää. Tästä luonnollisesti aiheutuu prosessihäiriöitä (Lund 2010, 13–21).

Sekoituslaitteistoja on pääsääntöisesti kolmenlaisia: mekaaninen sekoitus, sekoitus kaasulla tai lietteenkierrätys. Sekoituksen tarkoitus on estää lietteen lajittuminen eli-minoiden reaktorin lämpötila- ja konsentraatiogradientteja. Lisäksi riittävän tehokkaal-

la sekoituksella estetään vaahtoamista ja hiekan kerääntymistä. Reaktorin koko ja muotoilu vaikuttavat sekoituksen tarpeellisuuteen. Sekoituslaitteiston tulisi kestää mahdollisimman pitkään ilman huoltoja, sillä kyseisten toimenpiteitten aikana voi reaktoriin päästä happea tai muita ei haluttuja komponentteja (Lund 2010, 47–49).

Sekoituslaitteiston valintaan vaikuttaa investointikustannusten lisäksi huoltotarve, prosessityyppi ja lietteen ominaisuudet kuten viskositeetti. Viskositeetti on suoraan riippuvainen lämpötilasta, kuiva-ainepitoisuudesta ja orgaanisen aineen määrästä. Lämpötilan noustessa viskositeetti pienenee ja vastaavasti kuiva-ainepitoisuuden noustessa viskositeetti suurenee (Lund 2010, 47–49).

Sekoitusteho ilmoitetaan reaktorin tilavuutta kohden yksikön ollessa  $W/m^3$ . Sekoitusintensiteetti voidaan ilmaista nopeusgradientilla  $G$  ja laskea seuraavalla kaavalla:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu * V}} \quad (2)$$

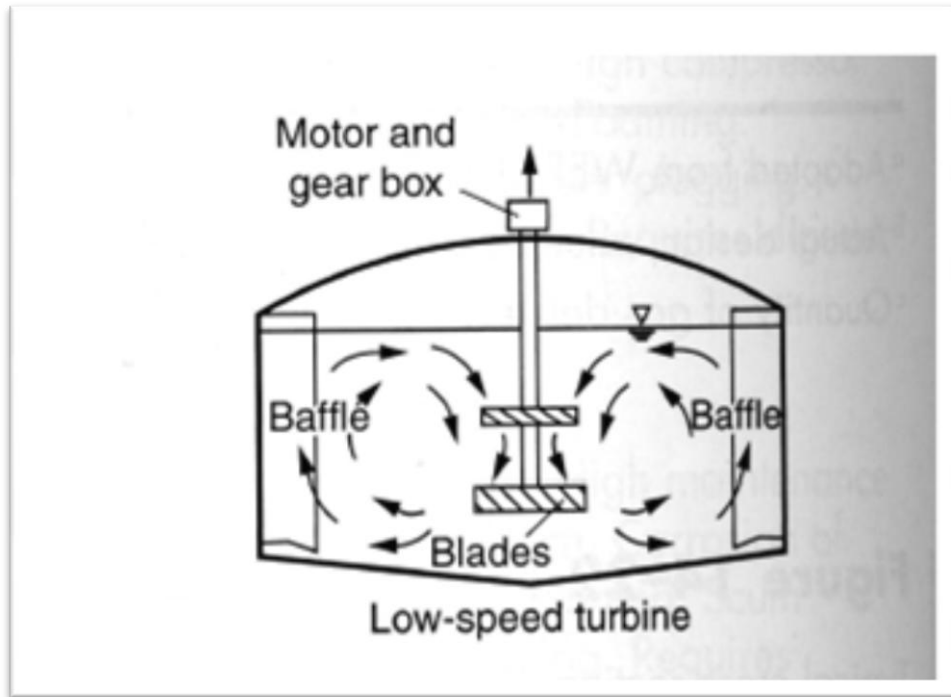
missä  $G$  on nopeusgradientin neliöllinen keskiarvo,  $s^{-1}$

$P$  on sekoitusteho,  $W$

$\mu$  on dynaaminen viskositeetti,  $Pa*s$

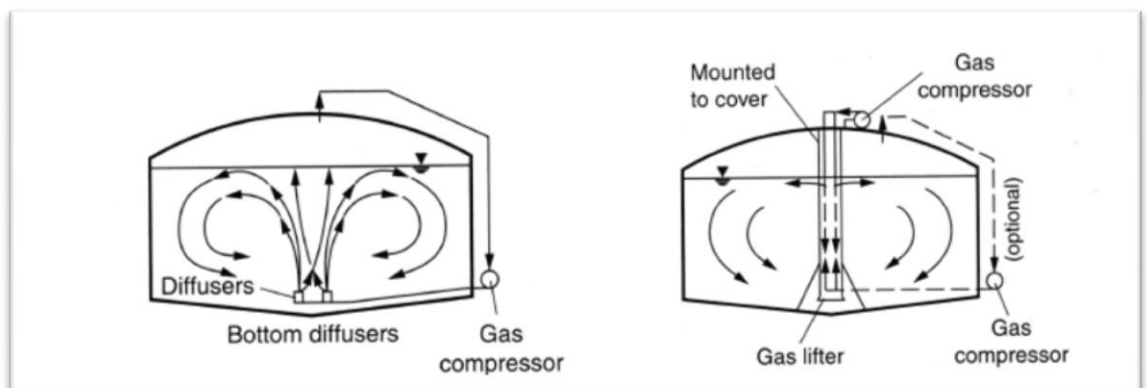
$V$  on reaktorin tilavuus,  $m^3$  (Lund 2010, 47–49).

Mekaanisista sekoittimista yleisimmin käytetty on turbiinisekoitus (kuva 4), jossa sekoitus tapahtuu hitaasti pyörien ja ylhäältäpäin. Mekaanisen sekoituksen huonona puolena ovat kuluvat osat ja biomassan kerääntyminen siipipyörään. Yleensä ongelmia ilmenee lisäksi laakereiden kanssa. Akselin läpivientikohta voi lisäksi mahdollistaa kaasun vuodon (Lund 2010, 47–49).



Kuva 4. Reaktori turbiinisekoittimella (Lund 2010, 48).

Kaasulla tapahtuva sekoitus voidaan toteuttaa kahdella tapaa (kuva 5), joko syöttäen kaasu reaktorin nestepinnan alapuolelle tai syöttäen kaasu reaktorin sisään rakennettuihin putkiin (toimii männän tavoin työntäen lietettä ylöspäin). Molemmissa tapauksissa kaasu kerätään ensin talteen reaktorin kaasutilasta, jonka jälkeen se tiivistetään ja syötetään reaktoriin nestepinnan alapuolelta. Mikäli kaasu syötetään suuttimen kautta reaktorin alaosaan, kaasukuplat sekoittavat ylös noustessaan lietettä (Lund 2010, 47–49).



Kuva 5. Kaasusekoitus (Lund 2010, 49).

Kaasusekoituksen huonona puolena ovat kaasuputkistojen ja -laitteistojen korroosio-ongelmat, kompressorin vaatima huolto ja mahdolliset kaasuvuodot. Lietettä voidaan sekoittaa reaktoreissa myös kierrättämällä. Tämä tapahtuu usein imemällä biomassaa reaktorin yläosasta ja syöttämällä sen takaisin reaktorin alaosaan. Pumppaus

suoritetaan yleensä joko aksiaali- tai keskipakopumpulla matalalla paineella ja suurella virtauksella.

### 2.6.3.7 Viipymä

Lietteen tulee viipyä reaktorissa tietyn aikaa, jotta kaikki reaktiot ennättävät tapahtua. Anaerobiset bakteerit kasvavat hitaasti ja tarvitsevat paljon substraatteja, koska substraattien pilkkomiseen kuluu paljon aikaa ja bakteerit saavat pilkkomisesta vain vähän energiaa (Lund 2010, 13–21).

Hydraulisella viipymällä (HRT, Hydraulic Retention Time) yleensä kuvataan, kuinka kauan liete viipyy reaktoreissa ja se lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\theta = \frac{V_r}{Q} \quad (3),$$

missä  $\theta$  on hydraulinen viipymä  
 $V_r$  on reaktorin tilavuus ja  
 $Q$  on syötön tilavuusvirta.

Lisäksi voidaan laskea lieteikä, joka kuvaa kuinka kauan yksittäinen bakteeri viipyy reaktorissa. Tämä on identtinen hydraulisen viipymän kanssa, kun lietteenkierrätystä ei tehdä. Biokaasutuksessa lietteen kierrätys on harvinaista (Lund 2010, 13–21).

Viipymän on oltava vähintään yhtä suuri kuin hitaammin kasvavien bakteerien generaatioaika ja yleensä suositellaan viipymän olevan kaksinkertainen metanogeenien generaatioaikaan nähden. Pitkän viipymän etuina ovat suurempi kaasutilavuuden muodostuminen ja orgaanisen aineen reduktio. Tällöin myös lieteikä kasvaa ja bakteerit ennättävät paremmin sopeutua vallitseviin olosuhteisiin. Koska biokaasutuksessa on kyse lietteen hygienisoinnista, pitkässä viipymässä tämä tapahtuu varmemmin, prosessi pysyy stabiilina ja se kestää paremmin toksisia yhdisteitä sekä olosuhteiden muutoksia. Viipymän ollessa pahimmillaan liian pieni, prosessi voi jopa kaatua (Lund 2010, 13–21).

Viipymäaika voidaan lisäksi optimoida prosessin aikana vaihtelemalla syöttövirtaa ja tarkastelemalla samalla saavutettua reduktiota ja kaasuntuottoa. Kun orgaanisen aineen reduktio on 50–60 % ja kaasun tuotto on stabiili, katsotaan viipymän olevan tarpeeksi pitkä. Biokaasulaitosten viipymä on yleensä 12–30 vrk, mesofiillisen prosessin suositeltava viipymä 21 vrk (Lund 2010, 36).

### 2.6.3.8 Orgaaninen kuormitus

Biokaasutuksen orgaaninen kuormitus määritellään syötetyn orgaanisen aineen massana reaktiutilavuutta ja aikayksikköä kohden. Aikana yleensä käytetään vuorokautta ja orgaanisen aineen määrä (VS, Volatile Solids) ilmoitetaan prosentteina kokonaiskiintoaineesta (TS, Total Solids). Orgaaninen kuormitus ilmoitetaan yleisesti yksikössä  $\text{kgVS/m}^3\text{d}$ , jolla ilmoitetaan, montako kilogrammaa orgaanista kuiva-ainetta vuorokauden aikana syötetään yhtä reaktorin nestetilavuutta kohden. Tyypillisesti kuormitus vaihtelee suurimmillaan välillä  $3\text{--}9 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$ . Jätevesilietteelle soveliaain kuormitus on  $2\text{--}4 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$ , kun vastaavasti esimerkiksi energiakasveilla se on  $1\text{--}3 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$  (Latvala 2009, 34–35; Lund 2010, 13–21; Luostarinen 2007, 7-9).

Prosessin pH on suoraan riippuvainen orgaanisesta kuormituksesta. Kuormituksen muutos voi aiheutua esimerkiksi syöteseoksen tai viipymäajan muutoksista. Liiallisesta syötöstä johtuva suuri orgaaninen kuormitus saa aikaan haponmuodostajabakteerien (optimi pH 5,2–6,3) aktiivisuuden lisääntymistä ja hajoamisen välituotteiden, rasvahappojen pitoisuuden nousua, mikä laskee pH:ta. Tämä heikentää metaania tuottavien bakteerien (optimi pH 6,5–7,5) elinoloja, minkä vuoksi metaanintuotto heikenee, ja siten myös biokaasun tuotto ja kaasun metaanipitoisuus laskevat (Latvala 2009, 34–35; Lund 2010, 13–21).

Orgaanisen kuormituksen laskemiseksi tarvitsee ennakkoon määrittää sekä lietteen kokonaiskiintoainepitoisuus että orgaanisen aineen osuus. Kuormitus saadaan kaavalla 4 (Lund 2010, 13–21):

$$\text{Orgaaninen kuormitus} = \frac{TS * \frac{VS-\%}{100} * Q}{V} \quad (4)$$

missä TS on kiintoainepitoisuus,  $\text{kg/m}^3$

VS- % on orgaanisen aineen prosenttiosuus kokonaiskiintoaineesta

Q on syöttövirtaama,  $\text{m}^3/\text{d}$  ja

V on reaktorin tilavuus,  $\text{m}^3$ .

Prosessin suunnitteluperusteet riippuvat mädätettävästä aineesta ja halutusta lopputuotteesta. Usein materiaali esikäsitellään, joka voi tapahtua esimerkiksi mekaanisesti tai kemiallisesti. Esikäsitelyllä edesautetaan käsiteltävän materiaalin hydrolyysia eli suurimpien molekyylien pilkkoutumista, koska se on usein määräävä askel biokaasutuksessa. Esikäsitely homogenisoi materiaalin, mikä osaltaan vähentää prosessihäiriöitä. Puhdistamoliete sakeutetaan usein ennen mädätystä kiintoainepitoisuuden nostamiseksi. Kiintoainepitoisuus saadaan nousemaan jopa kolminkertaiseksi. Tällä

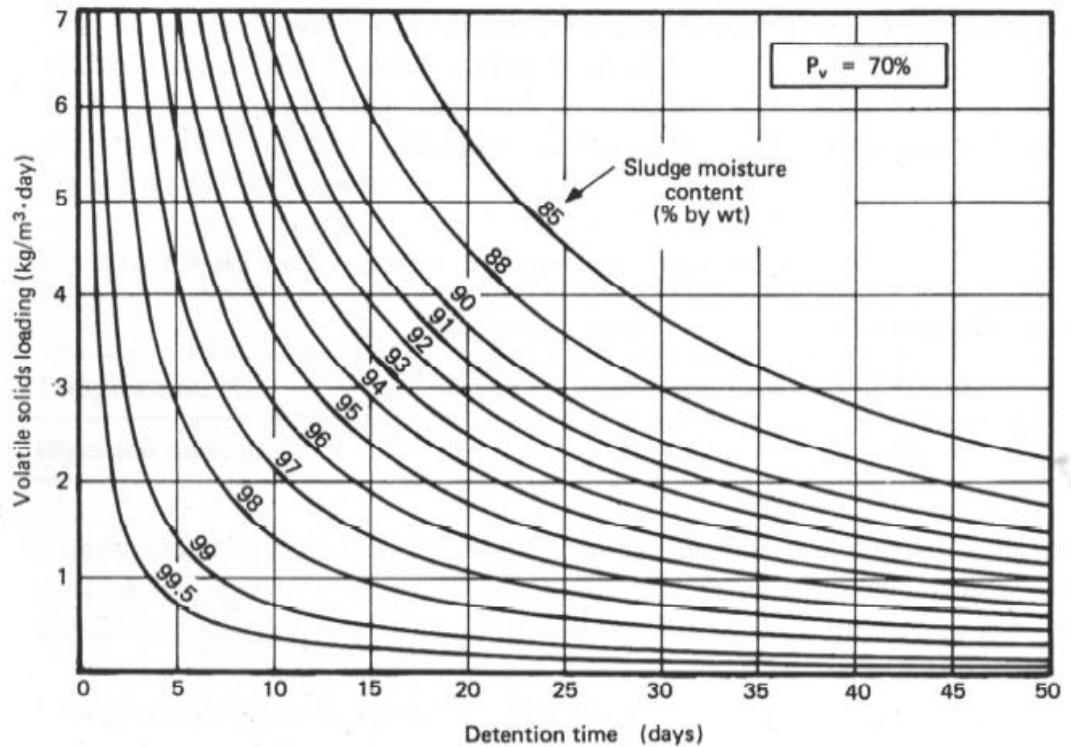
tekijällä on suora pidentävä vaikutus mädätettävän materiaalin viipymään ja samalla maksimoidaan kaasuntuottavuutta (Lund 2010, 34–36).

Mädätysprosessi perustuu kolmeen päätekijään:

1. Reaktorin mitoitus käsiteltävän lietteen laadun ja määrän perusteella
2. Haluttujen olosuhteiden, etenkin lämpötilan ja sekoitustehon, määrittäminen
3. Sopivan prosessilaitteiston sekä ohjaussysteemin valitseminen.

Prosessilaitteisto valitaan käytössä olevien prosessiolosuhteiden mukaan ja reaktorin koko riippuu kahdesta edellä mainitusta tekijästä. Prosessin toisena ääripäänä on heikolla prosessiohjauksella varustettu suuri reaktori ja toisena pieni reaktori, jonka olosuhteita hallitaan tehokkaasti. Investointikustannukset sijoittuvat näiden väliin (Lund 2010, 34–36).

Reaktoritilavuus mitoitetaan syöttölietteen laadun ja määrän mukaan. Reaktoritilavuuden määräävät syötön tilavuusvirta ja hydraulinen viipymä. Viipymä on riippuvainen kuiva-aineen määrästä ja orgaanisen aineen määrästä sekä lämpötilasta ja sekoituksesta. Sakeutetun puhdistamolietteen kuiva-ainepitoisuus on yleensä 4-5 %, jonka orgaanisen aineen osuus on 60–80 %. Pitkällä viipymällä saavutetaan korkea reduktio ja maksimaalinen kaasun tuottavuus. Pitkä viipymä aiheuttaa myös energia-kustannuksia, sillä sekoituksen ja lämmityksen tarve korostuu ja suuremmat reaktorit nostavat investointikustannuksia. Kuvassa 6 on esitetty orgaaninen kuorma viipymän funktiona. Eri kiintoainepitoisuuden omaavat lietteet muodostavat käyräparven, kun oletetaan kuiva-ainepitoisuuden pysyvän vakiona, tässä 70 %. Tarvittava viipymäaika lasketaan yleensä laboratorionkokeiden perusteella (Lund 2010, 34–36).



Kuva 6. Orgaaninen kuorma viipymän funktiona (Lund 2010, 35).

Reaktoreiden suunnittelussa on huomioitava kuinka paljon syötettävä jae sisältää primaari- tai sekundaarilietettä, koska nämä ovat laadultaan erilaisia. Kun mädättämöä suunnitellaan jätevedenpuhdistamon yhteyteen, on huomioitava, että kyseisen laitoksen on pystyttävä käsittelemään puhdistusprosessista jatkuvasti syntyvää lietettä (mikäli käytössä ei ole puskurisäiliöitä). Tämä saattaa aiheuttaa prosessille myös syöttövirtaaman vaihteluita. Syöttölietteen laadun vaihdellessa, on järkevää tehdä laitoksen suunnitelmista karkeat. Reaktoreiden tilavuus tulisi mitoittaa 20–30 % liian suureksi, jotta on varaa syöttövirtaamien vaihtelulle ja jotta kaasulle jää tilaa kerääntyä reaktorin yläosaan (Lund 2010, 36).

#### 2.6.4 Biokaasutusprosessin valvonta

Prosessin epästabiilisuus voi oireilla monella tapaa ja yleisimmät "oireet" on koottu taulukkoon 5. Yleensä prosessia tulisi arvioida kokonaisuutena ja arviointi tulisi suorittaa useamman seurattavan parametrin perusteella (Lund 2010, 60–61).

Taulukko 5. Prosessin vianetsintä (Lund 2010, 60–61).

Indikaattori	Aleneminen	Nousu
Biokaasun tuotanto	x	
Metaanin tuotanto	x	
Alkaliteetti	x	
pH	x	
Orgaanisen aineen reduktio	x	
Haihtuvien happojen määrä		x
Biokaasun CO <sub>2</sub> -pitoisuus		x

Yksi mädätysprosessin yleisimpiä ongelmia on vaahtoaminen, jota aiheuttaa muun muassa tietyt rihmamaiset bakteerit, epästabiliit prosessiolosuhteet ja tietyt aineet, kuten pesuaineet, rasvat, öljyt, proteiinit, lipidit, polymeerit, pihka ja emäksiset suolat. Vaahdon muodostuksen yhteydessä lietteen pintajännitys laskee ja kuiva-aine kerääntyy kaasusulkeumiin. Pintajännityksen alenemista aiheuttavat korkea alkaliteetti ja suuri rasvahappojen pitoisuus. Tämä voidaan eliminoida pois riittävän tehokkaalla tarkkailulla. Eniten vaahtoamista esiintyy prosessin käynnistysvaiheessa sekä ylikuormituksen tai epästabiliien olosuhteiden vallitessa (Lund 2010, 60–61).

Vaahtoaminen voi aiheuttaa biokaasutusprosessille hajuhaittoja ja turvallisuusongelmia. Vaahto voi tunkeutua kaasunkeräysjärjestelmiin tukkien putkia ja aiheuttaen korroosio-ongelmia. Mikäli reaktoreissa käytetään kelluvaa kantta, vaahto voi pursuta ulos kannen ja seinämän välistä. Vaahtoamista voidaan estää riittävän tehokkaalla sekoituksella, jolloin kaasut vapautuvat lietteestä helpommin. Sekoituksen ollessa liian tehokas tai jos se suoritetaan pienillä kaasukuplilla, edistetään vaahdon muodostusta. Lisäksi vaahtoamista voidaan pyrkiä välttämään kiinteäkantisilla reaktoreilla, alentamalla lietepinnan tasoa, käyttämällä vaahdonestoaineita tai vedensumutuslaitteistoa vaahdon rikkomiseksi. Vaahtoutumista voidaan myös hallita säännöllisellä lietteen poistamisella (Lund 2010, 60–61).

## 2.7 Kohdelaitoksen kuvaus

### 2.7.1 Siirrettävän koelaitoksen toimintaperiaate

Siirrettävä biokaasutuslaitos eli Mobiili (kuva 7) on 20 ”jalkainen” eli noin 6 metriä pitkä ja 2,5 metriä leveä merikontin sisään rakennettu siirrettävä koelaitos. Koelaitoksen PI-kaavio on esitetty liitteessä 1. Kyseistä laitosta voidaan ajaa jatkuvatoimisesti tai panostyyppisesti. Lisäksi yksikön prosessointi etäkäyttönä on mahdollista. Koelaitos on valmistunut vuonna 2009. Syötettäessä jatkuvatoimiseen prosessiin materiaalia, poistuu samanaikaisesti käsittelyjäännöksen suuruinen määrä materiaalia prosessista. Koelaitoksen reaktoreihin menee kaksi linjaa, joista toista pitkin pumpataan materiaalia sisään ja toista kautta käsittelyjäännöstä poistuu. Koelaitoksessa ei ole integroitua varastoa syötteille vaan varastointiin on varattava erillinen tila.



Kuva 7. Siirrettävä biokaasutuslaitos eli Mobiili.

Koulutus- ja tutkimuskäyttöön tarkoitettu koelaitoksesta löytyy kaksi erillistä 3 m<sup>3</sup> reaktoria (kuva 8) varustettuna mekaanisilla sekoittimilla, kaasuväri jonne kaasu johdetaan ja kaasukattila jolla kaasu poltetaan energiaksi. Reaktoreissa voidaan säätää lämpötilat, joten niitä voidaan prosessoida sekä meso- että termofiilisenä. Muodostuneella biokaasulla lämmitetään vesivaraajan vesisisältöä sekä lisäksi itse koelaitosta sekä reaktoreita. Vaihtoehtoisesti vesivaraajan vettä voidaan lämmittää sähkövastuksella, jossa on säädettävä lämpötilarajoittimen kytkin. Veden vähetessä vesivaraajasta, kattilan takaa löytyy täyttöventtiili, jonka kautta vettä voidaan tarvittaessa lisätä. Vesivaraajan alapuolelta löytyy varoventtiili ja sen kautta suora yhteys ulos. Täten vettä lisättäessä ylimääräinen vesi poistuu varoventtiilin kautta. Linjastoissa

käytetään 20 prosentista glykoli-vesiseosta ruostumisen ja jäätyksen estämiseksi. Edellä esitetyn systeemin mukaan, teknisten huoltotoimenpiteiden suorittaminen onnistuu helposti.



Kuva 8. Koelaitoksen reaktori, jossa ylhäällä vasemmalla ruuvikuljetin kiinteän materiaalin syötöille, ylivaluntalaatikko sekä lämpötila-anturi.

Reaktoreihin voidaan syöttää sekä kiinteää materiaalia että pumpattavaa nestemäistä lietettä. Kiinteän materiaalin syöttö suoritetaan ruuvikuljettimen kautta. Kiinteät syötet murskataan tarvittaessa, jota varten koelaitoksesta löytyy erillinen automatiikalla ohjattava murskainyksikkö (kuva 9). Ruuvikuljettimen kautta syötöt voidaan ajastaa, mutta itse syötettävä materiaali on manuaalisesti nostettava kuljettimelle.



Kuva 9. Murskaussyksikkö sisältäpäin kuvattuna.

Pumpattavia nestemäisiä lietteitä voidaan ajaa prosessiin automatiikalla, mikäli koelaitoksen ulkopuolella on riittävän tehokas pumppu syöttämään materiaalia. Lietemääriä voidaan tarkastella virtaamamittarin avulla. Syötteiden suoritus on mahdollista myös uppopumpun avulla. Tällöin syöttöventtiilit on avattava manuaalisesti.

Kaikkea pystytään prosessoimaan tietokoneen avulla ja prosessin ohjelmointi on muutenkin helppoa ohjauspaneelin kautta. Koelaitos ilmoittaa vikatilanteista prosessihoitajalle tekstiviestillä. Lisäksi koelaitokselta löytyy lämpötila-anturit, joilla seurataan reaktoreiden lämpötilaa, virtaamamittarit ja metaanianturit muodostuvalle biokaasulle sekä paine-anturi sijoitettuna toisen reaktorin kylkeen. Kyseinen painemittari mittaa muodostuvan kaasun painetta ja on täten suorassa yhteydessä kaasukattilan kanssa. Paineen noustessa raja-arvon ylätasolle, kattila polttaa muodostuneen kaasun ja sammuu automaattisesti paineen saavuttaessa alarajan. Mittari toimii ns. raja-arvokytkimenä. Reaktoreiden sisäpuolella kiertää lämmitysverkosto putkisto. Lämmitysjärjestelmää ohjelmoidaan magneettiventtiilin avulla siten, että lämpötilan laskiessa alle asetetun raja-arvon, venttiili aukeaa ja kuuma glykoli-vesiseos alkaa kiertää reaktorissa ja lämmittää biokaasutettavaa massaa.

Reaktoreiden kyljissä on ylivaluntalaatikat (kuva 8, laatikko kiinni reaktorin kyljessä), joista on yhteys poistolinjaan. Täten laatikon kautta poistuu käsittelyjäännöstä uutta materiaalia sisään syötettäessä. Ylivaluntalaatikat vaativat joka viikoista huoltoa, sillä käsittelyjäännös kerrostuu laatikon yläreunaan ja voi täten tukkia yhteyden poistolinjaan. Lisäksi laatikoista on yhteys reaktioihin lietepinnan alapuolelle. Täten huoltotoimenpiteitä suorittaessa reaktorin kaasutilavuuteen muodostuu alipaine, joten laatikon avaamisen aikana kaasua ei pääse karkaamaan koelaitoksen ilmatilaan.

Kaasuvaraston tilavuus on yhden kuution verran (kuva 10). Mikäli kaasukattilan toiminnassa on ongelmia, kaasu poistuu varastosta varoventtiin kautta.



Kuva 10. Kaasuvarasto.

Kaasun poistaminen varastosta voidaan tehdä lisäksi vielä manuaalisesti poistoputken kautta. Kuvassa 11 on esitetty kaasuväkä aivan täynnä (vasen puoli) ja vastaavasti oikealla puolella, kun se on poistoputken kautta tyhjennetty. Samaisesta kuvasta voidaan havaita kuinka kaasuväkä saadaan ns. imettyä todella tyhjäksi.



Kuva 11. Kaasuvarasto täynnä ja tyhjennettynä.

Kaasukattilan (kuva 12) toiminnan edellytyksenä on tietty metaanin osuus koko tuotetusta biokaasusta. Kokemus on osoittanut, että puhutaan noin 52 %:n metaanipitoisuudesta.



Kuva 12. Koelaitoksen kaasukattila.

### 2.7.2 Suoniemen puhdistamon puhdistustekniikat ja jätevesivirtaamat

Lapinlahden puhdistamo sijaitsee maantieteellisesti Suoniemellä, jossa käsitellään Lapinlahden, Alapitkän ja Nerkoon taajamien sekä Lapinlahdella toimivan Valio Oy:n jätevesiä. Puhdistamo on kaksilinjainen biologiskemiallinen jälkisaostuslaitos (kuva 13), jonka mitoitusvirtaama on 5 750 m<sup>3</sup>/d. Maidonjalostusteollisuudesta aiheutuu noin 85 % jätevesivirtaamista. Puhdistamolla on lisäksi varajärjestelmänä kolmas käsittelylinja (Päivinen 2010, 9-10).



Kuva 13. Kohdelaitoksen ilmakekuva vuodelta 2009 (Päivinen 2010), Valokuva Pasi Kannasmaa, 2009.

Normaalitilanteessa mitoitukskuorma-arvot puhdistamolla ovat seuraavat:

- hydraulinen mitoituskvirtaama  $5\,750\text{ m}^3/\text{d}$
- orgaaninen mitoitukskuorma (BOD7)  $4\,100\text{ kg/d}$
- kiintoaine  $1\,740\text{ kg/d}$
- kokonaistyyppi  $463\text{ kg/d}$
- kokonaisfosfori  $187\text{ kg/d}$  ja
- ylijäämäliete  $2\,900\text{ kg TS/d}$  (Päivinen 2010, 9-10).

Mahdollisten poikkeavien jätevesipäästöjen varalle on puhdistamolla erillinen pH:n säädöllä ja sekoittimilla varustettu allas. Lisäksi käytetään saostuskemikaaleina ferri-sulfaattia noin  $1\,000\text{ t/a}$ , sekä lietteen kunnostamiseen polymeeriä noin  $6\text{ t/a}$ . Lipeää (noin  $100\text{ t/a}$ ) ja rikkihappoa käytetään pH:n säätö kemikaaleina. Valion maidonjalostuksen tehdas sijaitsee puhdistamon välittömässä läheisyydessä, josta tulevat jätevedet ovat hyvin lämpimiä (yli  $+20\text{ °C}$ ) ja erittäin happamia tai voimakkaasti emäksisiä riippuen tuotantoprosessin vaiheesta (Päivinen 2010, 9-10).

Kaikki puhdistamolle tulevat jätevedet ohjautuvat tasausaltaalle porraskäppien kautta, jossa niistä poistetaan karkea kiintoaine. Tasausaltaalla jätevesille tehdään pH:n säätö ja kyseinen allas on lisäksi varustettu mekaanisella sekoituksella. Ilmastus tehdään pohjailmastimilla automaattisesti happipitoisuuden mukaan, mikä mahdollistaa korkean prosessilämpötilan myös talvella (noin  $+15\text{ °C}$ ) (Päivinen 2010, 9-10).

Puhdistusprosessista muodostuu ylijäämälietettä ja lisäksi puhdistamolle toimitetaan sako- ja umpikaivolietettä (noin  $3\,000\text{ m}^3/\text{a}$ ). Nämä jakeet esitiivistetään ja kuivataan mekaanisesti lingolla. Tätä lingottua jätettä (TS on  $13,6 \pm 0,5\%$ ) muodostuu vuodessa noin  $8\,000$  tonnia ja se hygienisoidaan kalkkistabiloinnilla välivarastoinnin jälkeen. Maidonjalostuksen jätevesijakeet eroavat yhdyskunnanjätevesistä sillä, että niiden solurakenteisiin on sitoutunut tavanomaista enemmän vettä (noin  $8\%$  enemmän). Solunsisäistä vettä on mahdotonta poistaa mekaanisesti vaan tämä vaatii kemiallisen

käsittelyn. Lisäksi kompostoinnissa joudutaan käyttämään normaalia enemmän seos- ja tukiaineita (Päivinen 2010, 9-10).

### 3 KOEJÄRJESTELYT

Tutkimus on osa suurempaa hanketta: *Selvitys Lapinlahden jätevesilietteen ja mahdollisten muiden orgaanisten jakeiden yhteisbiokaasulaitoksesta ja käsittelyjäännöksen hyötykäyttömahdollisuuksista Ylä-Savon alueella*. Etukäteen oli päätetty, että Mobiilin koeajoissa käytetään Lapinlahden, Iisalmen ja Kiuruveden jätevesilietteillä. Mobiilin koeajot prosessoitiin aikajaksona 6.9. – 31.10.2011 viipymän ollessa 20 vuorokautta. Näin ollen materiaali ennätti vaihtua reaktoreissa kokonaan kaksi ja puoli kertaa. Mobiiliin syötettävistä jätėjakeista tehtiin pullopanoskokeet Savonia-ammattikorkeakoulun ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikön Kuopion laboratoriossa. Kyseisiin pullopanoskokeisiin ei allekirjoittanut ole itse osallistunut, joten niistä esitellään lähteen muodossa ainoastaan saadut tulokset. Kustakin jätevesijakeesta on tehty oma panoskoe siten, että panoskokeen kestonä on käytetty yhtä kuukautta ja kaasun tuottavuutta on seurattu viikon välein.

Tässä luvussa esitetään koejärjestelyjen ennakoivat toimenpiteet, kokeiden varsinainen toteutus ja päivittäiset operointityötehtävät koelaitoksella. Lisäksi käydään läpi päivittäiseen seurantaan liittyvä dokumentointi sekä syötettävien jätėjakeiden jatkuva seuranta.

#### 3.1 Koejärjestelyjen ennakoivalmistelut, suunnittelu ja toteutus

Syksyllä 2009 valmistunut koelaitos on rakennettu siirrettäväksi yksiköksi, jotta sillä voidaan vastata kunkin tilaajan toiveisiin. Koelaitos itsessään sijaitsi Maaningan MTT:n tutkimuslaitoksella, josta se siirrettiin Lapinlahdelle koeajoja varten. Siirto onnistui suunnitellussa aikataulussa. Maaningalta lähtiessä reaktoreita vajennettiin 1000 L säiliöihin, joiden sisältö palautettiin takaisin reaktoreihin kohdepaikkakunnalla. Tämän jälkeen prosessin ja mikrobitoiminnan elpyminen vei yllättävän paljon aikaa noin 3 viikkoa. Prosessin ylösajon aikana reaktoreissa ollut materiaali pyrittiin vaihtamaan. Prosessissa oli kuitenkin havaittavissa hitaasti tapahtuva mikrobien toiminnan elpyminen siirron jäljiltä. Hidas elpyminen johtui suurelta osin siitä, että koelaitos oli ennen siirtoa noin 9 vuorokautta ilman syöttöä. Siirrosta aiheutuva prosessin hetkellinen keskeytyminen tulee huomioida tulevaisuudessa aikatauluttaessa hankkeita.

Lapinlahden pumppauslinjaa varten muodostettiin letkuista linja koelaitokselle. Pumppaukset suoritettiin uppopumpun ja 80 litran saavin avulla. Lapinlahden liete pumpattiin suoraan rumputiivistimeltä. Iisalmen ja Kiuruveden jätevesilietteitä varten

hankittiin 200 litran metallisia säiliöitä (kuva 14), joissa oli kannet mekaanisella kiinnityssysteemillä.



Kuva 14. Metallinen säiliö jätevesilietteiden säilytykseen.

Säiliöt saatiin lahjoituksena metalliteollisuudesta ja niihin hitsattiin kantokahvat. Iisalmen jätevesiliete tuli lingolta ja Kiuruveden suotonauhapuristimelta (kuva 15). Kuivatut jätevesilietteet lisättiin reaktoreihin manuaalisesti ruuvikuljettimien kautta. Lietekuljetuksia varten Lapinlahden kunta lainasi kerran viikossa peräkärriä, jolla itse ajoin lietteet. Sekä Iisalmissa että Kiuruvedellä oli vaihtosäiliöt näytekuljetuksien nopeuttamiseen.



Kuva 15. Iisalmen (oikealla) ja Kiuruveden (vasemmalla) kuivattuja jätevesilietteitä metallisäiliöissä.

Molemmilla puhdistamoilla lietesäiliöt nostettiin nostureilla ja puhdistamon henkilökunta osallistui sekä säiliöiden täyttämiseen että itse vaihdon suorittamiseen. Lietettä säilytettiin noin viikko kohtalaisen tuoreuden takaamiseksi. Lisäksi koelaitokselle hankittiin kannellisia sankoja, joihin pystyi koko viikon annokset punnitsemaan valmiiksi.

Ennen koejärjestelyjen toteuttamista tulevista jätejakeista tehtiin kuiva-aineen ja orgaanisen aineen määritykset Kuopion laboratoriossa. Näiden pohjalta pystyttiin tekemään laskelmat mikä tulisi kunkin jakeen syötettävän materiaalin osuus olemaan, kun syöttöjä haluttiin tehdä viitenä päivänä viikossa. Taulukkoon 6 on koottu jokaisen puhdistamon lietemäärät ja niistä määritetyt kuiva-ainepitoisuudet. Kuiva-ainepitoisuuksia ja orgaanisen aineen osuutta määritettiin useammasta näytteestä SFS 3800 standardin mukaisesti ja tässä taulukossa esitetään niistä keskiarvo. lisa-lmen ja Kiuruveden TS-pitoisuuksina on käytetty heidän itsensä määrittämiä arvoja. Lisäksi taulukossa esitetään laskennalliset parametrit eli hydraulinen viipymä (HRT), orgaaninen kuormitus ja päivässä vaihtuvan materiaalin osuus. Viipymä on laskettu kaavalla 3 ja orgaaninen kuormitus kaavalla 4. Lisäksi laskettiin päivässä vaihtuvan materiaalin osuus seuraavalla kaavalla.

$$R(\%) = \frac{\text{Lietesyöttö} \left( \frac{\text{kg}}{\text{d}} \right)}{\text{Reaktorin tilavuus} (\text{m}^3) * 1000} * 100 \quad (5)$$

Taulukko 6. VS/TS-määritystulokset ja viipymän määrittäminen todellisten lietteiden syntymäärien mukaan.

<b>Todelliset lietteen syntymäärät</b>					
<b>Puhdistamo</b>	<b>Lietettä t/a</b>	<b>TS-%</b>	<b>VS-%</b>	<b>tTS/a</b>	<b>tVS/a</b>
Lapinlahti	8 500	13,00	7,15	1 105,00	607,75
Iisalmi	4 500	21,00	15,69	945,00	706,10
Kiuruvesi	1 500	15,60	9,52	234,00	142,74
Yhteensä	14 500			2 284,00	1 456,59
<b>Lietteet koetoiminnan syötössä reaktoria kohden</b>					
<b>Puhdistamo</b>	<b>Syötteen TS (%)</b>	<b>Syötteen VS (%)</b>	<b>kgVS/d</b>	<b>Lietesyöttö (kg/d)</b>	<b>Lietesyöttö (kg/d/5d)</b>
Lapinlahti	2,33	1,24	1,22	98,64	138,10
Iisalmi	21,00	15,69	1,42	9,04	12,65
Kiuruvesi	15,60	9,52	0,29	3,01	4,22
Yhteensä			2,93	110,69	154,97
Reaktorin tilavuus (m <sup>3</sup> )					
2,25					
HRT (pv)					
20					
Orgaaninen kuormitus (kgVS/Rm <sup>3</sup> /d)					
1,3					
Vaihtuvuus (pv)/(R%)					
6,9					

Jokaista lietejätettä syötettiin prosessin molempiin reaktoreihin kerran vuorokaudessa viitenä vuorokautena viikossa. Lapinlahden lietettä syötettiin 138,1 kg uppopumpulla. Iisalmen ja Kiuruveden jätevesilietteet punnittiin koukkuvaa'alla ja nostettiin manuaalisesti ruuvikuljettimille. Iisalmen osuus oli 12,7 kg ja Kiuruveden 4,2 kg. Jokaisesta syöte-erästä otettiin näyte TS/VS määrittäystä varten Kuopion laboratorioon. Iisalmen ja Kiuruveden jätejakeet osoittautuivat hyvin stabiileiksi, mutta Lapinlahden lietteen orgaanisen aineen osuus vaihteli voimakkaasti. Kuiva-aineen ja orgaanisen aineen määritysten tulokset on esitetty liitteessä 2. Vastaavasti kyseisistä analyyseistä on esitetty esimerkki mittauspöytäkirjasta liitteenä 3, johon projekti-insinööri on koonnut tiedot.

### 3.2 Koelaitoksen päivittäinen seuranta

Mobiililla tehtiin ns. "aamukierros", jolloin tarkkailtiin lämpötilojen pysyvyyttä reaktoreissa, muodostuneen kaasun tilavuutta (virtaamamittarit), muodostuneen kaasun metaanin osuutta (%) ja itse koelaitoksessa vallitsevaa lämpötilaa. Päivittäisen seurannan ansiosta pystyttiin hyvinkin nopeasti reagoimaan, mikäli prosessissa kaikki ei toiminut normaalisti. Mobiilin operoinnin tukena oli toiminnassa mukana etäyhteys, jonka avulla koelaitokseen pystyi tekemään tarvittavia muutoksia. Etäyhteys vastasi näkymää Mobiilin kosketusnäytöllisestä tietokoneruudusta.

Mobiilin seurantaraportti on esitetty liitteenä 4, jossa on laskettu myös kuinka paljon metaania muodostui litroina vuorokaudessa. Koska aamukierrosta ei suoritettu viikonloppuisin, on maanantain kaasulukema jaettu koko viikonlopun ajalle eli kolmelle päivälle.

Mobiili lähetti valvontatekstiviestin kahdesti vuorokaudessa seitsemänä päivänä viikossa. Tämä kaikki on tallennettu omaksi tiedostoksi. Taulukossa 7 on esitetty yhden viikon raporttiviestit. Taulukossa R1:llä tarkoitetaan termofiilistä reaktoria, R2:lla mesofiilistä ja kk tarkoittaa kaasukattilaa.

Taulukko 7. Viikon 41 raporttiviestit.

pvm	Kello	R1	R2	KK			Met R1	Met R2
		lämpö [°C]	lämpö [°C]	lämpö [°C]	R1 tuot [L]	R2 tuot [L]	[%]	[%]
10.10.11	09:00	54	37	67	44730	31200	63	65
10.10.11	21.00	55	37	76	45100	31400	56	61
11.10.11	09:00	55	37	68	45390	31530	59	63
11.10.11	21.00	55	37	71	45800	31650	54	60
12.10.11	09:00	55	37	67	46040	31770	59	62
12.10.11	21.00	55	37	73	46390	32040	59	63
13.10.11	09:00	55	37	69	46720	32170	62	66
13.10.11	21.00	55	37	75	47030	32280	59	65
14.10.11	09:00	55	36	73	47260	32490	62	69
14.10.11	21.00	55	37	76	47690	32610	59	65
15.10.11	09:00	55	36	74	47850	32700	61	66
15.10.11	21.00	55	37	74	48010	32790	61	64
16.10.11	09:00	55	37	66	48090	32800	61	65
16.10.11	21.00	55	36	75	48200	32870	60	64

### 3.3 Laboratoriokokeet

#### *Kuiva-aineen ja orgaanisen aineen määritykset*

Jätevesilietteiden kuiva-aineen ja orgaanisen aineen määritykset tehtiin Kuopion laboratoriossa standardin SFS 3008 mukaisesti. Määritykset tehtiin upokkaissa siten, että kuivattuun upokkaaseen punnittiin analyysivaakaa käyttäen haluttu määrä näytettä. Kuivaus aikana käytettiin 20 tuntia 105 celsiusasteessa ja hehkutus aikana 2 tuntia 550 celsiusasteessa. Punnitukset suoritettiin eri toimenpiteiden välissä.

#### *Kaasujen analysointi FTIR-savukaasuanalysointilaitteella*

Koelaitoksessa muodostuneesta kaasusta suoritettiin mittaukset savukaasuanalysointilaitteella Varkauden yksikössä. Mittauksia varten biokaasua otettiin kaasupussiin ja mitattiin Calcmet STD sovellusohjelmalla rinnakkaiset määritykset. Kaasuanalysointilaitteen toiminta perustuu FTIR- eli Fourier-muunnosinfrapunatekniikkaan, joka yhdessä sovellusohjelman kanssa mahdollistavat jopa 50 kaasukomponentin yhtäaikaista tarkkaa kvalitatiivista ja kvantitatiivista erottelua kaasuseoksesta. Näytteenottoyksikköön on integroitu  $ZrO_2$ -mittausperiaatteella toimiva happianturi.

#### *Biokaasupanoskokeet*

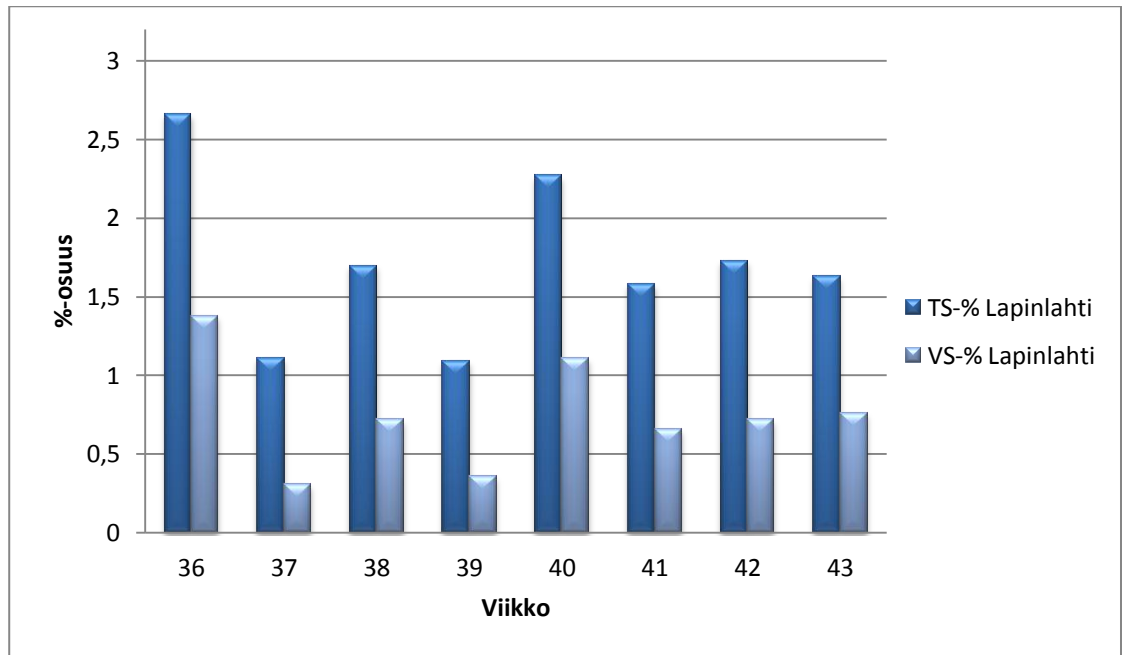
Biokaasupanoskokeet on suoritettu mesofiilisella lämpötila-alueella 5 litran panospulloissa. Panoskokeita on tehty kustakin jätejakeesta erikseen. Kokeita ennen kustakin jätejakeesta on määritetty TS- ja VS – pitoisuudet. Biokaasupanoskokeiden kaasun koostumus analysoitiin GA2000 PLUS – mittalaitteella. Lisäksi biokaasun tilavuus mitattiin erillisellä määrämittaan perustuvalla tilavuusmittaussäiliöllä.

## 4 TULOKSET

### 4.1 Kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuus

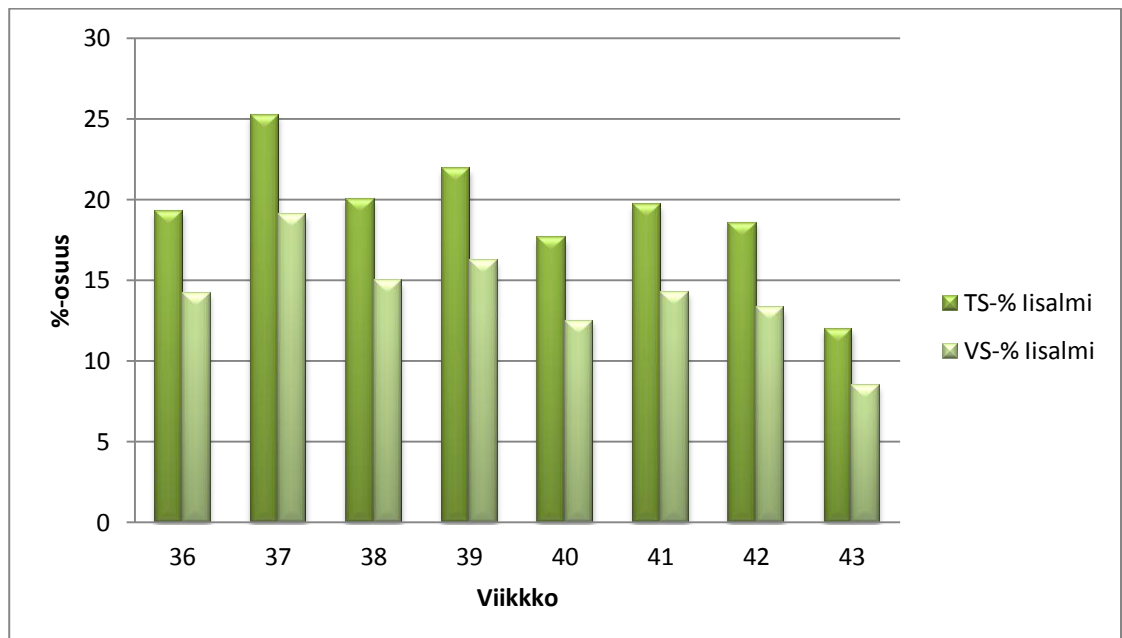
Kaikista koeajoissa syötetyistä jätejakeista tehtiin TS- ja VS-määritykset. Kiuruveden ja Iisalmen jätevesilietteitä haettiin 8 viikolla. Vastaavasti Lapinlahden jätevesilietteestä on jokaiselta syöttöpäivältä oma määrityksensä. Haasteellisimmaksi osoittautui Lapinlahden jätevesiliete suuren kuiva-ainepitoisuuden vaihtelevuuden myötä. TS- ja VS-määritysten tarkat tulokset on esitetty liitteessä 2, joista esitetään tämän luvun taulukossa 8 tiivistelmä. Kuvissa 16–18 on esitetty kuiva-aineen ja orgaanisen aineen määritysten tulokset pylväs diagrammeina. Lapinlahden määrityksistä esitetään viikko keskiarvot. Vastaavasti Kiuruveden ja Iisalmen jätevesilietteitä on analysoitu kerran viikossa noudetusta näyte-erästä.

Lapinlahden jätevesilietteen TS-pitoisuuksien viikkokeskiarvot vaihtelivat voimakkaasti vaihdellen välillä 1,1 – 3,1 %. Tästä VS-osuus vaihteli 0,3 – 1,5 % välissä (kuva 16). Lapinlahden jätevesilietteen voimakas vaihtelu johtuu suurelta osin sykleittäin puhdistamolle tulevasta jätevedestä maidonjalostusteollisuudesta. On kuitenkin huomioitava, että tässä tutkimuksessa Lapinlahden jätevesiliete syötettiin suoraan rumputiivistimeltä. Vastaavasti Iisalmen ja Kiuruveden jätevesilietteet syötettiin kuivattuna. Tämä selittää osittain Lapinlahden selkeästi alhaisemman kuiva-ainepitoisuuden muihin jakeisiin verrattuna. Kuitenkin VS-pitoisuuden suuri vaihtelu eli prosessin orgaanisen kuormituksen vaihtelu koeviikkojen aikana on aiheuttanut biokaasun muodostumisprosessin tapahtuvan epätäydellisesti.



Kuva 16. Lapinlahden jätevesilietteen kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen aineen (VS) viikko keskiarvot.

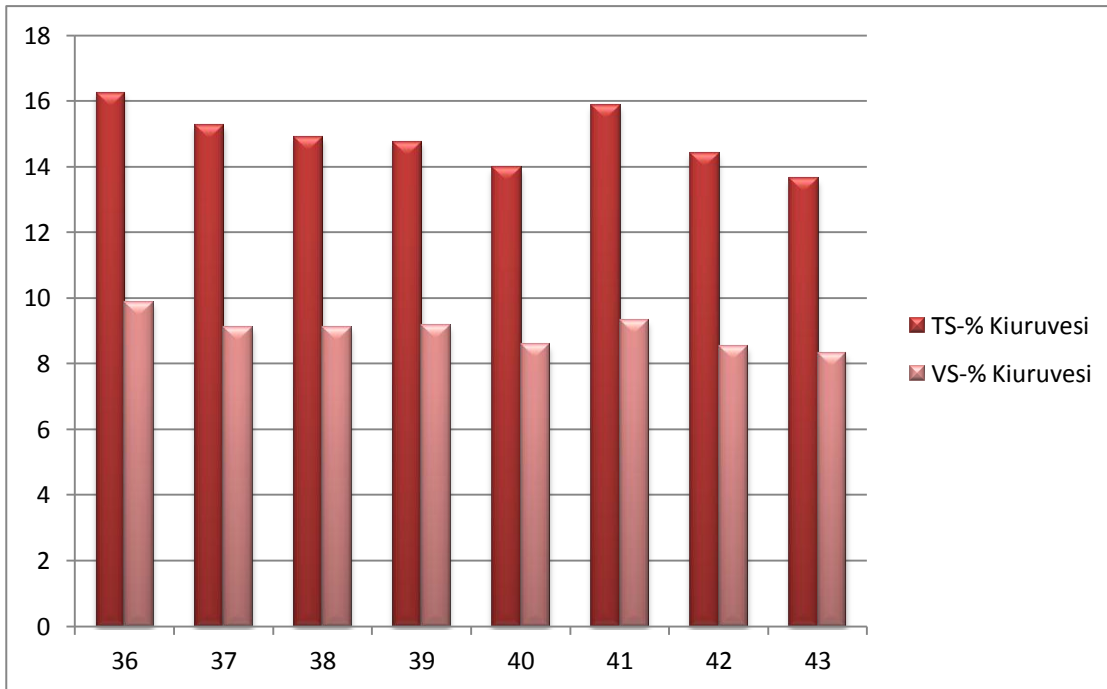
Iisalmen ja Kiuruveden jätevesilietteet osoittautuivat huomattavasti tasalaatuisemmiksi ja Kiuruveden kaikista stabiileimmaksi (kuvat 17 ja 18). Iisalmissa lietettä käsiteltiin lingolla ja Kiuruvedellä suotonauhapuristimella. Lingolla käsitellyn lietteen kuiva-ainepitoisuus nousi kaikkein korkeimmaksi syötetyistä jättejakeista.



Kuva 17. Iisalmen jätevesilietteen kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen aineen (VS) viikko määritykset.

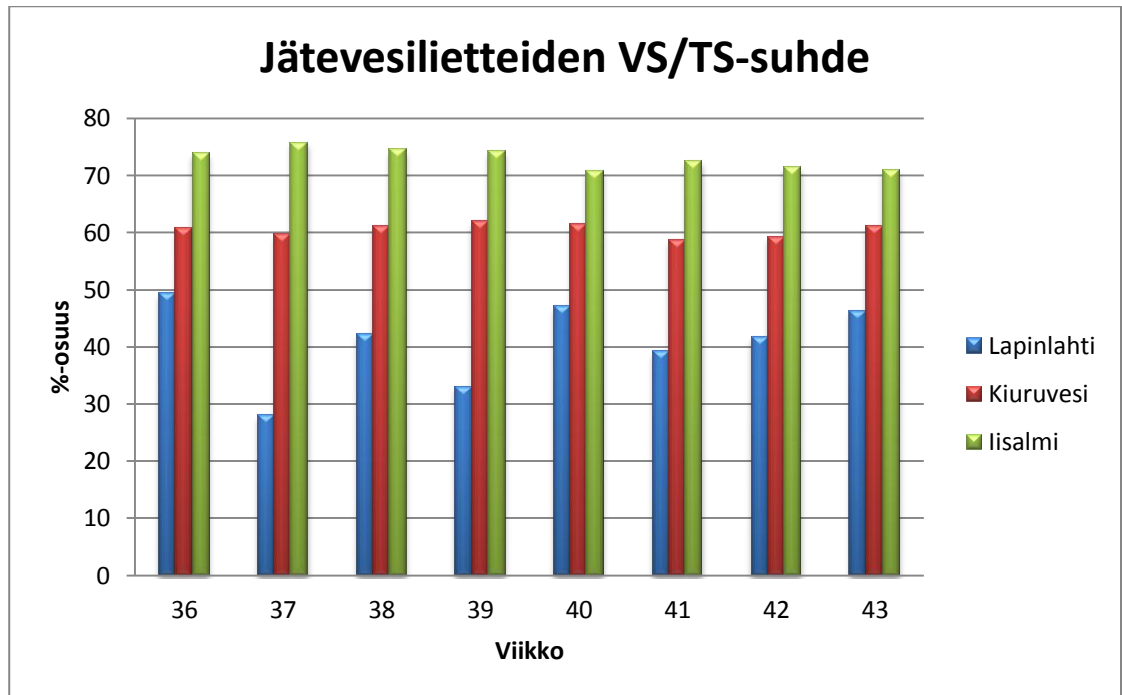
Iisalmen jätevesilietteen TS-pitoisuus pysytteli 20 % tuntumassa VS-osuuden ollessa noin 15 %. Vastaavasti kiuruveden TS-pitoisuus pysytteli tasaisesti 15 %:ssa, josta

VS-osuus oli 10 % (kuva 18). Iisalmen jätevesien vaihtelua aiheuttaa juomateollisuus (Olvi), Kiuruveden jätevesien koostuessa pelkästään yhdyskuntajätevedestä.



Kuva 18. Kiuruveden jätevesilietteen kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen aineen (VS) viikko määritykset.

Kuvassa 19 on vertailtu syötettävien jätevesilietteiden orgaanisen kuiva-aineen osuutta koko kuiva-aineesta. Pylväsdiagrammista nähdään Iisalmen lietteen VS/TS – suhteen olevan suurin. Kiuruveden lietteen pylväistä nähdään jätevesilietteen tasa-laatuisuus ja Lapinlahden lietteen voimakas vaihtelu.



Kuva 19. Jätevesilietteiden VS/TS -määritysten suhteen jakautuminen.

Syötteiden orgaaninen aines muodostaa biokaasutusprosessissa kaasun tuottavuuden. Taulukossa 8 on esitetty kumpaankin reaktoriin syötettyjen jakeiden orgaanisen kuiva-aineen osuus ja sen kokonaisosuus viikkosyötteistä. Reaktoreita pyritään prosessoimaan tasalaatuisesti. Tässä tutkimuksessa käytettyjen syötejakeiden koostumus vaihteli jonkin verran, aiheuttaen myös hajontaa viikossa syötettävään orgaanisen aineen osuuteen.

Taulukko 8. Viikkokohtaisten syöttöjakeiden keskiarvot TS- ja VS – pitoisuuksista.

Viikko	Syötteiden VS- %			Syötteessä orgaanista ainetta (kgVS/vk)			
	Lapinlahti	Iisalmi	Kiuruvesi	Lapinlahti	Iisalmi	Kiuruvesi	Yhteensä
36	1,46	14,21	9,87	10,1	9,0	2,1	21,2
37	0,31	19,09	9,12	2,2	12,1	1,9	16,2
38	0,72	15,75	9,50	5,0	10,0	2,0	17,0
39	0,36	16,25	9,18	2,5	10,3	1,9	14,7
40	1,11	12,50	8,59	7,7	7,9	1,8	17,4
41	0,66	14,26	9,32	4,6	9,1	2,0	15,6
42	0,67	13,28	8,54	4,6	8,4	1,8	14,9
43	0,76	8,32	9,16	5,2	5,3	1,9	12,5

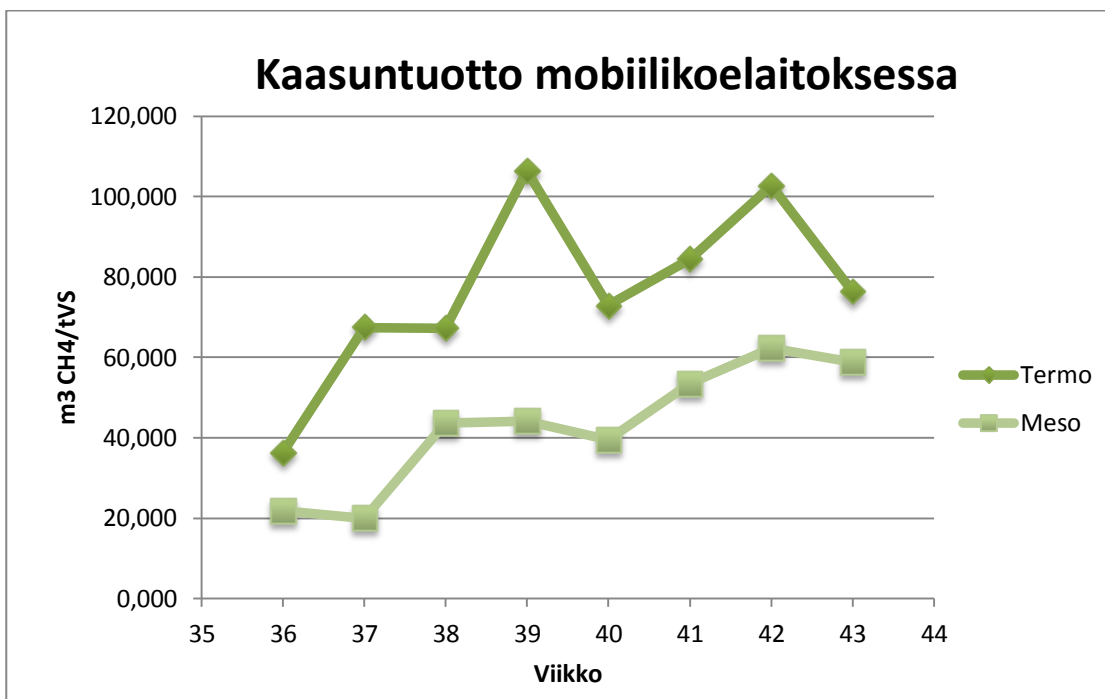
#### 4.2 Kaasuntuottavuus Mobiilikoelaitoksella

Biokaasun muodostusta Mobiilikoelaitoksella tehdyistä koeajoista on vertailtu kuvassa 19 ja taulukossa 9. Lisäksi liitteessä 4 on esitetty niin sanotun ”aamukierroksen”

havainnot, jolloin kirjattiin ylös muodostunut kaasu virtaamamittareiden lukemana. Liitteestä 4 havaitaan biokaasua muodostuvan 60 % metaanisisällöllä tasaisesti koko koeajon ajan.

Toista reaktoria (R1) prosessoitiin termofiilisenä (55 °C) ja toista (R2) mesofiilisenä (37 °C). Viipymänä käytettiin 20 vuorokautta, joten ensimmäinen viipymä on suoritettu viikkojen 36–38, toinen viikkojen 39–41 ja kolmas viikkojen 42–43 aikana. Viimeinen viipymä ei ennättänyt toteutumaan kokonaisuudessaan.

Kahden ensimmäisen koeviikon aikana prosessissa oli lämpötilojen pysyvyydessä ongelmia, mistä johtuu koeajojen alun alhaisempi kaasuntuottavuus. Lisäksi mesofiilin puolella varoventtiilissä havaittiin nesteveajausta, joten kaasua on voinut karata vesilukon kautta. Tämä ongelma ilmeni koko koeajoprosessin ajan, jota korjattiin ope-roinnin tarkkaavaisuudella.



Kuva 20. Kaasuntuoton viikkokohtainen vertailu Mobiilikoelaitoksella reaktoreiden välillä.

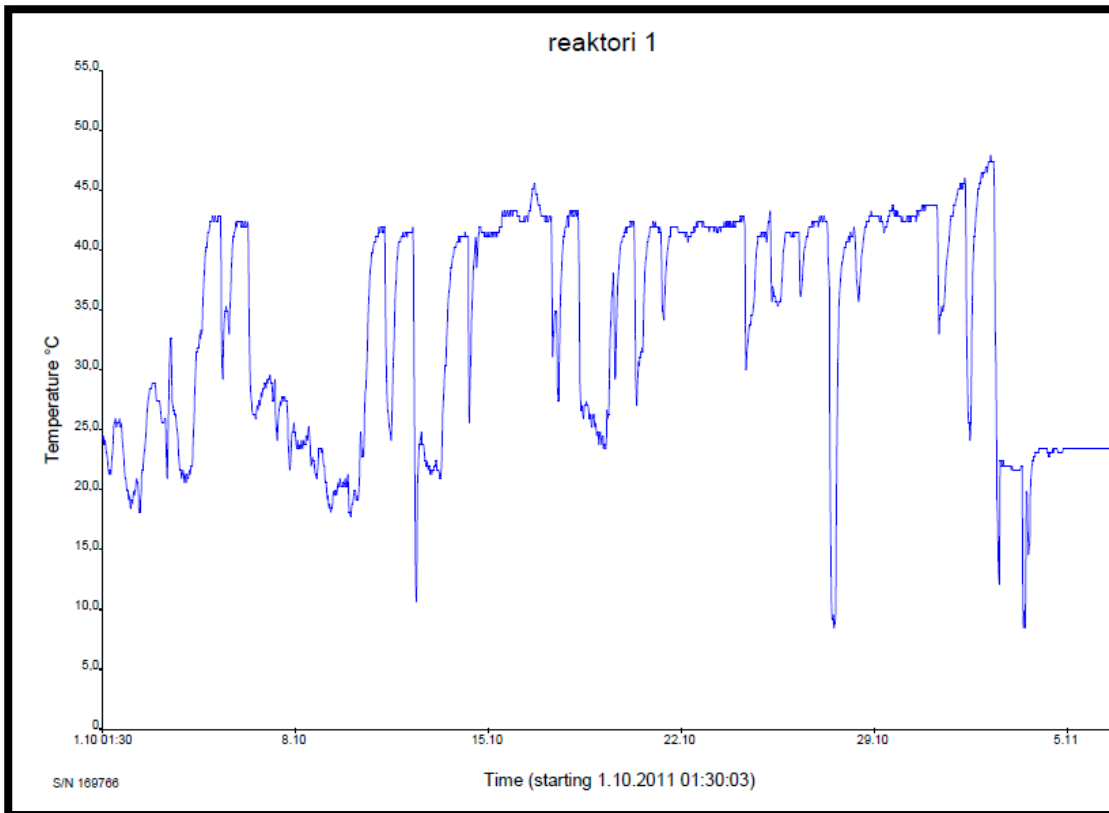
Kokonaisuudessaan termofiilinen prosessi tuotti koko koeajojen ajan huomattavasti enemmän kaasua, tuoton ollessa vähintään 1,5-kertainen mesofiiliin nähden. Kuvan 20 tulokset on laskettu kaasuntuottavuutena virtaamamittareiden ja vallitsevan metaanipitoisuuden perusteella. Koeajojen alussa ilmenneet ongelmat (lämpötilan epästabiilius ja varoventtiilin nesteveajaus) näkyvät kuvaajasta. Viikot 40–43 olivat täysin ongelmatonta prosessiajkoa. Termofiilisessä prosessissa saavutettiin kaksi huippua,

joita kiteytyvät viipymien kiertoon. Mesofiilin tuotto oli koko ajan tasaisempaa, mutta huomattavasti heikompaa kuin termofiilissä. Kaasun muodostus mesofiilisessä prosessissa oli 46 m<sup>3</sup> ja termofiilisessä 83 m<sup>3</sup> ilmaistuna syötettyä orgaanista kuiva-ainetta kohden (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS).

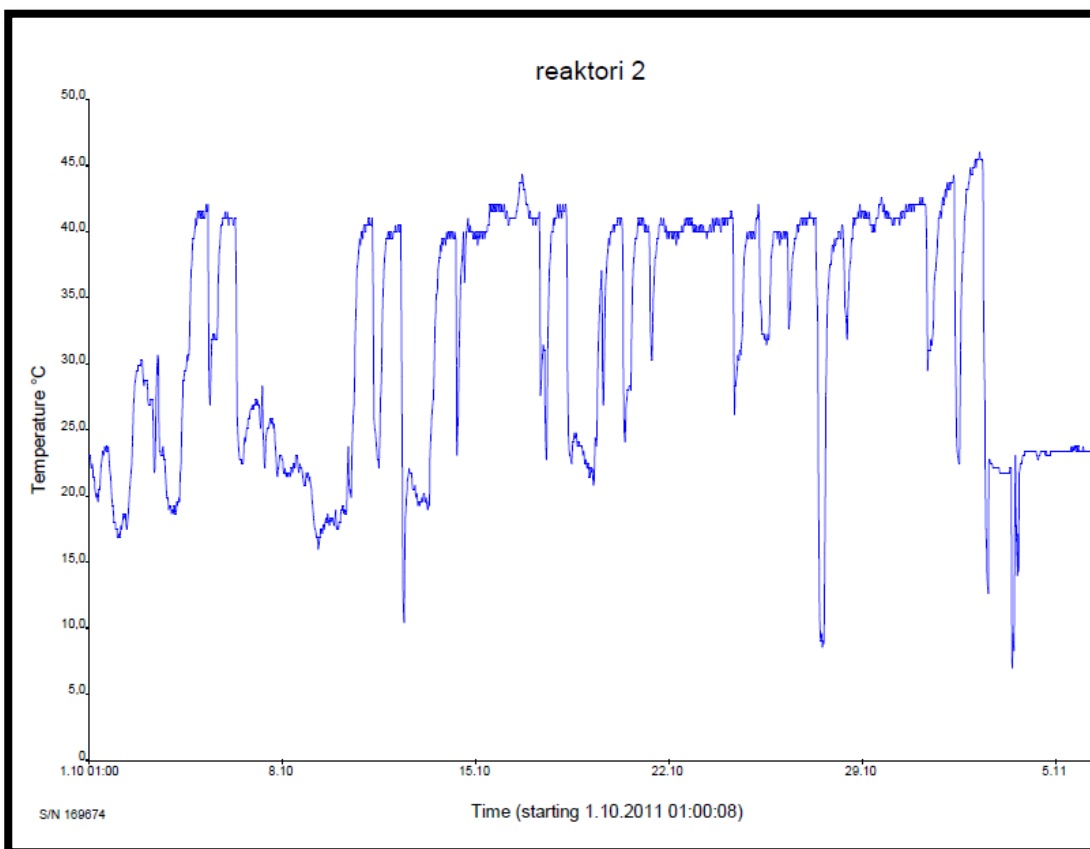
Taulukko 9. Reaktoreiden kaasuntuottavuus koeajojen aikana viikossa sekä orgaanista kuiva-ainetta kohden laskettuna virtaamamittareiden perusteella.

Viikko	Tuotto CH <sub>4</sub> (l/vk)			Tuotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS)	
	R1	R2	R1/R2	R1 (termo)	R2 (meso)
36	769,7	463,5	1,7	36,3	21,8
37	1091,1	323,8	3,4	67,4	20,0
38	1142,8	741,8	1,5	67,3	43,7
39	1568,9	651,8	2,4	106,4	44,2
40	1271,9	688,9	1,9	72,9	39,5
41	1317,3	834,0	1,6	84,5	53,5
42	1528,3	927,8	1,7	102,7	62,4
43	1038,1	799,8	1,3	76,4	58,8
KA	1216,0	678,9	1,9	82,5	46,0

Lisäksi lokakuun ajan mitattiin muodostuvan kaasun lämpötiloja kaasulinjastojen pinnoista. Molemmilla linjoilla oli oma lämpötilaloggeri. Biokaasun lämpötila riippuvuus ilmeni samanlaisena molempien reaktoreiden kaasulinjoissa ja tulokset ilmenevät kuvista 21 ja 22.



Kuva 21. Termofiilisen reaktorin kaasulinjan lämpötilan vertailu lokakuun ajalta.



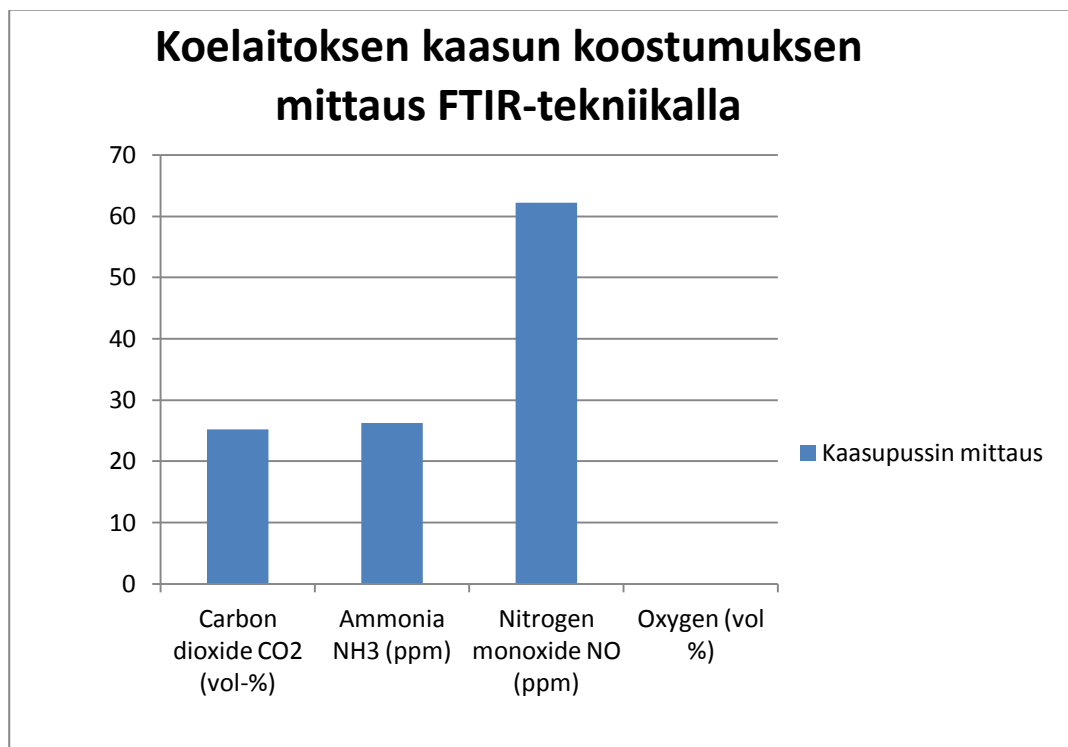
Kuva 22. Mesofiilisen reaktorin kaasulinjan lämpötilan vertailu lokakuun ajalta.

### 4.3 Mobiilikoelaitoksen kaasunkoostumuksen mittaukset

Mobiilikoelaitoksella muodostunutta biokaasua analysoitiin FTIR-tekniikkaan perustuvalla savukaasuanalysaattorilla. Vastaavanlaista komponenttia ei ollut aiemmin kyseisellä laitteella analysoitu. Ensimmäinen mittaus osoitti muun muassa seuraavaa:

- laite ei ollut kalibroitu suurille kaasupitoisuuksille
- suuri metaanipiikki peitti alleen muita näytteen sisältämiä komponentteja
- kaasusisältö kaasupussissa sisälsi sellaisia komponentteja joita laite ei tunnistanut

Laitteella analysoitiin näytettä suoraan kaasupussista. Lisäksi toinen näyte ajettiin suodattimen läpi. Tällöin ympäristössä oleva happi häiritsee mittausta ja aiheuttaa epätarkkuutta. Kuvassa 23 on esitetty ensimmäisen mittauksen pääsääntöiset tulokset, josta nähdään hapen osuuden olevan lähes olematon. Koelaitoksella muodostuvan biokaasun ei pidäkään sisältää happea. Lisäksi kuvasta havaitaan hiilidioksidin osuuden olevan 25 prosentin luokkaa, mikä kuulostaa luotettavalta tulokselta. Typpi-monoksidin ja ammoniakkin osuudesta tarvittaisiin lisätutkimuksia, vaikkakin tiedetään biokaasun sisältävän ppm-pitoisuuksina havaittavissa määrin ainakin typeä.



Kuva 23. FTIR-mittausdata suoraan kaasupussista analysoidusta näytteestä.

#### 4.4 Biokaasupanoskoe

Biokaasupanoskokeita tehtiin kustakin jätejakeista omat määritykset rinnakkaisina. Mesofiilinenkoe kesti 20 vrk ja kaasuja mitattiin kolmesti kokeen aikana. Lisäksi erikseen määritettiin ympin kaasuntuottavuus, joka on vähennetty tuloksista. Iisalmen ja Kiuruveden panoskokeet ovat suoritettu kuivatusta jätevesilietteestä. Taulukossa 10 on esitetty biokaasupanoskokeen pääsääntöiset tulokset. Yhteenvetotaulukossa tulokset ovat ilmoitettu lietteiden tuorepainoa, kuiva-ainetta ja orgaanista kuiva-ainetta kohden.

Taulukko 10. Yhteenveto biokaasupanoskokeiden metaanikaasun tuottavuuksista.

Näyte	TS	VS	VS/TS	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /		
				tFM	tTS	tVS
Lapinlahti	1,53	0,75	0,49	1,6	111,8	234,1
Iisalmi	14,52	10,69	0,74	22,8	143,5	290,0
Kiuruvesi	14,78	9,18	0,62	13,0	82,5	129,5
<b>20 vrk aikana muodostunut metaanin osuus</b>				37,4	337,8	653,6
<b>Keskimääräinen metaanin tuottavuus/vk</b>				12,5	112,6	217,9

Huomioitaessa syötteissä oleva orgaanisen kuiva-aineen osuus viikkokohtaisissa biokaasupanoskokeissa (viikot 38–43), saadaan metaanin keskiarvolliseksi tuottavuudeksi 196 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS kaikista jätejakeista yhteen laskettaessa. Tulokset ilmenevät taulukosta 11. Verrattaessa näitä arvoja kirjallisuuden referenssiarvoon jätevesilietteen biokaasun tuottavuudesta (200–400 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/tVS), havaitaan panoskokeiden tuloksen olevan ko. arvon alarajalla.

Taulukko 11. Panoskokeiden perusteella saavutettava optimaalinen metaanin tuottavuus.

Osuus syötteen VS:stä			Panoskokeiden perusteella (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS)
Lapinlahti	Iisalmi	Kiuruvesi	
29	59	12	195,9
17	70	13	189,6
44	46	10	203,2
29	58	13	195,4
31	57	12	196,5
39	39	21	194,3
<b>Keskiarvot:</b>			
<b>32</b>	<b>55</b>	<b>14</b>	<b>195,8</b>

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSEN TARVE

### *Mobiilikoelaitoksen toimivuus ja kehittämisen tarpeellisuus*

Koelaitoksen optimaalisen biokaasun tuottavuuden yhtenä peruslähtökohtana on lämpötilojen tasaisuus. Koeajojen alussa reaktoreiden lämpötiloissa ilmeni epätasaisuutta. Lämpötila epästabiilisuus johtui glykoli-vesiseoksen vajeesta lämmitysjärjestelmässä. Lisäksi lämmitysverkoston paineessa oli vajetta ja verkostoon oli muodostunut ammoniakille tuoksuva bakteerikasvusto, joka oli siirron myötä lähtenyt liikkeelle. Glykoli kuuluu sokereihin, joka voi vallitsevissa olosuhteissa muodostaa oman kasvuston linjastoon. Linjastoihin vaihdettiin uusi 20 % glykoli-vesiseos. Jotta lämmitysverkostoon ei tulevaisuudessa pääse muodostumaan bakteerikasvustoa, tulee termostaatin lämpötila nostaa maksimiin kerran viikossa.

Mobiilikoelaitoksella toteutettavista koeajoista mesofiilisen reaktorin tuotot jäivät odotettua alhaisemmiksi. Biokaasun tuottavuuden heikkous selittyy osittain prosessissa ilmenneillä ongelmilla (varoventtiilin pinnan vajuus & ylivaluntalaatikoiden huoltotoimenpiteiden yhteys kaasuntuottavuuteen ja kaasuvaraustoon tyhjentymiseen). Virtaamamittareiden toimivuus tarkastettiin ristikytkennällä. Jatkotutkimuksissa tulee selvittää pienen kaasuvirtaaman luotettava mittaaminen sekä mittareihin veden kondensoitumisen mahdollisuus.

Etäyhteys oli ensimmäistä kertaa käytössä mobiilin historiassa ja tämän avulla pystyi monta vikatilannetta hoitamaan. Kuitenkin sähkökatkot olivat yksi huolenaihe, sillä katkon jälkeen reaktoreiden sekoittimia on käytettävä manuaalisesti pysähdyksissä. Koelaitoksessa itsessään ei ole sähkökatkojen varalle varausjärjestelmää. Nostettaessa syötteitä ruuvikuljettimelle, tulevat syötteet nostaa pienissä erissä työturvallisuuden maksimoimiseksi.

Mobiilin kehitystarpeeksi on tämän tutkimuksen myötä ilmennyt mm. kaasun tuottavuuden ja metaanipitoisuuden kvantitatiivinen tarkistaminen, näytteiden oton mahdollisuus kaasulinjoista sekä kaasuvarauston kahdentaminen. Kaasulinjat voivat yhdentyä kuitenkin ennen kaasukattilaa.

*Biokaasupotentiaalin tuottavuus ja johtopäätökset*

Erilaisten jätejakeiden biokaasutusta on tutkittu paljon ja monissa kokeissa on havaittu termofiilisen prosessin tuottavuuden olevan noin 1,3-kertainen mesofiiliin verrattuna. Tosin termofiilistä prosessia pidetään hyvin lämpötila herkkänä, mutta lämpötilan takia tehokkaampana prosessina.

Termofiilisen prosessin tuottavuus oli  $83 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVS}$  ja mesofiiliin  $46 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVS}$  laskettuna virtaamamittareiden tuottavuuden ja vallitsevan metaanipitoisuuden perusteella. Kirjallisuusarvot antavat referenssiksi puhdistamon jätevesilietteen biokaasun tuottavuudeksi  $200\text{--}400 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVS}$ . Koeajoissa viipymänä (Hydraulic Retention Time, HRT) käytettiin 20 vuorokautta ja orgaanisena kuormituksena (Organic Load Rate, OLR)  $1,8 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$ . Jätevesilietteellä orgaanisen kuormituksen tulisi olla välillä  $2\text{--}4 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$  (vrt. luku 2.6.3.8 Orgaaninen kuormitus). Tässä tutkimuksessa alhainen kuormitus yhdistyi suhteellisen lyhyeen viipymään. Tämän seurauksena metaanintuottaja bakteerit eivät välttämättä ehdi kasvaa riittävästi ja biokaasun tuottavuus jää alhaiseksi. Metaanintuottaja bakteerien generaatioaika esimerkiksi mesofiilisen prosessin lämpötilassa on 3 vuorokautta (vrt. luku 2.5.3).

Koeajosuunnitelma on laskettu ennakkoon määritettyjen laboratorioskokeiden ja puhdistamoiden itsensä määrittämien kuiva-aineen orgaanisen aineen osuuden perusteella. Kuitenkin koeajojen aikana lietteiden laadussa ilmeni erittäin suurta vaihtelevuutta, etenkin Lapinlahden jätevesilietteen osalla. Kiuruveden jätevesiliete pysyi koeajojen ajan kaikkein stabiileimpana. Lietteiden koostumuksen vaihtelevuus ja erityisesti orgaanisen aineen osuus aiheutti kuormituksen tippumisen  $1,4 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$  tasolle. Lietteen kuormituksen lisäämisellä ei saavuteta parempaa tuottoa. Biokaasutusprosessin kannattavuutta voidaan lisätä kolmannella syötteellä (biojäte). Biokaasutuslaitoksen kannattavuus riippuu kaasuntuottavuuden lisäksi myös porttimaksuista (Lapinlahti hankkeen loppuraportti).

Biokaasupullopansokokeissa saatiin tuottavuudeksi  $195,8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVS}$ . Tämä osoittaa laboratorio-olosuhteissa toteutettavien kokeiden tuloksen asettuvan kirjallisuusarvon alalaitaan. Laboratorioskokeet on tehty pansopulloissa, joissa orgaaninen kuormitus on korkeampi verrattuna koelaitoksen ajoihin. Pansokokeet eivät huomioi lietteen laadun vaihtelevuutta, mutta osoittavat ko. olosuhteissa kaasuntuottavuuden olevan kirjallisuuteen verrannollista.

## LÄHTEET

Biovakka Oy:n www-sivusto [viitattu 20.10.2011] Saatavissa:

<http://www.biovakka.fi/Nastola>

Kangas, A., Lund, C., Liuksia, S., Arnold, M., Merta, E., Kajolinna, T., Carpén, L., Koskinen, P. & Ryhänen, T., 2011, *Energiätehdokas lietteen käsittely*, Suomen Ympäristökeskus, Helsinki.

Kastensson, J., 2011, *Performance Optimization of the Växtkraft Biogas Production Plant*, Third International Conference on Applied Energy, Perugia, Italy.

Latvala, M., 2009, *kaasuntuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä*, selvitys, Suomen Ympäristökeskus, [viitattu 7.3.2012] Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=106756&lan=FI>

Lund, C., 2010, *Mesofiilisen ja termofiilisen biokaasulaitoksen kuormitusvertailu ja optimointi*, Aalto yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Kemian ja materiaalitekniikan tiedekunta, Helsinki.

Luostarinen, J., 2007, *Energiakasveista tuotetun biokaasun energiatase suomalaisessa maatilakoluokan biokaasulaitoksessa*, opinnäytetyö, Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteidenlaitos, [viitattu 21.3.2012] Saatavissa:

[https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/7238/URN\\_NBN\\_fi\\_jyu-2007691.pdf?sequence=1](https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/7238/URN_NBN_fi_jyu-2007691.pdf?sequence=1)

Manu, H., 2011, *Siirrettävän biokaasulaitoksen monitorointi*, opinnäytetyö, Savonia-ammattikorkeakoulu, Tekniikka Kuopio [viitattu 16.9.2011] Saatavissa:

[https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/25864/Manu\\_Harri.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/25864/Manu_Harri.pdf?sequence=1)

Maailman Luonnon Säätiön www-sivusto [viitattu 18.10.2011] Saatavissa:

[http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen\\_vahentaminen\\_suomessa/uusiutuva\\_energia.html](http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen_vahentaminen_suomessa/uusiutuva_energia.html)

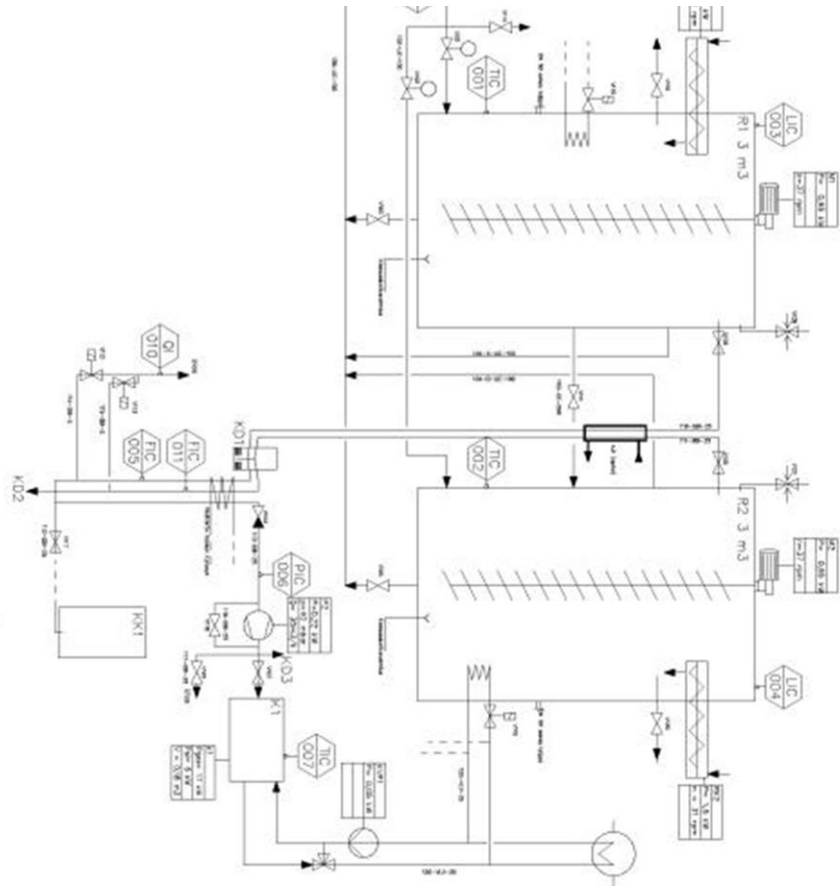
Päivinen, P., 2010, *Jätevesilietteen kompostoinnin kehittäminen*, opinnäytetyö, Savonia-ammattikorkeakoulu, Tekniikka Kuopio.

Päivinen, P., Kohdelaitoksen käyttöpäällikkö, 2011. *Henkilökohtainen tiedonanto*, 24.10.2011.

Pervilä, M., 2007, Nastolan biokaasulaitos yva-syynissä, *Tekniikka&Talous* [verkkolehti] 2007 [viitattu 20.10.2011] Saatavissa:

<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/nastolan+biokaasulaitos+yvasyynissa/a39761>

Toivanen, R., 2008, *Kiteen biokaasulaitoksen mädätysjäännös ja sen ravinteidenkierrätys maanviljelyssä*, opinnäytetyö, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, Puhos [viitattu 24.10.2011] Saatavissa: [http://www.tts.fi/finageng/files/riikka\\_toivasen\\_opinnaytetyo.pdf](http://www.tts.fi/finageng/files/riikka_toivasen_opinnaytetyo.pdf)



Savonia mobiililaitos		Suuri
PI-kaavio biokasvatiltois		ED
Juha Lueterinen		Arvi
NETEMER OY		Suun.
		02.09.21
		Tark.
		TPV

Viikko	Lapinlahden ylijäämäliete rumputiivistimeltä			
	Näytteenotto	TS-%	VS-%	VS/TS-%
32	8.8.2011	3,27	1,59	48,6
32	11.8.2011	3,95	2,38	60,3
32	12.8.2011	3,68	1,46	39,7
33	17.8.2011	1,26	0,30	23,8
34	24.8.2011	1,53	0,75	49,0
35	2.9.2011	2,31	1,14	49,4
36	5.9.2011	4,14	2,17	52,4
36	6.9.2011	1,36	0,65	47,8
36	7.9.2011	4,32	2,53	58,6
36	8.9.2011	2,30	0,97	42,2
37	12.9.2011	1,93	0,52	26,9
37	13.9.2011	0,94	0,18	19,1
37	14.9.2011	0,84	0,42	50,0
37	15.9.2011	0,91	0,19	20,9
37	16.9.2011	0,94	0,22	23,4
38	19.9.2011	2,75	1,09	39,6
38	20.9.2011	1,39	0,76	54,7
38	21.9.2011	1,98	0,86	43,4
38	22.9.2011	0,92	0,19	20,7
38	23.9.2011	1,47	0,7	47,6
39	26.9.2011	1,19	0,3	25,2
39	27.9.2011	0,42	0,15	35,7
39	28.9.2011	1,47	0,56	38,1
39	29.9.2011	1,08	0,32	29,6
39	30.9.2011	1,31	0,48	36,6
40	3.10.2011	2,75	1,36	49,5
40	4.10.2011	1,25	0,44	35,2
40	5.10.2011	1,56	0,76	48,7
40	6.10.2011	2,38	1,16	48,7
40	7.10.2011	3,40	1,82	53,5
41	10.10.2011	2,48	1,09	44,0
41	11.10.2011	0,69	0,32	46,4
41	12.10.2011	1,25	0,37	29,6
41	13.10.2011	0,80	0,21	26,3
41	14.10.2011	2,66	1,32	49,6
42	17.10.2011	2,00	0,79	39,5
42	18.10.2011	1,83	0,79	43,2
42	19.10.2011	1,56	0,73	46,8
42	20.10.2011	1,64	0,62	37,8
42	21.10.2011	1,62	0,67	41,4
43	24.10.2011	1,49	0,60	40,3
43	25.10.2011	3,15	1,60	50,8
43	26.10.2011	0,80	0,37	46,3
43	27.10.2011	1,04	0,56	53,8
43	28.10.2011	1,69	0,68	40,2
44	31.10.2011	3,13	1,49	47,6
	<b>Keskiarvo</b>	1,89	0,84	41,36

<b>lisalmen jätevesiliete lingolta</b>				
Viikko	Näytteenotto	TS-%	VS-%	VS/TS-%
32	8.8.2011	20,27	15,37	75,8
34	24.8.2011	14,52	10,69	73,6
36	5.9.2011	19,25	14,21	73,8
37	13.9.2011	25,21	19,09	75,7
38	20.9.2011	20,06	14,95	74,5
39	27.9.2011	21,92	16,25	74,1
40	4.10.2011	17,63	12,5	70,9
41	11.10.2011	19,66	14,26	72,5
42	18.10.2011	18,57	13,28	71,5
43	25.10.2011	11,96	8,48	70,9
	<b>Keskiarvo</b>	18,91	13,91	73,35

<b>Kiuruveden jätevesiliete suotonauhapuristimelta</b>				
Viikko	Näytteenotto	TS-%	VS-%	VS/TS-%
32	8.8.2011	16,16	9,61	59,5
34	24.8.2011	19,32	12,1	62,6
36	5.9.2011	16,27	9,87	60,7
37	13.9.2011	15,27	9,12	59,7
38	20.9.2011	14,90	9,11	61,1
39	27.9.2011	14,78	9,18	62,1
40	4.10.2011	13,97	8,59	61,5
41	11.10.2011	15,87	9,32	58,7
42	18.10.2011	14,42	8,54	59,2
43	25.10.2011	13,64	8,33	61,1
	<b>Keskiarvo</b>	15,46	9,38	60,62



PVM	R1 LT [°C]	R2 LT [°C]	BIOKASU TUOTTO R1	BIOKASU TUOTTO R2	CH <sub>4</sub> R1 (%)	CH <sub>4</sub> R2 (%)	KONTIN LT [°C]	Kaasu (l) R1	Kaasu (l) R2	Kaasu I/d R1	Kaasu I/d R2	CH <sub>4</sub> R1 (l)	CH <sub>4</sub> R2 (l)	CH <sub>4</sub> R1 (l/d)	CH <sub>4</sub> R2 (l/d)
6.9.11	50,0	36,8	96502	81387	58,9	53,9	18								
7.9.11	50,1	36,7	96892	81476	58,9	57,6	18	390	89	390	89	230	51	230	51
8.9.11	52,3	37,6	97310	81968	55,9	56,4	18	418	492	418	492	234	277	234	277
9.9.11	52,5	36,4	97567	82090	59,3	62,0	19	257	122	257	122	152	76	152	76
12.9.11	47,5	36,8	97920	82311	65,4	40,1	17	353	221	118	74	231	89	77	30
13.9.11	47,4	37,4	98065	82358	63,4	54,2	18	145	47	145	47	92	25	92	25
14.9.11	52,6	37,1	98403	82358	54,2	61,2	24	338	0	338	0	183	0	61	0
15.9.11	53,3	37,5	98932	82374	56,0	60,1	17	529	16	529	16	296	10	296	10
16.9.11	55,2	36,9	99246	82543	56,7	64,5	17	314	169	314	169	178	109	59	36
19.9.11	55,0	37,1	99897	82750	61,0	66,0	7	651	207	217	69	397	137	397	137
20.9.11	54,8	36,7	100221	83055	61,0	67,0	14	324	305	324	305	198	204	66	68
21.9.11	54,8	37,2	100560	83209	60,0	66,0	7	339	154	339	154	203	102	203	102
22.9.11	55,0	37,1	101014	83405	59,5	64,0	9	454	196	454	196	270	125	270	125
23.9.11	55,0	37,3	101405	83608	58,0	63,0	8	391	203	391	203	227	128	227	128
26.9.11	55,0	36,4	101661	83712	65,9	66,2	15	256	104	85,3	34,7	169	69	56	23
27.9.11	54,3	36,3	101977	83880	64,4	65,9	17	316	168	316	168	204	111	204	111
28.9.11	54,7	36,7	102597	84302	58,9	59,3	22	620	422	620	422	365	250	365	250
29.9.11	54,8	37,3	103159	84404	60,8	62,1	15	562	102	562	102	342	63	342	63
30.9.11	56,0	36,5	103782	84527	56,6	59,9	24	623	123	623	123	353	74	353	74
3.10.11	54,0	36,5	104385	84724	62,1	64,7	18	603	197	201	65,7	374	127	125	42
4.10.11	54,8	37,5	104748	84868	59,9	41,2	10	363	144	363	144	217	59	217	59
5.10.11	54,9	37,1	105199	84964	55,9	56,6	22	451	96	451	96	252	54	252	54
6.10.11	55,0	36,5	105578	85221	56,6	61,2	28	379	257	379	257	215	157	215	157
7.10.11	54,5	36,7	105974	85512	60,3	62,2	15	396	291	396	291	239	181	239	181
10.10.11	54,3	36,8	106507	85765	63,1	64,9	8	533	253	177,7	84,3	336	164	112	55
11.10.11	55,2	36,8	106859	85926	56,4	61,3	28	352	161	352	161	199	99	199	99
12.10.11	54,8	36,5	107292	86118	56,4	61,5	18	433	192	433	192	244	118	244	118
13.10.11	54,9	36,9	107686	86382	62,5	66,1	8	394	264	394	264	246	175	246	175

