

MTT RAPORTTI 113

Biokaasuteknologiaa maataloilla I

Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatalakohtaiselta laitokselta

Sari Luostarinen (toim.)



Biokaasuteknologiaa maatiloilla I

**Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja
operointi - käytännön kokemuksia MTT:n
maatilakohtaiselta laitokselta**

Sari Luostarinen (toim.)

ISBN: 978-952-487-481-6

ISSN: 1798-6419

<http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti113.pdf>

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-481-6>

Copyright: MTT

Kirjoittajat: Sari Luostarinen (toim.)

Julkaisija ja kustantaja: MTT Jokioinen

Julkaisuvuosi: 2013

Kannen kuva: Ville Pyykkönen/MTT:n arkisto

Biokaasuteknologiaa maataloilla I

Sari Luostarinen (toim.)

¹⁾Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus MTT, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

Tiivistelmä

Biokaasuteknologiaa voidaan hyödyntää maataloudessa monella tapaa. Sen avulla voidaan hyödyntää lannan ja muiden eloperäisten materiaalien energiasisällöt, kierrättää niiden ravinteet kasvintuotannon tarpeisiin, tehostaa typen hyödyntämistä ja hallita maatalouden ympäristövaikutuksia. Prosessin lopputuotteista biokaasu voidaan hyödyntää sähkön, lämmön ja/tai liikennepolttoaineen tuotannossa ja käsittelyjäännös kasvinravinteina pelloilla.

Maatilojen biokaasulaitokset käsittelevät Suomessa yleensä pääasiassa kotieläinten lietalantaa. Lisämateriaaleina käytetään erilaisia kasvibiomassoja sekä soveltuvia jättemateriaaleja lähinnä ruuantuotannosta. Lisämateriaalien käytön tavoitteena on yleensä nostaa biokaasutuottoa, mutta ne muuttavat myös käsittelyjäännöksen ravinnepitoisuuksia ja -suhteita.

Maatilojen biokaasulaitosten suunnittelu lähtee liikkeelle käytettävissä olevista syöttömateriaaleista sekä niiden määrästä ja ominaisuuksista. Laitos mitoitetaan näille massoille ja tarvittava tekniikka valitaan niille soveltuvaksi. Laitoksen suunnittelussa ja liittämisessä olemassa oleviin tilarakenteisiin on monia vaihtoehtoja, joista on hyvä keskustella asiantuntijan kanssa. Näin voi varmistaa tilakohtaisesti oikeat ratkaisut. Myös laitoksen luvittamisessa (rakennus- ja ympäristölupa, turvallisuus, lannoitevalmistelainsäädäntö) kannattaa olla yhteydessä kuhunkin viranomaiseen, jotta luvitusprosessi etenee sujuvasti.

Laitoksen kannattavuutta kannattaa pohtia hyvissä ajoin ja miettiä, kuinka se voisi rakentua. Huomioitavia seikkoja ovat mm. saatavilla olevat tuet, investointikustannus, energiantuotto ja sen hyödyntäminen (oma käyttö vai myynti), ravinnekierrot ja mahdollinen väkilannoitetarpeen väheneminen, porttimaksullisten materiaalien vastaanottaminen, parantunut hygienia ja vähemmän hajuja.

MTT Maaningan maatilakohtaisella biokaasulaitoksella tehtyjen koeajojen perusteella lypsylehmien lietalanta tuottaa keskimäärin 12–14 m³ metaania per tuoretonni, mikä ko. laitoksella tarkoittaa noin 400 MWh:n verran metaania energiantuotantoon (3500 m³/a lantaa). Kokeissa havaittiin, että lietalannan energiantuottoa on helppo nostaa merkittävästi jo pienelläkin kasvibiomassan lisäyksellä. Kun 10 % syötön tuorepainosta oli nurmisäilörehua, metaanintuotto nousi ainakin 50 % verrattuna pelkkään lannan käsittelyyn. Myös muunlaiset kasvibiomassat voivat toimia lisämateriaalina lannalle. Sipulituotannon sivutuote ja tuoreena korjattu ruokohelpi lisäsivät metaanintuottoa myös merkittävästi. Myös perunantuotannon sivutuotteet soveltuvat biokaasutuotantoon.

Koeajojen aikana syöttömateriaalien orgaanista typpeä hajosi, jolloin käsittelyjäännöksessä oli pääasiassa 40–65 % enemmän liukoista ammoniumtyppeä kuin alkuperäisissä massoissa. Muiden ravinteiden pitoisuudet (fosfori, kalium) eivät merkittävästi prosessissa muutu. Kasvibiomassan lisääminen nostaa jäännöksen typpipitoisuutta ja jäännöksen fosfori:typpi-suhde on kasville käyttökelpoisempi kuin pelkän lannan käsittelyssä.

Biokaasulaitoksen energiataseeseen voi vaikuttaa monin tavoin. Tärkeää on kerätä reaktorin jälkeen käsittelyjäännöksestä muodostuva jälkikaasu talteen. Näissä kokeissa sen osuus koko laitoksen tuottamasta metaanista ja täten myös energiasta oli 13–20 %. Lisäksi laitoksen omaa sähkönkulutusta voi vähentää optimoimalla erityisesti sekoituksen alimmalle tarvittavalle tasolle. MTT Maaningan laitos kulutti koeajoissa tuottamansa kausun energiasisällöstä 11–14 % sähkönä ja 15–26 % lämpönä.

Avainsanat:

Biokaasu, jäte, kasvibiomassa, lanta, ravinnekierrot, sivutuote, uusiutuva energia, ympäristövaikutukset.

Biogas technology on farms I

Sari Luostarinen (ed.)

¹⁾MTT Agrifood Research Finland, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki, FINLAND

Abstract

Biogas technologies can be applied for several different purposes in agriculture. It is a means to utilise the energy content of manure and other organic materials, to recycle their nutrients into plant production, enhance utilisation of nitrogen and to mitigate emissions from agriculture. Of the two end-products, biogas can be utilised in the production of heat, electricity and/or vehicle fuel and digestate as fertiliser on fields.

Agricultural biogas plants digest mainly animal manure in Finland. Several co-substrates are also used, including different plant biomasses and suitable by-products from especially food production. The aim of using co-substrates is usually to increase the amount of energy produced but they also affect the nutrient content and ratios in the digestate.

Planning agricultural biogas plants starts from available feed materials, their amounts and characteristics. The biogas plant is designed for these materials and the technologies used are chosen to suit them. There are several options for plant design and how it can be attached into existing farm structures and it is wise to discuss these matters with an expert. In this way, correct farm-specific decisions can be made. When permitting the plant (permission for construction, environmental permit, safety issues, fertiliser legislation), it is important to make contact with the respective authority.

Profitability of the biogas plant should be considered carefully. Things to consider include e.g. available financial incentives, investment cost, energy production and utilisation (own use or sale), nutrient recycling and potential avoidance of mineral fertilisers, co-substrates with gate fee, improved hygiene and less odours.

Experiments at MTT Maaninka farm-scale biogas plant showed that dairy cow slurry produces 12–14 m³ of methane per ton of fresh weight. In this specific biogas plant this results potentially in methane production with an energy content of 400 MWh (3500 m³ of slurry per year). It was easy to improve methane production with a small addition of plant biomasses. When 10% of the feed fresh weight was grass silage, methane production increased by at least 50% as compared to digesting slurry alone. Also other plant biomasses are suitable. Onion by-product and freshly harvested reed canary grass increased methane production significantly and by-products from potato production were shown suitable.

Organic nitrogen was degraded during the digestion resulting mostly in 40–65% of more ammonium nitrogen in the digestate than in the original feed materials. The content of other nutrients (phosphorus, potassium) was not altered. Plant biomass as co-substrate increases the nitrogen content of the digestate and makes its P:N-ratio more suitable for plants as compared to slurry alone.

The energy balance of an agricultural biogas plant can be optimised in different ways. An important thing is to collect the post-biogas still emitted from the digestate after the actual digester. In the current experiments, the post-biogas comprised of 13–20% of all methane and thus also energy produced in the farm-scale plant. Also the electricity consumption of the biogas plant can be decreased by optimising especially the mixing. The MTT Maaninka farm-scale biogas plant consumed 11–14% of the energy it produced as electricity and 15–26% as heat.

Keywords:

Biogas, by-product, environmental effects, manure, nutrient recycling, plant biomass, renewable energy, waste.

Alkusanat

Tämä raportti kokoaa MTT Maaningan toimipisteen maatilakohtaisen biokaasulaitoksen hankintaan, käyttöön-ottoon ja operointiin liittyvät kokemukset sekä laitoksen kahden ensimmäisen operointivuoden aikana kerätyn tutkimustiedon. Raportti on ensimmäinen osa kaksiosaisesta raportista, joista toisessa keskitytään käsittelyjäännöksen hyödyntämiseen. Toivomme, että raporttipari toimii hyvänä lähtökohtana mautilojen biokaasulaitoksia suunnitteleville, operoiville ja valvoville tahoille varmistaa laitoksen tehokas toiminta ja kaikkien biokaasuprosessin etujen hyödyntäminen.

Raportoitu työ tehtiin Euroopan maaseuturahaston (Pohjois-Savon ELY-keskus), muutamien pohjoissavolaisten kuntien sekä MTT:n rahoittamana vuosina 2008–2012. Kiitämme kaikkia työhön osallistuneita kumppaneita, rahoittajia, hankkeen ohjausryhmää sekä lukuisia sidosryhmäläisiä viljelijöistä viranomaisiin hyvästä yhteistyöstä.

Syyskuussa 2013

Tekijät

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	8
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet.....	8
1.2 Käytännön koetoiminnan laitteistot	8
1.3 Maatilojen biokaasulaitosten kannattavuustarkastelu	9
1.4 BIOTILA-hankkeen perustiedot	9
2 Biokaasuteknologian perusteet.....	10
2.1 Biokaasuprosessin mikrobiologia	10
2.1.1 Biokaasutuottoa estävät ja häiritsevät tekijät	11
2.1.2 Muita biokaasuprosessiin vaikuttavia tekijöitä	12
2.2 Biokaasuprosessiin soveltuvat syöttömateriaalit.....	13
2.3 Biokaasuprosessien tekniset ratkaisut	15
2.4 Biokaasuprosessin lopputuotteet ja niiden hyödyntäminen	17
2.4.1 Biokaasun hyödyntäminen	17
2.4.2 Käsittelyjäännöksen hyödyntäminen.....	19
3 Maatilakohtaisen biokaasulaitoksen perustaminen.....	21
3.1 Biokaasulaitoksen esisuunnittelu	21
3.1.1 Syöttömateriaalien määrät ja ominaisuudet	21
3.1.2 Lopputuotteiden käyttö	22
3.1.3 Tilan olemassa olevien rakenteiden hyödyntäminen.....	23
3.1.4 Tarvittavat laitosrakenteet.....	23
3.1.5 Laitoksen kannattavuus	23
3.1.6 Tarvittavat luvat	24
3.2 Tarjouskilpailu ja laitostoimittajan valinta.....	27
3.3 Rakentaminen.....	28
3.4 Käyttöönotto ja kouluttautuminen.....	28
4 Biokaasukokeiden materiaalit ja menetelmät	29
4.1 MTT Maaningan maatilakohtainen biokaasulaitos	29
4.2 Syöttömateriaalit	30
4.3 Koeasetelmat	31
4.3.1 Lannan käsittely yksin.....	31
4.3.2 Lannan ja erilaisten kasvibiomassojen yhteiskäsittely	31
4.3.3 Lietelannan ja siitä mekaanisesti separoidun kuivajakeen yhteiskäsittely	31
4.4 Analytiikka ja laskut.....	32
4.4.1 Metaanintuottopotentiaali (BMP)	32
4.4.2 Maatilamittakaavan kaasuntuotto- ja pitoisuusmittaukset	32
4.4.3 Lietteiden ja kasvibiomassojen analyysit.....	33
4.4.4 Biokaasulaitoksen viipymä- ja kuormituslaskelmat.....	33
4.4.5 Lämpötilamittaukset ja biokaasulaitoksen energiataselaskelmat	34
4.4.6 Separoinnin massataseelaskut	37
5 Maatilamittakaavan biokaasukokeiden tulokset	38
5.1 Maatilamittakaavan syötteiden biometaanipotentiaalit (BMP)	38
5.2 Perunan ja perunankuoriveden metaanintuottopotentiaali (BMP)	39
5.3 Naudan lietalannan separointikokeet	39
5.3.1 Lietelannan separoinnin massa- ja kuiva-ainetaseet	39
5.3.2 Lietelannan ja separoitujen jakeiden metaanintuottopotentiaalit sekä niiden kuljetuksen kannattavuus.....	41
5.3.3 Lietelannan separoinnin ravinnetase sekä jakeiden lannoitekäyttö	42
5.3.4 Kuvitteellisen tilakeskittymän biokaasulaitoksen energiantuotto lietalannasta, kuivajakeesta ja säilörehusta.....	44

5.4 Metaanintuotot ja käsittelyjäännöksen laatu maatilamittakaavan kokeissa	46
5.4.1 Maatilamittakaavan laitoksen käyttöönotto: naudan lietalannan ja säilörehun yhteiskäsittely	46
5.4.2 Maatilamittakaavan koe: naudan lietalannan ja sipulimassan yhteiskäsittely.....	49
5.4.3 Maatilamittakaavan koe: naudan lietalannan ja ruokohelven yhteiskäsittely	53
5.4.4 Maatilamittakaavan koe: naudan lietalannan käsittely	56
5.5 Biokaasulaitoksen energiatase	62
5.5.1 Biokaasulaitoksen vuotuinen energiatase	62
5.5.2 Jälkikaasultaan metaanintuotto ja vuotuinen energiatase.....	65
5.5.3 Biokaasulaitoksen kuukausittainen energiatase	66
6 Tulosten tarkastelu	68
6.1 Metaanintuottopotentialit (BMP)	68
6.2 Lannan separointi ja jakeiden metaanintuottopotentialit.....	69
6.3 Metaanintuotto maatilamittakaavan kokeissa	70
6.3.1 Reaktorin sekoituksen vaikutus metaanintuottoon.....	70
6.3.2 Reaktorin metaanintuotto	70
6.3.3 Jälkikaasultaan metaanintuotto (reaktorin ja JKA:n yhteistuotto)	71
6.4 Biokaasulaitoksen energiatase	72
6.4.1 CHP-yksikön hyötysuhde ja kapasiteetti	72
6.4.2 Biokaasulaitoksen reaktorin lämpötilousmalli	73
6.4.3 Biokaasulaitoksen vuotuinen energiatase CHP-tuotannossa.....	74
6.4.4 Jälkikaasultaan metaanintuotto, vuotuinen energiatase ja vaikutus päästöihin.....	76
6.4.5 Kuukausittainen energiatase CHP-tuotannossa.....	76
6.5 Käsittelyjäännöksen ominaisuudet.....	79
7 Johtopäätökset maatilamittakaavan kokeista.....	81
8 Maatilojen biokaasulaitosten energiataseet ja kasvihuonekaasupäästöt.....	82
8.1 Johdanto	82
8.2 Skenaariot.....	82
8.3 Alueellinen biokaasuntuotantomalli ja lähtöaineistot	83
8.3.1 Nurmisäilörehun tuotanto	83
8.3.2 Kuljetukset.....	84
8.3.3 Biokaasusähkön- ja lämmön tuotanto	84
8.3.4 Biokaasulaitoksen energiatase	85
8.4 Tulokset.....	86
8.5 Johtopäätökset.....	88
9 Tärkeimmät tulokset ja suositukset	90
9.1 Maatilan biokaasulaitoksen hankinta	90
9.2 Maatilan biokaasulaitoksen tekninen ratkaisu.....	90
9.3 Lietelanta biokaasulaitoksen syöttömateriaalina.....	90
9.4 Kasvibiomassan merkitys lantapohjaisessa biokaasulaitoksessa	90
9.5 Separoinnin mahdollisuudet yhdistettynä biokaasuun	91
9.6 Käsittelyjäännöksen arvo	91
9.7 Maatilan biokaasulaitoksen energiatase	92
9.8 Maatilakohtainen vai tilojen yhteinen laitos ja laitosten talous	92
10 Kirjallisuus	93

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Maatilojen mahdollisuudet biokaasuteknologian käyttöönottoon Maitosuomessa -hankekokonaisuus ”BIOTILA” (ks. 1.4) rakennettiin alun perin vastaamaan kysymyksiin, millä edellytyksillä pohjoissavolaiset maatilat voisivat ottaa biokaasuteknologiaa käyttöönsä. Maakunnassa tuotetaan merkittävä osa Suomen maidosta, minkä vuoksi myös lantaa, biokaasutuotannon yhtä perusraaka-ainetta, on runsaasti. Tilallisilla onkin ollut aktiivista kiinnostusta biokaasuteknologiaan lannan tehokkaammaksi hyödyntämiseksi. Pullonkaulaksi oli kuitenkin havaittu sekä biokaasulaitosten kannattavuus että tiedonpuute teknologiaan liittyvissä käytännön kysymyksissä. Näitä kysymyksiä olivat mm. seuraavat:

- maatilojen biokaasulaitoksen perustamiseen liittyvät tekijät laitossuunnittelusta ja lupamenettelyistä laitoksen käyttöönottoon
- soveltuvat syöttömateriaalit ja niiden yhdistelmät
- saatavilla olevat energiantuotot
- kierrätettävien ravinteiden käyttökelpoisuus orgaanisina lannoitteina

Hankkeen laajempänä tavoitteena on ollut selvittää mahdollisimman käytännönläheisesti biokaasuteknologian käyttöönoton mahdollisuuksia maatalouden energia- ja materiaalikiertojen kehittämisessä sekä maatalouden ympäristövaikutuksien vähentämisessä. Pääosassa hankkeessa on maatalouden eloperäisten materiaalien, lannan ja erilaisten kasvibiomassojen, tehokas ja turvallinen hyödyntäminen uusiutuvana energiana ja ravinteina. Saavutetut tulokset ovatkin käyttökelpoisia maakunnasta riippumatta.

1.2 Käytännön koetoiminnan laitteistot

BIOTILA-hankkeen koetoiminnassa on hyödynnetty pääasiassa Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus MTT:n maatilakohtaista biokaasulaitosta, joka on sijoitettu MTT Maaningan toimipisteen lypsykarjanavetan yhteyteen. Laitos käsittelee lypsylehmiä lantaa sekä tilan kasvibiomassoja (Kuva 1.1). MTT:n biokaasulaitoksen hankintamenettely ja käyttöönotto tapahtuivat hankkeen aikana. Kokemukset ja opitut asiat on raportoitu tässä raportissa osiossa 3. Lisäksi hankkeessa käytettiin Savonia-ammattikorkeakoulun (Savonia-amk) pilotmittakaavaista koelaitteistoa (Kuva 1.1). Tässä raportissa kuitenkin keskitytään maatilamittakaavan koeajojen tuloksiin.



Kuva 1.1. MTT Maaningan maatilakohtainen biokaasulaitos (vasemmalla; Kuva: Sari Luostarinen, MTT) ja Savonia-amk:n siirrettävä koelaitteisto kontissaan (oikealla; Kuva: Auvo Sairanen, MTT).

1.3 Maatilojen biokaasulaitosten kannattavuustarkastelu

MTT Maaningan biokaasulaitoksen teknisiä ominaisuuksia ja tuottamaa tietoa käytettiin lähdetietoina myös BIOTILA-hankkeessa tehdyssä maatilojen biokaasulaitosten liiketaloudellisessa kannattavuustarkastelussa (Taavitsainen 2011). Kannattavuustarkastelu on julkaistu erillisenä raporttina ja se on sähköisesti saatavissa osoitteesta: <http://www.envitecpolis.fi/?Ajankohtaista>

Kannattavuustarkastelun tuloksena havaittiin haasteet tehdä maatilamittakaavan biokaasutuotannosta liiketaloudellisesti tuottavaa, mikäli vertailussa käytetään vain energianhintaa sekä investointi- ja operointikustannuksia vuoden 2010 tuilla (käytännössä pelkkä investointituki). Mikäli tuotetulla biokaasuenergialla korvattiin ostosähköä ja lämmitysöljyä, kannattavuus oli vuoden 2010 tiedoilla miltei mahdollinen. Jos sähkö myytiin tai lämmöllä korvattiin hakelämpöä, ei kannattavuutta saavutettu. Mikäli maatilalla on lannan lisäksi käytettävissä kasvibiomassaa, jota ei ole erityisesti tuotettu biokaasutuotantoa varten (esim. säilörehuylijäämä), sen hyödyntäminen nostaa energiantuottoa ja sikäli myös tuloja lisäämättä kuluja. Myös porttimaksulliset, soveltuvat biomassat tilan ulkopuolelta voivat lisätä laitoksen tuloja ja siten kannattavuutta. Kierrätettyjen ravinteiden hinnan vaikutus sekä ympäristöhyödyt havaittiin vaikeiksi laskea osaksi laitoksen liiketaloutta. Niiden vaikutukset voivat kuitenkin olla merkittävät ja tulevaisuudessa näille tulisi luoda jonkinlaisia taloudellisia arvoja, jotta hyöty kertautuisi myös laitosten liiketoimintaan.

1.4 BIOTILA-hankkeen perustiedot

BIOTILA-hanke toteutettiin aikavälillä 6.11.2008–30.6.2012. Sitä rahoitti pääasiassa Pohjois-Savon ELY-keskus Euroopan maatalousrahaston kautta (Hanke: Biokaasuteknologian käyttöönoton edistäminen Pohjois-Savossa). Rahoitukseen osallistuivat Pohjois-Savon kunnista kaikki Ylä-Savon kunnat Ylä-Savon Kehitys Oy:n kautta, Nilsiä, Siilinjärvi, Maaninka, Rautavaara sekä Tuusniemi. Lisäksi MTT rahoitti biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen lannoitekäytön kokeet pelto-olosuhteissa vuosina 2009–2012. Tästä osasta koetoimintaa tuotetaan erillinen raportti MTT Raportti -sarjaan.

BIOTILA-hanketta veti MTT kumppaneinaan Savonia-amk ja Envitecpolis Oy. MTT vastasi hankkeen kokonaisuusien hallinnasta, taloushallinnosta, kaikesta koetoiminnasta MTT:n maatilakohtaisella biokaasulaitoksella, pääosasta käytännön koetoimintaa Savonia-amk:n koelaitteistolla, analytiikasta sekä lähtötiedoista kannattavuustarkasteluun ja hankkeen yhteydessä tehtyihin opinnäytetöihin. Savonia-amk luovutti koelaitteistonsa hankkeen käyttöön ja osallistui sillä tehtyjen kokeiden suunnitteluun yhdessä MTT:n kanssa sekä osin ko. kokeiden käytännön toteutukseen. Envitecpolis Oy:n vastuulla oli maatilojen biokaasulaitosten liiketaloudellisen kannattavuuden tarkastelut.

Yhteistyötä tehtiin myös Itä-Suomen yliopiston Ympäristötieteiden laitoksen kanssa maatilojen biokaasulaitosten energiatasotarkasteluissa (prof. Juhani Ruuskasen ryhmä) sekä hygieniaan liittyvissä asioissa (lehtori Helvi Heinonen-Tanskin ryhmä). Hanke teki yhteistyötä myös monien muiden Pohjois-Savossa toimineiden hankkeiden sekä pohjoissavolaisten maatilojen ja muiden toimijoiden kanssa.

Hankkeella oli ohjausryhmä, joka seurasi ja kommentoi hankkeen toimintaa aktiivisesti. Ohjausryhmään kuuluivat MTT:ltä erikoistutkija Sari Luostarinen (hankkeen vastuututkija), tutkija Ville Pyykkönen (vastuututkijan sijainen 2010), teknologiatutkimuksen johtaja Markku Järvenpää ja vanhempi tutkija Auvo Sairanen; Savonia-amk:sta projekti-insinööri Teija Rantala, tutkimuspäällikkö Eero Antikainen ja projektipäällikkö Mika Repo; Envitecpolis Oy:ltä projektipäällikkö Toni Taavitsainen ja toimitusjohtaja Mika Arffman; Itä-Suomen yliopistolta prof. Juhani Ruuskanen ja lehtori Helvi Heinonen-Tanski; tilallinen Asko Juntunen Vieremältä; Pohjois-Savon liitosta Juha Minkkinen; Pohjois-Savon ELY-keskuksesta Pekka Kärkkäinen; Ylä-Savon kehitys Oy:stä Jukka Jaakkola (ohjausryhmän pj). Aluekehityssäätiön / Maito-Savon edustaja vaihtui hankkeen aikana siten, että tehtävää hoiti ensin Mika Repo, sitten Laura Honkanen ja loppuajan Mika Arffman.

2 Biokaasuteknologian perusteet

Sari Luostarinen ja Ville Pyykkönen

Biokaasuteknologia on mikrobiologinen prosessi, jossa hapettomissa (anaerobisissa) olosuhteissa elävät mikrobiryhmät käyttävät eloperäistä ainesta omaan kasvuunsa ja pilkkovat sitä samalla lukuisissa toisiaan seuraavissa reaktioissa pienemmiksi osakkeiksi. Mikrobitoiminnan lopputuotteita on kaksi: kaasuseos, jota kutsutaan biokaasuksi, sekä jäljelle jäävä massa, jota tässä raportissa kutsutaan biokaasuprosessin käsittelyjäännökseksi tai pelkäksi jäännökseksi. Sitä voidaan muissa yhteyksissä kutsua myös mädätteeksi tai mädätysjäännökseksi, sillä biokaasuprosessi tunnetaan myös termillä mädätys.

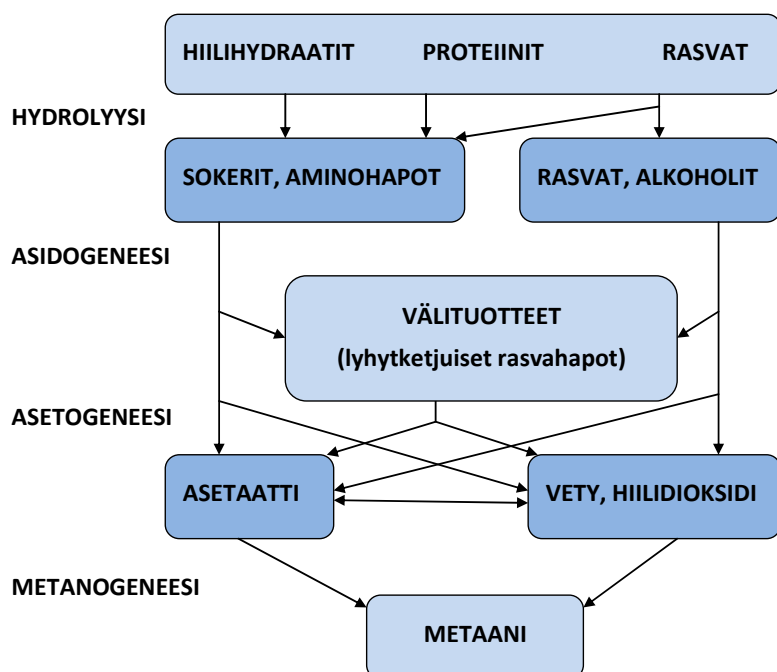
Tässä raportissa biokaasuteknologian perusteita ei tarkastella kovin syvällisesti, sillä aiheesta on julkaistu lukuisia raportteja jo aiemmin. Tällaisia raportteja ovat mm. seuraavat:

- MTT Raportti 27: Lannan ja muun eloperäisen materiaalin käsittelyteknologiat (Luostarinen ym. 2011a)
- Biokaasusta energiaa maatalouteen - raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet (Lehtomäki ym. 2007)
- Baltic MANURE report: Overview of biogas technologies (Luostarinen ym. 2011b)

2.1 Biokaasuprosessin mikrobiologia

Biokaasuprosessi perustuu anaerobisten, hapettomissa olosuhteissa elävien mikrobien toimintaan. Tässä esitetty kuvaus biokaasuprosessin mikrobiologiasta perustuu seuraaviin lähteisiin: Pavlostathis & Giraldo-Gomez (1991), Mata-Alvarez (2003) sekä Gerardi (2003).

Eri mikrobit toimivat hajoamisketjun eri vaiheissa (Kuva 2.1) ja sinänsä toisistaan välittämättä pyrkivät optimoimaan olosuhteet oman toimintansa kannalta parhaalla mahdollisella tavalla. Mikrobit ovat kuitenkin myös toisistaan riippuvaisia, sillä yhden mikrobiryhmän metabolian lopputuotteet ovat toisen mikrobiryhmän ravinnonlähde, substraatti.



Kuva 2.1. Eloperäisen materiaalin hajoaminen biokaasuprosessissa (yksinkertaistettu: Gujer & Zehnder 1983).

Eloperäisen materiaalin anaerobinen, mikrobiologinen hajoaminen etenee neljässä vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa, jota kutsutaan hydrolyysiksi, hapontuottajamikrobien ulkopuolelleen erittämät hydrolyytiset entsyymit pilkkovat eloperäisen materiaalin hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja pienemmiksi osasikseen. Hydrolyysi on usein biokaasuprosesseissa partikkelimaisten raaka-aineiden hajoamista rajoittava tekijä, jota pyritään edistämään erilaisin esikäsittelyin, kuten pilkkomalla tai jauhamalla syöttömateriaalit pienemmäksi ennen syöttämistä prosessiin. Tällöin maksimoidaan materiaalien pinta-ala hydrolyytisten entsyymien hajotukselle, ja näin olleen tehostetaan hydrolyysiä.

Hydrolyysin lopputuotteina ovat yksinkertaiset sokerit, aminohapot sekä glyseroli ja alkoholit. Nämä yhdisteet ovat niin pieniä, että haponmuodostajamikrobit pystyvät ottamaan ne sisälleen ja jatkamaan niiden pilkkomista oman kasvunsa ja metaboliansa ravinnonlähteenä. Tätä hajoamisvaihetta kutsutaan asidogeneesiksi, fermentaatioksi tai happokäymiseksi. Sen lopputuotteina muodostuu lyhytketjuisia, haihtuvia rasvahappoja (volatile fatty acids, VFA), kuten voi happoa, propionihappoa ja valeerihappoa.

Haihtuvat rasvahapot hajoavat edelleen asetogeneesivaiheen aikana asetaatiksi (etikkahappo) sekä vedyksi ja hiilidioksidiksi. Pääosa sitä seuraavan metanogeneesivaiheen biokaasun metaanista muodostuu asetaatista (70 %) ja loput vedystä ja hiilidioksidista (30 %).

2.1.1 Biokaasutuottoa estävät ja häiritsevät tekijät

Biokaasuprosessin mikrobiologiaa voivat inhiboida, eli häiritä tai estää täysin, monet erilaiset tekijät prosessin ulkopuolelta tai itse hajoamisketjussa. Koska mikrobisto on pääasiassa anaerobista eli hapettomissa olosuhteissa elävää, happi on niille toksista. Prosessiin voi myös päätyä syöttömateriaalien mukana mikrobitoimintaa häiritseviä kemikaaleja, kuten merkittäviä määriä antibiootteja tai desinfiointiaineita. Esimerkiksi antibioottimaitoa ei kannata ohjata biokaasuprosessiin suurina määrinä. Pienehköt määrät voivat soveltua, mutta niidenkin käytössä on syytä noudattaa varovaisuutta ja tehdä syöttökokeilut pieninä määrinä pitemmällä aikavälillä. Joskus myös laajemmat antibioottikuurit eläinsuojassa voivat nostaa lannan antibioottipitoisuuden niin korkeaksi, että se häiritsee biokaasuprosessia. Häiriö näkyy yleensä biokaasuntuoton ja biokaasun metaanipitoisuuden laskuna.

Myös biokaasuprosessin normaalin mikrobiologisen hajoamisketjun välituotteet voivat inhiboida koko prosessia, jos syntyy tilanne, jossa yhdellä mikrobiryhmistä on ikään kuin liian hyvät olosuhteet, ne pääsevät tuottamaan omaa lopputuotettaan niin paljon, että tämä lopputuote alkaa häiritä muita hajoamisketjun mikrobeja. Biokaasuprosessin mikrobiologiaa onkin hyvä hieman ymmärtää, jotta osaa tulkita laitoksen toimintaa oikein ja sitä kautta operoida laitosta menestyksekkäästi sen sietokyvyn rajoissa.

Korkean typpipitoisuuden syöttömateriaalit voivat aiheuttaa ongelmia biokaasuprosessille. Eloperäisten typpiyhdisteiden, proteiinien hajotessa muodostuu ammoniumtyyppiä (ammonifikaatio). Pääasiassa tämä on prosessin kannalta hyvä asia, sillä sen lisäksi että ammoniumtyppi puskuroi pH:n alenemista vastaan, se lisää käsittelyjäännöksen arvoa kasvinravinteena (enemmän liukoista, kasveille suoraan käyttökelpoista tyyppiä kuin syöttömateriaaleissa). Korkeina pitoisuuksina ammoniumtyppi voi kuitenkin häiritä mikrobitoimintaa ja täten inhiboida biokaasuprosessia. Ammoniumtyypin aiheuttama inhibitio on riippuvainen pH:sta ja lämpötilasta siten, että mitä korkeampia ne molemmat ovat, sitä suurempi osuus ammoniumtyypestä (NH_4^+) on ammoniakkimuodossaan (NH_3). Sähkövaraukseton ammoniakki pääsee mikrobien solukalvon läpi solun sisälle häiritsemään niiden normaalia toimintaa. Erityisen herkkiä tälle inhibitiolle ovat metaania tuottavat mikrobit, joten typpi-inhibitio näkyy biokaasuprosessissa alentuneena biokaasun ja metaanin tuottona. Mikrobeja voidaan siedättää kestävämpää aiempaa korkeampia typpipitoisuuksia nostamalla syöttömateriaalien typpipitoisuutta hiljalleen. Nostamista ei kuitenkaan voida tehdä loputtomiin, vaan eri laitosten mikrobipopulaatioilla on omat rajansa (Angelidaki & Ahring 1993, Hansen ym. 1998, Mata-Alvarez 2003).

Liian korkea orgaaninen kuormitus (organic loading rate, OLR) voi myös aiheuttaa välituoteinhibitiota. Mikäli kuormitus on korkea ja ensimmäiset hajoamisen vaiheet etenevät nopeasti tuottaen pitkäketjuisia rasvahappoja (long-chain fatty acids, LCFA), haihtuvia rasvahappoja (VFA) ja/tai asetaattia, metaania tuottavat mikrobit eivät välttämättä prosessin herkimpinä ja hitaimmin kasvavina mikrobeina pysty hyödyntämään tätä niille muodostuvaa ravintoa yhtä nopeasti. Tällöin rasvahappoja alkaa kertyä prosessiin ja alentavat prosessin pH:ta, jolloin erityisesti metaania tuottavien mikrobien toiminta häiriintyy ja biokaasun tuotto laskee. Mikäli ylikuormitus jatkuu, myös hajoamisketjun aiemmat vaiheet häiriintyvät ja pahimmassa tapauksessa prosessi ajautuu niin pahasti ”hapoille”, että se on käytännössä tyhjennettävä ja käynnistettävä uudelleen. Sopiva orgaaninen kuormitus onkin erittäin olennainen tekijä biokaasuprosessille ja se on tiukasti kytköksissä prosessin viipymäaikaan (hydraulic retention time, HRT), eli aikaan,

jonka syöttömateriaali keskimäärin prosessissa viipyy. Kun viipymää pidennetään, kuormitus laskee, ja toisinpäin. Myös orgaanista kuormitusta voidaan nostaa prosessin mitoituksen ja siinä toimivan mikrobiston sallimissa rajoissa, mutta se on syytä tehdä varovaisesti kuormitusta tai sen laatua, ts. syöttömateriaalia tai niiden seosta, hiljalleen ja pienissä erissä muuttamalla (Pavlostathis & Giraldo-Gomez 1991, Mata-Alvarez 2003).

Myös vedyn kertyminen biokaasuprosessiin voi aiheuttaa prosessin häiriön tai kaatumisen. Vedyn osapaineen tulisi pysyä mahdollisimman alhaisena, jotta mikrobitoiminnan reaktiot etenevät termodynamiikan lakien mukaan haluttuun suuntaan, ovat ylipäättään mahdollisia. Eloperäisen materiaalin hajotessa muodostuva vety täytyy siis kulua välittömästi sen muodostuttua. Tämän vuoksi on erittäin tärkeää, että vedystä ja hiilidioksidista metaania tuottavat mikrobit ovat toimintakykyisiä (Pavlostathis & Giraldo-Gomez 1991, Mata-Alvarez 2003).

2.1.2 Muita biokaasuprosessiin vaikuttavia tekijöitä

Biokaasuprosessia operoidaan yleensä jossakin kolmesta mikrobitoiminnalle tyypillisestä lämpötila-alueesta. Kussakin lämpötilassa prosessissa kasvaa ne mikrobit, joille tämä lämpötila on optimaalinen. Lämpötila-alueet ovat psykoofiilinen (<20 °C), mesofiilinen (35–37 °C) ja termofiilinen (50–55 °C). Psykoofiilisiä biokaasuprosesseja käytetään pääasiassa joidenkin liukoista orgaanista ainetta sisältävien jätevesien käsittelyssä. Meso- ja termofiiliset prosessit ovat selvästi yleisempiä.

Koska anaerobisen hajoamisen reaktiot eivät juuri tuota lämpöenergiaa, biokaasuprosesseja on lämmitettävä, jotta ne pysyvät halutussa lämpötilassa. Ne siis kuluttavat osan tuottamastaan lämpöenergiasta itse.

Yleisesti ottaen mitä korkeampi lämpötila, sitä korkeampi on mikrobiaktiivisuus. Täten myös mikrobitoiminnan hajotustoiminta on nopeampaa. Periaatteessa termofiilinen biokaasuprosessi hajottaa käsiteltävän syöttömateriaalin nopeammin kuin mesofiilinen prosessi, jolloin myös vaadittu viipymä prosessissa olisi lyhyempi ja täten myös vaadittu reaktori pienempi. Käytännössä tällaista etua harvoin kuitenkaan havaitaan. Lisäksi korkeammassa lämpötilassa suurempi osuus esimerkiksi ammoniumtypeistä on inhiboivassa ammoniakkimuodossa, mikä voi tehdä termofiiliprosessista mesofiilistä epävakaamman. Mesofiiliprosessia taas on yleisesti pidetty varsin vakaana ja se sietää paremmin häiriöitä esimerkiksi prosessiteknikan häiriöiden takia.

Biokaasuprosessin pH tulisi olla välillä 6–8, sillä tämä on pH-alue, jolla metaania tuottavat mikrobit pysyvät toimimaan. Hajoamisen kahden ensimmäisen vaiheen, hydrolyysin ja asidogeneesin, pH-optimi olisi tätä hieman alhaisempi, mutta hajoaminen etenee myös metanogeenien optimaalisella pH-alueella.

Biokaasuprosessin operoinnissa tärkeitä parametreja ovat viipymä (HRT) ja orgaaninen kuormitus (OLR). Viipymä kuvaa syöttömateriaalin keskimääräistä viipymää biokaasureaktorissa (ja myös jälkikaasualtaassa). Se lasketaan jakamalla reaktorin nestetilavuus päivittäisen syötön määrällä. Viipymä on sidoksissa kuormitukseen, joka puolestaan kuvaa keskimääräistä orgaanisen aineen määrää, joka prosessiin päivittäin syötetään. Viipymä tulee valita siten, että se on riittävän pitkä varmistamaan syöttömateriaalin tehokkaan hajoamisen, muttei kuitenkaan liian pitkä, jolloin biokaasulaitos on ikään kuin vajaakäytöllä. Tavallinen viipymä esimerkiksi lantaa käsittelevillä biokaasulaitoksilla on 20–30 vuorokautta. Jokaisella biokaasulaitoksella on myös maksimikuormituksensa riippuen syöttömateriaaleista. Rajat tulevat vastaan sekä mikrobiologisesti (ks. 2.1.1) että teknisesti esimerkiksi siksi, etteivät syöttölaitteet pysty siirtämään kuivempia syöttömateriaaleja tai etteivät sekoittimet pysty sekoittamaan reaktorin massaa liian korkean kuiva-ainepitoisuuden vuoksi.

Sekoitus on hyvin tärkeä osa biokaasuprosessia. Sen tavoite on varmistaa hyvä kontakti syöttömateriaalin ja mikrobien välillä (hajoamisen perusedellytys), pitää reaktorin massa tasalaatuisena ja halutussa lämpötilassa kauttaaltaan sekä vapauttaa muodostuva biokaasu massan sisältä kaasutilaan ja edelleen kaasunke-räykseen. Mikäli sekoitus ei toimi riittävän hyvin, lopputuloksena voivat olla alentunut biokaasutuotto ja heikkolaatuinen käsittelyjäännös, jota on välttämätöntä stabiloida jollain jatkokäsittelyllä. Heikko sekoitus voi myös johtaa kaasutaskujen muodostumiseen reaktorin massan sisälle. Niiden lopulta vapautuessa hallitsemattomasti massaa voi päätyä ei-toivottuihin paikkoihin, kuten kaasulinjoihin. Heikon sekoituksen vuoksi voi myös muodostua tukoksia putkistoihin. Lisäksi vääränlainen sekoitus voi johtaa vaahtoamiseen, jolloin reaktorin pintaan muodostuva paksu vaahto tunkee kaikista mahdollisista ulospääsyreiteistä ulos. Vaahtoamiseen vaikuttavat toki myös muut tekijät, kuten syöttömateriaalien ominaisuudet.

2.2 Biokaasuprosessiin soveltuvat syöttömateriaalit

Biokaasuprosessin syöttömateriaaliksi soveltuvat periaatteessa kaikki eloperäiset materiaalit, jotka eivät sisällä suuria määriä ligniiniin suojaamia rakenteita. Karkeasti voidaan arvioida, että soveltuvia materiaaleja ovat kaikki muut eloperäiset materiaalit paitsi puu. Todellisuudessa syöttömateriaaleissa on eroja ja jotkin materiaalit eivät sellaisenaan tai yksinään sovellu biokaasuprosessiin, mutta jotenkin esikäsiteltynä tai yhdessä yhden tai useamman muun materiaalin kanssa kyllä.

Perinteisesti biokaasuteknologiaa on hyödynnetty jätevedenpuhdistamoilla muodostuvan lietteen käsitelyssä. Puhdistamoliete on hyvä perusmateriaali biokaasuprosessiin: sitä muodostuu tasaisia määriä jatkuvasti ja melko tasalaatuisena. Se on kuitenkin yleensä varsin laimeaa, ts. sen kuiva-ainepitoisuus (total solids, TS) on alhainen. Mitä matalampi se on, sitä enemmän materiaalissa on vettä, joka ei luonnollisesti prosessissa hajoa ja tuota biokaasua. Myös orgaanisen aineen (volatile solids, VS) osuus kuiva-aineesta voi olla alhainen riippuen puhdistamolla käsiteltävien jätevesien alkuperästä. Orgaaninen aine kuvaa syöttömateriaalin potentiaalisesti biologisesti hajoavaa osuutta: mitä matalampi se on, sitä vähemmän materiaalissa on biokaasuprosessissa hajoavaa ainesta. Kaikki orgaaninen aine ei kuitenkaan ole anaerobisesti hajoavaa.

Toinen perusmateriaali biokaasuprosesseille on kotieläintuotannon lanta. Myös lantaa muodostuu yleensä jatkuvasti ja melko tasaisesti ympäri vuoden. Se on lisäksi ravinteikasta ja sen puskurointikyky on korkea, mikä ylläpitää haluttuja olosuhteita biokaasuprosessin mikrobitoiminnalle. Lietelannan kuiva-ainepitoisuus on alhainen, joten myös sen metaanintuotto per prosessiin syötetty tuoretonni on melko alhainen (Taulukko 2.1). Kuivalannassa on vähemmän vettä, joten sen metaanintuotto on korkeampi tuorepainoa kohti. Lisättyä orgaanista ainetta kohti metaanintuotto on kuiva- ja lietalannoilla jotakuinkin samaa tasoa. Liete- ja kuivalantaa käsittelevien prosessien tekniset ratkaisut eroavat toisistaan lannan erilaisten ominaisuuksien vuoksi (ks. kappale 2.3). Lisäksi esimerkiksi kananlannan korkea typpipitoisuus voi inhiboida biokaasuprosessia erityisesti, jos kananlantaa käsitellään yksin. Inhibiota voidaan kuitenkin laimentaa yhteiskäsittelemällä kananlantaa jonkin toisen, vähemmän tyyppiä sisältävän materiaalin kanssa tai laimentamalla lantaa jollakin soveltuvalla nesteellä.

Taulukko 2.1. Eri lantatyypin keskimääräiset ominaisuudet ja metaanintuottopotentialit (BMP).

Lantatyypin	TS (%)	VS (% TS:sta)	Ntot (% TS:sta)	BMP (m ³ /tVS lisätty)	BMP (m ³ /tTP lisätty)	Lähde
Naudan lietalanta	5–14	75–85	3–6	120–300	10–20	1–5
Naudan kuivalanta	17–25	68–85	1.1–3.4	126–250	24–55	1–5
Sian lietalanta	4–10	75–86	6–18	180–490	12–24	1–5
Sian kuivalanta	20–34	75–81	2.4–5.2	162–270	33–39	1–5
Kanan kuivalanta	32–65	63–80	3.1–5.4	150–300	42–156	1, 3–6

TS = kuiva-aine, VS = orgaaninen aine, Ntot = kokonaistyyppi, TP = tuorepaino.

Lähteet: 1) Viljavuuspalvelu 2004; 2) Steineck ym. 1999; 3) KTBL 2010; 4) Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004; 5) Institut für Energetik und Umwelt ym. 2006; 6) Edström 2011.

Yhdyskunnissa muodostuu puhdistamo- ja saostuskaivolietteiden lisäksi biojätettä erilliskeräysten yhteydessä. Biojäte sisältää yleensä paljon energiaa ja sen metaanintuottopotentiali on korkea (Taulukko 2.2). Toisaalta sitä on yleensä vaikeaa kerätä riittävän puhtaana, minkä vuoksi sitä on esikäsiteltävä ennen biokaasuprosessia epäpuhtauksien, kuten muovin, lasin ja metallin poistamiseksi. Biojäte ei välttämättä sovellukaan pienemmille laitoksille esikäsitellyn työläyden ja lisäinvestointitarpeiden vuoksi.

Teollisuudessa muodostuu lukuisia erilaisia eloperäisiä jätteitä ja sivutuotteita, joiden soveltuvuus biokaasuprosessiin voi vaihdella merkittävästi. Yleisesti ottaen elintarviketeollisuuden sivutuotteet ovat erityisen soveltuvia, sillä ne ovat usein melko helposti hajoavia ja sisältävät merkittävästi energiaa (korkea metaanintuottopotentiali esimerkiksi lihanjalostuksen jätteillä ja sivutuotteilla; Taulukko 2.2). Toisaalta korkean energiapotentialin materiaalien kanssa on syytä olla varovainen, jottei biokaasuprosessin kuormitus nouse mikrobitoiminnalle liian korkeaksi (ks. kappale 2.1). Teollisuuden sivutuotteiden ominaisuudet on hyvä tuntea myös siksi, että tuotantoprosessissa voidaan käyttää jotain biokaasuprosessille haitallisia kemikaaleja, jotka päätyvät sivutuotteeseen. Uusista materiaaleista voi myös teetää metaanintuottopotentialin määrittämiä niitä tarjoavissa laboratorioissa tai tutkimuslaitoksissa.

Taulukko 2.2. Erilaisten yhdyskuntien ja teollisuuden jätteiden ja sivutuotteiden metaanintuottopotentiaaleja (BMP).

Raaka-aine	BMP (m ³ /tVS lisättyä)	BMP (m ³ /tTP lisättyä)	Lähde
Ruokajäte	300–500	130	1–2
Puhdistamoliete	220–430	10–32	1–4
Lihanjalostuksen sivutuotteet	500–900	100–300	5
Rasvanerotuskaivon liete	920	250	1
Perunantuotannon sivutuotteet	323–373	–	6

- = ei raportoitu

Lähteet: 1) Luostarinen ym. 2008; 2) Davidsson ym. 2007; 3) Einola ym. 2001; 4) Järvinen & Rintala 1996; 5) Salminen & Rintala 2002; 6) Kryvoruchko ym. 2009.

Suomessa toistaiseksi vähän käytetty mahdollisuus biokaasuprosessin syöttömateriaaliksi ovat erilaiset kasvibiomassat. Ne voivat olla varta vasten biokaasutuotantoon tuotettuja kasvibiomassoja, ns. energia-kasveja, kasvintuotannon sivutuotteita, kuten tuotannon ylijäämiä tai rehu- tai elintarvikekäyttöön soveltumattomia kasvinosia, tai esimerkiksi vesistöjen kunnostuksen tai suojaväyhykkeiden kasvibiomassoja. Biokaasutuotantoon tarkoitettuna kasvibiomassan tulee olla suhteellisen helposti hajoavaa, ts. samaan tapaan sulavaa kuin lehmienkin rehun. Mitä korsiintuneempaa kasvibiomassa on, sitä heikommin se biokaasuprosessissa hajoaa ja täten sitä alhaisempi on myös biokaasuntuotto (Lehtomäki 2006, Amon ym. 2007, Seppälä ym. 2009). Kasvibiomassa tulisi myös voida säilöä, jotta se voidaan hyödyntää tasaisemmin ja/tai haluttuna ajankohtana, kun energiantuotto halutaan maksimoida. Nurmen tuotannosta tuttua säilöntää siiloissa tai paaleissa säilöntäaineiden kanssa tai ilman on yleisesti pidetty soveltuvimpana kasvibiomassan säilöntämenetelmänä biokaasutuotantotarkoituksissa.

Taulukko 2.3. Kasvibiomassojen metaanintuottopotentiaaleja (BMP).

Raaka-aine	BMP (m ³ /tVS lisätty)	BMP (m ³ /tTP lisätty)	Lähde
Maissi	312–410	–	1,2
Nurmi	410	–	1
Nurmi (timotei–apila)	370–380	72–85	3
Säilörehu	306–372	72–104	3
Ruokohelpi	253–351	47–116	4
Apila	350	–	1
Puna–apila	280–300	41–68	3

- = ei raportoitu

Lähde: 1) Weiland 2003; 2) Amon ym. 2007; 3) Lehtomäki 2006; 4) Seppälä ym. 2009

Biokaasuprosesseihin syötetään varsin harvoin vain yhtä syöttömateriaalia. Yleensä syöttö on sekoitus kahdesta tai useammasta materiaalista, jotka voivat myös vaihdella eri aikoina materiaalien saatavuuden mukaan. Kahden tai useamman syöttömateriaalin seosta käytettäessä puhutaan yhteiskäsittelystä (co-digestion). Yhteiskäsittelyn tavoitteita voivat olla: 1) biokaasutuotannon lisääminen, 2) inhiboivan yhdisteen laimentaminen, 3) laitoksen kannattavuuden lisääminen (käsittely- eli porttimaksut) tai 4) syöttömateriaalien hajoavuuden lisääminen yhteiskäsittelyn luomien synergioiden avulla (Mata-Alvarez ym. 2000).

Erilaisten syöttömateriaalien vastaanottamisessa biokaasulaitokseen on huomioitava lukuisia asioita aina laitoksen teknisistä ratkaisuista lainsäädännön vaatimuksiin. Materiaalien on sovellettava laitoksen tekniikkaan siten, ettei tekniseen toimivuuteen (esim. sekoitus, syöttölaitteet) muodostu ongelmia. Tietyt materiaalit voi myös aiheuttaa lainsäädännöllisiä prosessivaatimuksia, kuten hygienisointivaateen (1 h, 70 °C, partikkelikoko <12 mm). Maatiloilla lisämateriaalit tilan ulkopuolelta tuovat myös lisäravinteita tilan ravinnetaseeseen, mikä on huomioitava tarvittavissa levityspinta–alassa käsittelyjäännöksen peltokäytössä.

2.3 Biokaasuprosessien tekniset ratkaisut

Biokaasulaitokset eroavat toisistaan tapauskohtaisesti eikä yhtä laitostyypillisiä yleensä voi täysin monistaa kuin kenties samanlaisia syöttömateriaaleja samassa suhteessa ja samoilla tavoitteilla käsitteleviin laitoksiin. Biokaasuprosessien teknisiä ratkaisuja on monenlaisia erilaisiin tarkoituksiin ja erilaisille syöttömateriaaleille. Kyse on kuitenkin aina ketjusta erilaisia laitoksen osia. Ketjun pituus ja monimutkaisuus riippuu myös mittakaavasta. Mitä pienempi laitos, sitä yksinkertaisempaa tekniikkaa yleensä käytetään.

Kaikissa biokaasulaitoksissa on yleensä ainakin seuraavat osat:

- syöttömateriaali(e)n vastaanotto / esisäiliö
- biokaasureaktori
- jälkikaasuallas ja/tai käsittelyjäännöksen varasto
- biokaasun hyödyntämislaitteisto

Biokaasulaitoksessa lietemäiset syöttömateriaalit ohjataan yleensä jonkinlaiseen esisäiliöön, jossa niitä sekoitetaan syötön tasalaatuisuuden varmistamiseksi ja josta materiaali pumpataan halutusti biokaasureaktoriin. Kuivat syöttömateriaalit on varastoitava esimerkiksi silloihin ja syötettävä niille soveltuvilla laitteilla, kuten ruuveilla tai hihnakuljettimilla. Syöttömateriaaleja saatetaan myös esikäsitellä erilaisin keinoin. Melko yleistä on pienentää partikkelikokoa jauhamalla tai silppuamalla. Tavoite voi tällöin olla paitsi tehostaa materiaalien hajoamista, myös vastata lainsäädännön vaatimuksiin. Esimerkiksi eläinsivutuoteasetuksessa biokaasulaitoksiin soveltuvilla materiaaleilla on partikkelikokovaatimukset (luokan 2 steriloitavat materiaalit: <50 mm, luokan 3 hygienisoitavat materiaalit: <12 mm). Hygienisointi ja sterilointi ovat myös lämpökäsittelyjä, jotka ennen biokaasuprosessia voivat edesauttaa syöttömateriaalien hajoamista ja täten toimia biokaasutuottoa nostavina esikäsitelyinä. Lämpökäsittelyyn voidaan lisätä myös paineistus, jolloin syöttömateriaalin odotetaan hajoavan entistäkin tehokkaammin. Muita esikäsitteilyjä ovat mm. erilaiset entsyymilisäykset, happokäsittelyt ja ultraääni. Niiden tehosta hajoamisen edistämässä on ristiriitaisia tuloksia.

Biokaasureaktoreita on monenlaisia riippuen syöttömateriaalin / syöttöseoksen ominaisuuksista. Mikäli syötön kuiva-ainepitoisuus on alle 15 %, puhutaan yleensä jatkuvasekoitteisesta märkäprosessista. Reaktori on tällöin joko sylinterimäinen pystyreaktori maan päällä tai laakeampi sylinteri pääosin maanpinnan alla (Kuva 2.2). Reaktorin sisältöä sekoitetaan esimerkiksi lapasekoittimilla. Syöttö tapahtuu kerran tai useita kertoja päivässä ja samalla reaktorista myös poistuu painovoimaisesti tai poistetaan saman verran jo käsiteltyä materiaalia. Koska reaktorisisältö on täyssekoitteinen, jonkin verran vasta syötettyä materiaalia voi poistua reaktorista jäännöksen mukana. Puhutaankin oikovirtauksesta, jota voidaan myös minimoida erilaisin teknisin ja operoinnin ratkaisuin.



Kuva 2.2. Jatkuvasekoitteinen pystyreaktori (Kalmarin tilan vanha reaktori, Laukaa, vasemmalla) sekä maan alle sijoitettu reaktori (Bioson Oy, Juva, oikealla). Kuvat: Sari Luostarinen, MTT.

Jos syötön kuiva-ainepitoisuus on niin korkea, ettei pumppaaminen onnistu, puhutaan yleensä kuivaprozessista. Tavanomaisimmat ratkaisut ovat tällöin joko panostoiminen ”autotalliprosessi” tai tulppavirtaukseen perustuva sylinterimäinen reaktori. ”Autotalliprosessissa” (Kuva 2.3) syöttömateriaali sekoitetaan

osaan edellisen panoserän käsittelyjäännöstä, jotta prosessiin varmistetaan oikeat mikrobit (mikrobiympäys). Tämä seos lastataan esimerkiksi etukuormaajalla autotallia muistuttavaan reaktoriin, joka suljetaan. Hapettomien olosuhteiden muodostuttua syöttömateriaali hajoaa ja tuottaa biokaasua. Kontaktia syöttömateriaalin ja mikrobin välillä voidaan tehostaa kierrättämällä prosessissa erottuvaa nestettä käsiteltävän massan läpi. Kun helposti hajoava materiaali on hajonnut ja biokaasutuotto hiipuu, reaktori avataan ja tyhjenetään. Sykli alkaa uudelleen alusta. Jotta tällainen laitos tuottaisi biokaasua jotakuinkin tasaisesti, reaktoreita on syytä olla ainakin kolme. Tällöin yksi reaktoreista on täytössä, toinen kiivaimman biokaasutuotannon vaiheessa ja kolmas tyhjennyksessä.

Tulppavirtaukseen perustuva kuivaprosessi on yleensä vaakatasossa oleva sylinterireaktori, joka syötetään uuden syöttömateriaalin ja käsittelyjäännöksen seoksella (mikrobiympäys) sylinterin toisesta päästä (Kuva 2.3). Massa liikkuu sylinterissä kohti sen toista päätä hiljalleen uuden syötön ja mahdollisesti myös erillisen sekoittimen ja/tai siirtimen avulla, kunnes se sylinterin toisen pään saavutettuaan poistetaan. Tulppavirtausprosesseissa on usein ollut ongelmia nimenomaan sekoitukseen liittyen. Tehoton sekoitus estää syöttömateriaalin ja mikrobin tehokkaan kosketuksen, jolloin hajoaminen ei etene halutusti ja käsittelyjäännöksen laatu ei ole tavoitellun korkea. Lisäksi heikko sekoitus voi vaikeuttaa muodostuvan biokaasun vapautumista.



Kuva 2.3. Autotallimallinen biokaasulaitos (vas.), Münchenin eläintarha, Saksa (Kuva: Sari Luostarinen, MTT) sekä tulppavirtaukseen perustuva biokaasulaitos (oik.), Thöni, Saksa (Kuva: Teija Paavola, MTT).

Verrattaessa märkä- ja kuivaprosesseja saavutettavat biokaasu- ja metaanituotot ovat syötettyä tuorepainoa kohti kuivaprosesseissa korkeammat. Prosessiin lisättyä orgaanista ainetta (VS) kohti vastaavaa eroa ei välttämättä saavuteta. Kuivaprosessien mitoituksessa reaktorikoko voi olla hieman pienempi, mutta koska kuivaprosessissa jopa puolet uudesta syötöstä on todellisuudessa käsittelyjäännöstä mikrobiympäysi, reaktorikoon ero märkäprosessiin verrattuna jää vaatimattomaksi tai sitä ei ole. Siinä missä märkäprosessin sekoittaminen on teknisestä yksinkertaista, kuivaprosessissa se on haasteellista ja usein syöttömateriaalin hajoaminen jääkin heikommaksi yksinkertaisesti siksi, etteivät mikrobit pääse kunnolla kontaktiin syöttömateriaalin kanssa. Monissa tulppavirtaukseen perustuvissa laitoksissa käsittelyjäännös jälkikompostoidaan lopputuotteen laadun parantamiseksi. Tällöin tuote ei enää ole sellainen kuin biokaasuprosessin käsittelyjäännöksen odotetaan olevan, sillä kompostoinnissa mm. hukataan tyypeä.

Märkäprosessissa on huomioitava, että jo oikovirtauksen vuoksi prosessiin on syytä kuulua jälkikaasuallas, ts. toinen suljettu säiliö, jossa muodostuva biokaasu kerätään myös talteen ja hyödynnetään yhdessä reaktorissa muodostuneen biokaasun kanssa. Prosessista, syöttömateriaalista ja mittakaavasta riippuen jälkikaasun osuus koko laitoksen biokaasutuotosta voi olla jopa luokkaa 20–30 %. Jälkikaasun keräys on siis perusteltua sekä laitoksen energiatalouden että haitallisten päästöjen (metaani voimakas kasvihuonekaasu) minimoinnin kannalta. Kuivaprosesseissa jälkikaasua ei yleensä kerätä.

Olenainen osa biokaasulaitosta on myös biokaasun keruulaitteet, biokaasuvarasto sekä biokaasun hyödyntämislaitteet. Biokaasu vapautuu käsiteltävästä massasta yleensä sekoituksen avustamana reaktorin (ja jälkikaasualtaan) yläosan kaasutilaan, josta se johdetaan kaasuväylään tai suoraan biokaasun hyödyntämislaitteille. Kaasuvarasto voi olla esimerkiksi erillinen kaasukello tai reaktorin katteena oleva kaasuhuppu (Kuva 2.4). Sen tilavuus vastaa yleensä korkeintaan muutaman päivän biokaasutuottoa laitoksella, sillä

tarkoitus ei ole niinkään varastoida kaasua (vaatii suuret tilavuudet), vaan tasata hyödyntämislaitteille menevän biokaasun virtausta sekä puskuroida tarvittaessa esim. hyödyntämislaitteiden huoltotaukoja. Biokaasun hyödyntämisestä energiana kerrotaan enemmän seuraavassa osiossa.



Kuva 2.4. Biokaasuvarasto voi olla kaasukello (vasemmalla Biovakka Suomi Oy:n Turun laitos) tai kaasuhippu reaktorin / jälkikaasualtaan päällä (oikealla MTT Maaningan biokaasulaitoksen reaktori). Kuvat: Sari Luostarinen, MTT.

2.4 Biokaasuprosessin lopputuotteet ja niiden hyödyntäminen

Biokaasuprosessissa muodostuu aina kahta lopputuotetta: biokaasua ja käsittelyjäännöstä. Biokaasu on suurelta osin energiarikasta metaania, joten se voidaan hyödyntää uusiutuvana energiana. Käsittelyjäännös taas mahdollistaa jäljelle jääneen orgaanisen aineen ja ravinteiden kierrättämisen, kun se hyödynnetään sellaisenaan tai jatkojalostettuna esimerkiksi orgaanisina lannoitevalmisteina.

2.4.1 Biokaasun hyödyntäminen

Biokaasu voidaan hyödyntää eri tavoin. Yksinkertaisin menetelmä on polttaa se lämmöksi kaasukattilassa (Kuva 2.5). Tähän löytyy myös suomalaisia laitteistoja, sillä itse kattila on täysin tavanomainen. Vain polttimen täytyy olla biokaasulle soveltuva. Lämpökattilaa varten biokaasusta ei yleensä tarvitse poistaa kuin kosteus esimerkiksi yksinkertaisen kondenssikaivon avulla.



Kuva 2.5. Oilonin lämpökattilat biokaasulle soveltuvilla polttimilla (vasemmalla Kalmarin tila, Laukaa; oikealla MTT Maaningan biokaasulaitos). Kuvat: Sari Luostarinen, MTT.

Toinen yleinen menetelmä on käyttää kaasumoottoria (kaasugeneraattoria; Kuva 2.6), joka muuntaa osan biokaasun energiasisällöstä sähköksi ja loput lämmöksi. Puhutaan siis sähkön ja lämmön yhteistuotannosta (combined heat and power, CHP). Yleisesti kaasumoottorin hyötysuhde menee niin, että 30–40 %

energiasta saadaan talteen sähkönä, kun taas lämmöstä jonkin verran hukataan kokonaishyötysuhteen ollessa luokkaa 80–90 %. Myös kaasuturbiinilla voidaan tuottaa vastaavasti sähköä ja lämpöä (Kuva 2.7). Kaasumootoria ja -turbiinia varten biokaasusta on hyvä poistaa kosteuden lisäksi myös rikkivety. Tämä voidaan toteuttaa yksinkertaisimmillaan johtamalla pientä määrää ilmaa biokaasureaktorin kaasutilaan, jolloin prosessin fakultatiiviset sulfaatinpelkistäjämikrobit hyödyntävät hapen pelkistääkseen rikkivetyä alkuainerikiksi. Rikkivetyä voidaan poistaa myös erillisessä kaasunpuhdistuskolonnissa sitomalla se esimerkiksi rautaoksideihin tai pesemällä rikkivety soveituvan pesuliukseen.



Kuva 2.6. CHP-generaattorit (kaasumootori): vasemmalla Karlen maatila, Saksa, oikealla MTT Maaningan biokaasulaitos. Kuvat: Teija Paavola ja Sari Luostarinen, MTT.



Kuva 2.7. Biokaasulle soveltuva mikroturbiini. Greenenvironment Ltd. Kuva: Sari Luostarinen, MTT.

Biokaasusta voidaan myös poistaa hiilidioksidi sekä muita epäpuhtauksia (ml. rikkivety) erillisellä puhdistuslaitteistolla (Kuva 2.8), jolloin lopputuotteena on biometaania (metaanipitoisuus yleensä >90 %). Puhdistusmenetelmiä on erilaisia, mutta useissa halutut kaasukomponentit erotetaan metaanista pesemällä ne veteen tai johonkin muuhun liuokseen. Biometaani vastaa pitkälti maakaasua, eli se voidaan hyödyntää maakaasuverkon kautta tai liikennepolttoaineena erillisen paineistus- ja tankkausyksikön kanssa. Biokaasun käyttöä kehitetään myös mm. stirling-moottorille ja polttokennoille, mutta kaupallisesti niitä ei vielä ole saatavissa.



Kuva 2.8. Biokaasun puhdistuslaitteisto maakaasuverkkoon injektointia varten (Laupheim, Saksa). Kuvat: Teija Paavola ja Sari Luostarinen, MTT.

2.4.2 Käsittelyjäännöksen hyödyntäminen

Biokaasuprosessin käsittelyjäännös sisältää kaikki alkuperäisten syöttömateriaalien ravinteet sekä jäljelle jäävän, heikosti hajoavan orgaanisen aineen. Orgaaninen aine on arvokasta peltomaan kunnon ylläpidossa, minkä vuoksi se kannattaa palauttaa peltoon aina kun mahdollista. Ravinteiden kierrättäminen on puolestaan enenevän tärkeää uusiutumattomien fosforivarantojen huventuessa ja epäorgaanisen typpilannoitteen tuotannon korkean energiankulutuksen ja päästöjen vähentämisen vuoksi.

Käsittelyjäännöksen arvoa nostaa se, että siinä suurempi osuus typestä on liukoisessa ammoniummuodossa kuin alkuperäisissä syöttömateriaaleissa. Ammoniumtyppi on suoraan kasveille käyttökelpoista, joten peltokäytössä se vastaa epäorgaanista typpilannoitetta. Ammoniumtyypin pitoisuuden nousu riippuu syöttömateriaaleista. Esimerkiksi naudon lietelannalla nousu on tyypillisesti 20 % ja sian lietelannalla 30 %. Toisaalta esimerkiksi kasvibiomassan typestä jopa 50–85 % muuntuu ammoniumtypeksi orgaanisten typpiyhdisteiden hajotessa (Lehtomäki 2006).

Ammoniumtyppipitoisuuden nousu on syytä huomioida käsittelyjäännöksen käsittelyssä, varastoinnissa ja loppukäytössä. Ammoniumtypeistä osa on ammoniakkinä, joka on helposti haihtuvaa. Ammoniakin haihtumisen estämisestä on pidettävä erityistä huolta biokaasuprosessin jäännöksessä, sillä sen pH ja ammoniakkipitoisuus on esimerkiksi raakalantaa korkeampi. Jäännöksen varastot olisi täten suositeltavaa kattaa. Tutkimusten mukaan kattaminen vähentää ammoniakkipäästöjä 65 % verrattuna kattamattomaan varastointiin (Amon ym. 2006a, 2006b). Ammoniakin haihtumisen estäminen onkin tärkeää paitsi ympäristölle haitallisten päästöjen vähentämiseksi, myös ravinteiden kierron kannalta. Elinkaariarviointien perusteella haihtuva ammoniakki aiheutti lannan käsittelyn merkittävimmät haitalliset ympäristövaikutukset. Biokaasuprosessin käsittelyssä lannassa vaikutukset olivat entistä voimakkaammat, mikäli ammoniakin haihtumista ei estetä (Grönroos ym. 2011).

Ammoniumtyppi on syytä huomioida myös jäännöksen peltokäytössä. Koska se on helposti ammoniakkinä haihtuvaa, jäännös tulisi levittää sijoittamalla tai multaamalla. Tällöin myös varmistetaan, että typpi saadaan tehokkaasti kasvin käyttöön. Kun levitys vielä tehdään kasvukaudella, myös typen huuhtoutuminen saadaan minimoitua. Suurin osa biokaasuprosessin jäännöksen potentiaalisista ammoniakkipäästöistä tapahtuukin nimenomaan peltolevityksessä (jopa 96 %; Amon ym. 2006a, 2006b).

Käsittelyjäännös voidaan hyödyntää sellaisenaan orgaanisena lannoitevalmisteena, mutta sitä voidaan myös jatkojalostaa erilaisiksi ravinnetuotteiksi. Eri jalostustekniikoiden perusteita on raportoitu mm. HYÖTYLANTA–tutkimusohjelmassa tuotetussa raportissa (Luostarinen ym. 2011a).

Yleisin keino on mekaaninen erottaminen (jakeistaminen, separointi) lingolla, suotonauhalla tai ruuvi-kuivaimella. Tällöin jäännöksestä puristetaan tai lingotaan erilleen pääosa kiintoaineesta ja nesteestä kuiva- ja nestejakeiksi. Suurin osa fosforista päättyy kuivajakeeseen, kun taas suurin osa typestä on nestejakeessa. Eri erotustekniikat tuottavat kuitenkin erilaisia jakeita erityisesti fosforin suhteen. Kaikki erottavat kiintoainetta varsin tehokkaasti ja myös liukoinen typpi päättyy nestejakeeseen. Sen sijaan fosforinerotus teho on korkein lingolla (52–78 %), kun esimerkiksi ruvipuristimet eivät pysty erottamaan fosforista kuin 7–33 % (Hjorth 2009).

Fosforin erotuksen tehostamiseksi fosforia voidaan saostaa tai kiteyttää yhdistettynä mekaaniseen erottamiseen. Rauta- ja alumiinisuoloilla fosfori saadaan saostumaan tehokkaasti, mutta se ei ole käytännössä enää kasveille käyttökelpoista. Fosforin kierrättämisen kannalta tämä ei siis ole suotavaa. Fosforin saostamista magnesiumsuoloilla kehitetään koko ajan, sillä tällöin muodostuvat fosforyhdisteet ovat edelleen kasveille käyttökelpoisia. Struviittia, eli magnesiumammoniumfosfaattia, kiteytettäessä sidotaan samalla myös ammoniumtyypeä. Menetelmät ovat kuitenkin vielä kehitysasteella.

Mekaanisesti erotettua kuivajaetta voidaan kuivata vielä lisää ja puristaa sen pellettiä muistuttaviksi rakeiksi. Tuloksena on helposti ja edullisesti kuljetettavaa fosforilannoitetta. Fosforin käyttökelpoisuus kuitenkin riippuu syöttömateriaaleista. Siinä missä pääasiassa lantapohjaisissa rakeissa fosfori on enimmäkseen kasveille käyttökelpoisessa muodossa, puhdistamolietepohjaisissa hyvin vähäinen osa siitä on käyttökelpoista (saostuskemikaalien vaikutus). Periaatteessa rakeet voisi myös polttaa jätteenpolttolaitoksessa ja mm. Tanskassa niitä aiotaan käyttää termisen kaasutuksen yhtenä raaka-aineena (Kuligowski & Luostarinen 2011).

Kuivajakeen voi myös kompostoida, jolloin lopputuotteena on humusmaista kompostia. Typen hyödyntämisen ja ympäristön kannalta tämä ei ole suotavaa varsinkaan pienessä mittakaavassa, sillä suurin osa typestä hukataan kompostoitumisen aikana ammoniakkipäästöinä (Grönroos ym. 2011).

Nestejaetta voidaan jalostaa monin eri keinoin. Tavoite on yleensä väkevöidä typpeä pienempään tilavuuteen, jotta sen käytettävyys ja kuljettavuus kasvavat. Ammoniumtyppi voidaan stripata erilleen nestejakeesta nostamalla nestejakeen pH ensin korkeaksi, jotta ammoniumtyppi esiintyy vain helposti haihtuvana ammoniakkinä. Ammoniakki puhalletaan erotuskolonniin kaasufaasiin, josta se sidotaan erillisessä pesukolonniin haluttuun nesteeseen, kuten veteen tai rikkihappoon. Lopputuotteena ovat tällöin vastavasti typpivesi tai ammoniumsulfaatti. Mikäli typpipitoisuutta halutaan edelleen nostaa, se voidaan saavuttaa vettä haihduttamalla. Eri yhdisteitä voidaan erotella toisistaan myös erilaisilla kalvotekniikoilla, käytännössä siis erottelemalla yhdisteitä niiden koon perusteella kalvoilla, joilla on erilainen läpäisevyys.

Biokaasuprosessin käsittelyjäännöksen jalostusketju voi olla moninainen yhdistelmä eri prosesseja. Sen mielekkyyteen ja kannattavuuteen vaikuttaa voimakkaasti mittakaava. Maatilakohtaisilla ja maatilojen yhteisillä, yksinkertaisilla biokaasulaitoksilla monimutkainen ja arvokas jalostaminen ei liene perusteltua, mutta suuressa mittakaavassa siitä odotetaan muodostuvan uusi ja olennainen osa biokaasulaitosten toimintaa.

3 Maatilakohtaisen biokaasulaitoksen perustaminen

Sari Luostarinen

Biokaasulaitoksen perustamisessa on lukuisia huomioitavia asioita, joista kaikista laitosta suunnitteleva toimija on harvoin välittömästi tietoinen. Onnistuneen laitoshankinnan ja menestyksekkään laitoksen operoinnin takeena onkin huolellinen esisuunnittelu. Suunnittelussa on käytävä läpi kaikki tiedossa olevat laitokseen liittyvät asiat mahdollisimman yksityiskohtaisesti ja vaihtoehtoja puntaroiden. Myös tarvittavat luvat (ml. ympäristölupa, rakennuslupa) haetaan tai ainakin laitetaan alulle tässä vaiheessa. Asiantuntija-avun käyttö on esisuunnittelussa, ja koko hankinnan aikana, erittäin suositeltavaa.

Kun laitokskonsepti alkaa olla selvillä, voidaan edetä tarjouskilpailuun. Tarjouspyynnön laadinta on toinen merkittävä osuus laitoshankintaa. Tarjouspyyntö on syytä laatia huolella, jotta saatavat tarjoukset varmasti vastaavat laitosta suunnittelevan tarpeisiin. Valitun laitostoimittajan kanssa suunnitelmia vielä tarkennetaan.

Rakennusvaiheen jälkeen päästään laitoksen käyttöönottoon. Käyttökoulutuksesta ja laitoksen rakentajan operointivaiheesta ennen laitoksen lopullista vastaanottoa kannattaa ottaa kaikki mahdollinen oppi irti. Biokaasulaitoksen operoinnissa on paljon huomioitavia asioita, ja mitä innokkaammin jaksaa ne jo alkuvaiheessa tunnistaa ja opetella oma prosessinsa tuntemaan, sitä helpompaa ja suoraviivaisempaa laitoksen käyttö jatkossa on.

Tässä osiossa esitetyt suuntaviivat maatilakohtaisen biokaasulaitoksen hankintaan perustuvat pääasiassa kirjoittajan omiin kokemuksiin MTT Maanigan maatilakohtaisen biokaasulaitoksen hankinnassa vuosina 2008–2009. Mukana on myös kokemuksia ja tietoa muiden toimijoiden laitossuunnittelusta, laitostoimittajilta ja viranomaisilta. Suuntaviivat laitoshankinnasta soveltuvat sinänsä myös muiden laitostyyppien (maatilojen yhteislaitokset, keskitetyt laitokset) hankintaan, vaikka niissä omat erityispiirteensä mittakaavaerojen ja toimintatapojen vuoksi onkin.

3.1 Biokaasulaitoksen esisuunnittelu

Jokainen biokaasulaitos on suunniteltava tapauskohtaisesti, minkä vuoksi täydellisesti monistettavaa laitosta eri kohteisiin ei käytännössä ole. Laitoksen esisuunnittelun aikana käydäänkin huolellisesti läpi, mitä laitokselta odotetaan, mihin tilanteeseen ja kohteeseen se sijoitetaan, mitä materiaaleja aiotaan käsitellä, mitä energiamuotoa biokaasulla tuotetaan, miten käsittelyjäännös hyödynnetään, miten laitoksen kannattavuus rakentuu, missä mittakaavassa toimitaan, miten työtehtävät järjestetään, miten lainsäädännön vaateisiin vastataan jne. Kootun tiedon perusteella päästään luomaan kokonaiskäsitys suunniteltavasta laitoksesta sekä etenemään hankinnassa menestyksellä. Tässä osiossa käydään läpi biokaasulaitoksen esisuunnitteluun yleensä liittyviä seikkoja.

3.1.1 Syöttömateriaalien määrät ja ominaisuudet

Minkä tahansa biokaasulaitoksen suunnittelun tärkeimpiä lähtökohtia ovat laitokseen aiottujen syöttömateriaalien määrät ja ominaisuudet. Laitos voidaan suunnitella ja rakentaa tietämättä, mitä kaikkea sinne tullaan tarkalleen ottaen syöttämään tulevaisuudessa. Jonkinlaiset rajaukset syöttömateriaaleille on kuitenkin vähintään tehtävä, sillä niiden ominaisuudet ja saatavilla olevat määrät vaikuttavat ratkaisevasti laitoksen tekniikkaan ja kapasiteettiin. Ts. voidaan esimerkiksi päättää, että laitoksessa tullaan käsittelemään lietemäisiä materiaaleja, joiden kuiva-ainepitoisuus on alle 15 %, tai että syöttöseoksessa on mukana myös kuivempia materiaaleja siten, että reaktoriin menevän kokonaissyötön kuiva-ainepitoisuus pysyy alle 15 %:ssa. Kun samalla rajataan syöttömateriaalien vuosittainen maksimimäärä (t/a tai m^3/a), saadaan laitokselle käsittelykapasiteetti. Näiden tietojen avulla päästään jo rajaamaan soveltuvat tekniikat ja pohtimaan, mitä osia laitoksessa tulisi olla.

Biokaasuteknologiaa on rakennettavissa kaikkiin mittakaavoihin jopa muutaman eläimen tiloista suuriin maatilojen yhteisiin ja keskitettyihin (teollisiin) laitoksiin. Suomen maatilakohtaiset laitokset on suunnit-

teltu käsittelemään pääasiassa kotieläinten tuottamaa lantaa. Sen lisäksi voidaan käsitellä tilan tai alueen muita eloperäisiä materiaaleja.

Maatilojen biokaasulaitosta suunniteltaessa on pohdittava ainakin seuraavat asiat käytettävissä oleviin syöttömateriaaleihin liittyen:

- vuosittaiset määrät ja saatavuuden mahdollinen vaihtelu eri vuodenaikoina
- varastointitarve
- ominaisuudet (kuiva-ainepitoisuus, hajoavuus / sulavuus, metaanintuottopotentiaali, ravinteet)
- mahdolliset lisämateriaalit tilan ulkopuolelta (hygienia, haitta-aineet, lainsäädännön vaatimukset, lisäenergiantuotto, porttimaksu, vaikutus tilan ravinnetaseeseen, jäännöksen määrän nousu ja varastokapasiteetti)

3.1.2 Lopputuotteiden käyttö

Toinen olennainen pohdittava asia on lopputuotteiden käyttö: mitä energiaa biokaasusta halutaan tuottaa ja miten käsittelyjäännös hyödynnetään. Tuotetun biokaasun määrää voidaan arvioida suunniteltujen syöttömateriaalien metaanintuottopotentiaalien ja määrien perusteella. Tällöin voidaan myös paremmin suunnitella biokaasun energiakäyttöä. Energiakäyttö on tärkeä osa laitoksen kannattavuutta, minkä vuoksi suunnittelussa on huomioitava paitsi soveltuvat energianhyödyntämismuodot, myös niistä saatava taloudellinen etu (myyntihinta ja/tai ostoenergian korvaushinta).

Maatilakohtaisissa biokaasulaitoksissa pääpaino on yleensä lämmön tai lämmön ja sähkön yhteistuotannossa. Toistaiseksi biokaasun puhdistamista liikennepolttoaineeksi tai maakaasuverkkoon injektoitavaksi tehdään kansainvälisestikin harvoin maatilamittakaavassa lähinnä tarvittavien laitteiden korkean hinnan vuoksi. Laitosta suunniteltaessa tuotetun biokaasun määrä ja energiasisältö on syytä arvioida ja sen jälkeen pohtia, mikä on paras tapauskohtainen energiankäyttömuoto. Kotieläintiloista sikaloilla on yleisesti suurempi energiantarve kuin karjatiloilta suuremman lämmöntarpeen vuoksi. Sikaloiden biokaasulaitoksilla energia saadaankin yleensä hyödynnettyä tilalla ostoenergian korvaajana kokonaisuudessaan. Karjatiloilta tarvitaan kyllä sähköä, mutta lämmöntarve on alhaisempi. Tämän vuoksi kaikelle tuotetulle lämmölle ei välttämättä ole tilalla käyttöä, ja se pitäisi saada muutoin hyötykäyttöön ja mieluiten myydyksi hyvällä hinnalla. Laitossuunnittelun yhteydessä on siis syytä kartoittaa mahdolliset muut lämmön tarvitsijat ja/tai lämpöverkot lähialueella ja neuvotella heidän kanssaan lämmöntuottosopimuksista. Maatilakohtaisissa laitoksissa parhaan hinnan sähkölle saavuttaa omalla käytöllä, ts. korvaamalla ostosähköä. Mikäli sähköä tuotetaan omaa tarvetta enemmän tai sähkö nimenomaan halutaan myydä, on neuvoteltava paikallisen energiayrityksen kanssa sähkönoston ehdoista.

Maatilakohtaisen biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen käytön suunnittelussa on huomioitava sen määrä ja todennäköiset ominaisuudet, jotka voidaan arvioida syöttömateriaalien ominaisuuksien ja käytettävän prosessin perusteella. Jäännös on voitava varastoida asianmukaisesti vastaavasti kuin käsittelemätönkin lanta. Kotieläintiloilla varastokapasiteettia on yleensä riittävästi, mikäli laitoksessa käsitellään tilan omia materiaaleja. Sen sijaan jos laitokselle otetaan vastaan merkittäviä määriä tilan ulkopuolisia syöttömateriaaleja, voi käsittelyjäännöksen määrä ylittää tilan varastokapasiteetin. Tällöin tarvitaan lisää varastoja. Varastoinnissa on hyvä miettiä myös vaihtoehtoja tilakeskuksessa varastointiin. Mikäli varastokapasiteettia on lisättävä joka tapauksessa, etäsäiliöiden mahdollisuus ja soveltuvimmat sijainnit on sisällytettävä suunnitelmiin tilakokonaisuuden toimintojen tehostamiseksi. Tilalliselle voi olla merkittävää etua siitä, että voi ajaa jäännöstä etäsäiliöihin vähemmän kiireisinä aikoina ja säästää täten ajoa ja työaikaa itse lietteenlevityssesonkina.

Jäännöksen ominaisuuksia voidaan arvioida syöttömateriaalien ja toivotun laitostekniikan avulla. Tietoa tarvitaan sekä jäännöksen varastoinnin että peltokäytön suunnittelussa. Jäännöksen kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa käytettävään levitysmenetelmään. Mikäli maatilan biokaasulaitosta aiotaan operoida korkealla kuiva-ainepitoisuudella esimerkiksi pääasiassa kuivalantaa ja/tai kasvibiomassaa käyttäen (ns. kuivaprosessina; ks. osio 2.3), on myös käsittelyjäännöksen kuiva-ainepitoisuus todennäköisesti melko korkea. Tällöin on arvioitava, soveltuuko kuivalannan levityskalusto myös jäännökselle. On todennäköistä, että se ei sovellu, sillä biokaasuprosessissa hajoava kuivalanta ja/tai kasvibiomassa muuntuu lietemäisempään muotoon. Kuiva-ainepitoisuus voi silti jäädä korkeammaksi kuin lietelannan levityskalustolle soveltuu. Tällöin jäännös on esimerkiksi jakeistettava erikseen biokaasuprosessin jälkeen, jotta saadaan sekä kuivalannan levityskalustolle soveltuva, fosforipitoinen kuivajae että lietelannan levityskalustolle soveltuva, typpipitoinen nestejake. Myös jakeistamiseen soveltuvan laitteiston saatavuus on varmistettava. Kovin korkean kuiva-ainepitoisuuden jäännökselle jakeistaminen voi olla haastavaa. Sen sijaan lietemäisiä mate-

riaaleja käsittelevässä laitoksessa myös jäännös on lietemäinen, kuiva-ainepitoisuudeltaan alhaisempi, tasalaatuisempi ja helpommin käsiteltävä kuin alkuperäisillä materiaaleilla. Se voidaan haluttaessa jakeistaa kuiva- ja nestejakeiksi tunnetuilla tekniikoilla.

Jäännöksen ravinnepitoisuudet voidaan arvioida suunniteltujen syöttömateriaalien perusteella. Tällöin niitä on hyvä tarkastella myös tilan ravinnetaseen kannalta, erityisesti mikäli suunnitellaan tilan ulkopuolisten lisämateriaalien vastaanottoa ja käsittelyä. Tilallisen on syytä varmistaa, että käytössä olevat peltohehtaarit riittävät ravinteiden hyödyntämiseen. Tilallinen voi myös päätyä luovuttamaan tai myymään jäännöstä tilan ulkopuolelle, mikäli lisämateriaaleja on runsaasti ja hyvästä porttimaksusta tarjolla eikä jäännös omille pelloille mahdu. Tätä on syytä suunnitella huolellisesti lainsäädännön kannalta: sekä tilan ulkopuolisten materiaalien vastaanottaminen että jäännöksen luovuttaminen ja/tai myynti voivat asettaa laitokselle prosessivaatimuksia.

3.1.3 Tilan olemassa olevien rakenteiden hyödyntäminen

Maatilakohtaisen biokaasulaitoksen suunnittelussa on huomioitava tilan olemassa olevat rakenteet sekä laitoksen sijoittelun, tilatoimintojen käytännön järjestelyjen että mahdollisten kustannussäästöjen vuoksi.

Lantaa käsittelevillä laitoksilla olennaista on huomioida eläinsuojan lannankeruujärjestelmä ja lantavarastot. Niitä voi tarvita päivittää tai niitä voidaan hyödyntää osana laitosratkaisua. Lannankeruujärjestelmän tulisi mieluiten olla sellainen, että lanta saadaan syötettyä biokaasulaitokseen mahdollisimman tuoreeltaan. Suuret lietekuilut eivät ole optimaalinen ratkaisu biokaasumaatilalle, sillä lanta liikkuu niissä hitaasti, tyypeä ehditään mahdollisesti hukata ammoniakkipäästöinä ja lanta voi myös ehtiä alkaa hajoamaan, jolloin menetetään helpoiten hajoavaa ja siten biokaasua tuottavaa orgaanista ainetta.

Lantavarastot voivat olla käyttökelpoiset myös osana biokaasulaitosta. Niitä voidaan mahdollisesti hyödyntää esimerkiksi 1) esisäiliönä, johon lanta kerätään eläinsuojasta ja josta se syötetään edelleen tulevaan biokaasulaitokseen, 2) biokaasureaktorina, mikäli tilavuus, kunto ja muunneltavuus (esim. syöttö- ja poistojärjestelyt, lämmitys, sekoitustekniikka, kate kaasunkeruineen) sen sallivat, 3) jälkikaasualtaana, mikäli tilavuus, kunto ja muunneltavuus (mm. syöttö- ja poistojärjestelyt, sekoitustekniikka, kate kaasunkeruineen) sen sallivat, tai 4) jäännöksen varastoina.

Lantaa ei yleensä haluta siirtää viemärillä ja pumpulla (lietelanta) tai kuivalannan kuljettimilla/kalustolla kovin pitkiä matkoja tilakeskuksessa lähinnä mahdollisten investointikustannusten ja/tai kasvavan työmäärän vuoksi. Biokaasulaitos osasineen onkin syytä sijoitella olemassa oleviin rakenteisiin siten, että tarvittavat työtehtävät ja kuljetusmatkat minimoidaan. Näin ollen tilakohtaiset lantalaitokset sijoitetaan yleensä lähelle eläinsuojaa. Tällöin myös olemassa olevat lantavarastot ovat yleensä lähellä, mikäli niitä hyödynnetään osana laitosratkaisua. Kasvibiomassaa hyödyntävillä laitoksilla on etua sijoittaa laitosrakenteet lähelle mahdollisia siiloja.

3.1.4 Tarvittavat laitosrakenteet

Maatilakohtaista biokaasulaitosta suunnitellessa ei välttämättä tarvitse ymmärtää kaikkea biokaasuprosessista itse, vaan voi ja pitää myös luottaa tulevan laitostoimittajan osaamiseen ja kokemukseen. Toisaalta on hyvä selvittää ja tiedostaa pääperiaatteet biokaasuprosessista ja biokaasulaitosten teknisistä ratkaisuisista, jotta on helpompi suunnitella omaa laitosta ja laatia aikanaan yksityiskohtaisempaa tarjouspyyntöä. Asiantuntija-avun käyttö on suositeltavaa.

Maatiloilla biokaasulaitoksessa on yleensä oltava syöttömateriaalien varastot ja/tai esisäiliöt, syöttölaitteet, biokaasureaktori, jälkikaasuallas, varastot jäännökselle sekä biokaasun keruu- ja hyödyntämislaitteet. Jälkikaasuallas voi olla tilan ainoa lantavarastokin, mikä on erityisen suotavaa sekä kaiken jälkikaasun keräämiseksi ja hyödyntämiseksi että päästöjen (erit. ammoniakki) minimoimiseksi. Jälkikaasuallas ja jäännöksen varastot voivat olla myös erilliset. Myös erillisten varastojen kattaminen on suositeltavaa ammoniakkipäästöjen ja täten myös arvokkaan typen hukan vähentämiseksi.

3.1.5 Laitoksen kannattavuus

Maatilakohtainen biokaasulaitos on melko arvokas investointi, minkä vuoksi laitosta suunniteltaessa on mietittävä huolellisesti, miten laitoksen kannattavuus rakentuu. Tärkeitä tekijöitä ovat luonnollisesti itse investoinnin suuruus, ts. laitoksen hinta, sille mahdollisesti saatavat tuet, tuotetun energian arvo sekä käsittelyjäännöksen ravinteiden arvo.

Biokaasulaitoksen investointihinta riippuu hyvin monista tekijöistä. Onkin mahdotonta arvioida suoralta kädeltä, mitä minkäkinlainen laitos voisi maksaa. Maatiloilla hintaa voi tiputtaa esimerkiksi olemassa olevien rakenteiden hyödyntäminen sekä tilallisen oma työpanos rakentamisessa (mm. perustusten kaivuu ym. konekalustoa vaativat tehtävät). Toisaalta investoinnille on saatavissa yhteiskunnalta tukea Maa- ja metsätalousministeriön hallinnonalaisista maatilojen tuista (esim. suorat investointituet, korkotukilainat). Suuremmille laitoksille tukea saattaa saada myös Työ- ja elinkeinoministeriöstä. Ajantasainen tukipolitiikka kannattaa tarkistaa laitossuunnittelun aikana.

Maatilakohtaisessa biokaasulaitoksessa tuotetun energian arvo riippuu energiamuodosta sekä energian käytöstä. Jos biokaasusta tuotettu lämpö hyödynnetään tilalla, lämpöenergian arvo riippuu siitä, mitä ja minkä hintaista lämpöenergiaa sillä korvataan. Mitä kalliimpaa lämpöenergiaa korvataan, sitä parempi on luonnollisesti laitoksen kannattavuus. Yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa biokaasusta tuotetun sähkön hinta riippuu siitä, hyödynnetäänkö se tilalla ostosähkön korvaajana vai myydäänkö se sähköverkkoon. Maatiloilla paras kannattavuus tuotetulle sähkölle saadaan yleensä ostosähköä korvaamalla, sillä tällöin vältetään ostosähkön kaikki maksut (sähköenergia, siirto, käyttömaksut). Kirjoittamishetkellä (2013) voimassa oleva sähkön syöttötariffi biokaasulla tuotetulle sähkölle on rajattu yli 100 kVA:n sähkötehoisille biokaasulaitoksille. Tämä rajaa useimmat maatilakohtaiset, erityisesti pääasiassa lantaa käsittelevät laitokset syöttötariffin ulkopuolelle. Sähköä myydessä maatilat eivät siis nykyisellään todennäköisesti saa kovin korkeaa hintaa sähkölleen. Liikennepolttoaineena biokaasulle saa kirjoittamishetkellä (2013) parhaan hinnan, mutta maatilakohtaisessa laitoksessa tarvittavat investoinnit biokaasun puhdistamiseksi, paineistamiseksi ja tankkauksen mahdollistamiseksi ovat yleensä korkeat tuotettuun kaasumäärään nähden.

Käsittelyjäännös on arvokas orgaaninen lannoitevalmiste, joka sisältää kaikki syöttömateriaalien ravinteet ja jossa kasveille suoraan käyttökelpoista liukoista tyyppiä (ammoniumtyppi) on enemmän kuin alkuperäisissä syöttömateriaaleissa. Sen käyttö korvaa epäorgaanisia lannoitteita, ja mitä vähemmän ostolannoitteita maatilan tarvitsee ostaa, sitä parempi on myös biokaasulaitoksen kannattavuus.

Kaikille biokaasuteknologian tuomille hyödyille on vaikeaa antaa euromääräistä hintaa. Ympäristöpäästöjen väheneminen on yksi tällainen tekijä. Kuinka esimerkiksi arvottaa kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen, kun maatalous ei ole päästökaupassa mukana? Tai kuinka arvottaa lannan ammoniakkipäästöjen väheneminen, kun toimitaan mahdollisimman suljetussa prosessiketjussa (biokaasulaitos, katetut varastot, levitys sijoittamalla / multaamalla)? Entä miten antaa eurohinta vähentyneille hajuhaitoille, lannankäsittelyn paremmalle hygienialle tai rikkakasvinsiementen (osittaiselle) tuhoutumiselle? Hyödyt voivat olla varsin merkittäviä, mutta hintaa niille ei suoranaisesti ole.

BIOTILA-hankkeessa maatilakohtaisten ja maatilojen yhteisten biokaasulaitosten kannattavuutta tarkasteltiin erillisessä kannattavuusselvityksessä. Raportti löytyy osoitteesta <http://www.envitecpolis.fi> > Ajankohtaista (Taavitsainen 2011).

3.1.6 Tarvittavat luvat

Rakennuslupa

Maatilakohtaiselle biokaasulaitokselle tarvitaan Maankäyttö- ja rakennuslain 125 §:n mukainen rakennuslupa, joka osoitetaan kunnalle, jonka alueella biokaasulaitos sijaitsee. Rakennuslupahakemuksessa biokaasulaitos kuvataan lyhyesti ja pääpiirteissään. Lupaa voi hakea myös siten, että rakentamistoimenpiteet voi aloittaa ennen kuin lopullinen rakennuslupapäätös on saatu. Hakemuksessa on kuitenkin jo ilmoitettava laitoksen suunnittelijat, minkä vuoksi sen voi varsinaisesti jättää vasta laitostoimittajan varmistuttua. Tarvittavia liitteitä voivat olla mm. selvitys rakennuspaikan omistusoikeudesta, kiinteistörekisterin ote, selvitys rakennuspaikan pohja- ja perustamisolosuhteista, väestörekisterikeskuksen rakentamishankeilmoitus, ympäristölupa, selvitys naapurien kuulemisesta jne. Liitteiden määrä ja tarve vaihtelevat tapauskohtaisesti. Laitoshankkeesta ja rakennusluvasta on hyvä keskustella kunnan teknisen toimen kanssa jo ennen lupahakemuksen jättämistä.

Ympäristölupa

Kaikki biokaasulaitokset vaativat ympäristöluvan, joka haetaan laitospasiteetista riippuen kunnalta (alle 5000 t/a) tai alueelliselta AVI-keskukselta (yli 5000 t/a). Mikäli biokaasulaitos ylittää kapasiteetin 20 000 t/a, vaaditaan myös ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA). Maatilakohtaiset laitokset ovat yleensä suhteellisen pieniä, joten YVA-menettelyä ei vaadita. Sen sijaan tilojen yhteisissä laitoksissa

tämäkin raja voidaan saavuttaa. Ympäristölupa tulisi pääasiassa olla voimassa ennen toiminnan aloittamista. Koska lupaprosessi vie yleensä useita kuukausia, myös ympäristölupa tulee hakea hyvissä ajoin laitoissuunnittelun edetessä.

Kunnan ympäristöviranomaiselta haettava ympäristölupa on yleensä yksinkertaisin menettelyistä. Sen tarkat vaatimukset voivat vaihdella kunnittain, joten on hyvä tarkistaa oman kuntansa tulkinta.

Alueellisissa AVI-keskuksissa maatilakohtaisen biokaasulaitoksen ympäristölupaa haetaan jollakin soveltuvalla lomakkeella, esimerkiksi eläinsuojan ympäristölupahakemuksella tai yleisellä ympäristölupahakemuksella. Mikään hakemuslomake ei sellaisenaan vastaa kaikkia tarpeita, joten kannattaa huomioida, ettei kaikkiin kohtiin välttämättä tarvitse kirjoittaa mitään. Hakemuksessa on yksilöitävä mm. seuraavia asioita:

- toiminta, jolle lupa haetaan
- hakijan ja laitoksen yhteystiedot
- mahdolliset olemassa olevat ympäristö- tai vesiluvat tai muut päätökset
- laitosalueen ja sen ympäristön tiedot (kiinteistöt haltijoineen, sijaintipaikan tiedot kaavoineen ja naapureineen)
- laitostoiminnan kuvaus (esitetään yleensä tarkemmin erillisenä liitteenä ml. tarvittavat piirustukset ja kaaviot)
 - käytettävät raaka-aineet, kemikaalit ja vastaavat, veden kulutus ja viemäröinti
 - energian käyttö ja tehokkuus
 - arvio ympäristöriskeistä, onnettomuuksien estämisestä ja toimista häiriötilanteissa
 - liikennejärjestelyt
- ympäristökuormituksen kuvaus
 - päästöjen määrä ja laatu ilmaan, veteen, viemäriin, maaperään, pohjaveteen
 - melu, värinä
 - jätteiden määrä, ominaisuudet, käsittely sekä jätemäärän ja haitallisuuden minimointi ja hyödyntäminen
- parhaan käyttökelpoisen tekniikan ja ympäristön kannalta parhaan käytännön soveltamisen kuvaus
- vaikutukset ympäristöön
- toiminnan tarkkailun ja raportoinnin kuvaus

Laitostoiminnan kuvaus on tärkeä osa ympäristölupahakemusta. Siihen on hyvä sisällyttää myös aiottu rakentamisaikataulu, jos se on jo tiedossa. Laitos toimintaperiaatteineen on kuvattava mahdollisimman tarkasti liittäen mukaan myös tekniset piirustukset laitoksesta ja sen sijainnista (kartta, asemapiirros). Kuvauksessa kannattaa luonnollisesti kiinnittää erityistä huomiota kaikkiin ympäristöseikkoihin, kuten jätteisiin ja päästöihin tai erityisesti niiden vähenemiseen laitoksen seurauksena. Parhaan käyttökelpoisen tekniikan osalta Suomen Ympäristökeskus SYKE on julkaissut kansallisen ohjeistuksen huomioitavista asioista. Sitä voi käyttää ympäristölupahakemusta tehdessä apuna (Latvala 2009). Myös laitoksen toiminnan tarkkailu on kuvattava, samoin kuin siihen liittyvä asiantuntemus. Jälkimmäistä laitosta vasta suunnittelevalle toimijalle ei välttämättä vielä ole, mutta tällöin onkin kuvattava laitostoimittajan osaaminen ja heiltä saatava käyttökoulutus.

Turvallisuusasiat

Biokaasu sisältää runsaasti metaania, joka hyvin herkästi syttyvä ja sopivassa ilmaseoksessa (5–15 %) myös räjähtävä. Syttyäkseen ja/tai räjähtääkseen se tarvitsee kuitenkin ulkoisen sytytyslähteen. Biokaasun metaanipitoisuuden vuoksi Turvatekniikan keskus TUKES luokittelee biokaasun lausekkeilla helposti syttyvä kaasu (varoituserkin kirjaintunnus F+, vaaraa osoittava standardilauseke R 12; Rantakoski & Säkkinen 2000). Turvallinen ja riskitön toiminta on olennainen osa biokaasulaitosta ja laitosta suunnittelevalle on oltava yhteyksissä paikalliseen pelastusviranomaiseen hyvissä ajoin.

Maakaasusetusta (1058/1993) sovelletaan biokaasun tekniseen käyttöön sekä biokaasun talteenottoon, siirtoon, jakeluun ja käyttöön tarkoitettuihin putkistoihin ja laitteisiin. Itse biokaasuprosessiin (biokaasun valmistus ja siihen liittyvä käyttö ja varastointi) asetusta ei kuitenkaan sovelleta. Käytännössä siis maatilakohtaisissa laitoksissa maakaasusetusta ei sovelleta, mikäli biokaasua ei johdeta tilalta ulos käytettäväksi muualla.

Tärkeämpi biokaasun käyttöön sovellettava asetus on asetus vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista (59/1999). Se on voimassa, kun maakaasusetus ei tule kysymykseen; siis myös maatilakohtaisissa biokaasulaitoksissa. Kemikaaliasetuksessa toiminnot jaetaan kahteen luokkaan: laajamittaiseen teolliseen käsittelyyn ja varastointiin sekä vähäiseen teolliseen käsittelyyn ja varastointiin. Laajamittainen toiminta on aina luvanvaraista ja vähäinen toiminta mahdollisesti ilmoituksenvaraista. Ero lasketaan käsiteltävän kemikaalin/kemikaalien määrän (vähimmäismäärät annettu) sekä laitoksen terveydelle ja ympäristölle vaarallisten sekä palo- ja räjähdysalttiiden kemikaalien suhdelukujen perusteella. Kun jokin edellä mainituista kolmesta suhdeluvusta on yhtä suuri tai suurempi kuin yksi, vaaditaan joko kemikaali-ilmoitus (vähäinen toiminta) tai toimintalupa (teollinen toiminta). Suhdelukujen summa s määritetään seuraavasti:

$$s = q_1/Q_1 + q_2/Q_2 \dots q_n/Q_n$$

jossa q tarkoittaa laitoksessa olevan vaarallisen kemikaalin määrää ja Q sen vähimmäismäärää (taulukot annettu asetuksessa). Maatilakohtaisissa biokaasulaitoksissa toiminta on yleensä vähäiseksi katsottavaa, minkä vuoksi tässä osiossa kerrotaan pääpiirteitä vain vähäisen toiminnan velvoitteista kemikaaliasetuksessa.

Maatilakohtaisessa biokaasulaitoksessa on todennäköistä, että em. suhdeluvut jäävät alle yhden, jolloin edes kemikaali-ilmoitusta ei vaadita. Paikallinen pelastusviranomais voi kemikaali-ilmoituksen tästäkin huolimatta pyytää. Sen laatiminen on itse asiassa laitosta suunnittelevalle varsin hyödyllinen oppitunti biokaasulaitoksen turvallisuudessa huomioitavista asioista. Ilmoituksen laatimisessa voi pyytää apua paitsi asiantuntijoilta, myös laitostoimittajalta. Kemikaali-ilmoituksessa selvitetään mm. seuraavia asioita:

- toiminnanharjoittajan tiedot
- laitoksen sijainti
- laitoksessa käsiteltävät / tuotettavat palo- ja räjähdysvaaralliset kemikaalit sekä terveydelle ja ympäristölle haitalliset kemikaalit
- em. kemikaalien kerrallaan olevat suurimmat määrät laitoksessa

Lisäksi ilmoitukseen on liitettävä selvitys toiminnan mahdollisista vaaroista, kemikaalien käyttöturvallisuustiedotteet, pääpiirteittäinen selostus laitoksen toiminnasta sekä riskien hallinnasta ja mahdollisten onnettomuuksien estämisestä. Ilmoitus on tehtävä hyvissä ajoin ennen toiminnan aloittamista. Pelastusviranomais antaa ilmoituksesta hyväksyvän päätöksensä ja tarkastaa laitoksen toiminnan sen käyttöönoton jälkeen.

Pelastusviranomais vaatii joka tapauksessa ainakin ATEX-räjähdysuojausasiakirjan, jonka laadintaan löytyy varsin hyviä ohjeita internetistä esimerkiksi Työterveyslaitoksen ja TUKESin sivuilta. Räjähdysuojausasiakirja laaditaan laitoksen turvallisuuden parantamiseksi ja sisältää sen palo- ja räjähdysvaarallisten kemikaalien tunnistamisen, riskinarvioinnin sekä toimenpiteet onnettomuuksien estämiseksi sekä niiden varalle. Räjähdysuojausasiakirja laaditaan laitostoimijalle itselleen eikä sitä toimiteta viranomaiselle. Biokaasulaitoksen tilat luokitellaan räjähdysvaaran mukaan neljään tilaluokkaan (0–3, joista 0 on erittäin vaarallinen) ja ne myös merkitään asianmukaisesti. Luokittelun mukaan toteutetaan asianmukaiset suojaustoimenpiteet. Pääasiassa ATEX-asioista huolehtiminen on laitostoimittajan asiantuntemusta ja vastuulla, mutta myös laitoksen omistajan ja operoijan on syytä olla niistä tietoinen. Räjähdetilöiden tilaluokituksista, sähkölaitteiden suojuksista ym. ATEX-toimiin liittyvistä seikoista löytyy lisätietoa mm. TUKESin internet-sivuilta.

Myös turvallisuus- ja pelastussuunnitelma on hyvä laatia ja pitää ajan tasalla. Maatilakohtaisen biokaasulaitoksen pelastussuunnitelmassa käydään läpi ennakoitavat vaaratilanteet ja niiden vaikutus, toimenpiteet vaaratilanteiden ehkäisemiseksi, suojautumismahdollisuudet sekä sammutustehtävien järjestelyt, alkusammutuskalusto sijainteineen sekä ohjeet erilaisia ennakoituja tilanteita varten. Pelastussuunnitelma on säilytettävä siten, että se on mahdollisen onnettomuuden ja/tai vaaratilanteen sattuessa saatavissa pelastustoimenpiteiden ohjaamiseksi.

Biokaasulaitosten prosessiratkaisuja ja käsittelyjäännöksen käyttöä valvotaan pääasiassa kahden lain avulla, jotka ovat kansallinen lannoitevalmistelaki (539/2006) asetuksineen sekä Euroopan Unionin eläinsivutuoteasetus (1069/2009). Lannoitevalmistelailla valvotaan lannoitevalmiste

iden käyttöä niiden turvallisuuden varmistamiseksi niin ihmisille, eläimille kuin ympäristölle. Vastaavasti sivutuoteasetuksella pyritään varmistamaan eläinperäisten sivutuotteiden turvallinen ja asianmukainen käsittely ja jatkokäyttö. Molempien lakien noudattamista biokaasulaitoksissa valvoo Suomessa Elintarviketurvallisuusvirasto Evira.

Kaikkien biokaasulaitosten tulee tehdä vähintään laitosilmoitus Eviralle. Ilmoituksella tiedotetaan Eviraa laitoksen olemassaolosta, käsiteltävistä syöttömateriaaleista, laitosprosessista sekä erityisesti käsittelyjäännöksen hyödyntämissuunnitelmista. Tiettyjen kriteereiden täytyttyä laitokselta voidaan vaatia myös laitoshyväksyntä, mikä tarkoittaa käytännössä monenlaisia valvonta- ja raportointivelvoitteita laitoksen ja sen lopputuotteiden turvallisen toiminnan ja käytön varmistamiseksi. Eviralla on myös mahdollisuus esittää biokaasulaitoksille prosessivaatimuksia mm. jäännöksen hygieenisen laadun varmistamiseksi.

Maatilakohtaisille biokaasulaitoksille ei yleensä aseteta prosessivaatimuksia eivätkä ne tarvitse laitoshyväksyntää eläinsivutuoteasetusta Eviralta, mikäli laitoksessa käsitellään tilan omia materiaaleja ja käsittelyjäännös hyödynnetään vain tilan omissa toiminnoissa. Samaa tulkintaa käytetään myös maatilojen yhteisillä biokaasulaitoksilla: jos laitoksella käsitellään sopimuksin suljetun tilaryhmän materiaaleja ja käsittelyjäännös hyödynnetään saman tilaryhmän toiminnoissa, laitoshyväksyntää ei tarvita.

Sen sijaan jos maatilakohtainen tai maatilojen yhteinen biokaasulaitos ottaa vastaan materiaaleja tilan/tilaryhmän ulkopuolelta ja/tai luovuttaa ja/tai myy käsittelyjäännöstä tilan/tilaryhmän ulkopuolelle, laitoshyväksyntää vaaditaan. Lopullisen laitoshyväksynnän tarpeen määrittää Evira, minkä vuoksi jokaisen biokaasulaitosta suunnittelevan kannattaa joka tapauksessa olla yhteydessä Eviraan jo laitosuunnittelun aikana. Tässä yhteydessä saa myös ajantasaiset tiedot vaatimuksista. Asiasta löytyy lisätietoa internetistä: <http://www.evira.fi/portal/fi/kasvit/viljely+ja+tuotanto/lannoitevalmisteet/>

3.2 Tarjouskilpailu ja laitostoimittajan valinta

Huolellinen esisuunnittelu luo vankan pohjan varsinaisen tarjouspyynnön laadintaan. Tarjouspyynnössä yksilöidään mahdollisimman tarkasti ainakin seuraavat asiat:

- syöttömateriaalit määrineen ja keskimääräisine ominaisuuksineen (mm. kuiva-aine, orgaaninen aine, typpipitoisuus hyvä esittää, jos tiedossa)
- kuvaus halutusta laitoksesta (räätälöity versio vai jokin ”perusratkaisu”)
 - laitososat: esisäiliö, reaktori, jälkikaasuallas, varastoaltaat jne.
 - haluttu kaasunhyödyntämismuoto (lämpö, CHP, liikennepolttoaine)
 - olemassa olevat ja hyödynnettävät rakenteet (mm. varastoaltaat)
- mahdolliset lisäoptiot, joita harkitaan ja joista halutaan lisätietoa
- laitoksen suunnittelun ja rakentamisen järjestelyt
 - avaimet käteen vai omaa osallistumista työvaiheisiin
 - toivottu aikataulu
- käyttöönoton järjestelyt, käyttökoulutus

Laitoksen sijoittelun suunnittelemiseksi tarjouspyyntöön on syytä liittää asemapiirros tilasta ja sen olemassa olevista rakenteista. Myös kuvaus tilan tuotannosta helpottaa tarjoajan suunnittelua ja mahdollistaa tilatoimintojen huomioimisen suunnitelmissa.

Lisäksi on hyvä esittää selkeästi, mitä muuta tietoa tarjoajan odotetaan tarjouksessaan esittävän. Sellaisia ovat mm. syöttömateriaalien perusteella arvioitu biokaasun ja energiantuotto sekä laitoksen arvioitu oma energiankulutus. Myös takuuajan, huollon ja varaosien järjestelyt kannattaa vaatia selvitettäväksi tarjouksessa.

Laitoksen eri osien investointihinnat kannattaa pyytää jollain tavoin eriteltynä, sillä se selkeyttää tarjousten vertailua ja omaa ymmärrystä kokonaishinnan koostumuksesta. Toimitus- ja maksuehdot sekä toivottu

maksuaikataulu on hyvä esittää jo tässä vaiheessa, vaikka niistä voidaan vielä myöhemmin tarvittaessa neuvotella.

Hyvin tärkeää on pyytää myös tarjoajan referenssit ja kuvaus kokemuksesta halutunlaisen biokaasulaitoksen rakentamisesta. Nämä luovat kuvaa tarjoajan osaamisesta ja uskottavuudesta biokaasutoimijana.

Tarjoajalle kannattaa myös tehdä selväksi, millä perusteella tarjouksia arvioidaan, ts. antaa hankintaperusteet. Yleensä niitä ovat hinnan lisäksi soveltuvuus käyttökohteeseen, eli kuinka hyvin tarjous vastaa tarjouspyynnössä kuvattua, toivottua ratkaisua, käyttöönoton, huollon, takuuajan järjestelyt sekä tarjoajan referenssit vastaavista kohteista.

Tarjouspyynnössä ilmoitetaan luonnollisesti myös yhteys henkilön nimi ja tiedot sekä tarjousten viimeinen jättöpäivä.

Tarjousten saavuttua toivottuun päivään mennessä päästään niitä vertailemaan. Vertailua kannattaa esimerkiksi taulukoida siten, että laittaa hankintaperusteet ja kunkin tarjouksen osalta niihin liittyvät, annetut tiedot taulukkoon selkeäksi kokonaisuudeksi. Vertailun helpottamiseksi hankintaperusteet voi myös pisteyttää siten, että lopulta korkeimman pistemäärän tai pistekeskisarvon saavuttanut tarjous voittaa.

Päätöksen synnyttyä kaikille tarjoajille on hyvä ilmoittaa hankintapäätös kriteereineen. Tämän jälkeen valitus laitostoimittajan kanssa voidaan aloittaa suunnitelmien tarkentaminen ja laatia tilaussopimus.

3.3 Rakentaminen

Avaimet käteen -periaatteella hankitussa biokaasulaitoksessa laitoksen tuleva omistaja ei luonnollisesti juuri rakentamiseen osallistu. Rakentamisen edistymistä halutussa aikataulussa kannattaa kuitenkin huolellisesti seurata ja dokumentoida rakentamisvaiheita mm. valokuvoin vastaisuuden varalle. Samalla oppii tärkeitä asioita omasta laitoksestaan. Myös sovitusta rakentamisaikataulusta kannattaa pitää kiinni.

Laitoksen tilaaja voi myös aktiivisesti osallistua rakentamiseen, mikäli hänellä / heillä on osaamista yhdessä tai useammassa työvaiheessa. Tilalliselle esimerkiksi kaivu- ja perustamistyöt voivat olla mahdolliset ja tarvittava kalusto tilalla olemassa. Luonnollisesti omalla työllä voi laskea investointikustannuksia.

3.4 Käyttöönotto ja kouluttautuminen

Rakentamisen loppuvaiheessa on syytä sopia tarkempi aikataulu laitoksen käyttöönotosta ja käyttökoulutuksesta laitostoimittajan kanssa. Laitostoimittajalla on oltava vastuu laitoksen käyttöönotosta vielä sovitun vastaanottoon asti. Tällä ajalla laitostoimittajan on pystyttävä osoittamaan tilaajalle, että laitos toimii halutusti.

Laitoksen käynnistämiseen tarvitaan soveltuva bakteeriympäristö, joka yleensä tuodaan reaktoriin jostain toiminnassa olevasta biokaasulaitoksesta. Käytännössä se siis on käsittelyjäännöstä, jossa elää tarvittavat mikrobipopulaatiot. Tämän jälkeen reaktoria täytetään haluttuun nestetilavuuteen, aletaan nostaa lämpötila halutulle korkeudelle ja odotellaan biologisen prosessin käynnistymistä antamalla mikrobeille varovasti jotain helposti hajoavaa syöttömateriaalia ravinnoksi. Kun biologisen toiminnan voidaan todeta käynnistyneen, voidaan siirtyä nostamaan kuormitusta tavoitellulle tasolle. Kuormituksen nosto kannattaa tehdä hiljalleen ja portaittain antaen prosessille aikaa sopeutua. Vielä tämän jälkeenkin laitoksen toimintaa seurataan huolellisesti ja testataan tekniikan toimivuus ja annetaan mikrobiologialle aikaa sopeutua uuteen syöttöönsä.

Käyttöönotto vie vähintäänkin viikkoja, joten sen aikana uudella laitoksen omistajalla on hyvää aikaa opetella laitoksen operointia ja tutustua prosessiinsa huolellisesti. Laitostoimittaja pitää erillisen käyttökoulutuksen, jonka aikana käydään läpi laitoksen tekniikka, tarvittavat rutiinitarkastukset, huolto-ohjelma ja turvallisuuskysymykset.

Vasta kun laitos toimii luvatusi ja koulutukset on pidetty, kannattaa ottaa laitos virallisesti vastaan ja siirtää vastuu sen toiminnasta itselle.

Erittäin tärkeää on muistaa, että biokaasuprosessin operointia ja syöttöä ei kannata muuttaa hätiköidysti ja liian isoina muutoksina kerralla. Kaikessa kannattaa olla maltillinen. Myös omalle prosessituntemukselle ja -ymmärrykselle kannattaa antaa aikaa kasvaa.

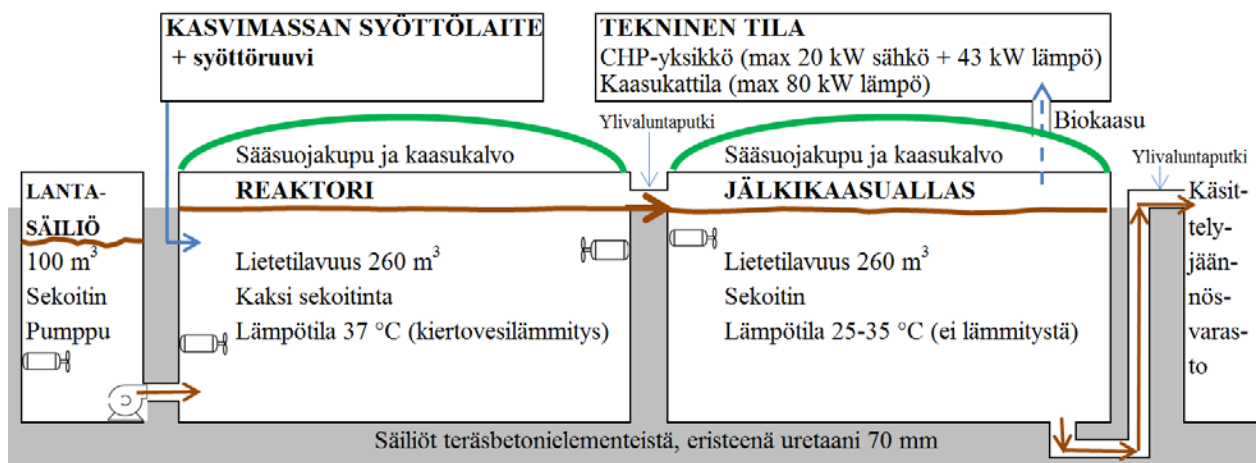
4 Biokaasukokeiden materiaalit ja menetelmät

Ville Pyykkönen ja Sari Luostarinen

BIOTILA-hankkeessa tehtiin useita koeajoja pääasiassa MTT:n maatilakohtaisella biokaasulaitoksella. Koetoimintaa tehtiin myös Savonia-amk:n koelaitteistolla, mutta tässä raportissa keskitytään maatilakoh-taisiin tuloksiin. Koeajoissa biokaasuprosessin perussyöttömateriaalina oli lypsylehmien lietelanta MTT Maaningan toimipisteen navetasta. Lisämateriaaleina tutkittiin säilörehun, sipulituotannon sivutuotteiden ja tuoreena korjatun ruokohelpin käyttöä.

4.1 MTT Maaningan maatilakohtainen biokaasulaitos

MTT Maaningan maatilakohtainen biokaasulaitos on suunniteltu tavanomaisen suomalaisen maitotilan biokaasulaitokseksi (Kuva 4.1). Se on mitoitettu käsittelemään vuosittain perussyöttönään 3500 m³ nau-dan lietelantaa sekä pientä määrää kasvibiomassaa (korkeintaan noin 300 t). Laitoksen on suunnitellut ja rakentanut Metener Oy Laukaasta ja se otettiin käyttöön kesällä 2009.



Kuva 4.1. MTT Maaningan biokaasulaitoksen yksinkertaistettu kaaviokuva.

Laitoksen perussyöttömateriaalina on MTT Maaningan toimipisteen navetassa muodostuva noin 100–120 lypsylehmän (+nuorkarjan) lietelanta. Lanta ohjataan navetan lietekuilusta betoniseen 100 m³ esisäiliöön, joka on sijoitettu maan alle. Esisäiliössä on lapasekoitin, joka sekoittaa lantaa automatiikan ohjaamana halutun ajan ennen kuin lantaa pumpataan biokaasulaitoksen reaktoriin. Sama pumppu voi pumpata lan-nan myös biokaasulaitoksen ohi suoraan poistokaivoon ja sieltä edelleen varastoaltaisiin tai laitoksen yhteyteen sijoitettuun Savonia-amk:n koelaitteistoon.

Biokaasuprosessiin voidaan syöttää myös kiinteää, korkean kuiva-ainepitoisuuden sisältävää syöttömateri-aaia, kuten kasvibiomassaa. Syöttö tapahtuu tällöin suoraan reaktoriin (josta tarkemmin alla) erillisen syöttölaitteen avulla. Syöttömateriaali tiputetaan sääsuojattuun, avautuvakattoiseen syöttösuppiloon, jon-ka pohjalla oleva ruuvi kuljettaa materiaalin suoraan reaktorin sisällä olevan massan joukkoon. BIOTI-LA-hankkeen koetoiminnan aikana syöttölaitetta ei ollut automatisoitu. Syöttöpöytä automatisointineen rakennettiin kesän 2012 aikana.

Biokaasulaitoksen reaktori on 300 m³ säiliö, joka on valmistettu betonisista lietesäiliöelementeistä ja si-joitettu pääosin maan alle. Maan eristävyvyyden lisäksi reaktori on eristetty kauttaaltaan 70 mm uretaanile-vyillä. Reaktorin nestetilavuus on 260 m³. Sen sisältöä sekoitetaan kahden, eri korkeudelle sijoitetun prop-ellisekoittimen avulla. Sekoittimien tehoa voidaan ohjata automaattisesti. Reaktorin lämpötila voidaan

pitää lämpötila-alueella 20...55 °C reaktorin seinämällä olevien lämmitysputkien avulla. Sekoittimet lämmitävät osaltaan reaktorilietettä. BIOTILA-hankkeen koetoiminnassa lämpötilana oli 37 °C; puhutaan siis mesofiilisestä biokaasuprosessista.

Reaktorin syötön yhteydessä reaktorista poistuu jo käsiteltyä massaa painovoimaisesti ylivaluntaputkea pitkin jälkikaasualtaaseen. Jälkikaasuallas on muutoin samanlainen säiliö kuin reaktorikin, mutta sitä ei lämmitetä ja siellä on vain yksi propellisekoitin. Jälkikaasualtaasta lopullinen käsittelyjännös siirtyy painovoimaisesti säiliön pohjalta lähtevän ylivaluntaputken kautta poistokaivoon, josta se pumpataan 200 metrin paineviemäriä pitkin tilalla jo aiemmin olleisiin, kolmeen varastoaltaaseen. Jännös hyödynnetään MTT Maaningan toimipisteen pelloilla orgaanisena lannoitteena.

Sekä reaktorin että jälkikaasualtaan päällä on katteena kaksiosainen, tiivis muovikate. Alimmainen kate toimii biokaasun keräimenä ja kaasuväestönä. Ylempi, näkyvä kate on sääsuoja, joka pidetään puhallettuna kuperaksi paineilman avulla.

Reaktorissa muodostuva biokaasu ohjataan ensin virtaamamittarille laitoksen tekniseen tilaan, josta se ohjautuu edelleen jälkikaasualtaan kaasuväestöön. Siellä reaktorikaasu ja jälkikaasu sekoittuvat toisiinsa. Seoskaasu ohjataan kondenssikaivon (kosteuden poisto) ja kaasun kulutusmittarin kautta kaasun hyödyn-tämislaitteille tekniseen tilaan. Tarvittaessa biokaasusta poistetaan rikkivetyä ennen kaasumootoria erillisen, rautaoksidilla täytetyn pesukolonnin avulla. Pääasiassa rikkivetyä kuitenkin poistetaan lisäämällä reaktorin kaasutilaan pientä määrää ilmaa mikrobiologisen rikkivedyn pelkistämisen mahdollistamiseksi.

Laitoksessa muodostuva biokaasu hyödynnetään 80 kW lämpökattilan (Jäspi; poltin: Oilon) ja 63 kW (20 kW_{el}+43 kW_{th}, PowerTherm) kaasumootorin (CHP) avulla. CHP-yksikön tuottamasta sähköstä biokaasulaitos käyttää osan omakulutuksena (sekoittimet, pumput ym.) ja ylijäämä eli nettosähkö kulutetaan navetalla korvaten ostosähköä. CHP-yksikön ja kattilan tuottamasta lämpöenergiasta osa käytetään reaktorin lämmitykseen ja loput navetalla ja MTT Maaningan toimipisteen lämpöverkossa. Tällöin korvataan hake-lämpöä sekä ajoittain varavoimana olevaa öljylämmitystä.

Laitoksen tekninen tila on kaksiosainen kontti: toisessa osassa on pääosa laitoksen sähkölaitteista sekä automatiikkaa ohjaava tietokone, kun taas toisessa osassa ovat biokaasun hyödyntämiseen liittyvät laitteet ja sääsuojuakupujen paineilmapuhaltimet. Tilat on erotettu toisistaan turvallisuussyistä (ATEX-vaatimukset).

Automatiikka huolehtii pääosasta laitoksen toimintoja ml. esisäiliön sekoitus, laitoksen lantasyöttö, reaktorin lämpötila ja sekoitus, jälkikaasualtaan sekoitus, jännöksen poisto ja biokaasun hyödyntäminen. Laitoksen käyttöön liittyy kuitenkin myös päivittäistä työtä vaativia toimenpiteitä, kuten rutiininomainen toiminnan tarkastaminen sekä kasvibiomassan syöttö. Tarkastusrutiineja ovat mm. laitteiden toimivuuden tarkastaminen, kaasuväestöjen ja niiden varoventtiilien tarkastaminen sekä laitoksen kaasuntuoton ja biokaasun metaaninpitoisuuden seuranta. Pelkällä lantasyötöllä vaadittu päivittäinen työmäärä on puolisen tuntia kasvisyötön pidentäessä päivittäisen työajan lähelle 1,5 tuntia. Kasvisyötön automatisoinnin lisääminen (kesä 2012) vähentää täten merkittävästi laitoksen vaatimaa työaikaa. Tutkimustoiminnan vaatimat lisätyöt liittyvät näytteenottoon ja niiden käsittelyyn. Niitä ei ole huomioitu edellä mainittuun työaikaan.

Lisäksi laitoksen operointiin liittyy ajoittaisia huoltotoimenpiteitä. Sekoittimet on huollettava öljynvaihtoineen noin kerran vuoteen, samoin pumput. Kaasukattilan pääasiallinen huoltotoimenpide on polttimeen ajoittainen puhdistaminen. Kaasumootoria huolletaan valmistajan huolto-ohjelman mukaan, kuten mitä tahansa mootoria (öljynvaihdot, tulpanvaihdot jne. tiettyjen käyttötuntien jälkeen).

4.2 Syöttömateriaalit

Tutkituista syöttömateriaaleista kaikissa kokeissa käytettiin MTT Maaningan toimipisteen navetan lypsy-lehmien lietelantaa. Lannan ominaisuudet vaihtelivat kokeiden välillä sekä kokeiden aikana navetan toimien sekä vuodenajan mukaan (Taulukko 5.1). Vaihtelua aiheuttivat mm. navetan käyttöönoton ja myöhemmän normaalin toiminnan eroavaisuudet, lannan vaihteleva liikkuminen navetan lietekuulusta esisäiliöön, keväiset sulavedet jaloittelutarhasta sekä puristenesteet rehusiiloista. Maatilamittakaavan koetoiminnassa tehtiin kaksi koeajoa pelkällä lannalla (syksy 2010, talvi 2011/2012). Toisen koeajon aikana kokeiltiin laitoksen sekoittamisen vähentämisen vaikutusta laitoksen sähköenergiantarpeeseen.

Maatilamittakaavassa toteutettiin lisäksi kolme koeajoa lannan ja kasvibiomassan yhteiskäsittelyinä. Ensimmäisessä koeajossa käsiteltiin lannan lisäksi nurmisäilörehua, toisessa sipulituotannon sivutuotteita ja kolmannessa tuoreena korjattua ruokohelpeä (Taulukko 5.1).

Pohjois-Savossa on myös perunan tuotantoa ja jalostusta, josta muodostuvien sivutuotteiden biokaasukäyttöä ei tutkittu maatilamittakaavassa koejärjestelyjen osoittauduttua liian hankaliksi käytännössä (kuljetukset, säilöntä, sivutuotteiden muodostumisajankohdat). Perunasivutuotteiden soveltuvuutta biokaasukäyttöön tutkittiin kuitenkin laboratoriomittakaavassa määrittämällä metaanintuottopotentiaalit perunan-kuorinnan sivutuotteelle (ominaisuudet: TS, VS), kokonaiselle hukkaperunalle (TS, VS) sekä kuorintasivutuotteen ja lannan yhteiselle seokselle.

4.3 Koeasetelmat

Maatilamittakaavan biokaasulaitoksen kokeissa lähtökohtana oli, että kaikki tilan navetassa (100–120 lypsylehmää+vähäinen määrä nuorkarjaa) tuotettu lietelanta hyödynnetään biokaasulaitoksessa vuoden ympäri. Lantaa on arvioitu muodostuvan noin 3500 m³/a, joten päivittäiseksi lantasyötöksi saatiin noin 10 m³/vrk.

4.3.1 Lannan käsittely yksin

Ensimmäisessä lietelantakokeessa selvitettiin alustavasti tilan lietelannan käsittelyä biokaasulaitoksessa yksin ja ilman mitään erityistä laitoksen operoinnin optimointia. Toisessa lietelantakokeessa pyrittiin vähentämään laitoksen omaa sähkönkulutusta sekoitusta vähentämällä. Samalla tutkittiin erilaisten sekoitusnopeuksien vaikutusta metaanintuottoon.

4.3.2 Lannan ja erilaisten kasvibiomassojen yhteiskäsittely

Yhteiskäsittelykokeissa tilan lietelannan (10 m³/d) lisäksi käsiteltiin erilaisia kasvibiomassoja Pohjois-Savon alueelta. Koeajoja tehtiin kolme ja niissä käytetyt kasvibiomassat ja niiden päivittäiset syöttömäärät olivat:

- nurmisäilörehu (timotei 55 %, nurminata 45 %) 800 kg/d
- sipulimassa (sipulituotannon sivutuotteina syntyviä naatteja ja kuoria) 800 kg/d
- tuoreena korjattu ruokohelppi 700 kg/d

800 kg/vrk säilörehumäärä vastaa vuodessa n. 290 tonnia, eli 6 t TS/ha satotasolla n. 14 peltohehtaarin nurmentuottoa. Kotieläintila voisi mahdollisesti tuottaa eläinten ravinnoksi tarkoitettua rehun viljelyn ohessa biokaasulaitoksen syötettä lisäämättä viljelyalaa. Jos esimerkiksi lannoitusta tehostamalla kuiva-ainesato nousisi 3 t TS/ha (TS 30 %, 10 t TP/ha), voisi koeasetelman mukaisen sadon tuottaa n. 10 reuhehtaarilla.

Sipulituotannon sivutuote lienee erikoisuus pohjoissavolaisessa maataloustuotannossa. Toimija on kuitenkin merkittävä tuottaja ja tuotetut sivutuotemäärät suuria. Sipulituotannon sivutuotetta syntyy 800 kg/vrk noin 58 hehtaarilla (5 t TP/ha) tuotetun sipulimäärän jalostuksesta.

Biokaasuntuotantoon menevä ruokohelppi korjattiin kesällä, paalattiin ja säilöttiin säilörehunurmen tavoin. Polttolaitosten käyttämä, talvehtinut keväällä korjattava ruokohelppi-kuloheinä soveltuu huonosti biokaasutukseen korkean ligniinipitoisuutensa vuoksi.

4.3.3 Lietelannan ja siitä mekaanisesti separoidun kuivajakeen yhteiskäsittely

Pohjois-Savon alueella on useita tilakeskittymiä, joissa olisi periaatteessa mahdollista rakentaa tilojen yhteinen biokaasulaitos. Laitokseen voisi haluttaessa ottaa vastaan myös kauempana sijaitsevilta tiloilta pelkkää separoitua kuivajakea. Separoitu kuivajake tuottaa enemmän biokaasua kuljetettua tuoretonnia kohden ja biokaasuntuoton kannalta turhan veden kuljetukselta säästyttäisiin. Separoitu nestejake voidaan käyttää tiloilla sellaisenaan typpipitoisena lannoitteena, kun taas suuri osa fosforista siirretään kuivajakeen mukana biokaasulaitokselle. Tila voi ottaa biokaasulaitoksen jäännöstä takaisin sen verran kuin fosforia kuivajakeen mukana menetetään, jos haluaa. Toisaalta tila voi myös sopia laitoksen kanssa, ettei se

ota jäännöstä vastaan ollenkaan. Tällainen toimintatapa voi siis poistaa tilalta fosforirajoitteen kotieläin- tuotannon lisäämisessä tai väliaikaisena toimenpiteenä edesauttaa tilan fosforitaseen korjaamista.

Tätä vaihtoehtoa ajatellen kokeiltiin lietelannan separointia ruuvipuristimella (Bauer Separator S 655, seulakoko 1 mm). Lietelantaa separoitiin kolmena eri ajankohtana, joina sen kuiva-ainepitoisuus vaihteli (TS 9,9 %, 7,2 % ja 3,6 %). Laihin lannoista oli laimentunut jaloittelutarhan vesillä sekä säilörehun puristenesteillä. Keskivertolietelannan (TS 7,2 %) sekä siitä separoitujen kuiva- ja nestejakeiden metaanintuottopotentiaalit määritettiin. Lisäksi metaanintuottopotentiaali määritettiin lietelannan ja separoidun kuivajakeen seokselle suhteessa 88:12. Suhdeluku otettiin erään pohjoissavolaisen tilakeskittymän lietelannasta sekä lähiseudulla sijaitsevien muiden tilojen mahdollisen kuivajakeen määrän perusteella.

Separoinnille laskettiin massa- ja ravinnetaseet kaikille kolmelle lannalle. Laskennallisesti määritettiin myös vastaavat taseet väkevimmän ja laihimman lannan metaanintuottopotentiaalille.

Tutkimustuloksia hyödynnettiin kuvitteellisen tilakeskittymän yhteisen biokaasulaitoksen massa-, ravinne- ja energiataseiden arvioinnissa. Menetelmä on selitetty tulosten yhteydessä osiossa 5.3.4.

4.4 Analytiikka ja laskut

4.4.1 Metaanintuottopotentiaali (BMP)

Säilörehun metaanintuottopotentiaalikoe tehtiin kolmena rinnakkaisena 1 l lasipulloissa (liettilavuus 0,75 l) 35±1 °C:ssa. Pulloihin lisättiin laukaalaisen maatilakohtaisen biokaasureaktorin jäännöstä mikrobiympäpinä (300 ml) ja rehua niin, että VS_{rehu}/VS_{ymppi} -suhde oli 1:1. Tämän jälkeen pullot täytettiin 0,75 litraan hanavedellä. Pulloihin lisättiin pH-puskuriksi 3 g $NaHCO_3$ /l. Kaasutilasta poistettiin ilma huuhtelemalla sitä viiden minuutin ajan N_2/CO_2 -kaasuseoksella (70:30, Aga Oy). Pullot suljettiin butyylikumikorkeilla. Metaanimittaukset tehtiin kaasukromatografisesti liekki-ionisaatioteknoreilla (Perkin–Elmer Clarus 500, Alumina kolonni 30 m * 0,53 mm, injektori ja detektor 225 °C, uuni 100 °C, kantajakaasu argon). Biokaasu kerättiin alumiinipusseihin ja sen tilavuus mitattiin vedensyrjäytysperiaatteella.

Kaikki muut metaanipotentialikokeet suoritettiin kolmena rinnakkaisena 500 ml lasipulloissa, joihin kaikkiin lisättiin sama määrä, 260 g mikrobiymppiä. Näytteen ja ympin VS/VS -suhde kokeissa oli 1. Näytemäärä mitoitettiin siten, että lisätyssä näytemäärässä oli kaikilla koejäsenillä sama määrä orgaanista kuiva-ainetta. Pullot täytettiin ionivaihdetulla vedellä 400 ml nestetilavuuteen, mikä vakioi orgaanisen kuiva-aineen pitoisuudet. Pulloihin lisättiin pH:n puskuroimiseksi natriumbikarbonaattia ($NaHCO_3$) annostuksella 3 g/l. Näyteseosten pH mitattiin ennen kokeen alkua, ja tarkistettiin että pH:t olivat yli 7,2. Näyteseosten pH:t olivat vaadittavalla tasolla eikä pH:n nostoa tarvittu. Pullot suljettiin kaasutiiviisti ja korkeista lähtevät kaasuletkut kiinnitettiin. Pulloissa muodostuva biokaasu johdettiin yksikköön, jossa biokaasun sisältämä hiilidioksidi reagoi natriumhydroksidin kanssa ja sitoutuu. Jäljelle jäävä metaani johdettiin edelleen kaasun tilavuusmittaukseen, joka perustuu nesteensyrjäytykseen. Ennen kokeen alkua pullojen kaasutila ja letkulinjat huuhdeltiin typpikaasulla, jotta olosuhteet saatiin hapettomiksi.

4.4.2 Maatilamittakaavan kaasuntuotto- ja pitoisuusmittaukset

MTT Maaningan maatilakohtaisessa biokaasulaitoksessa mitataan tunnin välein reaktorissa tuotetun biokaasun määrä (paljekaasumittari G4 1-YHT) sekä reaktorin ja jälkikaasualtaan seoskaasun kulutus (paljekaasumittari BK-G25) kaasukattilassa ja/tai CHP-yksikössä. Reaktorissa tuotettu biokaasun määrä mitataan siis omalla mittarillaan, kun taas jälkikaasualtaassa muodostuneen jälkikaasun määrä saadaan laskennallisesti vähentämällä reaktorissa tuotettu biokaasu kaasun hyödyntämislaitteilla kulutetusta seoskaasusta. Reaktorikaasun metaanipitoisuus määritettiin jatkuvasti tunnin välein (Simrad GD10P - IR Gas Detector). Reaktorissa ja jälkikaasualtaassa tuotetun kaasun metaanipitoisuus oletettiin samaksi. Ajoittain määritettiin myös biokaasun metaani-, hiilidioksidi-, happi-, ja rikkivetypitoisuutta Combimass GA-m Gas Analyser -mittarilla.

Biokaasun virtaamamittareiden kaasuntuoton ja -kulutuksen kuutiomäärät (m^3) muutettiin normaalikuutiometreiksi (Nm^3) kaavalla 1:

$$V_2 = P_1 * V_1 * T_2 / T_1 * P_2 \quad (1)$$

V_1 mitattu kaasutilavuus (paljemittari), m^3

V_2	kaasun tilavuus NTP-olosuhteissa, Nm ³
P_1	vallitseva ilmanpaine MTT Maaningan sääasemalla (Ilmatieteen laitos)+sääsuojakuvun lisäpaine (n. 0,15–0,2 kPa)
P_2	kaasunpaine NTP-olosuhteissa (101,3 kPa)
T_1	paljekaasumittarin lämpötila, K
T_2	kaasun lämpötila NTP-olosuhteissa, 273,15 K (0 °C)

Paljekaasumittarin lämpötilana käytettiin lietelannan ja säilörehukokeen aikana mitattua mittarihuoneen ilman lämpötilaa. Muissa kokeissa kaasumittarin lämpötila mitattiin 10*10*5 cm styroksieristeen alta mittarin kotelon pinnasta.

4.4.3 Lietteiden ja kasvibiomassojen analyysit

Biokaasulaitoksesta otettiin viikoittain (kokeiden loppuvaiheessa kaksi kertaa viikossa) näytteet käsittelemättömästä lietelannasta sekä reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) käsittelyjäännöksistä. Lietelantanäytteet otettiin upottamalla 10 litran ämpäri sekoituksen jälkeen biokaasulaitoksen esisäiliön pohjaan. Toisen lietelannan käsittelykokeen (Lantakoe 2) aikana lietelantaa pumpattiin näytteenottoa varten reaktorin syöttöpumpulla esisäiliöstä erilliseen 1 m³ kokoiseen säiliöön. Reaktorin käsittelyjäännösnäyte otettiin lietepumppauksen yhteydessä reaktorin ja JKA:n välisestä ylivaluntaputkesta. JKA:n käsittelyjäännösnäyte otettiin altaan pohjalta lähtevän ylivaluntaputkesta. Näytteistä määritettiin viikoittain pH (VWR pH100), kuiva-ainepitoisuus (TS) sekä Lantakoe 2:n aikana myös orgaaninen kuiva-aine (VS). Näytteitä on otettu jatkuvasti myös kasvibiomassoista. Valikoiduista näytteistä teetettiin MTT:n laboratorioissa seuraavaa analytiikkaa:

kuiva-aine (TS), orgaaninen aine (VS), haihtuvat rasvahapot (VFA), liukoinen kemiallinen hapenkulutus (COD_{sol}), kokonaistyyppi (N_{tot}), ammoniumtyppi (NH₄⁺), kokonaisfosfori (P_{tot}), vesiliukoinen fosfori (P_{liuk}) sekä kokonaiskalium (K_{tot}). Kasvibiomassoista määritettiin valikoidusti myös kuitupitoisuudet ja sulavuus: ADF, NDF, ligniini, orgaanisen aineen sellulaasiliukoisuus ja D-arvo.

4.4.4 Biokaasulaitoksen viipymä- ja kuormituslaskelmat

Biokaasulaitoksen hydraulisen viipymän (HRT) ja orgaanisen kuormituksen (OLR) laskennassa syötteiden (lietelanta ja kasvimassat) tilavuuspainoksi oletettiin 1000 kg/m³.

Reaktorin ja jälkikaasualtaan HRT:t laskettiin kaavalla 2:

$$HRT = V_R / V \quad (2)$$

HRT	hydraulinen viipymä (d)
V_R	reaktorin tai jälkikaasualtaan lietetilavuus (260 m ³)
V	reaktorin syötteen tilavuus aikayksikössä (m ³ /d, 1 m ³ = 1 tonni)

Biokaasulaitoksen (reaktorin) orgaaninen kuormitus (OLR) laskettiin kaavalla 3:

$$OLR = m * c / V_R \quad (3)$$

OLR	orgaaninen kuormitus (kgVS/m ³ d)
m	syötteen massa (t/d)
c	syötteen VS-pitoisuus
V_R	reaktorin lietetilavuus

Kuormituslaskelmia varten lietelannan TS-pitoisuuden oletettiin muuttuvan mittauspisteiden (TS-analyysit n. viikon välein) välillä lineaarisesti, jolloin analyysien välillä olevien päivien lantasyötteen TS-pitoisuus laskettiin kaavalla 4:

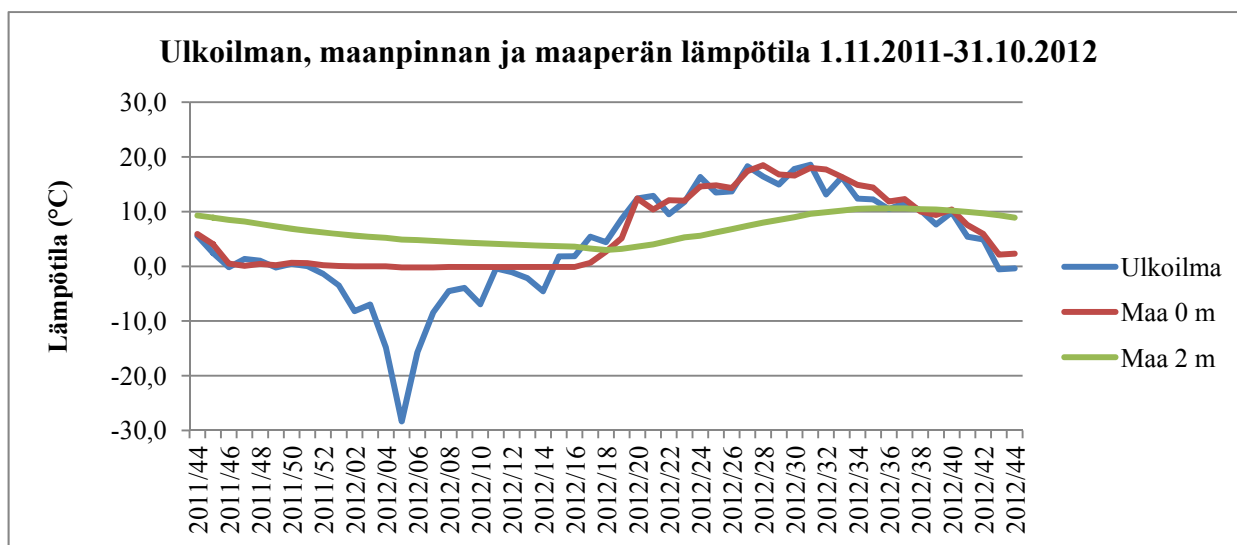
$$c_p = (c_2 - c_1) / d_n * d_p + (c_2 - c_1) / d_n \quad (4)$$

c_p	lietelannan laskennallinen TS-pitoisuus (%) ko. analyysien välisenä päivänä
-------	---

c_2	jälkimmäinen TS-analyysitulokset (%)
c_1	ensimmäinen TS-analyysitulokset (%)
d_n	jälkimmäistä TS-analyysiä edeltävien päivien kokonaislukumäärä (1. analyysin jälkeinen päivä = 2)
d_p	ko. päivän järjestysnumero alkaen 1. analyysistä (1. analyysin jälkeinen päivä = 2)

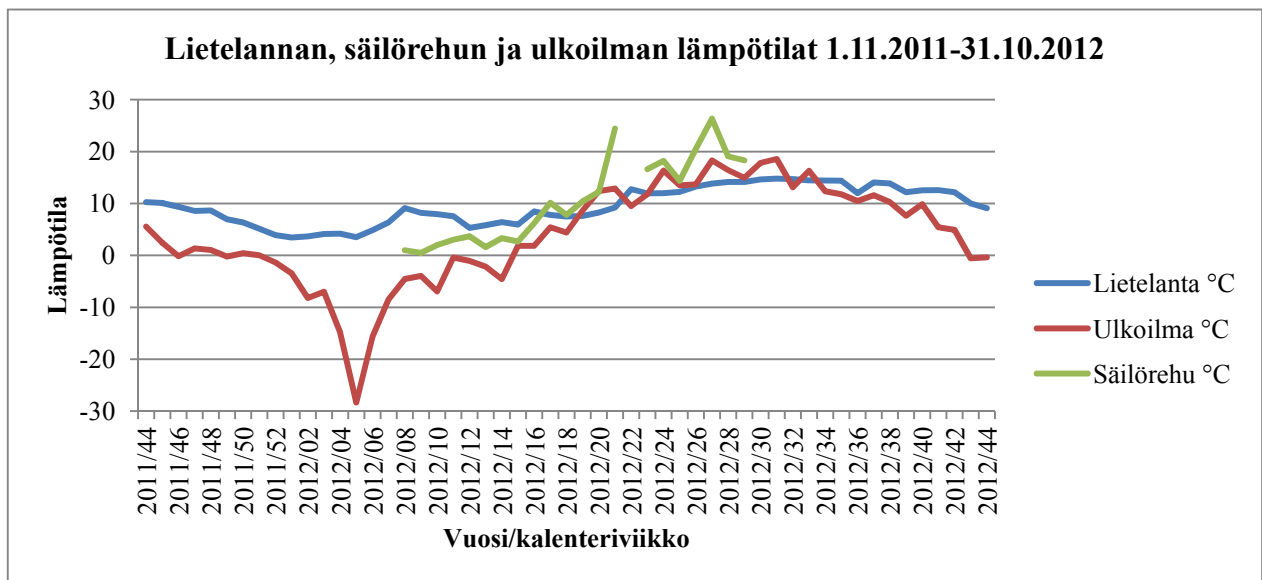
4.4.5 Lämpötilamittaukset ja biokaasulaitoksen energiataselaskelmat

Biokaasulaitoksen reaktorin lämpötalouden mallintamista varten mitattiin ulkoilman, maaperän ja syötteiden lämpötiloja (Kuva 4.2). Ulkoilman ja maaperän lämpötila mitattiin sääasemalla 200 metrin päässä biokaasulaitoksesta. Ilman lämpötila oli keskimäärin 4,0 °C ja viikkokeskiarvojen vaihteluväli oli -28,3...18,6 °C. Maaperän lämpö 2 m syvyydessä oli keskimäärin 6,8 °C (3,0...10,6 °C) ja maan pinnassa 6,3 °C (-0,2...18,5 °C).



Kuva 4.2. Ulkoilman, maanpinnan ja maaperän lämpötilat viikkokeskiarvoina 1.11.2011–31.10.2012.

Lietelantasyötteen lämpötila mitattiin esisäiliöön upotetuilla dataloggereilla (HOBO U12–001; Kuva 4.3). Lannan lämpötila oli vuoden mittaisella seurantajaksolla (1.11.2011–31.10.2012) keskimäärin 9,5 °C (vuorokauden keskiarvojen vaihteluväli 3,5...14,8 °C) ja ulkoilman lämpötila 4,0 °C (-28,3...18,6 °C). Biokaasulaitoksen säilörehusyötteen lämpötila oli 22 viikon seurantajaksolla (20.2...22.7.2012) keskimäärin 10,6 °C ja keskimäärin 4,5 °C vastaavan jakson ulkoilman lämpötilaa korkeampi. Mallinnuksessa oletettiin, että kasvimassan lämpötila on aina vähintään 0 °C ja muulloin 4,5 °C korkeampi kuin ulkoilman lämpötila.



Kuva 4.3. Ulkoilman ja biokaasulaitoksen lietelantasyytteen lämpötilat 1.11.2011–31.10.2012 sekä biokaasulaitoksen säilörehusyytteen lämpötila 20.2.–22.7.2012 viikkokeskiarvoina.

Biokaasureaktorin lämpö pidettiin mesofiilille mikrobeille suotuisassa 37 °C lämpötilassa, joten reaktoriin johdettiin lämpöenergiaa. Reaktorin lämpöenergian (lämmitysveden) tarve laskettiin kaavalla 5:

$$E_{th} = E_{syöte} + E_{häviö} - E_{mikr} - E_{seko} \quad (5)$$

E_{th} biokaasulaitoksen reaktorin lämpöenergian kulutus (lämmitysveden energiasisältö, kWh/d)
 $E_{syöte}$ syötteiden lämmittämiseen 37 °C:een tarvittava energiamäärä (kWh/d)

$E_{häviö}$ lämpöhäviö reaktorista ympäristöön (kWh/d), ks. kaava 8

E_{mikr} biokaasureaktorin mikrobin tuottama lämpö (kWh/d)

E_{seko} reaktorin sekoittimien sähkönkulutus (kWh/d)

Reaktorin syötteiden lämmittämiseen tarvittava teoreettinen lämpöenergiämäärä laskettiin kaavalla 6:

$$E_{syöte} = C * m * \Delta T \quad (6)$$

C syötteiden ominaislämpökapasiteetti (kWh/(t°C)), ks. kaava 7

m syötteiden massa (t/d)

ΔT reaktorin lämpötilan (37 °C) ja syötteiden lämpötilan erotus

Kaavassa 5 syötteiden (lietelanta ja säilörehu) ominaislämpökapasiteetti (C , kJ/kg°C) laskettiin kuten Chen (1983), joka muodosti regression tekemiensä naudanlannan ominaislämpökapasiteetin mittausten perusteella (kaava 7):

$$C = 4,19 - 0,0275 * TS \% / 3,6 \quad (7)$$

C syötteiden ominaislämpökapasiteetti (kWh/(t°C))

$TS \%$ syötteiden (naudanlanta) TS-pitoisuus (%)

Lämpöhäviö reaktorista ympäristöön laskettiin kaavalla 8:

$$E_{häviö} = U * A * \Delta T \quad (8)$$

U reaktorin osan lämmönläpäisykerroin (W/(m²K)), ks. kaava 9

A reaktorin osan pinta-ala (m²)

ΔT reaktorin sisälämpötilan (37 °C = 310,15 K) ja ympäristön lämpötilan (K) erotus

Lämmönläpäisykerroin laskettiin kaavalla 9:

$$U = 1 / (R_1 + R_2 + R_n \dots) \quad (9)$$

$R_1 \dots R_n$ reaktorin seinämien eri materiaalien lämmönvastukset ($(m^2K)/W$)

Lämmönvastus laskettiin kaavalla 10:

$$R = d / \lambda \quad (10)$$

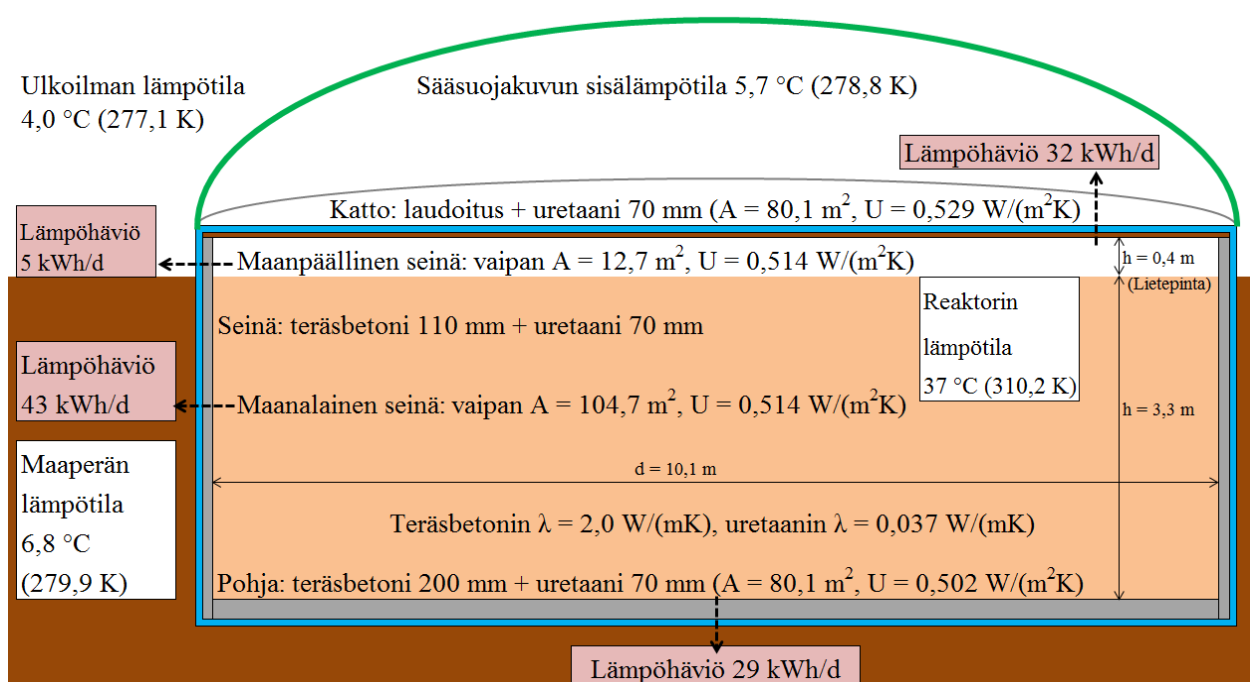
d reaktorin seinämän materiaalin paksuus (m)

λ reaktorin seinämän materiaalin lämmönjohtavuus ($W/(mK)$)

Mallinnuksessa käytetyt reaktorin mitat ja seinämien materiaalit on esitetty kuvassa 4.4. Lämpötilamittausten (24.10.2012–25.2013) perusteella muodostettiin yhtälö ($R^2 = 0,93$) reaktorin sääsuojakuvun sisälämpötilan laskemiseksi (kaava 11):

$$T_{\text{sääkupu}} = 0,7725 * T_{\text{ilma}} + 64,731 \quad (11)$$

T_{ilma} ulkoilman lämpötila (K)



Kuva 4.4. MTT Maaningan sylinterinmuotoisen biokaasureaktorin lämpöhäviöiden laskennassa käytetyt pinta-alat (A), lämmönjohtavuudet (λ) ja lämmönläpäisykertoimet (U) sekä vuoden tarkastelujakson keskiarvoiset ympäristön lämpötilat ja lämpöhäviöt reaktorin eri osista (kWh/d).

Mikrobien tuottaman lämmön oletettiin olevan 0,21 kWh reaktorin tuottamaa metaanikuutiota kohti. Luku perustuu Lübkenin ym. (2007) tutkimukseen, jossa mallinnettiin mikrobien lämmöntuottoa karjanlannan ja seosrehun yhteiskäsittelyssä (syötteen lanta:rehu VS-suhde 80:20).

Mallissa reaktorin sekoittimien kuluttaman sähköenergian oletettiin muuttuvan lämpöenergiaksi (liikeenergia ja reaktorilietteeseen sijoitettujen moottoreiden hukkalämpö).

Biokaasulaitoksen sähkönkulutus laskettiin sähkönkulutusmittareiden lukemien perusteella kaavalla 12 (ks. Kuva 4.5):

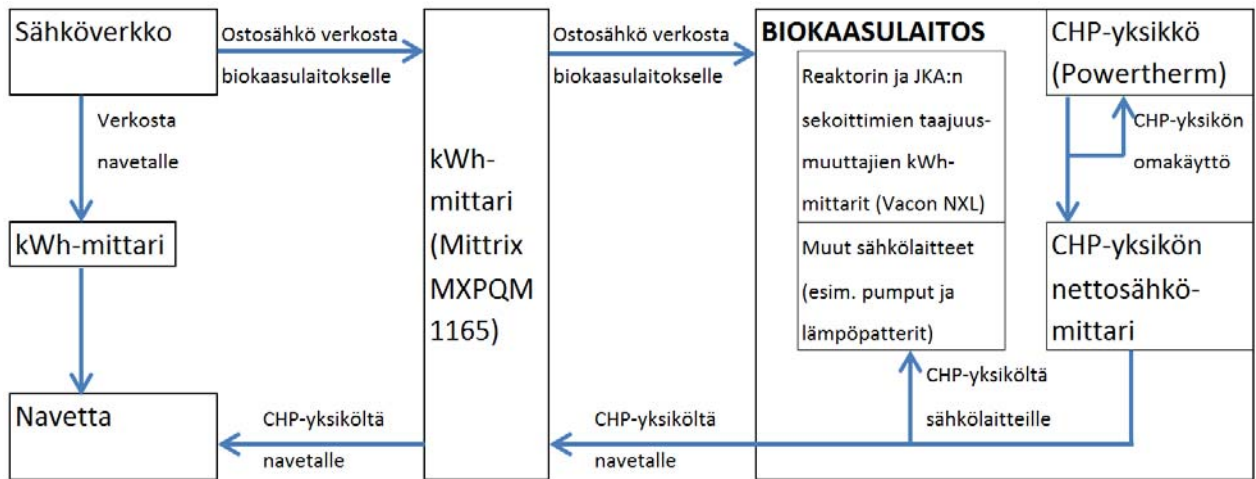
$$E_{\text{omakulu}} = E_{\text{osto}} + E_{\text{netto}} - E_{\text{CHP}} \quad (12)$$

E_{omakulu} biokaasulaitoksen sähkön omakulutus, kWh/d

E_{osto} ostosähkön kulutus biokaasulaitoksella, kWh/d

E_{netto} biokaasulaitoksen (CHP-yksikön) navetalle tuottama nettosähkö, kWh/d

E_{CHP} CHP-yksikön sähköntuotto, kWh/d



Kuva 4.5. Maaningan biokaasulaitoksen sähkömittaukset.

Reaktorin ja jälkikaasualtaan sekoittimien sähkönkulutusta mitattiin niiden taajuusmuuttajien kWh-mittareilla. Lietelannan käsittelyn aikainen sekoittimien sähkönkulutus mitattiin Lantakoe 2:n aikana ja tulosta sovellettiin myös Lantakoe 1:een. Yhteiskäsittelyn aikainen sekoittimien sähkönkulutus mitattiin BIOTILA-hankkeen jälkeen toteutetussa lietalannan ja säilörehun yhteiskäsittelykokeessa kesäheinäkuussa 2012. Laitoksen muiden sähkölaitteiden (esim. paineilmapuhaltimet, polttolaitteet, teknisen tilan sähköpatterit sekä esisäiliön lietepumppu ja sekoitin) energiankulutus laskettiin vähentämällä koko laitoksen kulutuksesta reaktorin ja JKA:n sekoittimien sähkönkulutus.

Biokaasulaitoksen teknistä tilaa ei tarvitse lämmittää kesä-elokuussa. Laitoksen kesäkuusien sähkönkulutus mitattiin em. yhteiskäsittelykokeen aikana kesä-heinäkuussa 2012. Vuoden tarkastelujakson (1.11.2011–31.10.2012) syys-toukokuun aikainen teknisen tilan lämpöpattereiden sähkönkulutus laskettiin vähentämällä koko laitoksen sähkönkulutuksesta kesäkuukausien sähkönkulutus. Teknistä tilaa lämmittävien sähköpattereiden energiankulutukseen vaikuttavat ulkoilman lämpötilan lisäksi esim. termostaattien asetuslämpötilat, polttolaitteiden tuottama hukkalämpö (onko kaasukattila ja/tai CHP-yksikkö päällä) sekä teknisen tilan tuuletusasetukset.

Energiataselaskelmissa käytetty CHP-yksikön (PowerTherm) hyötysuhde mitattiin yhteensä 9 päivän (6+3 d) aikana 29.5.–11.6.2012. CHP-yksikön sähköntuottomittari ilmoittaa nettosähkön tuotomäärän, eli generaattorin sähköntuotomäärän, josta on vähennetty laitteen oma sähkönkulutus. Laskelmissa oletettiin, että CHP-yksikön kapasiteetti riittää polttamaan tuotetun kaasun.

4.4.6 Separoinnin massatase-laskut

Separoitavasta lietalannasta sekä siitä syntyvistä kuiva- ja nestejakeista määritettiin TS-pitoisuudet. TS-pitoisuuksien perusteella laskettiin separoinnista syntyvän kuivajakeen tuoremassa kaavalla 13:

$$m_{\text{kuiva}} = (TS_{\text{lanta}} - TS_{\text{neste}}) / (TS_{\text{kuiva}} - TS_{\text{neste}}) * m_{\text{lanta}} \quad (13)$$

- m_{kuiva} separoinnissa syntyvän kuivajakeen tuoremassa (FM)
- TS_{lanta} separoitavan lietalannan TS-pitoisuus, TS % / 100
- TS_{neste} separoinnissa syntyvän nestejakeen TS-pitoisuus, TS % / 100
- TS_{kuiva} separoinnissa syntyvän kuivajakeen TS-pitoisuus, TS % / 100
- m_{lanta} separoitavan lietalannan tuoremassa (FM)

Nestejakeen tuoremassa laskettiin lietalannan ja kuivajakeen tuoremassojen erotuksena.

5 Maatilamittakaavan biokaasukokeiden tulokset

Ville Pyykkönen, Sari Luostarinen ja Jukka Rintala

Maatilamittakaavan kokeita tehtiin MTT Maaningan biokaasulaitoksessa. Koeajojen yhtenä syöttömateriaalina oli kaikissa kokeissa lypsylehmien lietelanta, jota käsiteltiin yksin sekä

yhdessä erilaisten kasvibiomassojen kanssa (säilörehu, sipulituotannon sivutuotteet, tuoreena korjattu ruokohelpi). Koeajojen tarkoituksena oli selvittää pohjoissavolaisten maatilojen mahdollisten syöttömateriaalien soveltuvuutta, metaanintuottoa, ravinnevaikutuksia ja käytännön hyödyntämistä maatilakohtaisessa biokaasulaitoksessa. Koeajot pyrittiin tekemään mahdollisimman yksinkertaisesti ja tilatoimintaa matkien. Tässä osiossa kerrotaan tarkemmin maatilamittakaavan koeajojen tuloksista.

5.1 Maatilamittakaavan syötteiden biometaanipotentiaalit (BMP)

Syötteiden maksimaalista metaanintuottopotentiaalia (BMP) tutkittiin laboratoriossa 37–80 vrk ajan kestäneillä panoskokeilla (Taulukko 5.1). Lehmän lietelannan metaanintuottopotentiaali oli 10–19 Nm³ metaania/tuoretonni, mikä vastaa 60–190 kWh:n energiamäärää. Lietelannan orgaaninen kuiva-aine tuotti eri kokeissa 196–227 Nm³CH₄/tVS (Taulukko 5.1).

Taulukko 5.1. Maatilalaitoksen lietelantasyötteiden biometaanipotentiaalit sekä TS- ja VS-pitoisuudet.

Biomassa	TS %	VS %	Nm ³ CH ₄ / tVS	Nm ³ CH ₄ / tTS	Nm ³ CH ₄ / tTP
Lietelanta v. 2009 ^a	5,7	4,6	227	183	10,4
Lietelanta v. 2010 ^b	8,0	6,6	225	184	14,7
Lietelanta v. 2011 ^c	10,7	9,1	207	177	18,8
Lietelanta v. 2012 ^d	7,2	5,8	196	158	11,4

a Lannan ja säilörehun yhteiskäsittelykoe; b Lannan ja sipulin yhteiskäsittelykoe;

c Lannan ja ruokohelven yhteiskäsittelykoe sekä Lantakoe 1; d Lantakoe 2

Nurmisäilörehu (TS 26 %, D-arvo 765) tuotti metaania 86 Nm³/t (364 Nm³ CH₄/tVS). Paali (800 kg) tällaista säilörehua tuottaa panoskokeen perusteella metaania enintään 69 Nm³ (energiasisältö 690 kWh). Hehtaarin säilörehusadosta (6–10 t TS/ha) biokaasuprosessi voisi tuottaa 2020–3360 Nm³ metaania, eli energiana 20–34 MWh/ha/v (Taulukko 5.2).

Taulukko 5.2. Maatilalaitoksen kasvisyötteiden sekä perunan ja perunankuoriveden biometaanipotentiaalit, D-arvot sekä TS- ja VS-pitoisuudet.

Biomassa	D-arvo	TS%	VS %	Nm ³ CH ₄ / tVS	Nm ³ CH ₄ / tTS	Nm ³ CH ₄ / tTP	Sato tTS/ha	MWh/ ha
Säilörehu	765	25,7	23,8	364	336	86,5	6–10	20–34
Sipulimassa	967	15,6	14,3	337	309	48,2	0,8	2,4
Helpi, lohko 1, sato 1	589	34,4	30,2	391	343	111,2	2,1	7,2
Helpi, lohko 1, sato 2	525	38,9	35,4	279	254	98,6	1,6	4,1
Helpi, lohko 1 yhteensä	562	36,3	32,4	342	304	105,7	3,7	11,3
Helpi, lohko 2, sato 1	590	33,4	30,6	315	288	96,3	2,7	7,8
Helpi, lohko 2, sato 2	511	36,4	33,2	303	276	100,5	1,8	5,0
Helpi, lohko 2 yhteensä	558	34,6	31,6	310	283	98,0	4,5	12,7
Biokaasulaitoksen helpisyöte keskiarvo	560	34,3	31,6	310	285	97,9	4,1	11,7

Sipulimassan (naatteja ja kuoria) orgaanisen kuiva-aineen BMP oli alhaisempi kuin säilörehulla, 337 Nm³CH₄/tVS. Sipulimassan tuoretonnin metaanintuottopotentiaali oli suuren vesipitoisuuden (TS 16 %) vuoksi noin puolet säilörehun potentiaalista, 48 Nm³/t. Sipulinjalostuksen sivutuotteesta (800 kg/vrk, 290 t/v) voitaisiin tuottaa metaania enintään 13600 Nm³/v (energiasisältö 136 MWh). Siilinjärveläisellä maatilalla syntyy sipulinjalostuksen sivutuotetta n. 5 t TP/ha (0,8 t TS/ha, 2,4 MWh/ha). Sadan hehtaarin sipulinviljelyalalta syntyvän sivutuotteen metaanienergiapotentiaali olisi 270 MWh/v (Taulukko 5.2).

Ruokohelven metaanintuottopotentiaalia tutkittiin kahden lohkon kahdesta eri sadosta. Ensimmäisiä satoja lannoitettiin biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksellä ja sato korjattiin 22.6.2010. Toisia satoja ei lannoitettu ja korjuu tapahtui myöhään, 28.9.2010.

Ensimmäisellä loholla 1. sadon BMP oli 391 Nm³CH₄/tVS (D-arvo 589 g/kg ka) ja 2. sadon BMP 279 Nm³CH₄/tVS (D-arvo 525 g/kg ka). Ensimmäisen lohkon kokonaissato oli 3,7 tTS/ha ja metaanintuottopotentiaali 11,3 MWh/ha. Toisen helpilohkon 1. sadon BMP oli selvästi alhaisempi kuin ensimmäisellä loholla, 315 Nm³CH₄/tVS, vaikka D-arvo oli suunnilleen sama (590 g/kg ka). Toisen lohkon 2. sadon BMP oli erittäin alhaisesta sulavuudesta (D-arvo 511 g/kg ka) huolimatta lähes sama kuin 1. sadolla, 303 Nm³CH₄/tVS. Lohkon kokonaissato oli 4,5 tTS/ha ja energiapotentiaali 12,7 MWh/ha (Taulukko 5.2). Maatilamittakaavan kokeessa biokaasulaitokseen syötetyn ruokohelven BMP oli keskimäärin 310 Nm³CH₄/tVS, eli 98 Nm³CH₄/tTP.

5.2 Perunan ja perunankuoriveden metaanintuottopotentiaali (BMP)

Vuoden yli varastoidun kokonaisen perunan metaanintuottopotentiaali oli 50 Nm³/t (287 Nm³CH₄/tVS). Perunankuorinnasta syntyvän perunankuoriveden VS-spesifinen BMP oli 397 Nm³CH₄/tVS. Alhaisen kuiva-ainepitoisuutensa (4,6 %) vuoksi sen tuoretonnikohtainen BMP (16 Nm³CH₄/tTP) on pienempi kuin paksulla (TS 10,7 %) liotelannalla. Kuitenkin VS-kohtaisten metaanipotentialien perusteella perunankuoriveden kuljettaminen biokaasulaitoksen syötteeksi olisi todennäköisesti kannattavampaa kuin TS-pitoisuudeltaan keskiarvoisen (TS 7 %, 11 Nm³CH₄/tTP) liotelannan.

Lietelannan ja perunankuoriveden yhteiskäsittelyä simuloivassa BMP-kokeessa, jossa lietteestä tulee 90 % ja 10 % VS:sta, havaittiin lievää synergiaa. Tämä yhteiskäsittely tuotti 2 % enemmän metaania panoskokeessa kuin oli odotettavissa lietteen ja kuoriveden erillisten metaanipotentialien perusteella (Taulukko 5.3).

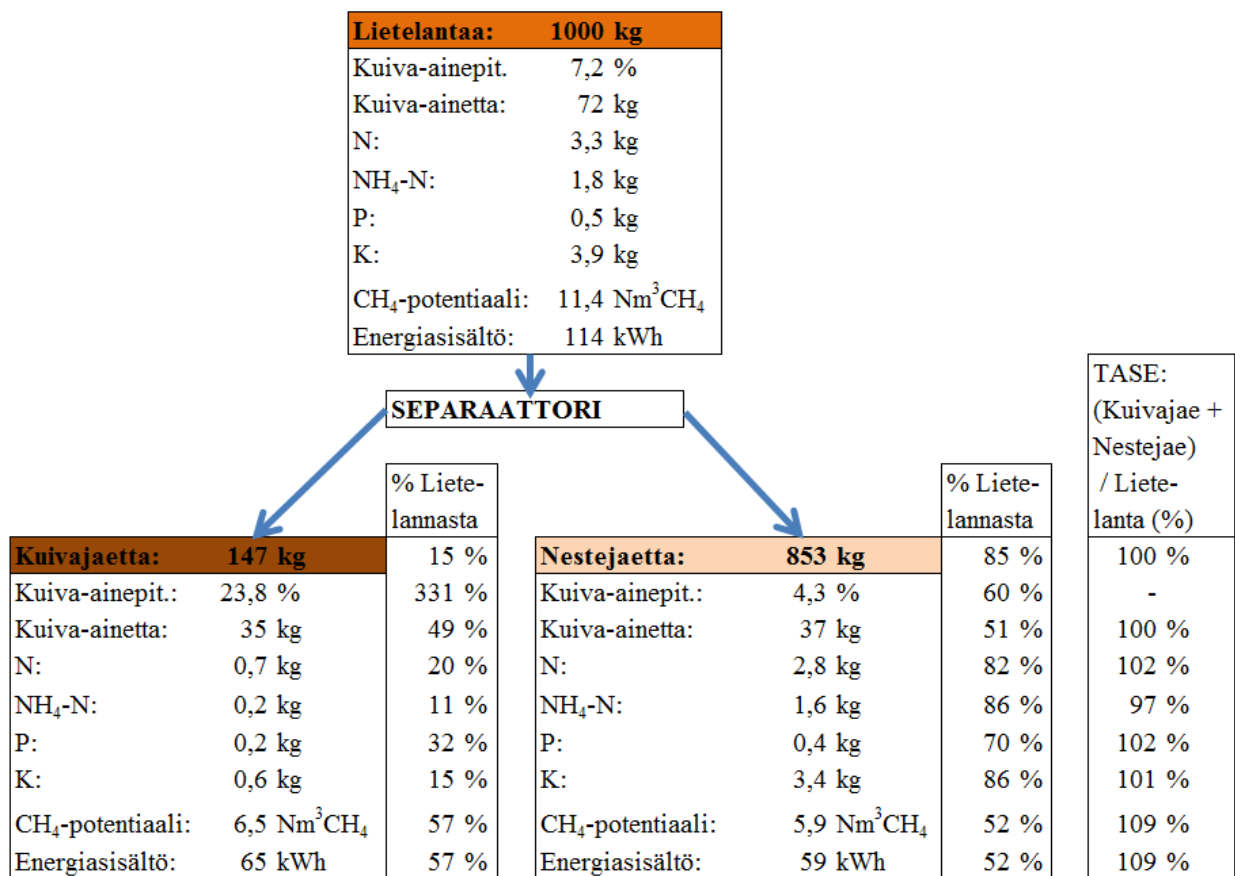
Taulukko 5.3. Perunan ja perunankuoriveden metaanintuottopotentiaali sekä TS- ja VS-pitoisuudet.

Biomassa	TS%	VS %	Nm ³ CH ₄ / tVS	Nm ³ CH ₄ / tTS	Nm ³ CH ₄ / tTP
Peruna	18,5	17,4	287	271	50,1
Perunankuorivesi	4,6	4,1	397	350	16,1
Lietelanta-perunankuorivesi -seos (VS-suhde 90:10)	9,5	8,1	231	198	18,7

5.3 Naudan liotelannan separointikokeet

5.3.1 Lietelannan separoinnin massa- ja kuiva-ainetaseet

Lypsylehmien liotelantaa separoitiin ruuvipuristimella. Tuhannesta kilogrammasta (1000 kg) kuiva-ainepitoisuudeltaan keskivertoa (TS 7,2 %) liotelantaa tuotettiin kuivajaetta 138 kg ja nestejaetta 862 kg. Kuivajakeen TS oli 23,8 % ja se sisälsi suhteellisesti enemmän orgaanista ainetta (VS/TS-suhde 0,9) kuin alkuperäisen liotelannan TS (VS/TS-suhde 0,82). Lietelannan sisältämästä kuiva-aineesta 49 % saatiin erotettua kuivajakeeseen, kun loput jäivät nestejakeeseen. Nestejakeen TS oli 4,3 % ja siitä suhteellisesti suurempi osuus oli epäorgaanista tuhkaa (VS/TS-suhde 0,74) kuin alkuperäisessä liotelannassa (Kuva 5.1, Taulukot 5.4 ja 5.5).



Kuva 5.1. Lietelantatonnin separoinnin massa-, ravinne- ja metaanipotentiaalitaset, kun separoitavan lietelannan kuiva-ainepitoisuus oli 7,2 % (tase on 100 % silloin, kun lietelannassa on esim. ravinnetta yhtä paljon kuin jakeissa yhteensä).

Paksun lietelannan (TS 9,9 %) sekä jaloittelutarhan salaojavesillä ja siilon puristenesteellä laimennetun lietelannan (TS 3,6 %) separoinnissa tuotettiin hieman määrempää kuivajaetta (kuivajakeiden TS-pitoisuudet 20,8 % ja 21,7 %), koska separaattorissa käytettiin hieman pienempää kuivajakeen ulostulokokoon kohdistuvaa puristusvoimaa. Paksun lietelantatonnin separointi tuotti kuivajaetta 332 kg. Laimennetun lietelantatonnin separointi tuotti vain 37 kg kuivajaetta. Mitä kuivempaa separoitava lietelanta oli, sitä enemmän lietelantatonnista kuivajaetta muodostui ja vastaavasti sitä suurempi suhteellinen osuus alkuperäisen lietelannan kuiva-aineesta meni kuivajakeeseen (Taulukko 5.4 ja 5.5).

Taulukko 5.4. Kolmen erilaisen lietelannan ja niiden separoinnissa muodostuneiden jakeiden kuiva-aine- (TS) ja orgaanisen kuiva-aineen (VS) pitoisuudet sekä orgaanisen kuiva-aineen osuus kuiva-aineesta (VS/TS-suhde).

Materiaali	TS %	VS %	VS/TS -suhde
Lietelanta (paksu)	9,9	8,4	0,85
Kuivajae	20,8	18,6	0,89
Nestejae	4,4	3,3	0,75
Lietelanta (keskiverto)	7,2	5,8	0,82
Kuivajae	23,8	21,4	0,90
Nestejae	4,3	3,1	0,74
Lietelanta (laimennettu)	3,6	2,8	0,76
Kuivajae	21,7	19,6	0,90
Nestejae	2,9	2,1	0,71

Taulukko 5.5. Kolmen erilaisen lietelantatonnin separoinnin massa-, kuiva-aine- (TS) ja orgaanisen kuiva-aineen (VS) tase.

Separoitavan lietelannan TS %	9,9	7,2	3,6
Kuivajakeen TS %	20,8	23,8	21,7
Nestejakeen TS %	4,4	4,3	2,9
Separointiin lietelantaa (kg)	1000	1000	1000
Muodostuu kuivajakeeta (kg)	332	147	37
Muodostuu nestejakeeta (kg)	668	853	963
Kuivajakeessa massaa (% Lietelannasta)	33	15	4
Nestejakeessa massaa (% Lietelannasta)	67	85	96
Massatase: (Kuivajae+Nestejae) / Lietelanta (%)	100	100	100
Lietelannassa kuiva-ainetta (kg)	99	72	36
Kuivajakeessa kuiva-ainetta (kg)	69	35	8
Nestejakeessa kuiva-ainetta (kg)	30	37	28
Kuivajakeessa TS (% Lietelannasta)	70	49	22
Nestejakeessa TS (% Lietelannasta)	30	51	78
TS-tase: (Kuivajae+Nestejae) / Lietelanta (%)	100	100	100
Lietelannassa orgaanista kuiva-ainetta (kg)	84	58	28
Kuivajakeessa orgaanista kuiva-ainetta (kg)	62	32	7
Nestejakeessa orgaanista kuiva-ainetta (kg)	22	27	20
Kuivajakeessa org. kuiva-ainetta (% Lietelannasta)	74	54	26
Nestejakeessa org. kuiva-ainetta (% Lietelannasta)	27	46	72
VS-tase: (Kuivajae+Nestejae) / Lietelanta (%)	100	100	98

5.3.2 Lietelannan ja separoitujen jakeiden metaanintuottopotentialit sekä niiden kuljetuksen kannattavuus

Metaanintuottopotentiali (BMP) määritettiin panoskokeena kuiva-ainepitoisuudeltaan 7,2 %:n lietelannasta sekä sen separoiduista jakeista. Lietelannan metaanintuottopotentiali oli 11,4 Nm³ CH₄/tTP. Kuivajakeen tuoretonnikohtainen metaanipotentiali oli lähes nelinkertainen lietelantaan verrattuna (44,1 Nm³ CH₄/tTP). Täten, kuljettaessa biokaasulaitokselle separoitua kuivajakeeta lietelannan sijasta saadaan tuoretonnia kohti kuljetettua lähes nelinkertainen määrä energiaa (lietelannan energiantuottopotentiali 114 kWh/t ja kuivajakeen 441 kWh/t). Tilalta pois kuljetettava kuivajae (147 kg/1000 kg separoitua lietelantaa) sisältää noin puolet alkuperäisen lietelannan metaanintuottopotentialista ja vastaavasti maatilalle jäävä biokaasuntuotannossa hyödyntämättä jäävä nestejake (853 kg) noin puolet (Kuva 5.1, Taulukko 5.7). Nestejakeen korkean vesipitoisuuden vuoksi sen tuoretonnikohtainen metaanintuottopotentiali oli alhainen (7,0 Nm³ CH₄/tVS). Toisaalta nestejakeen orgaaninen kuiva-aine (VS) oli helpommin biohajoavaa (BMP 222 Nm³ CH₄/tVS) kuin kuivajakeen orgaaninen kuiva-aine (Taulukko 5.6).

Metaanintuottopotentiali määritettiin myös lietelannan ja siitä separoidun kuivajakeen seoksesta (88 % lietelantaa, 12 % kuivajakeeta). Panoskokeen perusteella yhteiskäsittely tuotti synergiaa: seoksen metaanintuottopotentiali oli 16,4 Nm³ CH₄/tTP, mikä on 6,7 % enemmän kuin lietelannan ja kuivajakeen metaanintuottopotentialien painotetun keskiarvon (15,3 Nm³ CH₄/tTP) perusteella voisi olettaa.

Taulukko 5.6. Lietelantojen ja niistä separoitujen jakeiden metaanintuottopotentialit tuoretonnia (Nm³ CH₄/t_{FM}), kuiva-ainetonna (Nm³ CH₄/t_{TS}) ja orgaanisen kuiva-aineen tonnia (Nm³ CH₄/t_{VS}) kohti.

Materiaali	TS %	Nm ³ CH ₄ /tTP	Nm ³ CH ₄ /tTS	Nm ³ CH ₄ /tVS
Lietelanta (paksu)	9,9	15,7	158	196
Kuivajae	20,8	38,6	185	206
Nestejae	4,4	7,1	161	222
Lietelanta (keskiverto)	7,2	11,4	158	196
Kuivajae	23,8	44,1	185	206
Nestejae	4,3	7,0	161	222
Lietelanta–kuivajaeoseos	9,2	16,4	178	213
Lietelanta (laimennettu)	3,6	5,8	158	196
Kuivajae	21,7	40,2	185	206
Nestejae	2,9	4,7	161	222

Paksun lietalannan (TS 9,9 %) tuoretonnin laskennallinen BMP on 15,7 Nm³ (157 kWh/t), jos sen kuiva-aineen BMP:n oletetaan olevan sama kuin keskiverrolla lietalannalla (TS 7,2 %). Samalla tavalla arvioituna paksusta lietalannasta separoidun kuivajakeen BMP on 38,6 Nm³ CH₄/tTP (energiasisältö 386 kWh/t). Paksumman lietalannan separoinnissa muodostuu enemmän kuivajaetta (332 kg/1000 kg separoitua lietalantaa), jolloin separoitu kuivajae sisältää 82 % alkuperäisen lietalantatonnin metaanipotentiaalista (Taulukko 5.7). Kuivajakeen kuljetus biokaasulaitokselle, verrattuna paksun lietalannan kuljetukseen, ei ole yhtä taloudellisesti positiivista kuin keskivertolietalannan tapauksessa, sillä kuivajaetonni sisältää vain 2,5-kertaisen määrän energiaa lietalantatonniin verrattuna.

Laimennetusta lietalannasta (TS 3,6 %) separoidun kuivajakeen laskennallinen BMP on tuoretonnia kohti lähes seitsenkertainen lietalantatonniin verrattuna (40,2 Nm³ CH₄/tTP vrt. 5,8 Nm³ CH₄/tTP), joten kuivajakeen kuljetus separoimattoman, vesipitoisen lietalannan kuljetukseen verrattuna olisi erittäin kannattavaa. Toisaalta näin laimean lietalantatonnin separoinnissa muodostuu vain 37 kg kuivajaetta, joten biokaasulaitokselle toimitettaisiin vain 26 % lietalantatonnin metaanintuottopotentiaalista (Taulukko 5.7). Näin laimeaa lietalantaa tuskin muodostuu millään tilalla pysyvästi, joten lyhytaikaisten lantalaan johdettavien vesien (kuten puristenesteet ja jaloittelutarhan vedet) eivät vaikuta lantaan merkittävästi pitemmällä aikavälillä.

Taulukko 5.7. Erialaisten lietalantojen separoinnissa muodostuvat jakeet ja niiden metaanintuottopotentiaalit (BMP:t).

Separoitavan lietalannan TS %	9,9	7,2	3,6
Kuivajakeen TS %	20,8	23,8	21,7
Nestejakeen TS %	4,4	4,3	2,9
Separointiin lietalantaa (kg)	1000	1000	1000
Muodostuu kuivajaetta (kg)	332	147	37
Muodostuu nestejaetta (kg)	668	853	963
Lietalannasta metaania (Nm ³)	15,7	11,4	5,8
Kuivajakeesta metaania (Nm ³)	12,8	6,5	1,5
Nestejakeesta metaania (Nm ³)	4,8	5,9	4,6
Kuivajakeen BMP (% Lietalannasta)	82	57	26
Nestejakeen BMP (% Lietalannasta)	30	52	79
BMP-tase: (Kuivajae+Nestejae) / Lietalanta (%)	112	109	105

5.3.3 Lietalannan separoinnin ravinnetase sekä jakeiden lannoitekäyttö

Paksusta (TS 9,9 %) ja keskiverrosta (TS 7,2 %) lietalannasta separoitujen nestejakeiden tuoretonnissa oli 17–18 % vähemmän fosforia kuin lietalantojen tuoretonnissa. Tällöin esim. keskiverron lietalannan separoitua nestejaetta saisi ympäristötuen ehtojen (Maaseutuvirasto 2009) fosforilannoitusrajoituksen perusteella levittää 22 % enemmän kuin lietalantaa (ravinnepitoisuudet taulukossa 5.8). Viljavuusluokaltaan ”tydyttävän” peltolohkon monivuotiselle nurmelle saisi fosforirajoituksen (ilman karjanlantapoikkeusta enintään 16 kgP/ha/v) perusteella levittää nestejaetta 36,0 tonnia, ja samalla sen mukana pellolle menisi kokonaistyppeä 116 kg/ha, kasveille heti käyttökelpoista liukoista typpeä 66 kg/ha ja kaliumia 142 kg/ha. Separoimatonta lietalantaa saisi levittää vain 29,4 t/ha, sisältäen typpeä 98 kg/ha, liukoista typpeä 54 kg/ha (19 % vähemmän kuin nestejakeen lannoitekäytössä) ja kaliumia 114 kg/ha. Viljavuuspalvelun (2012) tilastojen mukaan v. 2006–2010 Pohjois-Savon peltolohkoista 33 % kuului fosforiluvun perusteella ”tydyttävään” ja 39 % ”välttävään” viljavuusluokkaan.

Taulukko 5.8 Lietelantojen ja niistä separoitujen jakeiden ravinnepitoisuudet sekä liukaisen tyypin osuus kokonaistypestä (NH₄-N/N %).

Materiaali	TS %	N g/kg	NH ₄ -N g/kg	N/NH ₄ -N %	P g/kg	K g/kg	N/P -suhde
Lietelanta (paksu)	9,9	3,8	1,5	38	0,74	3,9	5,1
Kuivajae	20,8	4,2	1,4	32	1,04	3,9	4,0
Nestejae	4,4	3,2	1,7	53	0,61	3,8	5,2
Lietelanta (keskiverto)	7,2	3,3	1,8	54	0,54	3,9	6,1
Kuivajae	23,8	4,5	1,4	30	1,20	3,9	3,8
Nestejae	4,3	3,2	1,8	57	0,45	3,9	7,3
Lietelanta (laimennettu)	3,6	2,1	1,1	55	0,35	2,8	6,0
Kuivajae	21,7	3,9	0,9	24	1,10	2,9	3,5
Nestejae	2,9	2,2	1,2	56	–	2,8	–

Kuivajakeen tuoretonnin fosforipitoisuuden ero alkuperäisen lietelantatonnin fosforipitoisuuteen riippui separoitavan lietelannan kuiva-ainepitoisuudesta. Paksun lietelannan kuivajakeen tuoretonni sisälsi 41 % enemmän fosforia kuin separointiin mennyt lietelantatonni, keskiverron lietelannan kuivajae 121 % enemmän ja laimennetun lietelannan kuivajae 219 % enemmän (pitoisuudet Taulukossa 5.8). Kuivajaetta biokaasulaitokselle toimittava maatila voi ottaa tilalleen takaisin käsittelyjäännöstä esimerkiksi toimittamansa syötetonnimäärän tai ravinnemäärän mukaan. Käsittelyjäännöksen fosforipitoisuus olisi todennäköisesti hieman korkeampi kuin lietelannan, mutta selvästi alhaisempi kuin separoidun kuivajakeen, jos biokaasulaitoksen syötteenä on kuivajakeen lisäksi esim. lietelantaa ja nurmea.

Separoitavan lietelannan kuiva-ainepitoisuus vaikutti suuresti myös ravinnetaseeseen (Taulukko 5.9, Kuva 5.1), eli siihen, kuinka suuri osa alkuperäisen lietelannan ravinteista meni eri jakeisiin. Paksun (TS 9,9 %) lietelantatonnin separoinnissa syntyi 332 kg kuivajaetta, joka sisälsi 37 % lietelannan kokonaistypestä, 31 % liukoisesta tyypestä, 47 % fosforista ja 33 % kaliumista. Keskiverron (TS 7,2 %) lietelantatonnin separoinnissa muodostui vähemmän kuivajaetta (147 kg) ja se sisälsi alkuperäisen lietelannan tyypestä vain 20 %, liukoisesta tyypestä 11 % ja fosforista 32 %.

Taulukko 5.9. Kolmen kuiva-ainepitoisuudeltaan (TS %) erilaisen lietelantatonnin separoinnin ravinnetaseet (taseissa 100 % tarkoittaa, että analyysihin perustuvien laskelmien mukaan lietelannassa ja jakeissa yhteensä on yhtä paljon ravinteita).

Separoitavan lietelannan TS %	9,9	7,2	3,6
Separointiin lietelantaa (kg)	1000	1000	1000
Muodostuu kuivajaetta (kg)	332	147	37
Muodostuu nestejaetta (kg)	668	853	963
Lietelannassa N (kg)	3,80	3,34	2,06
Kuivajakeessa N (kg)	1,40	0,66	0,14
Nestejakeessa N (kg)	2,12	2,76	2,08
Kuivajakeessa N (% Lietelannasta)	37	20	7
Nestejakeessa N (% Lietelannasta)	56	82	101
N-tase: (Kuivajae+Nestejae) / Lietelanta (%)	93	102	108
Lietelannassa NH ₄ -N (kg)	1,46	1,82	1,14
Kuivajakeessa NH ₄ -N (kg)	0,45	0,20	0,03
Nestejakeessa NH ₄ -N (kg)	1,12	1,57	1,17
Kuivajakeessa NH ₄ -N (% Lietelannasta)	31	11	3
Nestejakeessa NH ₄ -N (% Lietelannasta)	76	86	102
NH ₄ -N-tase: (Kuivajae+Nestejae) / Lietelanta (%)	107	97	105
Lietelannassa P (kg)	0,74	0,54	0,35
Kuivajakeessa P (kg)	0,35	0,18	0,04
Nestejakeessa P (kg)	0,41	0,38	0,51
Kuivajakeessa P (% Lietelannasta)	47	32	12
Nestejakeessa P (% Lietelannasta)	55	70	–
P-tase: (Kuivajae+Nestejae) / Lietelanta (%)	102	102	–
Lietelannassa K, kg	3,88	3,89	2,82
Kuivajakeessa K, kg	1,29	0,57	0,11
Nestejakeessa K, kg	2,53	3,36	2,73
Kuivajakeessa K (% Lietelannasta)	33	15	4
Nestejakeessa K (% Lietelannasta)	65	86	97
K-tase: (Kuivajae+Nestejae) / Lietelanta (%)	98	101	101

Lietelannoissa oli kuiva-ainetonnia kohti (kg/tTS) ravinteita eniten laimennetussa lietelannassa, todennäköisesti johtuen jaloittelutarhan vesien ja puristenesteiden tuomista ravinteista. Kaikki separoidut nestejakeet olivat kuiva-ainekohtaisilta ravinnepitoisuuksiltaan samankaltaisia. Eri kuivajakeiden kuiva-ainekilojen ravinnepitoisuuksissa suurin ero oli niiden liukoisen typen pitoisuuksissa: mitä paksumpi separoitava lietelanta oli, sitä suurempi oli kuivajakeen kuiva-ainekohtainen ammoniumtyppipitoisuus (Taulukko 5.10).

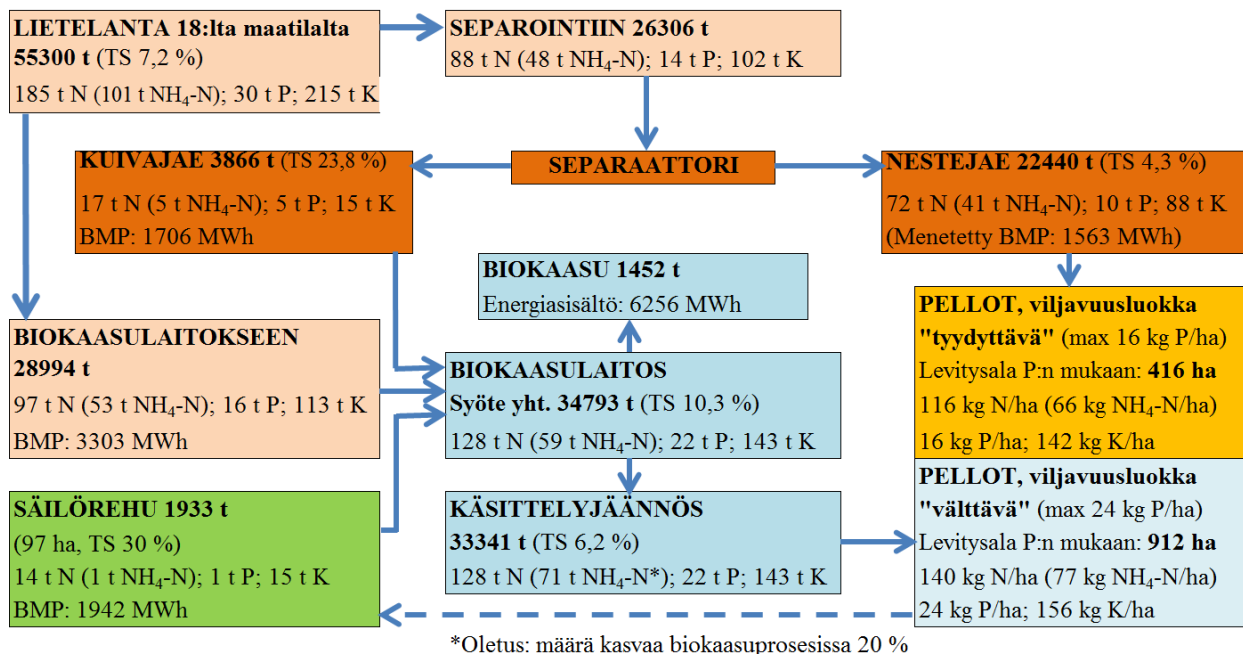
Taulukko 5.10. Lietelantojen ja niistä separoitujen jakeiden ravinnepitoisuudet kuiva-ainetonnia (kg/tTS) kohti.

Materiaali	TS	N	NH ₄ -N	N/NH ₄ -N	P	K
	%	g/kgTS	g/kgTS	%	g/kgTS	g/kgTS
Lietelanta (paksu)	9,9	38,4	14,8	38	7,5	39,2
Kuivajae	20,8	20,3	6,5	32	5,0	18,6
Nestejae	4,4	71,4	37,6	53	13,8	85,4
Lietelanta (keskiverto)	7,2	46,4	25,3	54	7,6	54,1
Kuivajae	23,8	18,5	5,6	30	4,9	16,0
Nestejae	4,3	72,6	41,4	57	10,0	88,6
Lietelanta (laimennettu)	3,6	56,7	31,4	55	9,5	77,5
Kuivajae	21,7	17,8	4,2	24	5,1	13,2
Nestejae	2,9	73,4	41,1	56	–	96,5

5.3.4 Kuvitteellisen tilakeskittymän biokaasulaitoksen energiantuotto lietelannasta, kuivajakeesta ja säilörehusta

Separointikokeiden tulosten perusteella laskettiin eräälle pohjoissavolaiselle karjatilakeskittymän kuvitteelliselle biokaasulaitokselle syötteen, energiantuotto ja ravinnetase. Tilakeskittymän 18 maatilaa tuottavat lehmänlietelantaa 55300 t/v. Osa lietelannasta (TS 7,2 %) separoidaan niin, että biokaasulaitokselle toimitettavan lietelannan ja separoidun kuivajakeen syötesuhteeksi tulee 7,5:1 (88 % lietelantaa, 12 % kuivajaeetta). Tällöin lietelantaa joudutaan separoimaan 26306 t/v, josta muodostuu biokaasulaitokseen menevää kuivajaeetta 3866 t/v ja suoraan lannoitteeksi menevää tyyppipitoista nestejaeetta 22440 t/v. Nestejakeeseen jää noin puolet lietelannan metaanintuottopotentialista. Lisäksi biokaasulaitoksen syötteenä on nurmisäilörehua (TS 30 %, NPK 7,1 : 0,76 : 7,7 kg/t) niin, että kokonaissyötteen tuorepainosta 83 % on lietelantaa, 11 % kuivajaeetta ja 6 % säilörehua. Tällöin säilörehua syötetään biokaasulaitokseen 1933 t/v, mikä vastaa satotasolla 20 tFM/ha/v 97 hehtaarin nurmialaa (Kuva 5.2). Biokaasulaitokseen syötettävä nurmi voi olla myös esim. hyvänä satovuotena eläimiltä ylijäävää rehua.

Syötteen metaanintuottopotentiali on yhteensä 728 861 Nm³CH₄/v (7289 MWh/v), jos lietelannan ja kuivajakeen yhteiskäsittelyn oletetaan tuottavan 6,7 % enemmän metaania kuin kyseiset syötteen yksinään erillisissä biokaasuprosesseissa (kts. kappale 1.2.). Jos jatkuvatoimisessa täyssekoitteisessa biokaasureaktorissa ja sen jälkikaasualtaassa syötteen metaanintuottopotentialista toteutuu 90 %, saadaan vuodessa tuotettua 655 975 Nm³ metaania, eli bruttoenergiaa 6560 MWh/v.



Kuva 5.2. Tilakeskittymän biokaasulaitokselle toimitettavat syötteet ja niiden metaanintuottopotentiali sekä tiloille jäävä separoitu nestejaje.

Syötettä toimitetaan biokaasulaitokselle yhteensä 34 793 t/v ja sen kuiva-ainepitoisuus on 10,3 %. Lannoitteena käytettävää biokaasulaitoksen käsittelyjäännöstä muodostuu syötemäärään verrattuna 4,4 % vähemmän (33271 t/v), koska syötteen orgaanisesta kuiva-aineesta muodostuu biokaasua (CH₄+CO₂) 1522 t/v. Kaasunmuodostuksen vuoksi jäännöksen kuiva-ainepitoisuus on 6,2 %. Jäännöksessä oletetaan olevan sama määrä ravinteita (NPK) ja vettä kuin syötteessä, joten jäännöksen ravinnepitoisuudet ovat hieman syötettä korkeammat.

Biokaasulaitoksessa orgaanisen aineen hajotessa vapautuu liukoista ammoniumtyyppiä, joka on kasveille heti käyttökelpoisessa muodossa. Tämän vuoksi käsittelyjäännös voi korvata väkilannoitteen käyttöä. Käsittelyjäännöksen oletetaan tässä sisältävän 20 % syötettä enemmän ammoniumtyyppiä. Tällöin kuvitteellisen laitoksen käsittelyjäännöksen kokonaistyöstä 60 % olisi liukoista (2,3 kg NH₄-N/t).

Käsittelyjäännöksen tuoretonnissa olisi fosforia (0,66 kg/t) 21 % enemmän kuin separoimattomassa liete-lannassa (0,54 kg/t), mutta 45 % vähemmän kuin kuivajakeen tuoretonnissa (Taulukko 5.11). Käsittelyjäännös on mahdollista separoida edelleen fosforipitoisempaan kuivajakeeseen ja typpipitoisempaan nestejakeeseen.

Taulukko 5.11. Lietelannan, separoidun kuivajakeen ja nestejakeen sekä lietelantaa, kuivajaa ja säilörehua käsittelevän biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen ravinnepitoisuudet.

Lietelanta	N-pitoisuus (kg/tFM)	3,34
	NH ₄ -N-pitoisuus (kg/tFM)	1,82
	P-pitoisuus (kg/tFM)	0,54
	K-pitoisuus (kg/tFM)	3,89
Kuivajae	N-pitoisuus (kg/t)	4,52
	NH ₄ -N-pitoisuus (kg/t)	1,36
	P-pitoisuus (kg/t)	1,20
	K-pitoisuus	3,90
Nestejae	N-pitoisuus (kg/tFM)	3,23
	NH ₄ -N-pitoisuus (kg/tFM)	1,84
	P-pitoisuus (kg/tFM)	0,45
	K-pitoisuus (kg/tFM)	3,94
	18:lle maatilalle palautetaan käsittelyjäännöstä (t/v)	33 271
	Jäännöksen kuiva-ainepitoisuus (%)	6,2
	Jäännöksen N-pitoisuus (kg/tFM)	3,85
	Jäännöksen NH ₄ -N-pitoisuus (kg/tFM)*	2,30
	Jäännöksen P-pitoisuus (kg/tFM)	0,66
	Jäännöksen K-pitoisuus (kg/tFM)	4,29

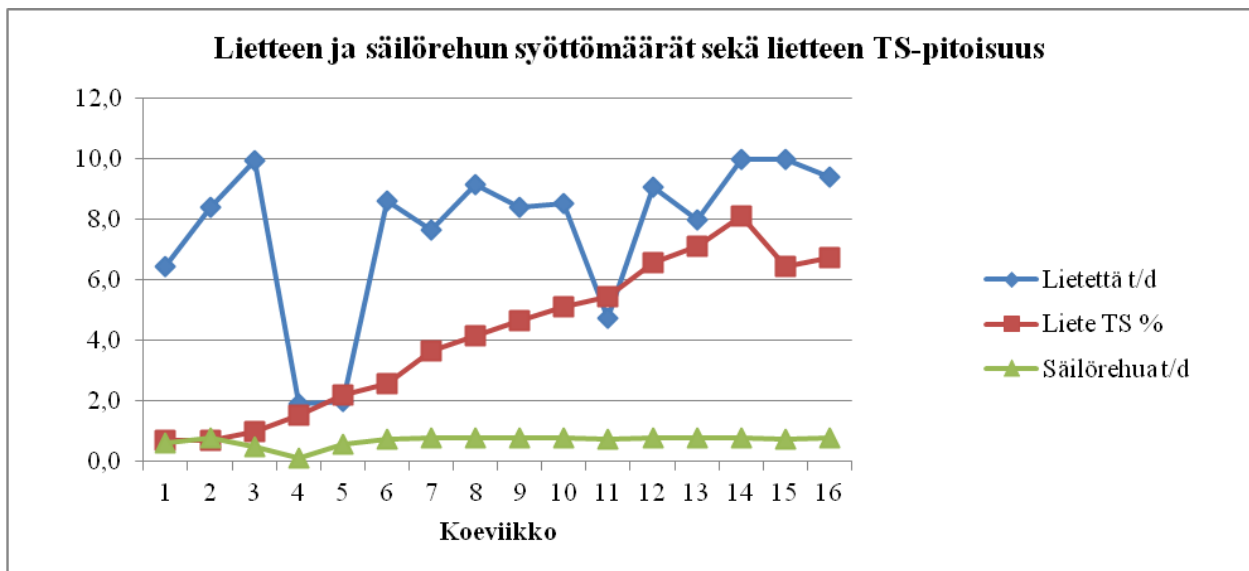
5.4 Metaanintuotot ja käsittelyjäännöksen laatu maatilamittakaavan kokeissa

Käytännön kokemusten keräämiseksi maatilamittakaavan laitoksen käyttöönotosta ja sen operoinnista erilaisilla syötteillä, MTT Maaningan biokaasulaitoksen käyttöönottoa ja sen jälkeistä operointia seurattiin vuosina 2009–2012. Seuraavassa esitetään tulokset eri koeajoista.

5.4.1 Maatilamittakaavan laitoksen käyttöönotto: naudan lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittely

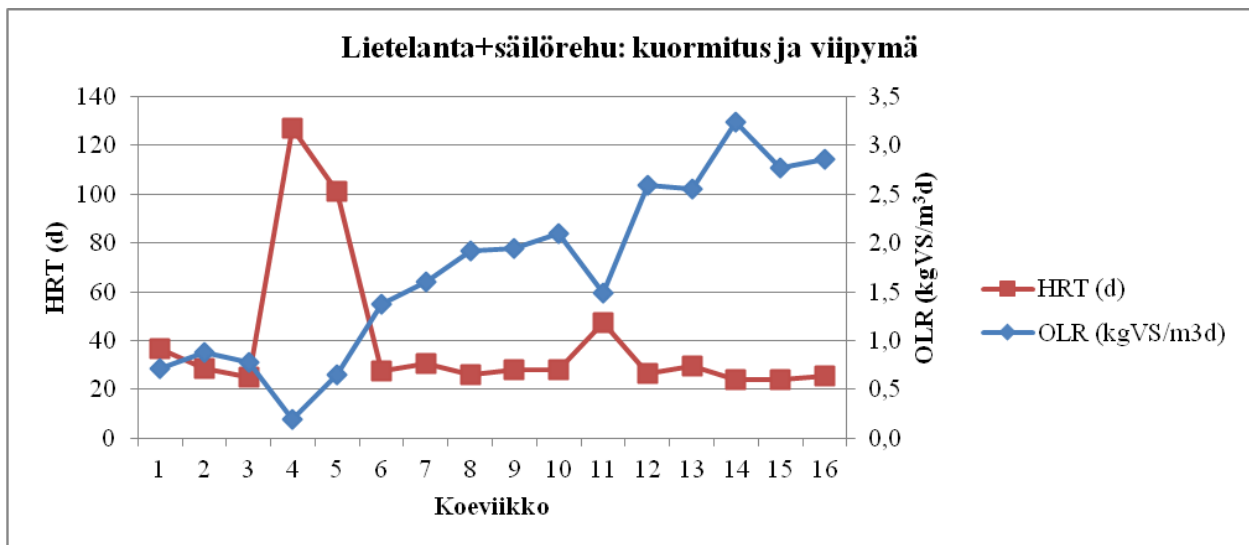
MTT Maaningan biokaasulaitos otettiin käyttöön elokuussa 2009 samaan aikaan uuden tutkimusnavetan käyttöönoton kanssa. Navetassa muodostuva lietelanta kerätään lietekuiluun, josta lanta siirtyy ylivaluntana varsinaiseen esisäiliöön, josta se pumpataan biokaasureaktoriin. Navetan käyttöönoton yhteydessä lietekuilu täytettiin vedellä muodostuvan lietelannan liikkumisen varmistamiseksi. Tästä syystä biokaasulaitokseen syötetyn lietelannan kuiva-ainepitoisuus (TS %) oli aluksi laimeaa, mutta kohosi kokeen loppua kohti ja oli odotetulla, navetan perustoimintaan kuuluvalla tasolla (6,4–8,5 %) kokeen viimeisen viiden viikon aikana (Kuva 5.3). Lietelantaa syötettiin yhteensä 8–10 m³ /d kolmeen eri kellonaikaan reaktorin orgaanisen kuormituksen tasaamiseksi.

Lietelannan lisäksi biokaasulaitokseen syötettiin säilörehua kokeen alusta asti. Rehusyötemäärä oli koeviikosta 7 alkaen 800 kg/d, paitsi koeviikoilla 11 ja 15 keskimäärin 743 kg/d (Kuva 5.3). Säilörehun kuiva-ainepitoisuus oli koko kokeen aikana 24,0–30,6 %.



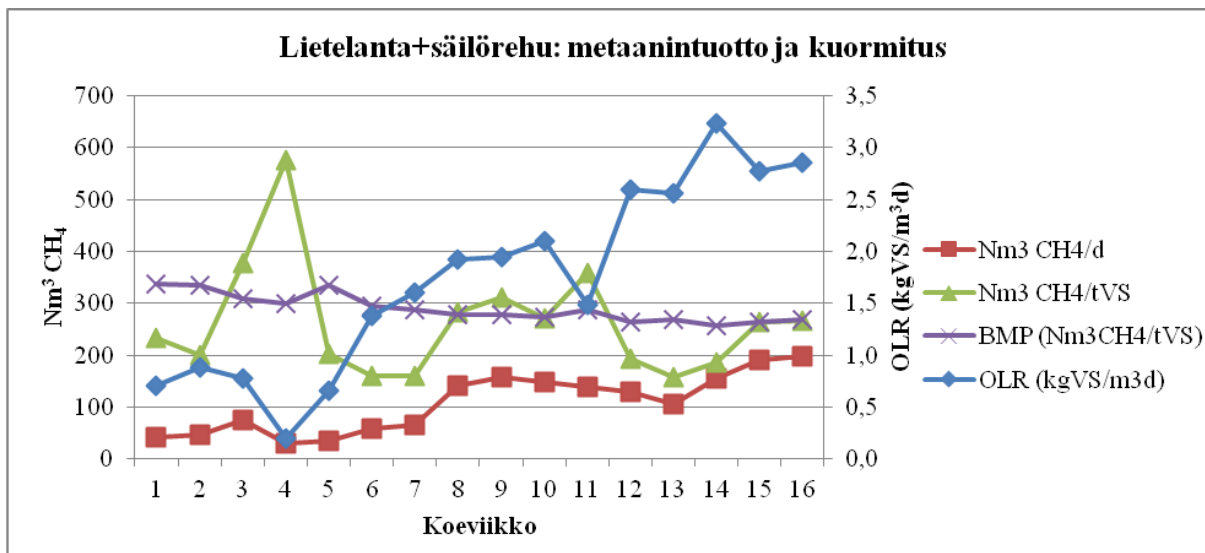
Kuva 5.3. Lietelannan ja säilörehun päivittäiset syöttömäärät sekä lieteelannan kuiva-ainepitoisuus (TS %) viikkokeskiarvoina.

Lietelannan vaihtelevien syöttömäärien ja TS-pitoisuuksien vuoksi biokaasureaktorin orgaaninen kuormitus (OLR, kgVS/m³d) ja syötteen hydraulinen viipymä reaktorissa (HRT) vaihtelivat, mutta olivat suhteellisen tasaiset kokeen loppuvaiheessa (OLR 3,0 kgVS/m³d, HRT 25 d; Kuva 5.4).



Kuva 5.4. Biokaasureaktorin orgaaninen kuormitus (OLR) ja syötteen hydraulinen viipymä (HRT) reaktorissa viikkokeskiarvoina.

Biokaasulaitoksen päivittäinen metaanintuotto (Nm³CH₄/d) kasvoi kokeen loppua kohti kuormituksen noustessa. Alhaisen kuormituksen ja pitkän viipymän aikana toteutunut tuotto ylitti potentiaalin (Kuva 5.5). Koko kokeen aikana syötteen BMP:sta toteutui keskimäärin 91 %.



Kuva 5.5. Biokaasulaitoksen orgaaninen kuormitus (OLR), päivittäinen metaanintuotto (Nm³CH₄/d), metaanintuotto syötteen orgaanisen kuiva-aineen tonnia kohti (Nm³CH₄/tVS) ja syötteen metaanintuottopotentiaali (BMP, Nm³CH₄/tVS).

Biokaasulaitoksen kuormitus saavutti tavoitteen kokeen kolmen viimeisen viikon aikana (koeviikot 14–16). Tällöin lietelantaa syötettiin laitokseen keskimäärin 9,8 m³/d ja sen TS-pitoisuus oli keskimäärin 7,1 %. Säilörehun syöttömäärä oli 780 kg/d ja TS-pitoisuus 27,5 %. Kuormitus oli keskimäärin 3,0 kgVS/m³d ja viipymä 25 d+25 d (reaktori+jälkikaasuallas). Biokaasua tuotettiin keskimäärin 337 Nm³/d, josta metaania oli 181 Nm³/d (metaanipitoisuus 54 til%). Syötteen metaanintuottopotentiaali oli 262 Nm³CH₄/tVS, lietelannan ja säilörehun BMP:ien painotettuna keskiarvona. Syötteen BMP:sta toteutui biokaasulaitoksessa 90 % eli 236 Nm³CH₄/tVS (Taulukko 5.12). Syötetonnei (93 % lietettä, 7 % rehua) tuotti metaania 17,3 Nm³. Jälkikaasuallas (lämpötila 30 °C) tuotti kokonaisbiokaasusta 20 %.

Taulukko 5.12. Biokaasulaitoksen syötteet ja prosessiparametrit lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelykokeessa (k.a. = keskiarvo, Min = pienin arvo, Max = suurin arvo, STD = keskihajonta).

Tarkasteltava ajanjakso →	Koeviikot 14–16				Koko koe			
SYÖTTEET	K.a.	Min	Max	STD	K.a.	Min	Max	STD
Lietelantaa t/d	9,8	9,4	10,0	0,3	7,6	1,9	10,0	2,6
Lietelannan TS %	7,1	6,5	8,1	0,9	4,5	0,7	8,1	2,5
Lietelannan VS %	5,8	5,3	6,6	0,7	3,7	0,6	6,6	2,0
Säilörehua t/d	0,78	0,74	0,80	0,0	0,70	0,13	0,80	0,2
Säilörehun TS %	27,5	24,0	30,6	3,3	25,7	21,9	30,6	1,8
Säilörehun VS %	25,3	22,0	28,1	3,1	23,9	20,1	28,1	1,7
Syötettä yhteensä t/d	10,6	10,2	10,8	0,3	8,3	2,0	10,8	2,7
Syötteen TS %	8,6	7,9	9,3	0,7	6,3	2,2	9,3	2,4
Syötteen VS %	7,3	6,7	7,8	0,5	1,5	1,9	7,8	2,0
Syötteen OLR (kgVS/m ³ d)	3,0	2,8	3,2	0,2	1,7	0,2	3,2	0,9
Kasvin osuus OLR:sta (%)	26	21	30	4,7	37	21	80	19
HRT (d)	25	24	25	0,8	31	24	127	30
Syötteen BMP (Nm ³ CH ₄ /tVS)	262	256	269	6,4	278	256	336	27
KAASUN TUOTTOMÄÄRÄT JA PITOISUUDET								
Biokaasua Nm ³ /d	337	302	362	32	201	48	362	107
CH ₄ -pitoisuus (%)	54	52	55	2	53	44	59	4
Metaania Nm ³ /d	181	156	198	22	107	29	198	57
JKA:n osuus CH ₄ -tuotosta (%)	20	19	22	2	–	–	–	–
JKA:n lämpötila (°C)	30	30	31	0	–	–	–	–
METAANISAANNOT								
Nm ³ CH ₄ /tFM	17,1	14,4	19,4	2,5	12,9	5,1	25,3	5,5
Nm ³ CH ₄ /tTS	199	156	225	40	204	134	501	94
Nm ³ CH ₄ /tVS	236	185	266	46	239	158	576	108
Nm ³ CH ₄ /tVS/BMP (%)	90	72	101	16	86	55	193	36

Prosessin mikrobiologisesta tilasta kertovia haihtuvien rasvahappojen (VFA) pitoisuuksia mitattiin reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) käsittelyjäännöksistä alhaisen kuormituksen aikana koeviikolla 11 ja tavoitekuormituksen aikaisen tarkastelujakson lopussa koeviikoilla 16 ja 17 (Taulukko 5.13). Alhaisen kuormituksen aikana kokonais-VFA-pitoisuus oli erittäin matala sekä reaktorissa 163 mg/l että jälkikaasualtaassa 114 mg/l. Tavoitekuormituksen aikana reaktorin VFA-pitoisuus nousi hieman korkeammaksi, ollen 570–640 mg/l. Jälkikaasualtaan VFA-pitoisuus pysyi ennallaan (Taulukko 5.13).

Taulukko 5.13. Haihtuvien rasvahappojen (VFA) pitoisuudet reaktorissa (R) ja jälkikaasualtaassa (JKA) eri koeviikoilla.

Näyte/ koeviikko	Etikkahappo mg/l	Propionih. mg/l	Voihappo mg/l	Isovaleri.h. mg/l	Kok.-VFA mg/l
R/11	132	19	6	6	163
R/16	530	70	10	10	620
R/16	560	60	10	10	640
R/17	500	60	10	0	570
JKA/11	114	0	0	0	114
JKA/16	90	0	0	0	90
JKA/16	90	0	0	0	90
JKA/17	110	10	0	0	120

Syötteiden ja käsittelyjäännösten VS- ja ravinnepitoisuuksia määritettiin kokeen loppuvaiheesta (Taulukko 5.14). Kokonaissyötteen VS/TS-suhdeluku oli keskimäärin 0,85, eli kuiva-aineesta 85 % oli orgaanista. Syöte sisälsi 3,4 kgN/t ja 1,6 kgNH₄-N/t. Syötteen kokonaistypestä 46 % oli liukoista ammoniumtipeä. Reaktorin käsittelyjäännöksen TS-pitoisuus oli keskimäärin 5,5 % ja VS/TS-suhde 0,81. Reaktorin käsittelyjäännös sisälsi 2,6 kgN, 1,3 kgNH₄-N, 0,4 kgP/t ja 3,2 kgK/t. Reaktorijäännöksen tpeestä 50 % oli liukoisessa muodossa. Jälkikaasualtaan käsittelyjäännöksen TS-pitoisuus oli 3,4 % ja VS/TS-suhde 0,76. JKA sisälsi 2,1 kgN, 1,3 kgNH₄-N, 0,3 kgP/t ja 2,9 kgK/t. Liukoisen tpeen osuus kokonaistypestä oli keskimäärin 64 % (60–72 %). Lietelannan ja JKA:n jäännöksen keskimääräisten NH₄-N/N-suhdelukujen perusteella laskettuna kasveille käyttökelpoisen mineraalitypen osuus kasvoi biokaasuprosessin aikana 40 %.

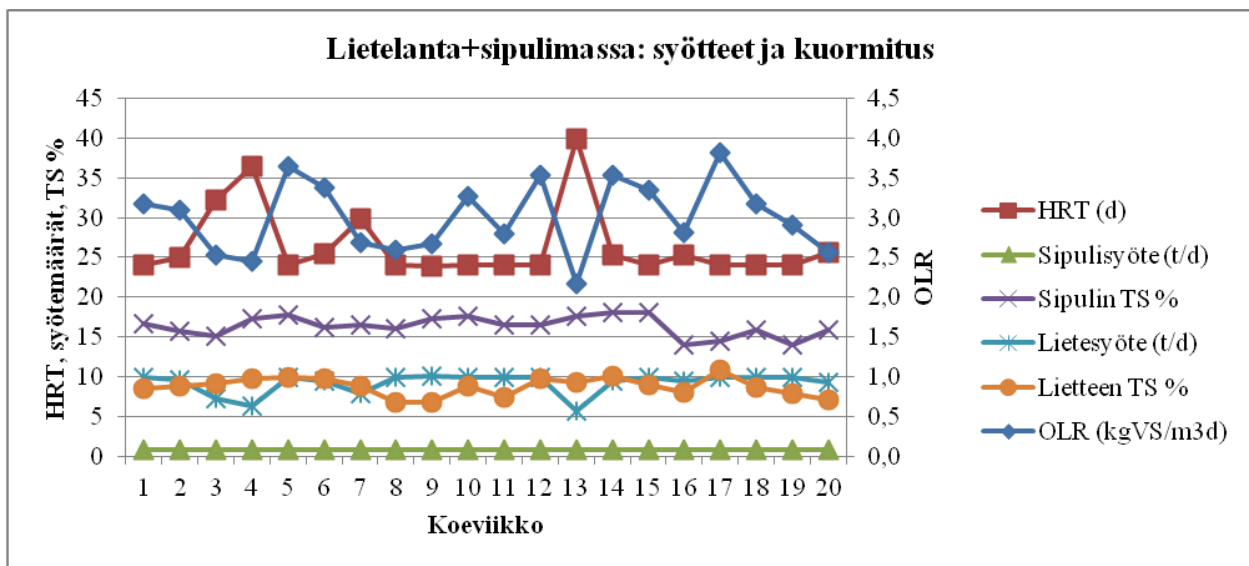
Taulukko 5.14. Syötteiden sekä reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) käsittelyjäännösten TS-, VS- ja ravinnepitoisuudet kokeen loppuvaiheessa.

Näyte/ koeviikko	TS %	VS %	VS/TS -suhde	Ntot kg/t	NH ₄ -N kg/t	N/NH ₄ -N %	Ptot kg/t	Pliuk kg/t	K kg/t
Lanta/14–16	7,1	5,8	0,82	3,2	1,6	52			
Rehu/14–16	27,5	25,3	0,92	6,5	0,4	6			
Syöte/14–16	8,6	7,3	0,85	3,4	1,6	46			
Reaktori/16	5,1	4,0	0,79	2,4	1,3	54	0,4	0,004	3,1
Reaktori/16	5,1	4,2	0,82	2,6	1,3	49	0,4	0,004	3,1
Reaktori/17	6,2	5,1	0,82	2,8	1,4	48	0,5	0,005	3,4
Reaktori keskiarvo	5,5	4,4	0,81	2,6	1,3	50	0,4	0,005	3,2
JKA/16	3,4	2,5	0,74	2,0	1,2	60	0,3	0,003	2,9
JKA/16	3,3	2,5	0,77	2,2	1,3	60	0,3	0,003	2,8
JKA/17	3,6	2,8	0,78	2,1	1,5	72	0,3	0,003	2,9
JKA keskiarvo	3,4	2,6	0,76	2,1	1,3	64	0,3	0,003	2,9

5.4.2 Maatilanmittakaavan koe: naudan lietalan ja sipulimassan yhteiskäsittely

Lietelannan ja sipulimassan (sipulinjalostuksesta syntynyttä sipulinkuorta ja naattia) yhteiskäsittelykoe toteutettiin 8.2.–27.6.2010. Lietelantaa syötettiin biokaasulaitokseen keskimäärin 9,2 m³/d (viikkokeskiarvot 5,7–10,1 m³/d). Lietteen TS-pitoisuus oli keskimäärin 8,7 % (6,8–10,8 %). Partikkelikooltaan keskimäärin <5 cm sipulimassaa (Kuva 5.7) syötettiin koko kokeen ajan 800 kg/d. Sipulimassan TS-

pitoisuus oli keskimäärin 16,4 % (14,0–18,1 %). Biokaasulaitoksen keskimääräinen orgaaninen kokonaiskuormitus oli kokeen aikana 3,0 kgVS/m³d, sipulin osuus kuormituksesta oli 16 %. Syötteen viipymä (HRT) reaktorissa ja jälkikaasualtaassa oli 26+26 d (Kuva 5.6, Taulukko 5.15).

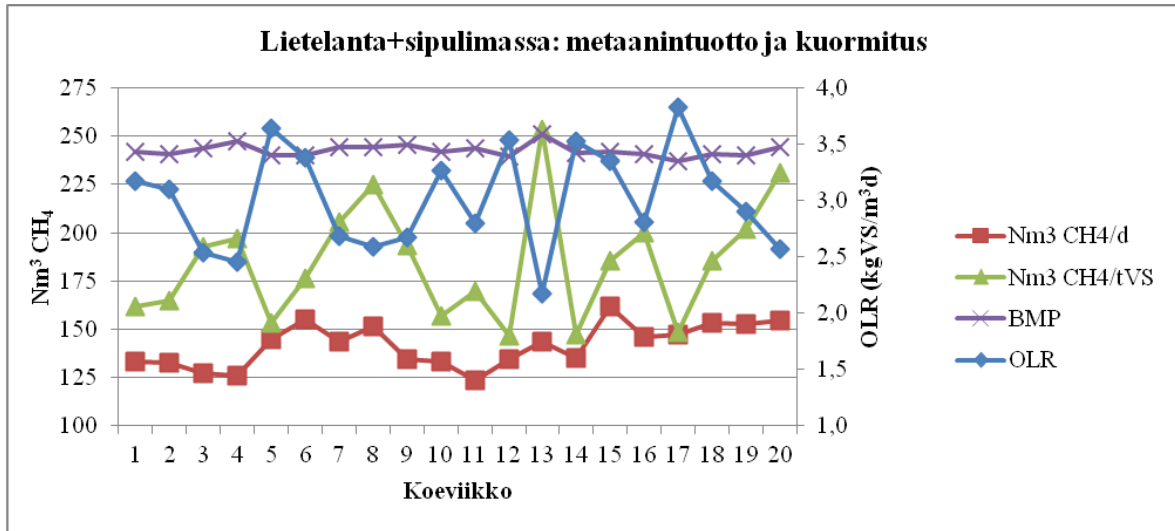


Kuva 5.6. Lietelannan ja sipulimassan yhteiskäsittelykokeen syötämäärät, syötteiden TS-pitoisuudet, biokaasureaktorin orgaaninen kuormitus (OLR) ja syötteen hydraulinen viipymä (HRT) reaktorissa viikkokeskiarvoina.



Kuva 5.7. Biokaasulaitoksen lisäsyötteenä käytettyä sipulimassaa (sipulinkuoria ja -naatteja). Kuva: Sari Luostarinen, MTT.

Biokaasua tuotettiin kokeen aikana keskimäärin 264 Nm³/d, josta metaania oli 143 Nm³/d. Syötetonna kohti metaania tuotettiin 14,3 Nm³/t. Syötteen metaanintuottopotentiaali oli 242 Nm³CH₄/tVS, lietelannan ja sipulin BMP:ien painotettuna keskiarvona. Syötteen BMP:sta toteutui biokaasulaitoksessa 76 % eli 183 Nm³CH₄/tVS (taulukko 3). Laitos hyödynsi syötteen metaanintuottopotentiaalin tehokkaammin, kun laitoksen kuormitus oli matalalla tasolla (Kuva 5.8).



Kuva 5.8. Biokaasulaitoksen orgaaninen kuormitus (OLR), päivittäinen metaanintuotto (Nm³CH₄/d), metaanintuotto syötteen orgaanisen kuiva-aineen tonnia kohti (Nm³CH₄/tVS) ja syötteen metaanintuottopotentiaali (BMP, Nm³CH₄/tVS).

Koeviikoilla 8–12 laitoksen kuormitus oli viiden viikon yhtämittaisen ajan laitoksen mitoituksen mukaisella tasolla. Tällöin lietelantaa syötettiin biokaasulaitokseen 10,0 m³/d ja sen TS-pitoisuus oli keskimäärin 7,9 %. Sipulimassan syötettiin 800 kg/d (TS-pitoisuus 16,8 %) ja sen osuus orgaanisesta kuormituksesta oli 16 %. Kokonaiskuormitus oli 3,0 kgVS/m³d ja viipymä oli 24 d+24 d (reaktori+JKA). Biokaasua tuotettiin 249 Nm³/d, josta metaania oli 136 Nm³/d (175 Nm³CH₄/tVS). Laitokseen syötettyä tonnia kohti metaania tuotettiin 12,5 Nm³. Syötteen BMP:sta toteutui 72 % (Taulukko 5.15).

Toisella biokaasulaitoksen mitoituksen mukaisella jaksolla kokeen lopussa (koeviikot 15–20) lietelantaa syötettiin keskimäärin 9,8 m³/d (TS 8,–6 %) ja sipulijätettä 800 kg/d (TS 15,4 %). Kokonaiskuormitus oli 3,1 kgVS/m³d ja sipulimassan osuus kuormituksesta oli 14 %. Syötteen viipymä laitoksessa oli 25+25 d. Biokaasua tuotettiin 281 Nm³/d, josta metaania oli 154 Nm³/d. Syötteen BMP:sta saatiin hyödynnettyä 78 % (Taulukko 5.15).

Taulukko 5.15. Biokaasulaitoksen syötteet ja prosessiparametrit lietelannan ja sipulimassan yhteiskäsittelykokeessa mitoituksen mukaisen kuormituksen (koeviikot 8–12 ja 15–20) ja koko kokeen aikana (koeviikot 1–20) (k.a. = keskiarvo, Min = pienin arvo, Max = suurin arvo, STD = keskihajonta).

Tarkasteltava ajanjakso →	Koeviikot 8–12				Koeviikot 15–20				Koeviikot 1–20			
SYÖTTEET	K.a.	Min	Max	STD	K.a.	Min	Max	STD	K.a.	Min	Max	STD
Lietelantaa t/d	10,0	10,0	10,1	0,03	9,8	9,4	10,0	0,30	9,2	5,7	10,1	1,32
Lietelannan TS %	7,9	6,8	9,7	1,29	8,6	7,2	10,8	1,25	8,7	6,8	10,8	1,13
Lietelannan VS %	6,5	5,5	8,0	1,06	7,1	5,9	8,9	1,03	7,2	5,5	8,9	0,93
Sipulia t/d	0,80	0,80	0,80	0,00	0,80	0,80	0,80	0,00	0,80	0,80	0,80	0,00
Sipulin TS %	16,8	16,1	17,6	0,61	15,4	14,0	18,1	1,54	16,4	14,0	18,1	1,24
Sipulin VS %	15,6	14,9	16,3	0,57	14,3	13,1	16,8	1,44	15,2	13,1	16,8	1,15
Syötettä yhteensä t/d	10,8	10,8	10,9	0,03	10,6	10,2	10,8	0,30	10,0	6,5	10,9	1,3
Syötteen TS %	8,6	7,4	10,2	1,21	9,1	7,9	11,1	1,15	9,3	7,4	11,1	1,1
Syötteen VS %	7,2	6,2	8,5	0,99	7,6	6,6	9,2	0,94	7,8	6,2	9,2	0,9
Syötteen OLR (kgVS/m ³ *d)	3,0	2,6	3,5	0,41	3,1	2,6	3,8	0,45	3,0	2,2	3,8	0,5
Kasvin osuus OLR:sta (%)	16	13	19	2,0	14	11	18	2,2	16	11	23	2,8
HRT (d)	24	24	24	0,06	25	24	26	0,70	26	24	40	4,6
Syötteen BMP (Nm ³ CH ₄ /tVS)	243	240	245	2	241	237	245	2	242	237	251	3
KAASUN TUOTTOMÄÄRÄT JA PITOISUUDET												
Biokaasua Nm ³ /d	249	230	280	19	281	269	297	10	261	230	297	20
Metaania Nm ³ /d	136	124	152	10	153	146	162	6	142	124	162	11
CH ₄ -pitoisuus (%)*	54	54	55	0	54	–	–	–	54	53	56	1
Energiasisältö (kWh/d)	1355	1236	1516	–	1526	1462	1616	–	1417	1236	1616	–
METAANISAANNOT												
Nm ³ CH ₄ /tFM	12,5	11,4	14,0	0,94	14,4	13,6	15,2	0,58	14,1	11,4	22,0	2,4
Nm ³ CH ₄ /tTS	146	122	188	27	158	123	194	23	151	122	214	25
Nm ³ CH ₄ /tVS	175	146	225	31	189	148	231	27	181	146	254	30
Nm ³ CH ₄ /t _{VS} /BMP (%)	72	61	92	12	78	63	95	11	75	61	101	12

*Mittattu koeviikoilla 1–14

Reaktorin ja jälkikaasualtaan käsittelyjäännöksistä määritettiin VFA-pitoisuudet (Taulukko 5.16). Reaktorin kokonais-VFA-pitoisuus oli kokeen keskivaiheilla (koeviikolla 8) 440 mg/l ja kokeen loppuvaiheessa (koeviikoilla 17–20) 590–1120 mg/l. Propionihappoa kertyi prosessiin hieman enemmän kokeen loppuvaiheessa (110–150 mg/l) kuin koeviikkoon 8 mennessä (60 mg/l). Jälkikaasualtaan kokonais-VFA-pitoisuudet olivat samankaltaisia kaikissa mittauspisteissä (kokonais-VFA 190–290 mg/l). Käsittelyjäännösten viikoittaiset pH-arvot vaihtelivat kokeen aikana välillä 7,3–7,7. Koeviikoilla 10–20 molempien, reaktorin ja JKA:n pH oli keskimäärin 7,5.

Taulukko 5.16. Biokaasulaitoksen reaktorin (R) ja jälkikaasualtaan (JKA) haihtuvien rasvahappojen (VFA) pitoisuudet kokeen koeviikolla 8 ja kokeen loppuvaiheessa. Myös valerianahappo ja kapronihappo määritettiin, mutta niitä ei havaittu näytteissä ollenkaan.

Näyte/ koeviikko	Etikkahappo mg/l	Propionih. mg/l	Isovoihappo mg/l	Voihappo mg/l	Isovaleri.h. mg/l	Kok.-VFA mg/l
R/8	380	60	0	0	0	440
R/17–18	820	140	10	10	20	1000
R/19	440	110	10	10	20	590
R/20	930	150	10	10	20	1120
JKA/8	140	50	0	0	0	190
JKA/17–18	190	80	0	10	10	290
JKA/19	120	70	0	0	10	200
JKA/20	120	60	10	10	10	210

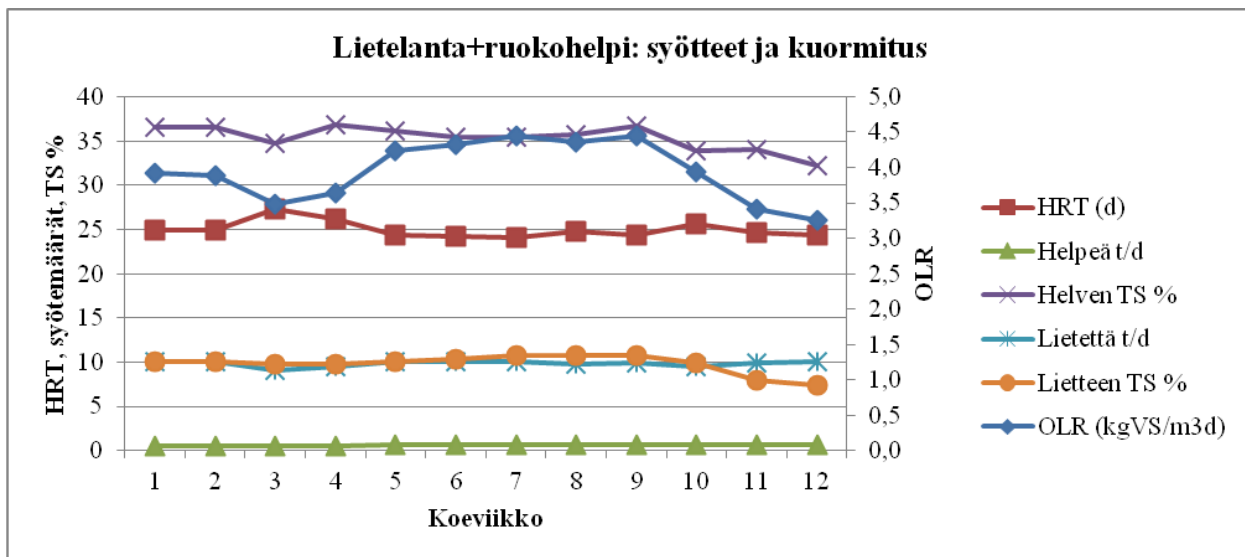
Biokaasulaitoksen syötteiden ja käsittelyjäännösten ravinnepitoisuuksia määritettiin kokeen keskivaiheelta ja lopusta (Taulukko 5.17). Analyysien perusteella syöte sisälsi kokonaistyyppä keskimäärin 3,0 kg/t (2,8–3,3 kgN/t) ja liukoista NH₄-N:ää 1,1 kg/t. Syötteessä liukoisen tyypin osuus kokonaistyyppästä oli keskimäärin 38 %. Lisäksi syöte sisälsi keskimäärin 0,5 kgP/t ja 3,0 kgK/t. Reaktorin käsittelyjäännös sisälsi keskimäärin 2,9 kgN/t ja 1,3 kgNH₄-N/t. Liukoisen tyypin osuus oli keskimäärin 46 %. Keskiarvojen perusteella laskettuna liukoisen tyypin osuus kokonaistyyppästä reaktorin jäännöksessä oli 21 % suurempi kuin liukoisen tyypin osuus kokonaistyyppästä syötteessä. Reaktorijäännöksessä oli 0,55 kgP/t ja 3,3 kgK/t. Jälkikaasualtaan (JKA) käsittelyjäännös sisälsi keskimäärin 2,6 kgN/t ja 1,7 kgNH₄-N/t. Liukoisen tyypin osuus oli keskimäärin 62 % (51–74 %). Syötteen ja JKA:n käsittelyjäännöksen keskimääräisten liukoisen tyypin osuuksien perusteella laskettuna kasveille käyttökelpoisen mineraalityypin osuus kasvoi prosessissa 65 %. JKA sisälsi keskimäärin 0,04 kgP/t ja 3,3 kgK/t. Vesiliukoista eli pelloilta helposti ympäristöön huuhtoutuvaa fosforia oli käsittelyjäännöksissä (0,03–0,04 kg/t) vähemmän kuin lietelannassa (0,07 kg/t; Taulukko 5.17).

Taulukko 5.17. Syötteiden sekä reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) käsittelyjäännösten TS-, VS- ja ravinnepitoisuudet.

Näyte/ koeviikko	TS %	VS %	VS/TS -suhde	N _{tot} kg/t	NH ₄ -N kg/t	N/NH ₄ -N %	P _{tot} kg/t	Pliuk kg/t	K kg/t
SYÖTTEET									
Lanta/8	6,8	5,6	0,83	2,6	1,0	39	0,4	0,07	2,9
Lanta/17–18	9,7	8,0	0,82	3,3	1,3	40	–	–	–
Lanta/19	7,9	6,5	0,82	2,8	1,1	39	0,6	–	3,1
Lanta/20	7,2	5,9	0,82	2,8	1,2	43	–	–	–
Lanta keskiarvo	7,9	6,5	0,82	2,9	1,2	40	0,5	0,07	3,0
Sipulimassa/17–18	15,2	14,3	0,94	2,9	0,3	9	0,4	–	2,5
Syöte/8	7,4	6,2	0,84	2,6	1,0	36	0,4	–	2,9
Syöte/17–18	10,1	8,4	0,83	3,3	1,2	38	–	–	–
Syöte/19	8,5	7,1	0,83	2,8	1,0	37	0,6	–	3,1
Syöte/20	7,8	6,6	0,83	2,8	1,1	40	–	–	–
Syöte keskiarvo	8,4	7,1	0,83	2,9	1,1	38	0,5	–	3,0
KÄSITTELYJÄÄNNÖKSET									
Reaktori/8	5,3	4,0	0,76	3,2	1,5	48	0,6	0,04	3,7
Reaktori/17–18	5,4	4,1	0,76	2,7	1,3	46	–	–	–
Reaktori/19	5,4	4,1	0,77	2,7	1,2	46	0,5	0,04	3,0
Reaktori/20	6,6	5,2	0,80	2,9	1,2	42	–	–	–
Reaktori keskiarvo	5,6	4,4	0,77	2,9	1,3	46	0,5	0,04	3,3
JKA/8	4,8	3,5	0,74	2,8	1,4	51	0,4	0,03	3,5
JKA/17–18	4,5	3,4	0,75	2,6	1,4	53	–	–	–
JKA/19	4,8	3,6	0,76	2,6	1,9	74	0,4	0,03	3,1
JKA/20	4,7	3,5	0,75	2,6	1,9	73	–	–	–
JKA keskiarvo	4,7	3,5	0,75	2,6	1,7	63	0,4	0,03	3,3

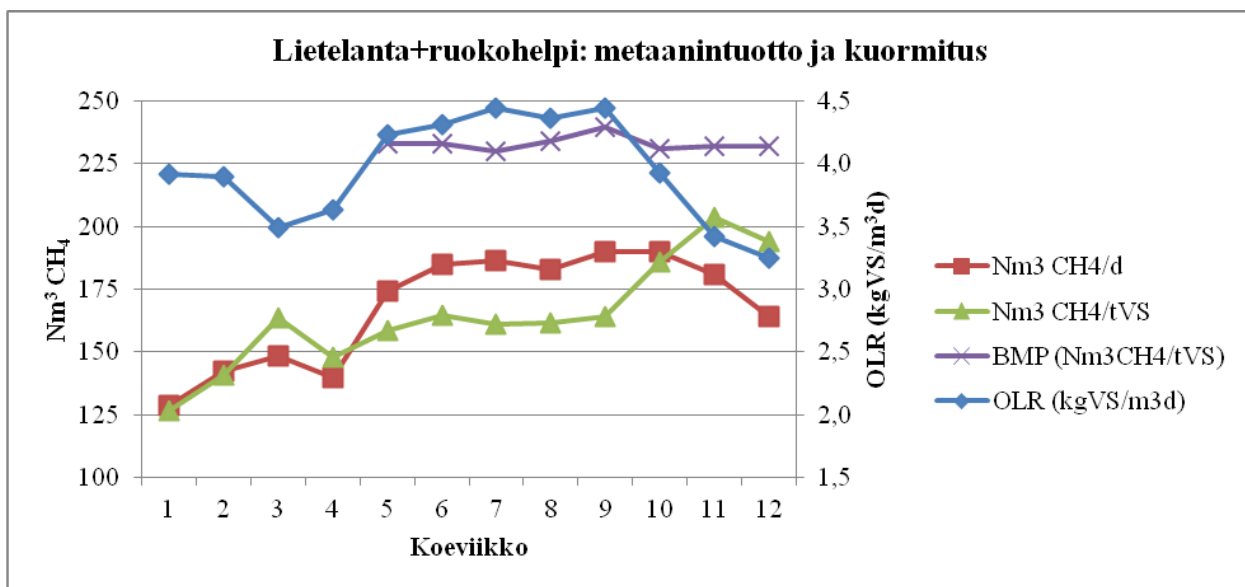
5.4.3 Maatilamittakaavan koe: naudan lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittely

Lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelykoe toteutettiin 28.2.–5.5.2011. Kokeen alussa syötettiin neljän viikon ajan 450 kg/d heikosti sulavaa, hieman pajua sisältävää lannoittamatonta ruokohelpeä, joka oli korjattu, paalattu ja käsitelty biologisella säilöntäaineella syyskuussa 2011 (yksi korjuukerta). Koeviikoilla 5–12 syötettiin paremmin hajoavaa, kahden korjuukerran (22.6. ja 28.9.2010, ensimmäinen sato lannoitettu) ruokohelpeä. Koko kokeen aikana (koeviikot 1–12) ruokohelpisyötteen TS-pitoisuus oli keskimäärin 35,2 %. Lietelantaa syötettiin kokeen aikana keskimäärin 9,8 m³/d (TS-pitoisuus 9,8 %). Biokaasulaitoksen keskimääräinen orgaaninen kokonaiskuormitus oli kokeen aikana 3,9 kgVS/m³d, ruokohelven osuus kuormituksesta oli 20 %. Syötteen viipymä (HRT) reaktorissa ja jälkikaasualtaassa 25+25 d (Kuva 5.9).



Kuva 5.9. Lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelykokeen syötemäärät, syötteiden TS-pitoisuudet, biokaasureaktorin orgaaninen kuormitus (OLR) ja syötteen hydraulinen viipymä (HRT) reaktorissa viikkokeskiarvoina.

Biokaasua tuotettiin koko kokeen aikana keskimäärin 294 Nm³/d, josta metaania oli 168 Nm³/d. Syöte-tonnia kohti metaania tuotettiin 16,1 Nm³/t ja syötteen orgaanisen kuiva-aineen tonnia kohti 164 Nm³/tVS (Kuva 5.10).



Kuva 5.10. Biokaasulaitoksen orgaaninen kuormitus (OLR), päivittäinen metaanintuotto (Nm³CH₄/d), metaanintuotto syötteen orgaanisen kuiva-aineen tonnia kohti (Nm³CH₄/tVS) ja syötteen metaanintuottopotentiaali (BMP, Nm³CH₄/tVS).

Ensimmäisen neljän koeviikon aikana lietelannan syöttömäärä oli 9,6 m³/d (TS 9,9 %) ja ruokohelpeä 450 kg/d (TS 36,2 %, BMP ei määritetty). Kokonaiskuormitus oli 3,7 kgVS/m³d ja helven osuus kuormituksesta 15 %. Syötteen viipymä laitoksessa oli 26+26 d. Biokaasua tuotettiin 240 Nm³/d, josta metaania oli 140 Nm³/d. Syöte-tonni tuotti metaania 13,9 Nm³ ja syötteen VS-tonni 144 Nm³ metaania (Taulukko 5.18).

Taulukko 5.18. Biokaasulaitoksen syötteet ja prosessiparametrit lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelykokeessa aloitusvaiheessa (koeviikot 1–4, helpisyöttö 450 kg/d) korkean kuormituksen aikana (koeviikot 5–10) ja alhaisen kuormituksen aikana (koeviikot 11–12) (K.a. = keskiarvo, Min = pienin arvo, Max = suurin arvo, STD = keskihajonta).

Tarkasteltava ajanjakso →	Koeviikot 1–4				Koeviikot 5–10				Koeviikot 11–12			
SYÖTTEET	K.a.	Min	Max	STD	K.a.	Min	Max	STD	K.a.	Min	Max	STD
Lietelantaa t/d	9,6	9,1	10,0	0,45	9,9	9,4	10,1	0,24	9,9	9,8	10,0	0,11
Lietelannan TS %	9,9	9,7	10,1	0,18	10,4	9,9	10,8	0,36	7,7	7,4	7,9	0,37
Lietelannan VS %	8,5	8,3	8,7	0,16	9,0	8,5	9,2	0,31	6,6	6,4	6,8	0,32
Ruokohelpeä t/d	0,45	0,45	0,45	0,00	0,70	0,70	0,70	0,00	0,70	0,70	0,70	0,00
Ruokohelven TS %	36,2	34,8	36,9	0,95	35,5	33,9	36,7	0,96	33,1	32,2	34,0	1,3
Ruokohelven VS %	33,3	32,0	33,9	0,87	32,7	31,2	33,8	0,88	30,4	29,6	31,3	1,2
Helven BMP (Nm ³ CH ₄ /tVS)	–	–	–	–	336	318	367	17	309	308	309	0
Syötettä yhteensä t/d	10,1	9,5	10,5	0,45	10,6	10,1	10,8	0,23	10,6	10,5	10,7	0,1
Syötteen TS %	11,1	10,9	11,2	0,14	12,1	11,6	12,5	0,36	9,3	9,0	9,7	0,4
Syötteen VS %	9,6	9,5	9,7	0,12	10,5	10,1	10,8	0,31	8,2	7,9	8,4	0,4
Syötteen OLR (kgVS/m ³ *d)	3,7	3,5	3,915	0,21	4,3	3,9	4,4	0,2	3,3	3,2	3,4	0,1
Helven osuus OLR:sta (%)	15	15	16	0,6	21	20	21	0,6	25	25	25	0,1
HRT (d)	26	25	27	1,2	25	24	26	0,6	24	24	25	0,3
Syötteen BMP (Nm ³ CH ₄ /tVS)	–	–	–	–	233	230	240	3	232	232	232	0
KAASUN TUOTTOMÄÄRÄT JA PITOISUDET												
Biokaasua Nm ³ /d	240	221	249	13	326	302	336	13	308	297	319	16
Metaania Nm ³ /d	140	129	148	8	185	174	190	6	172	164	181	12
CH ₄ -pitoisuus (%)	58	56	60	2	57	56	58	1	56	55	57	1
JKA:n osuus CH ₄ -tuotosta (%)*	–	–	–	–	19	18	21	2	20	19	21	2
JKA:n lämpötila (°C)*	–	–	–	–	32	31	33	1	34	34	34	0
Energiasäilö (kWh/d)	1399	1289	1483	–	1847	1744	1899	–	1724	1640	1807	–
METAANISAANNOT												
Nm ³ CH ₄ /tFM	13,9	12,3	16	1,3	17,4	16,3	18,7	0,8	16,2	15,3	17,1	1,3
Nm ³ CH ₄ /tTS	125	110	142	13	144	138	162	9	174	169	178	6
Nm ³ CH ₄ /tVS	144	127	163	15	166	159	186	10	199	194	203	7
Nm ³ CH ₄ /tVS/BMP (%)	–	–	–	–	71	68	80	5	86	84	88	3

*Mitattu koeviikoilla 8–12

Korkean kuormituksen aikana (koeviikot 5–10) laitoksen kokonaiskuormitus oli 4,3 kgVs/m³d (HRT 25+25 d). Ruokohelpeä syötettiin 700 kg/d (TS 35,5 %, BMP 336 Nm³CH₄/tVS) ja sen osuus kuormituksesta oli 21 %. Lietelantasyötteen (9,9 m³/d) TS-pitoisuus oli 10,4 %. Biokaasua tuotettiin 326 Nm³/d ja metaania 185 Nm³/d. Syötetönni tuotti 17,4 Nm³CH₄. Syötteen BMP:sta toteutui 71 %, eli 166 Nm³CH₄/tVS. Jälkikaasuallas tuotti koeviikoilla 8–10 kokonaisbiokaasusta 19 % (Taulukko 5.18).

Matalan kuormituksen aikana kokeen lopussa (koeviikot 11–12) lietelantasyötteen (9,9 m³/d) TS-pitoisuus oli 7,7 % ja ruokohelpisyötteen (700 kg/d) TS-pitoisuus 33,1 %. Laitoksen kuormitus oli 3,3 kgVS/m³d ja helven osuus kuormituksesta oli 25 %. Viipymä oli 25+25 d. Biokaasua tuotettiin 308 Nm³/d, metaania 172 Nm³/d (16,2 Nm³CH₄/syötetönni). Ruokohelven BMP oli jakson aikana 309 Nm³CH₄/tVS. Laitokseen syötetty VS-tonni tuotti metaania 199 Nm³, kokonaisyötteen BMP:sta toteutui 86 %. Jälkikaasuallas tuotti 20 % biokaasusta.

Reaktorin ja jälkikaasualtaan käsittelyjäännöksistä määritettiin VFA-pitoisuudet korkean kuormituksen alussa (koeviikko 5) ja lopussa (viikko 10; Taulukko 5.19). Kokonais-VFA-pitoisuudet olivat alhaisia. Reaktorinjäännöksen VFA-pitoisuus oli hiemna korkeampi jakson alussa (150 mg/l) kuin lopussa (120 mg/l). Jälkikaasualtaan VFA-pitoisuudet olivat samanlaiset molemmissa näytepisteissä (kokonais-VFA 60 mg/l). Reaktorin ja jälkikaasualtaan viikoittain määritetyt pH-arvot olivat molemmat keskimäärin 7,5 ja pH:n vaihtelu oli viikosta toiseen vähäistä (reaktori 7,4–7,6 ja JKA 7,5–7,6).

Taulukko 5.19. Biokaasulaitoksen reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) haihtuvien rasvahappojen (VFA) pitoisuudet kokeen koeviikolla 8 ja kokeen loppuvaiheessa. Myös isovoihappo, valeriaanahappo ja kapronihappo määritettiin, mutta niitä ei havaittu näytteissä ollenkaan.

Näyte/ koeviikko	Etikkahappo mg/l	Propionih. mg/l	Voihappo mg/l	Isovaleri.h. mg/l	Kok.-VFA mg/l
Reaktori/5	120	10	10	10	150
Reaktori/10	90	10	10	10	120
JKA/5	40	10	0	10	60
JKA/10	40	10	0	10	60

Syötteiden ja käsittelyjäännösten ravinnepitoisuuksia määritettiin kokeen keski- ja loppuvaiheesta (Taulukko 5.20). Syötteen VS/TS-suhdeluku oli näytteissä keskimäärin 0,86. Syötteen N-pitoisuus oli keskimäärin 3,4 kg/t ja NH₄-N-pitoisuus 1,1, eli liukoisen typen osuus syötteessä oli 33 %. Syötteessä oli fosforia keskimäärin 0,6 kg/t ja kaliumia 2,9 kg/t. Reaktorin käsittelyjäännöksen TS-pitoisuus oli näytenäytteissä keskimäärin 7,3 % ja VS/TS-suhde 0,80. Reaktorijäännöksen N-pitoisuuden keskiarvo oli 3,3 kg/t ja liukoisen NH₄-N:n osuus siitä oli 48 % (1,6 kg/t). Reaktorissa oli keskimäärin 0,7 kg/t fosforia ja 3,7 kg/t kaliumia. Jälkikaasualtaan TS oli keskimäärin 5,3 % ja VS/TS-suhde 0,76. Kokonaistypen pitoisuus oli keskimäärin 3,0 kg/t, josta liukoista tyyppiä oli 55 %. Syötteen ja JKA:n jäännöksen keskimääräisten NH₄-N/N-suhdelukujen perusteella laskettuna kasveille käyttökelpoisen mineraalitypen osuus kasvoi biokaasuprosessin aikana 66 %. JKA:n jäännös sisälsi 0,5 kgP/t ja 3,7 kgK/t. Pellolta ympäristöön helposti huuhtoutuvaa vesiliukoista fosforia oli lietelannassa (0,09 kg/t) lähes kaksinkertainen määrä jäännöksen pitoisuuksiin (0,05 kg/t) verrattuna (taulukko 5.20).

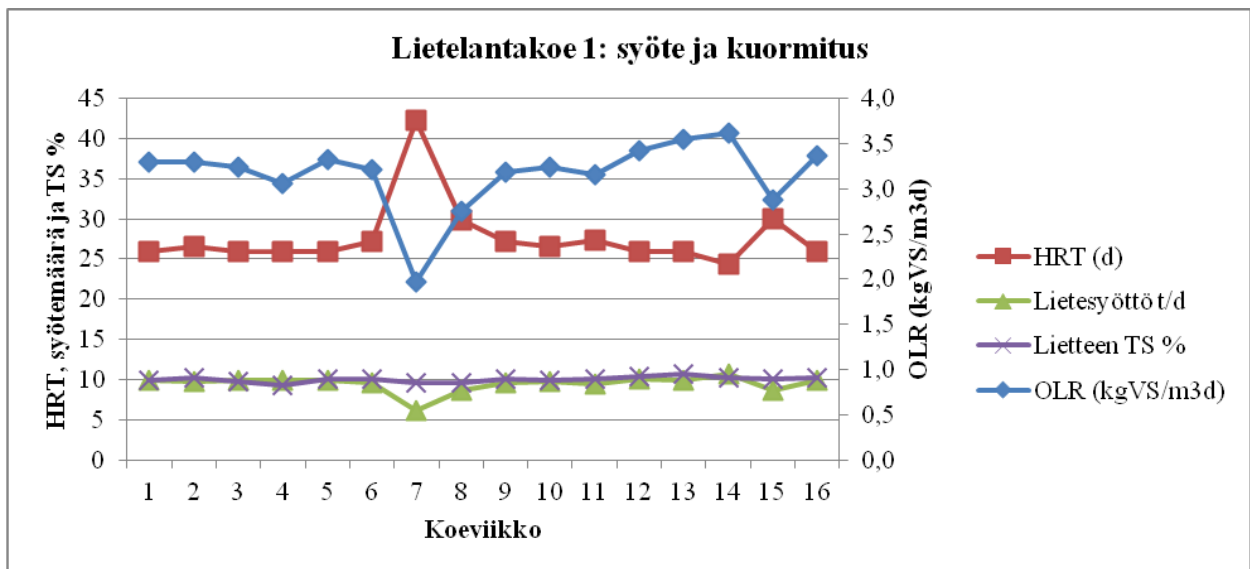
Taulukko 5.20. Syötteiden sekä reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) käsittelyjäännösten TS-, VS- ja ravinnepitoisuudet.

Näyte/ koeviikko	TS %	VS %	VS/TS -suhde	Ntot kg/t	NH ₄ -N kg/t	N/NH ₄ -N %	Ptot kg/t	Pliuk kg/t	K kg/t
SYÖTTEET									
Lanta/5–10	10,4	8,9	0,85	3,6	1,2	32	–	–	–
Lanta/11	7,9	6,7	0,85	3,0	1,1	37	0,6	0,09	2,6
Lanta keskiarvo	9,2	7,8	0,85	3,3	1,1	34	0,6	0,09	2,6
Helpi/5–12	34,9	32,1	0,92	4,5	0,3	7	0,9	–	7,0
Syöte/5–10	12,1	10,5	0,86	3,7	1,1	31	–	–	–
Syöte/11	9,7	8,4	0,85	3,1	1,1	35	0,6	–	2,9
Syöte keskiarvo	10,9	9,4	0,86	3,4	1,1	33	0,6	–	2,9
KÄSITTELYJÄÄNNÖKSET									
Reaktori/5	7,4	6,0	0,8	3,2	1,6	49	0,6	0,05	3,7
Reaktori/10	7,3	5,7	0,8	3,4	1,6	48	0,7	0,06	3,7
Reaktori keskiarvo	7,3	5,9	0,80	3,3	1,6	48	0,7	0,05	3,7
JKA/5	5,1	3,9	0,8	2,9	1,6	56	0,5	0,05	3,6
JKA/10	5,5	4,2	0,8	3,1	1,6	53	0,6	0,06	3,8
JKA keskiarvo	5,3	4,1	0,76	3,0	1,6	55	0,5	0,05	3,7

5.4.4 Maatilamittakaavan koe: naudan lietelannan käsittely

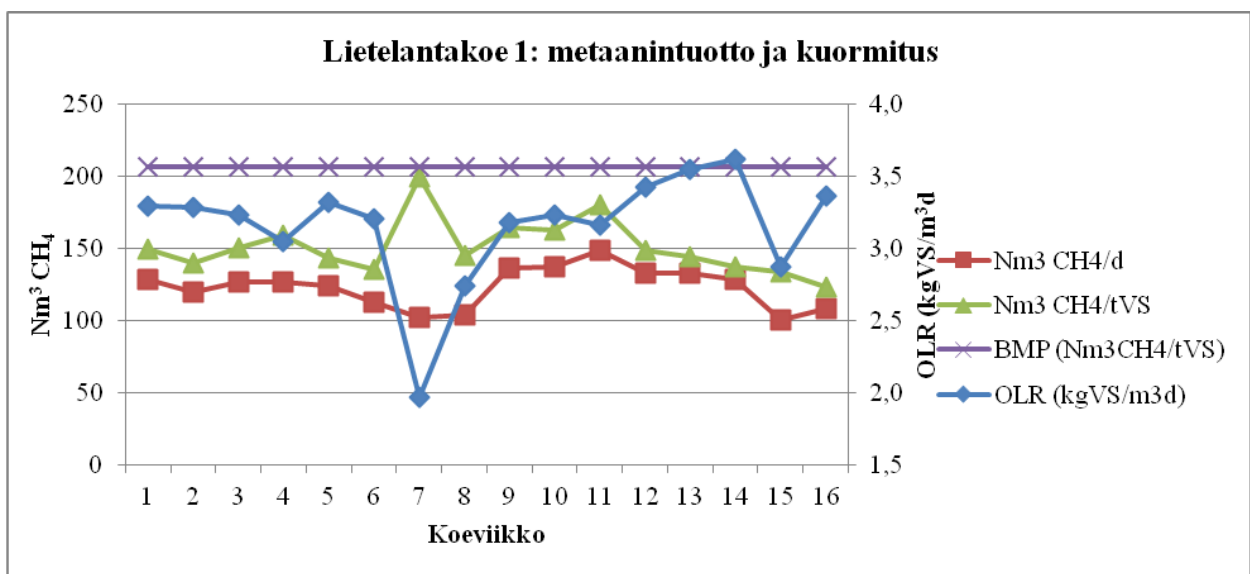
LANTAKOE 1

Ensimmäisessä lietelannan käsittelykokeessa (Lantakoe 1) käytettiin syötteenä paksua lietelantaa, jonka TS-pitoisuus oli keskimäärin 10,0 %. Lietettä syötettiin 9,9 m³/d. Laitoksen kuormitus oli keskimäärin 3,2 kgVS/m³d ja viipymä 27+27 d (Kuva 1).



Kuva 5.11. Ensimmäisen lietelantakokeen syöttömäärät, syötteen kuiva-ainepitoisuus (TS %), reaktorin orgaaninen kuormitus (OLR) ja viipymä (HRT) viikkokeskiarvoina.

Kokeen aikana tuotettiin biokaasua keskimäärin $220 \text{ Nm}^3/\text{d}$, josta metaanin osuus oli $126 \text{ Nm}^3/\text{d}$ (metaanipitoisuus 57 til%). Lietelantatonna tuotti metaania $13,2 \text{ Nm}^3$. Lietelanan metaanintuottopotentiaalista ($207 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$) toteutui keskimäärin 74 % (Kuva 5.12).



Kuva 5.12. Biokaasulaitoksen orgaaninen kuormitus (OLR), päivittäinen metaanintuotto ($\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{d}$), metaanintuotto syötteen orgaanisen kuiva-aineen tonnia kohti ($\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$) ja syötteen metaanintuottopotentiaali (BMP, $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$) Lantakoe 1:n aikana.

Koeviikoilla 9–14 syötettiin erittäin paksua lietelantaa (TS 10,3 %) keskimäärin $9,9 \text{ m}^3/\text{d}$. Tällöin kuormitus oli $3,4 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$ ja viipymä $26+26 \text{ d}$. Biokaasua tuotettiin keskimäärin $235 \text{ Nm}^3/\text{d}$ ja metaania $136 \text{ Nm}^3/\text{d}$. Syötetonna tuotti metaania $13,7 \text{ Nm}^3$. Lanan BMP:sta toteutui 75 %, eli tuotto oli keskimäärin $156 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$ (Taulukko 5.21).

Taulukko 5.21. Biokaasulaitoksen syötteet ja prosessiparametrit koko ensimmäisen lietelantakokeen sekä korkeamman kuormituksen (viikot 9–14) aikana (k.a. = keskiarvo, Min = pienin arvo, Max = suurin arvo, STD = keskihajonta).

Tarkasteltava ajanjakso →	Koeviikot 9–14				Koeviikot 1–14			
SYÖTTEET	K.a.	Min	Max	STD	K.a.	Min	Max	STD
Lietelantaa t/d	9,9	9,5	10,7	0,42	9,6	6,2	10,7	1,07
Lietelannan TS %	10,3	10,0	10,7	0,27	10,0	9,2	10,7	0,36
Lietelannan VS %	8,8	8,6	9,2	0,23	8,6	7,9	9,2	0,31
OLR (kgVS/m ³ d)	3,4	3,2	3,6	0,20	3,2	2,0	3,6	0,40
HRT (d)	26	24	27	1	27	24	42	4
Lannan BMP (Nm ³ CH ₄ /tVS)*	207	207	207	–	207	207	207	–
KAASUN TUOTTOMÄÄRÄT JA PITOISUUDET								
Biokaasua Nm ³ /d	235	224	253	10	220	175	253	20
Metaania Nm ³ /d	136	129	148	7	126	102	148	13
CH ₄ -pitoisuus (%)	58	57	59	1	57	54	59	2
Energiasisältö (kWh/d)	1362	1291	1485	–	1259	1022	1485	–
METAANISAANNOT								
Nm ³ CH ₄ /tFM	13,7	12,1	15,6	1,2	13,2	11,8	16,6	1,4
Nm ³ CH ₄ /tTS	134	118	155	14	131	116	171	15
Nm ³ CH ₄ /tVS	156	137	181	16	153	135	200	18
Nm ³ CH ₄ /tVS/BMP (%)	75	66	87	8	74	65	96	9

*Määritetty kokeen jälkeen, lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelykokeen aikana

Reaktorin ja jälkikaasualtaan käsittelyjäännöksistä määritettiin VFA-pitoisuudet kokeen lopussa (Taulukko 5.22). Kokonais-VFA-pitoisuudet olivat alhaisia, reaktorissa 180–200 mg/l ja JKA:ssa 80–90 mg/l. Molempien käsittelyjäännösten viikoittaiset pH-arvot olivat keskimäärin 7,6 (7,5–7,7).

Taulukko 5.22. Biokaasulaitoksen reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) haihtuvien rasvahappojen (VFA) pitoisuudet ensimmäisen lietelantakokeen loppuvaiheessa. Myös valeriaanahappo, isovaleriaanahappo ja kapronihappo määritettiin, mutta niitä ei havaittu näytteissä ollenkaan.

Näyte/ koeviikko	SCOD mg/l	Etikkahappo mg/l	Propionih. mg/l	Isovoihappo mg/l	Voihappo mg/l	Kok.-VFA mg/l	pH
Reaktori/12	10700	160	10	0	10	180	
Reaktori/14	11100	180	20	0	0	200	
Reaktori keskiarvo	10900	170	15	0	5	190	7,6
JKA/12	9600	70	10	0	0	80	
JKA/14	10400	80	10	0	0	90	
JKA keskiarvo	10000	75	10	0	0	85	7,6

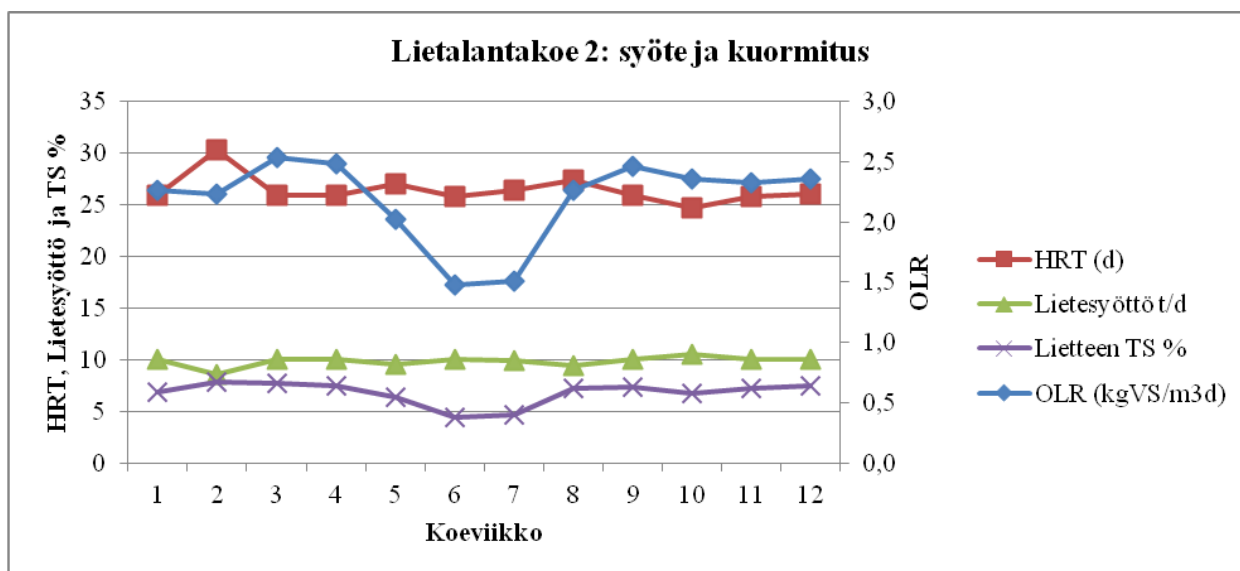
Syötteiden ja käsittelyjäännösten ravinnepitoisuuksia määritettiin kokeen loppuvaiheesta (Taulukko 5.23). Lietelannan VS/TS-suhdeluku oli keskimäärin 0,85. Lietteiden N-pitoisuus oli keskimäärin 3,3 kg/t ja NH₄-N:n osuus siitä oli 42 %. Lanta sisälsi 0,7 kgP/t ja 3,2 kgK/t. Reaktorin käsittelyjäännös sisälsi 3,1 kgN, 1,7 kgNH₄-N, 0,6 kgP/t ja 3,5 kgK/t. Reaktorijäännöksen tyyppistä 56 % oli liukoisessa muodossa. Jälkikaasualtaan käsittelyjäännös sisälsi 3,1 kgN, 1,8 kgNH₄-N, 0,6 kgP/t ja 3,5 kgK/t. Liukoisen tyyppien osuus kokonaistyyppistä oli 60 %. Lietelannan ja JKA:n jäännöksen keskimääräisten NH₄-N/N-suhdelukujen perusteella laskettuna kasveille käyttökelpoisen mineraalityypen osuus kasvoi biokaasuprosessin aikana 40 %.

Taulukko 5.23. Syötteiden sekä reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) käsittelyjäännösten TS-, VS- ja ravinnepitoisuudet ensimmäisessä lietelantakokeessa.

Näyte/ koeviikko	TS %	VS %	VS/TS -suhde	Ntot kg/t	NH ₄ -N kg/t	N/NH ₄ -N %	Ptot kg/t	Pliuk kg/t	K kg/t
Lanta/12	9,9	8,4	0,84	3,5	1,5	43	0,7	0,02	3,5
Lanta/14–15	10,1	8,7	0,86	3,1	1,3	42	0,6	0,06	2,8
Lanta keskiarvo	10,0	8,6	0,85	3,3	1,4	42	0,7	0,04	3,2
KÄSITTELYJÄÄNNÖKSET									
Reaktori/12	6,1	4,9	0,80	3,3	1,8	54	0,6	0,04	3,5
Reaktori/14	5,6	4,5	0,80	3,0	1,7	57	0,6	0,04	3,4
Reaktori keskiarvo	5,9	4,7	0,8	3,1	1,7	56	0,6	0,04	3,5
JKA/12	5,3	4,0	0,75	3,0	1,9	62	0,5	0,04	3,6
JKA/14	5,4	4,1	0,76	3,2	1,8	57	0,6	0,04	3,5
JKA keskiarvo	5,3	4,0	0,76	3,1	1,8	60	0,6	0,04	3,5

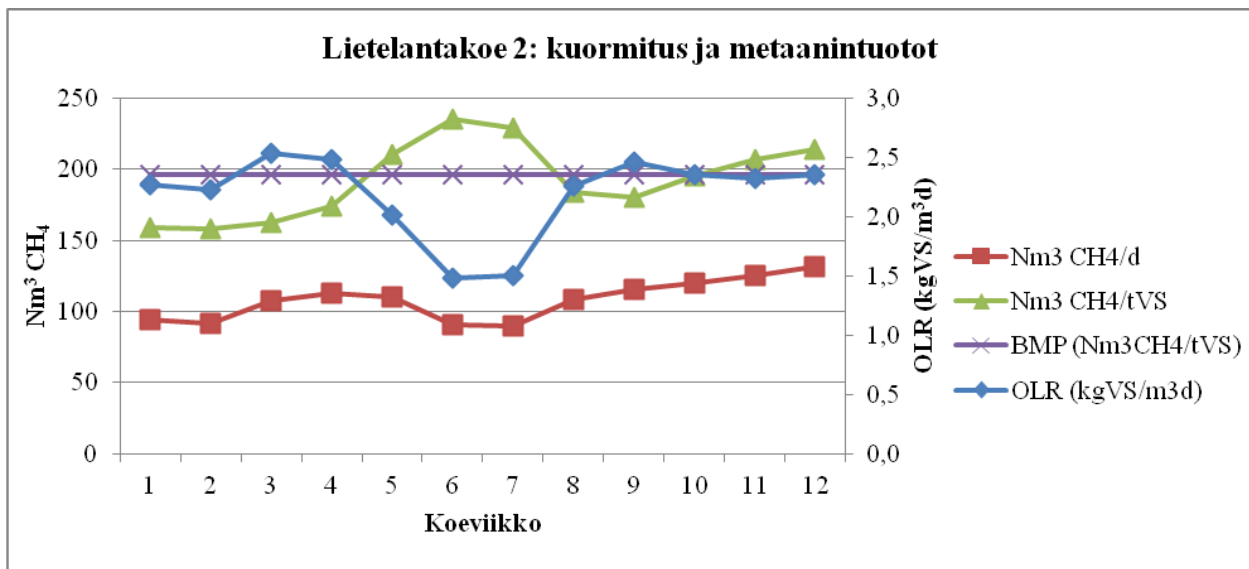
LANTAKOE 2

Toisessa lietelantakokeessa (Lantakoe 2, 14.11.2011–12.2.2012) käsiteltiin vesipitoisempaa lietelantaa. Koeviikoilla 3–12 lietelantaa syötettiin keskimäärin 10,0 m³/d (TS keskimäärin 6,8 %, vaihteluväli 4,4–8,4 %). Kuormitus oli keskimäärin 2,2 kgVS/m³d ja viipymä 26+26 d (Kuva 5.13).



Kuva 5.13. Toisen lietelantakokeen syöttömäärät, syötteen kuiva-ainepitoisuus (TS %), reaktorin orgaaninen kuormitus (OLR) ja viipymä (HRT) viikkokeskiarvoina.

Biokaasua tuotettiin koeviikoilla 3–12 keskimäärin 194 Nm³/d ja metaania 113 Nm³/d (metaanipitoisuus 58 til%). Lietelantatonna tuotti metaania keskimäärin 11,3 Nm³. Lietelannan BMP:sta (196 Nm³CH₄/tVS) toteutui biokaasualaitoksessa 100 % (197 Nm³CH₄/tVS (Kuva 5.14).



Kuva 5.14. Biokaasulaitoksen orgaaninen kuormitus (OLR), päivittäinen metaanintuotto (Nm³CH₄/d), metaanintuotto syötteen orgaanisen kuiva-aineen tonnia kohti (Nm³CH₄/tVS) ja syötteen metaanintuottopotentiaali (BMP, Nm³CH₄/tVS) Lantakoe 2:n aikana.

Kokeessa tutkittiin sekoitustehon vaikutusta metaanintuottoon. Kokeen alussa käytettiin samaa sekoitusnopeutta kuin Lantakoe 1:ssä. Reaktorin sekoittimien koeviikoilla 3–5 mitattu sähkönkulutus oli 111 kWh/d. Jälkikaasuallasta (JKA) sekoitin kulutti sähköä 14 kWh/d. JKA:n lämpötila oli 30 °C ja se tuotti 14,3 % metaanista. Lietelantaa syötettiin 9,9 m³/d (TS 7,2 %). Laitoksen kuormitus oli 2,3 kgVS/m³d ja viipymä 26+26 d. Metaania tuotettiin jaksolla 110 Nm³/d (92 % BMP:sta).

Kokeen toisessa vaiheessa (koeviikot 6–9) alennettiin reaktorin sekoittimien pyörimisnopeutta. Koeviikoilla 8–9, laitoksen orgaanisen kuormituksen ollessa 2,4 kgVS ja viipymän 27+27 d, reaktorin sekoitus kulutti sähköä 80 kWh/d ja JKA 14 kWh/d. Metaania tuotettiin 112 Nm³/d, JKA:n (lämpötila 30 °C) osuus tuotosta oli 14,2 %. Lannan BMP:sta toteutui 96 %.

Koeviikoilla 10–12 reaktorin sekoitukseen käytettiin sähköä 62–63 kWh/d ja JKA:n sekoitukseen edelleen 14 kWh/d. Lietelannan TS-pitoisuus (7,2 %) ja kuormitus (2,3 kgVS/m³d) ja viipymä (25+25 d) olivat samankaltaisia kuin kahdella edellä mainitulla tarkastelujaksolla. Metaania tuotettiin 125 Nm³/d ja lannan BMP:sta toteutui 105 %. Edellisistä jaksosta poiketen JKA (30 °C) tuotti hieman pienemmän osan kaasusta, 13,3 % (Taulukko 5.24).

Taulukko 5.24. Biokaasulaitoksen syötteet ja prosessiparametrit koko ensimmäisen lietelantakokeen sekä korkeamman kuormituksen (viikot 9–14) aikana (k.a. = keskiarvo, Min = pienin arvo, Max = suurin arvo, STD = keskihajonta).

Tarkasteltava ajanjakso →	Koeviikot 3–5				Koeviikot 8–9				Koeviikot 10–12			
SYÖTTEET	K.a.	Min	Max	STD	K.a.	Min	Max	STD	K.a.	Min	Max	STD
Lietelantaa t/d	9,9	9,6	10,0	0,2	9,8	9,5	10,0	0,4	10,2	10,0	10,5	0,3
Lietelannan TS %	7,2	6,4	7,7	0,7	7,3	7,2	7,4	0,2	7,2	6,8	7,5	0,4
Lietelannan VS %	6,2	5,5	6,6	0,6	6,3	6,2	6,4	0,1	6,0	5,8	6,1	0,2
OLR (kgVS/m ³ *d)	2,3	2,0	2,5	0,3	2,4	2,3	2,5	0,1	2,3	2,3	2,4	0,0
HRT (d)	26	26	27	0,6	27	26	27	1	25	25	26	0,7
Lannan BMP (Nm ³ CH ₄ /tVS)	196	196	196	–	196	196	196	–	196	196	196	–
KAASUN TUOTTOMÄÄRÄT JA PITOISUUDET												
Biokaasua Nm ³ /d	191	184	196	6	197	192	202	8	207	202	214	7
CH ₄ -pitoisuus (%)	58	57	58	1	57	56	57	1	61	59	62	2
Metaania Nm ³ /d	110	107	112	3	112	108	116	5	125	120	131	6
JKA:n osuus CH ₄ -tuotosta (%)	14,3	12,4	15,6	1,6	14,2	13,8	14,6	0,6	13,3	12,1	14,8	1,4
JKA:n lämpötila (°C)	30	30	30	0	30	30	30	0	30	30	31	0
Energiasäilytö (kWh/d)	1100	1072	1124	27	1119	1083	1156	52	1253	1197	1312	57
METAANISAANNOT												
Nm ³ CH ₄ /tFM	11,1	10,7	11,5	0,4	11,5	11,4	11,5	0,1	12,3	11,4	13,1	0,9
Nm ³ CH ₄ /tTS	155	139	181	22	156	155	158	2	171	167	175	4
Nm ³ CH ₄ /tVS	180	163	211	25	182	181	184	2	205	195	214	9
Nm ³ CH ₄ /tVS/BMP (%)	92	83	108	13	93	92	94	1	105	100	109	5
SEKOITUS												
Reaktorin sekoitusenergia (kWh/d)	111	110	112	0,8	80	80	81	0,4	62	62	63	0,5
Reaktioin sekoitusteho (W/m ³)	17,8	17,6	17,9	0,1	12,9	12,8	12,9	0,1	10,0	9,9	10,1	0,1
JKA:n sekoitusenergia (kWh/d)	14	14	15	0,4	14	14	14	0,0	14	14	14	0,3
JKA:n sekoitusteho (W/m ³)	2,3	2,2	2,3	0,1	2,3	2,3	2,3	0,0	2,2	2,2	2,3	0,0

Reaktorin ja jälkikaasualtaan käsittelyjäännöksistä määritettiin VFA- ja SCOD-pitoisuudet kokeen keski- ja loppuvaiheessa (Taulukko 5.25). Kokonais-VFA-pitoisuudet olivat reaktorissa 160–260 mg/l ja JKA:ssa 80–100 mg/l. Prosessiin kertyvistä välituotteista kertova liukoinen kemiallinen hapenkulutus (SCOD) oli reaktorin käsittelyjäännöksessä keskimäärin 7,9 g/kg ja JKA:n jäännöksessä keskimäärin 7,4 g/l. Reaktorin viikoittain mitattu pH-arvo oli keskimäärin 7,7 (7,6–7,8) ja jälkikaasualtaan 7,7 (7,5–7,7) (Taulukko 5.25).

Taulukko 5.25. Biokaasulaitoksen reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) haihtuvien rasvahappojen (VFA) pitoisuudet toisen lietelantakokeen aikana. Myös isovoihappo, valerianahappo, isovalerianahappo ja kapronihappo määritettiin, mutta niitä ei havaittu näytteissä ollenkaan.

Näyte/ koeviikko	SCOD mg/l	Etikkahappo mg/l	Propionih. mg/l	Voihappo mg/l	Kok.-VFA mg/l	pH
Reaktori/5	6831	220	30	10	260	
Reaktori/6	7866	140	20	0	160	
Reaktori/10	9038	200	20	10	230	
Reaktori keskiarvo	7912	187	23	7	217	7,7
JKA/5	–	90	10	0	100	
JKA/6	7280	80	10	0	90	
JKA/10	7568	70	10	0	80	
JKA keskiarvo	7424	80	10	0	90	7,6

Syötteiden ja käsittelyjäännösten ravinnepitoisuuksia määritettiin kokeen alku, keksi- ja loppuvaiheessa (Taulukko 5.26). Lietelannan VS/TS-suhdeluku oli keskimäärin 0,82. Lietelanta sisälsi keskimäärin 3,2 kgN/t, 1,8 kgNH₄-N/t, 0,5 kgP/t ja 3,8 kgK/t. Liukoisen typen osuus kokonaistypestä oli keskimäärin 56

%. Reaktorin käsittelyjäännös sisälsi 3,1 kgN, 1,8 kgNH₄-N, 0,6 kgP/t ja 3,6 kgK/t. Reaktorijäännöksen tyypestä 56 % oli liukoisessa muodossa. Jälkikaasualtaan käsittelyjäännös sisälsi 3,0 kgN, 1,8 kgNH₄-N, 0,5 kgP/t ja 3,6 kgK/t. Liukoisen tyyden osuus kokonaistyypeistä oli 61 %. Lietelannan ja JKA:n jäännöksen keskimääräisten NH₄-N/N-suhdelukujen perusteella laskettuna kasveille käyttökelpoisen mineraalityyden osuus kasvoi biokaasuprosessin aikana vain 10 %.

Taulukko 5.26. Syötteiden sekä reaktorin ja jälkikaasualtaan (JKA) käsittelyjäännösten TS-, VS- ja ravinnepitoisuudet toisessa lietalantakokeessa.

Näyte/ koeviikko	TS %	VS %	VS/TS -suhde	Ntot kg/t	NH ₄ -N kg/t	N/NH ₄ -N %	Ptot kg/t	Pliuk kg/t	K kg/t
Lanta/5	6,9	5,6	0,82	3,1	1,7	54	0,5	0,08	3,6
Lanta/6	6,9	5,7	0,83	3,1	1,8	60	0,5	0,07	3,6
Lanta/10	7,2	5,9	0,82	3,3	1,8	54	0,5	0,10	3,9
Lanta/11–12	7,5	6,1	0,82	3,5	1,9	55	0,6	0,10	4,0
Lanta keskiarvo	7,1	5,9	0,82	3,2	1,8	56	0,5	0,09	3,8
Reaktori/1	4,5	3,4	0,75	2,7	1,6	58	–	–	–
Reaktori/5	6,7	5,4	0,80	3,5	1,6	48	0,7	0,07	3,7
Reaktori/10	5,6	4,4	0,78	3,1	1,9	62	0,5	0,08	3,5
Reaktori/11–12	5,9	4,6	0,79	3,3	1,9	56	0,6	0,01	3,7
Reaktori keskiarvo	5,7	4,4	0,78	3,1	1,8	56	0,6	0,05	3,6
JKA/1	4,6	3,4	0,74	2,8	1,7	61	–	–	–
JKA/5	5,1	3,9	0,76	2,9	1,7	59	0,5	0,09	3,6
JKA/6	5,2	4,0	0,77	3,1	1,9	63	0,5	0,09	3,6
JKA/10	4,9	3,7	0,75	3,1	1,9	62	0,5	0,07	3,5
JKA/11–12	4,8	3,7	0,77	3,0	1,9	63	0,5	0,08	3,6
JKA keskiarvo	4,9	3,7	0,76	3,0	1,8	61	0,5	0,08	3,6

5.5 Biokaasulaitoksen energiatase

5.5.1 Biokaasulaitoksen vuotuinen energiatase

Biokaasulaitoksen mitoituksen mukaisilla tarkastelujaksoilla tuotettiin eri kokeissa metaania 124–186 Nm³/d. Tuotetun kaasun energiasisältö oli 1240–1864 kWh/d. Biokaasulaitoksen lämpötalouden mallintamisessa (ks. 4.5.5) käytetty vuoden keskilämpötila oli 4,0 °C ja maaperän lämpötila 2 m syvyydessä 6,8 °C. Lietelantasyötteen lämpötila oli vuoden tarkastelujaksolla keskimäärin 9,5 °C ja kasvisyötteen lämpötila 9,0 °C.

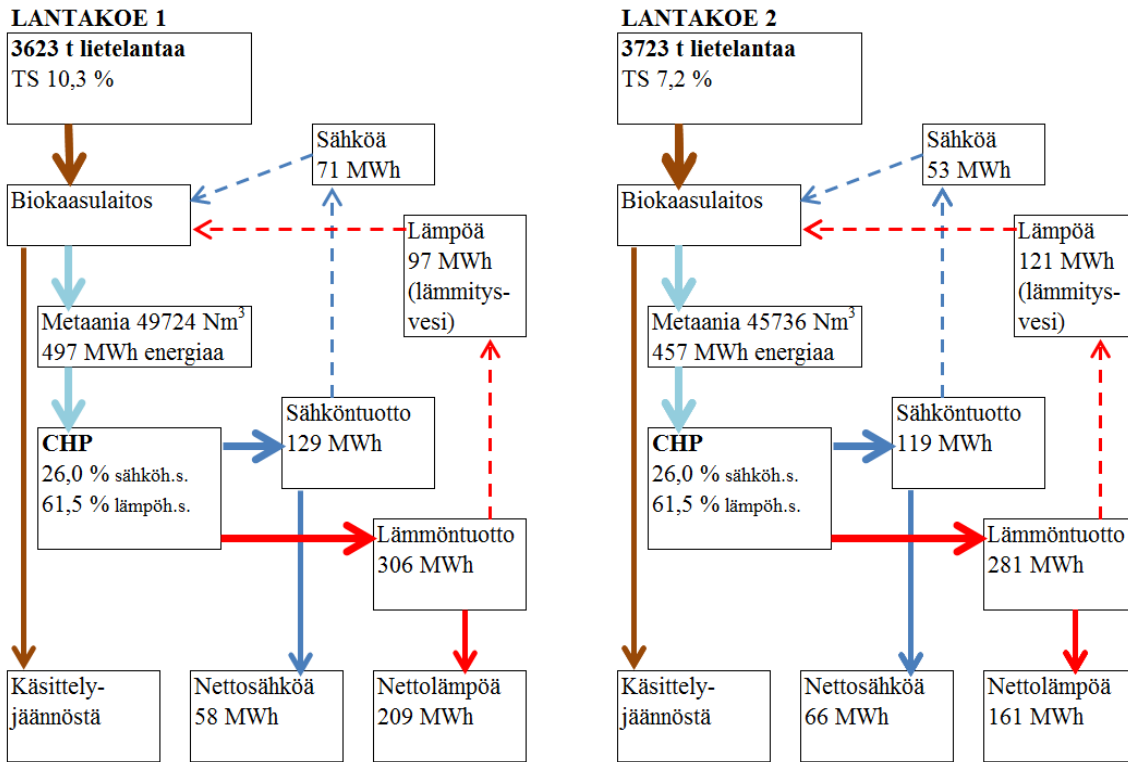
Syötteen ominaislämpökapasiteetista ja sekoitustehosta riippuen biokaasulaitoksen reaktorin lämmittämiseen kuluu lämpöenergiaa 266–330 kWh/d. Toisessa lietalannan käsittelykokeessa (Lantakoe 2) reaktorin lämmitysveden tarvetta lisäsi ensimmäistä lantakoetta (111 kWh/d) pienempi sekoitusteho (63 kWh/d). Kasvimassojen yhteiskäsittelyssä reaktorin sekoittimien sähkönkulutus on 115 kWh/d. Jälkikaasualtaan sekoitus kulutti sähköä 14–15 kWh/d.

Muut biokaasulaitoksen sähkölaitteet kuluttivat energiaa 51 kWh/d. Teknisen tilan lämmitys toteutettiin sähköpattereilla, jotka kuluttavat sähköä vuodessa keskimäärin n. 17 kWh/d. Sähkön kokonaisomakulutus oli eri kokeissa 146–199 kWh/d. Biokaasulaitoksen yhteenlaskettu sähkön ja lämmön omakulutus oli 25–38 % tuotetun kaasun energiasisällöstä. CHP-yksikön mitattu kokonaishyötysuhde oli 87,5 % (sähköhyötysuhde 26,0 % ja lämpöhyötysuhde 61,5 %). Nettoenergiaa voidaan tuottaa 621–1147 kWh/d (nettosähköä 160–281 kWh/d). Tuotettu nettoenergia on 50–62 % tuotetun kaasun energiasisällöstä (Taulukko 5.27).

Taulukko 5.27. Biokaasulaitoksen keskimääräinen päivittäinen energiatase vuoden aikana.

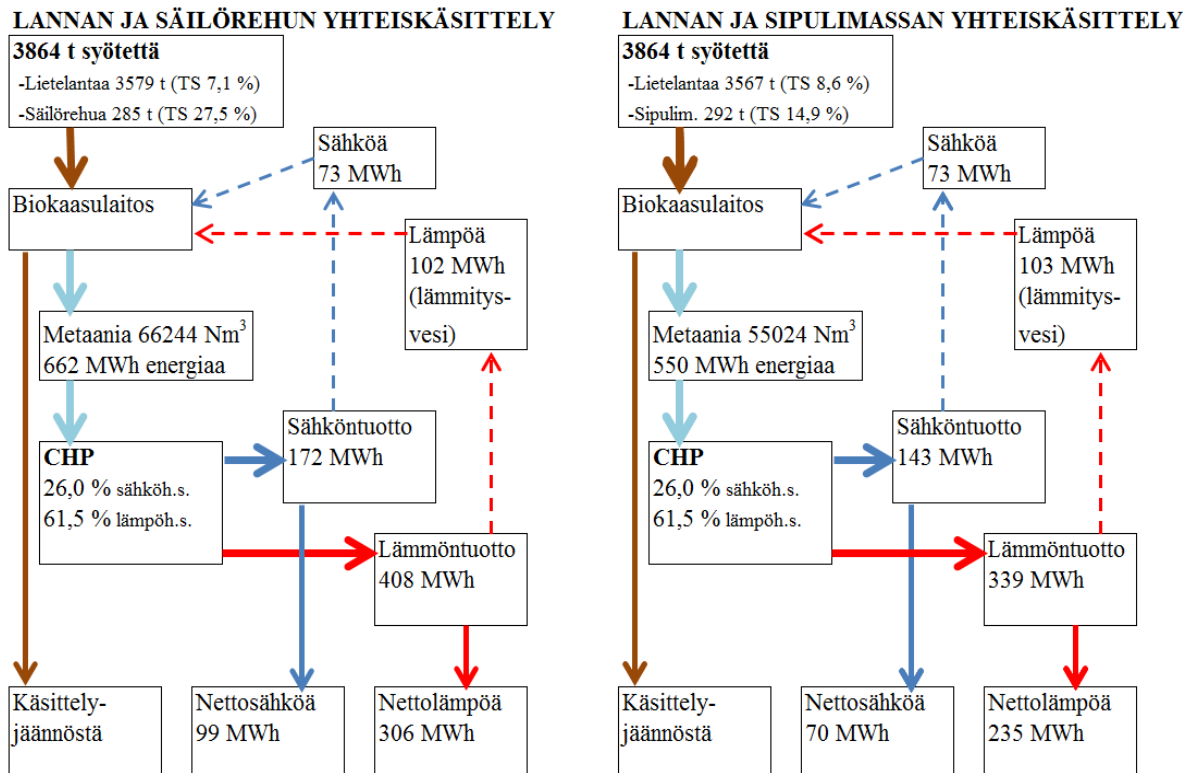
Koeajo	Lanta+rehu	Lanta+sipuli	Lanta+helpi	Lantakoe 1	Lantakoe 2
Laskelmassa käytetyt koeviikot	14–16	16–20	5–10	9–14	10–12
Syötettä yhteensä (t/d)	10,6	10,6	10,6	9,9	10,2
Syöteen TS %	8,6	9,0	12,1	10,3	7,2
Kaasun energiasisältö (kWh/d)	1815	1508	1847	1362	1253
ENERGIANTUOTTO					
CHP sähköntuotto (kWh/d)	472	392	480	354	326
CHP lämmöntuotto (kWh/d)	1117	928	1136	838	771
CHP energiantuotto yht. (kWh/d)	1588	1319	1616	1192	1097
BIOKAASULAITOKSEN OMAKULUTUS					
Sähkön omakulutus (kWh/d)	199	199	199	194	146
- Reaktorin sekoitus (kWh/d)	115	115	115	111	63
- JKA:n sekoitus (kWh/d)	15	15	15	14	14
- Teknisen tilan lämmitys (kWh/d)	17	17	17	17	17
- Muut sähkölaitteet (kWh/d)	51	51	51	51	51
Lämmön omakulutus (kWh/d)	279	283	270	266	330
Omakulutus yhteensä (kWh/d)	478	482	469	460	476
NETTOENERGIANTUOTTO					
Nettosähköä (kWh/d)	273	193	281	160	180
Nettolämpöä (kWh/d)	838	645	866	572	441
Nettoenergiaa yhteensä (kWh/d)	1110	838	1147	733	621
ENERGIATASEET					
Sähkön omakulutus / kaasun energia (%)	11	13	11	14	12
Lämmön omakulutus / kaasun energia (%)	15	19	15	20	26
Omakulutus yht. / kaasun energia (%)	26	32	25	34	38
Nettoenergia / kaasun energia (%)	61	56	62	54	50

Vuositasolla paksun lietalan (TS 10,3 %) käsittely tuottaa biokaasulaitoksen ulkopuoliseen käyttöön nettoenergiaa 267 MWh, josta sähkön osuus on 22 %. Ohuemman lietalan (TS 7,2 %) käsittely tuottaa nettoenergiaa 227 MWh, josta sähkön osuus on 29 % (Kuva 5.15).



5.15. Biokaasulaitoksen vuotuinen energiatase lehmän lietelannan käsittelyssä.

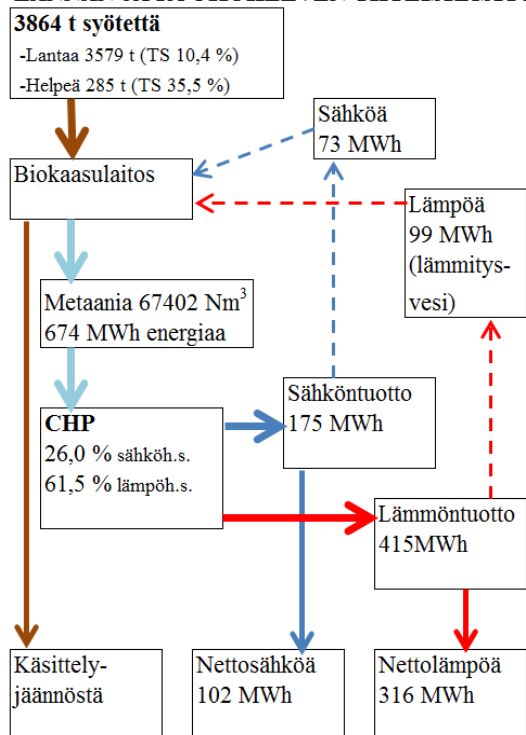
Lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittely tuottaa nettoenergiaa 405 MWh/v (nettoenergiasta 24 % sähköä). Lietelanta ja sipulimassa tuottavat yhdessä nettoenergiaa 305 MWh/v (23 % sähköä) (Kuva 5.16).



Kuva 5.16. Biokaasulaitoksen vuotuinen energiatase lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä sekä lietelannan ja sipulimassan yhteiskäsittelyssä.

Paksun lietalannan ja ruokohelven yhteiskäsittely tuottaa nettoenergiaa 418 MWh/v, josta sähkön osuus on 24 % (Kuva 5.17).

LANNAN JA RUOKOHELVEN YHTEISKÄSITTELY



Kuva 5.17. Biokaasulaitoksen vuotuinen energiatase lietalannan ja ruokohelven yhteiskäsittelyssä.

5.5.2 Jälkikaasualtaan metaanintuotto ja vuotuinen energiatase

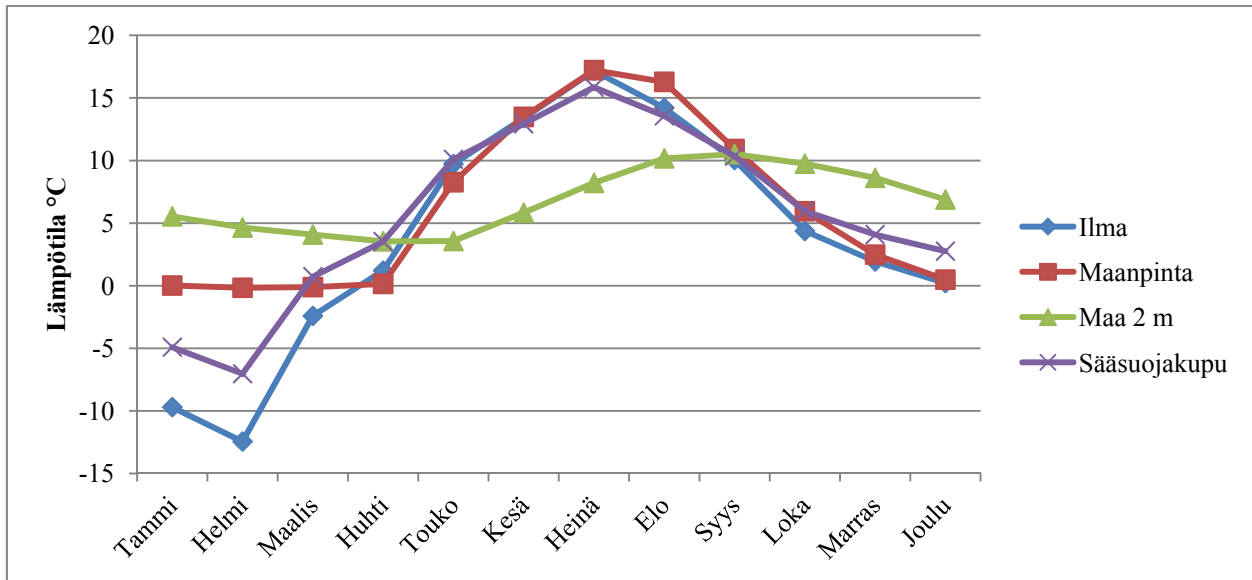
Ohuemman lietalannan käsittelyssä (Lantakoe 2) jälkikaasualtaan lämpötila oli 30–31 °C ja se tuotti viikkokeskiarvoina kolmella laitoksen mitoituksen mukaisella tarkastelujaksolla 13–14 % kokonaismetaanimäärästä. Kokeen loppuvaiheessa reaktorin sekoitustehon ollessa alhainen jälkikaasuallas tuotti 16,7 Nm³CH₄/d (12 % kokonaismetaanintuotosta). Kaasun energiasisältö oli 167 kWh/d. JKA kulutti sähköä 15,6 kWh/d (sekoitin 14,0 ja sääsuojakuvun paineilmapuhallin 1,6 kWh/d), mikä on 10 % koko laitoksen sähkönkulutuksesta. JKA:n sähkönkulutus oli 10 % sen tuottaman metaanin energiasisällöstä (koko laitos kulutti 12 % tuottamastaan energiasta). Laitoksen CHP-yksikkö (sähköhyötysuhde 26,0 % ja lämpöhyötysuhde 61,5 %) voi tuottaa JKA:n kaasusta sähköä 35 kWh/d, jolloin nettosähköä tuotetaan 24 kWh/d. CHP-yksikkö tuottaa samalla lämpöä 103 kWh/d, mikä jää kokonaisuudessaan muualla käytettäväksi, sillä JKA ei kuluta lämpöenergiaa. Vuositasolla jälkikaasuallas tuottaisi täten lietalannasta (7,2 %TS) nettosähköä 8,8 MWh/v, mikä on 13 % laitoksen nettosähköntuotannosta. Nettolämpöä JKA tuottaisi 37,5 MWh/v, mikä on 23 % laitoksen nettolämmöntuotosta.

Lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä JKA (lämpötila 30–31 °C) tuotti kokeen loppuvaiheessa laitoksen mitoituksen mukaisella kuormituksella 36,4 Nm³CH₄/d (364 kWh/d), joka oli 20 % kokonaistuotosta. JKA:n sähkönkulutus oli 4 % sen tuottaman kaasun energiasisällöstä. JKA:n kaasusta tuotettu nettosähkö on 27 % koko laitoksen tuottamasta nettosähköstä ja siitä tuotettu lämpö 27 % koko nettolämmöntuotosta. JKA tuottaisi vuodessa 27,2 MWh nettosähköä ja 81,8 MWh nettolämpöä.

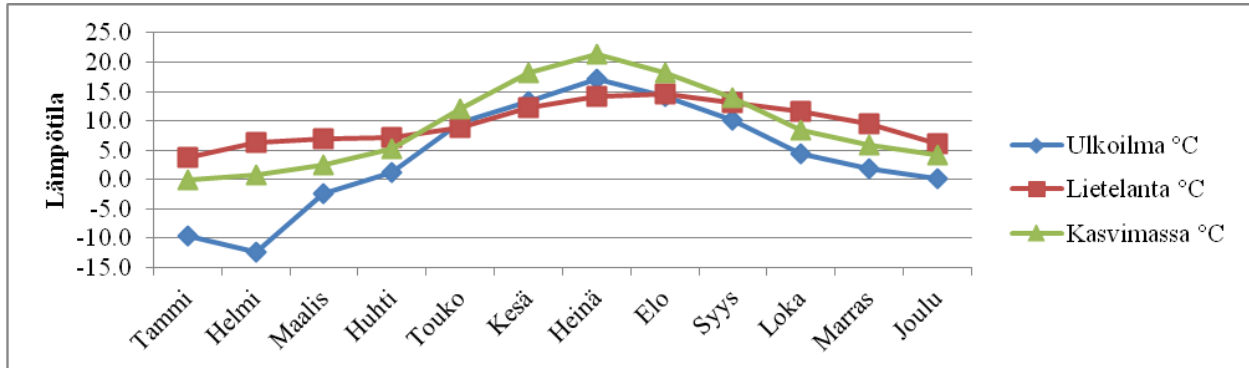
Lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelyssä JKA (31–33 °C) tuotti korkean kuormituksen aikana (koeviikot 5–10) 19 % koko laitoksen biokaasusta. Vuositasolla JKA voi tuottaa 26 % (26,6 MWh) koko laitoksen tuottamasta nettosähköstä ja 25 % (80,5 MWh) nettolämmöstä.

5.5.3 Biokaasulaitoksen kuukausittainen energiatase

Biokaasulaitoksen syötteiden ja reaktorin ympäristön (ulkoilman ja maaperän) sekä sen sääsuojakuvun lämpötilat vaihtelevat vuodenajan mukaan (Kuva 5.18). Myös syötteiden lämpötila vaihtelee (Kuva 5.19). Lämpötilan vaihtelut vaikuttavat biokaasulaitoksen energiataseeseen muuttamalla lämmitystarvetta reaktorissa sekä säätelämällä lämmittämättömän JKA:n lämpötilaa.

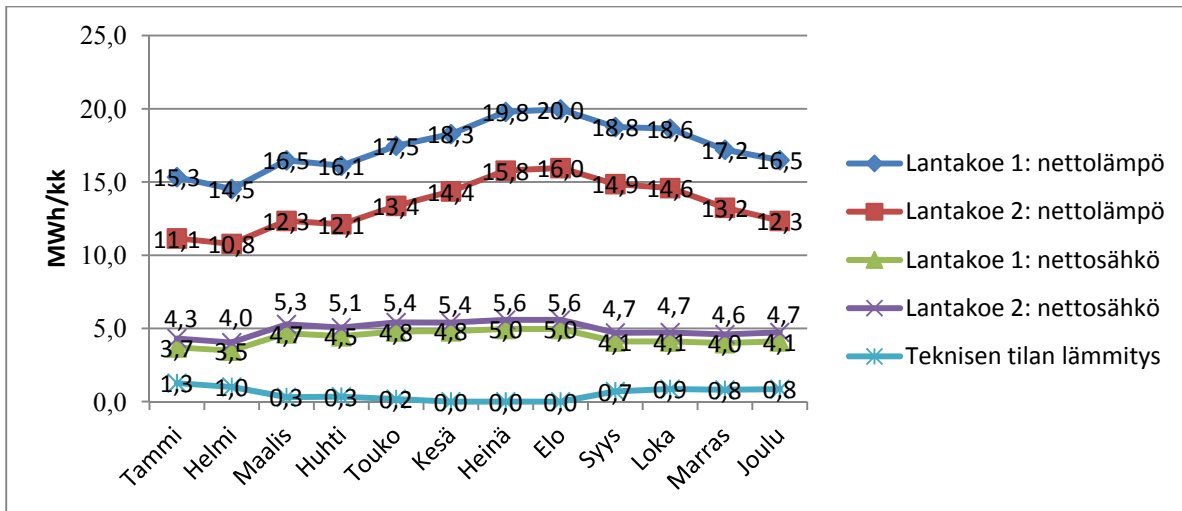


Kuva 5.18. Ulkoilman, maanpinnan, maaperän (2 m syvyydellä) ja sääsuojakuvun lämpötilat kuukausittain vuoden tarkastelujaksolla (1.11.2011–31.10.2012).



Kuva 5.19. Biokaasulaitoksen lietelanta- ja kasvimassasyötteiden sekä ulkoilman lämpötilan kuukausikeskiarvot MTT Maaningan biokaasulaitoksessa vuoden tarkastelujaksolla (1.11.2011–31.10.2012).

Lämpötilan vaihteluiden vuoksi biokaasulaitoksen reaktorin lämmitys vaatii kuukausittain eri määriä lämpöenergiaa. Paksun lietelannan käsittelyssä (Lantakoe 1, syöttö 9,8 m³/d, TS %) reaktorin lämmitys vaatii sekoittimien tuottaman lämmön lisäksi energiaa 9–10,6 MWh/kk. Nettolämpöä tuotetaan täten 14,5–20,0 MWh/kk. Biokaasulaitoksen sähkön päivittäistä omakulutusta lisää syys-toukokuussa käytettävä teknisen tilan sähkölämmitys (0,2–1,3 MWh/kk). Nettosähköä tuotetaan eri kuukausina 3,5–5,0 MWh/kk (Kuva 5.20).



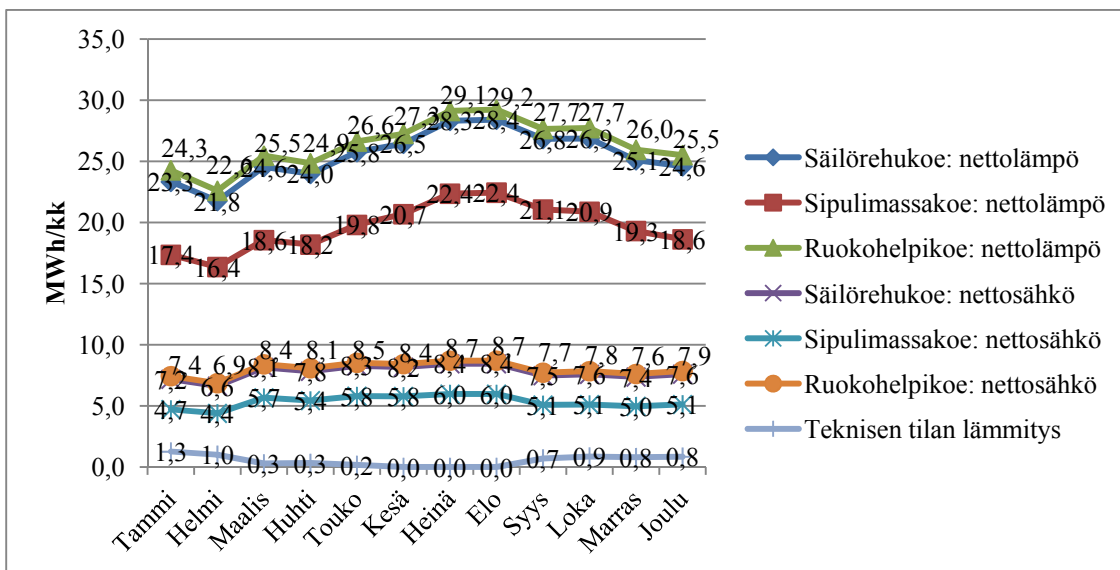
Kuva 5.20. Kuukausittainen nettosähkön- ja nettolämmöntuotto sekä teknisen tilan lämmityksen sähkönkulutus paksun (Lantakoe 1) ja ohuen lietalannan (Lantakoe 2) käsittelyssä vuoden tarkastelujaksolla (1.11.2011–31.10.2012).

Ohuemman lietalannan käsittelyssä (Lantakoe 2, syöttö 10,2 m³/d, TS 7,3 %) lämmitysenergiaa tarvitaan suuremman syötemäärän ja sen vesipitoisuuden (korkeampi ominaislämpökapasiteetti) sekä alhaisemman sekoitustehon vuoksi enemmän, 7,6–12,5 MWh/kk. Nettolämpöä tuotetaan touko-lokakuussa 13,4–16,0 MWh/kk ja muina kuukausina 10,8–13,2 MWh/kk (Kuva 5.19). Nettosähköä tuotetaan alhaisemman sekoitustehon ansiosta hieman enemmän kuin paksun lietalannan käsittelyssä, 4,0–5,6 MWh/kk.

Lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä (Säilörehukoe) tuotetaan nettolämpöä touko-lokakuussa 25,8–28,4 MWh/kk ja marras-huhtikuussa 21,8–25,1 MWh/kk. Nettosähköä tuotetaan 6,6–8,4 MWh/kk. Lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelyssä (Ruokohelpikoe) nettolämmön kokonaistuotto on suurempaa, hieman korkeamman metaanintuoton ja syötteiden korkeamman TS-pitoisuuden vuoksi. Nettolämpöä voidaan tuottaa touko-lokakuussa 26,6–29,2 MWh/kk ja marras-huhtikuussa 22,6–26,0 MWh/kk. Nettosähköä tuotetaan 6,9–8,7 MWh/kk.

Lietelannan ja sipulimassan yhteiskäsittelyssä (Sipulimassakoe) tuotetaan nettolämpöä touko-lokakuussa 19,8–22,4 MWh/kk ja muina kuukausina 16,4–19,3 MWh/kk. Nettosähköä tuotetaan 4,4–6,0 MWh/kk (Kuva 5.21).

Biokaasulaitoksen sähkön omakulutus (sekoittimet ja muut sähkölaitteet) oletettiin samansuuruisiksi kaikissa kolmessa lietalannan ja kasvimassan yhteiskäsittelykokeessa (kts. 5.5.1 Vuotuinen energiatase).



Kuva 5.21. Kuukausittainen nettosähkön- ja nettolämmöntuotto sekä teknisen tilan lämmityksen sähkönkulutus lietalannan ja kasvimassojen yhteiskäsittelykokeissa vuoden tarkastelujaksolla (1.11.2011–31.10.2012).

6 Tulosten tarkastelu

BIOTILA-hankkeessa tehtiin useita koeajoja MTT Maaningan maatilakohtaisessa biokaasulaitoksessa. Kokeissa oli aina mukana lypsylehmien lietalanta laitoksen perussyötteenä. Tavoite oli selvittää sen käsittelyä yksin sekä erilaisten kasvibiomassojen kanssa, optimoida energiantuotantoa ja laitoksen energiata-
setta sekä selvittää käsittelyjännösten laatua lannoitekäytön kannalta. Tässä osiossa tarkastellaan osiossa 5 esitettyjä tuloksia tarkemmin.

6.1 Metaanintuottopotentialit (BMP)

Tutkimuksissa verrataan yleensä biomassojen orgaanisen kuiva-aineen (VS) metaanintuottopotentialiaaleja. Lehmän lietalannan metaanintuottopotentialiaali on ollut eri tutkimuksissa 120–300 Nm³CH₄/tVS (Taulukko 6.1), mutta yleensä alhaisempi kuin tässä tutkimuksessa (196–227 Nm³CH₄/tVS). Lantojen metaanipotentialiaaliin vaikuttaa mm. eläinten ruokinta ja viipymäaika lietekuilussa tai esisäiliössä ennen näytteenottoa.

Taulukko 6.1. Biomassojen metaanipotentialiaaleja sekä hehtaarikohtaisia satoja ja bruttoenergiapotentialiaaleja muissa tutkimuksissa.

Biomassa	Nm ³ CH ₄ /tVS	Sato (t TS/ha/v)	MWh/ha	Lähde
Lehmän lietalanta	120–300	–	–	1–5
Lehmän lietalanta	130 ja 160	–	–	Kaparaju 2003
Lehmän lietalanta	125–166	–	–	Amon ym. 2007
Koiranheinä	308–382	11–12	35–36	Seppälä ym. 2009
Ruokonata	307–394	–	35–36	Seppälä ym. 2009
Timotei	308–365	4–7	–	Seppälä ym. 2009
Ruokohelpi	253–351	–	35	Seppälä ym. 2009
Timotei–apila	370	8–11	28–38	Lehtomäki ym. 2008
Ruokohelpi	340 ja 430	9–10	37–41	Lehtomäki ym. 2008
Puna–apila	280–410	5–7	13–18	Lehtomäki ym. 2008
Virna–kaura -seos	410	5–7	18–25	Lehtomäki ym. 2008
Lupiini	310–400	4–7	13–22	Lehtomäki ym. 2008
Sokerijuurikkaan naatti	340	3–5	8–14	Lehtomäki ym. 2008
Olki (ohra)	320	2	6	Lehtomäki ym. 2008
Olki (rypsi)	240	2	4	Lehtomäki ym. 2008
Perunantuotannon sivutuotteet	323–377	–	–	Kryvoruchko ym. 2009

Lähteet: 1) Viljavuuspalvelu 2004; 2) Steineck ym. 1999; 3) KTBL 2010; 4) Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg–Vorpommern 2004; 5) Institut für Energetik und Umwelt ym. 2006.

Tässä tutkimuksessa ruokohelven kahden lohkon ensimmäisten, lannoitettujen satojen BMP:t (391 ja 315 Nm³CH₄/tVS) olivat korkeampia kuin lannoittamattomilla kakkossadoilla (279 ja 303 Nm³CH₄/tVS). Ensimmäisten satojen VS-kohtaista metaanintuottopotentialiaalia todennäköisesti heikensi kevätkorjuusta peltoon paikoitellen jäänyt ja sadonkorjuussa mukaan tullut ligniinipitoinen ylivuotinen kuloheinä. Toisen sadon biohajoavuutta alensi myöhäinen korjuuajankohta (28. syyskuuta).

Ruokohelven D-arvo ei korreloinut hyvin BMP:n kanssa (R²=0,4852). Ensimmäisen lohkon 1. sadon D-arvo oli 589 ja BMP 391 Nm³CH₄/tVS, kun saman D-arvon (590 g/kg ka) omaavan toisen lohkon 1. sadon BMP oli vain 315 Nm³CH₄/tVS. D-arvot ja BMP:t korreloivat erittäin heikosti kasvibiomassatyypin välillä (säilörehu, sipulimassa, ruokohelpinäytteet: R²=0,1365), esim. sipulilla oli korkeampi D-arvo

(967 g/kg ka), mutta alhaisempi BMP (337 Nm³CH₄/tVS) kuin timotei-säilörehulla (D-arvo 765 g/kg ka ja BMP 364 Nm³CH₄/tVS).

Seppälän ym. (2013) tutkimuksessa eri aikaan korjatuissa nurmiheinänäytteissä (timotei-Nurminata sekä ruokonata, n=6) D-arvolla ja BMP:lla oli vahva korrelaatio ($R^2 = 0,8$) ja keskimääräinen BMP oli 341 Nm³CH₄/tVS. Puna-apilalla taas BMP ei selittänyt D-arvolla (n=6, $R^2 = 0,09$) tai kasvin kemiallisella koostumuksella ja BMP oli alhaisempi kuin nurmiheinillä, keskimäärin 291 Nm³CH₄/tVS.

Suomessa tehdyissä muissa tutkimuksissa ruokohelven metaanipotentiaaliksi on todettu 253–430 Nm³CH₄/tVS (Lehtomäki ym. 2008, Seppälä ym. 2009). Samoissa tutkimuksissa muiden nurmiheinäkasvien BMP:t olivat 296–394 Nm³CH₄/tVS ja nurmipalkokasviseosten 210–410 Nm³CH₄/tVS (Taulukko 6.1). Tämän tutkimuksen tulokset ovat näihin verrattuna tulosten yläpäättä. Metaanipotentiaalierot eri sadonkorjuukertojen ja vuosien välillä ovat kuitenkin suuria. Lisäksi muissa tutkimuksissa vuotuiset hehtaarisadot on arvioitu yleensä yläkanttiin (esim. lajikekokeiden perusteella) ja siten raportoidut hehtaari-kohtaiset metaanienergiapotentialit voivat olla todellista suurempia.

Tämän tutkimuksen sipulimassan (kuoria ja naatteja) VS-kohtainen metaanipotentiaali on hieman suurempi kuin toisaalla tutkitun (Lehtomäki ym. 2008) sokerijuurikkaan naatin tai ohran oljen. Sipulisivutuotteen alhaisen hehtaarikohtaisen kuiva-ainesaannon vuoksi myös metaanienergiasaanto (2,4 MWh/ha) jää kuitenkin näihin sivutuotteisiin verrattuna alhaiseksi (Taulukko 6.1).

Tässä tutkimuksessa perunakuoriveden VS-kohtainen metaanipotentiaali (397 Nm³ CH₄/t VS) oli hieman korkeampi kuin Kryvoruchkon ym. (2009) tutkimuksessa (377 Nm³ CH₄/t VS). Kokonaisen perunan BMP taas oli alhaisempi kuin ko. tutkimuksessa kuorettoman perunamössön.

6.2 Lannan separointi ja jakeiden metaanintuottopotentialit

Separointi ruuvipuristimen seulakoolla 1 mm ei erottanut tehokkaasti fosforia kuivajakeeseen. Sen sijaan kuiva-ainetta (TS) ja orgaanista kuiva-ainetta (VS) ruuvipuristin erotti tehokkaasti ja tässä kokeessa saavutettu kuiva-ainepitoisuus 24 % on kirjallisuuteen verraten tavanomainen tulos (Møller ym. 2000). Changin & Riblen (1975) mukaan lannan TS:sta 60 %, kokonaistypestä 86 % ja kokonaisfosforista 94 % on alle 0,5 mm partikkeleissa. Tässä tutkimuksessa kuiva-ainetta, orgaanista ainetta ja ravinteita erottui sitä enemmän kuivajakeeseen, mitä suurempi separoitavan lietalannan TS-pitoisuus oli (Taulukko 6.2).

Taulukko 6.2. Separoitavan lannan massojen ja metaanintuottopotentialin erottuminen kuivajakeeseen lannan eri TS-pitoisuuksilla tässä tutkimuksessa sekä Ricon ym. (2012) tutkimuksessa.

Tutkimus	Lannan TS %	% FM:sta	% TS:sta	% VS:sta	% N:sta	% NH ₄ -N:sta	% P:sta	% BMP:sta
Tämä tutkimus	3,6	4	22	26	7	3	12	–
	7,2	15	49	54	20	11	32	57
	9,9	33	70	74	37	31	47	–
Rico ym. 2012	10,1	29	76	80	59	–	87	64

Hjorthin (2009) mukaan tehokkain mekaaninen erotuslaite oli dekanterilinko, joka erottaa lietalannan fosforista kuivajakeeseen 52–78 % fosforista. Ricon ym. (2012) kokeessa paksun lannan (TS 10,1 %) kemiallinen käsittely (polymeerin lisäys) ja seulonta 0,2 mm verkkosiivilällä erotti massaa ja etenkin fosforia tehokkaasti kuivajakeeseen (Taulukko 6.2). Lannan metaanintuottopotentialista (BMP) erottui kuivajakeeseen hieman enemmän (64 % lannan BMP:sta) kuin tässä tutkimuksessa (57 %). Ricon tutkimuksessa nestejakeen BMP oli huomattavan korkea (580 Nm³CH₄/tVS) verrattuna lannan (320 Nm³CH₄/tVS) ja kuivajakeen (258 Nm³CH₄/tVS) potentiaaliin. Tässä tutkimuksessa raakalannan ja jakeiden BMP:t olivat samankaltaisia (kuivajakeella 5 % korkeampi ja nestejakeella 13 % korkeampi kuin lannalla).

6.3 Metaanintuotto maatilamittakaavan kokeissa

6.3.1 Reaktorin sekoituksen vaikutus metaanintuottoon

Reaktorin ja jälkikaasualtaan sekoitus pitää niiden sisällön tasalaatuisena ja -lämpöisenä, ehkäisee tiheiden partikkeleiden sedimentoitumista ja lietteen kerrostumista. Esimerkiksi syötteenä käytettävä säilörehu muodostaisi helposti reaktorin pinnalla kelluvan lautan, jos sekoitus on riittämätön. Kelluvan massan mikrobihajotus ei ole tehokasta ja se voi esimerkiksi MTT Maaningan laitoksessa tukkia reaktorin ja jälkikaasualtaan välisen ylivaluntaputken.

Lyhyessä sekoituskokeilussa (Lantakoe 2) verrattiin reaktorin metaanintuottoa samankaltaisilla, laitoksen mitoituksen mukaisilla kuormitusjaksoilla (2–3 vko, OLR 2,3–2,4 kgVS/m³d). Paras metaanintuotto, 178 Nm³/tVS, saavutettiin kokeen lopussa sekoitusteholla 10 W/m³_{reaktoriliete} (muilla sekoitusjaksoilla n. 18 ja 13 W/m³). Kaikissa lietelannan ja kasvimassan yhteiskäsittelykokeissa reaktorin sekoitusteho oli n. 18,5 W/m³, jonka laitoksen käyttöönottovaiheessa todettiin ehkäisevän tehokkaasti rehusyötteen kellumisen. Kaikissa kokeissa käytettiin jatkuvaa sekoitusta.

MTT Maaningan biokaasulaitoksen sekoitustehossa on alentamisen varaa, sillä lantaa ja kasvimassaa käsittelevässä täyden mittakaavan laitoksessa sekoitustehon on havaittu voivan olla jopa vain 3,1 W/m³ (Naegele ym. 2012). Tämä toki riippuu sekoittimista, reaktorirakenteesta ja syöttömateriaalien ominaisuuksista. Liiallinen sekoitus voi haitata reaktorissa hyödyllisten granuloiden muodostumista (de Bok ym. 2004) tai estää tarpeellisen metanogeenialueiden muodostumista (Vavilin & Angelidaki 2005). Mikrobiologisesti epävakaa reaktorin voi stabiloida vähentämällä reaktorin sekoitustehoa (Stroot ym. 2001).

Sekoituksen ei myöskään tarvitse olla jatkuvaa. Täyden mittakaavan laitoksissa käytetään sekoitustaukoja (Naegele ym. 2012, Frost & Gilkinson 2011). Kaparajun ym. (2008) tutkimuksessa laboratoriomittakaavassa (55 °C) minimaalinen sekoitus (10 min ennen syöttöä, 30 min/d) lisäsi lannan metaanintuottoa 12,5 % jatkuvaan sekoitukseen verrattuna. Ajoittainen sekoitus (8 h välein 2 h, sekoitustauko ennen syöttöä) lisäsi metaanintuottoa 1,3 % jatkuvaan sekoitukseen verrattuna. Pilot-mittakaavassa ajoittainen sekoitus lisäsi metaanintuottoa 7 % jatkuvaan sekoitukseen verrattuna.

Karimin ym. (2005) tutkimuksessa mukaan TS-pitoisuudeltaan 5 % lehmän lietelannalla syötetyssä reaktorissa sekoitus (teho 8 W/m³) ei lisännyt kaasuntuottoa (sekoituksen puuttumiseen verrattuna). Tutkimuksen mukaan laimealla syötteellä ja reaktorilietteellä kaasunmuodostus voi mahdollisesti saada aikaan mikrobeille riittävän sekoituksen. Paksumman lietelannan (TS 10 ja 15 %) syötöllä eri sekoitustavat lisäsivät biokaasuntuottoa 10–30 %. Sekoittamattomassa reaktorissa mikrobit voivat kerrostua, esim. metanogeenit suosivat reaktorin pohjakerrosta (Kowalczyk ym. 2013).

6.3.2 Reaktorin metaanintuotto

Biokaasureaktori tuotti lietelannan käsittelyssä (Lantakoe 2) eri sekoitusnopeuksilla (koeviikot 8–9 ja 10–12, OLR 2,3–2,4 kgVS/m³d, HRT 27+27 d) metaania 156–178 Nm³CH₄/tVS, mikä oli 80–91 % lannan metaanintuottopotentialista (BMP). Lehtomäen ym. (2007) laboratorioskokeessa paras lietelantareaktori tuotti 67 % BMP:sta, kun viipymä oli tätä koetta lyhyempi (20 d), mutta kuormitus hieman alhaisempi (2 kgVS/m³d). Reaktorin orgaanisen kuormituksen lisääminen vähentää metaanintuottoa, samoin syötteen viipymän lyheneminen reaktorissa. Esimerkiksi Mähnertin & Linken (2009) laboratorioskokeisiin (35 °C) perustuva yksinkertainen, kuormituksen ja viipymän huomioiva staattinen malli ennustaa tässä raportoitavissa tuloksissa ja Lehtomäen ym. (2007) kokeissa havaittua alhaisempaa metaanintuoton toteutumaa (Taulukko 6.3). Mallit voivat antaa suuntaa metaanintuoton arvioinnille, mutta ennustamista vaikeuttaa esim. syötteen hajoamisnopeuden substraatti- ja prosessikohtaisuus.

Taulukko 6.3. Lietelantakokeiden VS-spesifisiä metaanintuottoja (Y), metaanintuoton toteutumia maksimaalisesta metaanintuottopotentiaalista (Y/BMP %) sekä Mähnertin & Linken (2009) mallin ennustama metaanintuoton toteutuma maksimituotosta (Y/Ymax %).

Koe (koeviikot)	Syöte VS (% FM)	OLR kgVS/m ³ d	HRT (d)	Y (Nm ³ CH ₄ /tVS)	Y/BMP %	Malli Y/Ymax (%)
Lantakoe 2 (vk 8–9) ^{a)}	6,3	2,4	27	156	80	74
Lantakoe 2 (vk 10–12) ^{b)}	6,0	2,3	25	178	91	75
Lehtomäki ym. 2007	4,0	2,0	20	155	67	60
Mähnert & Linke 2009	7,2	1,0	72	307	–	82
Mähnert & Linke 2009	7,2	2,0	36	261	–	70
Mähnert & Linke 2009	7,2	3,0	24	226	–	61
Mähnert & Linke 2009	7,2	4,0	18	146	–	54

a) Sekoitus 13 W/m³ b) Sekoitus 10 W/m³

Lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelykokeen loppuvaiheessa kuormituksen ollessa 3,0 kgVS/m³d (rehun osuus 25 %) ja viipymä 25 d reaktori tuotti 191 Nm³CH₄/tVS, joka oli 73 % syötteen BMP:sta.

Lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelyssä reaktorin metaanintuotto vastasi korkealla kuormituksella (4,3 kgVS/m³d, viipymä 24 d) ja helven 21 % VS-osuudella 57 %:ia syötteen BMP:sta. Kuormituksen alentuessa 3,3 kgVS/m³d:een ja helven VS-osuuden syötteessä kasvaessa 25 %:een BMP:sta toteutui suurempi osa, 69 % (Taulukko 6.4).

Taulukko 6.4. Lietelannan ja kasvimassan yhteiskäsittelykokeiden metaanintuottoja (Y) ja toteutumia BMP:sta (Y/BMP %).

Koe (syötteen VS-osuudet)	OLR kgVS/m ³ d	HRT (d)	Y (Nm ³ CH ₄ /tVS)	Y/BMP %
<i>Tämä tutkimus:</i>				
Lanta:nurmi 75:25	3,0	25	191	73
Lanta:helpi 79:21 ^{a)}	4,3	25	134	57
Lanta:helpi 75:25 ^{b)}	3,3	24	160	69
<i>Lehtomäki ym. 2007:</i>				
Lanta:nurmi 90:10	2,0	20	143	62
Lanta:nurmi 80:20	2,0	20	178	72
Lanta:nurmi 70:30	2,0	20	268	105
Lanta:nurmi 60:40	2,0	20	250	95
Lanta:nurmi 60:40	3,0	18	233	89
Lanta:nurmi 60:40	4,0	16	186	71

a) koeviikot 5–10 b) koeviikot 11–12

Lehtomäen ym.(2007) lietelannan ja nurmen yhteiskäsittelykokeissa BMP:sta totetui samanlainen osuus (72 %) kuin tässä raportoidussa rehukokeessa, kun syötteen VS:sta 20 % tuli nurmesta, kuormitus oli 2,0 kgVS/m³d ja viipymä 20 d. VS-spesifisessä metaanintuotossa havaittiin suuri harppaus ylöspäin, kun nurmen VS-osuus syötteessä nostettiin 30 %:een. Tällöin reaktorin metaanintuotto oli 105 % BMP:sta. Lehtomäki ym. (2007) arvioivat tämän synergistisen vaikutuksen johtuvan todennäköisesti yhteiskäsittelyn aikaansaamasta mikrobeille sopivasta C/N-suhteesta ja syötteen oikeasta ravinnekoostumuksesta. Kasvin VS-osuuden lisääminen syötteessä alensi VS-spesifistä metaanintuottoa, samoin samanaikainen kuormituksen kasvattaminen ja viipymän lyhentäminen (Taulukko 6.4).

6.3.3 Jälkikaasualltaan metaanintuotto (reaktorin ja JKA:n yhteistuotto)

Jälkikaasuallas tuotti lietelannan käsittelyssä (Lantakoe 2) mitoituskäyttökuormituksella tasaisesti 26–27 Nm³CH₄/tVS (Huom. reaktoriin syötettyä VS:ta kohti) JKA:n viipymän ollessa 25–27 d. JKA vastasi 13–14 % laitoksen metaanintuotosta.

Reaktorin ja jälkikaasualtaan yhteenlaskettu metaanintuotto ylitti syötteen metaanintuottopotentiaalin (105 % BMP:sta), kun reaktorin sekoitusteho oli alimmillaan (10 W/m³) kokeen lopussa. Jälkikaasualtaan metaanintuotto olisi kuitenkin todennäköisesti laskenut, jos koe olisi jatkunut samalla sekoitusteholla tasalaatuisella syötöllä pidempään ja tasapainotila (steady state) olisi saavutettu. Tasapainotilanteessa (kun JKA:een tulee pidemmän aikaa reaktorista pidemmälle hajonnutta lietettä) koko laitoksen metaanintuotto jäisi todennäköisesti hieman BMP:ia alhaisemmaksi. Muilla Lantakoe 2:n mitoituksen mukaisilla koeviikoilla reaktorin ja JKA:n yhteistuotto oli 92–93 % lietalannan BMP:sta. Lantakoe 1:ssä korkealla kuormituksella (lannan TS n. 10 %, kuormitus keskimäärin 3,4 kgVS/m³d) reaktori ja JKA tuottivat yhdessä (75 % BMP:sta) (Taulukko 6.5).

Taulukko 6.5. Reaktorin ja JKA:n yhteinen metaanintuotto (Y_{tot}), yhteistuoton osuus syötteen BMP:sta (Y_{tot}/BMP %) sekä JKA:n osuus kokonaistuotannosta (Y_{tot}/Y_{JKA} %) tässä sekä Frostin & Gilkinsonin (2011) tutkimuksessa.

Koe (koeviikot)	OLR kgVS/m ³ d	HRT (d)	Y_{tot} Nm ³ CH ₄ /tVS	Y_{tot}/BMP %	Y_{tot}/Y_{JKA} %
<i>Tämä tutkimus:</i>					
Lantakoe 1 (vk 9–14)	3,4	26+26	156	75	–
Lantakoe 2 (vk 8–9)	2,3	27+27	182	93	14
Lantakoe 2 (vk 10–12)	2,4	25+25	205	105	13
Lanta+rehu (vk 14–16)	3,0	25+25	236	90	20
Lanta+sipuli (vk 15–20)	3,1	25+25	158	78	–
Lanta+helpi (vk 5–10)	4,3	25+25	166	71	19
<i>Frost & Gilkinson 2011:</i>					
Lanta	2,0	27+27	154	–	–

Tässä raportoiduissa yhteiskäsittelykokeissa JKA tuotti enemmän ja suhteellisesti suuremman osan koko biokaasulaitoksen metaanista kuin lantakokeessa. Lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelykokeessa JKA tuotti 47 Nm³CH₄/tVS (20 % tuotosta) ja ruokohelpikokeessa korkean kuormituksen aikana 36 Nm³CH₄/tVS (19 % tuotosta). Lietelannan ja sipulin yhteiskäsittelyssä kokonaistuotto oli 158 Nm³CH₄/tVS (78 % BMP:sta), kun kuormitus oli 3,1 kgVS/m³d.

6.4 Biokaasulaitoksen energiatase

6.4.1 CHP-yksikön hyötysuhde ja kapasiteetti

MTT Maaningan maatilakohtaisen biokaasulaitoksen CHP-yksikön nettosähköhyötysuhde oli 26,0 %, lämpöhyötysuhde 61,5 % ja kokonaishyötysuhde 87,5 % (6+3 d kokeen keskiarvoina). Sähkön osuus laitteen tuottamasta kokonaisenergiasta oli 29,7 % ja lämmön osuus vastaavasti 70,3 %. Navetan lämpökeskukselta laitteelle palaavan veden lämpötila oli keskimäärin 67 °C.

Laitevalmistajan (PowerTherm) ilmoittama kokonaishyötysuhde on >86 %, kun paluuveden lämpötila on 80 °C ja >90 %, kun paluuveden lämpötila on 30 °C. Laitevalmistajan ilmoittamien maksimaalisten tehojen (sähkö 20 kW ja lämpö 43 kW) perusteella laskettu sähkön osuus kokonaistehosta, 31,7 % (20 kW/63 kW), on hieman mitattua korkeampi.

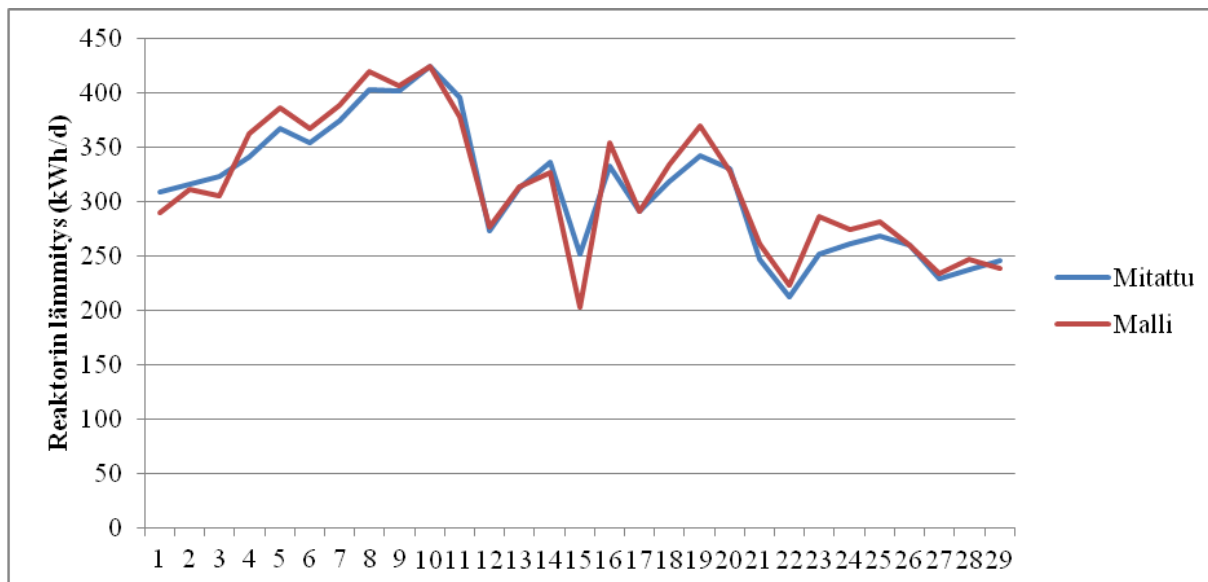
Laitoksen CHP-yksikön kapasiteetti osoittautui korkean kaasuntuoton aikana liian pieneksi. Täydellä 63 kW teholla, 90 % hyötysuhteella käyvä laite kuluttaa metaania 168 Nm³/d (1 Nm³ CH₄ = 10 kWh), kun laitoksen päivittäinen metaanintuotto oli ajoittain n. 190 Nm³/d.

MTT Maaningan biokaasulaitoksen CHP-yksikköä vastaavan (23 kW sähköteho) CHP-laitteen sähköhyötysuhde oli Frostin & Gilkinsonin (2011) tutkimuksessa 27 % ja kokonaishyötysuhde 78 %. Bioson Oy:n Juvan biokaasulaitoksen kokonaishyötysuhde oli 76–83 % neljällä mittausjaksolla (Arola 2012). CHP-yksikön sähköhyötysuhde on yleensä sitä suurempi, mitä isompi CHP-yksikkö on. Wallan & Schneebergerin (2008) tutkimuksessa esim. alle 50 kW sähkötehon laitteissa sähköhyötysuhde oli keskimäärin 30,7 % (26,0–33,0 %), 51–100 kW laitteissa 32,8 % ja 1001–2425 kW laitteissa 40,6 % (38–42 %). Täten isommassa, keskitetyssä biokaasulaitoksessa voitaisiin tuottaa suhteellisesti enemmän sähköä kuin maatilamittakaavassa.

Kirjallisuuteen verraten MTT Maaningan CHP-yksikön sähköntuotannon hyötysuhde on yksikön kokoluokkaan nähden tavanomaisella tasolla. Sen sijaan kokonaishyötysuhde, lämpö mukaan lukien, on varsin korkea.

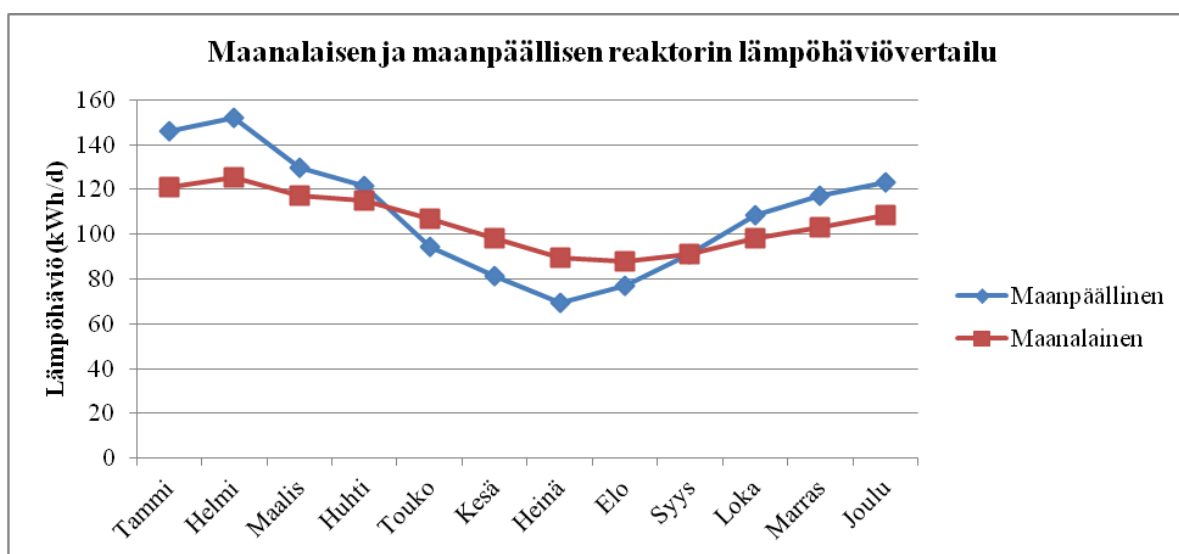
6.4.2 Biokaasulaitoksen reaktorin lämpötalousmalli

Lämpötalousmallin (ks. 4.4.5.) ennuste reaktorin lämpöenergian kulutuksesta poikkeaa 29 viikon tarkastelujaksolla mitatusta keskimäärin -1 % (Kuva 6.1).



Kuva 6.1. Reaktorin lämpötalousmallin ennusteen vertaaminen reaktorin mitattuun lämpöenergian kulutukseen Lantakoe 2:n ja Valuegrass-hankkeen lietalannan ja säilörehun yhteiskäsittelykokeen aikana.

Mallin mukaan MTT Maaningan biokaasulaitoksen reaktorin sijoittaminen maan päälle lisäksi esim. lietalannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä lämpöenergian tarvetta vuodessa keskimäärin vain n. 4 kWh/d (1,5 MWh/v), Maan alle sijoittaminen kuitenkin tasaa lämpöhäviön vuodenaikaisvaihtelua (Kuva 6.2). Suurimman ja pienimmän lämpöhäviön kuukausikeskiarvon ero maanalaisella reaktorilla on 38 kWh/d, kun maanpäällisellä ero on 83 kWh/d. Maan alle sijoittaminen vähentää biokaasulaitoksen lämmön omakulutusta talvella, kun muiden rakennusten lämmöntarve on suurin.



Kuva 6.2. Mallinnettu maanalaisen ja maanpäällisen reaktorin lämpöhävikki kuukausittain lietalannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä.

6.4.3 Biokaasulaitoksen vuotuinen energiatase CHP-tuotannossa

Vuoden tarkastelujaksolla (1.11.2011–30.10.2012) ulkoilman keskimääräinen lämpötila oli 4,0 °C, maaperän (2 m) lämpötila 6,8 °C, lietelantasyötteen lämpötila 9,0 °C ja kasvimassasyötteiden lämpötila 9,5 °C. Vuosittaisessa energiataseen laskemista varten käytettiin kullakin koejaksolla mitattua 3–6 koeviikon keskiarvoista, laitoksen mitoituksen mukaisen syötön (n. 10 m³/d lietelantaa, yhteiskäsittelyssä lisäksi 700–800 kg/d kasvimassaa) aikana mitattuja kaasuntuottolukemia. Taselaskelmassa tuotettu kaasu poltetaan CHP-yksiköllä, ilman huoltokatkoja ja olettaen, että laitteen kapasiteetti riittää polttamaan kaiken kaasun. Syötetönä kohti laskettuna ensimmäisessä lietelantakokeessa (Lantakoe 1, lannan TS 10,3 %) tuotettiin 14 Nm³ metaania (158 Nm³CH₄/tVS). Biokaasulaitoksen sähkön omakulutus olisi tällä syötöllä vuodessa keskimäärin 18 kWh/syötetönä (13 % tuotetun biokaasun energiasisällöstä) ja lämmön omakulutus 27 kWh/syötetönä (19 % biokaasun energiasta). CHP-tuotannossa (sähköhyötysuhde 26,0 %, lämpöhyötysuhde 61,5 %) laitoksen ulkopuoliseen käyttöön voidaan tuottaa nettosähköä 25 kWh/syötetönä ja nettolämpöä 49 kWh/syötetönä. (Taulukko 6.6).

Taulukko 6.6. Lannan käsittelyn energiataseet kahdessa Biotila-hankkeen kokeessa Maaningalla sekä pohjoisirlantilaisessa (Frost & Gilkinson 2011) ja turkkilaisessa (Akbulut 2012) biokaasulaitoksessa.

Koe/paikka →	Lantakoe 1	Lantakoe 2	P-Irlanti	Turkki
Reaktorin OLR (kgVS/m ³ d)	3,4	2,3	2,0	2,7
Reaktorin HRT (d)	26	25	27	33
Syötteen TS %	10,3	7,2	6,9	10,8
Metaania Nm ³ /t syötettä	13,7	12,3	8,5	19,1
Kaasun energiasisältö (kWh)	137	123	85	191
Nm ³ CH ₄ /tVS	156	205	158	211
CHP sähköntuotto (kWh)	35,7	31,9	23,0	74,3
CHP lämmöntuotto (kWh)	84,5	75,6	43,0	85,7
Sähkön omakulutus (kWh)	19,5	14,3	5,4	7,3
-Reaktorin sekoitusenergia (kWh)	11,2	6,1	–	–
Lämmön omakulutus (kWh)	26,8	32,4	32,0	42,7
Nettosähkö (kWh)	16,1	17,6	17,6	67,0
Nettolämpö (kWh)	57,7	43,2	11,0	43,0
Nettoenergia yhteensä (kWh)	73,8	60,9	28,6	110,0
ENERGIATASEET				
Sähkön omakulu/kaasun energia (%)	14	12	6	4
Lämmön omakulu/kaasun energia (%)	20	26	39	22
Energian omakulu/kaasun energia (%)	34	38	44	26
Nettoenergia/kaasun energia (%)	54	50	34	58

Toisessa lietelantakokeessa (Lantakoe 2, lannan TS 7,5 %) tuotettiin alhaisen sekoitusnopeuden aikana metaania 12,3 Nm³/syötetönä (-205 Nm³CH₄/tVS). Sähkön omakulutus oli tällöin 14 kWh/t (12 % biokaasun energiasta). Alennettu sekoitusnopeus lisäsi vastaavasti lämmön omakulusta ja laitoksen energiakulutus oli samansuuruinen kuin ensimmäisessä lantakokeessa (45 kWh/syötetönä). Nettoenergiaa tuotettiin yhteensä 61 kWh/syötetönä. Toisaalta maatalojen biokaasulaitoksissa, erityisesti karjatiljoilla on usein lämmölle vähemmän käyttöä, joten sen lisäkulutus laitoksessa ei ole ongelma. Sähkön omakulutuksen säästö voi edelleen olla merkittävä etu taloudellisesti.

Pohjoisirlantilainen täyden mittakaavan biokaasulaitos (Frost & Gilkinson 2011) tuotti lehmän lietelannan (TS 6,9 %, syötteen lämpötila 6–16 °C) käsittelyssä metaania 8,5 Nm³/syötetönä (158 Nm³CH₄/tVS). Laitos (reaktori 660 m³, JKA 660 m³) kulutti kaasusekoituksen (15 min/h) ansiosta sähköä vain 5,4 kWh/syötetönä (6 % tuotetun biokaasun energiasisällöstä). Todennäköisesti sekoituksen vähäisen lämmöntuoton sekä reaktorin sijoituspaikan (maan päällä) ja rakenteen (materiaali, eristys) vuoksi laitoksen lämmönkulutus (32 kWh/syötetönä) oli leudommasta ilmastosta huolimatta korkeampi kuin MTT Maaningan biokaasulaitoksessa. Myös tuotetun nettoenergian määrä (29 kWh/t) oli alhaisempi kuin MTT Maaningan lantakokeissa (Taulukko 6.6).

Turkissa (vuoden keskilämpötila 7,5 °C) sijaitseva, lehmän ja lampaan lantaa käsittelevä biokaasulaitos (Akbulut 2012) tuotti syötetöntä (TS 10,8 %) kohti nettoenergiaa 110 kWh (metaanintuotto 19 Nm³/syötetöntä). Suurikokoisen laitoksen laskennallinen sähkönkulutus oli vain 3,8 % tuotetun biokaasun energiasisällöstä, mutta korkeamman prosessilämpötilan (40 °C) ja syötteen alhaisen keskiarvoisen lämpötilan (8,0 °C) vuoksi lämpöenergian kulutus oli korkeampi kuin MTT Maaningan biokaasulaitoksella, 43 kWh/syötetöntä (22 % biokaasun energiasisällöstä) (Taulukko 6.6).

MTT Maaningan biokaasulaitoksessa lietalannan ja säilörehun yhteiskäsittely (syötteen TS 9 %) tuotti nettoenergiaa 105 kWh/syötetöntä. Paksun lietalannan ja ruokohelven yhteiskäsittely (TS 12 %) tuotti nettoenergiaa -108 kWh/syötetöntä. Lannan ja sipulimassan yhteiskäsittely tuotti näitä vähemmän nettoenergiaa syötteen alhaisen TS-pitoisuuden ja sipulimassan matalan metaanintuottopotentialin vuoksi (Taulukko 6.7).

Taulukko 6.7. Lannan ja lisäsyötteiden yhteiskäsittelyn energiatase MTT Maaningan biokaasulaitoksessa ja ruotsalaisessa nurmea, sokerijuurikkaan naatteja, leipomojätettä ja nurmea käsittelevässä biokaasulaitoksessa (Edström ym. 2005).

Koe/paikka →	Rehukoe	Sipulikoe	Helpikoe	Ruotsi
Reaktorin OLR (kgVS/m ³ d)	3,0	3,1	4,3	2,6
Reaktorin HRT (d)	25	25	25	47
Syötteen TS %	8,6	9,0	12,1	10,8
Metaania Nm ³ /t syötettä	17,1	14,3	17,4	17,4
Kaasun energiasisältö (kWh)	171	143	174	174
Nm ³ CH ₄ /tVS	236	189	166	310
CHP sähköntuotto (kWh)	44,5	37,1	45,3	61,0
CHP lämmöntuotto (kWh)	105,5	87,8	107,4	95,9
Sähkön omakulutus (kWh)	18,8	18,8	18,8	4,4
-Reaktorin sekoitusenergia (kWh)	10,9	10,9	10,9	0,5
Lämmön omakulutus (kWh)	26,4	26,7	25,5	26,2
Nettosähkö (kWh)	25,7	18,2	26,5	54,6
Nettolämpö (kWh)	79,2	61,0	81,8	69,5
Nettoenergia yhteensä (kWh)	104,9	79,3	108,4	124,0
ENERGIATASEET				
Sähkön omakulu/kaasun energia (%)	11	13	11	3
Lämmön omakulu/kaasun energia (%)	15	19	15	15
Energian omakulu/kaasun energia (%)	26	32	25	18
Nettoenergia/kaasun energia (%)	61	56	62	71

Ruotsalaisessa biokaasulaitoksessa (Edström ym. 2005) hevosenlannan, nurmen, sokerijuurikkaan naattien, leipomojätteen ja nurmen yhteiskäsittely tuotti nettoenergiaa 124 kWh/syötetöntä (reaktori 500 m³). Laitoksessa käytettiin syötteen korkean TS-pitoisuuden laimentamiseen separoimatonta ja separoitua käsittelyjäännöstä. Laitoksen sähkön omakulutus (4 kWh/syötetöntä) oli vain 3 % tuotetun biokaasun energiasisällöstä. Suurin alhaista sähkönkulutusta tekijä oli sekoitus. Laitoksen reaktorin sekoituksen (kaltevaan kulmaan asennettu lapasekoitin) osuus sähkönkulutuksesta on vain 12–23 % (0,5 kWh/syötetöntä), kun tässä raportoiduissa kokeissa reaktorin sekoitukseen meni 43–58 % laitoksen käytämästä sähköstä (6–11 kWh/syötetöntä). Lämpöenergiaa Ruotsin laitos kulutti saman verran kuin MTT Maaningan biokaasulaitos yhteiskäsittelykokeissaan (26 kWh/syötetöntä).

Biokaasulaitoksen sähkönkulutusta voidaan siis pienentää ainakin alentamalla reaktorin sekoitustehoa. Sekoitustehoa voidaan alentaa tauottamalla sekoitusta tai vaihtamalla sekoitusmenetelmää. Myös Naegelen ym. (2012) tutkimuksessa täyden mittakaavan lantaa, nurmisäilörehua, viljasäilörehua, maissisäilörehua ja muita energiakasveja yhteiskäsittävän laitoksen reaktorin (923 m³) sekoitusteho (3,1 W/m³, OLR 1,5–2,3 kgVS/m³d) oli huomattavasti alhaisempi kuin tässä raportoiduissa kokeissa (10–18 W/m³). Laitos käytti reaktoreissaan vaakasuoraan suunnattua propellisekoitinta sekä kaltevaan kulmaan asennettua lapasekoitinta (paddle incline agitator) ja sekoitus oli tauotettua (3 min 30 min välein). Jälkikaasualtaan sekoitusteho oli myös alhainen, 1,3 W/m³ (MTT Maaningalla 2,2–2,3 W/m³). Ilman vesikiertolämmitystä olevan JKA:n sekoitustehon alentaminen viilentää säiliötä ja alentaa sen mahdollisesti kaasuntuottoa.

Toisaalta biokaasulaitoksen suurempi koko ja/tai sähkötekniiset ratkaisut voivat pienentää laitoksen sähkönkulutusta. Sekä pohjoisirlantilaisen kaasusekoitteen (Frost & Gilkinson 2011) että ruotsalaisen (Edström ym. 2005) biokaasulaitoksen koko sähkönkulutus sekoituksineen syötetonnia kohti (5 ja 4 kWh/t) olivat alhaisempia kuin pienemmän MTT Maaningan laitoksen sähkönkulutus, kun siitä on vähennetty reaktorin sekoitusenergia (8 kWh/t pl. reaktorin sekoitus).

Kaiken kaikkiaan voidaan siis havaita, että maatilan biokaasulaitoksen energiataseen optimoinnissa on erilaisia mahdollisuuksia. Laitoksen sähkönkulutusta voidaan alentaa vähentämällä reaktorin ja JKA:n sekoitustehoa. Samalla on huomioitava, että sekoitustehon vähentäminen lisää lapa- ja propellisekoittimia käytettäessä reaktorin lämmönkulutusta (kaasusekoituksessa ei merkitystä). Useissa tapauksissa lämpöä tuotetaan yli tilan tarpeen, joten lämmöntarpeen nousu ei välttämättä ole tilalle merkittävä. Sen sijaan säästetyn sähkön arvo voi olla laitoksen kannattavuuden kannalta hyvinkin edullinen. Lapa- ja propellisekoittimien käytön vähentäminen myös hieman viilentää jälkaasuallasta, mikä saattaa johtaa sen kaasuntuoton alentumiseen (alhainen lämpötila hidastaa mikrobien aktiivisuutta).

Alhaiseen sähkönkulutukseen on kirjallisuuden mukaan päästy käyttämällä lapa- ja propellisekoittimien sijaan kaasusekoitusta tai vähentämällä sekoittimien käyttöä joko sekoitusnopeutta vähentämällä tai tauotamalla sekoitusta halutun ohjelman mukaisesti. Laitostoimijan kannattaa jossain vaiheessa laitoksen opeointia seurata laitosta muutaman viikon ajan tavanomaista tarkemmin ja testata sekoitustarvetta oman tavoitteensa mukaisesti ja syöttömateriaaleista riippuen. Kannattaa myös kiinnittää huomiota pumppujen käyttöön (sähkönkulutus) sekä laitoksen lämmitettäviin osiin (esim. tekninen tila) ja miettiä, voisiko niissä tehdä jotain lämmön- ja sähkönkulutusta vähentäviä toimenpiteitä.

6.4.4 Jälkikaasualtaan metaanintuotto, vuotuinen energiatase ja vaikutus päästöihin

Jälkikaasualtaassa (JKA) jäljelle jääneen orgaanisen aineen hajoaminen edelleen lisää biokaasulaitoksen kaasuntuottoa ja vähentää metaanipäästöjä ilmakehään merkittävästi verrattuna suoraan varastointiin reaktorin jälkeen. Jälkikaasualtaan merkitys korostuu erityisesti lietelannan ja kasvimassan yhteiskäsittelyssä.

JKA:n metaanintuottoon tässä tutkimuksessa vaikuttivat mm. laitoksen kuormitus (OLR), kasvin osuus kuormituksesta sekä JKA:n lämpötila (v. 2009–2012 vaihteluväli 25–35 °C, ei lämmitystä). Lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä (OLR 3,0 kgVS/m³d, rehun osuus 26 % kuormituksesta) JKA (31 °C) tuotti 20 % koko laitoksen metaanimäärästä, ja sen sähkönkulutus oli 4 % tuottamansa kaasun energiasisällöstä. Lietelannan ja ruokohelven yhteiskäsittelyssä korkean kuormituksen (4,3 kgVS/m³d, helven osuus 21 %) aikana JKA tuotti 32 °C lämpötilassa koko laitoksen metaanituotosta 19 % ja sen jälkeisellä kahden viikon matalan kuormituksen (3,3 kgVS/m³d, helven osuus 25 %) jaksolla 34 °C lämpötilassa 20 %. Samalla JKA:n sähkönkulutus oli 5 % tuottamansa kaasun energiasisällöstä. Lietelannan käsittelyssä (Lantakoe 2), laitoksen kuormituksen ollessa 2,3–2,4 kgVS/m³d, JKA tuotti 30–31 °C lämpötilassa 12–14 % metaanista ja sen sähkönkulutus oli 10 % tuottamansa kaasun energiasisällöstä.

Jälkikaasualtaan merkitys päästöjen vähentäjänä on erityisen merkittävä. Lukuisissa tutkimuksissa on havaittu, että pelkässä reaktorissa käsitellyn jäännöksen metaanipäästöt ovat suuremmat kuin raakalannan, kun molemmat varastoidaan avoimissa säiliöissä. Sen sijaan jälkikaasutetun jäännöksen päästöt ovat hyvin vähäiset. Varastot kattamalla päästöjä voidaan entisestään vähentää. Samalla myös estetään arvokkaan ammoniumtyypen haihtuminen ammoniakkipäästöinä ja varmistetaan jäännöksen korkea lannoitearvo. Ympäristöllisesti jäännösvarastojen kattaminen on erittäin tärkeää, sillä metaani on voimakas kasvihuonekaasu ja ammoniakki aiheuttaa suoraan rehevöitymistä, happamoitumista ja terveydelle haitallisten partikkelien muodostusta sekä epäsuorasti dityppioksidipäästöjä (erittäin voimakas kasvihuonekaasu).

6.4.5 Kuukausittainen energiatase CHP-tuotannossa

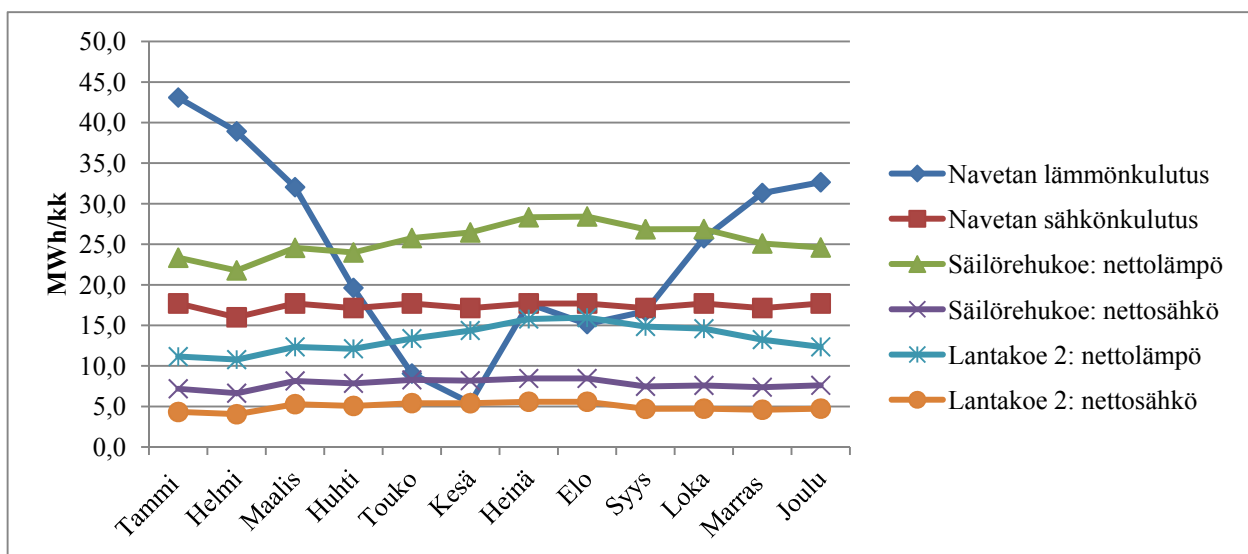
Mittausten ja mallinnuksen perusteella laskettiin vuoden jokaiselle kuukaudelle MTT Maaningan biokaasulaitoksen energian omakulutusmäärät ja biokaasulaitoksen ulkopuoliseen käyttöön saatavat nettoenergiämäärät. Nettolämpöä voidaan tuottaa eri syötteillä kesä-elokuussa 14–29 MWh/kk ja muina kuukausina 11–28 MWh/kk. Kylminä kuukausina nettolämmön määrää vähentää biokaasulaitoksen reaktorin liisäntynyt lämmitystarve. Nettosähköä voidaan tuottaa eri syötteillä kesä-elokuussa 4,8–8,7 MWh/kk ja muina kuukausina 3,5–8,5 MWh/kk. Nettosähkön määrää vähentää syys-toukokuussa tarvittava teknisen tilan sähkölämmitys (0,2–1,3 MWh/kk). Teknisen tilan sähkölämmitys on mahdollista muuttaa lämminvesipattereilla toimivaksi, jolloin biokaasulaitos tuottaisi enemmän nettosähköä. Lämmitystarvetta voisi

vähentää myös esim. eristämällä tila paremmin, pienentämällä huoneiden tilavuutta ja vähentämällä tuuletusta.

MTT Maaningan 120 lehmän verhoseinäinen pihattonavetta (sisältää myös ihmisten oleskelutiloja) kulutti lämpöenergiaa vuoden tarkastelujaksolla (1.11.2011–31.10.2012) yhteensä n. 287 MWh (Kuva 6.3). Navetan sähkönkulutuksen arvioidaan olevan 174 MWh/v ja jakautuvan vuoden päiville tasaisesti (arvio Posion (2009) mukaan: pihattonavetan laskennallisen ja kyselytutkimuksen tulosten sähkönkulutuksen keskiarvojen keskiarvo TE-keskusalue III:lla 1447 kWh/lehmäpaikka/v).

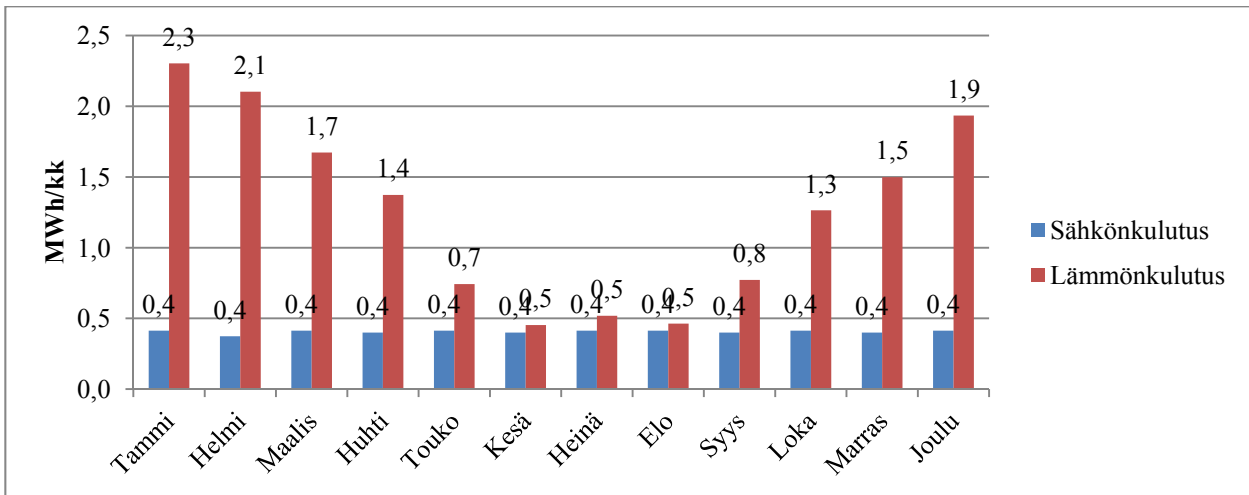
Esimerkiksi lietalan ja säilörehun yhteiskäsittelystä saatavalla nettosähköllä (6,6–8,4 MWh/kk) voidaan kattaa 41–48 % navetan vuotuisesta sähkötarpeesta (16,0–17,7 MWh/kk). Lisäksi biokaasulaitos voisi tuottaa navetan tarvitsemasta lämpöenergiasta loka–maaliskuussa 46–89 %. Huhti-syyskuussa biokaasulaitoksen tuottaman nettolämmön määrä ylittää navetan lämpöenergian tarpeen kuukausittain 4–21 MWh:lla (Kuva 6.3).

Jos ylijäämälämpöenergiaa ei pystytä hyödyntämään eikä lämpöenergiaa haluta tuhjata, navetan lämpöenergian tarve voitaisiin kattaa pelkällä lietalantasyötölläkin touko-kesäkuussa (Kuva 6.3). Vastaavasti kylminä kuukausina navetan huippukulutuksen aikana voitaisiin biokaasulaitokseen syöttää enemmän säilörehua, jolloin saataisiin tuotettua myös enemmän nettoenergiaa.



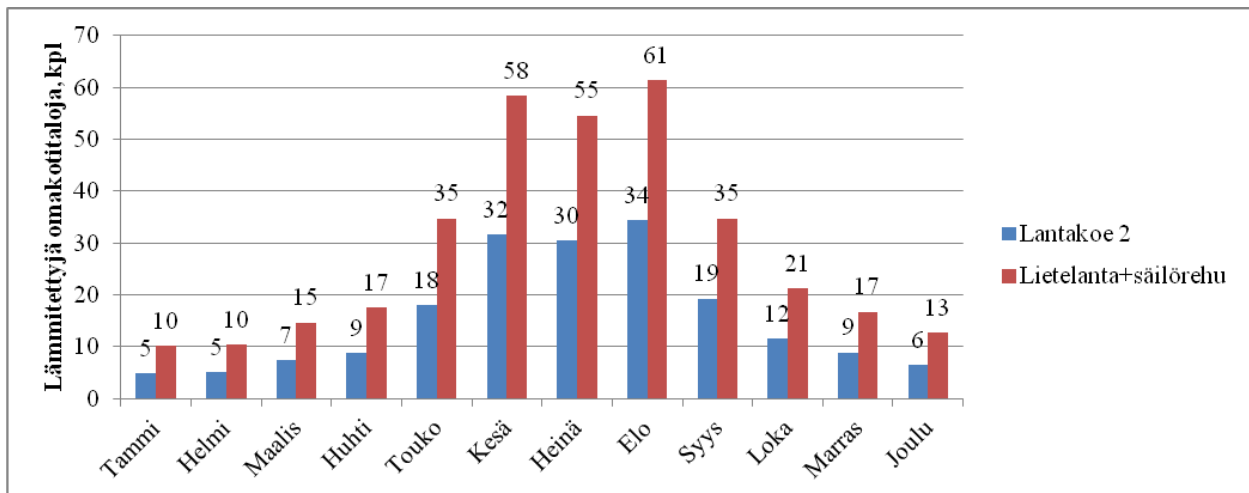
Kuva 6.3. 120 lehmän pihattonavetan energiankulutus (lämmönkulutuksen tarkkuus n. ± 2 MWh/kk, tammi–maaliskuun jakauma arvioitu) ja pelkän lietalan käsittelyssä (Lantakoe 2) sekä lietalan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä (Säilörehukoe) syntyvät nettoenergiamäärät kuukausittain.

Biokaasulaitoksen tuottamaa nettoenergiaa voitaisiin käyttää myös omakotitalojen tarvitseman energian tuottamiseen. Maaningan vuoden tarkastelujaksoa (vuoden keskilämpötila $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) vastaavissa lämpöolosuhteissa ($4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) esimerkkitalon (Ympäristöministeriö 2008) sähkönkulutus on $49\text{ kWh}/\text{brm}^3/\text{v}$ ja lämmönkulutus $151\text{ kWh}/\text{brm}^2/\text{v}$. Bruttopinta-alaltaan 100 m^2 omakotitalon lämpöenergiankulutus olisi $15,1\text{ MWh}/\text{v}$ ($0,5\text{--}2,3\text{ MWh}/\text{kk}$) ja sähköenergiankulutus $4,9\text{ MWh}/\text{v}$ ($0,4\text{ MWh}/\text{kk}$; Kuva 6.4).



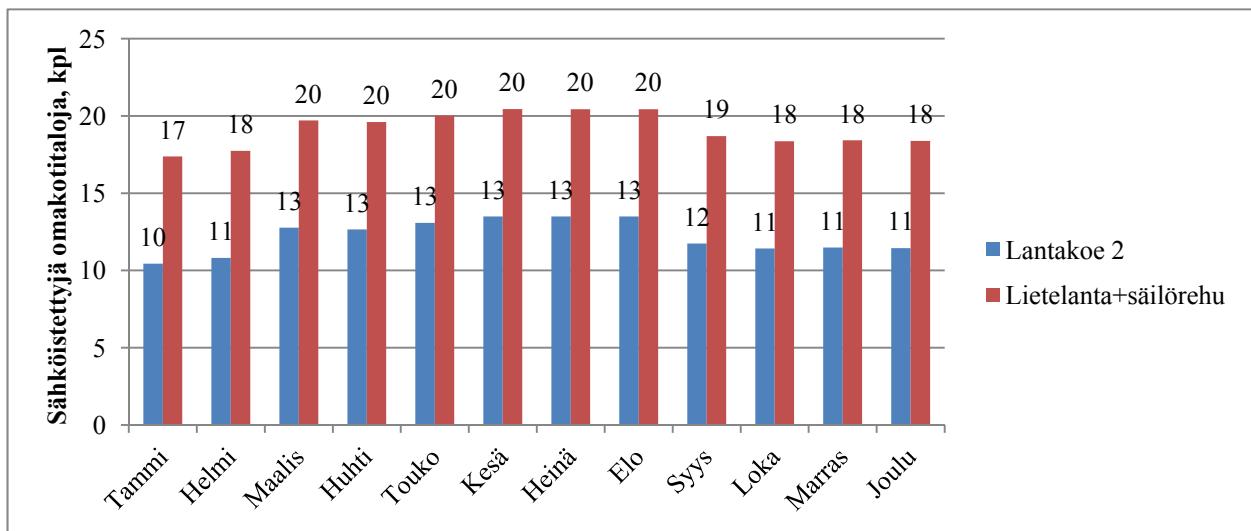
Kuva 6.4. Esimerkkiomakotitalon sähkön ja lämmönkulutus kuukausittain.

Lietelannasta tuotettu nettolämpö riittäisi jouluihelmikuussa vain 5–6 omakotitalon lämmitykseen, mutta touko-syyskuussa 18–34 talon lämmitykseen. Lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä jouluihelmikuussa tuotettava nettolämpö vastaa 10–13 omakotitalon lämmöntarvetta (Kuva 6.5). Touko-syyskuussa biokaasulaitoksen tuottamalla nettolämmöllä voisi lämmitellä jopa 35–61 omakotitaloa (siirtohäviöitä ei huomioitu).



Kuva 6.5. Lietelannan käsittelyssä sekä lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä tuotetun nettolämmön riittävyys omakotitalojen lämmitykseen.

Lietelannan käsittelyssä maalisielokuussa tuotettu nettosähkö kattaisi 13 omakotitalon sähköntarpeen ja muina kuukausina 10–12 talon sähköntarpeen. Lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä maalisielokuussa tuotettu nettosähkö riittäisi 20 omakotitalolle ja muina kuukausina 17–19 omakotitalolle (Kuva 6.6).



Kuva 6.6. Lietelannan käsittelyssä sekä lietelannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä tuotetun nettosähkön riittävyys omakotitalojen sähköntuotantoon.

6.5 Käsittelyjäännöksen ominaisuudet

Teoriassa kokonaistyyppiä, -fosforia ja -kaliumia tulee biokaasulaitoksesta ulos suunnilleen saman verran kuin syötteessä menee sisään. Käsittelyjäännöksessä on kuitenkin hieman korkeampi ravinnepitoisuus kuin syötteessä, koska osa syötteen sisältämästä massasta muuttuu biokaasuksi, jonka mukana ei poistu ravinteita (pl. erittäin vähäinen määrä ammoniakkia), vaan lähinnä vain metaania ja hiilidioksidia. Syötemäärän ja syötteen ravinnepitoisuuden vaihdella (kuten tässäkin raportoiduissa kokeissa) reaktorin ja jälkikaasualtaan (jäännösten) ravinnepitoisuudet muuttuvat viiveellä, joten tarkkaa ravinnetasetta on vaikea määrittää. Raportoitavissa kokeissa reaktorin käsittelyjäännösnäytteissä ravinnepitoisuudet olivat yleensä korkeampia kuin jälkikaasualtaan jäännösnäytteissä. Näytteenottomenetelmä ja näytteenottopiste voivat vaikuttaa osaltaan analyysituloksiin. Toisaalta ravinteiden pidäytyminen prosessissa, esim. sedimentoitumisen (Schievano ym. 2011) tai epätasaisen sekoittumisen vuoksi, on mahdollista.

Käsittelyjäännöksen kasveille käyttökelpoisen ammoniumtyypen pitoisuus ja sen suhde kokonaistyyppien määrään ($\text{NH}_4\text{-N}/\text{N}_{\text{tot}}$) riippuvat syötteen laadusta sekä biokaasuprosessin mikrobiologisesta tilasta. Syötteen sisältämän proteiinin hajotessa prosessissa vapautuu ammoniumioneja (NH_4^+). Prosessiin voi myös tulla syötteen mukana valmiiksi nesteeseen liuennutta ammoniumtyyppiä. Etenkin lietelannassa sitä on runsaasti.

Mikrobisynteeseissä osa prosessilietteen ammoniumtyyppistä sitoutuu mikrobeihin, jolloin prosessilietteessä sen pitoisuus alenee. Staattisessa tasapainotilanteessa mikrobeja kuitenkin syntyy ja kuolee tai poistuu käsittelyjäännöksen mukana samaan tahtiin, jolloin ammoniumtyypen nettositoutumista ei tapahdu. Tällöin mikrobit hajottavat edelleen proteiineja, mutta eivät sido itseensä vapautuvaa ammoniumtyyppiä, joka lisää käsittelyjäännöksen ammoniumtyypin pitoisuutta (kasvattaa $\text{NH}_4\text{-N}/\text{N}_{\text{tot}}$ suhdelukua).

Dynaamisessa prosessissa (muuttuvat syötteen määrät ja ominaisuudet sekä prosessin mikrobimäärät), kuten näissä kokeissa, prosessilietteen (käsittelyjäännöksen) ammoniumtyypin pitoisuus voi vaihdella. Esimerkiksi prosessin viipymän pidentyminen ja kuorituksen aleneminen kasvattaa mikrobipitoisuutta ja lisää siten ammoniumtyypin sitoutumista orgaaniseen ainekseen (Husain 1998: Hill 1983).

Kokeissa paksun lietelannan käsittelyn loppuvaiheessa (Lantakoe 1, $n = 2$) jälkikaasualtaan käsittelyjäännöksen $\text{NH}_4\text{-N}/\text{N}$ -suhde oli 41 % korkeampi kuin lietelantasyötteessä (Taulukko 6.7). Ohuemman lietelannan käsittelyssä (Lantakoe 2, $n = 4$) jälkikaasualtaan käsittelyjäännöksen $\text{NH}_4\text{-N}/\text{N}$ -suhde oli 10 % korkeampi kuin lietelannassa. Käsittelyjäännösten TS- ja VS-pitoisuudet olivat selvästi syötteen pitoisuuksia alhaisempia. VFA-pitoisuudet olivat erittäin matalia, mikä kertoo mikrobi prosessin hyvästä tasapainosta.

Taulukko 6.7. Syötteen ja käsittelyjäännösten keskiarvoiset ominaisuudet kahdessa lietelannan käsittelykokeessa sekä Frostin ja Gilkinsonin (2011) kokeissa.

Koe/liete	OLR kgVS/m ³ d	HRT d	TS %	VS %	VS/TS -suhde	N _{tot} kg/t	NH ₄ -N kg/t	NH ₄ -N/N %	SCOD g/kg	VFA g/kg	pH
<i>LANTAKOE 1:</i>											
Lietelanta			10,0	8,6	0,85	3,32	1,41	42	20,9	6,32	6,8
Reaktorijäännös	3,4	26	5,9	4,7	0,80	3,14	1,75	56	10,9	0,19	7,6
JKA-jäännös	3,4	26+26	5,3	4,0	0,76	3,10	1,85	60	10,0	0,09	7,6
<i>LANTAKOE 2:</i>											
Lietelanta			7,1	5,9	0,82	3,23	1,81	56	13,7	5,0	7,3
Reaktorijäännös	2,3	25	5,7	4,4	0,78	3,15	1,75	56	7,9	0,22	7,7
JKA-jäännös	2,3	25+25	4,9	3,7	0,76	2,98	1,83	61	7,4	0,09	7,6
<i>FROST & GILKINSON 2011, TÄYSI MITTAKAAVA, 27 KUUKAUDEN KESKIARVO:</i>											
Lietelanta			6,9	5,4	0,78	3,33	1,78	53	–	5,79	7,2
JKA-jäännös	2,0	27+27	5,5	4,0	0,73	3,36	2,10	63	–	1,16	7,9

Frostin & Gilkinsonin (2011) 27 kk täyden mittakaavan Lantakoe 2:ta vastaavassa kokeessa käsittelyjäännöksen NH₄-N/Nsuhde oli keskimäärin 17 %, ammoniumtyypen pitoisuus 18 % ja kokonaistypen pitoisuus 1 % korkeampi kuin lietelantasyötössä (Taulukko 6.7). Lehtomäen ym. (2007) laboratoriomittakaavan lyhyissä lietelantakokeissa (OLR 2 kgVS/m³d, HRT 20 d) reaktorin käsittelyjäännöksen NH₄-N/N-suhde oli 0–9 % korkeampi kuin lietelantasyötössä.

Biokaasulaitoksen kasvimassasyötössä selvästi lietelantaa suurempi osa tyydestä on sitoutunut orgaaniseen ainekseen. Tämän vuoksi lietelannan ja kasvimassan yhteiskäsittelyssä jäännöksen ammoniumtyypen pitoisuus on selkeästi suurempi kuin syötössä. Yhteiskäsittelykokeissa jäännöksessä olikin 40–66 % enemmän ammoniumtyyppiä kuin syötössä. Lehtomäen ym. (2007) lietelannan ja nurmen yhteiskäsittelykokeessa suhde oli samankaltainen (29–41 %), kun kasvin osuus syötteen VS:sta oli 10–30 % (OLR 2 kgVS/m³d, HRT 20).

Biokaasulaitoksen osana oleva jälkikaasuallas lisää käsittelyjäännöksen lannoitearvoa ja stabiilisuutta sekä vähentää metaanipäästöjä ilmakehään. Jälkikaasualtaan jäännös sisälsi kaikissa kokeissa suhteellisesti enemmän mineraalityyppiä (NH₄-N/N-suhde korkeampi) kuin reaktorijäännös. Lisäksi kaikissa kokeissa jälkikaasualtaan TS-, VS- ja VFA-pitoisuudet olivat alhaisempia kuin reaktorin pitoisuudet. Suurin ero VFA-pitoisuuksissa havaittiin lietelannan ja sipulimassan yhteiskäsittelyn loppuvaiheessa (reaktori 1,1 mg/l, JKA 0,2 mg/l). Jälkikaasualtaan VFA-pitoisuudet (n. 0–0,2 g/l) olivat huomattavasti alhaisempia kuin Frostin & Gilkinsonin (2011) lietelantakokeessa (1,16 g/l). VFA:n kertyminen voi kertoa inhibitiosta (esim. prosessissa liikaa mikrobeille myrkyllistä vapaata ammoniakkia Frostin & Gilkinsonin kokeessa 230 mg/l ja Lantakoe 2:ssa JKA:ssa 110 mg/l) tai ylikuormituksesta.

7 Johtopäätökset maatilamittakaavan kokeista

- Lietelanta on hyvä perusmateriaali maatilamittakaavan biokaasulaitoksessa. Sen käsittelyyn on olemassa toimivaa, testattua teknologiaa.
- Biokaasuprosessi lisää lietalan typen liukoisuutta ja taten sen lannoitearvoa.
- Maatilamittakaavan omien tai lähialueiden kasvibiomassojen hyödyntäminen biokaasulaitoksessa yhdessä lietalan kanssa lisää laitoksen energiantuottoa sekä jäännöksen typpipitoisuutta.
- Kun biokaasulaitoksen kokonaiskuormitus on pieni, saadaan hyödynnettyä suurempi osa syötteiden biometaanipotentiaalista. Tällöin syötteen orgaanisesta aineesta hajoaa suurempi osa ja ravinteiden (typen) mineralisoituminen nousee.
- Biokaasulaitoksen tuottaman nettoenergian määrä kasvaa ja energiatase paranee, kun orgaanista kuormitusta nostetaan, ja varsinkin silloin, kun kuormitusta lisätään korkean metaanipotentiaalilla omaavalla kasvimassalla. Jokaisella prosessilla on kuitenkin rajansa, joiden ylityttyä päädytään joko mikrobitoiminnan inhibitioon tai teknisiin ongelmiin. Kuormituksen noston kanssa on syytä toimia varovaisuusperiaatteella ja etsiä oman prosessin rajoja maltilla.
- Lannankäsittelyssä reaktorin sekoitusnopeuden merkittävä pienentäminen ei vähentänyt metaanintuottoa. Sekoituksen optimointi siis kannattaa, jotta laitos kuluttaa tuottamastaan sähköstä mahdollisimman vähän prosessin siitä kuitenkaan kärsimättä.
- Lietalan ja kasvimassan yhteiskäsittelyssä sekoitusnopeutta ei voi vähentää yhtä alhaiselle tasolle kuin pelkän lannan käsittelyssä. Liian vähäisellä sekoituksella kasvimassa voi kellua reaktorilietteen pinnalla, mikä voi vähentää metaanintuottoa ja aiheuttaa teknisiä ongelmia, kuten putkitukoksia. Sekoituksen optimointi kuitenkin kannattaa sähkönkulutuksen minimoimiseksi.

8 Maatilojen biokaasulaitosten energiataseet ja kasvihuonekaasupäästöt

Tuomas Huopana

8.1 Johdanto

Lisääntyvä kiinnostus biokaasuntuotantoa kohtaan on lisännyt myös tarvetta saada yksityiskohtaisempaa tietoa siitä, mikä on maatilakokoluokan biokaasusähkön- ja lämmöntuotannon energia- ja ravinnetase paikallisissa olosuhteissa sekä kuinka energiatehokkuutta ja ravinnetasetta voidaan parantaa. Näitä tutkimuskysymyksiä käsiteltiin Tuomas Huopanan BIOTILA-hankkeessa tekemässä pro gradu -tutkielmassa, jossa mallinnettiin erään pohjoissavolaisen, kuuden maatalan tilakeskittymän biokaasulaitoksen energia-, ravinne- sekä kasvihuonekaasupäästötasetta (Huopana, 2011). Opinnäytetyössä keskityttiin energia- ja typpitaseisiin, koska yleisesti energian säästöillä ja paremmalla energia- ja materiaalitehokkuudella päästään myös ilmastoon kannalta suotuisimpaan lopputulokseen (Huopana, 2011). Tässä tiivistelmässä esitetään opinnäytteen päätulokset.

Vaikka kasvihuonekaasupäästöjä ei tässä tiivistelmässä tarkastellakaan, viljelijän on hyvä pitää mielessä muutamia olennaisimpia seikkoja ilmastoon lämpenemiseen vaikuttavista tekijöistä. On yleisesti tiedossa, että polttamalla metaani (CH_4) hiilidioksidiksi ja korvaamalla sillä fossiililla polttoaineilla tuotettua energiaa, voidaan syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä pienentää merkittävästi. Tiedetään myös, että levittämällä lanta sijoittamalla voidaan ilmastolle haitallisia typpioksiduuli (N_2O) päästöjä vähentää. Myös lantavarastot kattamalla voidaan ehkäistä typen yhdisteiden haihtumista ilmakehään, mikä pienentää huomattavasti syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä. Typpioksiduulilla on sadan vuoden aikajaksolla 310–kertainen ilmastoa lämmittävä vaikutus kuin hiilidioksidilla. Metaani sen sijaan on samalla aikajaksolla 21 kertaa enemmän ilmastoon lämpenemistä kiihdyttävä kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi.

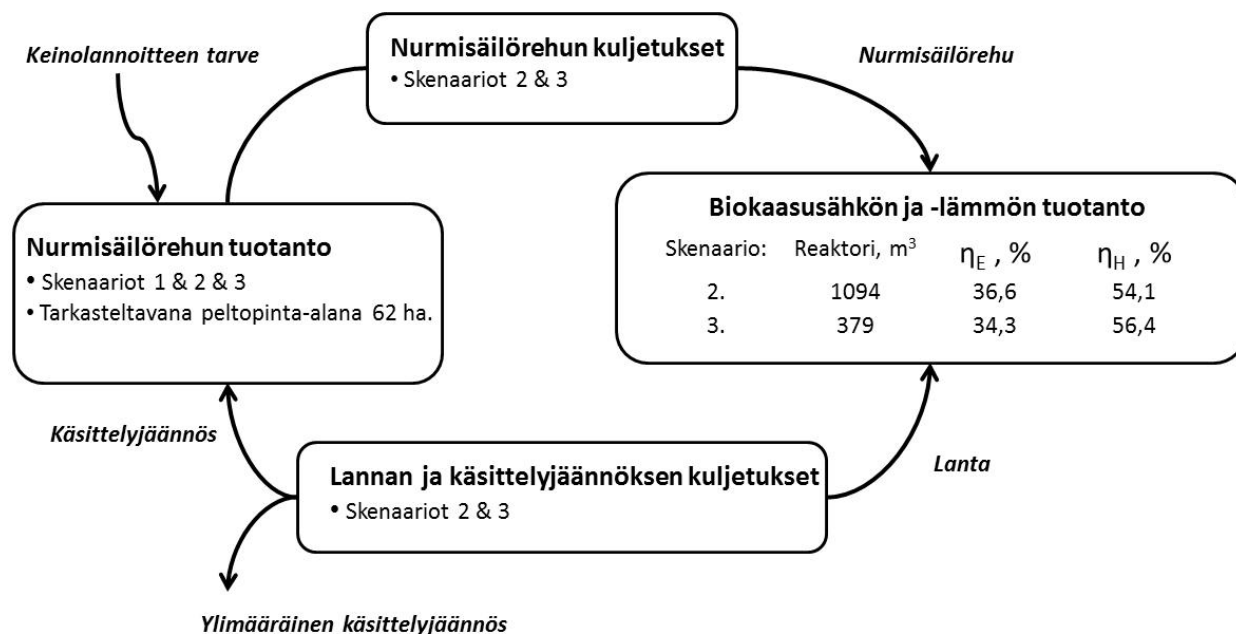
8.2 Skenaariot

Energia- ja massatase laskettiin nurmisäilörehun tuotantoskenaariossa sekä biokaasuntuotannolle kahdessa eri skenaariossa, minkä tarkoituksena oli nostaa esille maatilojen nurmisäilörehun tuotannon energia- ja ravinnetaseen muutosta siirryttäessä biokaasuntuotantoon (Kuva 8.1). Mallin tulokset ilmoitettiin keskimääräisinä arvoina yhden vuoden ajalle.

- Skenaario 1: Nurmisäilörehu on tuotettu erillisesti kuudella eri maatilalla. Lanta käytetään lannoitteena säilörehun tuotannossa. Biokaasun tuotantoa ei ole vielä otettu huomioon.
- Skenaario 2: Kuuden eri maatalan tuottamaa nurmisäilörehua ja lantaa käytetään syötteinä tilojen yhteisessä biokaasulaitoksessa. Syötteenä olevan säilörehun massa on 8 % lanta-syötteen tuoremassasta. Tilojen tuottama lantamäärä käytetään syötteenä kokonaan yhteisessä biokaasulaitoksessa. Käsittelyjäännös käytetään edelleen kaikilla tiloilla lannoitteena säilörehun tuotannossa.
- Skenaario 3: Biokaasulaitoksen säilörehun tuottajiksi valitaan kaksi maatilaa, joilla säilörehun tuotannon ominaisenergiankulutus (MJ tuotettua säilörehu tonnia kohden) on kaikkein pienin (Kuva 8.5). Nämä kaksi maatilaa lopettavat maidontuotannon ja siirtyvät sivutoimiksi nurmisäilörehun tuottajiksi. Kun biokaasulaitos on sijoitettu syötteen kuljetusten kannalta optimaalisimpaan paikkaan, vain biokaasulaitosta lähinnä olevat maidontuottajatilat luovuttavat lantaa biokaasulaitokselle siten, että biokaasulaitoksen orgaanisen aineksen kuormitus on korkeintaan $3 \text{ kg VS}/(\text{m}^3\text{d})$.

8.3 Alueellinen biokaasuntuotantomalli ja lähtöaineistot

Eri biokaasusähkön- ja lämmön sekä nurmisäilörehuntuotanto skenaarioiden energia- ja massataseiden laskemiseksi muodostettiin alueellinen biokaasuntuotantomalli, joka käsitti nurmisäilörehuntuotannon, biokaasulaitoksen syötteiden kuljetukset maatilojen ja biokaasulaitoksen välillä sekä biokaasusähkön- ja lämmöntuotannon. Mallin lähtöaineisto koostui tilakeskittymän aluetason ja biokaasuntuotannon datasta, jota täydennettiin kirjallisuusarvoilla sekä kokeellisilla arvioilla MTT Maaninnan biokaasulaitokselta mitatuista tuloksista. Mallin tuloksia käytettiin BIOTILA hankkeessa myös kohdealueen maatilojen biokaasuntuotannon kannattavuuden laskemisessa *Envitecpolis Oy:n* raportissa (Taavitsainen 2011).



Kuva 8.1. Skenaarioiden tärkeimmät yksikköprosessit ja parametrit.

8.3.1 Nurmisäilörehun tuotanto

Nurmisäilörehun tuotannon konetyön energiankulutus laskettiin neljän vuoden nurmen viljelykierron ajalta vuoden keskiarvona. Viljelykierron konetyö käsitti laskelmissa sadon uudistamisen, lietelannoitteen ja keinolannoitteiden levitykset, kasvinsuojelutyön, kalkin levityksen sekä rehunteon yhteensä seitsemän kertaa neljän vuoden aikana. Laskelmat perustuvat konetyön polttoaineen kulutusmalliin, joka käsittää konetyön peltolohkoilla sekä siirtymiset ja kuljetukset tilan ja peltolohkojen välillä. Mallin lähtötietoina käytettiin erään tilakeskittymän peltolohkojen sijainti, pinta-ala sekä kasvilajitietoja (Huopana, 2011). Siirtymisissä ja kuljetuksissa huomioitiin lyhin reitti tiestöä pitkin tilan ja sen peltolohkojen välillä. Lannan tuotantoluvut (Taulukko 8.1) kohdealueen tiloilla perustuvat MMM:n tietokantaan vuodelta 1996 ja olemassa oleviin rakennussuosituksiin lantaloiden tilavuuksien määrittämisestä. Nurmisäilörehun hehtaarisadoksi arvioitiin 2,8 kuiva-ainetonnia (8,8 tuorettonnia), kun neljän viljelyvuoden aikana huomioitiin seitsemän sadonkorjuukertaa. (Huopana 2011)

Taulukko 8.1. Kohdealueen lypsykarjatilojen lannantuotantomäärät.

Maatila nro:	Lannan tuotanto, t/v
1.	3800
2.	1800
3.	1900
4.	2500
5.	1400
6.	500

Mallissa typen lannoitustarve tyydytettiin lietalannan, käsittelyjäännöksen ja keinolannoitteen tyypellä, mutta myös typen huuhtoumat ja haihtumishäviöt sijoittavaa lannanlevityskalustoa käytettäessä huomioitiin (Huopana 2011). Typen lannoitetarpeeksi arvioitiin skenaarioissa 154 kg/ha, mikä käsitti myös typen häviöt. Kokonaistypen huuhtoutumaksi arvioitiin hietamaille tyypillisesti 23 kg/ha, mikä oli suurin typpi-häviöihin vaikuttavista tekijöistä. Typpioksidipäästöt arvioitiin 0,7 %:iin lietteenä levitetyn lannan tai käsittelyjäännöksen kokonaistypen määrästä. Ammonium typen haihtumisen määräksi levityksen yhteydessä arvioitiin 0,33 % lietalannoitteen sisältämästä liukoisesta tyypestä. Liukoisen typen määräksi arvioitiin 1,8 kg lantatonnia kohden (Taulukko 8.2). Käsittelyjäännöksessä sen sijaan skenaariossa 2 arvioitiin olevan 2,3 kg tyyppiä tuorettonnia kohden (Taulukko 8.4). Skenaariossa 3 liukoisen typen määräksi käsittelyjäännöksessä arvioitiin jopa 2,6 kg tuorettonnia kohden, koska biokaasulaitoksen syötteenä käytettiin suurempaa tyyppiä sisältävää nurmisäilörehun osuutta kuin skenaariossa 2. Keinolannoitteina huomioitiin *YaraBela* ja *YaraMila Pellon NP*, jotka sisälsivät 26 % tyyppiä lannoitteen massasta.

8.3.2 Kuljetukset

Nurmisäilörehun ja lannan kuljetusten energiankulutus perustui polttoaineen kulutusmalliin (Huopana 2011). Skenaariossa 2 biokaasulaitos sijoitettiin kohdealueen kasvihuoneelle, joka kulutti kaiken CHP laitoksen tuottaman lämmön. Nurmisäilörehun ja lannan kuljetuksissa biokaasulaitoksen ja maatilojen välillä käytettiin lyhintä etäisyyttä tieverkkoa pitkin. Skenaariossa 3. biokaasulaitos sijoitettiin paikkaan, jossa nurmisäilörehun ja lannan kuljetusten energiankulutus oli minimissään.

8.3.3 Biokaasusähkön- ja lämmön tuotanto

Biokaasulaitoksen tyypitase

Tyypitase laitoksella arvioitiin syötteiden ominaisuuksien ja kokeellisten arvioiden avulla. Laitokselta on myös poistuttava yhtä paljon tyyppiä kuin sinne saapuu syötteiden mukana. Syötteiden ominaisuudet perustuvat yleisiin kirjallisuusarvoihin ja valtakunnallisiin tilastoihin (Viljavuuspalvelu, Lehtomäki 2006, MTT 2006) kuin kyseisessä opinnäytetyössä on esitetty (Huopana 2011; Taulukko 8.2). Kokonaissyötteiden ominaisuudet on esitetty (Taulukko 8.3), kun skenaariossa 2 nurmisäilörehun tuoremassa on 8 % lannan tuoremassasta. Nurmisäilörehun syötön määrä skenaariossa 3 on 28,8 %, jolloin laitoksen orgaanisen aineksen kuormitus on 3 kgVS/m³d.

Taulukko 8.2. Syötteiden ominaisuudet.

	TS, %ww	VS, %ww	N-tot, mg/s TS	NH ₄ -N, mg/gTS	N-tot, %ww	NH ₄ -N, %ww	P, %ww	K, %ww
Lanta	5,50	4,48	54,55	32,73	0,30	0,18	0,05	0,33
Nurmisäilörehu	31,80	27,90	37,00	3,30	1,18	0,10	0,09	0,91

Taulukko 8.3. Kokonaissyötteiden ominaisuudet skenaarioissa eri syötesuhteilla.

Skenaario:	TS, %ww	VS, %ww	N-tot, mg/s TS	NH ₄ -N, mg/gTS	N-tot, %ww	NH ₄ -N, %ww	P, %ww	K, %ww
2	7,45	6,22	49,00	23,42	0,36	0,17	0,05	0,37
3	11,38	9,72	43,58	14,34	0,50	0,16	0,06	0,46

Käsittelyjäännöksen ominaisuudet määritettiin syötteiden ominaisuuksien ja kokeellisiin tuloksiin perustuvien arvioiden avulla (Taulukko 8.4). MTT Maaningan koeasemalla tehtyjen mittausten perusteella ammonium ja kokonaistypen pitoisuudet olivat 154 % ja 66,5 % enemmän käsittelyjäännöksessä kuin syötteessä, kun käsittelyjäännöksen ammonium typen pitoisuus mitattiin 60 päivää syötteen pitoisuuden mittauksen jälkeen. Samana aikana käsittelyjäännöksen VS pitoisuus oli pienentynyt 60,3 % syötteen VS pitoisuudesta. Esimerkiksi, skenaarion 2 käsittelyjäännöksen VS pitoisuudeksi saatiin 2,47 %, kun syötteen VS massa oli 6,22 % tuoremassasta ja VS:n poistumaksi arvioitiin 60,3 % (Taulukko 8.4). Käsittelyjäännöksen TS pitoisuudeksi skenaarioissa 2 ja 3 arvioitiin sen sijaan 3,84 % ja 5,87 % (Huopana 2011). Molemmassa biokaasuntuotantoskenaarioissa kokonaistypen pitoisuuden muutoksiksi arvioitiin 66,5 %. Kuitenkin, skenaariossa 2 ammonium typen pitoisuuden arvioitiin lisääntyvän 154 %, koska MTT Maaningan koeaseman syötesuhteet olivat samat kuin skenaariossa 2. Ammoniumtypen pitoisuuden muutoksen ennakoitiin olevan 37 % prosenttia enemmän skenaariossa 3 kuin skenaariossa 2, koska skenaariossa 3 on suhteessa enemmän nurmisäilörehua kuin skenaariossa 2 (Huopana, 2011). Tällöin ammonium typen pitoisuuden muutokseksi skenaariossa 3 saatiin 210 %.

Taulukko 8.4. Käsittelyjäännöksen ominaisuudet skenaarioiden syötesuhteilla.

Skenaario	NH ₄ -N:n muutos, % TS	VS poisto, %	VS, %ww	TS, %ww	NH ₄ -N, mg/gTS	N-tot, mg/s TS	N-tot, %ww	NH ₄ -N, %ww
2	154	60,3	2,47	3,84	59,48	81,56	0,31	0,23
3	210	60,3	3,86	5,87	44,45	72,55	0,43	0,26

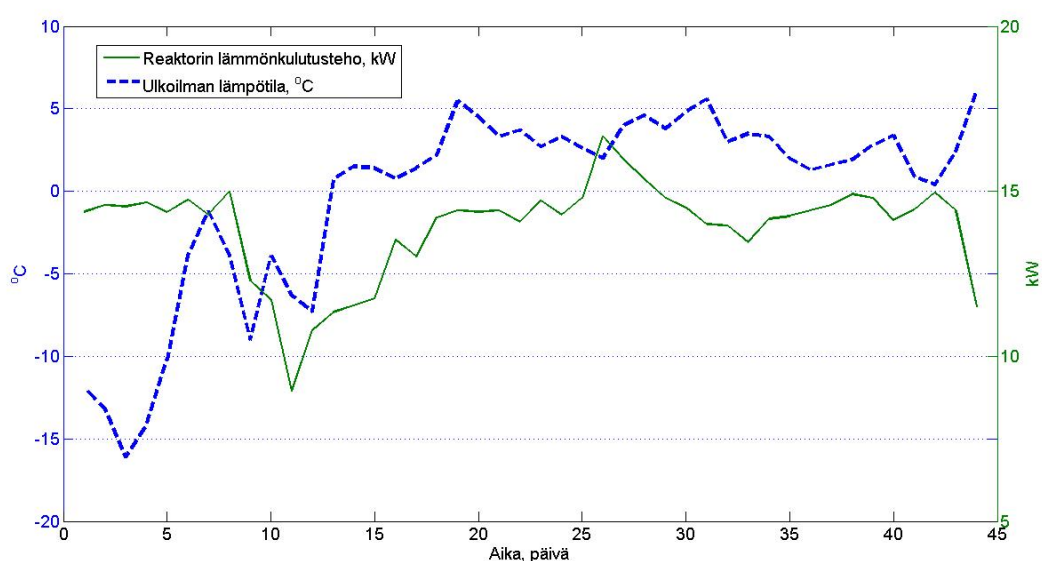
8.3.4 Biokaasulaitoksen energiatase

Biokaasulaitoksen energiatasemalli koostui sähkön- ja lämmöntuotanto- sekä energiankulutusmalleista. Todellisina energiapanoksina huomioitiin laitoksen sähkölaitteiden sähkönkulutus. Laitoksen tuottamasta lämmöstä vähennettiin laitoksen reaktorin lämmönkulutus ja loppuosa lämmöstä huomioitiin tuotettuna energiana. Sen sijaan laitoksen tuottama sähköenergia huomioitiin sellaisenaan tuotettuna energiana.

Mallin laitos koostui kahdesta reaktorista sekä lannan että käsittelyjäännöksen varastointisäiliöistä. Mallissa huomioitiin syötteiden pumppaus varastointisäiliöön, syötteiden siirto ja pumppaus ensimmäiseen reaktorisäiliöön ja ensimmäisen reaktorisäiliön lämmitys mesofiiliseen +37 °C lämpötilaan. Jäännöksen pumppaus jälkimädätysaltaaseen ja edelleen varastointialtaaseen huomioitiin.

Sähkön- ja lämmöntuotanto mallinnettiin syötteiden tuottaman metaanin energiasisällön ja arvioitujen hyötysuhteiden avulla. Metaanintuotoiksi skenaariossa 2 ja 3 arvioitiin 282 m³/(t VS) ja 309 m³/(t VS), kun skenaariossa 2. ja 3. orgaanisen aineksen kuormitukset olivat eri syötesuhteista johtuen 2,0 ja 3,0 kgVS/m³d (Huopana 2011). Metaanin palamisen alemmaksi lämpöarvoksi normaalilämpötilassa (293 K) ja paineessa (1 atm) johdettiin 33,13 MJ/m³ (Huopana 2011). Skenaarioissa 2. ja 3. sähköntuotannon hyötysuhteiksi arvioitiin 36,6 % ja 34,3 % metaanin energiasisällöstä (Kuva 8.1). Lämmönkulutuksen hyötysuhteiksi skenaarioissa 2 ja 3 oletettiin 54,1 % ja 56,4 %.

Biokaasulaitoksen ensimmäisen reaktorin lämmönkulutusmalli kuvaa biokaasureaktorin kuluttaman lämmön määrän vuoden ajalta (Huopana 2011). Lähtötietoina lämmönkulutusmallissa käytettiin MTT Maaninnan biokaasulaitoksen prosessidataa 44 päivän ajalta. Tällöin ensimmäisen 300 m³:n biokaasureaktorin lämmönkulutusteho oli keskimäärin 14 kW, kun ulkoilman keskilämpötila oli 0 °C ja lämpötilan vaihteli -16 °C ja +6 °C:n välillä (Kuva 8.2). Reaktoria syötettiin mittausjakson aikana lannalla ja kasvibiomassalla 9,7 ja 0,8 tonnia päivässä. Lannan ja käsittelyjäännöksen sekä kasvibiomassan kuiva-aineen määrät olivat 5,68 %, 5,46 % ja 31,11 % kunkin kyseisen syötteen märkäpainoista. Reaktorin lämmönkulutus riippuu reaktorin tilavuuden 2/3 potenssista sekä syötteiden ja jäännöksen entalpioiden (lämpösisältöjen) erotuksesta mikä on merkittävin reaktorin lämmönkulutukseen vaikuttavista tekijöistä. Skenaarioissa 2 ja 3 reaktoreiden lämmitysenergiankulutuksiksi saatiin 1797 GJ/vuosi ja 615 GJ/vuosi.

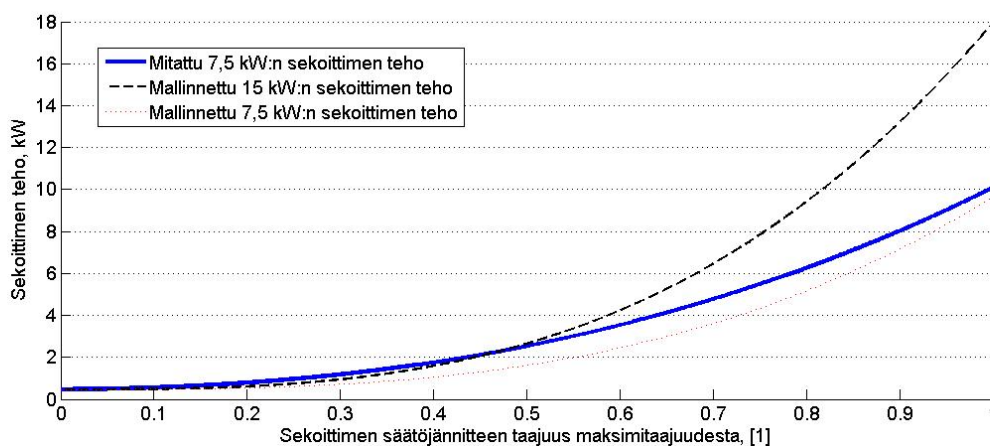


Kuva 8.2. Biokaasureaktorin lämmönkulutusteho ja ulkoilman lämpötila mitattiin keväällä 2010.

Pumppauksien sähkönkulutusmalli käsitti kolme keskipakoispumppua, joiden tekniset tiedot perustuivat erään pumppuvalmistajan tietoihin (Huopana 2011). Pumppujen hyötysuhteeksi oletettiin mallissa 76 % sen parhaimman hyötysuhteen toimintapisteessä, jossa pumpun nostokorkeus oli 14 metriä ja syötteen pumppausmäärä 30 litraa sekunnissa pumpun ottotehon ollessa 5,4 kW. Skenaarioissa 2. ja 3. pumppauksien energiankulutuksiksi saatiin mallin avulla 7 GJ/vuosi ja 2 GJ/vuosi.

Sekoittimien sähkönkulutusmalli käsitti kolme erityyppistä sekoitinta, jotka mallinettiin MTT Maaningan biokaasulaitokselta mitattujen sähkötehon, syöttöjännitteen taajuuden ja toiminta-ajojen sekä dimensioanalyysiin ja erään sekoitinvalmistajan teknisten tietojen perusteella (Kuva 8.3). Sekoittimia mitoitettaessa laitokselle on huomattava, että sekoittimen sähkönkulutus riippuu sekoittimen lavan halkaisijan viidennestä potenssista ja sekoittimen ottojännitteen syöttötaajuuden kolmannesta potenssista. Oikeaa sekoitinta valittaessa olisi siten ensiarvoisen tärkeää selvittää kullekin syötteelle vaadittavat minimi halkaisijat sekoittimien lavoille ja syöttötaajuuksille. On huomattava, että sekoittimen mitattu ottoteho (Kuva 8.3) pätee vain MTT Maaningan biokaasulaitoksella käytetylle syötesuspensiolle (9,7 t/a lietelantaa ja 0,8 t/a kasvibiomassaa). Skenaarioissa 2 ja 3 arvioitiin sekoittimien sähkönkulutuksiksi 246 GJ/vuosi ja 220 GJ/vuosi.

Laitosta ylläpitävien laitteiden kuten syötteen ruuvipuristimen, reaktorin sääsuojan ilmapumpun ja kierto-vesipumppujen sähkönkulutuksiksi skenaariossa 2. arvioitiin 72 GJ/vuosi. Skenaariossa 3. näiden laitteiden sähkönkulutukseksi arvioitiin 37 GJ/vuosi.

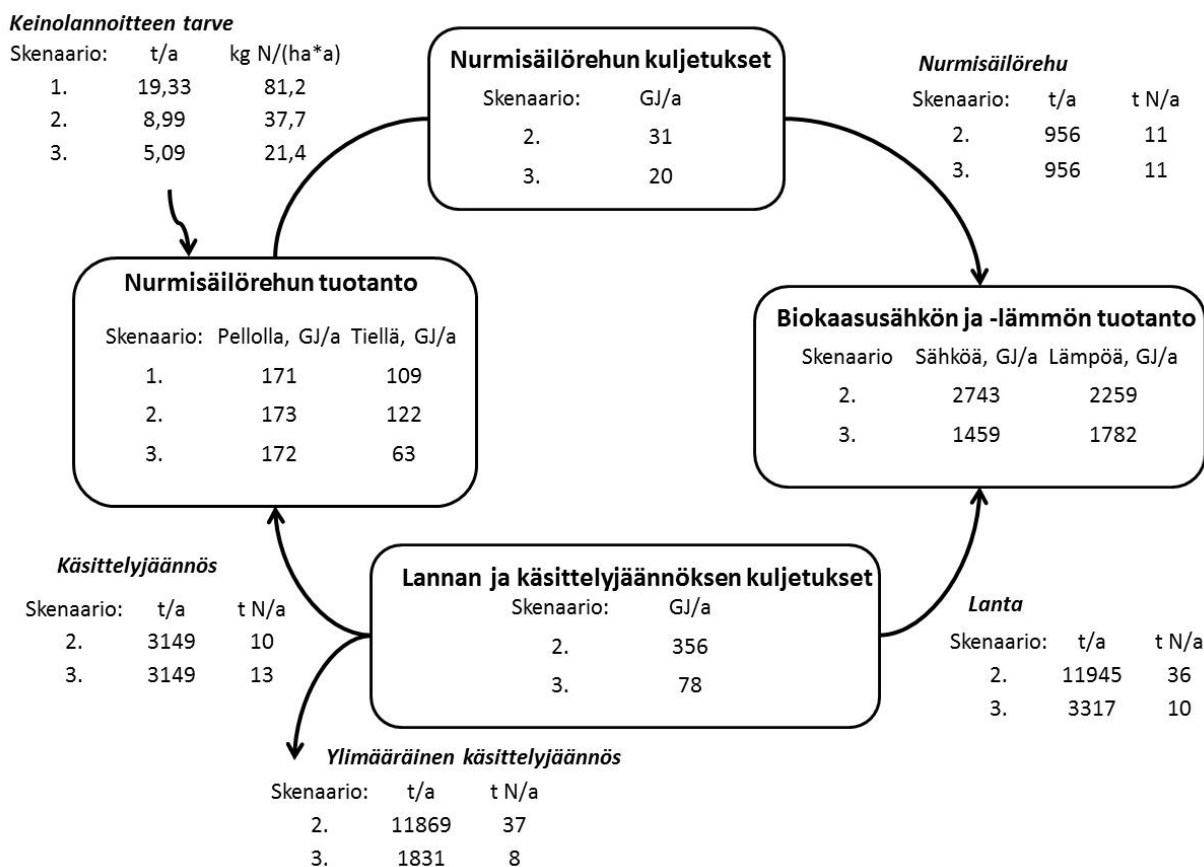


Kuva 8.3. Skenaarioiden sekoittimien sähkönkulutusmallissa käytettiin kolmea erityyppistä sekoitinta.

8.4 Tulokset

Yksi energiayksikkö biokaasusähkön- ja lämmöntuotantoketjuun tuotti skenaarioissa 2 ja 3 sähkönä ja lämpönä 5,0 ja 5,5 yksikköä energiaa. Energiapanokset skenaarioissa koostuivat nurmisäilörehuntuotannon, kuljetusten ja biokaasulaitoksen sähkölaitteiden energiankulutuksista. Tuotetut energiayksiköt käsiteltivät laitoksella tuotetun sähkön, mutta lämmöntuotannosta oli vähennetty laitoksen oma lämmönkulutus, mitkä skenaarioissa 2 ja 3 olivat 1797 GJ/a ja 615 GJ/a. Tällöin laitokselta ulospäin hyödynnettävissä olevaksi lämpöenergiaksi skenaarioissa 2. ja 3. jäi 2259 GJ/a ja 1782 GJ/a (Kuva 8.4).

Nurmisäilörehun tuotannossa käsiteltiin mallin osalta 62 hehtaarin aluetta, mille huomioitiin viljely taanomaisilla viljelymenetelmillä (Huopana 2011). Skenaariossa 1 keinolannoitteita tarvittiin 81,2 kg hehtaarille, kun lietelannoituksen määränä oli 2505 tonnia. Molemmassa skenaarioissa 2 ja 3 sen sijaan käytettiin biokaasulaitoksen käsittelyjäännöstä 3149 tonnia. Tällöin keinolannoitteita skenaarioissa 2 ja 3 tarvittiin 37,7 kg/ha ja 21,4 kg/ha. Biokaasulaitoksen syötteissä skenaariossa 3 nurmisäilörehun osuus lannan määrästä oli 28,8 %, jolloin paljon tyypeä sisältävä nurmi liukoistui reaktorissa enemmän kuin skenaariossa 2, jossa nurmen osuus lannan määrästä oli 8 %. Tilakeskittymän muille pelloille jäi vuosittain skenaarioissa 2 ja 3 käsittelyjäännöstä 11869 tonnia ja 1831 tonnia.



Kuva 8.4. Eri skenaarioista on esitetty tärkeimmät massa- ja energiataseen termit.

Taulukko 8.5. Skenaariossa 1. nurmisäilörehuntuotannon työ tiellä ja pellolla on ilmoitettu yksiköissä GJ vuodessa.

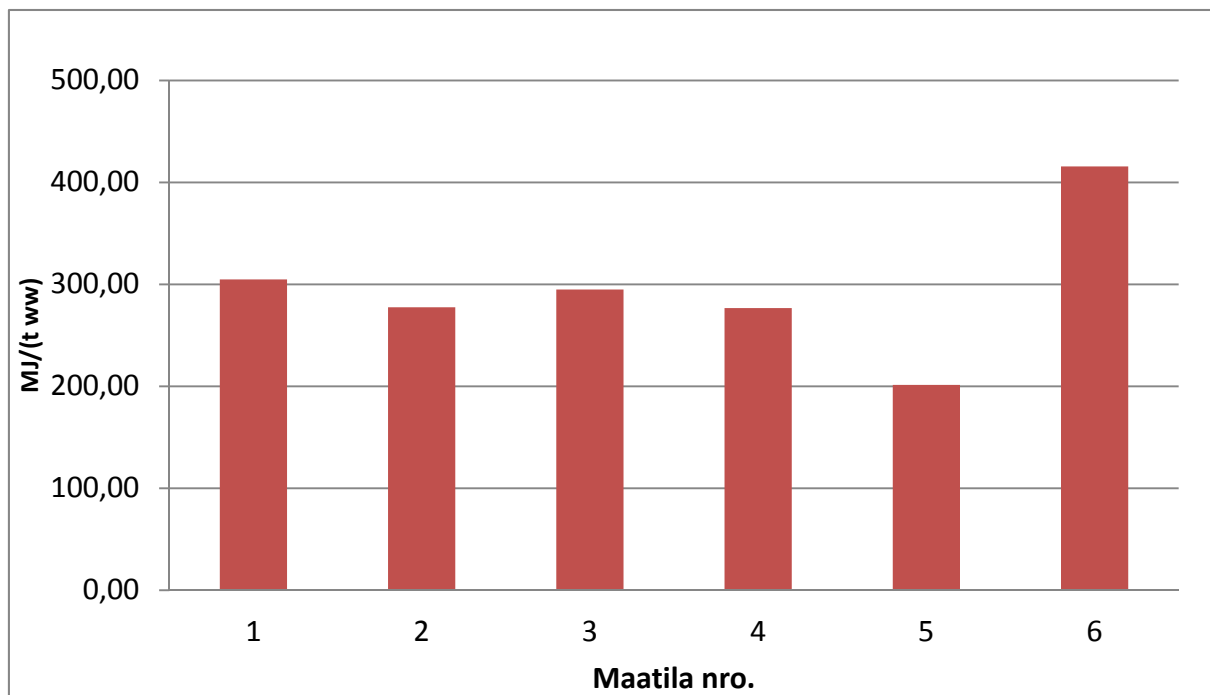
	Pellolla	Tiellä	Yhteensä:
Kasvinsuojelutyö	0,8	0,7	1,5
Kalkin levitykset	2,6	2,7	5,3
Lietelannan levitykset	16,1	63,4	79,5
Sadon uudistamistyö	31,2	3,3	34,5
Keinolannoitteiden levitys	3,7	3,6	7,3
Sadonkorjuu	116,1	35,0	151,1
Yhteensä:	170,5	108,7	279,2

Nurmisäilörehuntuotannossa energiankulutusta tarkasteltiin konetyönä pellolla ja tiekuljetuksissa tilojen ja niiden peltolohkojen välillä vuoden keskimääräisinä arvoina neljän vuoden viljelykierron aikana. Sadonkorjuun energiankulutus 170,5 GJ/a osoittautui suurimmaksi energiankulutuksen tekijäksi skenaariossa 1, jossa nurmisäilörehun tuotantoon kului energiaa 62 hehtaarin pinta-alalle yhteensä 279,2 GJ/a (Kuva 8.4. Eri skenaarioista on esitetty tärkeimmät massa- ja energiataseen termit).

Taulukko 8.5. Hyvin merkittävä osa energiaa kului myös lietalannan tiekuljetuksiin 63,4 GJ, kun pellolla energiaa kului vain 16,1 GJ.

Nurmisäilörehun ja lietteiden kuljetuksissa voitiin pienentää kuljetusten energiankulutusta 35 % (Kuva 8.4). Kun biokaasulaitoksen paikkaa ei optimoitu skenaariossa 2, niin 956 nurmisäilörehutonnin kuljettamiseen kului energiaa 31 GJ/a. Skenaariossa 2 kuljetusetäisyydet vaihtelivat 0,11 ja 6,22 km välillä, kun keskimääräinen kuljetusetäisyys oli 2,63 km. Sen sijaa skenaariossa 3 biokaasulaitos oli sijoitettu kuljetusten energiankulutuksen kannalta minimiin, jolloin samaisen 956 nurmisäilörehutonnin kuljettamiseen

kului energiaa vain 20 GJ/a. Skenaariossa 3 syötteiden kuljetusetäisyydet biokaasulaitoksen ja tilojen välillä vaihtelivat 0,39 ja 4,45 km välillä, kun keskimäärin kuljetusetäisyys oli 1,74 km.



Kuva 8.5. Nurmisäilörehuntuotannon ominaisenergiakulutukset perustuvat skenaarioon 2.

Maatilojen välillä oli merkittäviä eroja nurmisäilörehun tuotannon energiakulutuksissa (Kuva 8.5). Pienimmillään nurmisäilörehuntuotannon energiakulutus tuotettua tuoretonnaa kohden tiloilla 4 ja 5 olivat 278 GJ ja 201 GJ. Erot maatilojen välisistä energiakulutuksista perustuvat mallin antamien tulosten mukaan tilan ja tilojen peltolohkojen välisiin erilaisiin etäisyyksiin. Suurimmillaan etäisyys tilalta peltolohkolle tilalla 6 oli 16,97 km ja pienimmillään etäisyys tilalla 2. oli 0,11 km (Taulukko 8.6).

Taulukko 8.6. Tilojen ja niiden peltolohkojen väliset etäisyydet on ilmoitettu kilometreinä.

Maatila nro:	Etäisyys ka.	Minimi	Maksimi
1	6,03	0,16	11,92
2	4,46	0,11	9,24
3	4,67	0,08	13,10
4	6,88	0,07	10,45
5	0,93	0,30	1,79
6	11,24	0,21	16,97

8.5 Johtopäätökset

Parhaimmillaan koko biokaasusähkön- ja lämmöntuotantoketjusta on mahdollista saada energiaa 5,5 yksikköä yhtä energiapanosyksikköä kohden. On kuitenkin huomattavaa, että energia ja massasetarkastelejen tulokset pätevät vain kyseisissä tutkimuksissa määritetyille rajapinnoille ja malleille, jolloin tutkimustuloksia ei voi suoraan verrata keskenään muiden tutkimusten kanssa. Tärkeimpiä ovat johtopäätökset muutosta kaipaavista yksikköprosesseista (ml. nurmisäilörehun tuotanto, kuljetukset sekä sähkön- ja lämmöntuotanto), joilla voidaan myös parantaa energiategokkuutta myös käytännössä. Kohdealueen tilakeskittymällä merkittävin energia- ja massataseeseen vaikuttavista prosesseista oli biokaasusähkön- ja lämmöntuotanto, toiseksi merkittävin oli nurmisäilörehuntuotanto ja vähäisin merkitys energiataaseeseen oli syötteiden ja käsittelyjäännöksen kuljetuksilla. Keinolannoitteiden tarpeen vähentyminen tilakeskittymällä biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen käyttöönoton jälkeen oli ilmeinen.

Biokaasulaitoksen käsittelyjäännös vähensi keinolannoitteiden tarvetta merkittävästi, vain noin neljäsosaan maatalojen normaalista keinolannoitteiden tarpeesta. On kuitenkin huomattava, että tällöin käsittelyjäännöstä olisi levitettävä pellolle noin 50 tonnia hehtaaria kohden, mikä on jo merkittävä määrä ja edellyttää pelloilta myös hyvää konekaluston kantokestävyyttä. Nurmisäilörehun tuotannossa tilojen tulisi entistään enemmän suosia tilaa lähinnä olevia peltolohkoja kaukaisimpien sijaan, millä tila voi saavuttaa merkittäviä säästöjä konekaluston polttoaineen kulutuksessa.

Syötteiden kuljetusten energiankulutus ei ollut kuuden maatilan tilakeskittymällä merkittävä, vain 3–0,8 % biokaasulaitoksella tuotetusta sähköstä ja lämmöstä. Mikäli syötteitä kuljetetaan suurempia määriä ja pidempiä matkoja kuin tässä tarkastelussa, niin on myös säästöt kuljetuksien energiankulutuksessa syytä ottaa huomioon. Biokaasusähkö- ja lämpölaitoksen paikkaa määritettäessä lämmönkuluttaja on merkittävin laitoksen paikkaan vaikuttavista tekijöistä syötteiden sijaintien ohella.

Tuotettua energiayksikköä kohden on suurilla laitoksilla paras energiantuotannon hyötysuhde, mikä selittyy pääasiassa CHP laitoksen korkeammalla hyötysuhteella ja lämpötalouden kannalta suurella reaktorin tilavuudella. Mallin antamien tulosten valossa toiseksi suurimpia laitoksen energian kuluttajia olivat sekoittimet, joiden valintaan ja mitoittamiseen on syytä panostaa. Kokemukset sekoittimien minimi laipojen halkaisijoista ja syöttötaajuuksista kullekin käytettävälle syötesuspensiolle auttavat vähentämään myös merkittävästi laitoksen sähkönkulutusta.

9 Tärkeimmät tulokset ja suositukset

9.1 Maatilan biokaasulaitoksen hankinta

Maatilojen biokaasulaitoksen hankinta vaatii perehtymistä teknologiaan. Ymmärrys itse prosessista, laistekniikasta, eri materiaalien soveltuvuudesta, laitoksen integroimisesta osaksi tilatoimia, laitoksen talouden rakentumisesta sekä luvituksesta, kilpailutuksesta ja lainsäädännöstä mahdollistaa onnistuneen laitoshankinnan.

Laitosta suunnittelevien tilallisten on suositeltavaa tutustua itse prosessitekniikkaan, lainsäädännön vaikeuksiin että laitoksen hankinnan tehtäviin huolella. Omat tarpeet ja tavoitteet sekä käytettävissä olevat syöttömateriaalit ja käsittelyjäännöksen varastointi ja käyttö on syytä selvittää, jotta laitos lähtökohtaisesti suunnitellaan toimijan tarpeiden mukaan.

Nopeimmin ja luotettavimmin asia etenee yleensä käyttämällä apuna ulkopuolista asiantuntijaa, joka osaa ohjata laitossuunnittelua tilakohtaisesti oikeaan ratkaisuun sekä neuvoo lupa-asioissa.

9.2 Maatilan biokaasulaitoksen tekninen ratkaisu

Maatilojen biokaasulaitokset ovat yleensä lantapohjaisia, ts. kotieläinten lanta on laitoksen perussyöttömateriaalina. Pääasiassa laitoksia on rakennettu lietelantapohjaisille ratkaisuille. Tällöin jatkuvasekoitteen reaktorimalli on luotettava ja tunnettu vaihtoehto.

Pääasiallinen reaktori on hyvin eristetty ja lämmitetty optimaaliseen lämpötilaan, joka voi olla mesofiilinen (37 °C) tai termofiilinen (55 °C). Maaperää voi hyödyntää eristeenä sijoittamalla reaktori pääasiassa maan alle. Reaktorissa hajoaa pääosa syöttömateriaalin orgaanisesta aineesta ja näin ollen myös muodostuu pääosa laitoksen tuottamasta biokaasusta. Prosessiin lisätään syöttömateriaaleja siten, että sen orgaaninen kuormitus ja viipymä ovat hajoamista edistävällä tasolla, ts. mikrobeille on riittävästi, mutta ei liikaa hajotettavaa ja niille annetaan riittävästi aikaa hajottaa helpoiten hajoava orgaaninen aine.

Koska reaktorin käsittelyjäännöksessä on vielä hajoamatonta orgaanista ainetta sekä jonkin verran myös jatkuvan syötön vuoksi varsinkin tuoretta, hajoamatonta syöttömateriaalia, tarvitaan jälkikaasullas. Se voi olla ilman lämmitystä, mutta hyvin eristetty. Muodostuva jälkikaasu kerätään talteen ja hyödynnetään energiantuotannossa. Jälkikaasun osuus koko laitoksen metaanin ja täten energiantuotosta on merkittävä, tässä tutkimuksessa luokkaa 13–20 %.

Biokaasulaitos tulee sitoa olemassa oleviin tilarakenteisiin mahdollisimman hyvin. Lannan keruu eläinsuojasta ja syöttö mahdollisimman tuoreeltaan biokaasulaitokseen on tärkeää. Mahdollisen kasvibiomasen esikäsittelyksi tarvittava silppuaminen voidaan tehdä esimerkiksi olemassa olevalla apevaunulla. Jälkikaasullas voi olla tilan ainoa lantavarasto tai osa varastoja. Mahdollisesti sen voi rakentaa olemassa olevista lantavarastoista kattamalla sen/ne kaasutiiviisti ja keräämällä kaasun talteen.

9.3 Lietelanta biokaasulaitoksen syöttömateriaalina

Lietelanta on hyvä perusmateriaali biokaasulaitokselle. Lypsylehmien lietelanta tuotti tässä tutkimuksessa maatilamittakaavan laitoksessa keskimäärin 12–14 m³ metaania per tuoretonni tai 160–200 m³ per tonni orgaanista ainetta. Lannan laimentumista mm. eläinsuojan pesuvesillä tai jaloittelutarhan vesillä kannattaa välttää, sillä tällöin laitoksen energiantuotto per tilavuuskuutio pienenee.

Biokaasuprosessi nostaa lietelannan arvoa. Sen orgaanisesta tyyppistä osa hajoaa liukoiseen ammoniummuotoon ja on suoraan kasvien käytettävissä. Orgaanisen aineen hajoaminen tekee lannasta homogeenisempää, helpommin levitettävää ja nopeammin maahan imeytyvää. Lannassa olevista tautia aiheuttavista mikrobeista ainakin osa tuhoutuu, samoin käy rikkakasvin siemenille. Lannan tyyppinen haju laimenee merkittävästi.

Esimerkiksi 120 lypsylehmän maatila tuottaa arviolta 3500 m³ lietelantaa vuodessa. Tavoiteltaessa noin 30 vuorokauden viipymää biokaasureaktorissa tämä tarkoittaa noin 300 m³ reaktoritilavuuden tarvetta. Potentiaalinen energiantuotto pelkistä lannasta on vuosittain luokkaa 400 MWh.

9.4 Kasvibiomassan merkitys lantapohjaisessa biokaasulaitoksessa

Lietelantapohjaisen biokaasulaitoksen energiantuottoa on yksinkertaista nostaa lisäämällä reaktoriin jotain tilan omaa tai lähialueella saatavilla olevaa, prosessiin soveltuvaan kasvibiomassaa. Esimerkiksi nurmisäilörehu (87 m³ metaania per tuoretonni; 20–34 MWh/ha) ja tuoreena korjattu ruokohelpi (98–106 m³ metaania per tuoretonni; 12 MWh/ha) lisäävät jo pieninä määrinä laitoksen energiantuottoa merkittävästi. Samalla vapautuu myös enemmän liukoista tyypeä käsitteilyjäännökseen.

Samaisella 120 lypsylehmän tilalla noin 10 % säilörehulisä lantasyöttöön (tuorepainona) nosti energiantuottoa pelkkään lietelantaan verrattuna ainakin 50 %.

Lisämateriaalien käytössä on monia huomioitavia asioita. Tilan omia materiaaleja saa hyödyntää lainsäädännön puolesta varsin vapaasti ja ilman prosessivaatimuksia, kunhan käsitteilyjäännöskin hyödynnetään vain saman tilan pelloilla. Tilojen yhteisillä laitoksilla tilojen omat materiaalit ovat myös käytettävissä melko vapaasti. Sen sijaan tilan / tilojen ulkopuolelta tulevissa syöttömateriaaleissa on huomioitava niiden mahdolliset riskit, kuten hygienia. Kaikkien lisämateriaalien kohdalla kannattaa olla yhteydessä valvovaan viranomaiseen (EVIRA), joka ohjeistaa lisämateriaalien turvalliseen hyödyntämiseen.

Lisämateriaalit tuovat lisäenergian lisäksi mukanaan lisää ravinteita. Tilan kannattaa ne huomioida, jotta levitysalaa käsitteilyjäännökselle riittää varmasti. Lisämateriaaleja voi myös joutua varastoimaan ja/tai esikäsittelemään (esim. silppuamaan), jotta ne saadaan hyödynnettyä tehokkaimmin. Laitoksen syöttölaitteiden ja sekoitustehon täytyy soveltua niille. Esimerkiksi kasvibiomassa on silputtava mahdollisimman tehokkaasti hajoamisen edistämiseksi, sille on oltava oma syöttölaitteensa ja sekoituksen on varmistettava, ettei massa nouse kellumaan reaktorin sisällän pintaan. Lisämateriaaleja on myös syötettävä laitokseen tasaisesti, ei suurina, yksittäisinä erinä, jotta mikrobitoiminta ei häiriinny.

9.5 Lietelannan separointi osana biokaasulaitosta

Biokaasulaitoksessa voidaan käsitellä lietelantaa sellaisenaan, sen separoituina jakeina tai näiden yhdistelminä. Myös biokaasulaitoksen käsitteilyjäännös voidaan separoida ja jakeet hyödyntää tarvittaessa erikseen kasviraavinteina.

Lietelantapohjaiseen biokaasulaitokseen voidaan ottaa lisämateriaalina vastaan pelkkää lietelannasta separoitua kuivajaetta. Se lisää laitoksen biokaasutuottoa ja voi tapauskohtaisesti mahdollistaa tilojen lannan uudelleen hyödyntämisen. Nestejäte jäisi separoivalle tilalle ja osa kuivajakeesta kuljetettaisiin biokaasulaitokseen. Tilojen yhteisissä laitoksissa ratkaisu voisi toimia siten, että kauempanakin sijaitsevat laitokset tai tilat, jotka eivät halua luovuttaa lantaansa lietteenä, pääsevät osakkaiksi.

Separoinnin kiintoaineen ja fosforin erotusteho vaihtelee tekniikasta riippuen. Tässä tutkimuksessa käytettiin ruuvipuristinta, joka erottaa tehokkaasti kiintoaineen (käytetyllä seulakoolalla ja puristusteholla 7,2 % ka lietelannasta 50 % kuivajakeeseen), muttei yhtä tehokkaasti fosforista (30 % kuivajakeeseen).

9.6 Käsitteilyjäännöksen arvo

Reaktorista poistuva käsitteilyjäännös sisältää vielä runsaasti hajoamatonta orgaanista ainetta, joka jatkaa hajoamistaan varastosäiliössä. Mikäli säiliö on kattamaton, jäännöksestä vapautuu merkittävästi metaanipäästöjä, ja metaani on voimakas kasvihuonekaasu. Samalla hukataan metaanin energiasisältö, joka on merkittävä. Jäännös tulisikin ohjata tiiviiseen jälkikaasualtaaseen, jossa muodostuva biokaasu kerätään ja hyödynnetään reaktorissa muodostuneen biokaasun mukana. Tässä tutkimuksessa maatilan biokaasulaitoksen jälkikaasualtaassa muodostui syötöstä riippuen noin 13–20 % koko laitoksen metaanintuotosta, siis myös koko laitoksen energiantuotosta.

Käsitteilyjäännös sisältää enemmän liukoista ammoniumtyyppiä kuin syöttömateriaaleissa alun perin. Se nostaa jäännöksen lannoitearvoa. Tyyppien liukoistuminen riippuu syöttömateriaaleista sekä niiden orgaanisen tyyppien pitoisuudesta ja hajoavuudesta. Tässä tutkimuksessa ammoniumtyyppiä oli käsitteilyjäännökse-

sä pääasiassa 40–65 % enemmän kuin syöttömateriaaleissa. Ammoniumtyypen hyödyntämisen tehostamiseksi varastosäiliöt tulisi kattaa (ammoniakkipäästöjen minimointi) ja jäännös levittää oikeaan aikaan, oikeana määränä ja oikealla tekniikalla. Suositeltavaa on, että jäännös levitetäisiin kasvuvaiheessa ja sijoittamalla / multaamalla.

9.7 Maatilan biokaasulaitoksen energiatase

Maatilan biokaasulaitoksen oma energiankulutus vaihtelee laitoksittain riippuen mm. teknisistä ratkaisuisista, laitoksen rakenteista ja eristyksestä sekä ympäristön olosuhteista. Laitos kuluttaa lämpöä pääasiassa reaktorin lämpötilan ylläpitoon. Lämmitystarvetta voi myös olla teknisessä tilassa. Sähköä laitos kuluttaa pääasiassa syöttö- ja poistolaitteisiin (pumput, kiinteän materiaalin syötöt), sekoitukseen ja teknisen tilan tarpeisiin. Näistä merkittävin sähkönkuluttaja on yleensä sekoitus.

Tässä tutkimuksessa käytetyssä maatilan biokaasulaitoksessa sähkönkulutus oli 11–14 % ja lämmönkulutus 15–26 % tuotetun kaasun energiasisällöstä riippuen syöttömateriaaleista. Sekoituksen optimoinnilla havaittiin merkittävä vaikutus laitoksen energiataseeseen: pienentämällä reaktorin sekoitustehoa saavutettiin n. 30 % säästöt laitoksen sähkönkulutuksessa. Laitoksen operointia kannattaa siis optimoida myös energiankulutuksen kannalta, jotta siitä saadaan paras mahdollinen hyöty irti.

9.8 Maatilakohtainen vai tilojen yhteinen laitos ja laitosten talous

Maatilakohtainen biokaasulaitos on nykyisessä (syksy 2013) tilanteessa varsin korkea investointi, jolle on haastavaa löytää kannattavuutta. Ostoenergian korvaaminen biokaasulla tuottaa tilalliselle voittoa erityisesti sähkön osalta, kun biokaasusähkö korvaa sekä itse sähkön että siirtohinnan. Lämmön tuoma rahallinen etu riippuu korvattavasta lämmöstä. Öljyn käyttöä korvaamalla saadaan suurimmat rahalliset hyödyt. Toisaalta energian voi myös myydä, mikäli erityisesti lämmölle on lähialueella käyttöä. Sähköstä saa paremman edun hyödyntämällä se itse.

Tilojen yhteisessä laitoksessa kannattavuus voi löytyä yhteistyönä, kun investointikustannus jakautuu useamman toimijan kesken. Energia yleensä myydään laitoksen ulkopuolelle. Toisaalta osakkaana voi olla myös energian hyödyntävä toimija, kuten kasvihuone. Osakkaiden erilaisten syöttömateriaalien yhteiskäsittely voi tuottaa tilakohtaista laitosta arvokkaampaa käsittelyjäännöstä, jos esim. jäännöksen fosfori:typpi-suhde saadaan syöttöseoksen avulla kasveille käyttökelpoisemmaksi, ts. typpipitoisuutta nostettua. Tilojen yhteinen laitoksen talouteen vaikuttaa myös kuljetustarve sekä lannan kuljettamiseksi laitokseen että jäännöksen palauttamiseksi osakastiloille.

Kannattavuudesta osa voi tulla myös väkilannoitteiden ostotarpeen vähenemisestä tai tilan ulkopuolelta vastaanotettavien syöttömateriaalien porttimaksuista. Tässä laitosratkaisut ovat tavallaan samalla viivalla. Samat lopputulemat voidaan saavuttaa molemmilla. Toisaalta tilojen yhteisessä laitoksessa voi olla kannattavampaa investoida esimerkiksi hygienisointiyksikköön, joka laajentaa hyväksyttävien lisämateriaalien kirjoa merkittävästi ja voi tätä kautta tuottaa laitokselle enemmän tuloja porttimaksuina. Lainsäädännöllisesti tilakohtainen laitos on yksinkertaisin, mikä voi kuitenkin tehdä siitä houkuttelevan vaihtoehdon.

Sekä maatilakohtaisessa että tilojen yhteisessä laitoksessa on omat hyvät puolensa. Kumpaakaan ei voi suositella yli toisensa, vaan ratkaisut on tehtävä tapauskohtaisesti.

10 Kirjallisuus

- Akbulut, A. 2012. Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Cicekdagi case study. *Energy* 44, 381–390.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T. & Zechmeister-Boltenstern, S. 2006a. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112, 153–162.
- Amon, B., Kryvoruchko, V. & Amon, T. 2006b. Influence of different methods of covering slurry stores on greenhouse gas and ammonia emissions. *International Congress Series* 1293, 315–318.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K. & Gruber, L. 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 173–182.
- Angelidaki, I. & Ahring B.K. 1993. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: effect of ammonia. *Applied Microbiology and Biotechnology* 38, 560–564.
- Arola, J. 2012. Keskitetyn biokaasulaitoksen energiatase. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu.
- de Bok, F.A.M., Plugge, C.M. & Stams, A.J.M., 2004. Interspecies electron transfer in methanogenic propionate degrading consortia. *Water Research* 38, 1368–1375.
- Chang, A.C. & Rible, J.M. 1975. Particle size distribution of livestock wastes. In proceedings of the third inter symposium on livestock wastes. ASAE; 1975.
- Chen, Y.R. 1983. Thermal properties of beef cattle manure. *Agricultural Wastes* 6, 13–29.
- Davidsson, Å., Lövestedt, C., la Cour Jansen, J., Gruvberger, C. & Aspegren, H. 2007. Co-digestion of grease trap sludge and sewage sludge. *Waste Management* 28, 986–992.
- Edström, M., Nordberg, Å & Ringmar, A. 2005. Utvärdering av gårdsbaserad biogasanläggning på Hagavik. JTI-rapport Kretslopp & Avfall 31.
- Edström, M. 2011. Personal communication. JTI, Sweden.
- Einola, J.–K., Luostarinen, S., Salminen, E. & Rintala, J. 2001. Screening for an optimal combination of municipal and industrial wastes and sludges for anaerobic co-digestion. Proceedings of 9th World Congress on Anaerobic Digestion, Part 1. ss. 357–362.
- Frost, P. & Gilkinson, S. 2011. 27 months performance summary for anaerobic digestion of dairy cow slurry at AFBI Hillsborough. Interim technical report.
- Gerardi, M.H. (ed.) 2003. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Wiley Publishers. 192 p.
- Grönroos, J., Rankinen, K., Kuisma, M., Palva, R., Alasuutari, S., Myllymaa, T., Leppälä, J., Alakukku, L., Huttunen, H., Mikkola, H., Leskinen, P., Kahiluoto, H. & Katajajuuri, J.–M. 2011. Lannankäsittelyn elinkaariset ympäristövaikutukset ja käsittely vaihtoehtojen kokonaiskestävyyden arviointi. Osa 1: Elinkaariset ympäristövaikutukset. Teoksessa: Luostarinen, S., Logrén, J., Grönroos, J., Lehtonen, H., Paavola, T., Rankinen, K., Rintala, J., Salo, T., Ylivainio, K. & Järvenpää, M. (toim.). *Lannan kestävä hyödyntäminen*. MTT Raportti 21, 88–117. www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti21.pdf

- Gujer, W. & Zehnder, A.J.B. 1983. Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 15(8–9), 127–167.
- Hill, D.T. 1982. A comprehensive dynamic model for animal waste methanogenesis. *Transactions of the ASAE*, 1982, 25(5), 1374.
- Hansen, K.H., Angelidaki, I. & Ahring, B.K. 1998. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. *Water Research* 32, 5–12.
- Hjorth, M. 2009. Flocculation and solid-liquid separation of animal slurry; fundamentals, control and application. PhD thesis. Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University / Institute of Chemical Engineering, Biotechnology and Environmental Technology, University of Southern Denmark.
- Huopana, T. 2011. Energy efficient model for biogas production in farm scale. University of Jyväskylä, 2011. [Cited: April 25, 2012.] <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-201103211905>.
- Husain, A. 1998. Mathematical models of the kinetics of anaerobic digestion—A selected review. *Biomass and Bioenergy* 14, 561–571.
- Institut für Energetik und Umwelt gMmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft & Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. 2006. Handreichung - Biogasgewinnung und -nutzung. 3., überarbeitete Auflage. Gülzow, Germany.
- Järvinen, K. & Rintala, J. 1996. Full-scale mesophilic anaerobic co-digestion of municipal solid waste and sewage sludge: methane production characteristics. *Waste Management & Research* 14, 163–170.
- Kaparaju, P.L.-N., Buendia, I.M., Ellegaard, L. & Angelidaki, I. 2008 Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology* 99, 4919–4928.
- Karim, K., Klasson, K.T., Hoffman, R., Drescher, S.R., DePaoli, D.W. & Al-Dahhan, M.H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing. *Bioresource Technology* 96, 1771–1781.
- Kowalczyk, A., Harnisch, E., Schwede, S., Gerber, M. & Span, R. 2013. Different mixing modes for biogas plants using energy crops. *Applied Energy* ARTICLE IN PRESS.
- Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Bodiroza, V., Amon, B. & Amon, T. 2009. Anaerobic digestion of by-products of sugar beet and starch potato processing. *Biomass and Bioenergy* 33, 620–627.
- KTBL, 2010. Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Report. 2. überarbeitete Auflage.
- Kuligowski, K. & Luostarinen, S. 2011. Thermal gasification of manure. Report. Knowledge Forum. www.balticmanure.eu
- Latvala, M. 2009. Biokaasutuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. *Suomen ympäristö* 24. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=106756&lan=FI>
- Lehtomäki, A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. PhD thesis. *Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science* 163. University of Jyväskylä, Finland.
- 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.
- Lehtomäki, A., Huttunen, S. & Rintala, J.A. 2007. Laboratory investigations on co-digestion of energy

- crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. *Resources, Conservation and Recycling* 51, 591–609.
- Lehtomäki, A., Huttunen, S., Lehtinen, T.M. & Rintala, J.A. 2008. Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production. *Bioresource Technology* 99, 3267–3278.
- Luostarinen, S., Luste, S. & Sillanpää, M. 2008. Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat-processing plant. *Bioresource Technology* 100, 79–85.
- Luostarinen, S., Paavola, T., Sipilä, I. & Rintala, J. 2011a. Lannan ja muun eloperäisen materiaalien käsittelyteknologiat. MTT Raportti 27. www.mtt.fi/mtrraportti/pdf/mtrraportti27.pdf
- Luostarinen S., Normak A. & Edström M. 2011b. Overview of biogas technology. Report. Knowledge Forum. www.balticmanure.eu
- Maaseutuvirasto. 2009. Opas ympäristötuen ehtojen mukaiseen lannoitukseen 2007–2013. Maaseutuviraston julkaisusarja: Hakuoppaita ja ohjeita. ISBN 978–952–453–473–1
- Mata–Alvarez, Mace, S. & Llabrés, P. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes - an overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 74, 3–16.
- Mata–Alvarez, J. 2003. Fundamentals of the anaerobic digestion process. In: Mata–Alvarez, J. (ed.), *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste*. IWA Publishing, UK. p. 1–19.
- Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg–Vorpommern. 2004. Düngung - Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung. http://www.lms-lufa.de/upload/39/1254233880_20539_15327.pdf (13.5.2011)
- Møller, H.B., Sommer, S.G. & Ahring, B.K. 2002. Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions. *Bioresource Technology* 85, 189–196.
- MTT. 2006. Rehutaulukot ja ruokintasuositukset 2006. [Online] 2006. [Cited: Maaliskuu 1, 2010.] <http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts106.pdf>.
- Mähnert, P. & Linke, B. 2009. Kinetic study of biogas production from energy crops and animal waste slurry: effect of loading rate and reactor size. *Environmental Technology* 30, 93–99.
- Naegele ym. 2012. Electric energy consumption of the full scale research biogas plant “Unterer Lindenhof”: results of longterm and full detail measurements. *Energies* 5, 5198–4214.
- Pavlostathis, S.G. & Giraldo-Gomez, E. 1991. Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Control* 21(5,6), 411–490.
- Posio, M. 2009. Kotielöntilojen energiankulutus. Pro gradu tutkielma. Helsingin yliopisto.
- Rantakoski & Säkkinen 2000. Säästösten soveltaminen biokaasuun. Turvatekniikan keskus TUKES. http://www.tukes.fi/tiedostot/vaaralliset_aineet/ohjeet/biokaasusaadokset.pdf
- Rico, C., Rico, J.L., Hipolito, G. & Garcia, P.A. 2012. Solid - liquid separation of dairy manure: distribution of components and methane production. *Biomass and Bioenergy* 39, 370–377.
- Salminen, E. & Rintala, J. 2002. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste - a review. *Bioresource Technology* 83, 13–26.

- Schievano, A., D'Imporzano, G., Salati, S. & Adani, F. 2011. On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): An on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance. *Bioresource Technology* 102, 7737–7744.
- Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. & Rintala, J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses - specific methane yield and methane yield per hectare. *Bioresource Technology* 100, 2952–2958.
- Seppälä, A. ym. 2013. Biochemical methane potential of timothy, tall fescue and red clover silages harvested at different stages of maturity. Proceedings of the 17th symposium of the European Grassland Federation. Akureyri, Iceland.
- Steineck, S., Gustafson, G., Andersson, A., Tersmeden, M. & Bergström J. 1999. Plant nutrients and trace elements in livestock wastes in Sweden. Naturvårdsverket, Rapport 5111, Sweden.
- Stroot, P. G., McMahon, K. D., Mackie, R. I. & Raskin, L. 2001. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions - I. digester performance. *Water Research*, 35, 1804–1816.
- Taavitsainen, T. 2011. Biokaasuteknologian edistäminen Pohjois-Savossa- Kestävä uusiutuvan energian tuotanto ja ravinteiden kierrätys (BIOTILA -hanke).
<http://www.envitecpolis.fi/?download=Biokaasulaitoksen%20kannattavuustarkastelut%2003102011.pdf>.
- Vavilin, V. & Angelidaki, I. 2005. Anaerobic degradation of solid material: Importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model. *Biotechnology and Bioengineering*, 89, 113–122.
- Viljavuuspalvelu. 2011. Finnish manure statistics 2000–2004.
http://www.viljavuuspalvelu.fi/user_files/files/kotielain/lanta_tilastot.pdf (Accessed 15.2.2011)
- Viljavuuspalvelu, 2012. Happamuus ja ravinteisuus viljavuusluokittain maaseutukeskuksen ProAgria Pohjois-Savo alueella. www.tuloslaari.fi (8.8.2013)
- Walla, C & Schneeberger, W. 2008. The optimal size for biogas plants. *Biomass and Bioenergy* 32, 551–557.
- Weiland, P. 2003. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109, 263–274.
- Ympäristöministeriö. 2008. Pientalon D5/2007energiälaskentaopas - rakennuksen energiankulutus ja ostoenergiankulutus sekä ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho, rakennuksen lämmitysteho ja arvio kesäaikaisesta huonelämpötilasta energiaselvitystä varten.
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=84298&lan=Fi%E2%80%8E> (8.8.2013)

MTT TEKEE TIETEESTÄ ELINVOIMAA

MTT RAPORTTI₁₁₃

www.mtt.fi/julkaisut

MTT Raportti -verkkojulkaisusarjassa julkaistaan maatalous- ja elintarviketutkimusta sekä maatalouden ympäristötutkimusta käsitteleviä tutkimusraportteja. Lukijoille tarjotaan tietoa MTT:n kaikilta tutkimusaloilta eli biologiasta, teknologiasta ja taloudesta.

MTT, 31600 Jokioinen.

