



Jenni Airaksinen

**BIOKAASUN TUOTANTO RUOKOHELVESTÄ JA LEHMÄN LIETELANNASTA  
MAATILAMITTAKAAVAN BIODIGESTIOINTILAITOKSELLA**

**BIOKAASUN TUOTANTO RUOKOHELVESTÄ JA LEHMÄN LIETELANNASTA  
MAATILAMITTAKAAVAN BIOKAASULAITOKSELLA**

Jenni Airaksinen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2012  
Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu  
Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma, ympäristöhoidon  
suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Jenni Airaksinen

Opinnäytetyön nimi: Biokaasun tuotanto ruokohelvestä ja lehmän lietelannasta  
maatilamittakaavan biokaasulaitoksella

Työn ohjaaja: Mikko Aalto

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2012      Sivumäärä: 60

---

Työn tavoitteena oli tutkia ruokohelven ja lehmän lietelannan soveltuvuutta biokaasun tuotantoon maatilakokoluokan biokaasulaitoksessa. Työn toimeksiantajana toimi Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT), jonka vetämään Maatilojen mahdollisuudet biokaasuteknologian hyödyntämiseen Maito-suomessa eli BIOTILA -hankkeeseen työ liittyi.

Aineiston hankinta suoritettiin koejärjestelyinä MTT Maaningan biokaasulaitoksella keväällä 2011. Kokeessa biokaasulaitoksen reaktoriin syötettiin päivittäin lietelantaa ( $10 \text{ m}^3$ ) sekä tuorekorjattua ruokohelpeä (700 kg), siten että ruokohelven osuus oli noin 20 % syötteen orgaanisesta aineesta. Biokaasuntuotto sekä -kulutustiedot ja metaanipitoisuus tallentuivat automaattisesti tietokoneelle. Syötteistä sekä lietteistä otettiin näytteitä viikoittain analyysyjä varten.

Biokaasun tuotto vaihteli kokeen aikana välillä 272 - 338  $\text{Nm}^3/\text{d}$  ja metaanipitoisuus oli keskimäärin 57 %. Ruokohelven ja lehmän lietelannan yhteiskäsittelykokeessa metaanintuotto vaihteli kokeen aikana välillä 152 - 203  $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$ . Tulosten perusteella tuorekorjattu ruokohelppi sopii lisäsyötteeksi kaasuntuottoa kasvattamaan lietelantaperusteiseen biokaasuprosessiin. Biokaasulaitoksen syötteeksi viljeltävän ruokohelven viljelytekniikkaan tulisi kuitenkin kiinnittää enemmän huomiota, jotta saataisiin tuotettua helposti sulavaa ruokohelpeä. Biokaasulaitoksen ominaisuudet ja tekniikka tulee muistaa huomioida valittaessa syötteitä, jotta prosessin ongelmilta vältyttäisiin.

---

Asiasanat

Biokaasu, ruokohelppi, lietelanta, yhteiskäsittely

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Agricultural and Rural Industries, Environmental Management

---

Author: Jenni Airaksinen

Title of thesis: Biogas production from reed canary grass and cow sludge in a farm-scale biogas plant

Supervisor: Mikko Aalto

Term & year when the thesis was submitted: Spring 2012 Number of pages: 60

---

The aim of this thesis was to research the possibilities for co-digestion of reed canary grass with cow sludge in a farm-scale biogas plant. The thesis was done for MTT Agrifood Research Finland. This thesis is one part of the project BIOTILA, lead by MTT. The project aims to develop the possibilities of farms to exploit biogas technology in the main milk production area in Finland.

The material for this thesis was collected with an experimental arrangement at the biogas plant of MTT Maaninka in the spring of 2011. Daily feedstock in this experiment was cow sludge (10 m<sup>3</sup>) and reed canary grass (700 kg). The share of reed canary grass of the volatile solids of feedstock was 20%. The information on methane content, biogas yield, and consumption was saved automatically on the computer. Samples were taken every week from feedstock and sludge for analysis.

The biogas yield varied between 272 - 338 Nm<sup>3</sup>/d and the methane content of biogas was 57 % on average. The methane yield varied between 152 - 203 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/tVS in this co-digesting experiment. On the basis of the results it can be pointed out that reed canary grass is suitable as additional feedstock for sludge based biogas process. To produce easily digestible reed canary grass for biogas plant's use we have to focus more on cultivation techniques. To avoid possible problems in the biogas process it is very important to pay attention to the individual features and technology of the biogas plant when feedstock is chosen for the plant.

---

Keywords:

Biogas, reed canary grass, sludge, co-digestion

# SISÄLLYS

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 BIOKAASUN TUOTANTO .....</b>	<b>10</b>
2.1 ANAEROBISEN HAJOAMISEN VAIHEET .....	11
2.2 BIOKAASUPROSESSIT .....	11
2.2.1 Mesofiilinen ja termofiilinen prosessi .....	11
2.2.2 Märkä- ja kuivaprosessit .....	12
2.2.3 Panos- ja jatkuvatoimiset prosessit .....	13
2.2.4 Yksi- ja monivaiheiset prosessit .....	13
2.3 OLOSUHTEET .....	13
2.3.1 Happamuus .....	13
2.3.2 Haihtuvat rasvahapot, VFA .....	14
2.3.3 Ammoniakki, NH <sub>3</sub> .....	15
2.4 PROSESSIN PARAMETRIT .....	15
2.4.1 Kuormitus, OLR (organic loading rate) (kgVS/m <sup>3</sup> *d) .....	15
2.4.2 Hydraulinen viipymä, HRT .....	16
2.4.3 Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen kuiva-aine (VS) .....	17
<b>3 LAINSÄÄDÄNTÖ JA POLITIIKKA .....</b>	<b>18</b>
3.1 LAINSÄÄDÄNTÖ .....	18
3.2 SYÖTTÖTARIFFI .....	21
3.3 MAATALOUDEN INVESTOINTITUKI .....	22
<b>4 BIOKAASULAITOKSEN SYÖTEMATERIAALIT JA NIIDEN METAANINTUOTTOPOTENTIALIT .....</b>	<b>24</b>
<b>5 BIOKAASUN OMINAISUUDET JA HYÖTYKÄYTTÖ .....</b>	<b>28</b>
<b>6 LIETELANNAN JA ENERGIAKASVIEN YHTEISKÄSITTELY BIOKAASULAITOKSISSA .....</b>	<b>30</b>
<b>7 RUOKOHELVEN TUOTANTO JA KÄYTTÖ BIOKAASULAITOKSEN SYÖTTEENÄ .....</b>	<b>30</b>
7.1 RUOKOHELVEN SOVELTUVUUS BIOKAASULAITOKSEN SYÖTTEEKSI .....	34
7.2 METAANINTUOTTOPOTENTIALI .....	35
<b>8 AINEISTON HANKINTA JA MENETELMÄT .....</b>	<b>36</b>
8.1 KOKEESSA KÄYTETTY RUOKOHELPI .....	37
8.2 KOEJÄRJESTELYT .....	39
8.3 PH-MITTAUS JA KUIVA-AINEPITOISUUDEN MÄÄRITYS .....	40
8.4 KÄYTÄNNÖN OPEROINTI .....	42
<b>9 TULOKSET .....</b>	<b>44</b>
9.1 PROSESSIN TOIMINTA .....	44
9.2 BIOKAASUN TUOTTO JA METAANIPITOISUUS .....	45
9.3 METAANIN TUOTTO .....	45

9.4 LIETELANNAN KOOSTUMUKSEN VAIKUTUS KAASUN TUOTANTOON .....	47
9.5 RUOKOHELVEN OMINAISUUKSIEN JA SYÖTTÖTASOJEN VAIKUTUS KAASUN TUOTANTOON .....	48
9.6 METAANINTUOTTOPOTENTIALIT .....	49
<b>10 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>50</b>
10.1 PROESSIN TOIMIVUUS.....	50
10.2 METAANINTUOTTO .....	51
10.3 RUOKOHELVEN VAIKUTUS TULOSSIIN .....	53
10.4 TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN.....	54
<b>11 POHDINTA .....</b>	<b>57</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>58</b>

# 1 JOHDANTO

Kiinassa ja Intiassa biokaasua on tuotettu aina 1800 – luvulta lähtien ja nykyään esimerkiksi Kiinassa on miljoonia kotitalouksien omia biokaasureaktoreita. Suomessa ei vielä 2000-luvullakaan ole suuremmissa määrin saatu hyödynnettyä biokaasuteknologian energiantuotantopotentiaalia, vaikka kiinnostus uusiutuvaa ja puhdasta energianlähdettä kohtaan onkin kasvussa. Suomessa biokaasutuksella tuotetun metaanin energiapotentiaalin on arvioitu olevan jopa 14 TWh. (Lampinen 2003, 31 -34; Suomen biokaasuyhdistys, hakupäivä 2.2.2012.)

Suomessa toimivista biokaasulaitoksista on koottu tietoja vuosittain Suomen biokaasulaitosrekisteriin. Rekisterin mukaan vuonna 2010 Suomessa toimi yhteensä 35 biokaasulaitosta, joista suurimmassa osassa käsitellään yhdyskuntien jätevesiä. Maatilakohtaisia biokaasulaitoksia oli vuonna 2010 toiminnassa 10. Kaatopaikoilta biokaasua kerätään yhteensä 39 laitoksella. Vuonna 2010 koko Suomessa tuotettiin biokaasua yhteensä 139,1 milj. m<sup>3</sup>, mutta vain 66 % siitä hyödynnettiin energiantuotantoon. Hyödyntämisaste on etenkin kaatopaikoilla sijaitsevilla laitoksilla alhainen, sillä syrjäisen sijainnin vuoksi läheltä ei välttämättä löydy lämmölle käyttäjää. Suomen uusiutuvan energian tuotannosta biokaasulla tuotettu energiamäärä, noin 420 GWh, on alle 1 %. Hyödyntämättä jäi vuonna 2010 energiaa noin 200 GWh:n arvosta. Pääosa hyödynnetystä energiasta hyödynnetään lämpönä. Maatilakohtaisilla laitoksilla saadaan hyödynnettyä lähes kaikki tuotettu kaasu energiaksi. Maatilojen mahdollisuudet biokaasun tuotantoon ja energiaomavaraisuuden nostamiseen kiinnostaa varmasti tulevaisuudessa, etenkin jos fossiilisten polttoaineiden sekä lannoitteiden hintojen nousu jatkuu. (Huttunen & Kuittinen 2011, 5,15,23.)

Ruokohelpi on profiloitunut Suomessa kevätkorjattavaksi, monivuotiseksi ja helppohoitoiseksi energiakasviksi, mutta tuorekorjatun ruokohelven mahdollisuudet ovat jääneet taka-alalle. Maatiloilla lanta on luonnollinen

biokaasulaitoksen perussyöte, mutta kasvimateriaalia, kuten ruokohelpeä, lisäämällä kaasuntuotto paranee selvästi. Ruokohelvestä voisi saada hyvän lisän maatilojen viljelykiertoon ja biokaasulaitosten syötteeksi.

Opinnäytetyön tavoite on selvittää ruokohelven ja naudon lietelannan yhteiskäsittelyn mahdollisuuksia maatilakohtaisessa biokaasulaitoksessa sekä havaita mahdolliset ongelmakohdat. Tarkoituksena on samalla tuottaa uutta tietoa lietelannan ja energiakasvien yhteiskäsittelystä biokaasuntuotannossa. Ruokohelven ja lietelannan yhteiskäsittelykoe on osa laajempaa kokonaisuutta. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen (MTT) vetämässä Maatilojen mahdollisuudet biokaasuteknologian hyödyntämiseen Maito-Suomessa eli BIOTILA -hankkeessa selvitetään laajemmin biokaasuteknologian edistämistä Pohjois-Savossa. Hanke toteutetaan vuosien 2008 - 2012 aikana ja sen rahoittavat Pohjois-Savon ELY-keskus (EMR), osa Pohjois-Savon kunnista sekä MTT. Koejärjestelyt suoritetaan MTT Maaningan maatilakokoluokan biokaasulaitoksessa.



## Opinnäytetyössä käytettyjä käsitteitä:

Mesofiilinen prosessi	Biokaasuprosessi, jonka lämpötila on noin 37°C.
Termofiilinen prosessi	Biokaasuprosessi, jonka lämpötila on noin 55°C.
Jäännös	Biokaasuprosessin lopputuote, jota voidaan käyttää lannoitteena.
BG	Biogas, biokaasusta käytetty lyhenne taulukoissa
CH <sub>4</sub>	Metaanin kemiallinen kaava
Nm <sup>3</sup>	Normikuutio, yksi kuutiometri kaasua perustilassa 0°C ja 1,01325 bar
TS	Total solids, kuiva-aine. Ilmoitetaan yleensä prosentteina märkápainosta.
VS	Volatile solids, orgaaninen kuiva-aine eli biohajoava aine. Metaanintuotto ilmoitetaan usein metaanintuottona lisättyä orgaanista kuiva-ainetta kohden, CH <sub>4</sub> /tVS.
FM	Fresh material, tuore materiaali. Käytetään ilmoitettaessa syötteen märkápaino.
HRT	Hydraulic retention time, hydraulinen viipymä. Käsiteltävän materiaalin viipymä prosessissa päivinä.
OLR	Organic loading rate, kuormitus. Reaktoriin lisätyn orgaanisen kuiva-aineen määrä reaktorin nestetilavuutta kohden. Ilmoitetaan yleensä kg/VS/m <sup>3</sup> d.

## 2 BIOKAASUN TUOTANTO

Biokaasun tuotannossa on monia hyviä puolia verrattuna useisiin perinteisiin energiantuotantotapoihin, joissa energiaa tuotetaan fossiilisista polttoaineista. Biokaasu on puhdasta, uusiutuvaa energiaa, joka vähentää kasvihuonekaasupäästöjä fossiilisia polttoaineita korvattaessa sekä biohajoavien materiaalien hallitsemattoman hajoamisen estyessä, esimerkkinä maatalouden lannan metaanipäästöt ilman käsittelyä. Biokaasun tuotannossa hiilidioksidikierto on lyhyt kasvien käyttäessä tuotannossa vapautuneen hiilidioksidin fotosynteesissä ja kasveja rehuna tai biokaasulaitoksen syötteenä käytettäessä kierto säilyy suljettuna. Tuotannon raaka-ainevalikoima on laaja; syötteenä voi käyttää muun muassa biojätettä, eläinten lantaa, puhdistamolietettä tai kasvibiomassoja. Biokaasun tuotannon avulla voidaan vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista, jonka lisäksi tuotanto auttaa saavuttamaan poliittisia tavoitteita uusiutuvan energian käytön lisäämisestä. Biokaasua voidaan käyttää lämmön ja sähkön tuotantoon tai jalostaa ajoneuvojen polttoaineeksi. (Al Seadi, Rutz, Prassl, Köttner, Finsterwalder, Volk & Janssen 2008, 12 – 13.)

Maatilan biokaasulaitoksesta hyötyy ympäristön lisäksi viljelijä: vastaanottaessa tilan ulkopuolisia raaka-aineita voi saada porttimaksua ja siten lisätuloa, energiaomavaraisuus kasvaa ja tila saavuttaa lähes suljetun ravinnekierron, jossa ravinteet kiertävät pelloilta biokaasulaitokseen ja takaisin. Käsittelyjäännös on erinomaista lannoitetta. Toisin kuin poltossa, biokaasuprosessi säilyttää kaikki raaka-aineiden sisältämät ravinteet, kuten lannoituksen kannalta oleelliset fosforin ja typen, hivenaineet ja myös osan hiilestä. Prosessin käsittelyjäännös voidaan hyödyntää sellaisenaan lannoituksessa tai siitä voidaan jalostaa erilaisia lopputuotteita, mm. väkilannoitteiden kaltaisia lannoitevalmisteita. Käsittelemättömään lietelantaan verrattuna käsittelyjäännös on tasalaatuisempaa, hajuttomampaa ja sen ravinteet ovat paremmin kasvien käytettävissä sekä sen hiili-typin – suhde on kasvien kannalta parempi. Anaerobinen käsittely hygienisoi materiaaleja: käsittelyn ansiosta rikkakasvin

siementen, tuholaisten, eräiden orgaanisten haitta-aineiden sekä lannan kasville haitallisten yhdisteiden määrä vähenee. (Paavola 27.3.2007, 25 – 26; Al Seadi ym. 2008, 13 – 14; Luostarinen 2012, suullinen tiedonanto.)

## **2.1 Anaerobisen hajoamisen vaiheet**

Biokaasua muodostuu orgaanisen aineen hajotessa mikrobiologisesti hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa. Hajoaminen voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, joissa kussakin eri mikrobit osallistuvat hajotustyöhön. Anaerobisen hajoamisen ensimmäinen vaihe on hydrolyysi, jossa hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat hajotetaan haponmuodostajabakteerien erittämien entsyymien voimin. Hydrolyysissä muodostuu yksinkertaisia liukoisia yhdisteitä, kuten ammoniakkaa ja sokereita. Seuraavassa vaiheessa, asidogeneesissä eli happokäymisessä, nämä hydrolyysivaiheessa muodostuneet yhdisteet hajoavat haihtuviksi rasvahapoiksi (VFA). Etikkahaponmuodostusvaiheessa eli asetogeneesissä rasvahapot hajoavat edelleen asetaatiksi, hiilidioksidiksi sekä vedyksi vetyä tuottavien bakteerien toimesta. Anaerobisen hajoamisen viimeisessä vaiheessa metaaninmuodostajabakteerit tuottavat asetaatista tai vedystä ja hiilidioksidista metaania. (Lehtomäki, Paavola, Luostarinen & Rintala 2007, 22 – 23.)

## **2.2 Biokaasuprosessit**

### **2.2.1 Mesofiilinen ja termofiilinen prosessi**

Prosessin oikea lämpötila on tärkeä, sillä biokaasuprosessin mikrobeilla on kaksi yleisesti käytettyä optimilämpötila-aluetta: 35 - 38 °C (mesofiilinen prosessi) sekä 50 – 55 °C (termofiilinen prosessi). Reaktorin lämpötila pyritään pitämään mikrobeille suotuisana lämmityksen avulla. Mikrobit eivät itse juurikaan tuota lämpöä, mutta hyödyntämällä osa prosessin tuottamasta kaasusta reaktorin lämmitykseen, esimerkiksi kaasukattilan avulla, voidaan reaktorin lämpötila pitää haluttuna. Termofiilisen prosessin lämmitystarve on

luonnollisesti mesofiilistä prosessia korkeampi. (Lehtomäki ym. 2007, 25.)

Korkeamman lämpötilan vuoksi termofiilisessä prosessissa käytetty raaka-aine tai raaka-aineseos hajoaa nopeammin ja sen hygienia on parempi kuin mesofiilisessä prosessissa. Viipymä on lyhyempi hajoamisen ollessa nopeaa ja siten myös prosessin vaatima reaktoritilavuus on pienempi. Termofiilisessä prosessissa biokaasun tuotto voi olla korkeampi kuin mesofiilisessä prosessissa. Mesofiilinen prosessi on termofiilistä varmatoimisempi, sillä se ei ole yhtä herkkä lämpötilan ja pH:n muutoksille eikä inhibitoille. Termofiilistä prosessia voi helpommin inhiboida esimerkiksi ammoniakki, jonka määrä nousee lämpötilan noustessa. (Lehtomäki ym. 2007, 25.)

### **2.2.2 Märkä- ja kuivaprosessit**

Biokaasuprosessi voi syötteistä riippuen olla joko märkä- tai kuivaprosessi. Märkäprosessissa syötteiden kuiva-ainepitoisuus on yleensä korkeintaan 10 -13 %, jolloin reaktorimassan sekoittaminen ja massavirtojen pumppaaminen on helppoa. Märkäprosessireaktori on yleensä jatkuvasekoitteinen, jossa sekoittaminen tapahtuu esimerkiksi lapasekoittimilla. Sekoittaminen tasoittaa reaktorin lämpötilaeroja, edistää hajotusta levittämällä mikrobeja kaikkialle reaktorimassaan, vapauttaa kaasukuplia materiaalista ja ehkäisee pintalietteen muodostumista sekä laskeutumista. (Lehtomäki ym. 2007, 33.)

Kuivaprosessissa käsiteltävien syötteiden kuiva-ainepitoisuus on märkäprosessin syötteitä korkeampi, noin 20 – 40 %. Kuivaprosessivaihtoehtoja on monia, mutta näille yhteistä on käsittelyjäännöksen kierrättäminen takaisin reaktoriin mikrobikannan säilyttämisen vuoksi. (Lehtomäki ym. 2007, 33.)

Märkäprosessissa on paljon nestettä, jonka vuoksi sen kaasuntuotto reaktoritilavuutta kohden on usein kuivaprosessilaitosta alhaisempi. Märkäprosessin kaasuntuottoa voi nostaa kuivien syötteiden, kuten säilörehun, lisääminen joukkoon. Kiinteät ja kuivat syötteen voidaan sekoittaa märkään syötteeseen esimerkiksi ruuvikuljettimen avulla. Automatisointi on

kuivaprosessissa vaikeampaa, sillä usein kuivaprosessin pH:n puskurointikyky on huonompi kuin märkäprosessin, jonka vuoksi valvonnan tarvekin on suurempi. (Lehtomäki ym. 2007, 33.)

### **2.2.3 Panos- ja jatkuvatoimiset prosessit**

Panosprosessireaktorit täytetään ja tyhjennetään uudella materiaalilla tietyin väliajoin. Täytettävään materiaaliin on usein sekoitettu käsiteltyä materiaalia mikrobikannan säilymiseksi. Jatkuvatoimisessa prosessissa materiaalia syötetään ja poistetaan tasaisin väliajoin ja automaattisesti. Jatkuvatoimisen prosessin kaasuntuotto on tasaisempaa, sillä kun panosprosessi täytetään uudella materiaalilla, kaasuntuotto alkaa vasta päivien päästä. Panosreaktoreita käytetäänkin yleisesti useita rinnakkain, jokin reaktoreista on aina kiivaimman kaasuntuoton vaiheessa ja kaasuntuotto on tasaisempaa. (Lehtomäki ym. 2007, 34.)

### **2.2.4 Yksi- ja monivaiheiset prosessit**

Yksivaiheisessa prosessissa kaikki hajoamisen vaiheet tapahtuvat samassa reaktorissa, samoissa olosuhteissa. Monivaiheisessa prosessissa eri hajoamisen vaiheita voidaan erotella eri reaktoreihin tietyn hajoamisen vaiheen mikrobien olosuhteiden optimoimiseksi. Monivaiheisella prosessilla on mahdollista tehostaa hajotusta, parantaa kaasuntuottoa sekä pidentää viipymää. Pidempi viipymäaika vähentää riskiä syötteiden oikovirtaukseen, jossa syöte virtaa liian nopeasti pois reaktorista hajoamatta kunnolla. (Lehtomäki ym. 2007, 35.)

## **2.3 Olosuhteet**

### **2.3.1 Happamuus**

Prosessia pyörittävät mikrobit voivat olla herkkiä olosuhteiden muutoksille.

Lehtomäen ym. (2007,25) mukaan prosessin pH:n tulisi olla 6,5 - 7,5, sillä etenkin metaaninmuodostajabakteerit reagoivat pH:n muutoksiin herkästi. Mesofiilisessä prosessissa tulee ongelmia pH:n laskiessa alle 6 tai noustessa yli 8,3. Lämpötilan noustessa hiilidioksidin vesiliukoisuus laskee eikä se siten enää muodosta veden kanssa hiilihappoa ja puskuroi pH:n muutosta vastaan yhtä paljon kuin alemmissa lämpötiloissa. Hiilidioksidin liukoisuuden muuttumisen myötä termofiilisen prosessin pH-arvot ovat usein mesofiilisen prosessin arvoja korkeampia. Myös ammoniakki voi vaikuttaa prosessin pH-arvoon nostavasti. VFA:n kertyminen prosessiin vastaavasti laskee pH:ta. (Al Seadi ym. 2008, 25 - 26.)

Syötteillä voidaan vaikuttaa prosessin pH:n puskurointikykyyn, vaikka yleensä normaalisti toimiva biokaasuprosessi pystyy itse puskuroimaan pH:ta ja pitämään sopivan pH:n prosessissa. Kuitenkin prosessin puskurointikyvyn ylittyessä pH - arvo muuttuu äkillisesti ja inhiboi prosessin. Lietelannalla on todettu olevan hyvä puskurointikyky, mutta esimerkiksi jätevesien puskurointikyky on jo selvästi heikompi ja pH:n tarkkailu kannattaa. Tarvittaessa syötteen pH:ta voidaan säätää prosessille edullisemmaksi. (Lehtomäki ym. 2007, 25.)

### **2.3.2 Haihtuvat rasvahapot, VFA**

Haihtuvat rasvahapot, kuten propionaatti sekä butyraatti, ovat biokaasuprosessin välituotteita, joita muodostuu happokäymisvaiheessa. Prosessin vakautta voidaan seurata haihtuvien rasvahappojen pitoisuutta seuraamalla. Haihtuvia rasvahappoja muodostuu nopeasti käytettäessä helposti hajoavia syötteitä. Kuormituksen ollessa liian suuri prosessiin kertyy haihtuvia rasvahappoja, sillä metanogeenit lisääntyvät haponmuodostajabakteereita hitaammin. VFA:n kertyminen voi aiheuttaa metaanintuoton laskemisen tai pysähtymisen ja jopa prosessin pH:n laskemisen, mikäli prosessin puskurikyky on heikko. Yleensä prosessin hyvän puskurikyvyn vuoksi VFA:n kertyminen ei näy pH:n laskuna. Muutokset alkaliniteetissa, eli veden kyvyssä neutraloida happoja, voivat johtua VFA:n kertymisestä prosessiin. On myös havaittu, että

reaktoreiden välillä on huomattavia eroja haihtuvien rasvahappojen pitoisuuksissa. Erojen on päätelty johtuvan mikrobikannan vaihtelusta reaktoreiden välillä. Mikrobikannan yksilöllisyyden vuoksi prosessin optimaalinen rasvahappopitoisuus on reaktorikohtaista. (Lehtomäki ym. 2007, 33; Al Seadi ym. 2008, 26; Luostarinen 2012, suullinen tiedonanto.)

### **2.3.3 Ammoniakki, NH<sub>3</sub>**

Ammoniakkia muodostuu prosessissa happokäymisvaiheessa proteiineista hajoamalla, mutta liian suurina pitoisuuksina ammoniakki voi aiheuttaa inhibition. Ammoniakki haittaa etenkin metaaninmuodostajabakteerien toimintaa, jonka vuoksi on suositeltu, että prosessin ammoniakkipitoisuus pidettäisiin alle 80 mg/l. Mikrobeja pystytään totuttamaan aiempaa korkeampiin ammoniakkipitoisuuksiin nostamalla syötetyn typen määrää hiljalleen, minkä vuoksi siedetyn ammoniakin pitoisuudet vaihtelevat myös reaktoreittain. Ammoniakin osuus ammoniumtypestä (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) kasvaa lämpötilan ja pH:n noustessa, minkä vuoksi termofiilisessä prosessissa on suurempi riski ammoniakki-inhibitiioon. (Al Seadi ym. 2008, 26; Luostarinen 2012, suullinen tiedonanto.)

## **2.4 Prosessin parametrit**

### **2.4.1 Kuormitus, OLR (organic loading rate) (kgVS/m<sup>3</sup>\*d)**

Kuormituksella tarkoitetaan sitä orgaanisen kuiva-aineen määrää, joka syötetään reaktoriin päivässä reaktorin nestetilavuusyksikköä kohden. Kuormitus ilmoitetaan yleensä orgaanisena kuiva-aineena (kgVS/m<sup>3</sup>\*d), mutta se voidaan ilmoittaa myös kemiallisena hapenkulutuksena (kgCOD/m<sup>3</sup>\*d). Lannan sekä muun orgaanisen jätteen yhteiskäsittelylaitoksen reaktorin kuormitus on korkeampi, noin 5 -7 kgVS/m<sup>3</sup>\*d, kuin lehmänlantaa käsittelevässä reaktorissa, jossa kuormitus on yleensä välillä 2,5 – 3,5 kgVS/m<sup>3</sup>\*d. Kuormituksen ollessa liian korkea, prosessiin kertyy haihtuvia rasvahappoja,

jotka voivat haitata prosessia. Kuormituksen voi laskea yksinkertaisella laskentakaavalla (KAAVA 1). (Lehtomäki ym. 2007, 42; Al Seadi ym. 2008, 28.)

*KAAVA 1. Kuormituksen laskentakaava*

$$OLR \text{ (kgVS/m}^3\text{*d)} = FM*VS/ V_R$$

*jossa FM on syötteen määrä päivässä, kg*

*VS on syötteen orgaanisen aineen pitoisuus, %*

*V<sub>R</sub> on reaktorin nestetilavuus, m<sup>3</sup>*

(Al Seadi ym. 2008, 28.)

#### **2.4.2 Hydraulinen viipymä, HRT**

Viipymäaika (HRT, hydraulic retention time) on se keskimääräinen aika, jonka syöte viipyy reaktorissa. Viipymän voi laskea helposti: reaktorin nestetilavuus jaetaan syötteen päivittäisellä määrällä. Mikrobin liian aikaisen huuhtoutumisen välttämiseksi, etenkin jatkuvasyötteisissä reaktoreissa, tulee käyttää pidempää viipymää kuin mikrobin kaksinkertaistumisaika on. Hapettomissa oloissa elävien mikrobin kaksinkertaistuminen vaatii vähintään 10 päivää. (Lehtomäki ym. 2007, 42; Al Seadi ym. 2008, 28.)

Pitkää viipymää käytettäessä syöte hajoaa paremmin, käsittelyjäännös on hygienialtaan parempaa ja kaasuntuotto lisättyä orgaanista ainesta kohden on korkeampi kuin lyhyessä viipymässä. Viipymäaika pidennettäessä reaktorin sekoitus- ja lämmitystarve sekä reaktorin kokovaatimus kasvaa. Suomessa biokaasulaitoksilla käytetään yleensä 12 – 30 vuorokauden mittaista viipymää. Termofiilisen prosessin viipymä voi olla joitain päiviä lyhyempi kuin mesofiilisen prosessin. Tarvittavan viipymäajan voi laskea suuntaa-antavasti käyttämällä apuna reaktorin nestetilavuutta sekä syöttömäärää (KAAVA 2). (Latvala 2009, 35.)



*KAAVA 2. Viipymän laskentakaava.*

$$HRT = V_R / V$$

*jossa HRT on viipymä päivinä, d*

*$V_R$  on reaktorin nestetilavuus,  $m^3$*

*$V$  on syötteen märkämäärä päivässä,  $m^3$*

(Latvala 2009, 35.)

### **2.4.3 Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen kuiva-aine (VS)**

Syötteen kuiva-ainepitoisuudella sekä orgaanisen aineen pitoisuudella on oleellinen merkitys biokaasulaitokselle. Anaerobisesti hajoaa ja metaania tuottaa nimenomaan orgaaninen aine, jonka määrällä vaikutetaan kuormitukseen. Biokaasureaktorit ovat joko kuiva- tai märkäprosesseja. Esimerkiksi märkäprosessiin ei voida syöttää suuria määriä kuivaa materiaalia prosessin häiriintymättä sekä mikrobiologisesti että teknisesti. (Latvala 2009, 25.)

Kuiva-aine (Total solids, TS) ilmoitetaan usein prosentteina märkäpainosta. Orgaaninen kuiva-aine (volatile solids, VS) ilmoitetaan yleensä prosentteina kuiva-aineesta. Kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen tehdään kuivaamalla näytettä 105 °C:ssa noin vuorokauden ajan ja vertaamalla painoja ennen ja jälkeen kuivauksen. Biohajoavan, orgaanisen kuiva-aineen määrittäminen tehdään hehkuttamalla jo kuivattua näytettä 550 °C:ssa 2 tunnin ajan, jonka jälkeen verrataan painoa ennen ja jälkeen hehkutuksen. (Lehtomäki ym. 2007, 61.)

### **3 LAINSÄÄDÄNTÖ JA POLITIIKKA**

Suomessa on tavoitteena nostaa uusiutuvien energialähteiden loppukulutuksen osuus vuoteen 2020 mennessä 38 %:iin kaikesta energiankulutuksesta komission veloitteen mukaisesti. Esimerkiksi vuonna 2005 vastaava osuus oli 28,5 %. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategiassa (2008 – 2020) kiinnitetään huomiota biokaasun tuotannon lisäämiseen niin maatalous- kuin jätesektorillakin. Strategian mukaan yksi tavoite on edistää maatalouspohjaisen bioenergian tuotantoa, esimerkiksi biokaasun tuotannon muodossa siten, että saatava vuosittainen energian määrä on 4 – 5 TWh. (Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia 6.11.2008, 8-9, 38 – 39.)

#### **3.1 Lainsäädäntö**

Biokaasulaitoksen toimintaan vaikuttavat erilaiset lait ja asetukset, joista osalla on enemmän vaikutusta laitoksen toimintaan kuin toisilla. Muun muassa maatalouteen, ympäristönsuojeluun ja energiantuotantoon liittyvät lait vaikuttavat biokaasulaitosten toimintaan. Ympäristönsuojelulailla ja -asetuksella säädetään jätehuollosta sekä maaperän, ilman ja vesien suojelusta sekä ympäristölupaa edellyttävistä toiminnoista. Biokaasulaitos tarvitsee ympäristöluvan alueelliselta ELY -keskukselta, mikäli käsiteltävä jätemäärä on vuodessa vähintään 5000 tonnia. Tätä pienemmille laitoksille luvan antaa kunnallinen ympäristöviranomais. Käsiteltävän jätemäärän ollessa vähintään 20 000 tonnia vuodessa biokaasulaitokseen sovelletaan ympäristövaikutusten arviointimenettelyä (YVA). (Latvala 2009, 15 – 18.)

Muita biokaasulaitoksen toimintaan vaikuttavia lakia ja asetuksia voivat olla esimerkiksi vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista annetut asetukset, kemikaaliturvallisuuslainsäädäntö, maakaasuasetus (em. biokaasuun liittyen) ja jätelaki. Biojätteiden erilliskeräyksen tehostumisen ja

talousjätevesiasetuksen tiukentumisen myötä näiden jätteiden käsittelylle biokaasulaitoksissa voisi olla kysyntää. Läheisimmin biokaasulaitoksen toimintaan vaikuttavat kuitenkin sivutuoteasetus sekä lannoitevalmistelainsäädäntö. (Lehtomäki ym. 2007, 12; Latvala 2009, 18.)

### Sivutuoteasetus

Euroopan parlamentti ja Euroopan Unionin neuvosto on antanut asetuksen muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden terveystähtöistä (1774/2002EY) eli sivutuoteasetuksen. Sivutuoteasetuksella säädetään muun muassa käsittelytavoista, biokaasulaitoksessa käsiteltäväksi sopivista sivutuotteista sekä lopputuotteen laatuvaatimuksista. Asetuksessa sivutuotteet jaetaan kolmeen luokkaan. Luokittelu on tehty sivutuotteiden riskien perusteella ja niiden käsittelyvaatimukset eroavat toisistaan. (TAULUKKO 1.) (Euroopan parlamentti ja Euroopan Unionin neuvosto 1774/2002.)

TAULUKKO 1. Eläinperäisten sivutuotteiden luokittelu (Lehtomäki ym. 2007, 13)

	Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3
<b>Materiaali</b>	Sivutuotteet, joilla on TSE-taudin riski, tuntematon riski tai ne sisältävät esimerkiksi ympäristömyrkköjen jäämiä	Sivutuotteet joissa on muiden kuin TSE-tautien riski tai eläinlääkkeiden tai saasteiden jäämiä	Sivutuotteet, jotka on saatu ihmisravinnoksi hyväksytyistä eläimistä, mutta joita ei kuitenkaan käytetä elintarvikkeena tai sen raaka-aineena, teuraseläinten osat jotka eivät kelpaa ihmisravinnoksi, mutta joissa ei ole merkkejä tarttuvista taudeista
<b>Käsittelyvaatimukset</b>	Ei sovellu biokaasulaitoksessa käsiteltäväksi	Hienonnus → partikkelikoko alle 50 mm, Sterilointi (133°C, 20 min, 3 bar)	Partikkelikoko alle 12 mm, Hygienisointi (70°C, 60 min)
<b>Esimerkkimateriaali</b>		Lanta*, muutoin kuin ihmisravinnoksi teurastetut eläimet	Elintarviketeollisuuden sivutuotteet, ruokajäte

\* Lantaa voidaan yleensä käyttää ilman luokan 2 käsittelyvaatimuksia

Lantaa voidaan käyttää biokaasulaitoksen syötteenä ilman käsittelyä, mikäli

lopputuote täyttää asetuksen 208/2006EY:n vaatimukset. Suomen Elintarviketurvallisuusvirasto EVIRA voi hyväksyä myös muunlaisen käsittelyn, mikäli pystytään osoittamaan, että käsittelyllä voidaan minimoida biologiset riskit. Ruokajätteen käsittelylle on kansallinen hyväksyntä, jonka mukaan ruokajätteen käsittely biokaasulaitoksessa ei vaadi hygienisointia, mikäli laitos toimii termofiilisenä prosessina. Lopputuotteiden hygieniselle laadulle on määritelty vaatimukset, joiden tulee täytyä. (Lehtomäki ym. 2007, 13 – 14.)

### **Lannoitevalmistelaki**

Mikäli biokaasulaitos tuottaa käsittelyjäännöksestä lannoitevalmistetta, tulee toimintaan soveltaa lannoitevalmistelakia (539/2006). Laissa säädetään lannoitevalmisteiden ja osittain niiden raaka-aineiden valmistuksesta, käytöstä, kuljetuksesta, markkinoinnista sekä valmistuksesta omaan käyttöön. Lannoitevalmisteilta vaaditaan sopivuutta käyttötarkoitukseensa, turvallisuutta sekä tasalaatuisuutta. Lannoitevalmistetta saa valmistaa ja markkinoida vain jos se kuuluu lannoitevalmisteiden tyyppinimiluetteloon. Tyyppinimiluettelo ja vaatimukset on määritelty omalla asetuksellaan. Tyyppinimiluettelossa on biokaasulaitoksen lopputuotteita muun muassa nimillä rejktivesi ja mädätysjäännös. Jos lannoitevalmiste ei sovellu minkään tyyppinimen alle, sille voi hakea uutta tyyppinimeä. Ajantasainen tyyppinimiluettelo kannattaakin tarkistaa EVIRA:n Internet-sivuilta. (Lannoitevalmistelaki 539/2006 1:2; Lehtomäki ym. 2007, 14 – 15.)

Maatilojen biokaasulaitosten jäännökselle ei tarvita tyyppinimeä, jos jäännös tuotetaan tilan tai yhteislaitoksen tilojen omista raaka-aineista (lanta, kasvibiomassat) ja hyödynnetään tilan tai yhteislaitoksen tilojen omilla pelloilla. Mikäli laitokselle otetaan vastaan jotain tilan tai tilojen ulkopuolista materiaalia tai jäännöstä luovutetaan tai myydään ulkopuolisille, lannoitevalmistelaki asettaa toiminnalle vähintäänkin valvontavaateita, mahdollisesti myös prosessivaateita. (Luostarinen 2012, suullinen tiedonanto.)

### 3.2 Syöttötariffi

Useissa Euroopan Unionin maissa biokaasulla tuotetun sähkön tuotantoa tuetaan joko tarjoamalla tuotetulle sähkölle takuuhinta tai erilaisin tuotantotuin. Tukitoimin pyritään lisäämään uusiutuvien energiamuotojen käyttöä sähkön tuotannossa sekä parantamaan näiden kilpailukykyä. Syöttötariffijärjestelmään hyväksytyt sähkön tuottajat, esimerkiksi biokaasuvoimala, saa tukea, jonka määrä on riippuvainen joko sähkön markkinahinnasta tai päästöoikeuden hinnasta. Tukea maksetaan määräajalta ja vain tukeen oikeuttavasta tuotannosta. Syöttötariffijärjestelmällä sähkön tuottajalle voidaan taata takuuhinta hänen tuottamastaan sähköstä. Esimerkiksi Saksassa syöttötariffijärjestelmä on ollut käytössä vuodesta 1990. (Impola 2010, hakupäivä 12.10.2011; Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010/1396 1:1.1 ja 2:6.1.)

Suomessa otettiin vuoden 2011 alusta osittain käyttöön syöttötariffijärjestelmä uusiutuvilla energialähteillä tuotetulle sähkölle. Kokonaisuudessaan syöttötariffijärjestelmä tuli voimaan maaliskuussa 2011, kun Euroopan komissio antoi hyväksyntänsä valtiotukien käyttöön. Järjestelmään hyväksytyille biokaasulaitoksen tuottamalle sähkölle maksetaan 12 vuoden ajan takuuhintana 8,35 snt/kWh. Mikäli sähkön tuotannon lisäksi tuotetaan lämpöä hyötykäyttöön, voi biokaasulaitos päästä lämpöpreemiolla korotetun syöttötariffin piiriin, jolloin takuuhinta nousee 5 snt/kWh ollen tällöin 13,35 snt/kWh. Korotetun tariffin piiriin pääsee laitos, joka tuottaa lämpöä hyötykäyttöön siten, että kokonaishyötysuhde on enemmän kuin 50 %. Mikäli laitoksen generaattoreiden nimellisteho on vähintään 1 megavolttiampeeri, korotetun tariffin piiriin pääsee, kun hyötysuhde on vähintään 75 %. Maatilakohtaiset biokaasulaitokset eivät käytännössä Suomessa yllä syöttötariffin piiriin generaattorin nimellistehovaatimuksen vuoksi, sillä generaattorit ovat yleensä vaatimusta pienempiä. (Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010/1396, Uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön tukijärjestelmä käyttöön 24.3.2011, hakupäivä 15.10.2011; Luostarinen 2012, suullinen tiedonanto.)

Biokaasuvoimala voidaan hyväksyä syöttötariffijärjestelmään tietyin ehdoin. Biokaasulaitoksen tulee olla uusi eikä siinä saa olla käytettyjä osia ja sen generaattoreiden nimellistehon tulee olla vähintään 100 kilovolttiampeeria. Biokaasulaitosta ei voida hyväksyä syöttötariffijärjestelmään, mikäli se on saanut muuta valtiontukea, kuten investointitukea. Biokaasulaitos ei saa myöskään käyttää sähkön tuotantoon sellaista biokaasua, joka on tuotettu laitoksessa, joka ei täytä tariffilainsäädännön ehtoja. Tariffiin ei kuulu laitoksen omaan käyttöön kulutettu sähkö. (Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010/1396 2:10.)

Verrattaessa Suomen järjestelmää Saksan vastaavaan ovat erot suuria. Saksassa laitokset jaetaan kolmeen eri kokoluokkaan, joiden mukaan perustariffi maksetaan. Pienillä laitoksilla tariffin määrä kilowattituntia kohden on suurempi kuin isoilla laitoksilla. Perustariffin lisäksi Saksan laitoksilla on mahdollisuus saada lisäbonusta esimerkiksi lannan käytön tai alueellisen työllistävyyden perusteella. Pienillä laitoksilla syöttötariffi voi olla jopa yli 30 snt/kWh. Suomen syöttötariffi on samaa luokkaa kuin mitä Saksassa maksetaan suurimmille laitoksille (*TAULUKKO 2*). (Imppola 2010, hakupäivä 12.10.2011.)

*TAULUKKO 2. Suomen ja Saksan biokaasulaitosten syöttötariffin perusmäärä laitoskokoluokittain (Imppola 2010, hakupäivä 12.10.2011.)*

	<b>Suomi</b>	<b>Saksa, S</b>	<b>Saksa, M</b>	<b>Saksa, L</b>
<b>Laitoksen koko</b>	100 kW -	<150 kW	150 – 500 kW	500 kW – 5 MW
<b>Tuki, snt/kWh</b>	8,35	11,67	9,18	8,25

### 3.3 Maatalouden investointituki

Maataloutta harjoittavan on mahdollista saada tietyin ehdoin biokaasulaitoksen rakentamiseen maatalouden investointitukea, mikäli tuotettua kaasua käytetään

maatalousrakennusten lämmittämiseen. Biokaasulaitoksen raaka-aineiden tulee olla pääasiassa tukea hakeneelta tilalta ja valtaosa tuotetusta energiasta tulee käyttää tilalla. Tukea voi hakea muun muassa rakenteisiin, reaktoriin sekä kaasu- ja lietesäiliöiden rakentamiseen. (Maatilan biokaasulaitokset 28.1.2011, hakupäivä 12.10.2011; Reskola 2011, 5-7.)

Investointituen vähimmäismäärä on rakennusinvestoinneissa 5000 euroa ja enimmäismäärä 500 000 euroa tilaa kohden kolmen verovuoden jaksolla. Mikäli hakijoita on kaksi, tuen enimmäismäärä on 750 000 euroa ja kolmella hakijalla 1 000 000 euroa. Biokaasulaitokselle myönnettävä investointituki on 15 % avustusta ja 20 % korkotukilainaa. Investointitukea ja syöttötariffia ei ole mahdollista saada samalle laitokselle. (Tuen määrä 12.3.2010, hakupäivä 12.10.2011; Reskola 2011, 5-7;10. )

Biokaasutuotantoa tuetaan myös maatilakokoluokkaa suuremmissa mittakaavassa. Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelman 2007 - 2013 kautta on mahdollisuus hakea hanke- ja yritystukia. Työ- ja elinkeinoministeriö myöntää energiatukea yrityksille ja yhteisöille, mutta ei kuitenkaan maataloille. Energiatukea voidaan myöntää esimerkiksi investointihankkeelle, joka edistää uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä. (Reskola 2011, 4- 6;11.)

## 4 BIOKAASULAITOKSEN SYÖTEMATERIAALIT JA NIIDEN METAANINTUOTTOPOSENTIAALIT

Biokaasulaitoksen syötteiksi sopivat orgaaniset, anaerobisesti helposti hajoavat materiaalit. Maatilan biokaasulaitoksella eläinten lietelanta on hyvä syöte, sillä se sisältää runsaasti mikrobien tarvitsemia ravinteita ja sen puskurointikyky pH:n muutosta vastaan on hyvä. Myös kuivalanta sopii biokaasutuotantoon. Maatilan biokaasulaitoksella voidaan käsitellä lannan lisäksi esimerkiksi rehujätteitä tai energiakasveja. Muita mahdollisia syötteitä ovat esimerkiksi jätevesilietteet ja biojäte. Huonosti syötteenä sopivat esimerkiksi paljon ligniiniä sisältävät syötteet, sillä ne hajoavat heikosti anaerobisissa olosuhteissa. Syötteitä voidaan joutua esikäsittämään hajoamisen nopeuttamiseksi esimerkiksi murskaamalla ennen syöttöä reaktoriin. (Latvala 2009, 22.)

Metaanintuottopotentiaalit määritetään yleisesti panoskoetyyppisesti laboratoriossa, jossa panosreaktorin sisältö ja lämpötila pysyvät jatkuvasti samana. Kaasun muodostumista seurataan, kunnes se hidastuu tai loppuu. Panoskoekokeiden olosuhteet voidaan optimoida todella tarkasti. Jatkuvatoimisten reaktoreiden metaanintuotoissa ei päästä panoskoekokeiden luokkaan, sillä viipymä on lyhyempi eikä olosuhteiden säätely ole yhtä helppoa. Metaanintuottopotentiaali ilmoitetaan yleensä metaanintuottona lisättyä orgaanista ainesta kohden ( $\text{CH}_4/\text{tVS}$ ). (Kervinen 2010, 11; Luostarinen 2012, suullinen tiedonanto.)

Pelkkää lietelantaa käytettäessä metaanintuotto reaktorilavuutta kohden jää alhaiseksi lietelannan korkean nestepitoisuuden takia. Esimerkiksi lehmänlannan metaanintuottopotentiaali on vain noin  $7 - 14 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$  märkää materiaalia (FM), kun vastaavasti esimerkiksi kasvibiomassalla tuotto voi olla yli  $100 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tFM}$ . Lehmänlannan metaanintuotto orgaanista kuiva-ainetta kohden ( $100 - 250 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVS}$ ) on myös alhaisempi kuin esimerkiksi kasvibiomassan ( $300 - 450 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVS}$ ) tai biojätteen ( $500 - 600 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVS}$ ). (TAULUKKO 3.) Lehmänlantaa käytettäessä biokaasun tuottoa voidaan



parantaa yhteiskäsittelyllä, jossa lietteen lisäksi reaktoriin syötetään esimerkiksi jäterehua. (Lehtomäki ym. 2007, 18 – 22.)

*TAULUKKO 3. Erialaisten syötemateriaalien metaanintuottopotentiaaleja (Lehtomäki ym. 2007, 19)*

<b>Syötemateriaali</b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS</b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tFM</b>
Lehmänlanta	100 – 250	7 – 14
Sianlanta	300 – 400	17 - 22
Kasvibiomassa	300 – 450	30 – 150
Puhdistamoliete	200 – 400	5 – 15
Biojäte	500 – 600	100 – 150
Teurasjäte	570	150

Yleisesti on havaittu kasvibiomassojen metaanintuottopotentiaalin olevan korkeampi kuin lietteiden. Laboratoriokokeissa eri kasvien metaanintuottopotentiaalit vaihtelevat välillä 170 – 430 m<sup>3</sup> metaania/tVS Lehtomäen (2006,39) kokeissa yli 400 m<sup>3</sup> metaanintuottopotentiaalin ylittivät ruokohelmi, virna-kaura, nokkonen sekä sokerijuurikas naatteineen. Metaanintuotto märkäpainoa kohden vaihtelee eri kasvien välillä paljon, mutta keskimääräisesti metaanintuottopotentiaali on noin 80 m<sup>3</sup> metaania/tFM. Laboratoriokokeissa ruokohelven metaanintuottopotentiaali on vaihdellut välillä 290 – 430 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS. (TAULUKKO 4.) (Lehtomäki 2006, 39; Seppälä, Paavola, Lehtomäki & Rintala 2009, hakupäivä 5.5.2011.)

Viljeltäessä kasveja tuottamaan uusiutuvaa energiaa, biokaasua, olisi kuitenkin huomioitava myös viljelyn aiheuttamat vaikutukset. Biokaasun tuotantoon

viljeltävältä kasvilta vaaditaan kestävyyttä ja menestymistä mahdollisimman vähäisillä viljelypanoksilla. Kasvibiomassa ei saisi sisältää liikaa ligniiniä ja muita huonosti hajoavia ainesosia, vaan mahdollisimman paljon hiilihydraatteja ja muita helposti hajoavia tuotteita. (Lehtomäki ym. 2007, 19 – 20.)

*TAULUKKO 4. Laboratoriokokeissa saatuja metaanintuottopotentiaaleja eri kasveille. (Lehtomäki 2006, 39; \*Seppälä ym. 2009 hakupäivä 5.5.2011.)*

<b>Kasvi</b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS</b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t TS</b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t FM</b>
<b>Ruokohelpi</b>	340 – 430	330 – 420	100 – 170
<b>Ruokohelpi *</b>	288	264	75
<b>Timotei-apilanurmi</b>	370 – 380	340 – 360	70 – 90
<b>Timotei *</b>	335	310	89
<b>Maa-artisokka</b>	360 – 370	340	90 – 110
<b>Virna-kaura</b>	400 – 410	370	60 – 100
<b>Nokkonen</b>	210 – 420	170 – 360	20 – 60
<b>Lupiini</b>	310 – 360	290 – 330	40
<b>Rehukaali</b>	310 – 320	280 - 290	30 – 40
<b>Apila</b>	280 – 300	260 – 270	40 – 70
<b>Jättitatar</b>	170 – 270	160 – 250	30-70
<b>Sokerijuurikas, naatit</b>	340	290	30 – 40
<b>Oiki</b>	240 – 320	220 - 290	200 – 260
<b>Ruokonata *</b>	336	304	84
<b>Koiranheinä *</b>	343	302	78

Laboratoriossa suoritetuissa yhteiskäsittelykokeissa on havaittu kasvimateriaalin lisäämisen nostavan metaanintuottoa verrattuna pelkän lietelannan metaanintuottoon. Yhteiskäsittelykokeissa suurimmat metaanintuotot on saatu kun kasvien osuus syötteen orgaanisesta aineesta on ollut 20 – 40 %. On havaittu, että kasvimassan osuuden nosto syötteessä kasvattaa metaanintuottoa orgaanista kuiva-ainetta kohden vain tiettyyn

pisteeseen asti, jonka jälkeen kaasuntuotto alkaa laskea. Esimerkiksi Lehtomäen tutkimuksessa Biogas production from energy crops and crop residues (2006) havaittiin, että suurimmat metaanintuotot syötteen orgaanista kuiva-ainekiloa kohden kasvin ja lannan yhteiskäsittelyssä saatiin, kun kasvin osuus syötteen orgaanisesta kuiva-aineesta oli 30 %. Kun kasvin osuus oli 40 %, metaanintuotto syötteen orgaanista kuiva-ainesta kohden oli alhaisempi kuin kasvin 30 %:n osuudella. Reaktorin orgaanisen kuormituksen vaikutus metaanintuottoon näkyy myös selvästi: kasvin osuuden ollessa 40 % ja kuormituksen noustessa kahdesta (2) neljään (4) kgVS/m<sup>3</sup>d, metaanintuotto laski entisestään. (TAULUKKO 5.) (Lehtomäki 2006, 20 – 21, 49 – 51.)

TAULUKKO 5. Lannan ja kasvimateriaalien yhteiskäsittelystä saatuja metaanintuottoja (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/tVS) laboratorio-oloissa (Lehtomäki 2006, 49 – 51.)

<b>Kasvi %VS syötöstä</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>
<b>OLR (kg VS/m<sup>3</sup>d)</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<u><b>Syötemateriaali</b></u>	<u><b>Metaanintuotto CH<sub>4</sub>/tVS</b></u>						
<b>Lanta</b>	155						
<b>Lanta + sokerijuurikas</b>	133	149	200	<b>229</b>	220		
<b>Lanta + säilörehu</b>	151	143	178	<b>268</b>	250	233	186
<b>Lanta + olki</b>	151	145	159	<b>213</b>	188	184	157

## 5 BIOKAASUN OMINAISUUDET JA HYÖTYKÄYTTÖ

Biokaasu sisältää pääosin metaania (CH<sub>4</sub>) sekä hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>) ja pieniä pitoisuuksia muun muassa typpeä, rikkivetyä, orgaanisia piiyhdisteitä (siloksaaneja), kosteutta sekä happea. Biokaasun metaanipitoisuus on noin 50 – 70 % ja hiilidioksidipitoisuus noin 30 – 50 %. Syötemateriaaleilla on vaikutusta biokaasun laatuun ja ne voivatkin muuttaa sen koostumusta. Puhdistamattoman biokaasun energiasisältö on keskimäärin 5-7 kWh/m<sup>3</sup>. Kuutio metaania vastaa energiasisällöltään noin 1 litraa kevyttä polttoöljyä. (Latvala 2009, 40 – 43; Latvala 2005, 10.)

Maatilan biokaasulaitoksilla tuotetussa biokaasussa on usein rikkivetyä (H<sub>2</sub>S), jonka pitoisuus kaasussa on tavallisesti 1000 – 3000 ppm. Rikkivedyllä on korrodoiva vaikutus, minkä vuoksi rikkivedyn pitoisuutta pyritään vähentämään lisäämällä reaktorin kaasutilavuuteen pieniä määriä happea esimerkiksi akvaariopumpun avulla. Tällöin fakultatiiviset bakteerit käyttävät hapen ja pelkistävät rikkivedyn rikiksi. Happea ei tule lisätä liikaa, sillä suuremmissa määrissä se inhiboi prosessia. Rikkivetyä voidaan vähentää myös lisäämällä prosessiin rautaa esimerkiksi rautaoksidina tai johtamalla biokaasu rautaoksidipetiin, johon rikkivety sitoutuu rautasulfidina. Biokaasu sisältää myös kosteutta, joka poistetaan yleensä ennen käyttöä vedenerottimella tai kondenssikaivolla. Kaasun sisältämät siloksaanit aiheuttavat piioksidiksi hapettuessaan ongelmia kaasumootoreille ja mikroturbiineille. Siloksaaneja voidaan poistaa kaasusta muun muassa vesipesun avulla, mutta käytännössä vesipesua ei käytetä, ellei biokaasua jalosteta esimerkiksi liikennekäyttöön. (Latvala 2009, 40 – 43.)

Metaani on hajuton ja väritön ilmaa kevyempi kaasu, joka on erittäin helposti syttyvää ja räjähtävää. Se on voimakas kasvihuonekaasu, jonka kasvihuonevaikutus hiilidioksidiin verrattuna on yli 20-kertainen. Metaani ja ilma voivat aiheuttaa räjähdysvaarallisen seoksen, kun metaanin osuus on ilmassa 5 – 15 %. Hiilidioksidi on ilmaa raskaampi, väritön ja hajuton kasvihuonekaasu.

Biokaasun tuotanto on hiilidioksidineutraalia, sillä vapautuva hiilidioksidi vapautuisi luontoon ilman käsittelyäkin. (Latvala 2009, 59; 67 - 68.)

Biokaasu on monikäyttöinen polttoaine, sillä sitä voidaan käyttää muun muassa lämmön, sähkön tai liikennepolttoaineen tuotantoon. Jätevedenpuhdistamoilla tuotetaan biokaasusta myös mekaanista energiaa puhdistamon omiin käsittelyprosesseihin. Hyödyntämismuoto määräytyy usein sen mukaan miten laitoksen läheisyydessä on mahdollista käyttää energiaa. Laitos itse tarvitsee energiaa esimerkiksi lämmitykseen ja sekoitukseen, mutta se käyttää tuottamastaan biokaasusta yleensä vain noin 10 – 40 %. Kun biokaasua käytetään lämmöntuotantoon, sitä voi käyttää vedenerotuksen tai kuivauksen jälkeen sellaisenaan. Kaasupolttimen avulla kiertovesijärjestelmän vesi lämmitetään tehokkaasti, sillä lämmöntuotannossa hyötysuhde voi olla yli 90 %. (Latvala 2009, 45 – 46.)

Suomessa suositaan biokaasun hyödyntämismuotona lämmön ja sähkön yhteistuotantoa (Combined Heat and Power, CHP), jossa tuotetun energian sähkön osuus on yleensä noin kolmasosa. Kaasumoottorin tai mikroturbiinin koon kasvaessa sähkön hyötysuhde paranee. Suurilla laitoksilla kokonaishyötysuhde on yli 70 %. CHP- laitteistoa varten biokaasusta poistetaan vesi ja rikkivety mahdollisimman hyvin. Rikkivety aiheuttaa korroosiota ja voi siten vahingoittaa laitteistoa. (Latvala 2009, 45 – 46; Al Seadi ym. 2008, 86 – 87.)

Liikennepolttoainekäyttöä varten biokaasusta tulee poistaa hiilidioksidi sekä rikkiyhdisteet siten, että jäljelle jää lähes puhdasta metaania. Hiilidioksidin voi poistaa kaasusta esimerkiksi vesipesulla. Vesipesussa hiilidioksidi sitoutuu veteen, kun biokaasua syötetään noin 8 bar paineessa vesikolonneihin. Erilaisia kemikaaliliuoksia, joilla hiilidioksidi saadaan tarkemmin poistettua, voidaan käyttää veden sijaan. Pestystä kaasusta poistetaan kosteus ja se paineistetaan varastointia varten noin 200 – 300 bar paineeseen. Biokaasusta jalostettua biometaania voidaan käyttää kuten maakaasua. (Latvala 2009, 47.)

## 6 LIETELANNAN JA ENERGIAKASVIEN YHTEISKÄSITTELY BIOKAASULAITOKSISSA

Biokaasua voidaan tuottaa lannasta ja energiakasveista, kuten ruokohelvestä, syöttämällä niitä reaktoriin joko yhdessä tai erikseen. Yhteiskäsittely on mahdollista sekä märkä- että kuivaprosessireaktoreissa. Eläintiloilla muodostuu lantaa jatkuvasti ja yleisesti maatalan biokaasulaitoksessa yksi syötteistä onkin lanta. Biokaasun tuotanto lietelannasta vähentää lannan aiheuttamia kasvihuonekaasu- ja typpipäästöjä sekä hajuhaittoja. Positiivisten ympäristövaikutusten lisäksi lietelannan biokaasutus tehostaa maatalan ravinnekiertoa. Lietelannan kuiva-ainepitoisuus on yleensä alle 10 %, minkä vuoksi märkäprosessi on kuivaprosessia luonnollisempi vaihtoehto eläintiloille. (Lehtomäki 2006, 18.)

Lannan ja energiakasvien yhteiskäsittelystä on saatavissa rajoitetusti tutkittua tietoa. Kuitenkin esimerkiksi Saksassa lietelannan ja energiakasvien, kuten maissin, yhteiskäsittely biokaasulaitoksilla on yleistä. Lietelannan ja oljen yhteiskäsittelyä biokaasutuotannossa on tutkittu useissa tutkimuksissa, mutta saadut tulokset vaihtelevat: yhdessä tutkimuksessa pelkällä lietelannalla saatiin korkeampi metaanin tuotto kuin käyttämällä syötteinä lietelantaa ja olkea. Toisessa tutkimuksessa tutkittiin lietelannan ja vehnän oljen yhteiskäsittelyn vaikutuksia metaanin tuottoon siten, että oljen osuus kokonaissyötteestä vaihteli. Tässä tutkimuksessa korkeimmat metaanin tuottoluvut saatiin kun oljen osuus syötteen kuiva-aineesta oli 40 %. (Lehtomäki 2006, 18 - 22.)

Yhteiskäsittelyllä on usein todettu olevan positiivisia vaikutuksia metaanintuottoon. Etuina on pidetty lannan hyvää puskurointikykyä pH:n muutosta vastaan ja sen sisältämiä ravinteita, kun taas kasvisyötteiden sisältämä runsas hiili nostaa lietsyötteen matalaa hiili/ typpi – suhdetta mikrobeille suotuisammaksi. Kasvisyötteen mukana lisätty hiili vähentää myös ammoniakki-inhibiitioita ja nostaa siten metaanintuottoa. Mikäli materiaalin hiili/typpi – suhde on liian korkea, typen puute alkaa rajoittaa metaanintuottoa

eikä hiilen lisäyksellä saada metaanintuottoa nousemaan. Tämän vuoksi kasvisyötteiden osuus kokonaissyötteestä tulee arvioida tarkkaan. (Lehtomäki ym. 2007, 30.)

Yhteiskäsittelyllä voi olla positiivisia vaikutuksia biokaasulaitoksen kannattavuuteen myös muuten kuin metaanintuoton nousun myötä. Mikäli biokaasulaitokseen tuodaan ulkopuolelta materiaalia, on mahdollista, että tuotavasta jätteestä maksetaan käsittelymaksu eli porttimaksu. Biokaasuprosessin kannalta yhteiskäsittely on hyvä vaihtoehto, sillä usein erilaisten syötteiden ominaisuudet tasapainottavat prosessia siten, että hajoaminen tehostuu. Kiinteän jätteen sekoittaminen esimerkiksi lietteeseen helpottaa käsittelyä, kun koko massa on helposti pumpattavissa. Yhteiskäsittelyssä ongelmia voi aiheuttaa kasvisyötteen nouseminen lietteen pinnalle biokaasureaktorissa. Ongelmia voidaan välttää esimerkiksi murskausmenetelmiä käyttämällä sekä riittävällä sekoituksella. (Lehtomäki ym. 2007, 30.)

## 7 RUOKOHELVEN TUOTANTO JA KÄYTTÖ BIOKAASU-LAITOKSEN SYÖTTEENÄ

Ruokohelpi (*Phalaris arundinacea* L.) on monivuotinen, pitkä ja tiheitä kasvustoja muodostava nurmikasvi, joka kasvaa koko Suomessa luonnonvaraisena. Ruokohelven viljelypinta-ala lähti nousuun vuoden 2004 jälkeen. Vuonna 2004 ruokohelven viljelypinta-ala oli 4500 hehtaaria ja vuonna 2005 ala oli yli tuplaantunut 10 400 hehtaariin. Huipussaan viljelypinta-alat olivat vuonna 2007, jolloin ruokohelpeä viljeltiin 19 000 hehtaarilla. Vuoden 2007 jälkeen viljelypinta-alat ovat laskeneet vuosittain. Ruokohelpeä viljeltiin Suomessa vuonna 2010 yli 16 500 hehtaarilla. Ruokohelpeä käytetään Suomessa lähinnä polttolaitosten energianlähteenä, mutta esimerkiksi Pohjois-Amerikassa ruokohelpeä käytetään myös eläinten rehuksi. (Lamminen, Isolahti & Huuskonen 2005, 15, Matilda, maataloustilastot, hakupäivä 4.4.2011.)

Ruokohelpi sopii viljelykasviksi kaikille maalajeille, mutta sato on suurin multa- ja turvemaidilla. Yhdellä kylvöllä ruokohelpi tuottaa satoa yli 10 vuotta, kun kasvusto korjataan keväällä energiakäyttöön. Ensimmäinen sato, joka on selvästi pienempi kuin seuraavien vuosien sato, korjataan kahden vuoden kuluttua kylvöstä, jolloin kasvin juuristo on kehittynyt tarpeeksi. Ruokohelven viljely ei vaadi juurikaan kasvinsuojelutoimenpiteitä, sillä rikkakasvitorjunta kylvövuonna on usein riittävä takaamaan tiheän ja puhtaan kasvuston. Lannoittaminen lisää satoa, mutta väkilannoitteiden käyttäminen ei välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa. Kevätkorjatun ruokohelven kuiva-ainesato on noin 6 – 8 tonnia hehtaarilta. (Pahkala, Isolahti, Partala, Suokangas, Kirkkari, Peltonen, Sahramaa, Lindh, Paappanen, Kallio & Flyktman 2005, 6 - 11.)

Biokaasun tuotantoon kevätkorjattua ruokohelpeä parempi vaihtoehto on ruokohelpi, joka korjataan vihreänä kuten muutkin nurmet. Tällöin korjuu tehdään kasvun varhaisemmassa vaiheessa, jolloin hajoaminen anaerobisissa oloissa on huomattavasti parempaa, kun esimerkiksi ligniinin määrä ei ole noussut korkeaksi. (Lehtomäki ym. 2007, 20.)



Biokaasulaitoksen vaatimukset tuorekorjatulle ruokohelvelle ovat samankaltaiset kuin lehmällä, jonka pötsissä anaerobista hajoamista myös tapahtuu. Ruokohelven soveltuvuutta rehukäyttöön on tutkittu myös Suomessa. Rehukäyttöön ja biokaasutukseen viljellyn ruokohelven tuotanto muistuttaa säilörehuksi viljeltävien nurmikasvien viljelyä. Kokeessa ruokohelven keskimääräinen kuiva-ainesato oli kahden niiton korjuustrategialla hieman yli 11 tTS/ha ja kolmen niiton korjuustrategialla 6 tTS/ha. Kirjallisuudessa käytetään usein ruokohelven kuiva-ainesatona noin 9 - 10 tTS/ha, mutta käytännössä satotasot ovat huomattavasti alhaisemmat. Esimerkiksi Metener Oy:n ruokohelven biokaasutuskokeessa kuiva-ainesato tuorekorjatulla ruokohelvellä oli alle 6,5 tTS/ha. (Lamminen ym. 2005, 21 – 22; Luostarinen 2009, 3.)

Käytettäessä ruokohelpeä biokaasulaitoksen raaka-aineena, se tulee korjata tuoreena säilörehun tapaan 2-3 kertaa kesässä. Säilörehun korjuun koneketjut ja säilöntämenetelmät sopivat tuoreena korjatulle ruokohelvelle hyvin. Säilöntäaineen käyttö varastoinnissa on tutkimuksissa todettu parantavan metaanintuottoa. (Laitinen, Sironen, Vesterinen 2006, 13 - 14; Lehtomäki ym. 2007, 18 – 22.)

Kevätkorjuuseen verrattaessa tuorekorjatun ruokohelven kiertoaika lyhenee kevätkorjatun yli 10 vuodesta noin 5 vuoteen ja lannoitustaso on erilainen. Kiertoaika lyhenee kasvukauden useiden niittojen vuoksi ja myös talvehtiminen voi heikentyä, jos satoa korjataan vielä syksyllä. Tämän vuoksi viimeisen niiton ja kasvukauden lopun väliin tulisi jäädä vähintään kuukauden jakso, jonka aikana ruokohelppi ehtii karaistua talvea varten. Lannoitus muistuttaa muiden nurmikasvien lannoitusta. Kahden korjuun strategialla typpilannoituksen määrä on koko sadolle yhteensä noin 200 kg N/ha. Fosfori- ja kaliumlannoitus määritetään viljavuuden mukaan. (Lamminen ym. 2005, 22; Laitinen ym. 2006, 13 - 14.)

Ruokohelven rehukäyttöä selvittäneen kokeen tulosten perusteella rehukäyttöön korjattava ruokohelppi suositellaan korjattavaksi kolme kertaa kesässä vaikka kahdella korjuulla saataisiinkin suurempi sato. Kolmen korjuun strategialla ruokohelven ruokinnalliset arvot ovat paremmat korjuuaikojen välien

ollessa riittävän lyhyitä. Ruokohelven ensimmäinen sato tulisi korjata aikaisemmin kuin perinteisten nurmikasvien sato, sillä ruokohelven sulavuus laskee nopeammin. (Lamminen ym. 2005, 21 – 22.)

### **7.1 Ruokohelven soveltuvuus biokaasulaitoksen syötteenä**

Ruokohelpi voisi sopia hyvin biokaasun tuotantoon useiden hyvien ominaisuuksiensa vuoksi: ruokohelpi ei vaadi suuria viljelypanostuksia menestyäkseen, kuiva-ainesadot ovat perinteisiä säilörehunurmisatoja suurempia ja säilörehunurmen korjuuketju, viljely- ja varastointitekniikat sopivat myös ruokohelvelle. Ruokohelpi ei välttämättä vaadi tehokasta lannoitusta, mutta lannoituksella voidaan nostaa sadon määrää. (Pahkala ym. 2005, 5 – 13; Laitinen ym. 2006, 13 – 14).

Metaanintuotto kärsii, mikäli syötteenä on paljon ligniiniä tai muita huonosti hajoavia aineksia. Metaanintuotto on vastaavasti korkea, kun syöte sisältää paljon hiilihydraatteja, jotka hajoavat prosessissa helposti. Ruokohelpikasvuston ikääntyessä lehtien osuus massasta vähenee ja ligniinin sekä muiden huonosti hajoavien komponenttien määrä kasvaa. Tämän vuoksi korjuuajankohdalla on suuri merkitys siihen, miten ja millä nopeudella ruokohelpi hajoaa anaerobisissa olosuhteissa. (Lamminen, ym. 2005, 21 – 22; Lehtomäki ym. 2007, 20.)

Suomessa on tehty pilottimittakaavan koe ruokohelven biokaasutukseen liittyen. Kokeessa jatkuvasekoitteen reaktorin lietteen sekaan syötettiin pelkästään ruokohelpeä siten, että kuormitus oli  $3 \text{ kg/VSS/m}^3\text{d}$  ja viipymä 66 päivää. Metener Oy:n suorittamassa biokaasutuskokeessa ruokohelpi tuotti kaasua noin  $250 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVSS}$  ja märkätonnia kohden hieman yli  $50 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{FM}$ . (Luostarinen 2009, 6.)

## 7.2 Metaanintuottopotentiaali

Laboratoriokokeiden perusteella ruokohelvellä on todettu olevan hyvä metaanintuottopotentiaali. Vuonna 2006 tehdyssä laboratoriokokeessa (Lehtomäki 2006, 39) ruokohelven metaanintuottopotentiaali oli korkea: 340 – 430 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS. Seppälän ym. (2009) laboratoriokokeessa ruokohelven metaanintuottopotentiaali orgaanista ainetta kohden vaihteli välillä 253 – 351 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS ollen keskimäärin 288 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS. Seppälän ym. kokeessa määritettiin myös ruokohelven satotasojä sekä hehtaarituohtoja. Ruokohelven kuiva-ainesato vaihteli välillä 2,9 – 13,7 t/ha riippuen korjuuajankohdasta ja korjuiden määrästä. Kokeessa metaanintuottopotentiaali hehtaaria ja korjuuta kohden oli keskimäärin noin 1500 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha/korjuu ja vuositasolla hehtaaria kohden noin 2100 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha. (TAULUKKO 6.) (Lehtomäki 2006, 39; Seppälä ym. 2009, hakupäivä 5.5.2011.)

*TAULUKKO 6. Ruokohelven metaanintuottopotentiaaleja eräissä laboratoriokokeissa (Lehtomäki 2006, 39; \*Seppälä ym. 2009, hakupäivä 5.5.2011.)*

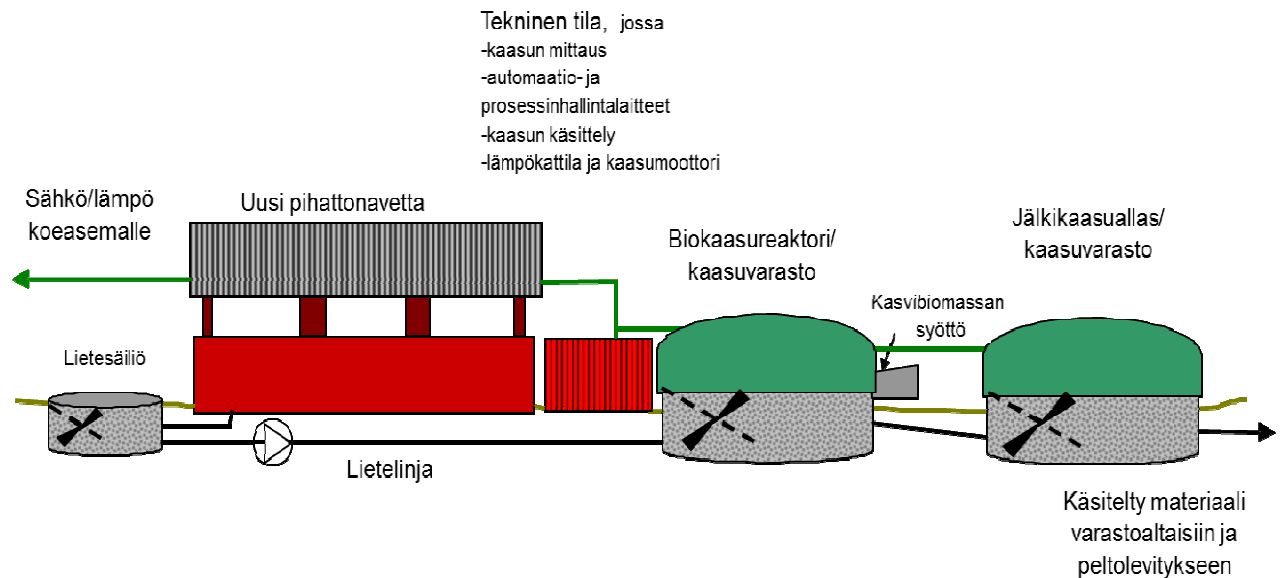
	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t TS	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t FM
<b>Ruokohelvi</b>	340 – 430	330 – 420	100 – 170
<b>Ruokohelvi *</b>	288	264	75

## 8 AINEISTON HANKINTA JA MENETELMÄT

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia ruokohelven soveltuvuutta biokaasun tuotantoon yhdessä naudan lietelannan kanssa maatilakokoluokan biokaasulaitoksella. Ruokohelpeä viljellään Suomessa energiaksi, lähinnä polttoon, mutta tuoreena korjatulla ruokohelvellä on todettu olevan myös hyvä metaanintuottopotentiaali. Tutkittua tietoa lietelannan ja energiakasvien, kuten ruokohelven, yhteiskäsittelystä biokaasulaitoksella on vähän. Yhteiskäsittely on kuitenkin esimerkiksi Saksassa yleistä maatilojen biokaasulaitoksilla.

Aineiston hankinta ja koejärjestelyt suoritettiin MTT Maanigan toimipisteessä sijaitsevalla biokaasulaitoksella, joka on valmistunut vuonna 2009. Maatilamittakaavan biokaasulaitoksella on lietetilavuudeltaan 260 m<sup>3</sup>:n jatkuvasekoitteinen mesofiilinen (~37 °C) reaktori sekä 260 m<sup>3</sup>:n jälkikaasuallas. Prosessissa syntyvä kaasu hyödynnetään lämmön ja sähkön tuotantoon 80 kW:n lämpökattilan sekä 60 kW:n kaasumootorin avulla. Sähköntuotannon osuus kaasumootorin energiantuotannosta on noin kolmasosa. Osa tuotetusta energiasta käytetään reaktorin lämmitykseen sekä laitoksen sähköä kuluttavien laitteiden toimintaan. Jälkikaasuallasta ei lämmitetä. Biokaasulaitoksella on erikseen syöttöjärjestelmät nestemäisille ja kiinteille aineille, mikä mahdollistaa lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelyn laitoksessa. (KUVIO 1.)

Prosessissa käytetty lietelanta tulee ylivaluntana MTT Maanigan tutkimuspihatosta tilavuudeltaan 100 m<sup>3</sup>:n esisäiliöön, josta se sekoitettuna pumpataan reaktoriin. Esisäiliöön tulee lietelannan lisäksi vesiä myös rehusiiloista sekä jaloittelutarhasta. Lähes kaikki navetasta tuleva liete kulkee biokaasuprosessin läpi: liete pumpataan esisäiliöstä reaktoriin automaattisesti, reaktorista liete jatkaa ylivaluntana jälkikaasualtaaseen ja sieltä edelleen ylivaluntana jäännöskaivoihin, josta se pumpataan varastosäiliöihin odottamaan peltolevitystä. Kiinteät syötteen, kuten kokeessa käytetty ruokohelvi, syötetään silputtuna reaktoriin erillisen syöttöruuvien kautta. Syöttöruuville syöttö tehdään apevaunulla tai pienkuormaajalla. (KUVIO 1.)



KUVIO 1. MTT Maaningan biokaasulaitoksen havainnekuva (Kuva: Sari Luostarinen & Teija Paavola)

### 8.1 Kokeessa käytetty ruokohelpi

Kokeessa käytettiin Maaningalla viljeltyä ruokohelpeä, jonka sato oli aikaisempina vuosina korjattu keväällä. Sato korjattiin myös vuoden 2010 keväällä polttoon. Kokeessa käytetty ruokohelpi korjattiin tuoreena säilörehun tapaan kesä- sekä syyskuussa 2010 (KUVIO 2). Vuosi 2010 oli ruokohelpilohkojen neljäs satovuosi. Ruokohelpeä korjattiin kaikkiaan noin 6,5 hehtaarilta. Heikoimmalta lohkolta sato korjattiin kerran, muilta kahdelta lohkolta (4,9 ha) tehtiin kaksi satoa. Keväällä lannoitteena käytettiin biokaasulaitoksen käsittelyjäännyksestä ensimmäiselle sadolle, toista satoa ei lannoitettu lainkaan. Ruokohelpi niitettiin ja sitä esikuivatettiin puolipilvisessä säässä noin vuorokauden ajan ennen korjaamista. Ruokohelpisato säilöttiin pyöröpaaleihin, säilöntäaineena käytettiin biologista, maitohappobakteeripohjaista Kärki Sil-All 4\*4 – säilöntäainetta.



*KUVIO 2. Ensimmäisen sadon niitto kesäkuussa 2010*

Ensimmäinen sato oli toista satoa suurempi ja sen kuiva-ainepitoisuus oli pienempi. Sulavan orgaanisen aineen määrää kuvaava D-arvo oli kummassakin sadossa heikko, alle 60, mutta ensimmäisessä sadossa hieman toista satoa parempi. Osittain ensimmäisen sadon heikkoa sulavuutta voi selittää se, että korjatussa ruokohelvässä oli mukana hieman kevätkorjuun jäljiltä peltoon jäänyttä kuivaa kasvustoa. Yhteensä kahdessa korjuussa märkäsato oli keskimäärin 12 t/ha ja kuiva-ainesato 4 tTS/ha. (TAULUKKO 7, KUVIO 3.)

*TAULUKKO 7. Kokeessa käytetyn ruokohelven ominaisuudet sadoittain.*

<b>SATO</b>	<b>Korjuupäivä</b>	<b>Sato, t/ha</b>	<b>TS, %</b>	<b>Kuiva-ainesato, tTS/ha</b>	<b>D-arvo</b>
<b>1.sato</b>	22.6.2010	8,1	30	2,4	56
<b>2.sato</b>	29.9.2010	4,4	37	1,7	54
<b>Kertakorjuu</b>	29.9.2010	6,7	37	2,4	50



*KUVIO 3. Ensimmäinen sato lannoitettiin biokaasulaitoksen mädätysjäännöksellä. Peltoon jäi kevätkorjuun jäljiltä kuivaa kasvustoa.*

## **8.2 Koejärjestelyt**

Kokeessa biokaasureaktoriin syötettiin lietelantaa  $10 \text{ m}^3$  päivässä. Syöttö tapahtui automaattisesti kolme kertaa vuorokaudessa 8 tunnin välein määrien ollessa  $3 \text{ m}^3$ ,  $3,5 \text{ m}^3$  ja  $3,5 \text{ m}^3$ . Apevaunulla silputtua ruokohelpeä syötettiin reaktorin syöttöruuville kaksi kertaa päivässä joko apevaunulla tai pienkuormaajalla (KUVIO 4). Ensimmäisen viipymän (noin 30 vrk) syöttömäärä oli päivässä 450 kg. Tämän jälkeen ruokohelven määrää nostettiin 700 kg:aan päivässä, mutta lietelannan määrä pysyi samana. Ruokohelven syöttömäärä punnittiin apevaunun vaa'alla, jonka tarkkuus oli noin 20 kg. Reaktorin sekä jälkikaasualtaan viipymät olivat noin 30 päivää. Tämän vuoksi kokeen kesto oli noin 3 kuukautta, jona aikana reaktorin ja jälkikaasualtaan sisällöt olivat vaihtuneet sellaisiksi, kuin ne näillä syötteillä olisivat jatkuvasti. Tällöin myös mittaukset olivat todenmukaisia.



*KUVIO 4. Ruokohelpi syötettiin apevaunun avulla syöttöruuville. Syöttöruuvien avulla kasvimassa saadaan syötettyä reaktorin lietepinnan alapuolelle.*

Kokeen aikana biokaasulaitoksen mittareilta kerättiin tietoa tuotetun ja kulutetun kaasun määrästä sekä metaanipitoisuuksista. Mittaustiedot tallentuivat tietokoneelle automaattisesti. Esisäiliö-, reaktori- sekä jälkikaasualtaan lietteiden pH ja kuiva-ainepitoisuus määritettiin viikoittain. Ruokohelpisyötteen kuiva-ainepitoisuus määritettiin viikoittain.

### **8.3 pH-mittaus ja kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen**

pH- ja kuiva-ainepitoisuuden määrittämiseen otettiin edustava näyte lietteistä sekä ruokohelvestä. Lietenäytteet otettiin kerran viikossa lietealtaista tai näytteenottoputkesta sangolla (*KUVIOT 5 ja 6*). pH-mittaus tehtiin mittarilla (VWR pH 100) mittarin ohjeiden mukaan. Tulokset kirjattiin ylös.





*KUVIO 5. Esisäiliön näytteenottoaikka ja -välineet.*



*KUVIO 6. Jälkikaasualtaan näytteenottoaikka sekä -välineet*

Ruokohelpinäyte kerättiin viikon aikana syötetyistä paaleista siten, että jokaisesta silputusta paalista otettiin näyte. Näytteitä säilytettiin muovipusseissa

kylmäkaapissa analyysipäivään saakka. Paalien näytteistä punnittiin jokaisesta sama määrä ja näytteet sekoitettiin ja koottiin edustava näyte koko viikon ruokohelvestä.

Kuiva-ainemäärittystä varten punnittiin folioastia, jonka jälkeen vaaka taarattiin ja punnittiin näytteen tuorepaino. Lietenäytteessä tuorepaino oli noin 120 g ja ruokohelpinäytteessä noin 60 g. Näytteet kuivatettiin 105 °C:ssa 15 – 24 tuntia (KUVIO 7). Kuivatut näytteet punnittiin. Kuiva-ainepitoisuus laskettiin vähentämällä kuivatusta näytteestä astian paino ja jakamalla saatu tulos näytteen tuorepainolla ja kertomalla sadalla. Rinnakkaisnäytteitä otettiin kerralla kolme ja niiden keskiarvoa käytettiin laskelmissa. Ruokohelvestä otettiin joka viikko näyte pakastimeen mahdollisia lisäanalyysyjä varten. Lietenäytteitä otettiin pakastimeen 1 litran muovipulloon kokeen aikana kerran kahdessa viikossa, mutta kokeen lopun intensiivijaksolla kahdesti viikossa.



KUVIO 7. Kuiva-ainemäärittystä varten näytteet kuivatettiin kuivatusuunissa 105°C:ssa

#### 8.4 Käytännön operointi

Biokaasulaitoksella suoritettiin joka päivä aamutarkastus. Aamutarkastuksella luettiin mittarit, tarkistettiin prosessin toiminta sekä kaasuväestön koko ja

tarvittaessa päivitettiin kaasuväkä ohjaustietokoneelle vastaamaan todellista kokoa (KUVIO 8). Aamutarkastukseen meni aikaan 15 -20 minuuttia.

Aamutarkastuksen lisäksi biokaasulaitoksella tehtiin ruokohelven syöttö kaksi kertaa päivässä. Apevaunulla voitiin silputa yksi kokonainen tai kaksi rehuleikkurilla pienennettyä paalia kerrallaan. Yhden paalin tasalaatuisen silppuamiseen meni noin 20 - 30 minuuttia, kahden paalin silppuamiseen noin 45 – 60 minuuttia. Ruokohelven syöttö kesti apevaunulla noin 10 – 15 minuuttia ja pienkuormaajalla hieman kauemmin, noin 20 minuuttia.

Tarvittaessa tehtiin myös huolto- ja kunnossapitotöitä. Ruokohelpikokeen aikana tärkeää oli huolehtia, että liete pääsi virtaamaan jälkikaasualtaasta eteenpäin eikä kuivaa ainesta kasaantunut poistoputkeen.



*KUVIO 8. MTT Maaningan biokaasulaitoksen reaktori (edessä) sekä jälkikaasuallas. Aamutarkastuksella tarkistettiin kummankin sääsuojakuvun ikkunasta kaasuväkästä kokoa.*

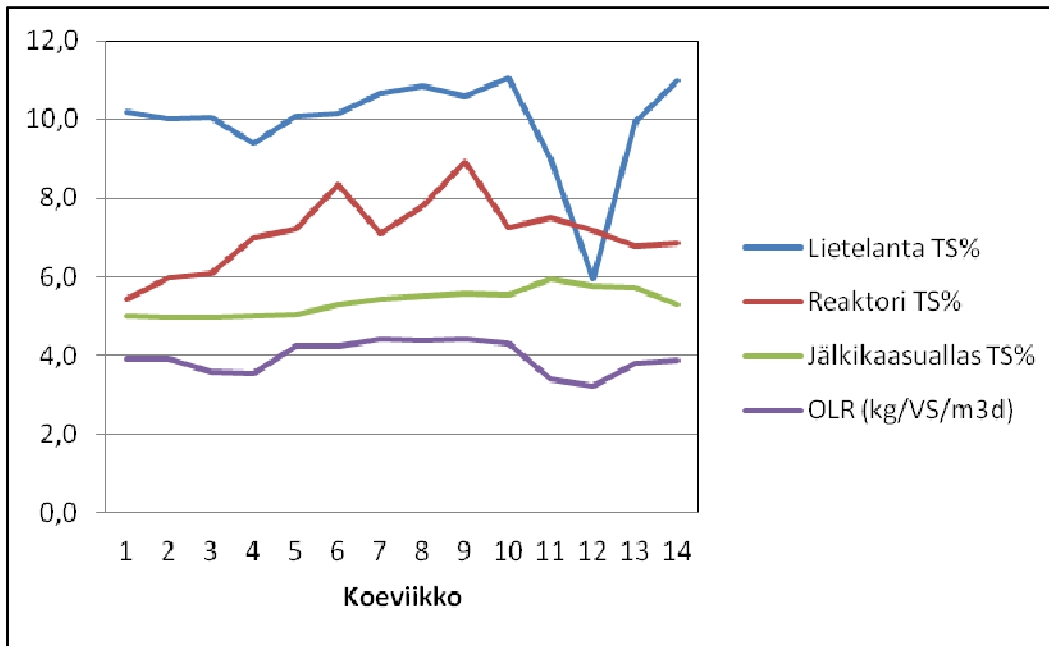
## 9 TULOKSET

Koejakso jakautuu tulosten puolesta kahteen eri osaan. Kokeen neljän ensimmäisen viikon aikana ruokohelven syöttömäärä oli 450 kg/vrk ja loppukokeen ajaksi ruokohelpisyöttöä nostettiin 700 kg:aan/vrk.

### 9.1 Prosessin toiminta

Kokeen aikana reaktorin hydraulinen viipymä oli keskimäärin 25 vuorokautta ja kuormitus 3,9 kg/VS/m<sup>3</sup>d. Kokeen ensimmäisillä neljällä viikolla ruokohelpeä syötettiin 450 kg vuorokaudessa, jolloin kuormitus oli hieman matalampi, noin 3,7 kg/VS/m<sup>3</sup>d. Kuormitus nousi kun ruokohelven syöttömäärä nostettiin 700 kg:aan päivässä. Korkeimmalle kuormitus nousi lietteen ollessa paksua, jolloin kuormitus oli 4,4 kg/VS/m<sup>3</sup>d. Prosessin lietteiden kuiva-ainepitoisuuden kuormituksen muutokset vaikuttivat viiveellä (*KUVIO 9*).

Esisäiliölietteen koostumus vaihteli kokeen aikana huomattavasti. Kevään sulamisvedet laskivat lietteen kuiva-ainepitoisuuden jopa 5 %:iin, kun se keskimäärin oli noin 10 %. Ruokohelpikoe alkoi heti lietelantakokeen jälkeen, jonka vuoksi prosessin lietteiden koostumus muuttui kokeen alussa eniten. Reaktori- sekä jälkikaasuallaslietteiden kuiva-ainepitoisuudet nousivat kokeen alussa kiinteämmän syötemateriaalin vuoksi, mutta tasoittuivat kokeen aikana omille tasoilleen. Reaktorilietteen kuiva-ainepitoisuus oli keskimäärin 7 % ja jälkikaasuallaslietteen noin 5 %. Esisäiliölietteen pH oli kokeen aikana keskimäärin 6,9. Koko prosessin lietteiden pH oli kokeen ajan vakaa, noin 7,5. Esisäiliön lietteen koostumusvaihtelut näkyivät reaktorilietteen kuiva-ainepitoisuuksissa. Reaktori- ja jälkikaasualtaan lietteiden pH:t olivat vakaita, mutta esisäiliölietteen pH vaihteli kokeen aikana yli 0,5 yksiköllä. (*KUVIO 9*).



KUVIO 9. Prosessin lietteiden kuiva-ainepitoisuudet sekä reaktorin kuormitus

## 9.2 Biokaasun tuotto ja metaanipitoisuus

Biokaasun metaanipitoisuus oli kokeen aikana keskimäärin 57 %. Lietekokeen jäljiltä metaanipitoisuus oli korkeimmillaan kokeen ensimmäisillä viikoilla, jolloin metaanipitoisuus oli noin 60 %.

Keskimäärin biokaasun tuotto oli kokeen aikana 290 Nm<sup>3</sup>/d. Kokeen ensimmäisillä neljällä viikolla kuormituksen ollessa alhaisempi vuorokausikohtainen keskituotto jäi 240 Nm<sup>3</sup>:iin/d, mutta kokeen loppupuoliskolla tuotto oli noin 320 Nm<sup>3</sup>/d. Jälkikaasualtaan tuotto oli noin 19 % biokaasun kokonaistuotosta. (KUVIO 10.)

## 9.3 Metaanin tuotto

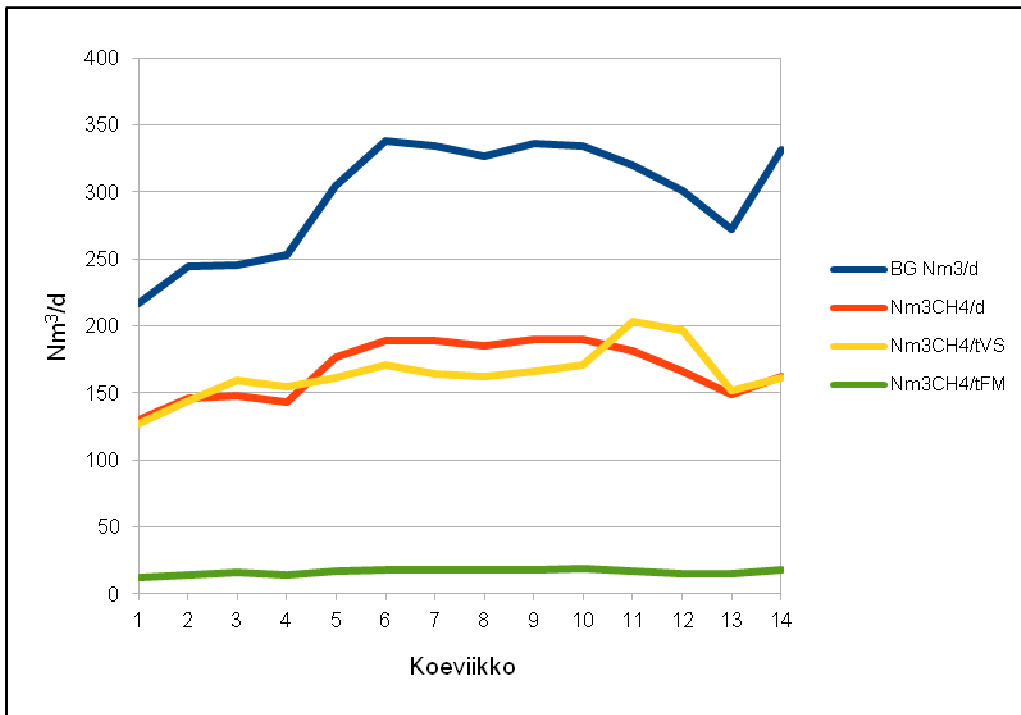
Koejakson aikana metaania tuotettiin keskimäärin 167 Nm<sup>3</sup>/d. Vuoden metaanintuotto olisi näillä syötteillä noin 60 000 Nm<sup>3</sup>. Energiasisällöltään vuoden metaanimäärä olisi noin 600 MWh. Tuotto oli tuoretta syötetonna kohden keskimäärin 16 Nm<sup>3</sup>/tFM ja orgaanisen kuiva-aineen syötetonna kohden 164 Nm<sup>3</sup>/tVS. Ensimmäisillä neljällä koeviikolla tuotot olivat hieman

alhaisemmat kuin loppukokeen aikana. (TAULUKKO 8.)

TAULUKKO 8. Metaanintuotot tuoretta sekä orgaanista syötetonnia kohden

Jakso	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tFM	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS
Koko koejakso	16	167
Helpeä 450 kg/vrk	14	146
Helpeä 700 kg/vrk	17	171

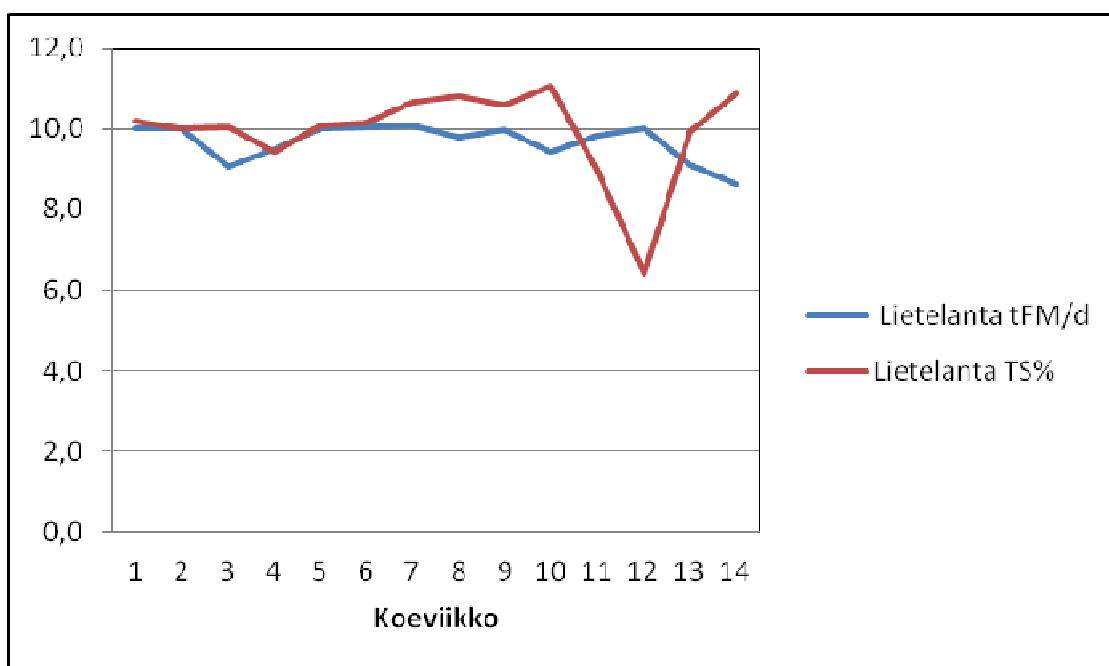
Korkeimmillaan koeviikkokohtaiset metaanintuotot lisättyä orgaanista ainetta kohden olivat kokeen loppupuolella, jolloin tuotto ylitti 200 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/tVS. Tuoretta syötetonnia kohden korkeimmat tuotot saatiin kokeen keskivaiheilla, jolloin tuotto oli 18 – 19 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/tFM. (TAULUKKO 10, KUVIO 10.)



KUVIO 10. Viikkokohtaiset biokaasu- ja metaanituotot koejakson aikana

#### 9.4 Lietelannan koostumuksen vaikutus kaasun tuotantoon

Kokeessa käytetyn lietelannan kuiva-ainepitoisuus vaihteli kokeen aikana paljon. Vaihtelu johtui lähinnä keväisistä sulamisvesistä, jotka johdetaan navetan laakasiiloista sekä jaloittelutarhasta lietesäiliöön. Sulamisvedet laimensivat lietettä huomattavasti, sillä lietteen kuiva-ainepitoisuus laski lähes 11 %:sta noin 5 %:iin vain parissa viikossa. Lietteen koostumuksen muuttuminen näkyi kaasun tuotossa. Paksummalla lietteellä biokaasun tuotto vuorokautta kohden oli noin 20 m<sup>3</sup> eli noin 6 % suurempi ja metaanintuottoakin yli 10 m<sup>3</sup>/vrk eli lähes 7 % suurempi kuin ohuemmalla lietteellä. Tuoretta syötetönniäkin kohden eroa oli 2 m<sup>3</sup>. Ohuemmalla lietteellä metaanintuotto orgaanista ainetta kohden oli suurempi kuin paksummalla lietteellä. (TAULUKKO 9, KUVIO 11.)



KUVIO 11. Lietelantasyötöt ja lietelannan kuiva-ainepitoisuus koeviikoittain

*TAULUKKO 9. Erialaisten lietteiden vaikutus kaasun tuottoon*

Jakso	Liete TS%	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tFM	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS	Nm <sup>3</sup> BG/d	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /d
Viikot 7 - 8	10,7	18	163	330	187
Viikot 11 - 12	7,7	16	200	310	174

**9.5 Ruokohelven ominaisuuksien ja syöttötasojen vaikutus kaasuntuotantoon**

Kokeessa käytetyn ruokohelven kuiva-ainepitoisuus oli korjuukesän analyysien mukaan ensimmäisessä sadossa 30 % ja toisessa sadossa 37 %. Koepaaleista kerättyjen näytteiden kuiva-ainepitoisuus oli kuitenkin keskimäärin noin 35 %. Ensimmäisillä neljällä koeviikolla syötetyn kesäkorjatun ruokohelven kuiva-ainepitoisuus oli noin 36,2 %. Loppukokeen aikana syötettiin kahden korjuun ruokohelpeä, jonka kuiva-ainepitoisuus oli näytteissä noin 34,5 %. Ensimmäisen ja toisen sadon paaleja syötettiin reaktoriin vuorotellen.

Kokeen alussa syötettiin ensimmäiset neljä viikkoa ruokohelpeä 450 kg vuorokaudessa, jolloin ruokohelven osuus kokonaissyötteen kuiva-aineesta oli noin 15 %. Tällöin reaktorin kuormitus oli noin 3,7 kgVS/m<sup>3</sup>\*d. Tämän jälkeen ruokohelven syöttömäärää nostettiin 700 kg:aan vuorokaudessa, jolloin ruokohelven osuus kokonaissyötteen orgaanisesta kuiva-aineesta oli noin 20 %. Tällöin reaktorin kuormitus oli keskimäärin 4 kgVS/m<sup>3</sup>\*d, sillä lietteen määrä pidettiin edelleen samana. Syöttötason nosto vaikutti myös kaasun tuotantoon. Biokaasun keskimääräinen vuorokausituotto nousi lähes 80 m<sup>3</sup> eli noin 33 %. Metaanipitoisuus laski kuormituksen noustessa kahdella prosenttiyksiköllä. Metaanintuotto nousi ruokohelpimäärän noston jälkeen lähes 40 m<sup>3</sup> vuorokautta kohden eli noin 26 %. Metaanintuotto tuoretta syötetöntä kohden nousi 3 m<sup>3</sup> eli noin 21 % ja orgaanista syötetöntä kohden noin 30 m<sup>3</sup> eli noin 17 %. (TAULUKKO 10.)



TAULUKKO 10. Koejakson tärkeimmät parametrit ja metaanintuotot

Koe-vk	HRT (d)	OLR (kgVS/m <sup>3</sup> d)	Helven syötteessä	VS% CH <sub>4</sub> %	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /d	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / tVS	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / tFM
1	25 + 25	3,9	15	58	130	127	12
2	25 + 25	3,9	15	59	146	144	14
3	27 + 27	3,6	16	60	148	159	16
4	26 + 26	3,5	17	56	143	155	14
5	24 + 24	4,2	21	58	177	161	17
6	24 + 24	4,2	21	56	189	171	18
7	24 + 24	4,4	20	57	189	164	18
8	25 + 25	4,4	20	57	184	162	18
9	24 + 24	4,4	21	56	190	166	18
10	26 + 26	4,3	20	57	190	171	19
11	25 + 25	3,4	25	57	181	203	17
12	24 + 24	3,2	25	55	166	197	16
13	27 + 27	3,8	22	55	149	152	15
14	28 + 28	3,9	20	55	162	161	18
Keskiarvo	25 + 25	3,9	20	57	167	164	16
vk 1-4	26 + 26	3,7	15	58	141	146	14
vk 5-10	25 + 25	4,3	20	57	186	166	18
vk 11-12	24 + 24	3,3	25	56	173	200	16
vk 5 - 14	25 + 25	4	21	56	178	171	17

## 9.6 Metaanintuottopotentiaalit

Koejakson syötteiden metaanintuottopotentiaalit määritettiin laboratorio-oloissa. Kokeessa käytetyn ruokohelven metaanintuottopotentiaali 35 vuorokauden viipymällä oli 1. sadon ruokohelvellä 309 – 368 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS ja 2. sadon ruokohelvellä 264 – 291 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS. Lietelannan metaanintuottopotentiaali 35 vuorokauden viipymällä oli 199 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS. Tulokset vastaavat hyvin aikaisemmin laboratoriossa tehtyjä metaanintuottopotentiaalin määrittämiä.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 10.1 Prosessin toimivuus

Biokaasulaitoksen metaanintuotto oli tasaisinta kokeen puolivälissä, jolloin kuormitus oli tasainen, mutta korkea, jopa  $4,3 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$ . Kuormituksen ollessa näin suuri ei kaikkea metaanintuottopotentiaalia saada hyödynnettyä, jos osa syötemateriaalista ei ehdi hajota prosessissa. Ylikuormitustilassa prosessin toiminta heikkenee ja kaasuntuotto pienenee. Kokeessa prosessi toimi suhteellisen hyvin näinkin korkealla kuormituksella, vaikka käytetyn ruokohelven sulavuus oli melko alhainen. MTT Maaningan biokaasulaitoksen lietteen virtaus toimii ylivaluntaperiaatteella, mutta lietteen ollessa tavallista paksumpaa tukoksia syntyi etenkin näytteenottoputkien läheisyyteen. Korkean kuormituksen aikana lietteen virtaukseen tuli kiinnittää erityistä huomiota ja tukokset avattiinkin tarvittaessa. Korkea kuormitus nostaa myös lietteiden kuiva-ainepitoisuutta ja voi joissain tilanteissa aiheuttaa ongelmia lietteiden sekoitukselle, mikäli sekoitusta ei ole suunniteltu paksulle lietemassalle. Kokeessa ei kuitenkaan havaittu korkeankaan kuormituksen aiheuttavan ongelmia sekoitukselle.

Kokeen loppuvaiheessa liete laimeni sulamisvesien vuoksi, jolloin prosessin kuormitus laski nopeasti ja ruokohelven osuus syötteen orgaanisesta aineesta nousi. Matalammalla kuormituksella myös saavutettiin suurimmat metaanintuotot syötteen orgaanista kuiva-ainetta kohden, sillä orgaanisen aineen määrän vähentyessä prosessin mikrobit hajottavat käytettävissä olevan orgaanisen aineen tarkemmin. Pidempään jatkuessaan liian matala kuormitus sen sijaan laskee metaanintuottoa, kun hajotettavaa orgaanista ainetta ei ole tarpeeksi mikrobien käytettävissä.

Aiemmissa Maaningalla suoritetuissa kokeissa lietteen kuiva-ainepitoisuus on ollut 7 – 8 %, kun se ruokohelpikokeessa oli keskimäärin 10 %. Alhaisempi lietteen kuiva-ainepitoisuus ruokohelpikokeessa olisi alentanut kuormitusta,

mikä puolestaan olisi nostanut koko kokeen metaanintuottoa lisättyä orgaanista ainetta kohti suuremmaksi. Paksun lietteen lisäksi prosessin kuormitusta nosti ruokohelppi, jonka kuiva-ainepitoisuus oli korkea.

## 10.2 Metaanintuotto

Lannan metaanintuottopotentiaali voi olla jopa  $250 \text{ m}^3/\text{tVS}$  ja ruokohelvellä on saatu laboratorio-oloissa jopa yli  $400 \text{ m}^3/\text{tVS}$  metaanintuottoja. Laboratorio-oloissa metaanintuottopotentiaalit ovat kuitenkin usein korkeampia kuin käytännössä, sillä viipymä on pidempi ja kaikkia kokeen olosuhteita pystytään hallitsemaan huomattavasti paremmin kuin suuressa biokaasulaitoksessa. Koko syötteen metaanintuottopotentiaalia ei jatkuvatoimisella yhteiskäsittelyllä saada hyödynnettyä täysin, jonka vuoksi kokeissa saadut todelliset tuotot eivät vastaa panoskokeissa saatujen metaanintuottopotentiaalien summaa. (Lehtomäki 2006, 39; Lehtomäki ym. 2007,19.)

Laboratorio-oloissa tehdyssä jatkuvatoimisessa yhteiskäsittelykokeessa, jossa kasvin osuus syötteen orgaanisesta aineesta oli 20 %, on saatu lannan ja säilörehun metaanintuotoksi  $178 \text{ m}^3/\text{tVS}$  ja vastaavalla kasviosuudella lannan ja oljen metaanintuotoksi  $159 \text{ m}^3/\text{tVS}$ . Pelkän lannan metaanintuotto samassa kokeessa oli noin  $155 \text{ m}^3/\text{tVS}$ . Tässä maatilamittakaavan biokaasulaitoksella suoritettussa ruokohelven ja lietelannan yhteiskäsittelykokeessa metaanintuotto oli vastaavalla kasviosuudella noin  $170 \text{ m}^3/\text{tVS}$ , joten tulos vastaa melko hyvin laboratoriossa saatuja tuloksia kasvimateriaalin ja lannan yhteiskäsittelystä. Korkeimmillaan metaanintuotto oli noin  $200 \text{ m}^3/\text{tVS}$ . Kuormitus oli tässä maatilamittakaavan kokeessa kuitenkin suurempi kuin Lehtomäen (2006, 49 - 51) laboratorio-oloissa tehdyissä säilörehu- ja olkikokeissa. Maatilamittakaavan ruokohelpikokeessa jälkikaasuallas tuotti 19 % biokaasusta ja lisäsi siten metaanintuottoa kokeen aikana keskimäärin 23 %.

Aikaisemmissa MTT Maaningan biokaasulaitoksessa suoritetuissa kokeissa metaanintuotot ovat olleet huomattavasti korkeampia syötteen orgaanista kuiva-ainetta kohden. Esimerkiksi säilörehun ja lietelannan yhteiskäsittelykokeessa metaanintuotto orgaanista ainetta kohden oli noin  $40 \text{ m}^3$  enemmän kuin

ruokohelpikokeessa. Tulokset eivät kuitenkaan ole täysin vertailukelpoisia, sillä ruokohelpikokeen aikana kuormitus oli jonkin verran suurempi. Kyseisen biokaasulaitoksen maksimikuormituksen on laskettu olevan noin 3,5 kgVS/m<sup>3</sup>d, mikä ylitettiin ruokohelpikokeessa. Kasviosuudet olivat kokeissa sipulijätkeoetta lukuunottamatta samaa kokoluokkaa. Huomattavimmat tuloksiin vaikuttavat eroavaisuudet kokeissa kuormituksen lisäksi olivat syötteiden erilaiset kuiva-ainepitoisuudet. (TAULUKKO 11.)

*TAULUKKO 11. MTT Maaningan biokaasulaitoksen yhteiskäsittelykokeiden kaasuntuotot sekä parametrit tarkastelujaksolta kokeen loppupuolelta (Luostarinen & Pyykkönen 2012, suullinen tiedonanto.)*

Syöte päivässä	Säilörehua 800 kg ja lietelantaa 10 m <sup>3</sup>	Sipulijätettä 800 kg ja lietelantaa 10 m <sup>3</sup>	Ruokohelpeä 700 kg ja lietelantaa 10 m <sup>3</sup>
HRT(Reaktori + Jälkikaasuallas)	25 + 25 vrk	24 + 24 vrk	25 + 25 vrk
OLR (kgVS/m <sup>3</sup> d)	3	2,8	3,4
Lietelanta TS %	7	8	8
Kasvimassa TS %	27	15	33
Biokaasuntuotto Nm <sup>3</sup> /d	340	300	310
Metaanintuotto Nm <sup>3</sup> /d	180	160	175
Metaanintuotto Nm <sup>3</sup> /tFM	17	15	16
Metaanintuotto Nm <sup>3</sup> /tVS	240	220	200

Kokeessa käytetyn lietelannan metaanintuottopotentiaali oli noin 200 m<sup>3</sup>/tVS ja ruokohelven metaanintuottopotentiaali vaihteli sadosta riippuen 260 – 370 m<sup>3</sup>/tVS. Kokeessa ruokohelven osuus syötteen organisesta aineesta oli neljää ensimmäistä viikkoa lukuun ottamatta noin 20 %. Syötteiden laskennallinen metaanintuottopotentiaali panoskokeiden ja toteutuneiden syöteosuuksien perusteella oli noin 225 Nm<sup>3</sup>/tVS. Tästä potentiaalista saatiin hyödynnettyä kokeen aikana keskimäärin 77 %. Kokeen viimeisillä viikoilla, jolloin liete oli ohutta, metaanintuottopotentiaalista saatiin hyödynnettyä noin 90 %. Korkea

kuormitus saattoi laskea hyödyntämisastetta, sillä se jäi aikaisempia samassa biokaasulaitoksessa tehtyjä kokeita alhaisemmaksi. (Pyykkönen 2012, suullinen tiedonanto.)

### **10.3 Ruokohelven vaikutus tuloksiin**

Ruokohelven satotaso on kirjallisuudessa raportoitua alhaisempi, sillä kirjallisuudessa kuiva-ainesatotasona käytetään yleensä 9 tTS/ha. Käytännön viljelyksillä tätä satotasoa ei kuitenkaan yleensä saavuteta ja koelohkoillakin satotaso jäi 4 tTS/ha. Ruokohelven D-arvo jäi selvästi perinteisiä nurmikasveja alhaisemmaksi. Nurmikasveilla tavoitellaan sulavuutta kuvaavaksi D-arvoksi 68 - 70, kun se kokeessa käytetyllä ruokohelvellä jäi alle 60. Lamminen ym (2005, 21 - 22) ovat todenneet Suomen oloissa, että ruokohelven D-arvo laskee muita nurmikasveja nopeammin ensimmäisessä niitossa, jonka vuoksi sato olisi korjattava muita nurmikasveja aikaisemmin. Kokeessa käytetty ruokohelpi korjattiin säilörehun teon jälkeen, joka voi osaltaan selittää alhaista sulavuutta. Korjuun aikaistamisella olisi voitu saada sulavuudeltaan parempaa ruokohelpeä. Aikaistaminen olisi tosin myös voinut laskea satotasoa huomattavasti, sillä kesä 2010 oli Maaningalla todella kuiva ja kuuma. Lamminen ym. (2005, 21 - 22) toteavat myös, ettei kahden niiton järjestelmä välttämättä sovellu tuorekorjatulle ruokohelvelle, sillä toisen sadon sulavuus laskee pitkän korjuuvälin vuoksi liikaa. Toista satoa ei myöskään lannoitettu ollenkaan.

Ruokohelpisatoon ja sadon laatuun voi vaikuttaa myös se, että kokeessa käytetty ruokohelpi oli korjattu lohkoilta, joiden sato on aikaisempina vuosina korjattu keväällä kuivana polttoon. Tämän vuoksi mukana saattoi olla kevätkorjuusta peltoon jäänyttä huonosti sulavaa materiaalia. On myös havaittu, että kevätkorjatun ruokohelven korsiosuus kasvaa kasvuston ikääntyessä. Korsiosuus on suurimmillaan 6. tai 7. satovuonna, jolloin se voi olla jopa 75 % kuiva-aineesta. Korsiosuuden lisääntyessä kasvaa myös kasvin huonosti sulavan osuuden määrä. Edellisten vuosien viljelytekniikka onkin voinut vaikuttaa kokeessa käytetyn ruokohelven heikkoon D-arvoon. (Pahkala ym. 2005, 7.)

Ensimmäiset neljä viikkoa syötettiin hieman huonolaatuisempaa ruokohelpeä, mikä voi osaltaan selittää pienemmät metaanituotot kokeen alkuvaiheessa. Toisaalta biokaasuprosessi tässä vaiheessa vasta sopeutui uuteen syöttöön, eikä hajoamisprosessi ollut vielä tehokkaimmillaan. Kesäkorjattu ruokohelppi oli sulavuudeltaan heikkoa ja kuiva-ainepitoisuus oli kahden korjuun ruokohelpeä korkeampi. Ruokohelven kuiva-ainepitoisuus oli koko kokeen ajan korkea, keskimäärin noin 35 %, mikä voi osaltaan selittää alhaisen D-arvon lisäksi alhaista metaanintuottoa lisättyä orgaanista ainetta kohden.

#### **10.4 Tulosten soveltaminen käytäntöön**

Metaanintuoton maksimointi alkaa jo pellolta. Tavoitteena on tuottaa mahdollisimman pienin viljelypanoksin mahdollisimman laadukas ja kooltaan hyvä sato biokaasulaitoksen syötteenä. Sadon määrän maksimointi voi korjuun viivästymisen takia vaikuttaa alentavasti sadon laatuun, kun taas aikainen korjuu parhaan D-arvon aikaan vaikuttaa väistämättä sadon määrään. Maatilan biokaasulaitoksella lietalanta on erinomainen perussyöte, johon kasvimassaa lisäämällä voidaan kaasuntuotanto nostaa uudelle tasolle.

Biokaasulaitoksen prosessi toimii paremmin pienemmällä kuormituksella kuin suurella kuormituksella, jonka aiheuttamia tukoksia jouduttiin aukaisemaan lietteen virtauksen varmistamiseksi. Laitokselle määritetty maksimikuormitus olisi syytä ottaa syötöissä huomioon, sillä kun maksimikuormitus ylitetään, prosessin vakaus voi vaarantua ylikuormituksen ja käytännön teknisen toimivuuden kannalta. Pysyteltäessä suositeltujen kuormitusten sisällä laitoksen toiminta on varmempaa eikä työpanos kasva liian suureksi.

Kuormituksella on oleellinen merkitys myös metaanintuottoon, sillä ylikuormitus pienentää kaasun tuottoa sekä laskee metaanipitoisuutta. Ruokohelven syöttö alensi metaanipitoisuutta pelkkään lietalantasyöttöön verrattuna, mutta tämä on tavanomaista kasvia käyttäville biokaasuprosesseille ja toisaalta kaasuntuoton lisäys korvaa osaltaan alentuneen metaanipitoisuuden. Kaasuntuoton

maksimointi kasvimassan osuutta lisäämällä ei pidemmän päälle ole järkevää, sillä se voi aiheuttaa ongelmia lietteiden paksuuntuessa, mikäli laitosta ei alun perin ole suunniteltu korkeille kuiva-ainepitoisuuksille. Laboratorio-oloissa on myös havaittu, että kasvimassan osuuden nosto syötteessä kasvattaa kaasuntuottoa vain tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen kaasuntuotto alkaa laskea. Esimerkiksi Lehtomäen tutkimuksessa Biogas production from energy crops and crop residues (2006) havaittiin, että suurimmat metaanintuotot yhteiskäsittelyssä saatiin kun kasvin osuus syötteen orgaanisesta aineesta oli 30 %. Kasviosuuden kasvaessa liian suureksi prosessin ylikuormittumisen riski kasvaa. Ruokohelpikokeessa prosessi toimi hyvin vielä 20 %:n kasviosuudella, mutta lietteen paksuuntuessa prosessin toimintavarmuus laski.

Kokeessa olisi voitu saada syötteiden metaanintuottopotentialiaali paremmin käyttöön, mikäli kuormitusta olisi laskettu. Kuormitusta olisi saatu laskettua vähentämällä lannan pumppausmäärää tai ruokohelven syöttömäärää. Biokaasulaitoksen päivittäinen pumppausmäärä ( $10 \text{ m}^3$ ) on kuitenkin laskettu siten, että kaikki tutkimusnavetan eläinten tuottama lanta saadaan ajetuksi prosessin läpi eikä ohijuoksutuksia tarvita. Mikäli kaikki lietelanta halutaan hyödyntää prosessissa, ei syöttömäärän pienentäminen käytännössä ole mahdollista. Lietelannan syötön vähentäminen aiheuttaisi myös prosessin lietteiden paksunemisen, mikäli kasvisyöttö pidettäisiin samana. Tällöin myös tukkeumariski kasvaisi. Kasvisyötön määrän pienentäminen kuormituksen laskemiseksi ja metaanintuottopotentialin hyödyntämiseksi olisi ollut mahdollista ja se olisi mahdollisesti hyödyttänyt prosessia. Etenkin lietelannan ollessa paksua kasvi- tai lietelantasyötön vähentäminen voisi olla prosessin kannalta järkevää, jotta ylikuormitustilaa ei syntyisi ja hajoaminen toteutuisi mahdollisimman hyvin. Toisaalta jos tätä kasvisyöttötasoa halutaan pitää yllä, kasvin sulavuus pitäisi olla korkeampi metaanintuoton maksimoimiseksi ja teknisten ongelmien, kuten tukosten, poistamiseksi.

Kesäaikana eläimet yleensä laiduntavat, minkä vuoksi lantaa on kesäisin käytettävissä vähemmän. Lannan varastointi kesää varten ei käytännössä ole järkevää, sillä sitä jouduttaisiin kuljettamaan kohtuuttomasti varastojen välillä. Biokaasulaitosta ajetaankin kesäisin pienemmällä lietemäärillä, jotta liete ei

loppuisi kesken. Tämä on käytännöllisesti ja taloudellisesti järkevämpää kuin lietteen varastointi kesää varten. Syötteen kasviosuutta voisi nostaa kesällä lietteen koostumus huomioiden siten, että prosessin lietteet eivät paksunisi liikaa eikä kasviosuus pääsisi nousemaan liian korkeaksi. Näin myös kesällä voitaisiin tuottaa enemmän biokaasua energiantuotantoon.

Ruokohelpi on hyvä lisä biokaasulaitoksen syötteenä, sillä monivuotisena, satoisana ja vaatimattomana kasvina sen viljely pienillä tuotantopanoksilla on mahdollista. Ruokohelven viljely on mahdollista myös heikoimmilla peltolohkoilla, jolloin tilan paremmat lohkot saadaan muuhun käyttöön. Ruokohelven tuorekorjuuketjua olisi kuitenkin kehitettävä, jotta ruokohelpi saadaan biokaasulaitokseen mahdollisimman sulavana.



## 11 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää ruokohelven ja lietelannan yhteiskäsittelyn mahdollisuuksia biokaasulaitoksessa. Koejärjestelyin suoritettu tutkimus oli mielenkiintoinen ja toimiessani tutkimusapulaisena biokaasututkimuksen parissa sain seurata kokeen etenemistä lähietäisyydeltä koko kokeen ajan. Käytännön töissä pääsi tekemään koejärjestelyjen lisäksi monipuolisia biokaasulaitoksen huolto- ja kunnossapitotöitä.

Ruokohelpikokeen alkaessa biokaasulaitoksessa oli juuri loppunut lietelantakoe ja oli mielenkiintoista huomata miten nopeasti kaasuntuotto nousi, kun ruokohelpeä alettiin syöttää reaktoriin. Kokeen aikana tuli esiin myös yhteiskäsittelyn ongelmia, jotka osittain johtuivat koelaitoksen ominaislaadusta. Esimerkiksi kuiva-aines pyrki tukkimaan erityisesti näytteenottoputkia, joita ei välttämättä perinteisessä maatalan biokaasulaitoksessa ole. Etenkin reaktorin näytteenottoputkesta oli vaikeaa saada joka viikko tasainen, edustava näyte ja putkesta joutuikin aina ennen näytteenottoa tyhjentämään useamman sangollisen kuivaa, pintaan noussutta lietettä.

Kiinnostus biokaasuteknologiaan ja biokaasuntuotannon mahdollisuuksiin kasvoi ja odotan innolla tulevaisuudessa näkeväni maatilojen pihapiireissä biokaasulaitoksia tuottamassa lähienergiaa tilan omaan käyttöön tilan omista raaka-aineista. Poliittisien päättäjien tuesta riippuen biokaasulaitosten yleistymisen on vain ajan kysymys.

## LÄHTEET

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen, R. 2008. Biogas handbook. Hakupäivä 1.3.2011. [http://www.big-east.eu/downloads/IR-reports/ANNEX%202-39\\_WP4\\_D4.1\\_Master-Handbook.pdf](http://www.big-east.eu/downloads/IR-reports/ANNEX%202-39_WP4_D4.1_Master-Handbook.pdf)

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden terveystäännöistä 3.10.2002/1774.

Huttunen, M., Kuittinen, V. 2011. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 14. Joensuu. Itä-Suomen yliopiston julkaisu. Hakupäivä 2.2.2012 [http://www.biokaasuyhdistys.net/index.php?option=com\\_content&view=categor y&layout=blog&id=37&Itemid=61](http://www.biokaasuyhdistys.net/index.php?option=com_content&view=categor y&layout=blog&id=37&Itemid=61)

Impola, R., 2010. Biokaasulaitokset ja niiden tuotanto Saksassa. Hakupäivä 12.10.2011. <http://www.oamk.fi/epooki/?julkaisu=15>

Kervinen, J. 30.11.2010. Biokaasulaitteiston suunnittelu, rakentaminen ja valodointi. Hakupäivä 12.10.2011. [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/23116/Kervinen\\_Jukka.pdf?sequence%3D2+biokaasu+panoskoe&hl=fi&gl=fi&pid=bl&srcid=ADGEESh1RhWqxJ2jBONrpPwQO4RO6GUVfy7Zj8-s6n8lullr0ISvyPSLDN9yQG6x29FGJ-vbWxPb\\_P6\\_DErXJF90\\_ZLMVmksrc3i8HtDqti1psEi4kXTBnfYt70CK7EcUbeQEDkEwfZ&sig=AHIEtbQXShveDzJ-11bBnD4RSVSqA2NKiA](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/23116/Kervinen_Jukka.pdf?sequence%3D2+biokaasu+panoskoe&hl=fi&gl=fi&pid=bl&srcid=ADGEESh1RhWqxJ2jBONrpPwQO4RO6GUVfy7Zj8-s6n8lullr0ISvyPSLDN9yQG6x29FGJ-vbWxPb_P6_DErXJF90_ZLMVmksrc3i8HtDqti1psEi4kXTBnfYt70CK7EcUbeQEDkEwfZ&sig=AHIEtbQXShveDzJ-11bBnD4RSVSqA2NKiA)

Laitinen, A., Sironen, J. & Vesterinen, T. 2006. Ruokohelven tuorekorjuun tekniikka ja talous. Hakupäivä 13.3.2011. [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20551/laitinenym\\_26.pdf?sequence=3](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20551/laitinenym_26.pdf?sequence=3)

Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010/1396.

Lamminen, P., Isoahti, M. & Huuskonen, A. 2005. Turvesoiden jatkokäyttö energiantuotannossa. MTT:n selvityksiä 101. Hakupäivä 13.3.2011. <http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts101.pdf>

Lampinen, A. 2003. Jätteiden liikennekäyttöpotentiaali Suomessa. Kuntatekniikka 1/2003, 31-34.

Lannoitevalmistelaki 29.6.2006/539.

Latvala, M. 2005. Tampere. Jätevesilietteen anaerobinen käsittely ja biokaasun hyötykäyttö. Hakupäivä 13.3.2011.  
[http://www.motiva.fi/julkaisut/uusiutuva\\_energia/jatevesilietteen\\_anaerobinen\\_kasittely\\_ja\\_biokaasun\\_hyotykaytto.1027.shtml](http://www.motiva.fi/julkaisut/uusiutuva_energia/jatevesilietteen_anaerobinen_kasittely_ja_biokaasun_hyotykaytto.1027.shtml)

Latvala, M. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Hakupäivä 13.3.2011.  
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=106756&lan=fi>

Lehtomäki, A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. Hakupäivä 5.4.2011.  
<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf;jsessionid=657A105EFA348B89651118F6B791AB46?sequence=1>

Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85.

Luostarinen, J. 4.11.2009. Ruokohelven biokaasutuskokeet. Hakupäivä 13.3.2011.  
<http://www.oulunkaari.com/tiedostot/Uusiutuvaenergia/raportit/Metenerin%20ruokohelpikoe.pdf>

Luostarinen, S. 2012. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. Erikoistutkija. Suullinen tiedonanto.

Maatilan biokaasulaitokset. 28.1.2011. Hakupäivä 12.10.2011.  
<http://www.mavi.fi/fi/index/maaseudunrahoitus/investointituet/tukikohteet.html>

Matilda, maataloustilastot. Hakupäivä 4.4.2011.  
<http://www.maataloustilastot.fi/tilasto/35/tilastojulkaisulistaus>

Paavola, T. 27.3.2007. Biokaasuprosessi – raaka-aineet, tuottokyky, käsittely, prosessi. Hakupäivä 1.3.2011.  
[http://www.thermopolis.fi/UserData/doc/Biokaasuseminaari/Biokaasuprosessi\\_Paavola\\_270307.pdf](http://www.thermopolis.fi/UserData/doc/Biokaasuseminaari/Biokaasuprosessi_Paavola_270307.pdf)

Pahkala, K., Isolahti, M., Partala, A., Suokangas, A., Kirkkari, A., Peltonen, M., Sahramaa, M., Lindh, T., Paappanen, T., Kallio, E. & Flyktman, M. 2005. Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotantoa varten. Hakupäivä 11.3.2011.  
<http://www.mtt.fi/met/pdf/met1b.pdf>

Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. 6.11.2008. Hakupäivä 8.8.2011.  
[http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus\\_311008.pdf](http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf)

Pyykkönen, V. 2012. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. Biokaasututkija. Suullinen tiedonanto.

Reskola, V-P. 2011. Miten valtio tukee biokaasulaitoksia? Hakupäivä 12.10.2011. [www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=131304&lan](http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=131304&lan)

Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. & Rintala, J. 3.3.2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare. Jyväskylän yliopisto. Hakupäivä 5.5.2011.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409000704>

Suomen biokaasuyhdistys. Tuotanto. Hakupäivä 2.2.2012.  
[http://www.biokaasuyhdistys.net/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=53&Itemid=73](http://www.biokaasuyhdistys.net/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=53&Itemid=73)

Tuen määrä. 12.3.2010. Maaseutuviraston Internetsivusto. Hakupäivä 12.10.2011.  
<http://www.mavi.fi/fi/index/maaseudunrahoitus/investointituet/tuenmaara.html>

Uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön tukijärjestelmä käyttöön. 24.3.2011. Hakupäivä 15.10.2011. [http://www.tem.fi/?s=2471&89519\\_m=102404](http://www.tem.fi/?s=2471&89519_m=102404)