

Pro gradu –tutkielma

**Biokaasun tuottaminen säilörehusta lehmänlantaa
käsittelevällä biokaasulaitoksella**

Eeli Mykkänen



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede

Uusiutuvan energian maisteriohjelma

25.6.2008

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede, Uusiutuvan energian maisteriohjelma

MYKKÄNEN, EELI: Biokaasun tuottaminen säilörehusta lehmänlantaa käsittelevällä biokaasulaitoksella

Pro Gradu –tutkielma: 52 s.

Työn ohjaaja: Prof. Jukka Rintala

Tarkastajat: Prof. Jukka Rintala, FT Sari Luostarinen

Kesäkuu 2008

Hakusanat: anaerobinen käsittely, biokaasu, energiakasvit, lehmänlanta, metaani, säilörehu

TIIVISTELMÄ

Biokaasua tuottamalla ja hyödyntämällä voidaan vähentää energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä, edesauttaa suljettua ravinteiden kiertoa sekä käsitellä orgaanisia jätteitä. Anaerobisessa prosessissa syntyvää biometaania voidaan hyödyntää sähköinä, lämpönä ja liikennepolttoaineena. Pelloilla viljeltävät energiakasvit tarjoavat merkittävän potentiaalín biokaasun tuotantoon. Satoiset nurmiheinäkasvit soveltuvat biokaasun tuotantoon, ja kasvimassan varastointi säilörehuna mahdollistaa energiantuoton ympäri vuoden. Tässä työssä tutkittiin säilörehun esikäsittelyä sekä soveltuvuutta käsiteltäväksi lehmänlannan kanssa maatilakohtaisessa biokaasuprosessissa. Täydenmittakaavan mesofiilisessa täyssekoitteisessa reaktorissa suoritettiin koeajoja ja lisäksi tehtiin laboratoriokokeita. Seosrehuvaunuilla silputun säilörehun partikkelikoko oli pääosin 0-50 mm, mikä oli riittävä biokaasuprosessin toiminnalle. Kasvimassan sekoittaminen lannan kanssa nosti seoksen viskositeettia, mikä aiheutti teknisiä ongelmia sekoitussäiliön sekoituksessa, reaktorin syöttöpumpussa ja syöttölinjassa. Syöte-seoksen hydrolysoituminen alkoi sekoitussäiliössä alhaisista lämpötiloista (10,7-17,5 °C) huolimatta, mikä näkyi pH:n laskuna, VFA-pitoisuuden nousuna ja kaasukuplien muodostumisena sekoitussäiliössä. Biokaasureaktorin toiminta oli vakaa koko kasvinkäsittelyjakson ajan. Energiakasveihin perustuvan tuotantoketjun optimoinnilla ja biokaasuprosessin teknisellä suunnittelulla voidaan parantaa kasveja käsittelevän biokaasulaitoksen toimivuutta ja lisätä käsiteltävän kasvimassan osuutta syötteessä.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science

Department of Ecological and Environmental Science

MYKKÄNEN, EELI: Biogas production from silage in a biogas plant treating cow manure

Master of Science Thesis: 52 s.

Supervisor: Prof. Jukka Rintala

Inspectors: Prof. Jukka Rintala, FT Sari Luostarinen

June 2008

Key Words: anaerobic digestion, biogas, cow manure, energy crops, methane, silage

ABSTRACT

Production and utilisation of biogas is advantageous to reduce greenhouse gas emissions of energy sector, to promote nutrient recycling and to treat organic wastes. Biomethane produced in an anaerobic degradation process can be used in heat, power and vehicle fuel production. Energy crops cultivated in the field provide additional biogas production potential. Herbaceous grasses are suitable for biogas production, and when cultivated and stored as silage biogas energy can be produced throughout the year. In this thesis pre-treatment of silage and co-digestion of silage with cow manure in a farm scale biogas process were studied. The full scale mesophilic continuously stirred tank reactor trial and laboratory experiments were carried out. Chopping of silage with a diet feeder gave the end product particle size of 0-50 mm, which was sufficient for biogas process. Mixing of crops with manure increased the viscosity of the feed, which caused technical problems in pre-treatment tank mixing and reactor feeding pump and feeding line. Hydrolysis of the feed mixture started in the mixer tank despite low temperature (10,7-17,5 °C) which caused reduction in pH, increase in VFA-content and also gas production in the mixer tank. The function of the biogas reactor was stable throughout the trial period. The proportion of crop in the feeding mixture can be affected by technical design of the biogas plant and by optimisation of the production chain based on energy crops.

Lyhenteet ja yksiköt

ppm	parts per million, miljoonasosa
k	kilo, 10^3
M	mega, 10^6
T	tera, 10^{12}
W	watti
W_e	watti, sähköteho
W_t	watti, lämpöteho
Wh	wattitunti
CHP	combined heat and power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto
GC	gas chromatograph, kaasukromatografi
CSTR	continuously stirred tank reactor, jatkuvatoiminen täyssekoitteinen reaktori
UASB	upflow anaerobic sludge blanket, lietepatjareaktori
HRT	hydraulic retention time, hydraulinen viipymä
OLR	organic loading rate, orgaanisen aineen kuormitus
SCOD	liukoinen kemiallinen hapen kulutus
VFA	volatile fatty acids, haihtuvat rasvahapot
LCFA	long chain fatty acids, pitkäketjuiset rasvahapot
TS	total solids, kuiva-aine
VS	volatile solids, hehkutushäviö, orgaaninen kuiva-aine
PA	partial alkalinity, osittainen alkaliteetti
TA	total alkalinity, kokonaisalkaliteetti
CH₄	metaani
CO₂	hiilidioksidi
H₂S	rikkivety, vetysulfidi
N-tot	kokonaistyyppi
NH₄-N	ammoniumtyppi

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO	7
2. TUTKIMUKSEN TAUSTA	8
2.1 Säilörehun tuotanto ja merkitys energiakasvina.....	8
2.2 Anaerobinen hajoaminen ja olosuhteet	10
2.2.1 Hajoamisen vaiheet.....	10
2.2.2 Olosuhdetekijät.....	12
2.2.3 Biokaasuprosessin operointi	13
2.3 Kasvia ja lantaa käsittelevä biokaasulaitos	14
2.3.1 Tuotantoketju.....	14
2.3.2 Säilörehu-lanta -syötteen ominaisuudet.....	14
2.3.3 Kasvin esikäsittely	16
2.3.4 Kasvimassan sekoitus lannan kanssa.....	17
2.3.5 Biokaasureaktori.....	17
2.3.6 Jälkikaasutus ja lopputuotteiden käyttö	19
3. MATERIAALIT JA MENETELMÄT	20
3.1. Koejakso biokaasulaitoksessa	20
3.1.1. Biokaasulaitoksen prosessikuvaus.....	20
3.1.2. Kokeessa käytetty säilörehu	22
3.1.3. Kasvimassan esikäsittely	24
3.1.4. Biokaasulaitoksen operointi koejakson aikana.....	24
3.2. Laboratoriokokeet	25
3.2.1. Sekoitussäiliön olosuhteiden simulointi	25
3.2.2. Metaanintuotto- ja jälkikaasutuskokeet	26
3.3. Analyysimenetelmät.....	26
4. TULOKSET	27
4.1. Säilörehun esikäsittely.....	27
4.2. Sekoitussäiliön toiminta	28
4.2.1. Kasvin ja lannan sekoittaminen ja kasvin käyttäytyminen sekoitussäiliössä ...	28
4.2.2. Sekoitussäiliön olosuhteet	29

4.2.3. Sekoitussäiliön olosuhteiden simulointi laboratoriossa.....	31
4.3. Reaktorin toiminta.....	34
4.3.1 Sekoitus ja olosuhteet.....	34
4.3.2 Reaktorin kaasuntuotto ja orgaanisen aineen vähenemä.....	35
4.4. Metaanintuotto- ja jälkikaasutuskokeet.....	38
5. TULOSTEN TARKASTELU	39
5.1. Biokaasulaitoksen tekniset edellytykset säilörehun ja lannan käsittelyssä	39
5.1.1 Kasvimassan silppuaminen.....	39
5.1.2 Kasvin ja lannan sekoitus ja syöttö reaktoriin	40
5.2 Olosuhdetekijät säilörehun ja lannan käsittelyssä	41
5.2.1 Sekoitussäiliö.....	41
5.2.2 Reaktori	42
5.3. Kaasuntuotto ja kaasun laatu.....	44
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	46
KIITOKSET.....	48
KIRJALLISUUS.....	49

1. JOHDANTO

Biokaasu on pääosin metaanista (CH₄) ja hiilidioksidista (CO₂) koostuvaa kaasua, jota syntyy anaerobisissa eli hapettomissa oloissa mikrobin hajottaessa orgaanista ainetta. Sitä muodostuu luonnostaan muun muassa soilla ja vesistöjen hapettomissa pohjasedimenteissä sekä ihmistoiminnan seurauksena kaatopaikoilla ja biokaasureaktoreissa (Hobson & Wheatley 1993). Biokaasusta on moninaisten etujensa myötä tullut parin vuosikymmenen aikana tärkeä uusiutuvan energian tuotantomuoto, jonka potentiaalista vasta pieni osa on hyödynnetty. Korvattaessa fossiilisia polttoaineita lyhyeen hiilen kiertoon perustuvalla biokaasuenergialla voidaan vähentää ilmastonmuutosta kiihdyttäviä hiilidioksidipäästöjä (FAL 2005). Biokaasun tuotannon lisäämisellä voidaan osaltaan täyttää Euroopan komission asettama maakohtainen velvoite, jossa Suomen sitovana tavoitteena on uusiutuvan energian osuuden kasvattaminen 38 %:iin kaikesta käytetystä energiasta vuoteen 2020 mennessä (Euroopan komissio 2008).

Biokaasureaktorit ovat yleensä eläinten lantaa ja jätevedenpuhdistamoiden lietteitä käsitteleviä yksiköitä. Pelloilla viljeltävien energiakasvien ja kasvijätteiden energiapotentiaali hyödyntämällä saadaan kasvatettua biokaasun tuotantomääriä ja parannettua biokaasulaitoksissa käsiteltävien materiaalien saatavuutta. Energiakasveja ja erilaisia jättemateriaaleja voidaan käsitellä muiden reaktoriin syötettävien substraattien kanssa, esimerkiksi yhteiskäsittelynä lannan kanssa, tai reaktori voidaan suunnitella käsittelemään pelkkää kasvimassaa. Saksa on edelläkävijämaa biokaasuteknologian hyödyntämisessä, ja vuonna 2006 siellä oli käytössä 3600 biokaasulaitosta, joiden yhteenlaskettu sähköntuotantoteho oli noin 1100 MW. Suurimmassa osassa laitoksia käytetään lannan lisäksi kasvibiomassaa, ja vuonna 2006 biokaasun tuotantoon viljeltävien energiakasvien viljelyala oli 190 000 ha. Biokaasulla tuotetulle sähkölle on Saksassa ollut käytössä tariffijärjestelmä vuodesta 1990 alkaen, mikä selittää alan voimakasta kasvua (Kauppa- ja teollisuusministeriö 2007; FvB 2008).

Energiakasvien käyttö biokaasun tuotantoon on Suomessa toistaiseksi vielä vähäistä, joskin kiinnostus biokaasualan ja peltoenergian hyödyntämiseen on suurta. Maatilakohtaisia eläinten lantaa ja erilaisia orgaanisia jätteitä käsitteleviä biokaasulaitoksia oli vuonna 2006 toiminnassa kahdeksalla tilalla, joilla tuotettiin yhteensä 254 000 m³ biokaasua, josta tuotettiin edelleen 156 MWh sähköä, 1176 MWh lämpöä ja 28 MWh liikennepolttoainetta. Lisäksi

ainakin 6 laitosta oli rakenteilla (Kuittinen ym. 2007). Biokaasulla tuotetulle sähkölle on pääministeri Matti Vanhasen II hallituksen ohjelmaan kirjattu toteutettavaksi syöttötariffijärjestelmä alle 20 MW:n laitoksille, mikä oletettavasti kasvattaa biokaasumarkkinoita Suomessa (Hallitusohjelma 2007).

Energiakasvien hyödyntäminen maatalan biokaasuprosessissa vaatii suunnittelua ja asiantuntemusta tuotantoketjun eri vaiheissa niin kasvin viljelyn, varastoinnin, esikäsittelyn, biokaasureaktori-käsittelyn kuin myös lopputuotteiden hyödyntämisen osalta, jotta tuotantoketju toimisi mahdollisimman tehokkaasti ja kasvimassan vaatimukset laitoksen tekniikan ja biokaasuprosessin tasapainoisen toiminnan kannalta olisi huomioitu. Tämän tutkimuksen tavoite oli selvittää säilörehun soveltuvuutta, käyttäytymistä ja teknisiä haasteita biokaasulaitoksen substraattina. Energiakasvien käsittelyä tutkittiin suorittamalla koeajoja Kalmarin maatalan lantaa käsittelevällä biokaasulaitoksella ja tekemällä niihin liittyviä kokeita laboratoriossa. Tulosten pohjalta tavoitteena oli kehitellä tuotantoketjua ja toimivia teknisiä ratkaisuja energiakasveja käyttävälle biokaasulaitokselle.

2. TUTKIMUKSEN TAUSTA

2.1 Säilörehun tuotanto ja merkitys energiakasvina

Suomessa on arvioitu olevan 220 000 ha kesantopeltoa, joka olisi mahdollista ottaa käyttöön energiakasvien viljelyyn. Arvion mukaan peltoalalla voitaisiin viljellä nurmiheinää 1,9 miljoonaa tonnia, kun saatava nurmisato on 8 t_{ka}/ha . Kesantopelloilta saatavan biokaasuenergian teoreettinen maksimituotantopotentiaali olisi siten 6,8 TWh vuodessa (Asplund ym. 2005). Toisaalta Maa- ja metsätalousministeriön mukaan peltobioenergian tuotantoon olisi käytettävissä tarvittaessa 500 000 ha peltoa. (Vainio-Mattila ym. 2005). Energiakasvien lisäksi huomattava biokaasun tuotantopotentiaali on jäteperäisissä materiaaleissa, kuten eläinten lannassa ja maatilojen ja teollisuuden orgaanisissa jätteissä, joiden energiapotentiaaliksi on arvioitu kaatopaikkojen potentiaali mukaan lukien 14 TWh vuodessa (Lampinen 2003).

Säilörehu on monilta ominaisuuksiltaan soveltuva käytettäväksi biokaasun tuotannossa. Rehukasvien viljelyllä ja säilönnällä on Suomessa pitkät perinteet, ja sen myötä vankka

tietotaito ja vaadittava laitteisto on jo maaseuduilla olemassa. Lisäksi rehukasvien, kuten nurmen viljelyyn käytettävät pellot kuuluvat suomalaiseen perinnemaisemaan. Mahdollisuus säilöä kasvibiomassaa on huomattava etu, sillä näin saadaan kesällä ja syksyllä korjatusta vihermassasta tuotettua energiaa ympäri vuoden, ja tuotantoa voidaan myös painottaa energiaintensiivisiin talvikuukausiin. Energiakasveiksi valittavien kasvilajien ja lajikkeiden tulee olla Suomen ilmastoon sopeutuvia ja kasvituholaisia hyvin sietäviä. Kasvien tuotannon pitää vaatia mahdollisimman vähäistä työpanosta viljelyn ja korjuun osalta sekä mahdollisimman pientä energiapanostusta ja lannoitustarvetta. Oleellista on kasvin kyky tuottaa paljon biomassaa peltopinta-alaa kohti (Lehtomäki 2006). Lisäksi metaanintuottoon käytettävällä energiakasvilla on oltava hyvä metaanintuottopotentiaali, ja sato on kyettävä korjaamaan nuorena kasvustona ennen kasvin korsiintumista, sillä vanhan kasvin ligniinipitoisuus huonontaa anaerobista hajoavuutta. Esimerkiksi kasvuvaiheessa korjatun nuoren apilan metaanisaanto on 33 % suurempi kuin kukintavaiheessa korjatun (Sharma ym. 1988; Kaparaju 2003).

Biokaasun tuotantoon voidaan viljellä muun muassa monivuotisia nurmirehukasveja, kuten timoteitä, nurminataa ja apilaa. Nurmen perustamiseen käytetään usein 2-3 kasvilajin siemenseoksia, jolloin saadaan hyödynnettyä seosnurmen kaikkien kasvilajien hyvät ominaisuudet esimerkiksi kasvun ajoituksen, talvehtimiskyvyn ja satoisuuden suhteen. Säilörehun tekoon sopivat myös monet yksivuotiset rehukasvit, kuten raiheinä, rehuherne ja rehuvirna. Nurmi on mahdollista perustaa ilman suojakasvia tai suojakasvin kanssa, jolloin suojakasvilla ehkäistään rikkakasvien kasvua ja maan kuorettumista. Suojakasvina voidaan käyttää esimerkiksi vihantaviljana korjattavaa kauraa, jolloin ennen varsinaista nurmisatoa saadaan lähinnä kauraa sisältävä sato, joka myös voidaan hyödyntää biokaasun tuotannossa. Muita biokaasun tuottoon soveltuvia energiakasveja ovat mm. rehukaali, sokerijuurikas, erilaiset kasvijätteet kuten oljet sekä nykyään kasvukauden pidentymisen myötä Suomessakin menestyvät maissin rehulajikkeet, joita on koeluntoisesti viljelty ainakin MTT:n toimesta Piikkiössä sekä Kalmarin tilalla Keski-Suomessa (Hyytiäinen ym. 1995; Laine & Tahvonon 2007).

Jotta rehu olisi biokaasuprosessissa hyvin sulavaa, tulee rehun korjuu aloittaa viidenneksen kasvustosta ollessa tähkällä tai röyhyllä, ja apilavaltaisen nurmen kohdalla ennen kukintaa

apilan ollessa vielä nupulla. Rehu voidaan korjata esikuivattuna 6-24 tunnin pellolla kuivauksen jälkeen, jolloin rehun tilantarve vähenee, mutta toisaalta säätekijät ja rehun lämpeneminen syksyllä voivat tuottaa ongelmia. Tuoreena korjatessa säilörehusta muodostuu puristenestettä 15 % sadon määrästä, jolloin rehu voi jäätyä talvella. Jotta puristenestettä ei muodostuisi, on rehun kuiva-ainepitoisuuden oltava yli 27-30 %. Rehun silppuamiseen voidaan käyttää vaihtelevan pituista silppua tekevää halpaa ja yksinkertaista kelasilppuria, keskimittaista silppua tekevää lieriöniittosilppuria tai kaksoissilppuria, tai 3-4 cm:n pituista silppua tekevää tarkkuussilppuria. Tarkkuussilppurin etuna on hyvin tiivistyvä ja pieneen tilaan menevä säilörehu sekä kasvimassan silppuuntuminen jo korjuuvaiheessa biokaasuprosessin vaatimaan partikkelikokoon (Hyytiäinen ym. 1995).

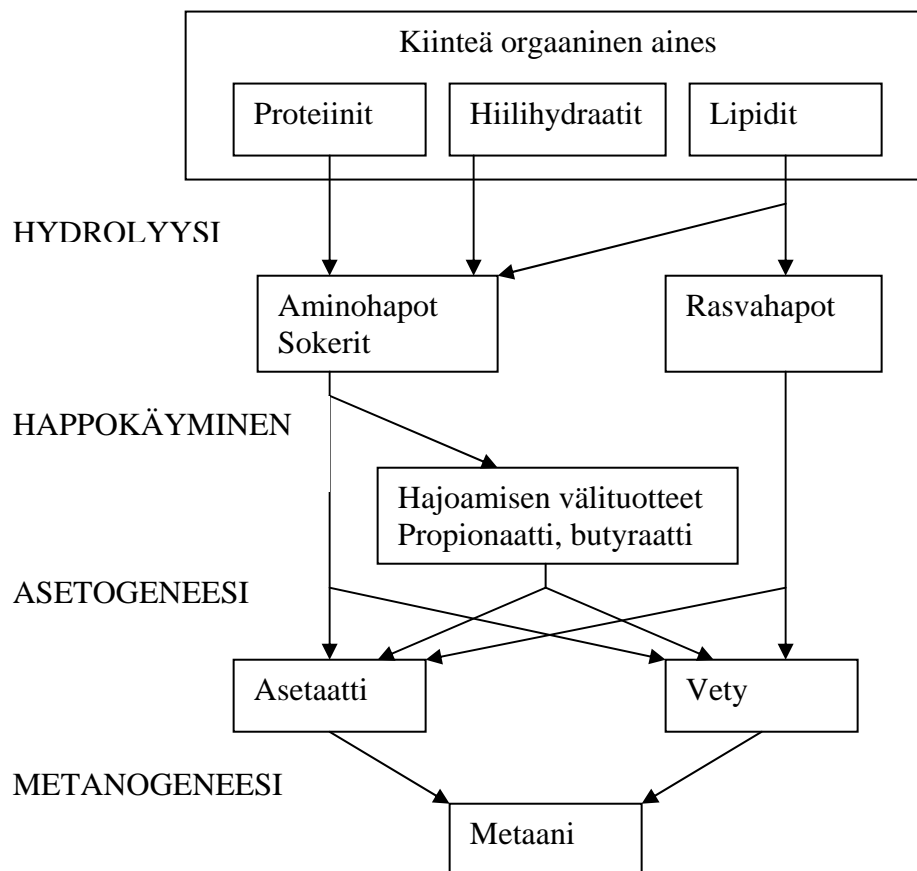
Rehun säilönnässä oleellista säilönnän onnistumisen kannalta on kasvimassan hyvä tiivistäminen, mitä edesautetaan kasvin silppuamisella, sekä alhainen pH-arvo (3,75-4,2), jolloin olosuhteet ovat epäsuotuisat haitallisille bakteereille ja suotuisat haitattomille maitohappobakteereille (Hyytiäinen ym. 1995). Tärkeää on myös hapettomuuden varmistaminen kasvimassan hengityksen ja lämpenemisen ehkäisemiseksi sekä epäpuhtauksien kuten haitallisia mikrobeja sisältävien mullan ja lannan välttäminen säilönnässä. Rehu voidaan säilöä ilman säilöntäainetta, mutta usein säilönnän onnistuminen varmistetaan lisäämällä 5-6 l säilöntäainetta rehutonna kohti. Happopohjaisilla, kuten muurahaishappoa sisältävillä säilöntäaineilla saadaan rehun pH laskemaan nopeasti, ja biologiset säilöntäaineet sisältävät usein maitohappobakteereita maitohappokäymisen tehostamiseksi sekä entsyymejä pilkkomaan kasvin soluseiniä ja vapauttamaan sokereita. Rehu voidaan säilöä pyöröpaaleihin, jolloin tosin rehun laatu voi vaihdella, ja työpanos ja käytettävän paalimuovin kulutus ovat kohtalaisen suuria. Suuria kasvimassoja säilöittäessä saadaan työmäärää ja säilörehun laatuvaihteluja vähennettyä säilömällä laakasiiloon tai aumaan (Hyytiäinen ym. 1995).

2.2 Anaerobinen hajoaminen ja olosuhteet

2.2.1 Hajoamisen vaiheet

Orgaaninen aines hajoaa hapettomissa oloissa useiden bakteeriryhmien toimesta monivaiheisten hajoamisreittien kautta (Kuva 1). Hajoaminen alkaa hydrolyysillä, jossa

käsiteltävän materiaalin sisältämät pitkäketjuiset polymeerit (proteiinit, hiilihydraatit, rasvat) hajoavat yksinkertaisiksi liukoiksi yhdisteiksi, kuten sokereiksi, aminohapoiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi (LCFA, long chain fatty acids) hydrolyyttisten bakteerien tuottamien entsyymien vaikutuksesta. Liukoiset yhdisteet hajoavat edelleen happokäymisessä fermentatiivisten bakteerien solujen sisällä vedyksi, hiilidioksidiksi, haihtuviksi rasvahapoiksi ja muiksi orgaanisiksi hajoamisen välituotteiksi. Asetogeneesissa pelkistyneet yhdisteet hajoavat vedyksi, bikarbonaatiksi ja asetaatiksi asetogeenisten bakteerien toimesta. Bikarbonaatti hajoaa edelleen vedyksi ja asetaatiksi homoasetogeenisten bakteerien vaikutuksesta, joskin hydrogenofiiliset metanogeenit kilpailevat myös bikarbonaatista. Viimeisessä vaiheessa, metanogeneesissa, muodostuu metaania asetoklastisten metanogeenien toimesta asetaatista, ja hydrogenofiilisten metanogeenien toimesta vedystä ja bikarbonaatista. Jos prosessissa on saatavilla sulfaattia ja nitraattia, sulfaatin- ja nitraatinpelkistäjäbakteerit hapettavat pelkistyneitä yhdisteitä, asetaattia ja vetyä (Pohland 1992).



Kuva 1. Anaerobisen hajoamisen vaiheet ja hajoamisreitit (Gujer & Zehnder 1983).

2.2.2 Olosuhdetekijät

Anaerobisen hajoamisen optimaaliset lämpötilat ovat mesofiilisiä bakteereja suosiva noin 35 °C ja termofiilisiä bakteereja suosiva noin 55 °C. Termofiilinen prosessi tuottaa tehokkaammin metaania, mutta toisaalta prosessi vaatii enemmän lämmitysenergiaa ja on herkempi prosessin tasapainon muutoksille (Mata-Alvarez 2003). Mesofiilinen prosessi on yleisemmin käytetty, ja esimerkiksi Saksan biokaasulaitoksista 95 % toimii mesofiilisella 37-43 °C:een lämpötila-alueella (FAL 2005).

Anaerobisen hajoamisen prosessi on vakaa pH:n ollessa 6,5-7,5. Biokaasuprosessi pysyy usein luontaisesti optimaalisella pH-alueella, ja liukoinen CO₂ ja ammoniakki puskuroivat prosessia neutraalille tasolle. Haponmuodostuksessa syntyvien haihtuvien rasvahappojen (VFA) määrä on reaktorissa yleensä 200-2000 mg/l, mutta VFA:t voivat kuitenkin biokaasureaktoriin kertyessään laskea pH:n haitalliselle tasolle, sillä metanogeenien populaatio kasvaa hitaammin kuin VFA:ta tuottavien asidogeenisten bakteerien (Cecchi ym. 2003). VFA:sta haitallisimpia ovat propionaatti ja butyraatti (Mata-Alvarez 2003). Prosessin epätasapaino on pH:n seuranta herkemmin ennakoitavissa seuraamalla alkaliniteettiä, joka kertoo kyvystä vastustaa pH:n muutosta, ja joka yleensä on reaktorissa tasolla 2000-4000 mg CaCO₃/l. Epätasapainoisessa prosessissa VFA-pitoisuus nousee ja alkaliniteetti laskee, ja niinpä VFA/alkaliniteetti –suhde ei saisi nousta yli 0,3 jotta prosessi olisi vakaa (Cecchi ym. 2003).

Lehmänlanta on lannan ja energiakasvien yhteiskäsittelyssä sopiva materiaali, sillä se sisältää Hartmannin ym. (2003) mukaan anaerobisille bakteereille välttämättömät ravinteet, joita ovat hiili, typpi, fosfori, rikki, vitamiinit ja hivenaineet (Fe, Ni, Mg, Ca, Na, Ba, Tu, Mo, Se ja Co) (Mata-Alvarez 2003). Liiallinen typen pitoisuus voi myös aiheuttaa inhibitiota, sillä ammoniakkin (NH₃) pitoisuuden nousu yli 1,1 g/l inhiboi prosessia (pH 8:ssa). Ammoniakkin pitoisuus nousee ammoniumtypen (NH₄) lisääntyessä ja pH:n ja lämpötilan noustessa (Hansen ym. 1998). Ammoniakkin inhibitiota voidaan ehkäistä lisäämällä syötteeseen hiilipitoista materiaalia ja pyrkimällä siten optimaaliseen C/N-suhteeseen, tai laimentamalla syötettä. Orgaanisen aineksen, typen ja fosforin olisi suositeltavaa olla COD/N/P –suhteessa 600/7/1 (Hobson & Wheatley 1993; Mata-Alvarez 2003). Mainittujen bakteeritoimintaa häiritsevien tekijöiden lisäksi anaerobista hajotusta voivat inhiboida liika suolaisuus, erilaiset puhdistusaineet, myrkylliset aineet ja vierasaineet kuten tuholaistorjunta-aineet. Rikkivedyllä

(H₂S) on myös inhiboiva vaikutus, ja sitä voidaan biologisesti pelkistää alkuainerikiksi syöttämällä reaktoriin pieni määrä ilmaa (Mata-Alvarez 2003). Myös pitkäketjuiset rasvahapot (LCFA) voivat kertyessään inhiboida mikrobiprosessia ja tietyissä oloissa estää propionaatin hajotuksen, jolloin hydrolysoituminen estyy (Salminen 2000).

2.2.3 Biokaasuprosessin operointi

Anaerobisen hajoamisprosessin tasapainon ja hajoamisen tehokkuuden ylläpitämiseksi biokaasulaitosta operoidaan laskennallisten parametrien avulla, joita käytetään hyödyksi myös biokaasulaitoksen mitoituksessa. Hydraulinen viipymä (HRT, hydraulic retention time) riippuu reaktorin syötöstä ja reaktoritilavuudesta, ja se kuvaa käsiteltävän massan viipymää reaktorissa (kaava 1). Kuormitus (OLR, organic loading rate) kuvaa reaktoriin syötetyn orgaanisen aineksen määrää reaktoritilavuutta kohti, ja se lasketaan kaavan 2 mukaisesti.

Laitoksen kaasuntuottonopeus (GPR, gas production rate) (kaava 3), ominaiskaasuntuotto (SGP, specific gas production) (kaava 4) ja biokaasun metaanipitoisuus kertovat käsiteltävän materiaalin hajoamistehokkuudesta. Ominaiskaasuntuotto kuvaa reaktorin kaasuntuottoa suhteessa syötetyn orgaanisen aineksen määrään (Cecchi ym. 2003).

$$\text{HRT} = V / Q \quad (1)$$

$$\text{OLR} = Q \cdot S / V \quad (2)$$

$$\text{GPR} = Q_{\text{biokaasu}} / V \quad (3)$$

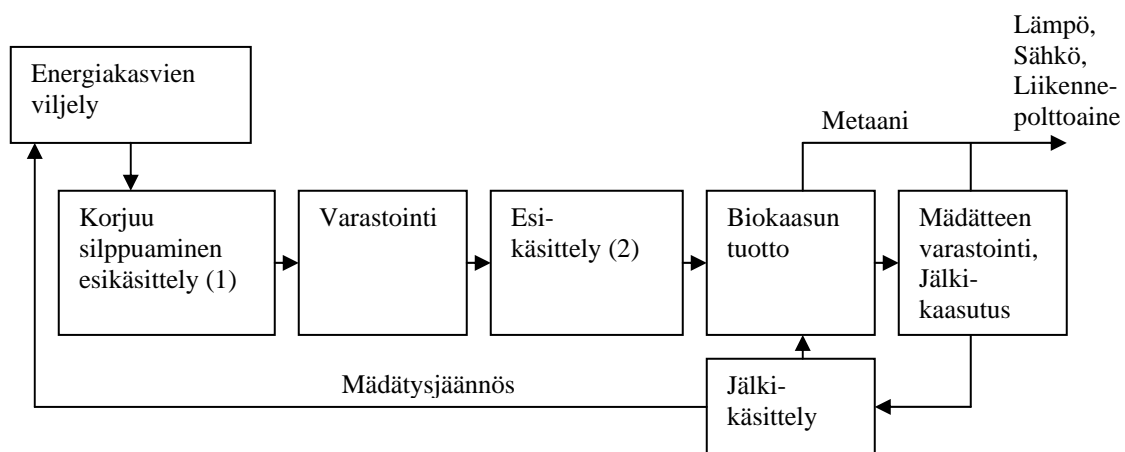
$$\text{SGP} = Q_{\text{biokaasu}} / Q \cdot S \quad (4)$$

HRT	hydraulinen viipymä (d)
OLR	orgaanisen aineksen kuormitus (kgVS/m ³ d) tai (kgCOD/m ³ d)
GPR	kaasuntuotto (m ³ biokaasua / m ³ reaktori d)
SGP	ominaiskaasuntuotto (m ³ biokaasua / kg VS)
V	reaktorin tilavuus (m ³)
Q	reaktorin syöttö (m ³ /d)
S	orgaanisen aineen pitoisuus (kg/m ³), eli VS:n tai COD:n määrä
Q _{biokaasu}	biokaasun tuotto (m ³ /d) (Cecchi ym. 2003).

2.3 Kasvia ja lantaa käsittelevä biokaasulaitos

2.3.1 Tuotantoketju

Biokaasuntuotanto energiakasveista on monivaiheinen tuotantoketju, jossa voidaan huomioida ravinteiden kierto biokaasuprosessista peltoenergian viljelyyn (Kuva 2). Jotta bioenergian tuotannon myötä voitaisiin vähentää mahdollisimman tehokkaasti fossiilisten polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjä ja tuotantoketjusta saatavan nettoenergian määrä olisi mahdollisimman suuri, voidaan jokaista vaihetta kehittämällä ja optimoimalla parantaa ketjun tehokkuutta. Energiakasvien käsittelyyn perustuvan tuotantoketjun toimivuutta voidaan arvioida tarkastelemalla, paljonko tietyllä konseptilla voidaan tuottaa metaania peltohehtaaria kohti. Näin tarkastelussa on huomioituna kasvien viljely, varastointi, esikäsittely, biokaasuprosessi sekä mädätysjäännöksen lannoitusvaikutus. Lisättäessä tarkasteluun vielä tuotantoketjuun vaaditun ulkoisen energiapanostuksen määrä sekä tuotetun metaanin hyötykäytön tehokkuus, saadaan arvioitua ja kehitettyä tuotantoketjua (Weiland 2003).



Kuva 2. Energiakasveja hyödyntävän biokaasuntuotannon tuotantoketju (Weiland 2003; Lehtomäki 2006).

2.3.2 Säilörehu-lanta -syötteen ominaisuudet

Lietelanta sisältää runsaasti vettä ja virtsaa (TS 3-5 %), joten lantaa käsittelevä biokaasulaitos on yleensä märkäprosessi, jossa materiaalivirrat voidaan siirtää pumppujen avulla. Lanta on yhteiskäsittelyyn hyvä materiaali, sillä sitä on runsaasti saatavilla, se sisältää monipuolisesti anaerobisessa hajoamisessa tarvittavia ravinteita ja sillä on mm. ammoniakkipitoisuutensa

myötä hyvä puskuroimiskyky (Hartmann ym. 2003). Säilörehun kuiva-ainepitoisuus on esimerkiksi nurmirehuilla 23-40 %. Säilörehu sisältää metaania hyvin tuottavia sokereita ja valkuaisaineita, joten energiakasveja lisäämällä voidaan parantaa pelkstä lannasta saatavaa kaasuntuottoa (Hyytiäinen ym. 1995). Kasvien lisääminen nostaa myös syöte-seoksen C/N-suhdetta, joka pelkkää lantaa käsiteltäessä on usein alhainen anaerobisen hajoamisen kannalta (Hobson & Wheatley 1993). Säilörehujen ominaisuudet poikkeavat toisistaan runsaasti riippuen mm. siemenseoksesta, viljelyolosuhteista, korjuutavasta ja varastoinnista (Lehtomäki 2006). Taulukossa 1 on esitetty erään Keski-Suomessa viljellyn nurmirehun sekä lehmänlannan ominaisuuksia.

Kasvit sekoitetaan yleensä lantaan sekoitussäiliössä ennen biokaasureaktoria, tai syötetään erillistä linjaa pitkin reaktoriin. Kasvien osuus käsiteltävässä materiaalissa vaikuttaa huomattavasti biokaasulaitoksen tekniseen toimivuuteen ja operointiin, kuten pumppujen, putkilinjojen ja sekoittimien toimintaan (Weiland 2003). Kasvien osuus vaikuttaa myös kaasuntuottoon, joten syötteen optimaalisella seossuhteella voidaan maksimoida laitoksen energiantuotto. Korkeimmat metaanisaannot on laboratoriomittakaavan täyssekoitteisissa lietereaktoreissa saatu kasvin orgaanisen aineksen osuuden ollessa 30 % syötteen orgaanisesta aineksesta reaktorin kuormituksella 2 kgVS/m³d (heinän, sokerijuurikkaan naattien ja oljen yhteiskäsittely lannan kanssa) (Lehtomäki 2006).

Taulukko 1. Säilörehun ja lehmänlannan ominaisuuksia. Säilörehu viljelty Keski-Suomessa timotei-nurminata –siemenseoksella (75 % timotei *Phleum pratense*, 25 % nurminata *Festuca pratensis*), sato korjattu varhaisessa kukintavaiheessa tarkkuussilppurilla, säilötty säilöntäaineen (maitohappobakteeri) kanssa laakasiiloon (Lehtomäki 2006).

	TS (%)	VS (%)	pH	N _{tot} (mg g ⁻¹ TS)	NH ₄ -N (mg g ⁻¹ TS)	SCOD (mg g ⁻¹ TS)	Ligniini (% TS)
Säilörehu	25,9	24,0	3,9	16,9	1,4	228	17
Lehmänlanta	6,5	5,3	7,4	41,5	15,8	233	

2.3.3 Kasvin esikäsitteily

Energiakasvit voivat hajota hitaasti biokaasuprosessissa, jolloin kasvin metaanipotentialista suuri osa jää saavuttamatta biokaasulaitoskäsittelyn aikana. Kasvin sulavuus on sitä huonompi, mitä korkeampi on ligniini/selluloosa -suhde (Sharma ym. 1988). Hajoavuutta voidaan parantaa kemiallisilla ja mekaanisilla esikäsitteilyillä, jotka vaikuttavat kasvien rakenteeseen ja ominaisuuksiin edesauttaen anaerobisten bakteerien hajotustoimintaa. Kemiallisia esikäsitteilyjä ovat erilaisten entsyymien ja happojen käyttö kasvien varastointivaiheessa. Esimerkiksi varastointilisäaineiden käytön nurmiheinän ja sokerijuurikkaan naattien säilönnässä on havaittu lisäävän metaanintuottopotentialia parhaimmillaan 19-22 % tuoreeseen kasvimassaan verrattuna, kun taas ilman lisäaineita säilötyn nurmiheinän metaanintuottopotentialin on havaittu laskevan varastoinnissa 17-39 % (Lehtomäki 2006).

Partikkelikoon pienentäminen on fysikaalinen esikäsitteily, joka on tärkeä biokaasulaitoksen tekniikan, kuten pumppujen, sekoittimien ja putkilinjojen toiminnan kannalta. Kasvien silppuamisella saadaan mekaanisesti rikottua kasvisolukkoa ja lisättyä anaerobisten bakteerien ja substraatin välistä kontaktipinta-alaa, jolloin metaanintuotto kasvaa ja kasvimassan käsittelyyn vaadittava reaktoritilavuus pienenee (Sharma ym. 1988). Optimaalisella partikkelikoolle voidaan lisätä metaanintuottoa 10-30 %, mutta optimaalinen koko on kuitenkin kasvilajista riippuvainen (Kaparaju 2003). Työ- ja energiapanoksen minimoimiseksi on edullista, jos kasvi silputaan kasvisadon korjaamisen yhteydessä esimerkiksi tarkkuussilppurilla (Weiland 2003).

Säilörehun esikäsitteilyn kuten partikkelikoon pienennyksen aikana erottuu kasvimassasta usein puristenestettä, joka on syytä ottaa talteen, sillä vesistöön päästessään se on haitallista suuren hapenkulutuksensa vuoksi. Runsaasti sokereita ja myös proteiineja sisältävä puristeneste kannattaa hyödyntää biokaasuprosessissa, ja sekoitussäiliöön lisättyinä saadaan hapan puristeneste myös neutraloitua lannan vaikutuksesta, jolloin se ei syövytä betonirakenteita (Kempainen 2001).

2.3.4 Kasvimassan sekoitus lannan kanssa

Sekoitettaessa kasvit ja lanta keskenään erillisessä sekoitussäiliössä ennen reaktoriin syöttämistä voidaan kasvimassa saada vettymään, mikä toimii fysikaalisena esikäsittelynä parantaen hajoamista (Sharma ym. 1988). Näin voidaan myös saada hydrolyysi alkamaan ennen varsinaista reaktorikäsittelyä, mikä on tärkeää, sillä hydrolyysi on usein koko biokaasuprosessin hitain vaihe etenkin monimutkaisia yhdisteitä sisältävillä materiaaleilla, kuten selluloosapitoisilla kasveilla (García-Heras 2003). Sekoitussäiliön sisällön sekoittaminen ennen jokaista syöttöä vaatii kuitenkin paljon energiaa, mikä kasvin ja lannan erillisessä reaktoriin syötössä säästyy (Weiland 2003).

Lannan ja kasvin sekoitukseen voidaan käyttää lietepumppuja, joiden suuntaus ja teho voidaan optimoida sekoitussäiliön muodon ja virtausten mukaisesti. Repivällä lietepumpulla saadaan hienonnettua varsinaisen kasvin silppuamisen jälkeen pitkäksi jääneet kasvikorret, ja sillä voidaan myös syöttää massa reaktoriin. Sekoitukseen ja pintaan kertyvän kasvilautan hajotukseen voidaan käyttää myös potkurisekoitinta. Sekoittimen huollon tarve on usein suuri, joten sekoittimen sijoittelu ja huollon vaivattomuus on hyvä huomioida. Esimerkiksi moottoriosia voi olla kokonaan sekoitussäiliön ulkopuolella akselin välityksellä kytkettynä (Mamec Oy 2008).

2.3.5 Biokaasureaktori

Biokaasuprosessi voi olla märkäprosessi tai paljon kiintoainetta kuten energiakasveja sisältävä kuivaprosessi. Se voi myös olla kaksivaiheinen kuiva- ja märkäprosessin yhdistelmä. Jatkuvatoimisessa prosessissa biokaasureaktoriin syötetään jatkuvasti uutta käsiteltävää materiaalia, ja panosperiaatteella toimivassa reaktorissa yksi käsittelyerä käsitellään loppuun asti ennen seuraavaa erää (Hobson & Wheatley 1993).

Suotopetireaktori on yksivaiheinen panosprosessi, jossa käsiteltävän materiaalin läpi suodattuvaa ravinne- ja mikrobiympäristöistä nestemäistä jätettä kierrätetään reaktorin pohjalta pintaan. Kaksivaiheisessa prosessissa voidaan suotopetireaktorissa nestejakeeseen siirtyneet hydrolyysituotteet johtaa erilliseen reaktoriin, missä tapahtuu metaanintuotto. Nestejakeeseen liukoistuneet yhdisteet voidaan johtaa esimerkiksi UASB-reaktoriin (upflow

anaerobic sludge blanket), jossa käsiteltävä materiaali johdetaan reaktoriin alhaalta ylöspäin bakteeri-flokkien muodostaman lietepatjan läpi. Nestemäisten materiaalien käsittelyyn sopii myös anaerobinen suodin, jossa syötettävä substraatti johdetaan bakteerien kiinnitysalustana toimivan kennomaisen suodattimen läpi joko alhaalta ylöspäin (upflow) tai ylhäältä alaspäin (downflow) (Hobson & Wheatley 1993).

Kaksivaiheinen prosessi on havaittu hyväksi käsiteltäessä energiakasveja panosperiaatteella, sillä yksivaiheisessa suotopetireaktorissa laboratoriokokeissa on saatu timoteivaltaisen säilörehun käsittelyssä ainoastaan 20 % metaanintuottopotentialista, ja kaksivaiheisessa prosessissa metaanintuotosta 98 % on ollut peräisin toisen vaiheen reaktorista. Suotopetireaktorin ja anaerobisen suotimen on havaittu olevan tehokas yhdistelmä apilavaltaisen säilörehun ja sokerijuurikkaiden käsittelyssä (Lehtomäki 2006).

Jatkuvatoiminen täyssekoitteinen lietereaktori eli CSTR-reaktori (continuously stirred tank reactor) on yksivaiheinen märkäprosessi, joka on yleisimmin käytössä lannan ja lisämateriaalien, kuten energiakasvien käsittelyssä (Hobson & Wheatley 1993). CSTR-reaktori voi olla tornimainen pystymalli tai matala leveä vaakamalli, ja kokoluokka vaihtelee esimerkiksi Saksan reaktoreilla 200-8000 m³:n välillä suurimman osan (73 %) ollessa alle 2000 m³ (FAL 2005).

Jatkuvatoimiseen reaktoriin syötetään jatkuvasti tai säännöllisin väliajoin uutta materiaalia, ja vastaava määrä käsiteltyä materiaalia poistetaan reaktorista. Lietereaktorin syötteen TS on Hobsonin ja Wheatleyn (2003) mukaan yleensä alle 8 %, joten lietteen syöttö tapahtuu usein pumppaamalla. Kiinteää materiaalia kuten energiakasveja voidaan syöttää reaktoriin erillistä syöttölinjaa pitkin, jolloin syöttö tapahtuu reaktorin nestepinnan alle ruuvikuljettimella tai männällä. Syötössä voidaan käyttää myös huuhdontalaitteistoa, jolloin syöte huuhdotaan kierrätettävällä reaktorilietteellä reaktorimassan sekaan (Weiland 2003).

Reaktorin täyssekoituksen tavoitteena on tehostaa bakteerien ja substraatin kontaktia, pitää reaktorin koko kapasiteetti tehokkaassa toiminnassa, tasata reaktorilämpötilaa ja ehkäistä kerrostumien ja vaahdon muodostumista. Reaktorin sekoituksessa voidaan käyttää potkurisekoitinta tai lapasekoitinta, joka ehkäisee sedimentoitumista ja vaahdonmuodostusta ja jonka pyörimisnopeudeksi riittää muutama kierros minuutissa. Mekaaniset sekoittimet ovat

tehokkain sekoitintyyppi laitteiston ollessa uusi, mutta teho laskee nopeasti sekoittimen korroosion ja likaantumisen myötä. Eräs sekoitustapa on reaktorilietteen kierrätys, mutta sen sekoitusvaikutus on usein riittämätön. Kaasusekoituksessa reaktorikaasua kierrätetään reaktorin pohjassa oleville suuttimille, jolloin kaasukuplat aikaansaavat sekoituksen. Kaasusekoituksen etuja ovat hyvä sekoitusvaikutus, vähäinen huollon tarve sekä vähäinen vaahdonmuodostus mekaaniseen sekoitukseen verrattuna (Hobson & Wheatley 1993). Eräitä kaupallisia sovelluksia kaasusekoituksesta ovat myös Cannon®-mixer ja Big Bubble Gun Mixer (BBGM)TM, joissa reaktoritilassa pystyssä olevaan putkeen muodostettu suuri kaasukupla työntää männän tavoin lietettä putkessa ylöspäin reaktorin pohjasta pintaan (Infilco Degremont Inc. 2008; Mabarex Inc. 2008; Mamec Oy 2008).

2.3.6 Jälkikaasutus ja lopputuotteiden käyttö

Käsitelty materiaali johdetaan tai pumpataan usein reaktorista jälkikaasuuntumisaltaaseen, jossa saadaan talteen merkittävä osa lietteen vielä reaktorikäsitellyn jälkeen sisältämästä metaanipotentialista. Optimaalinen lämpötila jälkikaasutukselle olisi mesofiilisen reaktorin tapaan noin 35 °C ja kaasuntuotto alenee voimakkaasti lämpötilan laskiessa, mutta pitkän viipymän myötä jälkikaasutuksen tuottama metaanimäärä voi olla suurikin, vaikka allasta ei erikseen lämmitettäisikään (Kaparaju 2003). Jälkikaasutusaltaan käsitelty mädätysjännös sisältää runsaasti epäorgaanisia ravinteita soveltuen erinomaisesti peltolannoitteeksi korvaamaan kemiallisia lannoitteita. Liette sisältää myös runsaasti orgaanisia yhdisteitä, ja lisää siten maan humuspitoisuutta ja toimii maanparannusaineena (Edelmann 2003).

Biokaasuprosessissa syntynyt kaasu johdetaan joko kaasuvaraan tai suoraan hyötykäyttöön. Metaani on puhtaasti palava ja ominaisuuksiltaan erinomainen polttoaine, jolla on monipuolisia käyttömahdollisuuksia. Biokaasusta voidaan tuottaa lämpöä kaasupolttimella tai sekä lämpöä että sähköä CHP-yksiköllä tai mikroturbiinilla. Liikennepolttoaineeksi biometaani soveltuu kaasunpuhdistuksen ja paineistuksen jälkeen, jolloin kaasusta poistetaan mm. vesihöyry, H₂S ja CO₂. Biokaasusta voidaan tuottaa sähköä myös hyvällä hyötysuhteella polttokennolla, jolloin kaasu puhdistetaan ja metaani muutetaan polttokennon käyttämäksi vedyksi. Kaasun laatu riippuu tällöin käytettävän polttokennon tyypistä (Weiland 2003).

3. MATERIAALIT JA MENETELMÄT

3.1. Koejakso biokaasulaitoksessa

3.1.1. Biokaasulaitoksen prosessikuvaus

Käytännön koejakso suoritettiin Laukaassa Leppävedellä sijaitsevan Kalmarin maatilan biokaasulaitoksessa. Tilalla tehtiin koeajo, jossa seurattiin lehmänlannan ja säilörehun yhteiskäsittelyä biokaasulaitoksessa. Koejakso oli ajalla 4.5.-11.8.2006.

Biokaasulaitos on otettu käyttöön vuonna 1998. Se on alun perin suunniteltu käsittelemään tilan navetassa syntyvä noin 60 nautayksikön tuottama lanta, jolloin käsiteltävä lietemäärä pesuvedet ja talon jätevedet mukaan lukien on vuosittain 1600-2000 m³. Normaalisti reaktoriin syötetään lantaan sekoitettuna myös makeistehtaan jätettä.

Biokaasulaitoksen prosessikuvaus on esitetty kuvassa 3. Navetasta tuleva lanta varastoidaan 760 m³:n katettuun betoniseen raakalietealtaaseen. Allas on osittain maan alla, ja lannan lämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan maaperän lämmön tasatessa kuitenkin lämpötilan vaihtelua. Raakalieteallasta sekoitetaan muutaman kerran vuodessa uppopumpulla. Pumppausteho on alhainen, minkä vuoksi vain osa altaan lietteestä sekoittuu. Lanta siirretään raakalietealtaasta pumpulla sekoitussäiliöön.

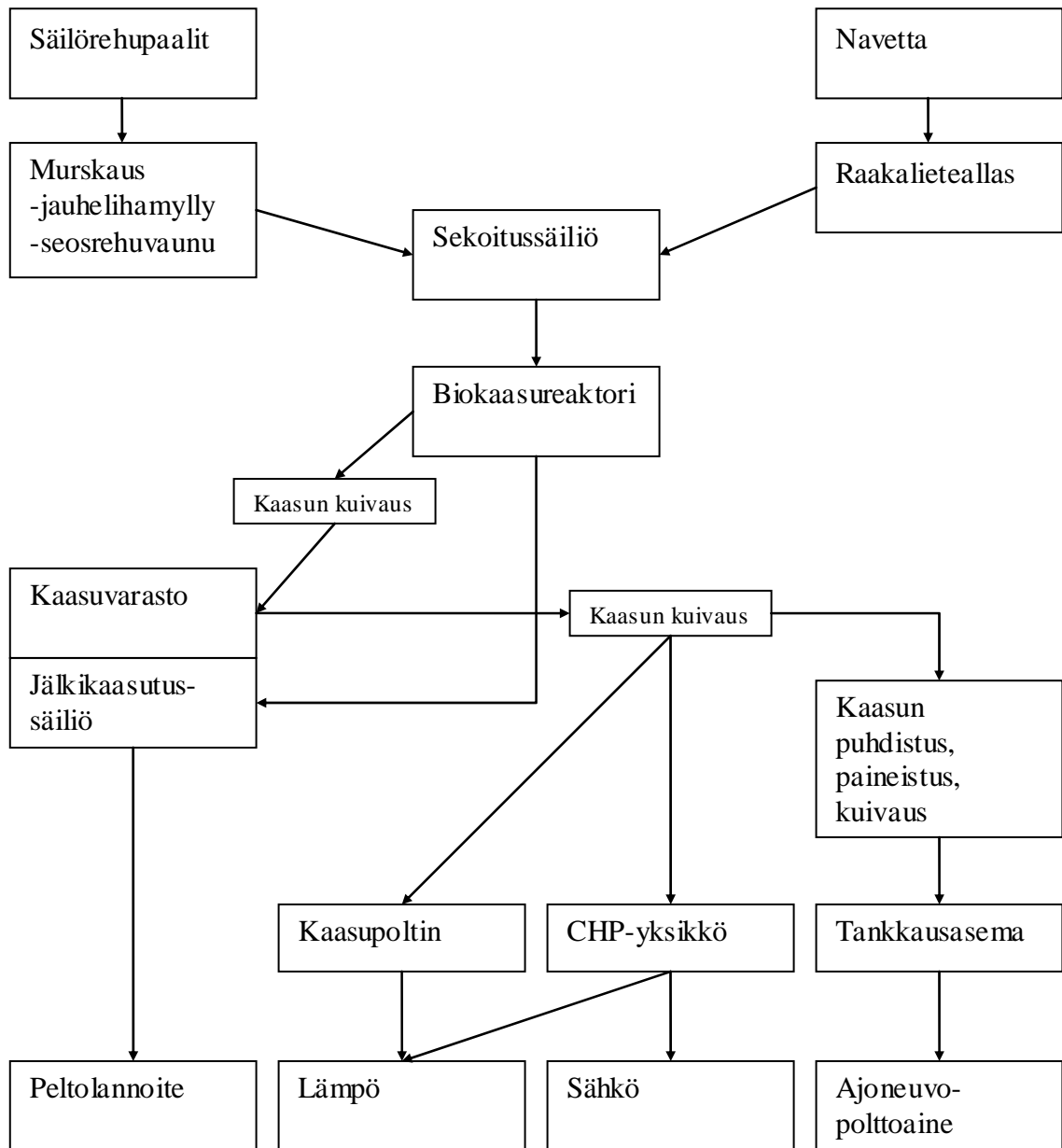
Sekoitussäiliö on osittain maan alle rakennettu pyöreä katettu betoniallas, jonka tilavuus on 94 m³ (halkaisija 7,1 m, syvyys 2,4 m). Pohjaan sedimentoituneen arviolta 4 m³:n kiinteän aineksen vuoksi hyödynnettävä tilavuus on noin 90 m³. Sekoittimena toimii sähkökäyttöinen 7,5 kW:n lietelantapumppu (Mamec Oy, LL-tyyppi), jonka moottoriosaa on nestepinnan yläpuolella säiliön ulkopuolella. Sekoitin on sijoitettu sekoitussäiliön toiseen reunaan, ja pumpun virtaus voidaan suunnata joko nestepinnan alle tai erillistä putkea pitkin nestepinnan päälle ylhäältä alaspäin. Syöttö reaktoriin tapahtuu leikkaavalla epäkesko-lietepumpulla, johon on hinnan välityksellä liitetty 3 kW:n sähkömoottori. Syöttölinja putki on halkaisijaltaan 78 mm ja pituudeltaan 25 m, ja syöttönopeus on noin 10 m³/h.

Biokaasureaktori on 150 m³:n jatkuvasekoitteinen reaktori (CSTR, continuously stirred tank reactor), jonka nestetilavuus on 120 m³. Reaktori toimii mesofiilisella 30-37 °C:een lämpötila-

alueella. Sekoitus tapahtuu lapasekoittimella, jonka lavat sijaitsevat reaktorin pohjan yläpuolella ja nestepinnan alapuolella. Sekoitus on päällä jatkuvasti, ja sekoitinta pyöritetään 1 kW:n sähkömoottorilla. Sekoituksen tehon tarve on 200-300 W, joten sekoittimen moottorin kapasiteetista vain osa on käytössä. Sekoitussäiliöstä syötettävä liete pumpataan reaktoriin metri nestepinnan alapuolelle, ja käsiteltyä lietettä poistuu vastaava määrä reaktorin pohjassa olevan venttiilin kautta. Reaktoriin syötetään myös pieni määrä ilmaa, jolloin rikkivetyä (H_2S) saadaan poistettua biokaasusta ja reaktorilietteestä.

Käsitelty liete johdetaan biokaasureaktorista jälkikaasutussäiliöön, jonka tilavuus on 1500 m^3 . Jälkikaasutussäiliö on katettu pienellä ylipaineella kuperana pysyvällä suojamuovikatteella. Säiliö toimii lietteen varaston lisäksi myös biokaasun varastona. Jälkikaasutusvarastossa syntyy biokaasua vielä 10-15 % laitoksen kokonaiskaasuntuotosta. Käsitelty materiaali tyhjenetään jälkikaasutusvarastosta kaksi kertaa vuodessa ja levitetään pelloille.

Biokaasulaitoksen pumppaukset ja valvonta on kytketty ATK-järjestelmään, ja tietokoneelle tallentuvat myös syntyvän biokaasun metaanipitoisuus ja tilavuustiedot. Laitoksella on kiinteät mittarit metaanipitoisuuden mittaamiseen ja kaasun tilavuuden mittaamiseen. Biokaasu kuivataan reaktorin jälkeen ja johdetaan kaasulinjaa pitkin joko kaasuvaraan tai tarkemman puhdistuksen kautta hyötykäyttöön. Kaasu hyödynnetään sähkön, lämmön ja ajoneuvopolttoaineen tuottamiseen, ja osa kaasusta käytetään biokaasureaktorin lämmittämiseen. Tilalla on kaasukäyttöiseksi konvertoitu Sisu-diesel CHP-yksikkö, josta saadaan sähköä 30 kW_e :n ja lämpöä 60 kW_t :n teholla. Lämmön tuottamiseen on myös 80 kW_t :n kaasupoltin. Ajoneuvopolttoaine puhdistetaan, paineistetaan ja kuivataan ja johdetaan tilan tankkauspisteeseen. Biokaasulaitoksen vuotuinen biokaasuntuotto on noin $60\ 000\text{ m}^3$.



Kuva 3. Kalmarin biokaasulaitoksen prosessikuvaus kasvinsyöttökokeen aikana

3.1.2. Kokeessa käytetty säilörehu

Koejaksolla 4.5.-11.8.2006 syötettiin biokaasureaktoriin 30 paalia eli 17 900 kg säilörehua (Taulukko 2). Kasvit viljeltiin Kalmarin tilan pelloilla kahdella eri kasvilajit sisältävällä siemenseoksella. Suurin osa kokeen säilörehusta oli monivuotista apila-timotei-nurminata-seosta, jonka kylvöseoksessa oli 17 % puna-apilaa (*Trifolium pratense*), 63 % timoteita

(*Phleum pratense*) ja 20 % nurminataa (*Festuca pratensis*). Vuonna 2004 kylvetystä kasvustosta korjattiin ensimmäinen sato 16.-17.6.2005 ja toinen sato 3.8.2005. Rehu säilöttiin pyöröpaaleihin siten, että kolme ensimmäisen sadon paalia paalattiin tuoreena heti niiton jälkeen ja 12:en paalin kasvimassaa esikuivattiin 1-2 vuorokautta pellolla ennen paalaamista. Paalit säilöttiin pääosin ilman säilöntäainetta, mutta kolmessa ensimmäisen sadon paalissa käytettiin Josilac-säilöntäainetta (*Lactobacillus plantarum* ja *Pediococcus acidilactici* maitohappobakteerit sekä sellulaasi-, pektinaasi- ja ksylanaasi-entsyymit).

Kokeessa käytetyn raiheinä-kaura-seoksen kylvöseoksessa oli 13 % italianraiheinää (*Lolium multiflorum*) ja 87 % kauraa (*Avena sativa*). Yksivuotinen kasvusto kylvettiin keväällä 2005. Ensimmäinen sato (korjattu 9.7.2005) sisälsi lähinnä raiheinän suojakasviksi viljeltyä kauraa ja toinen sato (korjattu 24.8.2005) oli lähinnä raiheinää. Kauraa ja raiheinää kuivattiin pellolla 1-2 vrk ja paalattiin pyöröpaaleiksi. Paalit säilöttiin muutoin ilman säilöntäainetta, mutta kahdessa raiheinäpaalissa käytettiin Josilac-säilöntäainetta.

Kokeessa käytetystä säilörehusta kolme paalia oli huonokuntoisia paaliin varastointivaiheessa päässeen ilman hajotettua aerobisesti kasvimassaa, mikä ilmeni paalien korkeasta lämpötilasta (33 °C), voimakkaasta hajusta sekä kasvien rakenteen pehmentymisestä hajoamisen seurauksena. Pääosin rehupaalit olivat kuitenkin kunnoltaan hyviä tai kohtalaisen hyviä.

Taulukko 2. Kokeissa käytetyn säilörehun koostumus, määrä sekä TS ja VS

kasvilaji	paalimäärä (kpl)	paino yht. (kg)	TS (%)	VS (%)
timotei 1. sato (apila, timotei, nurminata)	15	8168	18,1	16,5
timotei 2. sato (apila, timotei, nurminata)	9	6060	24,0	21,4
kaura (kaura- raiheinä-seos)	3	2015	34,0	30,3
raiheinä (kaura- raiheinä-seos)	3	1643	35,1	30,1

3.1.3. Kasvimassan esikäsitteleminen

Säilörehupaalit punnittiin Tamtron haarukkavaunualla (mittaustarkkuus $\pm 1,25$ kg, kapasiteetti 1500 kg). Paalimuovin poistamisen jälkeen punnittiin myös kasvista erottunut paalimeste. Kasvi murskattiin aluksi Titan 250 jauhelihamyllyllä, jossa on 18 kW:n sähkömoottori. Kokeessa verrattiin myös kahta erilaista seosrehuvaunua, joilla saatiin murskattua kerralla 3-4 paalia. Vaunut olivat yhdellä pystyruuvilla varustettu 12 m³:n sekoituskapasiteetin Kuhn Euromix I 1270 ja Elho Dual Mixer, jossa on kaksi vaakaruuvia ja 13 m³:n sekoituskapasiteetti. Kummassakin seosrehuvaunussa oli vaaka murskattavan kasvimäärän punnitsemiseksi. Yhden kasvieron (2-4 paalia) murskaamiseksi annettiin seosrehuvaunun pyöriä 40-100 min, jonka jälkeen murskattu kasvi saatiin vaunun purkuluukun ja hihnakuuljettimen avulla siirrettyä kottikärryihin ja edelleen sekoitussäiliöön.

3.1.4. Biokaasulaitoksen operointi koejakson aikana

Ennen kasvinsyöttökokeen aloittamista biokaasureaktoriin syötettiin 14 d pelkkää lantaa, jotta normaalisti yhteiskäsittelynä lannan kanssa käytetty makeistehtaan sivutuote saataisiin huuhdottua reaktorista ja sen vaikutus minimoitua. Lantajakson aikana syöttö tapahtui pääosin kahdesti päivässä, ensimmäinen syöttö aamulla ja toinen illalla. Keskimääräinen syöttö oli 5,1 m³/d ja kuormitus 2,9 kgVS/m³d.

Kasvinsyöttöjakson alkaessa sekoitussäiliö tyhjennettiin pumppaamalla niin, että säiliön pohjalle jäi noin 3 m³ lantaa. Koejaksolla sekoitussäiliössä sekoitettiin 6-18 päivän välein erä lantaa ja säilörehua reaktoriin syöttämistä varten. Yhteen seokseen murskattava ja sekoitettava kasvimäärä oli 3-5 paalia. Kasvista ja lannasta sekoitettuja syöte-eriä oli kokeen aikana yhteensä yhdeksän, joista kukin syötettiin reaktoriin ennen seuraavan syöte-erän valmistamista. Säilörehupaalit syötettiin kasvilajeittain aikajärjestyksessä: timotei 1. sato (5 seoserää), timotei 2. sato (2 seoserää), kaura (1 seoserä), raiheinä (1 seoserä). Murskatun kasvin sekoitus lannan sekaan tapahtui syöttämällä se sekoitussäiliön pinnan yläpuolelta alaspäin kohdistettuun lantasuikkuun, jolloin kasvi saatiin saman tien nestemäisen jakeen kanssa sekaisin. Kasvilanta-seosta sekoitettiin nestepinnan alle suunnatulla pumpulla aina ennen reaktoriin syöttöä, jotta syöte olisi mahdollisimman tasalaatuista.

Syötteen TS oli koejakson aikana eri seoksissa 6,8-9,3 % ja VS 5,6-7,7 %. Kasvin VS:n osuus koko seoksen VS:stä oli 9,7-23,3 %. Reaktoria syötettiin pääosin kahdesti päivässä keskimääräisellä syötöllä 5,1 m³/d ja keskimääräisellä kuormituksella 3,1 kgVS/m³d. Reaktorin viipymä oli keskimäärin 23,6 d.

Syöteseoksen ominaisuuksia seurattiin ottamalla näyte jokaisesta seoksesta heti seoksen tekopäivänä ja 1-5 päivän välein seoserän loppuun asti. Ennen näytteenottoa sekoitussäiliön sisältöä sekoitettiin pumppusekoittimella, ja näyte otettiin pumppaamalla samalla pumpulla. Biokaasureaktorista poistuvasta käsitellystä lietteestä otettiin näyte 1-5 vrk:n välein. Näytteistä määritettiin pH, lämpötila, TS, VS, alkaliteetti, ammoniumtyppi (NH₄-N), kokonaistyyppi (N_{tot}), liukoinen kemiallinen hapenkulutus (SCOD) sekä haihtuvat rasvahapot (VFA).

Reaktorin kaasuntuottoa ja metaanipitoisuutta mitattiin biokaasulaitoksen omilla mittareilla. Kaasun koostumus (CH₄, CO₂, H₂S) mitattiin myös kannettavalla IR-kaasuanalysointilaitteella (GA-94). Biokaasulaitoksen toimintaa selvitettiin tilalla tehtävän koejakson lisäksi myös laboratoriokokeilla.

3.2. Laboratoriokokeet

3.2.1. Sekoitussäiliön olosuhteiden simulointi

Sekoitussäiliön olosuhteita simuloitiin laboratoriossa kokeilla, joissa sekoitettiin murskattua säilörehua raakalannan, lantasuodoksen sekä veden kanssa. Kokeissa tutkittiin kasvin sekoittumista ja kerrostumista nestejakeeseen ja kasvin hajoamista sekoitussäiliössä. Kokeet tehtiin 15 l:n kuution mallisissa lasiastioissa 21,2 ± 1,7 °C:ssa. Tutkimuksessa oli kaksi koesarjaa. Ensimmäisessä sekoitettiin kasvia lantasuodokseen ja veteen pitäen kasvin määrä vakiona suhteessa nestemäärään. Toisessa koesarjassa kasvia sekoitettiin lannan kanssa kahdella eri kasvi-lanta -seossuhteella.

Ensimmäisessä koesarjassa käytettiin lihamyllyllä murskattua timotein ensimmäisen sadon säilörehua, jota lisättiin nestejakeeseen 4,8 % seoksen painosta. 600 g kasvia sekoitettiin 12 litraan vesijohtovettä (koeastia A) ja vastaavasti 300 g kasvia sekoitettiin 6 litraan lantasuodosta (koeastia B). Lantasuodos tehtiin suodattamalla raakalannasta kiinteä jae pois tiheällä terässiivilillä. Seoksista arvioitiin silmämääräisesti kasvin kerrostumista

nestejakeeseen sekä mitattiin pH ja lämpötila. Seokset sekoitettiin homogeenisiksi havainnoinnin jälkeen. Kokeita seurattiin 48 päivän ajan aluksi neljänä päivänä viikossa ja lopuksi harvemmin.

Toisessa koesarjassa käytetty säilörehu oli seosrehuvaunulla murskattua raiheinää, jota säilytettiin ennen kokeen alkua 3 d 4 °C:ssa kaasutiiviissä pussissa. Raiheinä sekoitettiin raakalannan kanssa siten, että seosten kokonaistilavuudeksi tuli 12 l. Kasvin VS:n osuudet seosten VS:stä olivat 20 % (koeastia C) ja 40 % (koeastia D). Seoksista tehtiin vastaavat havainnoinnit kuin ensimmäisessä koesarjassa, ja pH:n ja lämpötilan lisäksi määritettiin myös liukoinen kemiallinen hapen kulutus (SCOD) ja VFA. Kokeita havainnoitiin 34 päivän ajan pääosin viitenä päivänä viikossa.

3.2.2. Metaanintuotto- ja jälkikaasutuskokeet

Metaanintuotto- ja jälkikaasutuskokeet tehtiin panoskokeina 3-4 rinnakkaisessa 118 ml:n serumpullossa, jonka nestetilavuus oli 40 ml. Kokeet tehtiin 22,6 ± 3,4 °C:ssa ja 35 °C:ssa. Kokeissa käytettiin ympäinä Kalmarin biokaasureaktorin lietettä. Metaanintuottokokeissa pulloihin lisättiin säilörehu-lanta -syötettä 22,4 g ja ympäinä 17,6 g, jolloin syötteen VS:n ja ympäin VS:n suhde oli 1,6:1. Jälkikaasutuskokeen pulloihin lisättiin lietettä 40 g. Serumpullot suljettiin kumikorkeilla ja alumiinikrimpeillä ja pullojen kaasutila huuhdottiin N₂-kaasulla anaerobisten olosuhteiden aikaansaamiseksi. Näytteitä inkuboitiin staattisesti. Metaanintuotto määritettiin kaasukromatografilla.

3.3. Analyysimenetelmät

Laboratoriokokeissa ja täyden mittakaavan kokeissa pH mitattiin pH-mittarilla (HI9025, Hanna Instruments, USA) ja elektrodilla (450CD, Sensorex, Stanton, CA, USA). TS ja VS määritettiin standardin SFS-3008 mukaisesti. SCOD analysoitiin standardin SFS-5504 mukaisesti näytteistä, jotka oli suodatettu GF50-lasikuitu-suodatinpapereilla. Ammoniumtyppi (NH₄-N) ja kokonaistyyppi määritettiin Tecatorin ohjeen (Perstorp Analytical 1995) mukaisesti Kjelttec System 1002 Distilling Unit (Tecator AB) -laitteistolla, ja NH₄-N -näyte suodatettiin ennen määrittystä kuten SCOD-näyte. Osittainen alkaliteetti (PA) ja kokonaisalkaliteetti (TA)

analysoitiin soveltamalla standardia SFS-3005 siten, että PA titrattiin pH 5,75:een ja TA titrattiin pH 4,30:een Björnssonin ym. (2001) mukaisesti.

Panoskokeiden metaanipitoisuus ja VFA määritettiin kaasukromatografilla (metaani: Perkin Elmer Clarus 500, Perkin Elmer Alumina column 30 m × 0,53 mm, VFA: Perkin Elmer Autosystem XL, Perkin Elmer FFAP column 30 m × 0,32 mm), joiden käyttöolosuhteet olivat metaanille: uuni 100 °C, injektori 250 °C, liekki-ionisaatiidetektori 225 °C ja kantajakaasu argon, sekä VFA:lle: uuni 100-160 °C (20 °C/min), injektori ja liekki-ionisaatiidetektori 225 °C ja kantajakaasu helium (Lehtomäki 2006). Kaasunäyte (0,1 ml) injektoidiin kromatografiin painelukittavalla GC-ruiskulla.

4. TULOKSET

4.1. Säilörehun esikäsittely

Kokeessa käytettyjen säilörehupaalien säilöntä onnistui muutoin hyvin, mutta kolme paalia 30:sta kokeessa käytetystä paalista oli laadultaan huonoja. Säilörehun laatua heikensi rehupaaleista aiemmin suoritettujen näytteenoton aiheuttamat ja eläinten tekemät reiät paalimuovissa. Kasvinsyöttökokeen alkaessa 9.5.2006 paalien havaittiin vielä olevan osittain jäässä. Paalien puristeneste pidättyi kasvimassaan paalimuoveja poistettaessa hyvin, ja puolella paaleista nestettä ei erottunut ollenkaan. Rehulaaduista kostein oli timotein ensimmäinen sato (TS 18,1 %), jonka paaleista erottui keskimäärin 8,2 l nestettä paalia kohti.

Murskatessa säilörehua jauhelihamyllyllä lopputuotteen partikkelikoko oli 0-50 mm pisimpien yksittäisten kasvisäikeiden ollessa 115 mm (Taulukko 3). Seosrehuvaunuja käytettäessä murskaus tapahtui traktorin avulla 2-4 rehupaalin erissä. Seosrehuvaunujen lopputuote oli partikkelikooltaan pääosin vastaava kuin jauhelihamyllyn. Pystyruuvisella Kuhn-seosrehuvaunulla murskattiin kolme rehupaalia 100 min, jolloin partikkelikoko oli 0-40 mm ja pisimmät yksittäiset kasvisäikeet 140 mm. Toiseen syöte-erään murskattiin kasvia vastaavasti 50 min, jolloin päästiin yhtä hyvään murskaustulokseen.

Kahdella vaakaruuvilla varustetulla Elho-seosrehuvaunulla murskattiin aluksi timotein 2. sadon paaleja. Murskattaessa kolme paalia 60 min ajan saatiin partikkelikooksi 0-40 mm

maksimikoon ollessa 100 mm. Murskattaessa kahta paalia 35 minuutin ajan partikkelikoot olivat vastaavasti 0-50 mm ja 140 mm. Timotein 2. sadon paalit olivat niin kosteita (TS 24,0 %), että seosrehuvaunun vaakaruuvit puristaessaan kasvia vaunun laitoja vasten puristivat myös paalimestettä erilleen kasvimaasta. Nestettä poistui murskaamisen aikana keskimäärin 144 l paalia kohti, ja neste valui purkuluukun raoista ulos vaunusta. Elho-seosrehuvaunulla onnistuttiin murskaamaan samanaikaisesti neljää rehupaalia. Koejakson rehulaaduista murskaantui nopeimmin korkeimman TS:n (34-35 %) omaavat laadut kaura ja raiheinä. Murskauksen jälkeen kuivimmat rehulaadut, erityisesti kaura, poikkesivat muista lopputuotteen ollessa koostumukseltaan ilmvaa ja kevyttä.

Taulukko 3. Säilörehun esikäsitteilyyn käytettyjen jauhelihamyllyn ja seosrehuvaunujen lopputuotteen partikkelikoko sekä seosrehuvaunujen murskauserän suuruus ja murskaukseen käytetty aika.

	Murskauserän paalimäärä (kpl)	Murskausaika (min)	Lopputuotteen partikkelikoko (mm)	Yksittäisten pitempien kasvinosien partikkelikoko (mm)
Jauhelihamylly			0-50	115
Pystyruuvinen seosrehuvaunu (Kuhn)	3	100	0-40	140
	3	50	0-40	140
Vaakaruuvinen seosrehuvaunu (Elho)	3	60	0-40	100
	2	35	0-50	140

4.2. Sekoitussäiliön toiminta

4.2.1. Kasvin ja lannan sekoittaminen ja kasvin käyttäytyminen sekoitussäiliössä

Kasvi-lanta-seokset tehtiin sekoitussäiliöön, jossa seos viipyi 6-18 d vähentyen päivittäin tapahtuvan reaktoriin syötön mukaisesti. Voimakkaaseen lantasuuhkuun syötetty kasvisilppu sekoittui homogeeniseksi seokseksi lannan kanssa sekoitussäiliössä, ja ainoastaan vähäisiä kasvipaakkuja muodostui syötteen sekoitushetkellä. Kasvimassan lisääminen lannan sekaan nosti seoksen jäykkyyttä. Lisättäessä 3 rehupaalia 35,3 m³:iin lantaa seoksen TS nousi timotein 1. sadon kohdalla keskimäärin 0,5 %-yksikköä, kauran kohdalla 1,4 %-yksikköä ja raiheinän kohdalla 1,2 %-yksikköä.

Kasvimassa nousi kaksi kertaa päivässä tapahtuvien sekoitussäiliön sisällön sekoitusten välissä säiliön pintaan muodostaen tiiviin lautan, joka ei sekoituspumppulla sekoittunut lannan sekaan. Kasvilautta hajotettiin lietepumppulla, jonka suihku kohdistettiin ylhäältä päin sekoitussäiliön pintaan. Kasvi ja lanta saatiin sekoituspumppulla sekoittumaan, kun seoserän kokonaismäärä oli 37 m³, kuten kaikissa timotein 1. sadon seoserissä, joissa sekoitettiin 3 rehupaalia 35 m³:iin lantaa. Seoksen kokonaismäärän ollessa 62 m³ (timotein 2. sadon paaleja 5 kpl 59 m³:iin lantaa) massaa ei saatu tarpeeksi tehokkaasti sekoitettua, jolloin reaktorin syöte oli alkuun laihaa seosta ja lopussa paljon kasvia sisältävää jäykkää massaa, jota laimennettiin lisäämällä sekaan lantaa. Sekoitusta saatiin parannettua, kun säiliön alaosaan puhaltaneen sekoituspumppun ulostulovirta ohjattiin pumppuun lisätyn putken avulla säiliön ylempään kerrokseen, jonne kasvimassa pyrki nousemaan. Tämän jälkeen saatiin sekoitettua myös 57 m³:n seoserä, jossa oli 4 kpl timotein 2. sadon paaleja 54 m³:ssä lantaa.

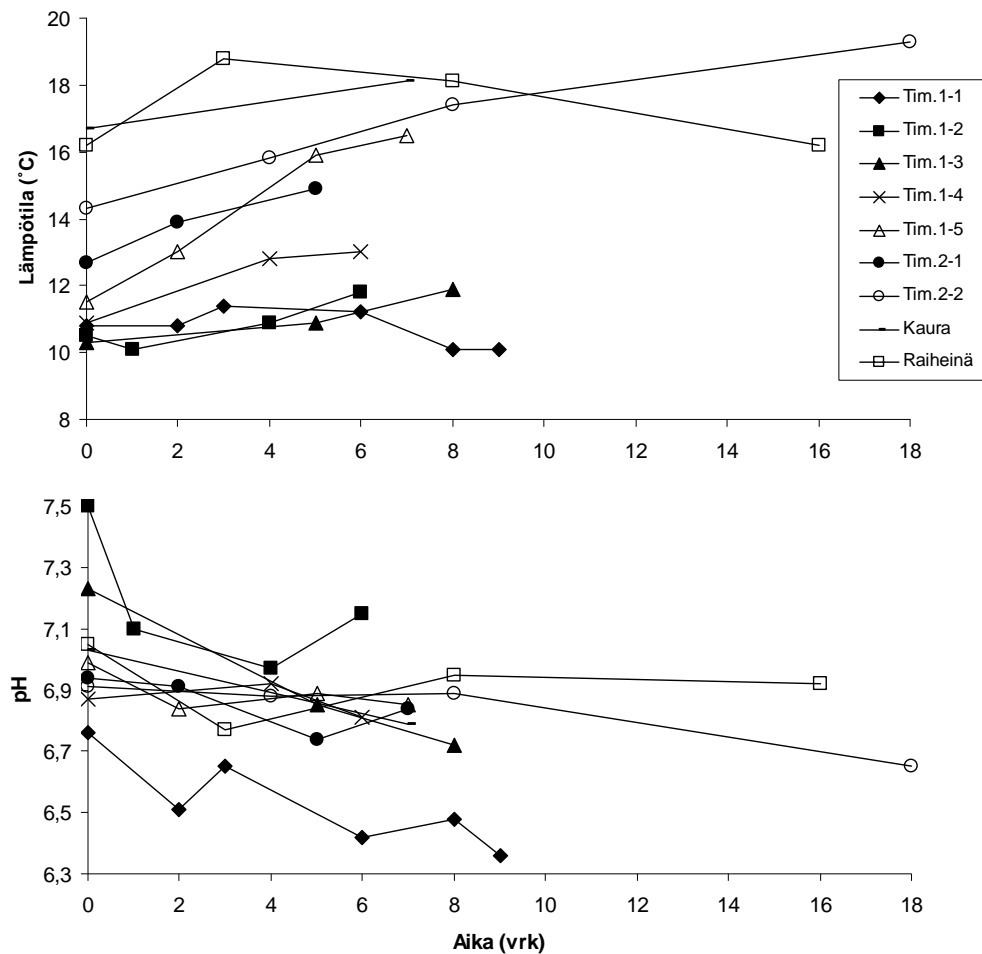
Kasvin ja lannan sekoitushetken jälkeen syötteen seisottaminen yön yli (12 tuntia) paransi syötteen pumppattavuutta. Syöttöpumppun kapasiteetti riitti koejaksolla käytettyjen kasvi-lanta -seoksien pumppaamiseen, kunhan massa oli homogeeniseksi sekoitettu. Huonosti sekoittuneen seoksen jäykkää paljon kasvia sisältävää massaa syötettäessä syöttölinjan putken paine nousi korkeaksi, ja pumppauslaitteiston toimintakyky oli ylärajoilla, jolloin seokseen jouduttiin lisäämään lantaa.

4.2.2. Sekoitussäiliön olosuhteet

Sekoitussäiliön lämpötila oli riippuvainen vuodenajan mukaan muuttuvasta raakalannan lämpötilasta. Koejaksolla lämpötila oli keskimäärin toukokuussa 10,7 °C, kesäkuussa 13,9 °C ja heinäkuussa 17,5 °C (Kuvat 4 ja 8). Kasvi-lanta -seosten lämpötilat nousivat sekoitussäiliössä 0-5 °C (lukuun ottamatta ensimmäistä seosta, jossa laski 0,7 °C).

Seosten pH:t olivat seosten tekohetkellä 6,8-7,5. Kaikissa seoksissa pH laski sekoitussäiliössä 0,1-0,5 pH-yksikköä (Kuva 4). VFA-pitoisuus nousi sekoitussäiliössä kaikissa seoksissa 0,5-2,5 g/l (Kuva 5). VFA-pitoisuus oli koejakson alussa n. 4,2 g/l, mutta nousi jakson edetessä ollen suurimmillaan n. 8,0 g/l. Myös SCOD nousi ollen koejakson alussa noin 20 g/l ja korkeimmillaan 38,8 g/l koepäivän 81 kohdalla. Sekoitussäiliöstä havaittiin noin kolmen vuorokauden jälkeen seoksen tekopäivästä nousevan kaasukuplia. Kasvi-lanta -seoksista

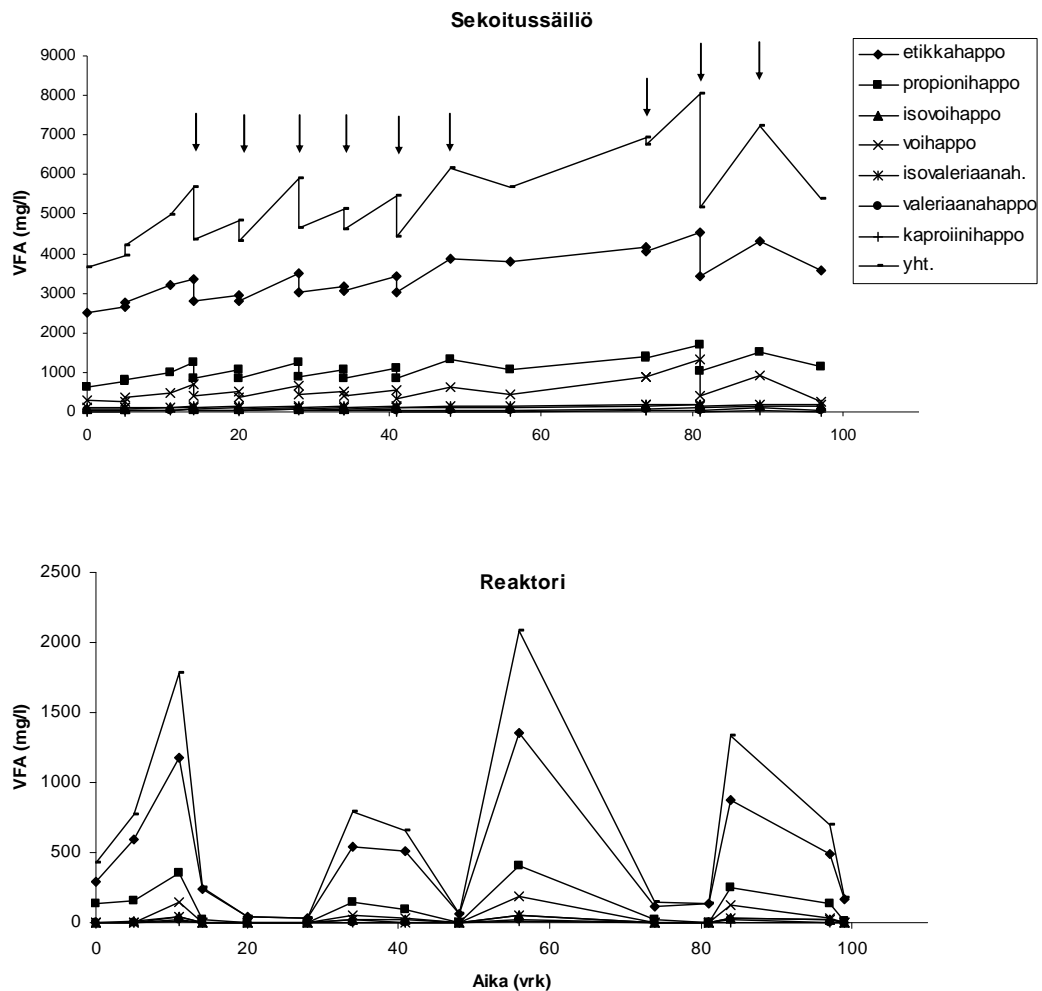
tehdyistä muista analyyseista ei havaittu trendejä kyseisten olosuhteiden muutoksista sekoitussäiliössä (Taulukko 4).



Kuva 4. Sekoitussäiliön seoserien (timotei 1. sato seoserät 1-5; timotei 2. sato seoserät 1-2; kaura; raiheinä) lämpötila ja pH sekoitushetkestä alkaen.

Taulukko 4. Reaktoriin menevän (sekoitussäiliö) ja käsitellyn materiaalin ominaisuudet kasvin ja lannan yhteiskäsittelyjakson aikana (keskiarvo \pm keskihajonta).

	Lämpötila (°C)	pH	TS (%)	VS (%)	SCOD (g/l)	NH ₄ -N (g/l)	N-tot (g/l)	VFA (g/l)	PA (mg CaCO ₃ /ml)	TA (mg CaCO ₃ /ml)
Sekoitussäiliö (käsittelemätön)	13,7 \pm 2,9	6,9	8,2 \pm 0,7	6,8 \pm 0,6	26,1 \pm 7,3	1,1 \pm 0,1	2,8 \pm 0,3	5,34 \pm 1,11	4,2 \pm 0,8	9,3 \pm 1,2
Reaktori (käsitelty)	31,2 \pm 4,5	7,6	6,0 \pm 0,4	4,7 \pm 0,4	18,7 \pm 7,7	1,2 \pm 0,2	3,1 \pm 0,3	0,63 \pm 0,65	8,9 \pm 1,4	10,9 \pm 1,2
Vähennemä reaktori- käsittelyn jälk.			26,8 (%)	30,9 (%)				88,2 (%)		



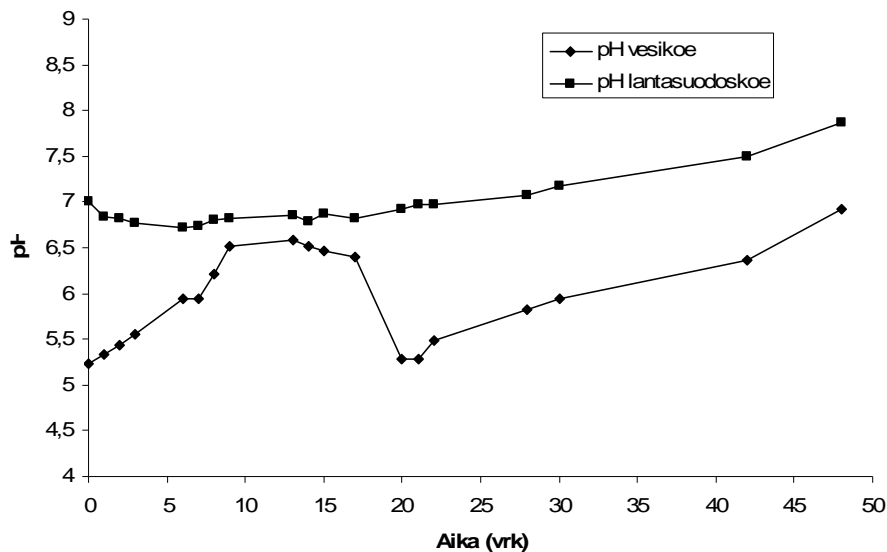
Kuva 5. Reaktoriin menevän (sekoitussäiliö) ja käsitellyn materiaalin (reaktori) haihtuvien rasvahappojen pitoisuudet koejakson aikana. Sekoitussäiliön kasvi-lanta -seoserien valmistusajankohdat merkitty nuolilla.

4.2.3. Sekoitussäiliön olosuhteiden simulointi laboratoriossa

Kasvimassan käyttäytymistä sekoitussäiliössä tutkittiin laboratoriossa sekoittamalla kasvia vesijohtoveden, lantasuodoksen ja raakalannan kanssa lasisissa koeastioissa. Veteen sekoitettaessa (koeastia A) säilörehu jakaantui heti tasaisesti koko vesipatsaaseen vajoten 2-3 d:ssa astian pohjaa kohti ja nousten jälleen noin 20 d:n kuluttua veden pintaan tiiviiksi lautaksi. Juoksevaan lantasuodokseen sekoitettaessa (koeastia B) kasvi sekoittui aluksi tasaisesti kuten veteenkin, mutta nousi jo 2-3 päivän kuluttua tiiviiksi lautaksi astian pinnalle, ja tuotti myös

runsaasti kaasukuplia. Kasvi pysyi pääosin kokeen loppuun asti astian yläosassa muodostaen kovan kuoren pintaan, joskin koepäivän 8 jälkeen osa kasvimassasta vajosi lähemmäksi pohjaa. Sekoitettaessa säilörehua raakalannan kanssa (koeastiassa C 20 % VS:stä ja koeastiassa D 40 % VS:stä kasvia) kasvimassa nousi ensimmäisinä vuorokausina etenkin koeastiassa C pintaan, mutta jo koepäivästä 4 lähtien kasvi pysyi sekoittuneena lannan kanssa. Kaasukuplia muodostui runsaasti kolmannesta vuorokaudesta lähtien.

Lämpötila oli kaikissa kokeissa 19,5-22,9 °C. Lannan puskuroiva vaikutus biokaasuprosessissa ilmeni sekoitettaessa hapanta säilörehua (pH 5,3) veden ja lantasuodoksen kanssa, sillä pH oli heti seoksen tekohetkellä vesiseoksessa 5,3, kun se lantasuodos-seoksessa oli 7,0 (Kuva 6). pH lantasuodos-seoksessa laski alkupäivinä 6,7:ään ja lähtien siitä nousemaan. Vesiseoksen pH nousi aluksi 6,6:een ja laski uudelleen 5,3:een koepäivien 15-20 aikana. Samaan aikaan pH:n laskiessa kasvi myös nousi vedessä pintaan tiiviiksi lautaksi, ja seos tuotti runsaasti kaasukuplia, joten kasvimassaan nostevoimia synnyttäviä hiilidioksidukuplia ja mahdollisesti haihtuvia rasvahappoja alkoi todennäköisesti syntyä tuolloin.

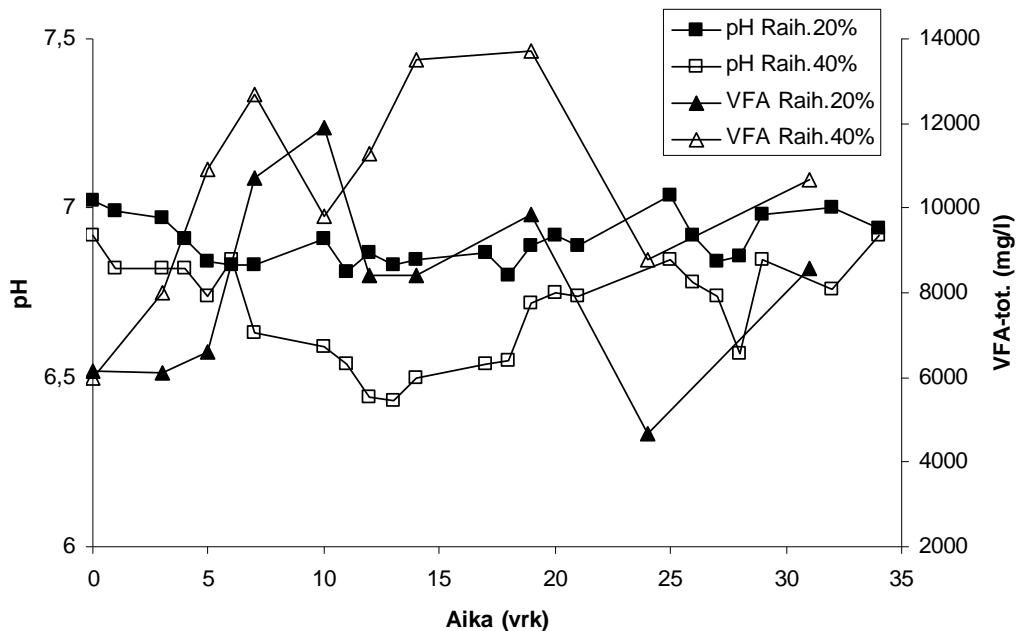


Kuva 6. pH:n muuttuminen sekoitettaessa Timotein 1. sadon säilörehua vesijohtoveden ja lantasuodoksen kanssa.

Lantaan sekoitettaessa pH laski kasvin VS:ää 20 % syötteen VS:stä sisältäneessä seoksessa (koeastiassa C) 0,2 pH-yksikköä seitsemän ensimmäisen koepäivän aikana (Kuva 7). Enemmän kasvia sisältäneessä seoksessa (40 % VS:stä kasvia, koeastiassa D) pH laski hieman

enemmän (0,5 pH-yksikköä) 15 ensimmäisen koepäivän aikana, jonka jälkeen se nousi neutraalille tasolle, kuten alussakin. VFA:n pitoisuus oli molemmissa seoksissa alussa noin 6000 mg/l. Kasvia 20 % VS:stä sisältäneessä seoksessa pitoisuus nousi koepäivien 5-10 aikana maksimiin (12000 mg/l), jonka jälkeen pitoisuus lähti laskuun. Kasvia 40 % VS:stä sisältäneen seoksen VFA-pitoisuus lähti ensimmäisinä päivinä nousuun ja oli 7 päivän kuluttua 12700 mg/l. Suurimmillaan pitoisuus oli noin 13600 mg/l koepäivien 14-19 kohdalla.

Seoksista mitattiin myös SCOD, mutta tuloksissa oli melko suurta hajontaa, eikä selkeää hydrolyysin aiheuttamaa SCOD:n nousua ollut havaittavissa. Pitoisuudessa oli pikemminkin lievä laskeva trendi, mikä voi selittyä VFA:n ja muiden orgaanisten haihtuvien yhdisteiden haihtumisella kokeen aikana. SCOD:n pitoisuus oli koeastiassa C $22,3 \pm 4,1$ g/l (\pm keskihajonta) ja koeastiassa D suuremman kasvipitoisuuden myötä korkeampi $27,0 \pm 3,6$ g/l. Vaikka SCOD:n pitoisuudessa ei havaittukaan nousua, voidaan VFA:n lisääntymisen perusteella todeta, että sekoitussäiliössä tapahtuu orgaanisen aineen hydrolysoitumista laboratorionkokeiden mukaisessa noin 20 °C:een lämpötilassa heti ensimmäisistä päivistä lähtien, kun kasvia on 40 % VS:stä (koeastia D), ja viidennestä päivästä lähtien, kun kasvia on 20 % VS:stä (koeastia C).



Kuva 7. pH ja VFA:n pitoisuus kokeessa, jossa sekoitettiin lantaan raiheinää 20 % VS:stä (koeastia C) ja 40 % VS:stä (koeastia D).

4.3. Reaktorin toiminta

4.3.1 Sekoitus ja olosuhteet

Kasvi-lanta-seosta syötettiin reaktoriin keskimäärin $5,1 \text{ m}^3/\text{d}$, ja kuormitus oli timotein 1. sadon syöttöjaksolla (koepäivät 8-40) keskimäärin $3,2 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$, timotein 2. sadon jaksolla (päivät 41-73) $2,9 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$, kauran syöttöjaksolla (päivät 74-80) $2,6 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$ ja raiheinän jaksolla (päivät 81-91) $3,1 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$ (Kuva 4.6). Syötössä oli katkoksia koepäivien 5-7 kohdalla, koska reaktorista oli suurella lantamäärällä huuhdottu pois makeistehtaalta tulevaa substraattia, ja syötössä pidettiin taukoa ennen kasvinsyöttökokeiden aloittamista, sekä koepäivien 71-73 aikana, jolloin raakalantapumpun rikkoutuminen esti uuden seoserän tekemisen.

Reaktorin lapasekoittajan havaittiin vaativan enemmän virtaa, kun reaktoriin oli syötetty n. 50 päivää kasvia. Sekoittajan lapoihin todennäköisesti kertyi hitaasti hajoavista kasvikuuduista koostuvia kasvinosia jarruttamaan sekoitusta, sillä sekoittimen kuorma keveni, kun sekoitinta käytettiin hetki normaalista päinvastaiseen pyörimissuuntaan. Koepäivästä 50 alkaen sekoittajaa käytettiin päivittäin hetken aikaa päinvastaiseen suuntaan koejakson loppuun asti.

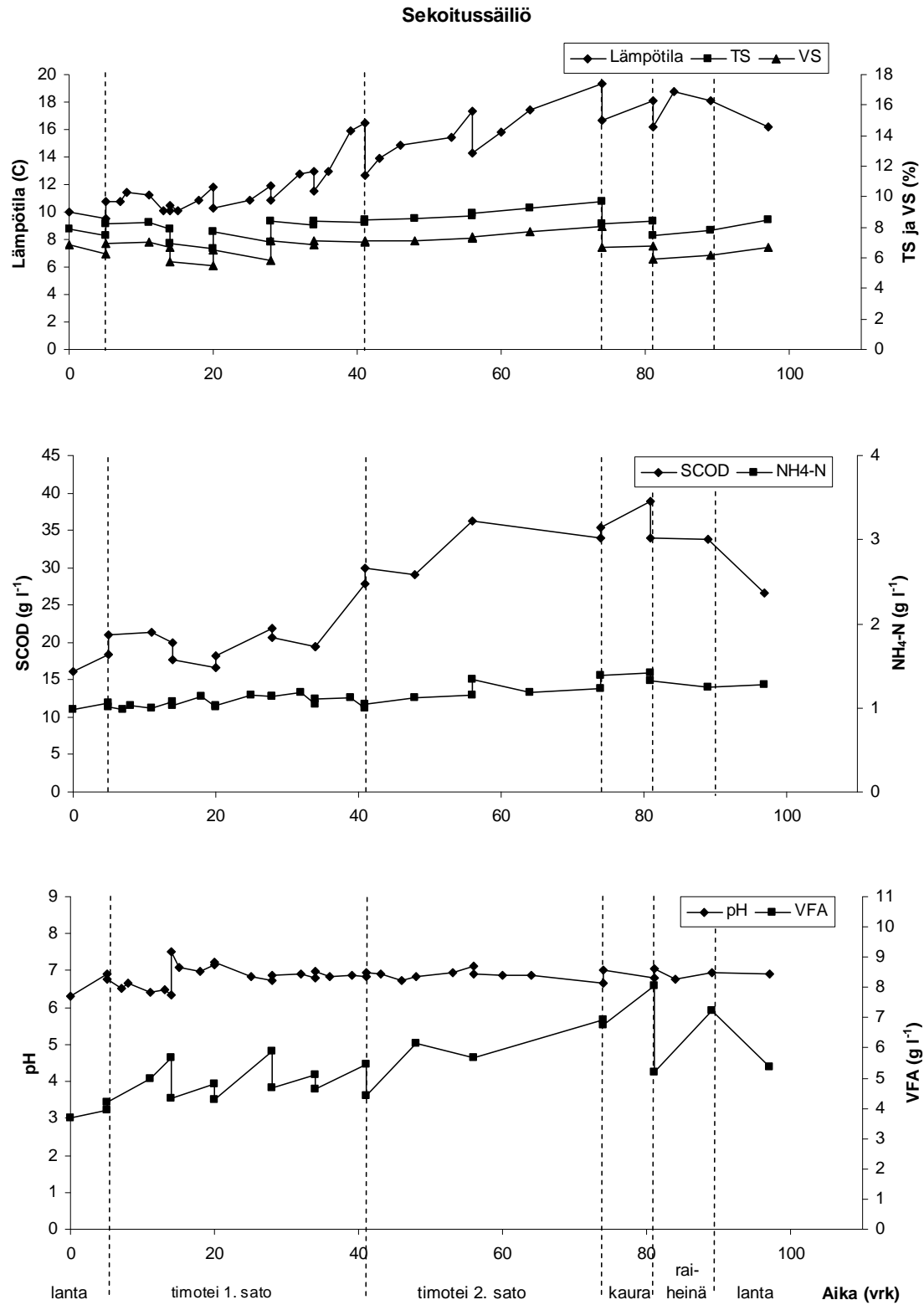
Reaktorin lämpötila oli koejakson aikana keskimäärin $37,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Lämpötila oli alimmillaan koepäivän 25 kohdalla ($32,4 \text{ }^\circ\text{C}$), mistä lämpötila nousi tasaisesti ollen korkeimmillaan koepäivän 72 kohdalla ($42,0 \text{ }^\circ\text{C}$). Reaktorin pH oli koejakson ajan 7,3-7,8. Kokonaistypen pitoisuus reaktorissa oli kasvinsyöttöjakson puoleen väliin asti keskimäärin $2,9 \text{ g/l}$, ja nousi hieman kokeen loppupuolella ollen keskimäärin $3,6 \text{ g/l}$. Ammoniumtypen ($\text{NH}_4\text{-N}$) pitoisuus oli koejakson alussa $1,0 \text{ g/l}$, ja myös se nousi hiljalleen $1,5 \text{ g/l}$ kokeiden edetessä. Typen kokonaismäärästä oli epäorgaanisessa ammoniumtypen muodossa 33-44 %. Osittainen alkaliteetti (PA, partial alkalinity) oli kasvinsyöttöjakson alkupuoliskolla keskimäärin $8,2 \text{ mg CaCO}_3/\text{ml}$, ja noin koepäivästä 50 lähtien keskimäärin $10,1 \text{ mg CaCO}_3/\text{ml}$. Kokonaisalkaliteetti (TA) oli koejakson alussa $9,5 \text{ mg CaCO}_3/\text{ml}$ ja nousi tasaisesti ollen lopussa $12,7 \text{ mg CaCO}_3/\text{ml}$. Osittaisen alkaliteetin ja kokonaisalkaliteetin suhde oli keskimäärin 0,8, ja vaihteli vain vähän (0,7-0,9 välillä) kasvinsyötön aikana.

4.3.2 Reaktorin kaasuntuotto ja orgaanisen aineen vähenemä

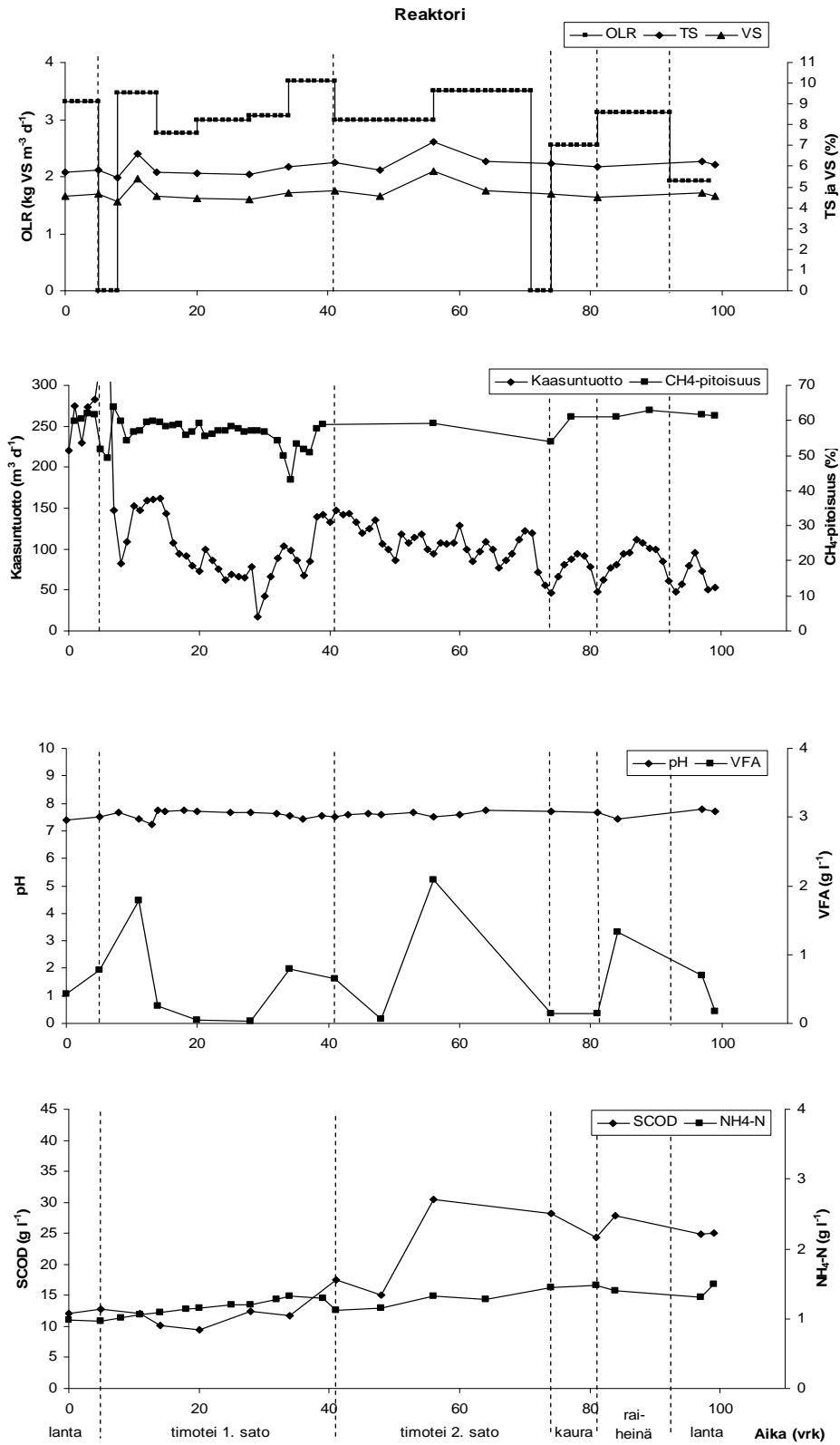
Reaktorin kaasuntuotto nousi hetkellisesti kasvinsyötön aloituksen kohdalla (Kuva 9). Kaasuntuotossa oli heikompi jakso kasvinsyötön aloituksen jälkeen koepäivinä 16-37. Päivien 29-37 häiriöt kaasun mittauksessa selittyvät laitoksen huoltotöillä, joissa mm. kaasun tilavuusmittari vaihdettiin uuteen.

Koepäivästä 38 alkaen kasvinsyöttöjakson loppuun asti reaktorin kaasuntuotto oli keskimäärin $96,9 \text{ m}^3/\text{d}$, ja kaasun CH_4 -pitoisuus keskimäärin $59,3 \%$. Metaanintuotto oli siten $57,3 \text{ m}^3/\text{d}$. Tuona aikana reaktoriin syötettiin keskimäärin $343 \text{ kgVS}/\text{d}$, jolloin ominaismetaanintuotto oli $0,167 \text{ m}^3/\text{kgVS}$. Kaasuntuotto oli koejakson puolivälissä timotein 2. sadon syöttöjaksolla $108,1 \text{ m}^3/\text{d}$ ($57,7 \%$ CH_4), jolloin ominaismetaanintuotto oli $0,177 \text{ m}^3/\text{kgVS}$. Koepäivien 71-73 syöttökatkos näkyy selvästi kaasuntuoton alenemisena, ja tuosta ajankohdasta koejakson loppuun kauran ja raiheinän syöttöjaksoilla kaasuntuotto oli keskimäärin $86,0 \text{ m}^3/\text{d}$. CH_4 -pitoisuus oli tuolloin $61,4 \%$, jolloin ominaismetaanintuotto oli $0,148 \text{ m}^3/\text{kgVS}$.

Reaktoriin syötetyn substraatin VS:n hajoaminen biokaasuksi näkyy TS-, VS-, SCOD- ja VFA-pitoisuuksien alenemisena reaktorikäsittelyn aikana (Taulukko 4, Kuvat 8 ja 9). TS oli reaktoriin menevässä materiaalissa keskimäärin $8,2 \%$ ja käsitellyssä materiaalissa $6,0 \%$. Käsitelty materiaali oli myös selvästi juoksevampaa ja helposti pumpattavaa. VS oli reaktoriin menevässä materiaalissa $6,8 \%$ ja käsittelyn jälkeen $4,7 \%$, jolloin VS:n vähenemä oli $30,9 \%$. SCOD oli ennen käsittelyä keskimäärin $26,1 \text{ g}/\text{l}$ ja käsittelyn jälkeen $18,7 \text{ g}/\text{l}$, jolloin SCOD:n vähenemä oli $28,4 \%$. VFA:n pitoisuus oli reaktoriin menevässä materiaalissa keskimäärin $5,3 \text{ g}/\text{l}$ ja käsitellyssä materiaalissa $0,6 \text{ g}/\text{l}$. Käsitellyn materiaalin VFA-pitoisuuksien suuret piikit johtuvat todennäköisesti näytteenoton ajoittumisesta heti reaktorin syöttöhetken jälkeen, jolloin VFA-pitoisuus reaktorissa oli korkeimmillaan.



Kuva 8. Reaktoriin menevän materiaalin (sekoitussäiliö) ominaisuudet (lämpötila, TS, VS, SCOD, NH₄-N, pH, VFA) koejakson aikana.

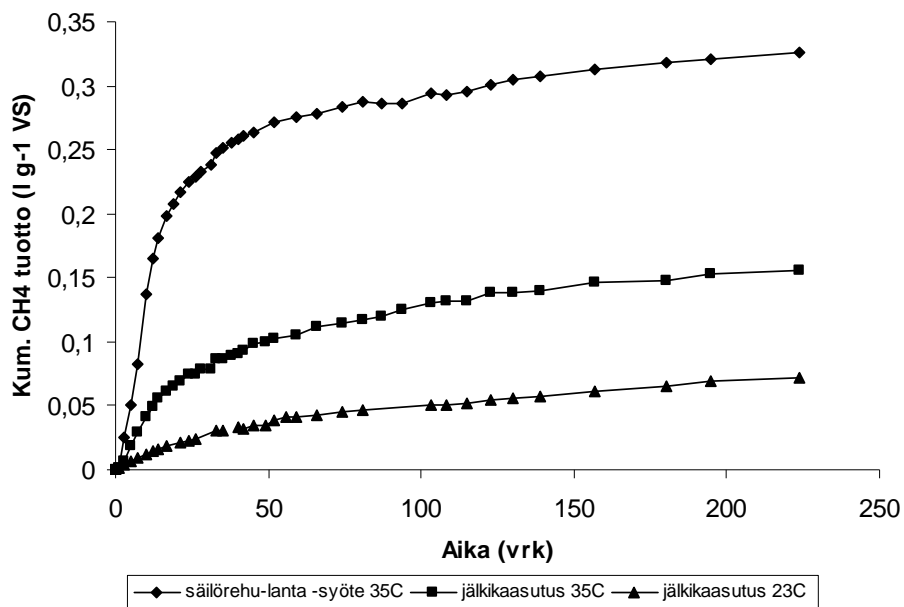


Kuva 9. Reaktorissa käsitellyn materiaalin ominaisuudet (TS, VS, pH, kokonais-VFA, SCOD, NH₄-N) ja biokaasuprosessin olosuhdetietoja (OLR, kaasuntuotto, CH₄-pitoisuus) koejakson aikana.

4.4. Metaanintuotto- ja jälkikaasutuskokeet

Panoskokeilla määritettiin metaanintuottopotentiaali kasvi-lanta -syötteelle, joka oli viipynyt sekoitussäiliössä 8 d. Timoteitä 4,7 % painosta sisältäneen kasvi-lanta -syötteen (kasvin VS:ää 10,7 % seoksen VS:stä) metaanipotentiaali oli 0,325 l/gVS (35 °C, 224 d) (Kuva 10). Täyden mittakaavan reaktorikoeajossa keskimääräinen viipymä oli 24 d, ja tuossa ajassa panoskokeiden metaanintuotto oli timotei-lanta -seoksella 0,224 l/gVS, mikä on 69 % metaanipotentiaalista.

Jälkikaasutuskoe tehtiin biokaasureaktorissa käsitellylle lietteelle, josta otettiin näyte 56 d kasvinsyötön aloituksen jälkeen. Jälkikaasutuspotentiaali 224 d:n aikana oli 35 °C:ssa 0,155 l/gVS ja 23 °C:ssa 0,071 l/gVS. Alhaisempi käsittelylämpötila kuvastaa paremmin lämmittämättömän jälkikaasuuntumisaltaan olosuhteita, ja mikäli lietteen viipymä altaassa on 90 d, on jälkikaasutuksesta saatava metaanisaanto panoskokeiden mukaan 0,048 l/gVS, mikä on 17,5 % koko laitoksen metaanintuotosta.



Kuva 10. Säilörehu-lanta -syötteen metaanintuottopotentiaali (35 °C) (syötteessä timotei-säilörehua 4,7 % painosta ja säilörehun VS:ää 10,7 % seoksen VS:stä) sekä reaktorissa käsitellyn materiaalin jälkikaasuuntumispotentiaali (35 ja 23 °C)

5. TULOSTEN TARKASTELO

5.1. Biokaasulaitoksen tekniset edellytykset säilörehun ja lannan käsittelyssä

5.1.1 Kasvimassan silppuaminen

Säilörehun silppuaminen seosrehuvaunuilla pääosin 0-50 mm:n partikkelikokoon (yksittäisiä pidempiä kasvukorsia, maksimi 140 mm) oli biokaasulaitoksen teknisen toimivuuden, kuten pumppujen ja putkilinjojen kannalta riittävä. Pysty- ja vaakaruuvilla seosrehuvaunuilla päästiin yhtä hyvään hienonnustulokseen, mutta silppuaminen vaati energiapanostusta, sillä kolmea paalia silputtiin 50-60 min, ja 12-13 m³:n sekoituskapasiteetin seosrehuvaunu tarvitsee käyttövoimaksi 59-80 kW:n traktorin. Toisaalta tehokkuutta voidaan kasvia paljon käyttävässä laitoksessa parantaa suuremmalla rehuvaunulla, sillä 18-22 m³:n sekoituskapasiteetin rehuvaunun vaatima traktoriteho on 60-90 kW (El-Ho Oy 2008; NHK-Keskus Oy 2008). Työ- ja energiapanostusta voitaisiin pienentää silppuamalla energiakasvit biokaasuprosessiin sopivaksi jo korjuun yhteydessä tarkkuussilppurilla ja säilömällä rehu laakasiiloon tai aumaan. Tarkkuussilppuri voi olla traktorikäyttöinen (voimanottoakselin tehon tarve 40-100 kW) tai ajettava malli, joka hyvin laajamittaiselle rehunteolle on taloudellisin ja tehokkain työkonie (moottoriteho 220-570 kW) (Weiland 2003; Suokannas 2004).

Kasveista voitaisiin saada suurempia metaanisaantoja silppuamalla ne pienempään partikkelikokoon kuin seosrehuvaunun lopputuote (partikkelikoko 40-50 mm), sillä energiakasveilla kuten vehnän ja riisin oljilla on saatu 4-10 % suurempia metaanintuottoja partikkelikoolla 0,088-0,40 mm verrattuna 1-30 mm:n partikkelikokoon. Toisaalta mehevien kasvinosien, kuten kasvin lehtien osalta suuretkin partikkelikoot ovat tuottaneet hyvin kaasua (Sharma ym. 1988). Kaparajun (2003) mukaan optimaalinen partikkelikoko riippuu myös kasvilajista ollen esimerkiksi nurmiheinälle 10 mm. 40-50 mm:n partikkelikoko on kuitenkin biokaasuprosessia varten teknis-taloudellisesti saavutettavissa, ja kaasuntuotto voidaan maksimoida lisäksi kasvilajin valinnalla, oikealla korjuuajankohdalla korsiintumisen välttämiseksi sekä hajoamisolosuhteita edistävällä varastoinnilla ja esikäsittelyllä.

5.1.2 Kasvin ja lannan sekoitus ja syöttö reaktoriin

Säilörehu saatiin hyvin sekoitettua sekoitussäiliön lannan kanssa syöttämällä kasvisilppu lantasuuhkuun, joka painoi kasvimassan lannan nestepinnan alapuolelle. Vastaavia lannan kierrätykseen perustuvia menetelmiä käytetään myös kasvimateriaalin erillisessä reaktoriin syötössä ja reaktorissa pintaan muodostuvan kasvikerroksen hajotuksessa (Hobson & Wheatley 1993). Kasvimassa kuitenkin nousi sekoitussäiliön pinnalle lautaksi, jonka hajotus tuotti toisinaan ongelmia lietepumppu-sekoittimella. Vastaavaa ilmiötä esiintyy myös kasvimassaa käsittelevissä reaktoreissa etenkin reaktorin sekoituksen ollessa katkonaista, ja ongelmaa pahentaa kasvikerroksen kuivuminen ja kovettuminen pinnasta, jolloin reaktorista ulostuleva effluentti sisältää vain nestemäistä jätettä kiintoaineen kasautuessa reaktoriin (Hobson & Wheatley 1993). Lietepumppu-sekoittimeen tehty virtaussuunnan muuttaminen horisontaaliseksi ja lähelle sekoitussäiliön pintaan auttoi kasvikerrostuman hajotuksessa, ja potkurisekoittajan lisääminen sekoitussäiliöön auttaisi todennäköisesti pitämään syötteen homogeenisena massana.

Koeajon aikana syötteen suurimmalla TS-pitoisuudella (9,3 %) sekoitussäiliön lietepumppu, reaktorin syöttöpumppu, syöttölinja ja reaktorin sekoitin toimivat, mutta syötteen jäykkyys oli laitoksen teknisen toimintakyvyn ylärajoilla. Lisäksi koeajo ja laboratoriokokeet osoittivat, että kuitumaisen energiakasvin lisääminen lantaan siten, että seoksen TS nousee 0,5-1,4 %-yksikköä nosti huomattavasti seoksen jäykkyyttä. Jatkuvatoimiset kiinteitä materiaaleja käsittelevät laitokset toimivatkin usein tavanomaisen CSTR-reaktorin laitteistoilla ainoastaan 4-8 %:n TS-pitoisuuden syötteillä, ja korkeamman TS-pitoisuuden materiaalien käsittelyyn vaaditaan muita teknisiä ratkaisuja. Näitä ovat reaktorin syöttö ruuvikuljettimella tai syöttömännällä ja reaktorin sekoitus kaasun avulla, ruuvisekoittimella tai lietettä pintaan nostavalla ja pintakerrostuman rikkovalla lietteen kierrätyksellä. Reaktorin sylinterimäisen muodon sijaan munan muotoisessa reaktorissa on optimoitu reaktorin sekoitus ja virtausolosuhteet sekä suippenevan reaktorin yläosan myötä minimoitu kaasu-neste -rajapinta, jolloin vaahdonmuodostus vähenee. Hyvin korkean TS:n käsittelyyn on myös käytetty ruuvilla syötettävää kaasusekoitteista jatkuvatoimista reaktoria, jossa lietereaktorin tyypillistä nestemäistä faasia ei ole, vaan käsiteltävä materiaali on niin jäykkää, että kiintoaine pysyy massan seassa laskeutumatta pohjalle ja kerrostumatta pintaan (Hobson & Wheatley 2003).

Sekoitussäiliön mallinnuskokeessa laboratoriossa olosuhteet olivat tämän kaltaiset, kun säilörehun VS:ää oli seoksen VS:stä 40 % (koeastiassa D).

5.2 Olosuhdetekijät säilörehun ja lannan käsittelyssä

5.2.1 Sekoitussäiliö

Sekoitussäiliön massan lämpötila oli toukokuussa 10,7 °C ja heinäkuussa 17,5 °C. Seoserien lämpenemiseen 0-5 °C:lla säiliössä viipymisen aikana vaikuttivat sääolot, syöte-erän suuruus, viipymä sekoitussäiliössä sekä mahdollisesti mikrobitoiminnasta aiheutuva lämmöntuotto.

Sekoitussäiliön olosuhteita kuvastaneessa laboratoriokokeessa havaittiin noin 21 °C:ssa pH:n laskevan ja VFA-pitoisuuden nousevan 10-15 päivän aikana, kun säilörehua sekoitettiin lannan kanssa (säilörehun VS:ää 20 % ja 40 % seoksen VS:stä), mikä osoittaa hydrolyysin alkamista kyseisissä olosuhteissa. pH:n lasku johtuu todennäköisesti kasvin ja lannan hajoamisessa syntyvän hiilidioksidin liukenemisesta seokseen sekä VFA-pitoisuuden noususta. Mitatut VFA-pitoisuudet olivat kokeen alussa 6000 mg/l ja suurimmillaan 12000-13600 mg/l, mutta todellisuudessa kasvi-lanta-seoksissa muodostuneen VFA:n määrä oli vielä suurempi, sillä laboratoriokokeiden pienen mittakaavan vuoksi VFA:n haihtuminen koeastioista on suurta, mikä näkyy alhaisempina mitattuina VFA-pitoisuuksina. Vastaavasti myös syntyneen hiilidioksidin suurempi haihtuminen koeastioissa verrattuna täyden mittakaavan sekoitussäiliöön näkyy laboratoriokokeiden hieman korkeampana pH:na ja pH:n nousuna kokeiden loppua kohti. Tilannetta tosin kompensoi veden haihtuminen kasvi-lanta -seoksista. pH- ja VFA-mittaukset tukevat toisiaan ja osoittavat pH:n olevan alhaisimmillaan koepäivinä, jolloin VFA:n määrä on suurimmillaan.

Hydrolyysi alkoi myös huomattavasti alemmissa lämpötiloissa ja pienemmällä seoksen säilörehupitoisuuksilla, sillä myös täydenmittakaavan sekoitussäiliössä havaittiin kasvi-lanta -seoksen pääosin 6-8 päivän viipymän aikana pH:n laskua, VFA-pitoisuuden nousua ja kaasukuplien muodostumista. Kaasukuplat saattoivat olla sekoituksen aikana massaan sitoutuneita ilmakuplia, mutta todennäköisesti suurin osa oli hajotustoiminnassa syntyvää hiilidioksidia ja mahdollisesti metaania. Sekoitussäiliön seoserät tehtiin panosperiaatteella, jolloin seoserästä alkuvaiheessa reaktoriin syötetyn syötteen hydrolysoituminen oli

lyhyemmän sekoitussäiliön viipymän myötä todennäköisesti alhaisempi kuin seoserän loppupuolella syötetyn.

Lämpötila vaikuttaa huomattavasti entsyymien aktiivisuuteen ja hydrolysoitumiseen (Sanders ym. 2003). SCOD:n ja VFA:n pitoisuudet olivatkin sekoitussäiliössä kesäkuukausina korkeammat kuin toukokuussa, myös vertailtaessa seoseriä, joissa säilörehu/lanta -suhde oli sama. Kasvi-lanta -seoksen havaittiin olevan helpommin pumpattavissa, kun seos oli tekoetken jälkeen seissyt säiliössä 12 tuntia, mikä todennäköisesti johtuu kasvin vettymisestä ja kasvikuittujen pehmenemisestä. Käsiteltävän kiinteän materiaalin inkubointia vedessä käytetään anaerobisen prosessin esikäsitteilyä, ja sekoitettaessa kasvimassaa nestemäisen lannan kanssa mahdollinen alkuvaiheen hajoaminen on avonaisesta sekoitussäiliöstä huolimatta lähes kokonaan anaerobista, sillä happea sekoittuu vain säiliön aivan ylimpään kerrokseen (Sharma ym. 1988; Hobson & Wheatley 1993).

Sekoitussäiliön simulointikokeissa havaittu lannan puskuroiva vaikutus on happaman säilörehun käsittelyssä etu, sillä vaikeasti hajotettavan kiderakenteisen selluloosan hydrolysoitumisen on havaittu olevan nopeinta pH 7,0:ssä (39,5 °C:ssa) alkaen 24 tunnin kuluttua mikrobiympin (vuohen suolistobakteerit) lisäyksen jälkeen ja hidastuen pH:n alentuessa. Tehokkain selluloosan hajoaminen (71 %) on saavutettu pH 7,0 – 7,5:ssä, ja hajoaminen estyy kokonaan pH:n laskiessa alle 5,5:n (Hu ym. 2005).

Kasvi-lanta -seoksista mitatuista SCOD-, TS-, VS-, NH₄-N- ja N_{tot}-pitoisuuksista ei havaittu trendejä kyseisen olosuhteen muutoksista, sillä näytteitä tulisi olla tiheämmin mittausjaksolta johtopäätösten tekemiseksi. Sekoitussäiliön sekoituskapasiteetin ollessa rajallinen tutkimustarkoituksiin suoritettavan näytteenoton kannalta tarvittaisiin useampia näytteitä trendien osoittamiseen.

5.2.2 Reaktori

Reaktorin orgaanisen aineksen kuormituksessa (OLR, keskimäärin 3,1 kgVS/m³d) päästiin koejakson biokaasuprosessissa, missä kasvimassa sekoitettiin lannan kanssa jo ennen reaktoriin syöttöä, hyvin lähelle suurinta mahdollista. Kiinteän kasvimateriaalin määrää ei olisi voitu seoksessa lisätä laitoksen tekniikan kuten pumppujen ja syöttölinjan toiminnan vuoksi, ja

toisaalta reaktorin syöttömäärän lisääminen olisi laskenut reaktorin viipymää (HRT koejaksolla keskimäärin 23,6 d). Energiakasvien (sokerijuurikkaan naatit, nurmisäilörehu, kauran olki) ja lehmänlannan yhteiskäsittelyssä on laboratorioskokeissa CSTR-reaktoreissa saatu parhaat ominaismetaanintuotot syötteen sisältäessä 30 % VS:stä kasvia OLR:n ollessa 2 kgVS/m³d ja HRT:n ollessa 20 d. Kuormituksen kasvattamisen ja HRT:n lyhentymisen myötä metaanintuoton reaktoritilavuutta kohti on havaittu kasvavan, mutta ominaismetaanintuoton vähenevän ja jälkikaasutuspotentiaalin lisääntyvän (Lehtomäki 2006). Koejaksolla käytössä ollutta biokaasuprosessia voitaisiin siis kehittää ja kaasuntuottoa maksimoida kasvattamalla syöteseoksen kasvipitoisuutta, pitämällä reaktorin viipymä vähintään 20 d:ssa ja hyödyntämällä käsitellyn materiaalin jälkikaasuuntumispotentiaali.

Reaktorin lämpötila oli koejaksolla keskimäärin varsin optimaalinen (37,2 °C), mutta lämpötilan nousu jakson loppupuolella 42 °C:een oli yli mesofiilisen lämpötila-alueen ylärajan, ja etenkin metanogeneesi on herkkä lämpötilan suhteen (García-Heras 2003; Mata-Alvarez 2003). Lämpötilan vaihtelu johtuu CHP-yksikön tuottaman lämpökuorman ajamisesta reaktoriin enemmän kesäaikaan, jolloin tuotetun lämmön hyödyntäminen muualla on vähäisempää. Reaktorin alhainen VFA-pitoisuus (0,6 g/l) kuitenkin osoittaa metanogeenien toimineen myös koejakson loppupuolella, sillä VFA-pitoisuus on tyypillisesti reaktorissa 0,2-2 g/l. Reaktorin pH koejaksolla (7,3-7,8) oli pääosin stabiilille prosessille tunnusomaisella 6,5-7,5 pH-alueella, ja vielä herkemmin prosessin vakaudesta kertova alkaliteetti oli koejakson aikana nousussa (9,5-12,7 mg CaCO₃/ml), kun se yleensä on biokaasureaktoreissa 2-4 mg CaCO₃/ml ja laskee prosessin mennessä epävakaaksi (Cecchi ym. 2003). Bikarbonaatin määrää kuvaavan osittaisen alkaliteetin (PA) ja VFA:n määrää kuvaavan kokonaisalkaliteetin (TA) suhde oli vakaa koko koejakson, mikä myös kertoo stabiilista prosessista (Björnsson ym. 2001; Cecchi ym. 2003). Reaktorissa ammoniumtyppipitoisuudella ei ollut inhibiiovaikutusta, sillä NH₄-N:n pitoisuus oli korkeimmillaankin 1,5 g/l, kun inhibiivaksi pitoisuudeksi on termofiilisessa lehmänlannan käsittelyssä havaittu 4 g/l (Angelidaki & Ahring 1993). Mesofiilisessa prosessissa ammoniumtypestä on matalamman lämpötilan vuoksi vielä pienempi osa haitallisessa ammoniakkin muodossa, jolloin mesofiilinen prosessi sietää tätäkin enemmän ammoniumtypeä (Hansen ym. 1998).

5.3. Kaasuntuotto ja kaasun laatu

Käsiteltävän materiaalin hajoamisesta ja kaasuntuotosta kertoo orgaanisen aineen vähenemä, ja koejaksolla reaktorikäsitellyssä kasvi-lanta -seoksen VS-pitoisuus aleni 30,9 %. Orgaanisen aineen hajoaminen oli alhainen siihen nähden, että pelkkää lehmänlantaa käsiteltäessä VS-vähenemä on tyypillisesti lietereaktoreissa 38 % (Hobson & Wheatley 2003). Lisäksi Lehtomäen (2006) mukaan VS-vähenemä kasvaa lisättäessä nurmi-säilörehun osuutta kasvi-lehmänlanta -syötteessä, ja on 41-53 % syötteen sisältäessä säilörehua 10-40 % VS:stä (HRT 20 d, OLR 2 kgVS/m³d). Toisaalta samoissa laboratoriokokeissa pelkän lehmänlannan käsitelyssä VS-vähenemän on havaittu olevan vastaavissa käsittelyoloissa 20-26 %, joten tämän tutkimuksen koejaksolla VS-vähenemä (30,9 %) oli kuitenkin tätä korkeampi. Koejaksolla SCOD:n pitoisuus reaktorissa nousi koeajon edetessä, mikä johtui SCOD:n pitoisuuden noususta samaan aikaan myös sekoitussäiliön syöte-seoksissa koepäivien 35-80 kohdalla.

Eri säilörehulaatujen kaasuntuottojen eroja ei tässä tutkimuksessa saatu selvitettyä, sillä tiettyjä rehulaatuja syötettiin reaktoriin niin lyhyen aikaa, että eri kasvilaadut sekoittuivat reaktorissa. Kasvin ja lannan yhteiskäsittelyssä syntyvä kokonaiskaasumäärä saadaan mitattua tarkasti ainoastaan biokaasureaktorin tuottaman kaasun osalta, sillä jälkikaasutussäiliössä syntyvä kaasu on peräisin hyvin pitkällä aikavälillä reaktorissa käsitellystä materiaalista sisältäen mm. makeistehtaan jätteitä, jolloin koejaksolla syötetyn substraatin jälkikaasutuksessa syntyvää kaasumäärää ei saada erikseen mitattua. Niinpä koko biokaasulaitoksen kokonaiskaasuntuottoa kasvin ja lannan yhteiskäsittelyn aikana voidaan vain arvioida panoskokeiden tulosten perusteella.

Kaasuntuoton nousu kasvinsyötön aloituksen kohdalla johtuu todennäköisesti edeltävästä syöttökatkoksesta, jonka jälkeen mikrobeille syötetty substraatti käytettiin tehokkaasti hyväksi, mistä aiheutui hetkellinen kaasuntuottopiikki. Säilörehun ja lannan yhteiskäsittelyä arvioitaessa on syytä jättää huomioimatta koejakson alun kaasuntuotto, sillä kasvi-substraatin pitoisuuden nousu reaktorissa vaatii vähintään reaktorin viipymän (23,6 d) pituisen ajanjakson kasvin syötön aloituksesta. Lisäksi reaktorin mikrobipopulaatio sopeutuu ajan myötä hyödyntämään reaktorin uutta kasvi-substraattia, jolloin kaasuntuottokin nousee.

Koejakson alkuvaiheen kasvipitoisuuden nousun jälkeen reaktorin ominaismetaanintuotto oli suurimman osan ajasta keskimäärin $0,177 \text{ m}^3/\text{kgVS}$, ja suurin osa syöte-eristä sisälsi noin 10 % VS:stä säilörehua. Vastaavalla syötekoostumuksella panoskoikeiden ominaismetaanintuotto oli 24 vrk:n (täyden mittakaavan reaktorikokeen viipymä) aikana $0,224 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ ja maksimi metaanintuottopotentiali (224 vrk:n aikana) oli $0,325 \text{ m}^3/\text{kgVS}$, joten reaktorin kaasuntuotto oli panoskoikeiden vastaavasta tuotosta 79 % ja syötteen teoreettisesta metaanipotentialista 54 %. Jos olettaa koejaksolla syötetyn materiaalin tuottavan jälkikaasutuksessa panoskoikeiden mukaisesti metaania vielä $0,048 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ (jälkikaasuuntumispotentiali 90 vrk:n viipymällä $23 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa), voidaan koko laitoksen tuotoksi arvioida $0,225 \text{ m}^3/\text{kgVS}$. Muissa tutkimuksissa on saatu vastaavia metaanintuottoja, sillä täyden mittakaavan biokaasulaitoksessa pelkän lehmänlannan metaanintuotoksi on koko laitoksen (reaktori ja jälkikaasuuntumisallas) kaasuntuotto huomioiden saatu $0,22 \text{ m}^3/\text{kgVS}$, ja energiakasvien lisäyksellä syötteeseen kaasuntuotto on ollut samaa luokkaa (Kaparaju 2003).

Lehtomäen (2006) mukaan metaanintuotto säilörehua 10 % VS:stä sisältäneellä kasvi-lanta - syötteellä oli laboratorio-CSTR -reaktorissa $0,143 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ (HRT 20 d, OLR $2 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$), mikä on samaa luokkaa, kuin tämän koejakson loppuvaiheen metaanintuotto ($0,148 \text{ m}^3/\text{kgVS}$). Ominaismetaanintuotto oli puolestaan suurinta ($0,268 \text{ m}^3/\text{kgVS}$) säilörehun osuuden ollessa 30 % VS:stä (Lehtomäki 2006). Biokaasulaitoksen kaasuntuottoa voitaisiinkin parantaa optimaalisella kasvi/lanta -suhteella. Sekoitussäiliön tehokkaammilla pumpuilla ja isommilla putkilinjoilla voitaisiin nostaa kasvin osuutta sekoitussäiliön seoksessa, ja ottamalla laitoksen suunnittelussa huomioon reaktorin muoto, soveltuva sekoitus ja energiakasvien erillinen syöttölinja reaktoriin voidaan myös jatkuvatoimisessa CSTR-reaktorissa käsitellä lietereaktorien tavanomaista syötettä (TS 4-8 %) jäykempää massaa (Hobson & Wheatley 2003).

Biokaasun metaanipitoisuus oli koejaksolla keskimäärin 59,3 % nousten loppupuolella 61,4 %:iin. Tämä on tavanomainen pitoisuus, sillä Saksan biokaasulaitoksissa CH_4 -pitoisuudet ovat 51,5-67,2 % (FAL 2005). H_2S -pitoisuus oli puolestaan koko koejakson ajan melko korkea ylittäen 200 ppm:n määrittäysrajan, mikä todennäköisesti johtuu koejaksoa edeltäneistä katkoksista ilman syötössä reaktoriin, jonka avulla rikkivetyä poistetaan biologisesti

biokaasusta. H_2S -pitoisuudet vaihtelevat paljon eri biokaasureaktoreissa mm. syötteen koostumuksen mukaan, ja ovat esimerkiksi Saksan laitoksissa 20-865 ppm (FAL 2005).

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Biokaasun tuotantoon käytettävän säilörehun partikkelikoon pienennys ennen biokaasureaktorikäsittelyä parantaa kasvin hajoavuutta prosessissa ja mahdollistaa kasvimateriaalin käsittelyn jatkuvatoimisissa CSTR-reaktoreissa. Partikkelikoon pienennys voidaan tehdä vaaka- tai pystyruuvisella seosrehuvaunulla, jolloin 3-4 säilöhupaalin murskaukseen kuluu aikaa 50-60 min, ja lopputuotteen partikkelikoko (40-50 mm) on biokaasulaitoksen teknisen toimivuuden, kuten pumppausten ja sekoitusten vaatimusten mukainen. Partikkelikoko voidaan pienentää myös energiakasvin korjaamisen yhteydessä tarkkuussilppurilla ja säilöä rehu paalien sijasta laakasiiloon tai aumaan, jolloin työmäärää sekä murskaukseen kuluvan energian ja paalimuovien määrää saadaan vähennettyä.

Lannan ja säilörehun yhteiskäsittelyssä kasvin sekoittaminen sekoitussäiliössä lannan kanssa ennen reaktoriin syöttöä edesauttaa kasvin hajoamista, sillä kasvimassa vettyy ja pehmenee lannan vaikutuksesta. Sekoitussäiliössä myös alkaa alhaisesta lämpötilasta (11-18 °C) huolimatta 6-8 d:n aikana syöteseoksen hydrolysoituminen, jolloin seoksen VFA-pitoisuus nousee, pH laskee ja esiintyy kaasukuplien (CO_2 , mahdollisesti CH_4) muodostusta. Lanta puskuroi tehokkaasti pH:n muutosta sekoitussäiliössä ja biokaasureaktorissa. Kasvimassa nousee sekoitussäiliössä heti seoksen valmistamisen jälkeen ja etenkin kaasuntuoton alettua kaasukuplien nostevoimien vaikutuksesta säiliön pintaan. Kasvimassasta muodostuu pinnan kuivuessaan kova kerrostuma pintaan, minkä vuoksi sekoitussäiliön riittävästä sekoituksesta esimerkiksi potkurisekoittimella on huolehdittava. Kasvimassa voidaan syöttää reaktoriin myös erillistä syöttölinjaa pitkin ruuvikuljettimella, männällä tai huuhdontalaitteella, jolloin sekoitussäiliön ongelmilta vältytään ja suurtenkin kasvipitoisuuksien käsittely on mahdollista.

Mesofiilisen biokaasureaktorin hajoamisprosessi on tämän tutkimuksen perusteella tasapainoinen yhteiskäsittelyssä säilörehua ja lantaa, ja olosuhteet, kuten pH, VFA-pitoisuus, alkaliteetti ja NH_4-N -pitoisuus pysyivät vakaina tai muuttuivat vain vähän 100 d:n kasvinsyöttöjakson aikana. Biokaasulaitoksen metaanintuotto oli koejaksolla $0,22 \text{ m}^3/\text{kgVS}$

(jälkikaasutussäiliön tuoton osuus arvioitu), ja säilörehun käsittelyn ominaiskaasuntuottoa on mahdollista kasvattaa lisäämällä kasvin määrää syötteessä.

Lehmänlannan käsittelyn ehdoilla suunnitellussa CSTR-reaktori-laitoksessa voidaan (laitoksen tekniikasta riippuen) käsitellä säilörehun ja lannan seosta, jonka TS on enintään 8-10 %. Kyseisessä seoksessa säilörehua on noin 5 % seoksen painosta, ja kasvin VS:n osuus seoksen VS:stä on 10-18 %. Käsiteltäessä suurempia kasvipitoisuuksia CSTR-reaktorissa voidaan biokaasulaitoksen pumput, sekoittimet, putkilinjat ja reaktorin muoto suunnitella runsaasti kiintoainetta sisältävän syötteen ehdoilla.

KIITOKSET

Suuret kiitokset tämän tutkielman teossa myötävaikuttaneille; ohjaajalle ja tarkastajalle Jukka Rintalalle, tarkastajalle Sari Luostariselle, koko Kalmarin tilan väelle erityisesti Erkille ja Jarnolle, kaikille koehallissa ja kahvihuoneessa samaan aikaan aikaansa viettäneille sekä tietysti kotijoukoille!

KIRJALLISUUS

- Angelidaki, I. & Ahring, B.K. 1993: Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. *Applied Microbiology and Biotechnology* 38: 560-564.
- Asplund, D., Korppi-Tommola, J. & Helynen, S. 2005: Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015. Kauppa- ja teollisuusministeriön selvityksiä ja raportteja. Kestävä kehitys ja ympäristö.
- Björnsson, L., Murto, M., Jantsch, T.G. & Mattiasson, B. 2001: Evaluation of new methods for the monitoring of alkalinity, dissolved hydrogen and the microbial community in anaerobic digestion. *Water Research* 35: 2833-2840.
- Cecchi, F., Traverso, P., Pavan, P., Bolzonella, D. & Innocenti, L. 2003: Characteristics of the OFMSW and behaviour of the anaerobic digestion process. – Teoksessa: Mata-Alvarez, J. (Toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA, London, ss.141-179.
- Euroopan komissio 2008: Proposal for a directive of the European parliament and of the council on the promotion of the use of energy from renewable sources. Commission of the European communities.
- Edelmann, W. 2003: Products, impacts and economy of anaerobic digestion of OFMSW. – Teoksessa: Mata-Alvarez, J. (Toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA, London, ss. 265-301.
- El-Ho Oy 2008:
<http://www.elho.fi/WebRoot/1000211/ProductPage.aspx?id=1000253&MainCategory=4>. – Viitattu 15.4.2008.
- FAL 2005: Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Gülzow.
- FvB 2008: The German biogas industry. <http://www.renewables-made-in-germany.com/en/biogas/> - Viitattu 18.2.2008.

- García-Heras, J.L. 2003: Reactor sizing, process kinetics and modelling of anaerobic digestion of complex wastes. – Teoksessa: Mata-Alvarez, J. (Toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA, London, ss. 21-62.
- Gujer, W. & Zehnder, A.J.B. 1983: Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 15 (8-9): 127-167.
- Hallitusohjelma 2007: Pääministeri Matti Vanhasen II hallituksen ohjelma. Valtioneuvoston kanslia. Edita Prima Oy, Helsinki.
- Hansen, K.H., Angelidaki, I. & Ahring, B.K. 1998: Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia. – *Water Research* 32: 5-12.
- Hartmann, H., Angelidaki, I. & Ahring, B.K. 2003: Co-digestion of the organic fraction of municipal waste with other waste types. – Teoksessa: Mata-Alvarez, J. (Toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA, London, ss. 181-199.
- Hobson, P.N. & Wheatley, A.D. 1993: *Anaerobic digestion: Modern theory and practice*. Elsevier applied science, London.
- Hu, Z.-H., Yu, H.-Q. & Zhu, R.-F. 2005: Influence of particle size and pH on anaerobic degradation of cellulose by ruminal microbes. *International Biodeterioration & Biodegradation* 55: 233-238.
- Hyytiäinen, T., Hedman-Partanen, R. & Hiltunen, S. 1995: *Kasvintuotanto 2*. Kirjayhtymä Oy, Helsinki.
- Infilco Degremont Inc. 2008: http://www.infilcodegremont.com/images/pdf/cannon_mixer.pdf. – Viitattu 13.4.2008.
- Kaparaju, P. 2003: Enhancing methane production in a farm-scale biogas production system. *Jyväskylä studies in biological and environmental science* 124. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.

- Kauppa- ja teollisuusministeriö 2007: Selvitys biokaasulla tuotetun sähkön syöttötariffista. Loppuraportti JO-070619-5390. Kauppa- ja teollisuusministeriö.
- Kempainen, E. 2001: Karjanlanta ja muut eloperäiset lannoitteet. – Teoksessa: Heinonen, R. (toim.): Maa, viljely ja ympäristö, ss. 255-294. Werner Söderström Osakeyhtiö, Helsinki.
- Kuittinen, V., Huttunen, M.J. & Leinonen, S. 2007: Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 10 - Tiedot vuodelta 2006. - 76 s., Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutin raportteja N:o 3. Yliopistopaino, Joensuu.
- Laine, A. & Tahvonen, R. 2007: Corn and perennial herbs for high yielding energy plants. NJF Seminar 405: Production and utilization of crops for energy. Vilnius, Lithuania, 25-26 September 2007. NJF Report 3(4): 119-121.
- Lampinen, A. 2003: Jätteiden liikennekäyttöpotentiaali Suomessa. Kuntatekniikka 1/2003. ss. 31-34.
- Lehtomäki, A. 2006: Biogas production from energy crops and crop residues. Jyväskylä studies in biological and environmental science 163. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.
- Mabarex Inc. 2008: http://www.mabarex.com/english/pdf/bbgm_en.pdf. – Viitattu 13.4.2008.
- Mamec Oy 2008: <http://www.mamec.fi/>. – Viitattu 13.4.2008.
- Mata-Alvarez, J. 2003: Fundamentals of the anaerobic digestion process. – Teoksessa: Mata-Alvarez, J. (Toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA, London, ss. 1-20.
- NHK-Keskus Oy 2008: <http://www.nhk.fi/portal/tuoteryhmat/seosrehuvaunut/kuhn/>. – Viitattu 15.4.2008.
- Pohland, F.G. (1992): Anaerobic treatment: Fundamental concepts, applications, and new horizons. – Teoksessa: Malina, J.F. & Pohland, F.G. (Toim.): Design of anaerobic

processes for the treatment of industrial and municipal wastes. *Water Quality Management*, Vol. 7. Technomic Publishing Co, Lancaster.

- Salminen, E. 2000: Anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse by-products and wastes. *Jyväskylä studies in biological and environmental science* 90. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.
- Sanders, W.T.M., Veeken, A.H.M., Zeeman, G. & van Lier J.B. 2003: Analysis and optimisation of the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. – Teoksessa: Mata-Alvarez, J. (Toim.): *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA, London, ss. 63-89.
- Sharma, S. K., Mishra, I. M., Sharma, M. P. & Saini, J. S. 1988: Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. *Biomass* 17: 251-263.
- Suokannas, A. 2004: Esikuivatun nurmirehun korjuuketjut. – Teoksessa: Kallioniemi, M. (Toim.): *Maatalouden uusi teknologia – tarkkuutta ja tehokkuutta. Ensimmäiset teknologiapäivät 1.-2.10.2003*, MTT maatalousteknologian tutkimus (Valkola), Vihti. MTT:n selvityksiä 50. MTT, Vihti.
- Vainio-Mattila, B., Ginström, T., Haaranen, T., Luomanperä, S., Lähdetie, P., Oravuo, M., Pietola, K., Suojanen, M., Virolainen, J., Knuutila, K. & Ovaska, S. 2005: *Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa. Raportti 2005:15*, Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki.
- Weiland, P. 2003: Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109: 263-274.