

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTON BIO- JA YMPÄRISTÖTIETEIDEN LAITOKSEN
TIEDONANTOJA 85

Annimari Lehtomäki¹, Teija Paavola², Sari Luostarinen²
ja Jukka Rintala²

¹ *Jyväskylä Innovation Oy*

² *Bio- ja ympäristötieteiden laitos/Ympäristötiede, Jyväskylän yliopisto*

BIOKAASUSTA ENERGIAA MAATALOUTEEN – RAAKA-AINEET, TEKNOLOGIAT JA LOPPU- TUOTTEET



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, 2007

Annimari Lehtomäki¹, Teija Paavola², Sari Luostarinen² ja Jukka Rintala²

¹ *Jyväskylä Innovation Oy*

² *Bio- ja ympäristötieteiden laitos/Ympäristötiede, Jyväskylän yliopisto*

**BIOKAASUSTA ENERGIAA MAATALOUTEEN
– RAAKA-AINEET, TEKNOLOGIAT JA LOPPUTUOTTEET**

Toimittaja:

Timo Ålander (tolander@cc.jyu.fi)

Kansikuvat:

1. Biokaasutuotantoa varten laakasiiloihin varastoitua kasvibiomassaa saksalaisella biokaasulaitoksella (kuva: Annimari Lehtomäki)
2. Biovakka Oy:n biokaasulaitos Vehmaalla (kuva: Annimari Lehtomäki)
3. CHP-yksikkö saksalaisella biokaasulaitoksella (kuva: Annimari Lehtomäki)
4. Biokaasulla kulkeva linja-auto tankattavana Linköpingin linja-autovarikolla (kuva: Annimari Lehtomäki)

ISBN 978-951-39-3076-9

ISSN 1795-6900

Copyright © 2007 by University of Jyväskylä

ESIPUHE

Kiinnostus biokaasuteknologian hyödyntämiseen maataloudessa on lisääntynyt Suomessa nopeasti viime aikoina. Kiinnostus lähtee sekä energia- että ympäristötekniikan lähtökohdista, jotka molemmat aiempaa voimakkaammin tukevat biokaasuteknologian käyttöönottoa. Biokaasuteknologia voi mahdollistaa tilan energiaomavaraisuuden sekä sähkön, lämmön että ajoneuvojen ja työkoneiden polttoaineen suhteen. Biokaasuprosessin jäännös on myös käyttökelpoinen lannoitevalmiste.

Biokaasuteknologia perustuu biologiseen toimintaan. Hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa mikrobit hajottavat eloperäistä ainesta (esimerkiksi lantaa, biojätettä, kasvibiomassaa) siten, että hajotuksen lopputuotteena syntyy runsaasti metaania sisältävää biokaasua. Biokaasuteknologian kuten muidenkin teknologioiden onnistunut toteutus ja käyttö edellyttävät perusasioiden tuntemista.

Tämän julkaisun tavoitteena on antaa tietoa biokaasuteknologian käyttöön liittyvistä energia- ja ympäristötekijöistä, soveltuvista raaka-aineista ja teknologioista, lopputuotteiden käytöstä, lainsäädännöstä sekä prosessin operointiin vaikuttavista tekijöistä.

Tämä julkaisu pohjautuu osittain vuodelta 2002 peräisin olevaan ”Biokaasusta uusiutuvaa energiaa maataloilla” - julkaisuun (tekijät: Rintala, J., Lampinen, A., Luostarinen, S., Lehtomäki, A.) keskittyen kuitenkin enemmän varsinaiseen biokaasuprosessiin, ja julkaisua tullaan mahdollisuuksien mukaan päivittämään ajoittain. Biokaasuteknologian käyttöönottoa suunnittelevalle on kuitenkin huomioitava, että erityisesti asiaa koskeva lainsäädäntö muuttuu jatkuvasti, ja laitosinvestointeja suunniteltaessa sen hetkinen tilanne on aina tarkistettava asianomaisilta viranomaisilta.

Jyväskylässä 10.11.2007.

tekijät

TIIVISTELMÄ

Biokaasuteknologia perustuu biologiseen toimintaan. Hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa mikrobit hajottavat eloperäistä eli orgaanista ainesta (esimerkiksi lantaa, biojätettä, kasvibiomassaa) siten, että hajotuksen lopputuotteena syntyy runsaasti metaania sisältävää biokaasua. Biokaasun tyypillinen koostumus on noin 55–70 % metaania ja noin 30–45 % hiilidioksidia. Biokaasu on monipuolinen polttoaine, jota voidaan hyödyntää sekä sähkön ja/tai lämmöntuotannossa että ajoneuvojen ja työkoneiden polttoaineena. Korvaamalla fossiilisten polttoaineiden käyttöä biokaasulla voidaan pienentää maatalouden ympäristövaikutuksia sekä suoraan että epäsuorasti. Biokaasulaitoksen jäännös soveltuu useimmiten hyvin käytettäväksi lannoitteena ja maanparannusaineena. Hyödyntämällä biokaasuprosessin jäännös lannoitteena vähennetään kemiallisten lannoitteiden tarvetta ja voidaan saavuttaa lähes suljettu ravinnekierto.

Biokaasutuotannon raaka-aineeksi soveltuvia materiaaleja ovat mm. eläinten lanta, yhdyskuntien ja teollisuuden biojätteet, puhdistamolietteet, sakokaivolietteet sekä peltobiomasat, eli sekä energiantuotantoa varten viljellyt energiakasvit että erilaiset kasvintuotannon sivutuotteet ja jätteet. Biokaasuprosessin suunnittelussa lähtökohtana ovat käsiteltävän materiaalin määrä ja ominaisuudet sekä suunniteltu lopputuotteiden hyödyntämistapa. Biokaasuprosesseja operoidaan useimmiten mikrobien optimilämpötilojen alueella, joko 35–38 °C:ssa (mesofiilinen prosessi) tai noin 55 °C:ssa (termofiilinen prosessi). Biokaasuprosessit voivat olla joko ns. märkä- tai kuivaprosesseja, jatkuvatoimisia tai panosperiaatteella toimivia, yksitai monivaiheisia, ja maatilakohtaisia tai keskitettyjä. Maatilakohtaisessa biokaasulaitoksessa käsitellään useimmiten tilan eläinten tuottama lanta, jonka lisäksi voidaan käsitellä muuta lähialueella syntyvää orgaanista jätettä tai kasvibiomassaa. Maatilakohtainen biokaasulaitoskonsepti koostuu yleensä vähintään neljästä osiosta, jotka ovat navetta, raakalieteallas, biokaasureaktori ja jälkivarasto. Tilan ulkopuolisia materiaaleja käsiteltäessä laitteistoon voi kuulua myös esimerkiksi varastointitilaa, hygienisointiyksikkö, jätteen murskauslaitteisto sekä syöttösäiliö. Kasvien hyödyntäminen biokaasun tuotannossa edellyttää myös omat rakenteensa, kuten laakasiilot kasvien varastointiin ja koneketjun kasvien korjuuseen. Lisäksi laitokseen kuuluvat turvallisuus- ja kaasunpuhdistuslaitteet, kaasuvälikamari sekä laitteistot kaasun ja käsitelyn jäännöksen hyödyntämiseksi. Keskitetty biokaasulaitos käsittelee esimerkiksi usean maatalan lannat mahdollisesti yhdessä muun orgaanisen jätteen kanssa. Biokaasulaitosten pe-

rustamista ja toimintaa säädellään mm. maatalouteen, ympäristönsuojeluun ja energiantuotantoon liittyvien lakien avulla.

Biokaasu on monipuolinen polttoaine, jota voidaan hyödyntää sekä sähkön ja/tai lämmöntuotannossa että ajoneuvojen ja työkoneiden polttoaineena. Sähköntuotantoon biokaasua on käytetty jo pitkään polttomoottoreissa, joiden tehot vaihtelevat noin 45 kW_e:sta useisiin MW_e:hin. Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa kokonaishyötysuhde nousee jopa yli 90 %:in. Biokaasun ajoneuvo- ja työkonekäyttö edellyttää kosteuden, hiilidioksidin ja epäpuhauksien poistamista sekä kaasun paineistusta. Biokaasun tuotanto on todettu yhdeksi puhtaimmista ja energiatehokkaimmista tavoista tuottaa liikenteen biopolttoainetta, ja kaasua polttoaineena käytävillä ajoneuvoilla on huomattavasti perinteisiä ajoneuvoja alhaisempi melutaso sekä alhaisemmat useimpien kaasumaisten ja hiukkasmaisten yhdisteiden päästöt. Kaasuajoneuvot voivat käyttää polttoaineenaan sekä maakaasua että jalostettua biokaasua, ja maakaasun ja puhdistetun biokaasun tankkaukseen, varastointiin ja siirtämiseen soveltuvat samat menetelmät. Maailmalla kaasukäyttöisiä ajoneuvoja on käytössä yli viisi miljoonaa, ja niitä löytyy useimpien autonvalmistajien mallistoista.

SISÄLLYSLUETTELO

Esipuhe

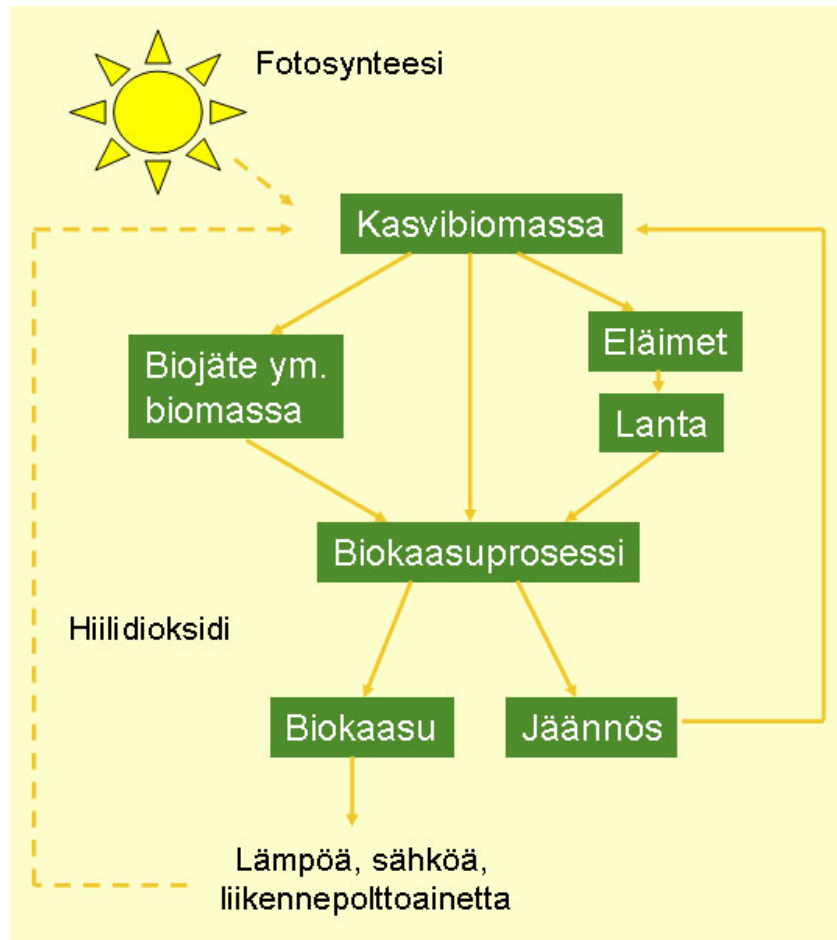
Tiivistelmä

1	Johdanto.....	2
2	Uusiutuva energia ja biokaasu.....	4
3	Maatalous ja ympäristö	7
4	Biokaasun tuotantoa koskeva lainsäädäntö ja tukipolitiikka.....	12
4.1	Sivutuoteasetus	13
4.2	Lannoitevalmistelainsäädäntö ja lopputuotteiden käyttö maataloudessa.....	14
4.3	Biokaasulaitoksia koskevat tuet	18
5	Biokaasun tuotannon perusteet.....	18
5.1	Biokaasun tuotannon raaka-aineet.....	18
5.2	Anaerobinen hajoaminen.....	22
5.3	Olosuhdetekijät.....	25
5.4	Hajoamista hidastavat tekijät.....	26
5.5	Patogeenit ja hygieniaindikaattoribakteerit biokaasuprosessissa.....	28
5.6	Lannan ja muiden orgaanisten materiaalien yhteiskäsittely.....	30
6	Biokaasuprosessit	31
6.1	Mesofiiliset ja termofiiliset prosessit	31
6.2	Märkä- ja kuivaprosessit	32
6.3	Panos- ja jatkuvatoimiset prosessit.....	34
6.4	Yksi- ja monivaiheiset prosessit.....	34
7	Biokaasuprosessin suunnittelu	35
7.1	Biokaasuprosessin mitoitus	36
7.2	Biokaasuprosessin operointi.....	37
7.3	Keskitetty ja maatilakohtainen biokaasutuotanto.....	37
8	Biokaasuprosessin lopputuotteiden hyödyntäminen	39
8.1	Biokaasun hyödyntäminen liikenne- ja työkonepolttoaineena, sähköinä sekä lämpönä	39
8.2	Käsitelty materiaali lannoitteena ja maanparannusaineena.....	44
9	Esimerkkejä biokaasulaitoksista.....	47
9.1	Kalmarin tila, Laukaa	47
9.2	Biovakka Oy, Vehmaa	48
9.3	Riihimäen tila, Halsua	48
9.4	Laihian kunnan biokaasulaitos	49
10	Tulevaisuuden näkymiä.....	50
11	Lähteet	52
12	Julkaisussa käytettyjen termien selitykset.....	59

1 Johdanto

Biokaasuteknologiaa voidaan hyödyntää maataloudessa uusiutuvan energian tuottamiseen erilaisista materiaaleista sekä mm. lannankäsittelyn aiheuttaman ympäristökuormituksen hallintaan (Kuva 1.1). Biokaasuteknologia on siis sekä energia- että ympäristöteknologiaa. Sitä pidetään yleisesti kestäväen kehityksen mukaisena, koska se ei kuluta merkittävästi lisäresursseja (energiaa, kemikaaleja, materiaaleja) ja toisaalta sen avulla voidaan tuottaa energiaa. Lisäksi materiaalien sisältämät ravinteet kiertävät prosessissa. Biokaasuteknologiaa hyödyntämällä tila voi olla energiaomavarainen sekä sähkön, lämmön että työkoneiden ja ajoneuvojen polttoaineiden suhteen, ja kaikkien näiden energiamuotojen myyntitulot ovat myös mahdollisia. Korvaamalla fossiilisten polttoaineiden käyttöä biokaasulla voidaan pienentää maatalouden ympäristövaikutuksia sekä suoraan että epäsuorasti. Lisäksi biokaasuprosessissa käsitellyn materiaalin monet lannoiteominaisuudet paranevat käsittelyn aikana (mm. typpiyhdisteet kasveille käyttökelpoisemmiksi, hajua aiheuttavien yhdisteiden väheneminen).

Biokaasuteknologia perustuu biologiseen toimintaan. Hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa mikrobit hajottavat eloperäistä eli orgaanista ainesta (esimerkiksi lantaa, biojätettä, kasvibiomassaa) siten, että hajotuksen lopputuotteena syntyy runsaasti metaania sisältävää biokaasua. Biokaasun tyypillinen koostumus on noin 55–70 % metaania ja noin 30–45 % hiilidioksidia. Tämän lisäksi biokaasu voi sisältää pieniä määriä muita yhdisteitä kuten rikkivetyä, ammoniakkia, vetyä ja häkää (Taulukko 1.1). Luonnossa biokaasua muodostuu esimerkiksi soilla, riisipelloilla ja märehijöiden pötsissä. Myös kaatopaikoilla syntyy jätteen hitaan hajoamisen seurauksena biokaasua, jota kutsutaan tässä tapauksessa kaatopaikkakaasuksi. Kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on usein alhaisempi kuin biokaasureaktorissa tuotetussa kaasussa, ja se voi sisältää enemmän epäpuhtauksia ja tyypeä (Taulukko 1.1).



Kuva 1.1 Biokaasun tuotantoketju.

Taulukko 1.1 Biokaasun ja kaatopaikkakaasun tyypillinen koostumus.

	Metaani (%)	Hiilidioksidi (%)	Typpi (%)	Rikkivety (ppm)
Biokaasu	55–70	30–45	< 1	10–40
Kaatopaikkakaasu	45–55	30–40	5-15	50–300

Suomi on biokaasuteknologian kehittämisen pioneereja, vaikkakin biokaasuteknologian hyödyntäminen Suomessa on toistaiseksi ollut vähäistä. Kiinnostus biokaasuteknologiaa kohtaan oli huomattavaa öljykriisien seurauksena 1970- ja 1980-luvuilla. Vaasan Mustasaaren rakennettiin 1980-luvulla yksi maailman ensimmäisistä yhdyskuntien biojätettä käsittelevistä biokaasulaitoksista. Viime vuosina Suomessa on toteutettu tai on toteuttamisvaiheessa useita sekä maatilakohtaisia että keskitettyjä biokaasulaitoksia. Yhtenä syynä tähän on ollut karjatilojen koon kasvu, mikä on lisännyt tilojen paikallisia ympäristövaikutuksia, mutta toisaalta myös antanut valmiuksia investointeihin. Lisäksi tiloille on viime vuosina rakennettu biokaa-

sukonseptissa hyödynnettävää varastoallastilavuutta, mikä alentaa kustannuksia ja kynnystä investoida lannan hyödyntämiseen biokaasuprosessissa.

Myös monissa muissa EU-maissa on lisääntyvää kiinnostusta biokaasun käyttömahdollisuuksiin sähkön-, lämmön- ja liikenteen biopolttoaineiden tuotannossa. Maatalouden biokaasutuotannon edelläkävijämaa on Saksa, jossa oli vuoden 2006 lopussa noin 3400 maatalouden biokaasulaitosta, joiden sähköteho oli yhteensä noin 1100 MW. Maatalouden biokaasulaitosten lukumäärä Saksassa on kasvanut nopeasti viime vuosina; vuonna 1990 laitoksia oli vielä noin 100, ja vuonna 2000 noin 1000 kappaletta. Yhtenä syynä biokaasulaitosten lukumäärän nopeaan kasvuun on Saksan erittäin kannustava tukipolitiikka, joka takaa biokaasusta tuotetulle sähkölle enimmillään 21 sentin myyntihinnan /kWh, ja laitosinvestointeihin on lisäksi tarjolla korkotukilainoja (Weiland 2006).

Biokaasun tuotanto on usein kannattavinta toteuttaa hajautettuna energiantuotantona lähellä käsiteltävien materiaalien tuotantoalueita, jolloin kuljetuskustannukset saadaan minimoitua. Maatalouden biokaasun tuotantoon liittyy useita ympäristön kannalta edullisia näkökohtia, ja lisäksi se tarjoaa positiivisia sosioekonomisia vaikutuksia erityisesti maaseudulle. Biokaasun laajamittainen tuotanto monipuolistaisi maatalouden tuotantorakennetta, loisi uusia työpaikkoja niin maaseudulle kuin energiateollisuuteenkin ja pitäisi maaseutumme elinvoimaisena. Se edistäisi myös maaseutumaiseman säilymistä etenkin, jos kesantopeltoja hyödynnettäisiin biokaasulaitoksissa käytettävien energiakasvien tuotannossa.

Tämä julkaisu käsittelee biokaasuteknologian käyttöönottoon ja käyttöön liittyviä tekijöitä erityisesti maatalouden biokaasutuotannon näkökulmasta.

2 Uusiutuva energia ja biokaasu

Lähes kaikki uusiutuva energia on peräisin auringon säteilystä. Kasvien yhteyttämisen eli fotosynteesin kautta auringon säteilyä varastoituu kasvibiomassaan kemiallisena energiana, jota voidaan hyödyntää erilaisilla bioenergiateknologioilla. Fotosynteesissä kasvit sitovat biomassansa myös ilmakehän hiilidioksidia. Kasveihin fotosynteesissä sitoutunut energia kiertää biosfäärissä kemiallisten ja fysikaalisten prosessin kautta, kunnes se lopulta poistuu

maapallolta matalaenergisenä lämpösäteilynä tai varastoituu fossiilisiin polttoainevarantoihin. Bioenergia on uusiutuvista raaka-aineista kuten biomassasta tuotettua energiaa. Kun tuotetaan bioenergiaa, eli esimerkiksi poltetaan biomassaa, vapautuu hiilidioksidia. Hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä on ollut kasvussa, ja tämän arvioidaan olevan yksi tärkeimmistä syistä nk. kasvihuoneilmiön havaittuun voimistumiseen ja sitä kautta ilmastonmuutokseen. Biomassan energiakäytössä vapautunut hiilidioksidi vastaa kuitenkin määrältään kasvibiomassan fotosynteesissä sitomaa hiilidioksidia, joten bioenergian tuotanto ei periaatteessa lisää ilmakehän nettokasvihuonekaasupitoisuutta. Bioenergia on siten kestävä kehityksen periaatteiden mukaista uusiutuvaa energiaa, jonka avulla voidaan vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja kotimaisia raaka-aineita käyttämällä myös riippuvuutta tuontipolttoaineista. Sen käyttöä lisäämällä voidaan vähentää erityisesti kasvihuonekaasu- ja rikkipäästöjä ilmakehään.

Uusiutuvan energian tuotannon ja käytön edistämiseen on kiinnitetty viime vuosina maailmanlaajuisesti paljon huomiota. Ilmastonmuutos, fossiilisten polttoainevarojen väheneminen ja hintakehitys, sekä taajamien ilmanlaadun heikkeneminen ovat olleet tärkeimpiä syitä tähän kiinnostukseen. Kioton sopimuksessa Euroopan Unioni on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasujen CO₂-ekvivalenttipäästöjä 8 prosentilla vuoden 1990 tasosta vuosien 2008–2012 keskiarvoon verrattuna. Suomen osuus tästä on EU:n taakanjakosopimuksen perusteella pysyä vuoden 1990 tasolla (EEA 2006). Kioton tavoitteisiin pääseminen vaatii fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämistä ja siirtymistä yhä enemmän uusiutuviin energianlähteisiin. EU onkin asettanut tavoitteeksi uusiutuvien energialähteiden osuuden nostamisen 20 prosenttiin yhteisön primäärienergiankulutuksesta vuoteen 2020 mennessä (Euroopan komissio 2007).

Vuonna 2006 Suomen kokonaisenergiankulutus oli noin 35,3 Mtoe (1480 PJ), josta uusiutuvien energianlähteiden osuus oli 24 %. Suomessa käytettävästä uusiutuvasta energiasta valtaosa, 84 %, oli bioenergiaa (Motiva 2007). EU:n kokonaisenergiankulutuksesta 4 % tuotettiin biomassasta (69 Mtoe, josta peltobiomassaa 2 Mtoe) vuonna 2003. Biomassaa on käytettävissä runsaasti, sillä siihen kuuluvat polttopuun ja metsäteollisuuden puupitoisen jätteen ja energiakasvien lisäksi maatalouden ja elintarviketeollisuuden jätteet, lanta ja orgaaninen kiinteä yhdyskuntajäte, lajiteltu kotitalousjäte sekä jätevesiliete. Euroopan komission biomassaa koskevassa toimintasuunnitelmassa asetetaan biomassan käytön tavoitteeksi 150 Mtoe vuonna 2010. Tämä lisäisi uusiutuvan energian osuutta 5 %:lla ja laskisi riippuvuutta tuontienergiasta 48 %:sta 42 %:iin, vähentäisi kasvihuonekaasupäästöjä 209 milj. t CO₂-ekv./vuosi, työllistäisi

250 000 – 300 000 ihmistä erityisesti maaseudulla sekä loisi painetta öljyn hinnan laskulle vähentyneen kysynnän vuoksi. Biokaasun osuus tavoitellusta uusiutuvan energian lisästä on 10 % eli 15 Mtoe:n vuosikapasiteetin rakentaminen vuoteen 2010 mennessä (Euroopan komissio 2005). EU:n alueella muodostuvan kaatopaikkakaasun ja hajoavien maatalousjätteiden kokonaisenergiasisällöksi on arvioitu yli 80 Mtoe (Euroopan komissio 1997).

EU:n ja Suomen tavoitteena on edistää biopolttoaineiden käyttöä myös liikenteessä ja siten vähentää liikenteen ympäristövaikutuksia ja riippuvuutta tuontipolttoaineista. EU:n liikennepolttoainedirektiivin suosituksen mukaisesti jäsenmaiden tulee tavoitella biopolttoaineille 5,75 prosentin osuutta liikenteessä käytetyistä polttoaineista vuoteen 2010 mennessä ja Euroopan neuvoston päätöksen mukaisesti 10 prosentin osuutta vuoteen 2020 mennessä (Euroopan parlamentti 2003; Euroopan komissio 2007). EU:n suosituksena on lisäksi nostaa vaihtoehtoisten polttoaineiden, mukaan lukien maakaasu, osuus 20 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä (Euroopan komissio 2006a). Keskustelua liikenteen biopolttoaineiden energiataseista ja kasvihuonekaasupäästöistä on käyty vilkkaasti myös Suomessa viime aikoina. Biokaasun tuotanto on useissa elinkaarianalyyseissa todettu yhdeksi energiatehokkaimmista ja ympäristöystävällisimmistä tavoista tuottaa liikenteen biopolttoainetta (LBS 2002). Kaasuajoneuvot voivat käyttää polttoaineenaan sekä puhdistettua biokaasua että maakaasua, ja mahdollisuus jalostaa biokaasua liikennepolttoaineeksi tarjoaakin kiinnostavan vaihtoehdon maaseudun elinkeinorakenteen monipuolistamiseksi.

Jäteperäisen biokaasumetaanin vuosittaiseksi tuotantopotentiaaliksi Suomessa on erään laskelman mukaan arvioitu 14 TWh, mikä vastaa noin 700 000 henkilöauton vuotuista polttoaineen kulutusta (Lampinen 2003). Tästä luvusta noin 4 TWh olisi peräisin eläinten lannasta ja 7 TWh maatalouden kasvijätteistä, eli näistä maataloudessa syntyvistä biomassoista olisi mahdollista tuottaa polttoaine noin 24 %:lle Suomen henkilöautoista. Tässä luvussa ei ole mukana tarkoitusta varten viljeltyjä energiakasveja. Hyödyntämällä esimerkiksi kesantoalaa vastaava pinta-ala, noin 10 % Suomen peltopinta-alasta, energiakasvien tuotannossa, voitaisiin tuottaa raaka-aine noin 300 000 biokaasulla kulkevan henkilöauton vuotuista polttoainetta varten (Lehtomäki 2006). Toisen arvion mukaan vuoteen 2015 mennessä olisi Suomessa teknistaloudellisesti mahdollista kasvattaa vuotuista biokaasun tuotantoa 7–18 TWh (Asplund ym. 2005).

Vuonna 2005 Suomessa tuotettiin biokaasua 15 yhdyskuntien jätevedenpuhdistamolla, kolmessa keskitetyssä jätteenkäsittelylaitoksessa, kuudessa maatilakohtaisessa ja kolmessa teollisuuden jätevesiä käsittelevässä biokaasulaitoksessa, yhteensä noin 27 miljoonaa kuutiometriä biokaasua, mikä vastaa energiasisällöltään noin 150 GWh. Tästä hyödynnettiin energiana 84 %. Vastaavasti kaatopaikkakaasua kerättiin talteen 33 kaatopaikalta, yhteensä 118 miljoonaa kuutiometriä, mikä vastaa energiasisällöltään noin 570 GWh. Tästä 53 % hyödynnettiin energiana ja loppu pääsääntöisesti soihutupoltettiin metaanipäästöjen välttämiseksi. Yhteensä biokaasua ja kaatopaikkakaasua tuotettiin ja kerättiin 720 GWh, josta hyödynnettiin energiana 425 GWh (Kuittinen ym. 2006). Kiinnostus biokaasuteknologian hyödyntämiseen erityisesti maataloudessa on lisääntynyt Suomessa nopeasti viime aikoina, ja viime vuosina Suomessa onkin toteutettu tai on toteuttamisvaiheessa useita sekä maatilakohtaisia että keskitettyjä biokaasulaitoksia.

3 Maatalous ja ympäristö

Maatalous on huomattava ympäristökuormittaja niin paikallisesti kuin maailmanlaajuisesti. Lisäksi erityisesti viime vuosina maataloudessa ja siihen liittyen elintarviketeollisuudessa on Euroopassa todettu merkittäviä tautitapauksia, jotka voivat olla vaarallisia sekä tuotantoeläimille että ihmisille (mm. BSE eli hullun lehmän tauti ja suu- ja sorkkatauti). Ongelmat on liitetty erityisesti nk. tehomaatalouteen. Lisäksi karjatilojen koko kasvaa ja tilat myös keskittyvät sekä tuotantosuunnittain että alueellisesti ja paikallisesti, jolloin lannantuotanto saattaa paikallisesti ylittää lähialueiden lannanlevityspinta-alan (Maa- ja metsätalousministeriö 2002; Tilastokeskus 2006a).

Spontaanin hajoamisprosessin seurauksena lannankäsittelystä tiloilla aiheutuu metaani-, typpioksiduuli- ja ammoniakkipäästöjä. Metaani ja typpioksiduuli ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja, ja ammoniakki on haitallista terveydelle ja karjan tuotannolle. Biokaasuprosessin yhteydessä lannan hallitussa käsittelyssä nämä päästöt pystytään minimoimaan (Maa- ja metsätalousministeriö 2004). Epäorgaanisten lannoitteiden valmistus, erityisesti typen sitominen ilmakehästä, on erittäin energiaintensiivistä, vastaten jopa 35–46 % kasvien viljelyn kuluttamasta energiasta. Suurin osa lannoitteiden valmistuksessa käytetystä energiasta on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla (Börjesson 2004; Salter ym. 2005). Kasvihuonekaasujen, erityisesti

typpioksiduulin päästöjä muodostuu runsaasti myös pelloilla maaperän mikrobien nitrifikaatio- ja denitrifikaatioprosesseissa (Mäkinen ym. 2006). Lannoiteperäistä typpeä ja fosforia voi lisäksi huuhtoutua pelloilta vesistöihin aiheuttaen rehevöitymistä. Nitraatit ja mikrobit voivat pilata pohjavesiä ja aiheuttaa terveysongelmia. Ratkaisuja kuormituksen vähentämiseksi on useita aina eläinten ravinnon muuttamisesta vähemmän typpeä ja fosforia sisältäväksi eläinmäärän rajoittamiseen asti (Maa- ja metsätalousministeriö 2000; Mikkola ym. 2002). Yksi keino hallita maatalouden ympäristövaikutuksia on maatalouden jätteiden ja sivutuotteiden käsittely biokaasulaitoksessa. Esimerkiksi Euroopan Unionin ilmastonmuutosohjelmassa (ECCP) sitä on esitetty keinoksi vähentää metaanipäästöjä (Euroopan Komissio 2000). Samalla todennäköisesti myös muut maatalouden päästöt ilmaan ja vesiin pienenisivät.

EU-15 maiden kasvihuonekaasupäästöt olivat 4227 miljoonaa CO₂-ekv. tonnia vuonna 2004, josta Suomen osuus oli 81 milj. CO₂-ekv. tonnia (EEA 2006; Taulukko 3.1), 15 % tavoitevuotta 1990 korkeammat (Taulukko 3.2). Maatalouden osuus EU-15 maiden kasvihuonekaasupäästöistä oli 9 %. EU-15 maiden metaanipäästöt olivat 319 Tg ja typpioksiduulipäästöt 340 Tg CO₂-ekvivalentteina (Taulukko 3.1). Viime vuosina maatalouden metaani- ja typpioksiduulipäästöt ovat hieman laskeneet eläinmäärän vähenemisen ja parempien lannankäsittelymenetelmien ansiosta sekä vähentyneen lannoitteiden käytön myötä (EEA 2006).

Taulukko 3.1. Ihmisperäiset kasvihuonekaasupäästöt Euroopan Unionissa (EU-15) vuonna 2004 (EEA 2006).

Kasvihuonekaasu	Milj. t CO ₂ -ekvivalenttia
Hiilidioksidi	3506
Metaani	319
Typpioksiduuli	340
Muut	66

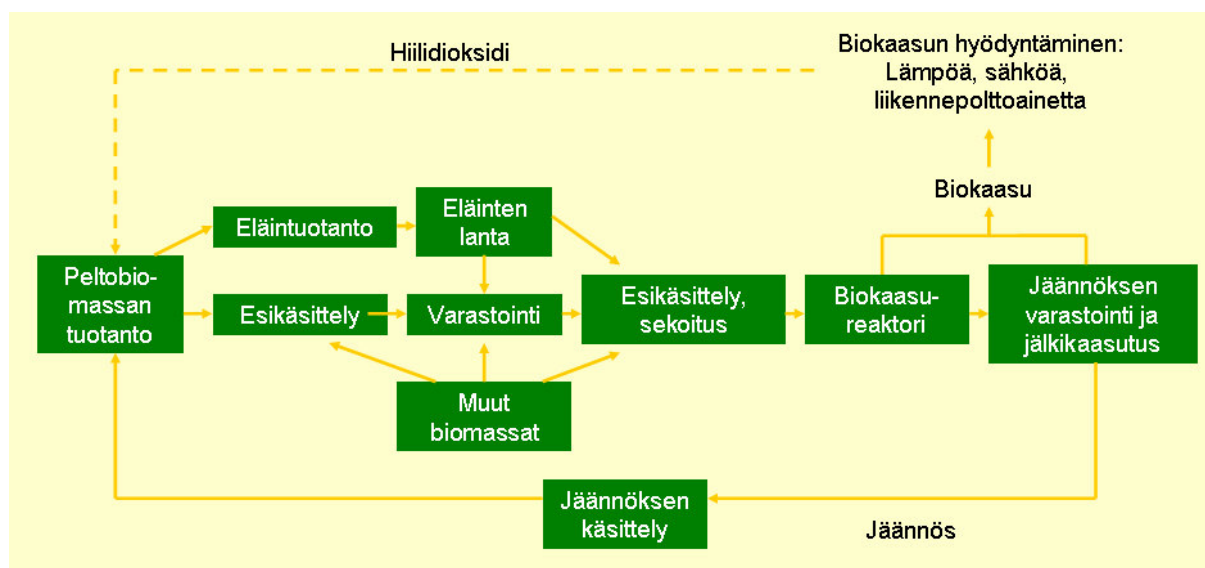
Suomen metaanipäästöistä 52 % tulee jätesektorilta ja 38 % maataloudesta (Taulukko 3.2). Jätesektorin metaanipäästöt ovat vähentyneet kaatopaikkakaasun talteenoton käynnistyttyä. Myös maatalouden metaanipäästöjä voidaan vähentää ottamalla metaani talteen biokaasulaitosten avulla ja tuottamalla sitä hallitusti energiantuotannossa hyödynnettäväksi, mikä metaanipäästöjen lisäksi vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta ja tätä kautta myös välillisesti hiilidioksidin muodostumista (Klingler 1999).

Taulukko 3.2. Kasvihuonekaasupäästöt ja niiden tuottajat Suomessa vuosina 1990 ja 2004 (Tilastokeskus 2006a). Päästöt milj. t CO₂-ekvivalentteina.

Kaasu ja sen tuottaja	1990	2004
Hiilidioksidi		
- Fossiiliset polttoaineet	53,9	65,39
- Teollisuusprosessit	3,47	3,82
- Muut	0,35	0,18
Metaani		
- Jäte	3,83	2,48
- Maatalous	2,15	1,84
- Energia	0,40	0,44
- Muut	0,01	0,02
Typpioksiduuli		
- Maatalous	4,96	3,79
- Teollisuusprosessit	1,66	1,46
- Energia	0,61	1,17
- Muut	0,67	0,51
F-kaasut*	0,09	0,73

*Yhteinen nimitys HFC-yhdisteille (fluorihiiilivedyille), PFC-yhdisteille (perfluorihiiilivedyille) ja rikkiheksafluoridille

Korvaamalla fossiilisten polttoaineiden käyttöä biokaasulla voidaan pienentää maatalouden ympäristövaikutuksia sekä suoraan että epäsuorasti. Biokaasutuotannon lopputuotteena muodostuu myös käsittelyjäännöstä, ja koska ravinnehäviöt ovat biokaasuprosessissa vähäiset, soveltuu tämä ravinteikas jäännös usein hyvin lannoitus- ja maanparannusaineena käytettäväksi. Prosessin aikana suuri osa käsiteltävässä materiaalissa olevasta orgaanisesta tyyppistä muuttuu liukoiseksi eli ammoniumtypeksi, joka on peltolevityksessä nopeammin kasvien hyödynnettävissä. Siten biokaasuprosessin jäännöksen lannoitekäytössä tyypin haihtuminen ja huuhtoutuminen vesistöihin jäävät alhaisemmaksi kuin esimerkiksi käytettäessä lantaa suoraan pelloilla. Kaikkea käsiteltävässä materiaalissa olevaa hiiltä ei tyypillisessä biokaasuprosessissa pystytä hajottamaan metaaniksi, ja jäännökseen jäävä hiili peltoon palautettuna hidastaa maaperän köyhtymistä. Hyödyntämällä biokaasuprosessin jäännös lannoitteena vähennetään kemiallisten lannoitteiden tarvetta, ja voidaan saavuttaa lähes suljettu ravinnekierto (Kuva 3.1). Lisäksi biokaasuprosessi hygienisoi käsiteltävää materiaalia ja vähentää hajua aiheuttavien yhdisteiden määrää, jolloin lannoitekäytöstä tulee turvallisempaa ja hyväksyttävämpää (Field ym. 1985; Klinger 1999; Ørtenblad 1999).



Kuva 3.1 Biokaasuprosessi maatilalla.

Kun öljy korvataan biokaasulla lämmön tuotannossa, vähenevät kasvihuonekaasupäästöt keskimäärin 70–90 % / MJ lämpöä (Börjesson ja Berglund 2007). Lämmön ja sähkön yhteistuotannossa vähenemä on hieman alhaisempi, kun vertailupolttoaineena on maakaasu. Liikennepolttoaineena biokaasulla saavutetaan 50–80 % vähenemä kasvihuonekaasupäästöissä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin (Börjesson ja Berglund 2007).

Keskustelua liikenteen biopolttoaineiden energiataseista ja kasvihuonekaasupäästöistä on käyty Suomessa vilkkaasti viime aikoina. Biokaasutuotanto on useissa ulkomaisissa elinkaarianalyseissa todettu yhdeksi energiatehokkaimmista ja ympäristöystävällisimmistä tavoista tuottaa liikenteen biopolttoainetta (LBS 2002). Esimerkiksi englantilaisessa elinkaaritutkimuksessa kasveista tuotetun biokaasun energiatehokkuus oli noin kaksi kertaa korkeampi kuin nykytokniikoilla tuotetun kasvipohjaisen biodieselin ja bioetanolin (Salter ym. 2005). Jopa kuusinkertaista energiatehokkuutta on esitetty (EU CROPGEN project 2007). Tämä johtuu siitä, että biokaasun tuotantoprosessi on melko yksinkertainen ja biokaasuprosessissa koko kasvi voidaan hyödyntää sekä ravinteet kierrättää, jolloin energiaa kuluu vähemmän verrattuna muihin biopolttoaineiden tuotantotapoihin. Merkittävä osa kasvipohjaisten biopolttoaineiden tuotannon kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu lannoitteiden tuotannosta ja käytöstä viljelyssä (Börjesson 2004; Fredriksson ym. 2006). Biokaasun tuotantoon soveltuvat hyvin monivuotiset, rehunakin käytetyt heinäkasvit (Lehtomäki 2006), jotka tarvitsevat vähemmän lannoitteita ja joiden viljelyn ympäristövaikutukset ja kasvihuonekaasupäästöt ovat vähäisemmät kuin

esimerkiksi kasvipohjaisen bioetanolin ja biodieselin tuotantoon nykYTEKNIKOILLA käytetyillä kasveilla (Fredriksson ym. 2006; Mäkinen ym. 2006). Lisäksi biokaasuprosessin jäännöksen hyödyntäminen lannoitteena parantaa koko 'kasveista biokaasua' -ketjun energiatasetta edelleen (Salter ym. 2005). Biokaasun tuotannossa voidaan hyödyntää lähes kaikki kasvinosat, esimerkiksi sokerijuurikkaat naatteineen, ja korjuujätteiden kerääminen pelloilta biokaasun tuotannossa hyödynnettäväksi pienentää vesistöihin valuvaa ravinnekuormaa (Börjesson ja Berglund 2004).

Timoteinurmea raaka-aineena käyttävän biokaasuprosessin energiatasetta Suomen olosuhteissa tarkastelleessa tutkimuksessa havaittiin, että biokaasun tuotannon koko ketju kulutti yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa 17 % tuotetun polttoaineen energiasisällöstä (reaktorin lämmitys 9 %, kasvibiomassan tuotanto 4 %, sähköntuotanto 3 %, kuljetus 1 %). Tuotos:panos-suhde oli tällöin 6,1. Mikäli kasvintuotannossa käytettäisiin mineraalilannoitteita biokaasujäännöksen kierrättämisen sijasta, laskisi tuotos:panos-suhde 3,5:een. Biokaasun puhdistaminen liikennepolttoaineeksi vaati 8 % tuotetusta energiasta, jolloin panos:tuotos-suhde oli 4,1 (Luostarinen 2007). Ruotsalaisessa tutkimuksessa koko biokaasuprosessiin kulunut energia kasvien tuotannosta biokaasun puhdistukseen vastasi noin 15–40 % prosessissa tuotetun metaanin energiasisällöstä (Berglund ja Börjesson 2004). Biodieselin, bioetanolin ja biokaasun hehtaarituoiksi dieselevivalentteina on mm. Saksassa esitetty 1200 l/ha, 2000 l/ha ja 4000 l/ha (Weiland 2006).

Metaani on voimakas kasviuonekaasu, joten sen päästöt ilmakehään biokaasuprosessien yhteydessä tulee minimoida. Biokaasuteknologian kasviuonekaasupäästöjä vähentävä vaikutus edellyttää, että tuotettu biokaasu hyödynnetään tai ainakin poltetaan, eikä sitä siis saisi päästää ilmakehään. Tärkeä biokaasulaitoksen metaanipäästöihin vaikuttava tekijä on katettu jälkikaasutus. Tyypillisesti noin 10–15 % maatilakohtaisen biokaasulaitoksen metaanintuotosta voidaan saavuttaa varastoimalla biokaasuprosessin jäännös katetussa, kaasunkeräyksellä varustetussa jälkikaasutusaltaassa (Angelidaki ym. 2006). Mikäli tämä säiliö on kattamaton, voidaan sen metaanintuottoa vastaava energiamäärä menettää kasviuoneilmiötä voimistavina päästöinä ilmakehään.

Biokaasuteknologian hyödyntäminen maataloudessa tuo etuja sekä maanviljelijälle että yhteisölle (Taulukko 3.3).

Taulukko 3.3. Biokaasuteknologian suorat edut maataloille ja yhteisölle (Klinger 1999).

EDUT TILALLE:	EDUT YHTEISÖLLE:
<ul style="list-style-type: none"> • Energiaomavaraisuus • Orgaanisen lannoitteen laadun paraneminen • Kemiallisten lannoitteiden tarpeen piene- minen • Kasvitoksisten yhdisteiden väheneminen • Tuholaistorjunnan tarpeen väheneminen • Maaperän laadun paraneminen ja maaperän köyhtymisen estyminen • Lannan hygienisoituminen • Jätteiden/sivutuotteiden ympäristövaikutus- ten väheneminen 	<ul style="list-style-type: none"> • Uusiutuvan energian tuotto • Huoltovarmuuden paraneminen (ha- jautettu energiantuotanto) • Maatalouden kasvihuonekaasupäästö- jen väheneminen • Hajuhaittojen pieneneminen • Raaka-aineiden säästyminen • Kesantomaan hyödyntäminen • Monipuolinen tuotantorakenne • Työllistävä vaikutus

4 Biokaasun tuotantoa koskeva lainsäädäntö ja tukipolitiikka

Euroopan unionin ympäristölainsäädäntö muuttuu ja uudistuu jatkuvasti. Yhdyskuntien käsittelyä tarvitsevat jätemäärät lisääntyvät uusien lakien ja asetusten myötä ja myös käsittelyvaatimukset tiukentuvat. Esimerkiksi biojätteiden erilliskeräys on koskenut myös haja-asutusalueita vuodesta 2006 lähtien ja samalla VNp (861/1997) kaatopaikoista on rajoittanut biohajoavan jätteen sijoittamista kaatopaikoille vuodesta 2005 eteenpäin, minkä vuoksi biohajoaville jätteille on kiireellisesti kehitettävä uusia käsittely- ja hyödyntämismuotoja. Lisäksi haja-asutusalueiden kotitalouksissa muodostuvien jätevedenkäsittelyjärjestelmien lietteiden määrä kasvaa, koska talousjätevesiasetuksen (VNa 542/2003) mukaan kaikissa vesihuoltolaitosten ulkopuoleisissa rakennuksissa (ml. vakituiset asunnot, loma-asunnot, maitotilojen maituhuoneet) on oltava asianmukainen jätevesienkäsittelyjärjestelmä vuoteen 2014 mennessä.

Biokaasulaitosten perustamista ja toimintaa säädellään mm. maatalouteen, ympäristönsuojeluun ja energiantuotantoon liittyvien lakien avulla. Monissa maissa biokaasuteknologian käyttöön siirtymistä kannustetaan myös kansallisten strategioiden avulla siihen liittyvien positiivisten ympäristönäkökohtien, kuten uusiutuvan energian tuotannon, ravinteiden kierrätyksen ja kasvihuonekaasujen päästöjen vähenemisen vuoksi.

4.1 Sivutuoteasetus

Yksi merkittävä biokaasulaitosten toimintaan vaikuttava säädös on Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 1774/2002/EY muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden terveystähtöistä eli sivutuoteasetus, jossa annetaan säädöksiä mm. käsiteltäväksi soveltuvista materiaaleista, käsittelymenetelmistä ja lopputuotteen laadusta ja käytöstä (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2002). Sivutuoteasetuksessa sivutuotteet jaetaan kolmeen luokkaan, joilla on erilaiset käsittelyvaatimukset (Taulukko 4.1). Luokan 1 sivutuotteita ei saa käyttää biokaasulaitosten raaka-aineena, luokan 2 sivutuotteet on ennen käyttöä steriloitava (133 °C, 20 min, 3 bar, partikkelikoko <50 mm) ja luokan 3 sivutuotteet on hygienisoitava (70 °C, 60 min, partikkelikoko <12 mm) joko ennen tai jälkeen käsittelyn (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2002; Euroopan komissio 2006b).

Taulukko 4.1. Eläinperäisten sivutuotteiden luokittelu ja käsittelyvaatimukset biokaasulaitoksissa.

	Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3
Materiaali	Sivutuotteet, joissa on TSE-taudin (esim. hullun lehmän tauti) riski, tuntematon riski tai ne sisältävät kiellettyjen aineiden (esim. hormonit) tai ympäristömyrkkujen jäämiä	Sivutuotteet, joissa on muiden eläintautien kuin TSE-tautien riski tai eläinlääkejäämien riski	Sivutuotteet, jotka on saatu ihmisravinnoksi hyväksytyistä eläimistä, joita ei kuitenkaan enää käytetä elintarvikkeena tai sen raaka-aineena
Käsittelyvaatimukset biokaasulaitoksissa	Ei sovellu käsiteltäväksi biokaasulaitoksissa	Sterilointi: 133 °C, 3 bar, 20 min, partikkelikoko <50 mm	Hygienisointi: 70 °C, 60 min, partikkelikoko <12 mm
Esimerkki-materiaaleja		Lanta*, kuolleet tai teurastetut siat ja siipikarja	Elintarviketeollisuuden sivutuotteet, ruokajäte

*Lantaa voidaan käyttää biokaasulaitoksen raaka-aineena ilman sterilointia tai hygienisointia, mikäli asetuksessa 208/2006/EY määritellyt lopputuotteen laatuvaatimukset täyttyvät.

Toimivaltainen viranomais (Suomessa Elintarviketurvallisuusvirasto, EVIRA) voi kuitenkin sallia myös muun tyyppisten prosessien käyttämisen, mikäli voidaan osoittaa, että niillä taataan biologisten riskien minimointi. Muun tyyppiset prosessit on validoitava, eli niiden mahdolliset vaarat, myös lähtöaineiden osalta, on tunnistettava ja analysoitava perustuen käsittelyvaatimusten täydelliseen määrittelyyn. Näiden perusteella on tehtävä riskinarviointi

sekä tavanomaisissa että poikkeuksellisissa tilanteissa. Lisäksi aiottu prosessi on validoitava indikaattoriorganismien avulla, joilla osoitetaan, että käsittelyllä pystytään vähentämään hygieenistä kokonaisriskiä riittävästi (bakteerien *Enterococcus faecalis* tai *Salmonella senftenberg* määrän väheneminen 5 log₁₀).

Kaikissa laitoksissa on seurattava lopputuotteiden hygieenistä laatua. Näytteet on otettava joko käsittelyn aikana tai välittömästi käsittelyn jälkeen ja niiden on täytettävä seuraavat vaatimukset: *Escherichia coli* tai *Enterococcaceae*: ≤1000 pmy/g neljässä näytteessä ja ≤5000 pmy/g 1 näytteessä. Lisäksi varastoinnin aikana tai varastosta oton yhteydessä materiaalien on oltava puhtaita salmonellasta (ei esiinny viidessä 25 g:n näytteessä).

Biokaasulaitoksen lopputuotteiden mikrobiologisia raja-arvoja voidaan verrata mm. Maa- ja metsätalousministeriön päätöksillä ja asetuksilla annettuihin elintarvikkeiden raja-arvoihin. Esimerkiksi elintarvikkeiden *E. coli* raja-arvot vaihtelevat 500 pmy/g – 100 000 pmy/g ja salmonellaa ei saa esiintyä.

4.2 Lannoitevalmistelainsäädäntö ja lopputuotteiden käyttö maataloudessa

Lannoitelainsäädäntö on uudistunut vuosien 2006–2007 aikana. Lannoitevalmistelaki 539/2006 tuli voimaan 1.7.2006 ja Maa- ja metsätalousministeriön asetus 12/2007 lannoitevalmisteista 15.3.2007.

Lannoitevalmistelakia 539/2006 sovelletaan lannoitevalmisteiden ja soveltuvin osin niiden raaka-aineiden valmistukseen, markkinointiin, käyttöön, kuljettamiseen sekä osittain myös niiden valmistukseen omaan käyttöön. Lannoitevalmistelakia sovelletaan myös sivutuoteasetuksen valvontaan ja täytäntöönpanoon. Yleiset vaatimukset lannoitevalmisteille ovat tasalaa-tuisuus, turvallisuus ja sopivuus käyttötarkoitukseensa. Lannoitevalmisteiden käyttöohjeen mukaisesta käytöstä ei saa aiheutua vaaraa ihmisten tai eläinten terveydelle tai turvallisuudelle, kasvien terveydelle tai ympäristölle. Myös raaka-aineiden tulee olla turvallisia. Lisäksi vain sellaisia lannoitevalmisteita, joiden tyyppinimi kuuluu joko kansalliseen lannoitevalmisteiden tyyppinimiluetteloon tai EY-lannoitteisiin saa valmistaa ja markkinoida. Tyyppinimiluetteloon voidaan lisätä myös uusia tyyppinimiä, mikäli ne täyttävät laissa annetut kriteerit.

Lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo ja tyyppinimikohtaiset vaatimukset sekä lannoitevalmisteiden laatu-, merkintä-, pakkaus-, kuljetus-, varastointi- ja muut vaatimukset määritellään tarkemmin Maa- ja metsätalousministeriön asetuksella lannoitevalmisteista (12/2007). Biokaasulaitosten lopputuotteita tyyppinimiluettelossa on tällä hetkellä (marraskuu 2007) seuraavilla nimillä: rejektivesi, maanparannuskomposti, lantaseos, tuorekomposti, maanparannusmädäte, kuivarae tai -jauhe ja mädätetty puhdistamoliete. Tyyppinimiluettelossa on em. lopputuotteille mm. valmistusmenetelmät ja siihen liittyvät vaatimukset sekä soveltuvat käyttökohteet ja käytön rajoitukset. Asetuksen liitteessä IV on esitettyä kaikkia tyyppinimiä koskevat vaatimukset haitallisten aineiden (metallit ja orgaaniset haitta-aineet), eliöiden (taudinaiheuttajat ja muut mikro-organismit) ja epäpuhtauksien osalta (Taulukko 4.2).

Lisäksi lannoitevalmisteita maa- ja puutarhataloudessa käytettäessä on noudatettava maataloudesta peräisin olevien nitraattien vesiin pääsyn rajoittamisesta annetussa valtioneuvoston asetuksessa (931/2000) lannoitevalmisteiden käytölle asetettuja vaatimuksia. Analysoidun liukoisen fosforin määrä saa olla korkeintaan 400 kg/ha maataloudessa sekä 600 kg/ha puutarhataloudessa enintään viiden vuoden käyttöjaksona annettuna. Maisemointi ja viherrakentamiskäytössä liukoista typpeä saa levittää viiden vuoden ajanjaksona korkeintaan 1250 kg/ha ja liukoista fosforia enintään 750 kg/ha (Maa- ja metsätalousministeriö 2007a). Käyttömäärien lisäykset ovat mahdollisia edellyttäen, ettei lisäyksistä aiheudu haittaa tai vahinkoa ympäristölle. Maa- ja metsätalousministeriön asetuksella 13/2007 säädellään tarkemmin lannoitevalmisteita koskevan toiminnan harjoittamista ja sen valvonnasta.

Taulukko 4.2. Lannoitevalmisteasetuksessa 12/2007 annetut haitallisten aineiden ja eliöiden enimmäismäärät lannoitevalmisteissa.

	Enimmäispitoisuus
Metallit:	mg/gTS
-Arseeni (As)	25 (30) ¹
-Elohopea (Hg)	1,0 (1,0) ¹
-Kadmium (Cd)	1,5 (15/17,5 ²) ¹
-Kromi (Cr)	300 (300) ¹
-Kupari (Cu)	600 ³ (700) ¹
-Lyijy (Pb)	100 (150) ¹
-Nikkeli (Ni)	100 (150) ¹
-Sinkki (Zn)	1500 ³ (4500) ¹
Taudinaiheuttajat/indikaattorieliöt:	
-Salmonella	Ei todettavissa 25 g:ssa
- <i>Escherichia coli</i>	1000 pmy/g
-Juuripoltesieni (mm. <i>Fusarium</i>)	Ei todettavissa taimituotannossa käytetyissä kasvualustoissa
Taudinaiheuttajat kasviperäisissä raaka-aineissa:	
-Keltaperuna-ankeroinen (<i>Globodera rostochiensis</i>)	Ei todettavissa juures-, juurikas- ja perunaraaka-aineesta tai näiden mukana tehtaalle tai kuoriin tulevista multajakeista valmistetussa lannoitevalmisteessa.
-Valkoperuna-ankeroinen (<i>Globodera pallida</i>)	
-Perunan vaalea rengasmätä (<i>Clavibacter michiganensis</i>)	
-Perunan tumma rengasmätä (<i>Ralstonia solanacearum</i>)	
-Perunasyöpä (<i>Synchytrium endobioticum</i>)	
-Juurikkaan nekroottinen keltasuonivirus ”Ritsomania”	
-Juuriäkämäankeroinen (<i>Meloidogyne spp.</i>)	
Muut kasvitauteja aiheuttavat karanteerituhoojat	Ei todettavissa kasvihuonetuotannon kasvijätteesistä tai kasvualustoista valmistetuissa lannoitevalmisteissa.

¹ Enimmäispitoisuus metsäkäytössä

² 17,5 mg/gTS metsätaloudessa käytettävässä puun, turpeen ja peltobiomassan tuhkassa

³ Enimmäispitoisuuden ylitys lannoitevalmisteissa voidaan sallia, kun maaperäanalyysin perusteella on todettu puutetta kuparista tai sinkistä

Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelmassa 2007–2013 (Maa- ja metsätalousministeriö 2007a) on esitetty myös uusi maatalouden ympäristötuki, joka on vahvistettu Valtioneuvoston asetuksella luonnonhaittakorvauksista ja maatalouden ympäristöistä vuosina 2007–2013.

Asetuksessa määritellään ehdot, joita maanviljelijöiden on noudatettava saadakseen ympäristötukea. Maatalouden ympäristötuki jakautuu kaikille viljelijöille tarkoitettuihin perus- ja lisätoimenpiteisiin sekä niitä tehokkaampiin ympäristönsuojelu- ja hoitotoimia edellyttäviin erityistukimuotoihin. Ympäristötukijärjestelmässä viljelijä sitoutuu viideksi vuodeksi toteuttamaan perustoimenpiteitä sekä mahdollisia lisätoimenpiteitä, joita voi olla tukialueesta riippuen kahdesta neljään. Lisätoimenpiteitä ovat mm. vähennetty lannoitus, typpilannoituksen tarkentaminen ja viljelyn monipuolistaminen. Lisäksi viljelijä voi tehdä erilaisia sopimuksia TE-keskuksen kanssa. Näistä sopimusmahdollisuuksista poistettiin kesällä 2007 EU-komission päätöksellä lannankäytön tehostaminen, jossa viljelijä sitoutui vastaanottamaan ja hyödyntämään toisilta tiloilta peräisin olevaa lantaa.

Ympäristötuen ehtojen mukaan fosforia saa levittää kasvista ja viljavuusluokasta riippuen keskimäärin 15 – 30 kg/ha ja tyyppiä nitraattiasetuksen (931/200) mukaisesti. Lannoitevalmisteiden sisältämästä fosforista laskelmissa huomioidaan analysoitu liukoinen fosfori, lannan ja perunan solunesteen kokonaisfosforista 85 % ja puhdistamolietepohjaisten lannoitevalmisteiden kokonaisfosforista 40 %. Fosforilannoituksessa voidaan käyttää enintään viiden vuoden tasausjaksoa. Lannan ja muiden orgaanisten lannoitteiden ravinteista otetaan huomioon liukoinen typpi kokonaan ja syyslannoituksessa 75 %. Maatalouden ympäristötuen sitomusehdoissa vuodelle 2007 määritellään tarkemmin tapauskohtaiset typpilannoitustasot (Maa- ja metsätalousministeriö 2007b).

Puhdistamolietteiden käytössä on huomioitava myös VNp 282/1994 puhdistamolietteen käytöstä maanviljelyksessä sekä Maa- ja metsätalousministeriön ja Elintarviketurvallisuusviraston (aiemmin KTTK) ohjeet maataloudessa käytettävälle puhdistamolietteelle (MMMELO 2915/835/2005). Päätöksessä on annettu raja-arvot raskasmetallien pitoisuuksille sekä maanviljelyksessä käytettävälle että lieteseoksen raaka-aineeksi soveltuvalle lietteelle. Päätöksessä on lisäksi määritelty mm. suurin keskimääräinen lietteen käytöstä aiheutuva vuotuinen raskasmetallikuormitus maanviljelyksessä.

4.3 Biokaasulaitoksia koskevat tuet

Maatalouden biokaasulaitosinvestointeihin on kesäkuusta 2007 lähtien ollut mahdollista hakea investointitukea maaseudun mikroyritystukien kautta, mikäli biokaasulaitokseen liittyy merkittävää kaupallista toimintaa (tilan ulkopuolisten materiaalien vastaanotto, porttimaksut, energian tai polttoaineen myynti tilan ulkopuolelle, laitoksen omistaa esim. maanviljelijöiden yhteenliittymä). Tällöin investointituen suuruus on alueesta riippuen 20–35 %. Lisäksi vuoden 2008 alussa tulevat todennäköisesti haettavaksi kansalliset maatalon investointituet, jotka mahdollistavat investointituen myöntämisen myös biokaasulaitoksille, jotka käsittelevät pääasiassa omalla tilalla syntyviä materiaaleja ja joissa tuotettu energia hyödynnetään pääasiassa omalla tilalla. Maatalon investointituella rahoitetuissa, oman tilan energiantuotantoon tarkoitettuissa kohteissa tuotettua energiaa saa myydä vähäisessä määrin tilan ulkopuolelle ja laitoksessa saa käsitellä vähäisiä määriä tilan ulkopuolisia jättemateriaaleja, mutta näistä saadut tulot eivät saa olla merkittävät tilan kokonaistalouden kannalta (Maa- ja metsätalousministeriö 2007c).

Lisäksi huhtikuussa 2007 julkaistussa hallitusohjelmassa Vanhasen II hallitus on ilmoittanut toteuttavansa syöttötariffijärjestelmän biokaasusta tuotetulle sähkölle. Syöttötariffijärjestelmällä on tarkoitus kattaa sähkön markkinahinnan ja biosähkön hinnan välinen erotus alle 20 MW:n biokaasulaitoksissa (Hallitusohjelma 2007). Syöttötariffijärjestelmän valmistelu käynnistyi syksyllä 2007 KTM:n toimesta, ja laki astunee voimaan vuonna 2008 (Eskola 2007; Kauppa- ja teollisuusministeriö 2007).

5 Biokaasun tuotannon perusteet

5.1 Biokaasun tuotannon raaka-aineet

Eläinten lanta on hyvä biokaasuprosessin perusmateriaali, koska se sisältää useimmat mikro-bien tarvitsemat ravinteet, sillä on korkea puskurikapasiteetti ja sitä on usein tasaisesti saatavilla ympäri vuoden. Lanan metaanintuottopotentiaali on keskimäärin 300 m³ metaania/tonni orgaanista ainetta (volatile solids, VS), mikä vastaa noin 10–20 m³ metaania/tonni märkää jätettä (1 m³ metaania vastaa energiasisällöltään noin 1 litraa kevyttä polttoöljyä) (Taulukko

5.1). Lannan alhaisen kuiva-ainepitoisuuden vuoksi metaanintuotto reaktoritilavuutta kohti on usein alhainen pelkkää lantaa käsiteltäessä. Biokaasulaitosten metaanintuottoa ja kannattavuutta voidaan usein parantaa yhteiskäsittelyllä, eli käsittelemällä reaktorissa lannan lisäksi muita orgaanisia materiaaleja. Potentiaalisia lisämateriaaleja ovat esimerkiksi yhdyskuntien ja teollisuuden biojätteet, puhdistamo- ja sakokaivolietteet sekä peltobiomassat, eli sekä energiantuotantoa varten viljeltyt energiakasvit että erilaiset kasvintuotannon sivutuotteet ja jätteet (Taulukko 5.1). Puhdistamolietteiden hyötykäyttöä saattaa joissakin tapauksissa rajoittaa raskasmetallipitoisuudet ja/tai orgaanisten haitta-aineiden pitoisuudet, joten niiden käyttöä on tarkasteltava tapauskohtaisesti.

Erilliskerätyn biojätteen ja esimerkiksi teurasjätteen metaanintuottopotentiaali on korkea, sillä niistä voidaan tuottaa noin 500–600 m³ metaania/tonni orgaanista ainetta eli noin 100–150 m³ metaania/tonni märkää jätettä (Campos ym. 1999; Luostarinen ym. 2000; Einola ym. 2001; Braun ym. 2003). Lainsäädäntö asettaa kuitenkin jotain rajoitteita eläinperäisten jätteiden ja lietteiden käytölle biokaasuprosessin raaka-aineena, ja näitä rajoituksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.

Taulukko 5.1. Esimerkkejä eri materiaalien metaanintuottopotentiaaleista.

Materiaali	Metaanintuottopotentiaali	
	m ³ CH ₄ / tonni orgaanista ainetta	m ³ CH ₄ / tonni märkápaino
Teurasjäte	570	150
Biojäte	500–600	100–150
Kasvibiomassa	300–450	30–150
Jätevedenpuhdistamon liete	200–400	5–15
Lehmänlanta	100–250	7–14
Sianlanta	300–400	17–22

1 m³ metaania ~ 1 l öljyä ~ 10 kWh

Biokaasun tuotantoon soveltuu monenlainen kasvibiomassa. Tarkoitusta varten viljeltyjen energiakasvien lisäksi erilaiset kasvintuotannossa syntyvät kasvijätteet sekä esimerkiksi keksantomailla, ylituotantona ja vuoroviljelyssä syntyvät kasvibiomassat voitaisiin hyödyntää biokaasun tuotannossa. Laboratoriokokeiden perusteella useimpien kasvien metaanintuottopotentiaali on 250–450 m³ metaania/tonni kuiva-ainetta (Taulukko 5.2). Märkápainotonna kohti vaihtelu on suurempaa, usein kuitenkin noin 100 m³ metaania/tonni (Lehtomäki 2006).

Biokaasun tuotantoon soveltuvien kasvien valinnassa on otettava huomioon useita erilaisia näkökohtia. Energiakasveiksi soveltuvien kasvilajien tulisi tuottaa runsaasti biomassaa mahdollisimman vähäisellä viljelypanostuksella, kasvien tulisi olla mahdollisimman helppoja viljellä, korjata ja varastoida, mahdollisimman kestäviä ja vaatimattomia, sekä tulla toimeen vähällä lannoituksella. Monivuotisten kasvien tulee lisäksi olla hyviä talvehtimaan. Jotta kasvibiomassan metaanintuottopotentiaali olisi mahdollisimman korkea, tulisi biomassan sisältää runsaasti helposti hajoavia hiilihydraatteja ja vähän hajotusta rajoittavaa ligniiniä. Lisäksi metaanintuottoa edistää mikrobitoiminnan kannalta optimaalinen hiili/typpisuhde.

Perinteisesti rehuna käytetyt monivuotiset heinäkasvit ovat yksi tehokkaimpia biomassan tuottajia pohjoisissa ilmasto-olosuhteissa (Lewandowski ym. 2003). Koska nämä kasvit on jalostettu rehuksi, on niiden hajoavuus anaerobisissa olosuhteissa (märehtijöiden pötsi, biokaasulaitos) hyvä. Heinäkasvien tuotantoon tarvittava kalusto ja asiantuntemus ovat olemassa, ja lisäksi ne ovat osa totuttua kulttuurimaisemaa. Nurmiheinät ovat melko vaatimattomia ja helppoja viljellä sekä varastoida säilörehumenetelmällä. Siten nämä perinteiset rehuksvit soveltuvat nykyisten tutkimustulosten perusteella hyvin biokaasun tuotantoon. Hehtaarin heinäsadosta on mahdollista tuottaa vuodessa noin 2 000–4 000 m³ metaania, mikä vastaa bruttoenergiasisällöltään n. 20–40 MWh. Mikäli yhden hehtaarin heinäsadosta tuotettu metaani käytettäisiin henkilöautojen polttoaineena (keskikulutus 8 m³ CH₄ /100 km), riittäisi se noin 25 000 – 50 000 ajokilometriin vuosittain (Taulukko 5.3). Tämä vastaa 1-2 henkilöauton vuotuista polttoainekulutusta (20 000 – 30 000 km/vuosi). Näissä luvuissa ei kuitenkaan ole huomioitu kasvibiomassan tuotannon ja biokaasuprosessin kuluttamaa energiaa. Esimerkiksi sokerijuurikkaasta saatava metaanintuotto on korkea (5 000–7 000 m³ CH₄ / ha), mutta sen vaatimat viljelypanostukset ovat vastaavasti heinäkasveja korkeammat (Taulukko 5.3).

Taulukko 5.2. Esimerkkejä eri kasvien metaanintuottopotentiaaleista.

Materiaali	Metaanintuottopotentiaali		
	m ³ CH ₄ / tonni orgaanista ainetta	m ³ CH ₄ / tonni kuiva-ainetta	m ³ CH ₄ / tonni märkäpaino
Ruokohelpi	340–430	330–420	100–170
Timotei-apila- nurmi	370–380	340–360	70–90
Maa-artisokka	360–370	340	90–110
Virna-kaura	400–410	370	60–100
Nokkonen	210–420	170–360	20–60
Lupiini	310–360	290–330	40
Rehukaali	310–320	280–290	30–40
Apila	280–300	260–270	40–70
Sokerijuurikas, juurikas + naatit	450	400	80
Sokerijuurikas, naatit	340	290	30–40
Olki	240–320	220–290	200–260

1 m³ metaania ~ 1 l öljyä ~ 10 kWh

Taulukko 5.3. Kasvien kuiva-ainesatoja, laskennallisia metaani- ja bruttoenergiasaantoja sekä potentiaalinen henkilöautokilometrien määrä hehtaaria kohti.

Kasvi	Sato (t _{kuiva-aine} / ha)	Metaanisaanto (m ³ CH ₄ / ha)	Bruttoener- giasaanto (MWh / ha)	Henkilöauto- kilometrit (1 000 km / ha)
Timoteinurmi	8-11 ¹	2900–4000	28–38	36–50
Ruokohelpi	9-10 ²	3800–4200	37–41	47–53
Maa-artisokka	9-16 ³	3100–5400	30–53	38–68
Sokerijuurikas (juurikas + naatit)	13–17 ⁴	5200–6800	50–66	65–85
Sokerijuurikas (pelkät naatit)	3-5 ⁴	900–1500	8-14	11–18
Kauran olki	2 ^{2,4}	600	6	7

1 m³ metaania ~ 1 l öljyä ~ 10 kWh

Henkilöauton keskimääräinen kulutus 8 m³ CH₄ / 100 km

¹ Kangas ym. 2004, ² Sankari 1993, ³ Hägglom 1988, ⁴ Hyytiäinen ym. 1999

Biokaasun tuotantoa varten sadonkorjuu kannattaa suorittaa melko varhaisessa kasvun vaiheessa, jolloin kasvubiomassan hajoavuus biokaasureaktorissa on parempi. Tällöin satoa on usein mahdollista korjata useita kertoja kasvukauden aikana, ja kokonaissadot ovat useimmiten kertakorjuumenetelmiä suurempia. Toisin kuin monet muut uusiutuvat energiamuodot, kasvubiomassa on melko helposti varastoitavissa ja käytettävissä silloin, kun energiankysyntä on suurimmillaan. Perinteiset kasvubiomassan varastointimenetelmät ovat kuivaus ja säilö-

hun valmistukseen perustuvat menetelmät. Kun kasvibiomassa käytetään biokaasun tuotantoon, kuivaus ei useimmiten ole suositeltavaa, koska kuivaus kuluttaa energiaa ja sen aikana menetetään orgaanista ainetta ja ravinteita. Lisäksi hyvin kuivien materiaalien käsitteleminen biokaasuprosessissa on usein vaikeaa. Tämän vuoksi säilörehun tekoon perustuvat menetelmät ovat käytössä useissa maissa varastoitaessa kasvibiomassaa biokaasun tuotantoa varten (Weiland 2003). Niillä on huomattu olevan myös potentiaalia parantaa kasvien metaanintuottoa. Laboratoriokokeissa ilman säilöntäaineita varastoidun heinän metaanintuottopotentiaalista menetettiin 3-6 kuukauden varastoinnin aikana 17–39 %, kun taas varastointi säilöntäaineiden avulla tehosti heinän sisältämän orgaanisen aineen säilymistä ja paransi metaanintuottopotentiaalia. Esimerkiksi muurahaishapolla varastoidun heinän metaanintuottopotentiaali oli 13–20 % tuoreen heinän metaanintuottopotentiaalia korkeampi (Lehtomäki ym. 2005). Varastoinnin aikana kasvibiomassan biokemialliset ominaisuudet voivat siis muuttua biokaasuprosessin kannalta otollisempaan suuntaan.

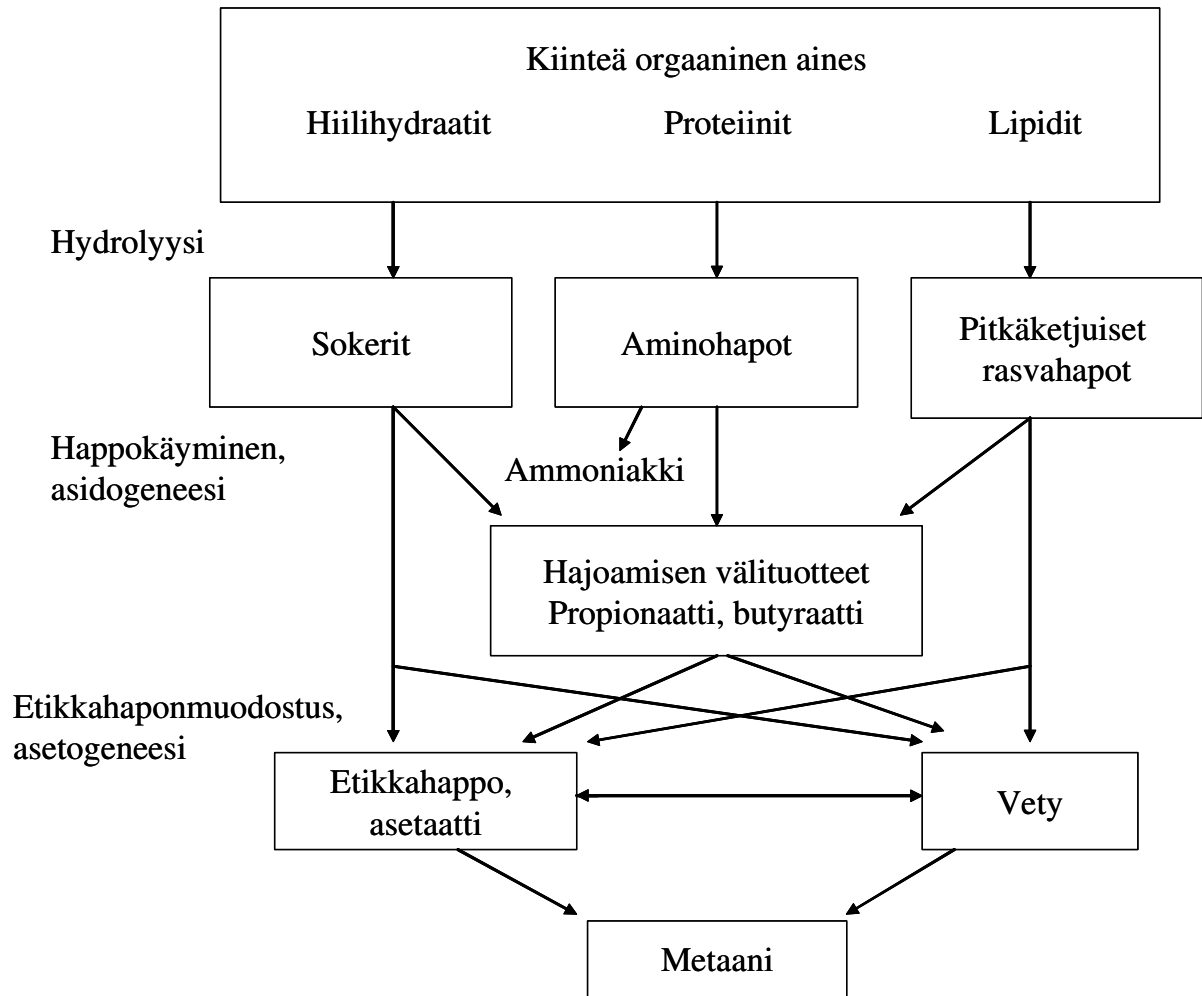
5.2 Anaerobinen hajoaminen

Biokaasuteknologia perustuu hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa tapahtuvaan orgaanisen aineen hajoamiseen. Anaerobinen hajoaminen on biologinen prosessi, jossa useat eri mikrobit osallistuvat hajotusketjun eri vaiheisiin (Kuva 5.1). Ensimmäisessä vaiheessa (hydrolyysi) haponmuodostajabakteerien erittämät entsyymit hajottavat käsiteltävän materiaalin sisältämät yhdisteet, eli hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat, yksinkertaisiksi liukoiksi yhdisteiksi, kuten yksinkertaisiksi sokereiksi, ammoniakiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi (long chain fatty acids, LCFA). Nämä yhdisteet, nk. hydrolyysituotteet, hajoavat edelleen happokäymisessä (asidogeneesi) haihtuviksi rasvahapoiksi (volatile fatty acids, VFA). Vetyä tuottavat bakteerit hajottavat muodostuneet rasvahapot edelleen asetaatiksi, hiilidioksidiksi ja vedyksi (asetogeneesi). Viimeisessä vaiheessa metaaninmuodostajabakteerit eli metanogeenit tuottavat metaania asetaatista tai vedystä ja hiilidioksidista. Metanogeenille tärkeimmät substraatit ovat asetaatti sekä vety ja hiilidioksidi. Ne eivät pysty hajottamaan yhdisteitä, joissa on enemmän kuin kaksi hiiliatomia. Biokaasuprosessin muiden bakteereiden on siis ensin hajotettava materiaali asetaatiksi tai vedyksi ja hiilidioksidiksi, jotta metaania muodostuisi (Hobson ja Wheatley 1993).

Mikäli anaerobisessa hajoamisessa on läsnä sulfaattia, muodostuu lisäksi rikkivetyä eli vety-sulfidia (H_2S) sulfaatinpelkistäjäbakteereiden toiminnan seurauksena (Widdel 1988). Rikkivetyä muodostuu myös lannan käsittelyssä vähäisiä määriä. Rikkivety on haiseva, myrkyllinen ja korroosiota aiheuttava kaasu, joten sen muodostumista pyritään minimoimaan.

Biokaasuprosessin hyödyntämistä myös biologiseen vedyntuotantoon on tutkittu (Ronkainen ym. 2005). Vety on anaerobisessa hajotusprosessissa muodostuva välituote, jonka metaania muodostavat mikrobit käyttävät nopeasti, ja siten vetyä ei normaalisti kerry prosessissa. Muuntamalla prosessin käyttöparametreja (esim. lämpötila, pH, viipymä) ja estämällä vetyä kuluttavien mikrobien toimintaa voidaan vedyn tuotantoa kuitenkin edistää. Myös yhdistettyä vedyn ja metaanin tuotantoa, jossa vetyä tuotetaan prosessin ensimmäisessä vaiheessa ja metaania toisessa, tutkitaan aktiivisesti. Biologinen vedyntuotanto on vielä kehitysasteella ja saavutetut vetysaannot ovat toistaiseksi olleet melko vaatimattomia (Ronkainen ym. 2005).

Ligniini, joka suojaa rakenteellisesti kasvien soluseinämän muita kuituja, selluloosaa ja hemiselluloosaa, hajoaa hitaasti anaerobisissa olosuhteissa. Käsiteltävän kasvibiomassan ikä ja kypsyysaste vaikuttavat kasvien kemialliseen koostumukseen ja siten metaanintuottopotentiaaliin, sillä kasvien ikääntyessä niiden ligniinipitoisuus usein kasvaa. Siksi kasvien korjuu-ajankohta on optimoitava siten, että kasvien metaanintuottopotentiaali on mahdollisimman korkea, mutta sadon määrä mahdollisimman suuri. Useilla kasveilla tähän päästään korjaamalla satoa useita kertoja kasvukauden aikana (Lehtomäki 2006).



Kuva 5.1. Anaerobisen hajoamisen tärkeimmät vaiheet ja välituotteet (Dolfing 1988; Madigan ym. 1997; Schomaker ym. 2000; Mata-Alvarez 2003).

Materiaaleja voidaan esikäsitellä eri tavoin metaanintuoton lisäämiseksi ja/tai nopeuttamiseksi. Mahdollisia vaihtoehtoja ovat erilaiset fysikaaliset (esim. partikkelikoon pienentäminen, lämpökäsittely), kemialliset (esim. happo- tai emäskäsittely) ja biologiset käsittelyt (esim. entsyymilisäys tai esikompostointi) tai niiden yhdistelmät. Esikäsitelyjen tarkoituksena on pienentää partikkelikokoa, lisätä käsiteltävän aineen ja mikrobin välistä kontaktipinta-alaa ja katkoa biomassan sisältämiä polymeeriketjuja helpommin hajoaviksi liukoisiksi yhdisteiksi. Esimerkiksi emäskäsittelyllä (lipeä, NaOH) oli mahdollista parantaa heinän ja sokerijuurikkaan naattien metaanintuottoa 10–15 % (Lehtomäki ym. 2004). Esikäsitelyn soveltuvuus ja taloudellisuus on selvitettävä tapauskohtaisesti.

5.3 Olosuhdetekijät

Anaerobiselle hajoamiselle optimaalisena pH-alueena pidetään 6,5–7,5. Mikrobien on kuitenkin havaittu pystyvän hajottamaan hiilihydraatteja jopa pH:ssa 5–6. Erityisesti metaanin muodostuminen eli hajotusketjun viimeinen vaihe on herkkä pH:n muutoksille. Happokäyminen (haponmuodostus) pyrkii laskemaan pH:ta, mitä tapahtuu erityisesti jätteen varastointivaiheessa. Biokaasuprosessit ovat kuitenkin yleensä itse-puskuroituvia ja pysyvät prosessin toimiessa normaalisti itsestään optimaalisella pH-alueella. Tarvittaessa käsiteltävän jätteen pH:ta kuitenkin voidaan säätää toiminnan varmistamiseksi. pH:n säädössä ei yleensä tule käyttää kalkkia, koska se muodostaa hiilidioksidin kanssa laitteistoihin saostuvaa kalsiumkarbonaattia.

Koska anaerobiset bakteerit tuottavat aineenvaihdunnassaan vähän lämpöä, on biokaasureaktoreita useimmiten lämmitettävä. Ulkoista energiaa ei kuitenkaan tarvita, sillä prosessin tuottama metaani toimii energianlähteenä ja käsitellyn materiaalin sisältämä lämpö voidaan ottaa talteen. Biokaasuprosesseja operoidaan useimmiten mikrobien optimilämpötilojen alueella, joko 35–38 °C:ssa (mesofiilinen prosessi) tai noin 55 °C:ssa (termofiilinen prosessi).

Orgaaninen jäte sisältää yleensä kaikkia anaerobisten mikrobien tarvitsemia ravinteita, kuten typpeä, hiiltä, fosforia, rikkiä, kalsiumia, magnesiumia, kaliumia, natriumia ja rautaa. Ravinteet eivät kuitenkaan välttämättä ole määrällisesti oikeassa tasapainossa, jotta anaerobinen hajoaminen olisi optimaalista. Erityisesti eräiden teollisuuden jätevesien ja jätteiden käsittelyssä ravinteiden puute tai vähäinen määrä voi rajoittaa mikrobien kasvua ja anaerobista hajoamista. Tämän vuoksi jätteiden sekoittaminen keskenään, eli eri materiaalien yhteiskäsittely, voi tehostaa anaerobista hajoamista tasapainottamalla ravinnemääriä. Käsiteltävän jätteen ominaisuuksia voikin olla kannattavaa määrittää kemiallisin analyysin, jotta prosessille voidaan luoda parhaat mahdolliset olosuhteet (Hobson ja Wheatley 1993; Mata-Alvarez ym. 2000).

5.4 Hajoamista hidastavat tekijät

Biologisissa prosesseissa inhibitiolla tarkoitetaan yleisesti jonkin kemiallisen tai fysikaalisen tekijän aiheuttamaa haittavaikutusta, joka häiritsee prosessin normaalia toimintaa tai tuhoaa tai inaktivoi hajotuksesta vastaavat mikrobit. Biokaasuprosessissa inhibitio on yleensä metaanintuottoa laskeva tai estävä kemiallinen prosessi, joka voi vaikuttaa kolmella tavalla: käsiteltävän materiaalin hajoaminen voi joko jatkua hidastuneena tai hajoaminen voi loppua vähitellen tai kokonaan hyvinkin nopeasti (Hobson ym. 1981).

Inhibiittoreita on kahdenlaisia. Normaalin anaerobisen hajotustoiminnan välituotteet (kuten rasvahapot, VFA) voivat kertyessään inhiboida biokaasuprosessia, mitä kutsutaan tuoteinhibitioksi. Toisaalta prosessissa käsiteltävä aines voi sisältää orgaanisia tai epäorgaanisia yhdisteitä, jotka inhiboivat prosessia (Hobson ym. 1981).

Typpi on tärkeä ravinne biokaasuprosessin loppumateriaalin käyttökelpoisuutta arvioitaessa. Korkeina pitoisuuksina se kuitenkin saattaa aiheuttaa ongelmia inhiboimalla metaanintuottoa. Yksi tärkeimmistä inhibitiota aiheuttavista tekijöistä erityisesti maatalouden jätteitä käsitellessä onkin ammoniakki (NH_3), eli ammoniumtypen (NH_4^+) ionisoitumaton muoto. Yleensä ammoniakin ja ammoniumtypen pitoisuuksien välille muodostuu tasapaino, mutta erityisesti runsaasti typpeä sisältävien jätteiden käsittelyssä (esim. kanan lanta) ammoniakin osuus ammoniumtypestä voi nousta inhiboivalle tasolle (Hobson ja Wheatley 1993).

Ammoniakin pitoisuus on riippuvainen pH:sta ja lämpötilasta. Mitä korkeampia ne ovat, sitä suurempi osuus ammoniumtypestä on ammoniakkina. Mikäli pH nousee 7:stä 8:aan, ammoniakin pitoisuus prosessissa nousee 8-kertaiseksi (Hansen ym. 1998). Erityisesti asetaatista metaania tuottavien mikrobien kasvu häiriintyy korkeissa typpipitoisuuksissa (Angelidaki ja Ahring 1993). Arviot ammoniakin haitallisesta pitoisuudesta vaihtelevat yleensä 0,1–1,1 g- NH_3 /l välillä. Mikrobien on kuitenkin havaittu sopeutuvan melko korkeisiin ammoniakkipitoisuuksiin (de Baere ym. 1984; Angelidaki ja Ahring 1993; Hansen ym. 1998). Sopeutuminen voi johtua haihtuvien rasvahappojen kertymisestä ja pH:n alenemisestä, jolloin ammoniakin osuus ammoniumtypestä laskee. Lehmänlannassa ammoniumtypen kokonaispitoisuuden ($\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$) 4 g-N/l on huomattu inhiboivan termofiilistä biokaasuprosessia. Mikäli prosessin annetaan sopeutua riittävän kauan korkeisiin typpipitoisuuksiin, se voi kuitenkin toimia jopa 6 g-

N/l pitoisuudessa. Metaanintuotto on tällöin kuitenkin hieman alempi ja haihtuvien rasvahapojen pitoisuus suurempi kuin ammoniumtyypen pitoisuuden ollessa 2,5 g-N/l (Angelidaki ja Ahring 1993). Tyypin inhiboiva vaikutus tuottaa yleensä enemmän ongelmia typpipitoisten sian- ja kananlannan käsittelyssä kuin lehmänlannan käsittelyssä (Wellinger 1999).

Myös pitkäketjuiset rasvahapot (LCFA) sekä haihtuvat rasvahapot (VFA) voivat inhiboida biokaasuprosessia. Rasvahapot ovat normaaleja välituotteita orgaanisen aineen anaerobisessa hajoamisessa. LCFA:t voivat inhiboida metaanintuoton lisäksi myös hydrolyysiä, jolloin anaerobinen hajoaminen ei etene lainkaan (Salminen 2000). Mikäli käsiteltävä jäte on helposti hajoavaa, VFA:ja muodostuu nopeasti. Metanogeenit kuitenkin kasvavat hitaammin kuin happonmuodostajabakteerit, minkä vuoksi liian suuri kuormitus voi johtaa VFA:n kertymiseen (Björnsson ym. 1997). Mikäli esimerkiksi biokaasuprosessin käynnistysvaiheessa kuormitusta nostetaan vähitellen, prosessi ehtii kuitenkin sopeutua, eli metanogeenit lisääntyvät, eikä hajoaminen häiriinny (Hobson ym. 1981). VFA:n kertymistä pidetään yleisesti merkinä epätasapainoisesta prosessista, jossa metaanintuotto laskee tai pysähtyy kokonaan. Erityisesti asetaatin, propionaatin ja butyraatin pitoisuuksia on pidetty hyvinä indikaattoreina, sillä ne kuvaavat prosessin herkimpien organismien toimintaa (Björnsson ym. 1997). Etenkin propionaatin suuren pitoisuuden on havaittu inhiboivan metaanintuottoa (Hobson ja Wheatley 1993, Marchaim ja Krause 1993). Kertyessään VFA:t alentavat prosessin pH:ta (Hobson ja Wheatley 1993). pH alenee sitä enemmän, mitä pienempi prosessin puskurointikyky eli alkaliniteetti on. Mikäli prosessin puskurointikyky on hyvä (lannan käsittelyssä yleensä ammoniakkin takia), pH ei alene, eikä VFA:n kertymistä voida pH-mittauksista havaita (Björnsson ym. 1997).

Sulfaatin pelkistyksessä muodostuva rikkivety eli vetysulfidi (H_2S) voi inhiboida anaerobista hajoamista. Se on korkeina pitoisuuksina myrkyllistä mikrobeille, ja lisäksi vetysulfidin muodostaminen voi syrjäyttää metaanituotannon, mikäli läsnä on runsaasti sulfaattia. Biokaasuprosessissa vetysulfidi aiheuttaa korroosiota, minkä vuoksi se pyritään poistamaan muodostuvasta biokaasusta. Sitä poistetaan esimerkiksi lisäämällä prosessiin happea, sillä hapen kanssa reagoidessaan vetysulfidi muodostaa alkuainerikkiä (Widdel 1988). Myös rauta saostaa rikkivetyä.

Myös liuennut happi voi inhiboida anaerobista hajoamista. Se ei yleensä kuitenkaan pääse vaikuttamaan merkittävästi, sillä reaktorissa olevat fakultatiiviset eli sekä hapellisissa että

hapettomissa olosuhteissa kasvavat mikrobit kuluttavat nopeasti prosessiin kulkeutuneen hapen. Myös hiilidioksidin vähäinen määrä voi häiritä metaanintuottoa alentamalla prosessin puskurointikykyä. Muita mahdollisia inhibiittoreita ovat esimerkiksi käsiteltävässä aineksessa suurina pitoisuuksina olevat desinfiointi- ja puhdistusaineet, antibiootit, raskasmetallit ja ligniini (Hobson ym. 1981; Hobson ja Wheatley 1993).

Inhibitiota voidaan välttää laimentamalla syötettävää materiaalia ei-inhiboivilla materiaaleilla ja välttämällä prosessin ylikuormitusta.

5.5 Patogeenit ja hygieniaindikaattoribakteerit biokaasuprosessissa

Orgaaniset jätteet ja myös eläinten lanta sisältävät suuria määriä erilaisia mikrobeja. Valtaosa niistä on hyödyllisiä ihmisten ja eläinten normaaliflooraan kuuluvia bakteereita, mutta mukana saattaa olla myös tauteja aiheuttavia patogeenisiä bakteereita. Tyypillisiä ihmisten ja eläinten ruoansulatuskanavan ja suoliston normaaliflooraan kuuluvia mikro-organismeja ovat mm. enterobakteerit, *E. coli* ja enterokokit, joiden määrä lannassa on tyypillisesti luokkaa 10 000 – 10 milj. pmy/g (Madigan ym. 1997). Samantasoisia määriä löytyy myös mm. vihannes-, hedelmä- ja puutarhajätteestä sekä jätevesilietteistä, joissa lisäksi esiintyy yleisesti salmonella-suvun bakteereja (Watanabe ym. 1997; Stubsgaard 2001; Termorshuizen ym. 2003; Horan ym. 2004; Sahlström ym. 2004).

Patogeeniset bakteerit ovat useimmiten melko harvalukuisia, niitä voi olla vaikea todeta tai niiden analysointi on hidasta. Materiaalien hygieenisen laadun ja ulosteperäisten patogeenien osoittajana käytetään yleensä ei-patogeenisiä indikaattoribakteereita, jotka esiintyvät suurina määrinä ihmisten ja eläinten suolistossa (Sahlström 2003). Terveystieteissä yleiset indikaattorilajit, kuten *E. coli* ja sulfaattia pelkistävät klostridit eivät välttämättä ole riittäviä indikoimaan patogeeneja eläinten lannassa. Esimerkiksi *E. coli*:n määrät ovat eläinten lannassa huomattavasti vähäisemmät kuin ihmisen ulosteessa (Colleran 1999). Tanskassa tehdyissä tutkimuksissa parhaiksi lannan patogeeni-indikaattoreiksi havaittiin enterokokit (fekaaliset streptokokit), koska ne ovat kestävämpiä kuin useimmat muut indikaattorilajit ja täten kuvaavat hyvin prosessin hygienisoivaa vaikutusta (Bendixen 1997; Colleran 1999). Myös *Salmonella* -suvun bakteereiden puuttuminen käsitellystä lannasta kuvaa hyvää hygienisointitehoa.

Monet bakteerilajit voivat epäedullisissa olosuhteissa kuitenkin muuttua kestävämpään muotoon, nk. lepomuotoon, ja näin selviytyä käsittelystä. Lepomuotoja on vaikeaa havaita patogeenimäärityksissä (Kearney ym. 1994).

Merkittävin mikrobien tuhoutumiseen vaikuttava tekijä on lämpötila, eli mikrobit tuhoutuvat sitä nopeammin, mitä korkeampi on lämpötila. Muita mikrobien tuhoutumiseen vaikuttavia tekijöitä biokaasuprosessissa ovat mm. käsittelyaika ja -tapa (panos- vai jatkuvatoiminen), pH, haihtuvien rasvahappojen määrä, mikrobien ominaisuudet ja käytettävissä olevat ravinteet. Patogeenit kilpailevat ravinteista haponmuodostajabakteereiden kanssa, sillä ne kaikki käyttävät hiilihydraatteja ravinnokseen. Typpiyhdisteitä hyödyntävillä patogeeneillä on kilpailuetu biokaasuprosessissa, sillä tyypeä käyttäviä bakteereita on usein vähemmän kuin hiilihydraatteja käyttäviä. Lisäksi bakteerit, jotka kykenevät kiinnittymään orgaaniseen aineeseen, pystyvät myös paremmin hyödyntämään sitä. Tuhoutumiseen vaikuttaa myös käsiteltävien materiaalien mikrobimäärä lähtötilanteessa (Kearney ym. 1994; Sahlström 2003).

Mikrobimäärät esitetään usein kymmenpotenssina ja logaritmisella asteikolla. Vähentäminen jossain ajassa annetaan yleensä \log_{10} -arvona. Vähentäminen 1 \log_{10} tarkoittaa 90 %, 2 \log_{10} , 99 % jne. mikrobimäärän vähentäminen verrattuna lähtötilanteeseen. Vähentäminen 1 \log_{10} saavutetaan termofiilissä olosuhteissa (n. 55 °C, ks. kpl 6.1) muutamassa tunnissa, mesofiilissä (n. 35-38 °C, ks. kpl 6.1) olosuhteissa muutamassa päivässä ja perinteisessä varastoinnissa siihen kuluu jopa useita kuukausia (Sahlström 2003).

Sivutuoteasetus (EY/1774/2002) vaatii materiaalien hygienisoinnin tunnin ajan 70 °C:ssa joko ennen tai jälkeen reaktorikäsittelyn. Vastaavaa käsittelyä käytetään mm. maidon pastöroinnissa. Kyseisessä lämpötilassa useimmat bakteerit tuhoutuvat jo alle kymmenessä minuutissa (Euroopan komissio 2001a). Poikkeuksena ovat itiöitä muodostavat bakteerit, kuten klostridit. Biokaasuprosessin mesofiilissä olosuhteissa mikrobien on todettu vähenevän noin 2 \log_{10} verrattuna syötön mikrobimääriin. Termofiilissä olosuhteissa lopputuotteiden mikrobimäärät ovat yleisesti <10 pmy/g riippumatta syöttöpitoisuuksista ja esim. salmonella tuhoutuu täysin (mm. Kearney ym. 1993; Watanabe ym. 1997; Horan ym. 2004; Nicholson ym. 2004; Sahlström ym. 2004).

5.6 Lannan ja muiden orgaanisten materiaalien yhteiskäsittely

Maatilojen biokaasulaitosten metaanintuottoa ja kannattavuutta voidaan usein parantaa erilaisien materiaalien yhteiskäsittelyllä. Tilan ulkopuolisten materiaalien yhteiskäsittely tilalla tuotettujen materiaalien kanssa parantaa laitoksen taloudellista kannattavuutta paitsi näistä materiaaleista saatavan lisäenergian, myös jätteen tuottajan mahdollisesti maksamien käsittelymaksujen, nk. porttimaksujen, ansiosta. Lisäksi erilaisten jätteiden yhteiskäsittely on todettu useissa tapauksissa edulliseksi biokaasuprosessin toiminnalle. Eri jätejakeiden yhteiskäsittely voi tasapainottaa käsiteltävän materiaalin ravinne- ja kosteuspitoisuuksia siten, että suuremman metaanintuoton lisäksi myös orgaaninen aine hajoaa paremmin. Samalla kiinteästäkin jätteestä tulee lietemäistä ja pumpattavaa, jolloin sitä on helpompi käsitellä sekä itse prosessissa että sen jälkeen. Erilaisten materiaalien yhdistämisen voi myös laimentaa inhiboivia aineita haitattomiin pitoisuuksiin. Yhteiskäsittely voi olla edullista myös mittakaavallisesti. Sen sijaan, että rakennettaisiin useita laitoksia, rakennetaan vain yksi kaikille jätejakeille. Anaerobisessa yhteiskäsittelyssä saadaan kiertoon lannan lisäksi muun orgaanisen materiaalin sisältämät ravinteet, mikäli loppumateriaali käytetään lannoitteena (Tafdrup 1997; Mata-Alvarez ym. 2000). Parhaan metaanintuoton saamiseksi on optimoitava yhteiskäsittelyyn otettavien materiaalien laatu, määrä ja sekoitussuhde.

Maatilakohtaisissa biokaasuprosesseissa käsitellään usein lannan kanssa elintarviketeollisuuden helposti hajoavia biojätteitä. Muita mahdollisia yhteiskäsiteltäviä materiaaleja ovat mm. yhdyskuntien erilliskerätty biojäte, jätevesiliete ja kasvibiomassa. Esimerkiksi Saksassa maatilakohtaisissa reaktoreissa käsitellään varsin yleisesti elintarviketeollisuuden sivutuotteita ja tarkoitusta varten viljeltyjä energiakasveja.

Metaanintuoton on havaittu nousevan lannan ja erilaisten kasvien yhteiskäsittelyssä verrattaessa pelkän lannan käsittelyyn. Syynä tähän on pidetty yhteiskäsittelyssä muodostuvaa suotuisaa hiili/typpi (C/N) -suhdetta. Matalassa C/N-suhteessa hiilen lisääminen nostaa metaanintuottoa vähentämällä ammoniakki aiheuttamaa inhibitiota. Korkeassa C/N-suhteessa hiilen lisäys taas laskee metaanintuottoa, kun tyypeistä tulee rajoittava ravinne. Metaanintuoton onkin havaittu laskevan, jos kasvien osuus yhteiskäsittelyssä nousee liian suureksi, ja näin ollen on tärkeää arvioida sopiva sekoitussuhde lannan ja käytettyjen kasvien välille (Hills 1979; Hashimoto 1983; Nordberg ja Edström 1999; Lehtomäki ym. 2007). Käsittelyssä ongelmaksi

voi muodostua esimerkiksi korren kappaleiden nouseminen lannan pinnalle. Oikea sekoitus-suhde, murskausmenetelmä ja sekoitus kuitenkin edesauttavat kasvien pysymistä lietteen se-assa (Nordberg ja Edström 1999).

Yhteiskäsittelyn suurimmat riskit ovat haitta-aineiden ja patogeenien leviäminen. Käsittelyn ympäristölliseen ja taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat myös mm. jätejakeiden ja lop-pumateriaalin kuljetus- ja varastointitarve. Yhteiskäsittelyssä on myös huomioitava käsiteltä-vien materiaalien vaikutus lopputuotteen hygieeniseen laatuun ja lannoitekäyttömahdollisuu-teen. Käsiteltävien materiaalien on oltava helposti hajoavia, eikä niiden käyttö saisi haitata käsitellyn materiaalin hyödyntämistä pelloilla (Tafdrup 1994). Orgaaniset jätteet sisältävät yleensä patogeenisiä bakteereja, loisia ja viruksia, jotka voivat levitä tuotantosysteemien, eläinten kuljetuksen ja eläinperäisten tuotteiden jakelun ja kulutuksen kautta. Lannan kuljetus biokaasulaitoksiin, sen sekoittaminen toisista lähteistä tulleeseen lantaan sekä käsitellyn lan-nan jakelu lannoitteeksi luovat uusia leviämisreittejä patogeeneille. Lisäksi esimerkiksi teu-ras- ja kalajätteen sekä jätevedenpuhdistamoiden lietteen ja biojätteen sekoittaminen lannan joukkoon monipuolistaa patogeenikantaa. Sivutuoteasetuksen mukainen hygienisointikäsittely on kuitenkin tehokas patogeenien tuhoaja ja se saattaa myös parantaa joidenkin materiaalien metaanintuottopotentiaalia (Colleran 1999; Paavola ym. 2006; Paavola & Rintala 2006; Sahl-ström 2003).

6 Biokaasuprosessit

6.1 Mesofiiliset ja termofiiliset prosessit

Biokaasuprosesseja operoidaan useimmiten mikrobien optimilämpötilojen alueella, joko 35–38 °C:ssa (mesofiilinen prosessi) tai noin 55 °C:ssa (termofiilinen prosessi). Kuitenkin myös psykrofiilinen käsittely (≤ 20 °C) on mahdollista. Termofiilisen käsittelyn etuna on käsiteltä-vän jätteen nopeampi hajoaminen, jolloin tarvittava reaktoritilavuus on pienempi ja reaktorin rakentamiskustannukset siten alhaisemmat. Erityisesti hajoamisjäännöksen peltokäytön kan-nalta on tärkeää käsiteltävien materiaalien tehokkaampi hygienisoituminen termofiilisisä olosuhteissa. Termofiiliset prosessit saattavat myös tuottaa enemmän biokaasua kuin alem-missa lämpötiloissa operoidut prosessit. Tällöin energiasaanto termofiilisisä prosessissa voi

olla suurempi kuin esimerkiksi mesofiilisessa prosessissa reaktorin suuremmasta lämmitystarpeesta huolimatta. Jotta kaikkiin näihin etuihin yllettäisiin, termofiilisen käsittelyn on toimitettava lyhyillä viipymillä ja korkealla orgaanisen aineen kuormituksella (Mackie ja Bryant 1995).

Mesofiilisen prosessin etuihin on luettu sen vakaa toiminta. Termofiilistä prosessia pidetään herkempänä lämpötilan ja pH:n muutoksille sekä inhibiittorien vaikutuksille. Metaanintuottoa inhiboivan ammoniakkin määrän tiedetään nousevan lämpötilan ja pH:n kohotessa, joten termofiilisessa prosessissa sen osuus on huomattavasti suurempi kuin mesofiilisessa reaktorissa vastaavalla typpipitoisuudella (Zeeman ym. 1985; Mackie ja Bryant 1995). Käsiteltävän jätteen nopeampi hajoaminen termofiilisessa prosessissa voi johtaa liukoisen orgaanisen aineen kasvuun ja rasvahappojen kertymiseen, mikä myös inhiboi metaanintuottoa (Maibaum ja Kuehn 1999).

6.2 Märkä- ja kuivaprosessit

Perinteinen biokaasuteknologia on suunniteltu materiaaleille, joilla on alhainen kuiva-ainepitoisuus. Tällaiset materiaalit käsitellään yleisimmin jatkuvasekoitteisissa reaktoreissa (continuously stirred tank reactor, CSTR), joita operoidaan yleensä enimmillään 10–13 % kuiva-ainepitoisuudessa. Näiden niin kutsuttujen märkäprosessien syöte ja käsitelty materiaali ovat siten helposti pumpattavissa ja mekaanisesti sekoitettavissa. Sekoittaminen voi tapahtua joko mekaanisten sekoittimien, kaasukuplien tai lietteen kierrätyksen avulla, ja sen tarkoituksena on levittää mikrobeja tasaisesti käsiteltävään materiaaliin, tasoittaa lämpötilaeroja reaktorissa, estää laskeutumista ja pintalietteen muodostumista sekä vapauttaa biokaasukuplat käsiteltävästä materiaalista (Wellinger 1999). Märkäprosessien etuna on se, että ne ovat usein kuivaprosesseja helpommin automatisoitavissa ja hallittavissa, mutta niissä kaasuntuotto voi korkeasta nestepitoisuudesta johtuen jäädä alhaisemmaksi reaktoritilavuutta kohti. Esimerkiksi käsiteltäessä märkäprosesseissa pelkkää lantaa kaasuntuotto reaktoritilavuutta kohti jää usein verrattain alhaiseksi, mutta sitä voidaan pyrkiä nostamaan käsittelemällä perusraaka-aineen lisänä kuivempia materiaaleja. Kiinteät materiaalit voidaan sekoittaa syötteeseen erillisessä sekoitussäiliössä. Erilaisia ratkaisuja, kuten ruuvikuljettimia, syöttömäntiä ja huuhtelu-

järjestelmiä, on myös kehitetty helpottamaan kiinteiden materiaalien kuten kasvibiomassan syöttämistä suoraan reaktoriin (Weiland 2006).

Kaasuntuottoa reaktoritilavuutta kohti voidaan nostaa myös operoimalla prosesseja korkeammalla kuiva-aine-pitoisuudella niin kutsuttuina kuivaprosesseina, joissa käsiteltävän materiaalin kuiva-ainepitoisuus on yleensä noin 20–40 %. Kuivaprosessit voivat olla joko panosperiaatteella toimivia tai jatkuvatoimisia, sekoituksella varustettuja tai sekoittamattomia, ja yksitai useampi-vaiheisia. Jatkuvatoimiset kuivaprosessit ovat usein tulppavirtausperiaatteella (plug flow) toimivia (kaupallisia nimiä esim. Dranco-, Linde- ja Kompogas-prosessit). Panosperiaatteella toimivat kuivaprosessit ovat usein nk. suotopetiprosesseja, joissa kierrätetään suotovettä käsiteltävän materiaalin läpi, mikä edistää mikrobien, ravinteiden ja hajoamistuotteiden tasaista jakautumista käsiteltävään materiaaliin. Kuivaprosessien vakaan toiminnan edellytyksenä on usein riittävä käsitellyn materiaalin kierrättäminen reaktoriin tasaisen mikrobikannan ylläpitämiseksi, ja kierrätettävän materiaalin osuus voi olla jopa 50 % reaktoriin syötettävästä materiaalista. Kiinnostus kuivaprosessien käyttöä kohtaan erityisesti energiakasvien käsittelyssä on lisääntynyt esimerkiksi Saksassa viime vuosina (Weiland 2006).

Kuivaprosesseissa voidaan saavuttaa märkäprosesseja korkeampi metaanintuotto reaktoritilavuutta kohti, materiaalien lämmitykseen kuluu vähemmän energiaa alhaisemmasta nestepitoisuudesta johtuen, ja mm. materiaalien kelluminen ja pintakerroksen muodostuminen ei yleensä ole ongelma. Toisaalta kuivaprosessien haittapuolena on usein märkäprosesseja alhaisempi puskurikapasiteetti ja siitä aiheutuva suurempi valvonnan ja prosessin ohjauksen tarve, sekä monimutkaisempien ja kalliimpien laitteiden tarve materiaalien syötössä reaktoriin. Kasvibiomassaa käsittelevissä kuivaprosesseissa on havaittu nk. autotermistä lämpenemistä, eli niissä hajotusmetabolian tuloksena kehittynyt lämpö on riittänyt nostamaan reaktorin lämpötilaa. Tämä ilmiö voi vähentää reaktorin lämmitystarvetta, mutta voi äärimmäisissä tapauksissa johtaa liialliseen lämpenemiseen ja jopa edellyttää jäähdytyksen käyttöönottoa (Lindorfer ym. 2005).

6.3 Panos- ja jatkuvatoimiset prosessit

Maatilakohtaisissa biokaasureaktoreissa yleisimmin käytetty reaktorityyppi on jatkuvatoiminen ja -sekoitteinen (CSTR), eli käsiteltävää materiaalia pumpataan reaktoriin ja käsiteltyä materiaalia reaktorista pois säännöllisesti siten, että tilavuus reaktorissa pysyy samana (Wellinger 1999). Jatkuvatoimisen prosessin etuna on mm. syötön automatisoitavuus ja tasainen kaasuntuotto. Panosperiaatteella toimivat prosessit taas tyhjennetään ja täytetään uudella materiaalilla (johon on yleensä sekoitettu käsiteltyä materiaalia tasaisen mikrobikannan ylläpitämiseksi reaktorissa) tasaisin väliajoin, esim. neljän-kuuden viikon välein. Panosreaktorien täyttö ja tyhjentäminen on yleensä työntensiivinen vaihe, mutta muuten panosprosessi voi toimia vähällä hoidolla. Kaasuntuoton käynnistyminen uudessa panoksessa vie tyypillisesti useita päiviä, joten tasaisen kaasuntuoton varmistamiseksi operoidaan usein useaa panosreaktoria rinnakkain. Saksassa on käytössä erityisesti energiakasvien käsittelyssä panosperiaatteella toimiva nk. autotallireaktori (garage fermentor), joka on etukuormaajalla tyhjennettävä ja täytettävä, suotoveden kierrätyksellä varustettu konttimallinen reaktori. Näitä panosreaktoreja suositellaan operoitavan vähintään kolmea rinnakkain samanaikaisesti, mikä mahdollistaa melko tasaisen kaasuvirran ja suotoveden kierrättämisen reaktoreiden välillä tasaisen mikrobikannan ylläpitämiseksi. Jälkimmäisen edellytyksenä on myös käsitellyn materiaalien sekoittaminen tuoreeseen syötteeseen reaktorien tyhjennyksen ja täytön yhteydessä (Weiland 2006).

6.4 Yksi- ja monivaiheiset prosessit

Biokaasuprosessit voivat olla yksi- tai monivaiheisia. Anaerobinen hajoaminen on monivaiheinen prosessi, jonka eri vaiheisiin osallistuvat eri mikrobit, joilla oli erilaiset optimiolosuhteet. Monivaiheisessa prosessissa on mahdollista pyrkiä erottamaan hajotuksen eri vaiheet eri reaktoreihin, jolloin olosuhteet voidaan pyrkiä säätämään kunkin vaiheen kannalta optimaaliseksi, ja siten tehostaa hajotusta ja kaasuntuottoa. Kaksivaiheisessa prosessissa voidaan esimerkiksi pyrkiä optimoimaan ensimmäisen reaktorin olosuhteet hydrolyysin ja happokäymisen kannalta otollisiksi, kun toisessa vaiheessa olosuhteet optimoidaan metaanin muodostumiselle edellisen vaiheen hajoamistuotteista. Monivaiheisen prosessin tarkoituksena voi myös olla pidentää kokonaisviipymää ilman että pyritään erottamaan hajotuksen vaihteita eri reaktoreihin. Näin voidaan pienentää oikovirtauksen riskiä, eli sitä, että osa syötettävästä materiaa-

lista saattaa virrata suoraan tai hyvin nopeasti ulos reaktorista. Tämä voi alentaa kaasuntuottoa, lisätä metaanipäästöjen vaaraa jälkivarastoinnissa sekä heikentää lopputuotteen hygieenistä laatua. Noin 2/3 uusista Saksassa rakennettavista biokaasulaitoksista on vähintään kaksivaiheisia, eli niissä on vähintään kaksi reaktoria rakennettuna sarjaan, pidemmän kokonaisviipymän ja korkeamman kaasuntuoton varmistamiseksi (Weiland 2006).

7 Biokaasuprosessin suunnittelu

Biokaasuprosessin suunnittelussa lähtökohtana ovat käsiteltävän materiaalin määrä ja ominaisuudet sekä suunniteltu lopputuotteiden hyödyntämistapa. Prosessin toteutukseen kuuluvat luonnollisesti myös erilaiset rakennus-, sähkö- ja automaatio suunnittelut sekä rakennus- ja ympäristölupa. Lisäksi 20 000 tonnia tai sitä enemmän raaka-ainetta vuodessa käsittelevillä laitoksilla on toteutettava ympäristövaikutusten arviointimenettely. Mikäli laitoksessa käsitellään jotain muita eläinperäisiä sivutuotteita lannan lisäksi, on haettava myös sivutuoteasetuksen mukainen laitoshyväksyntä Elintarviketurvallisuusvirastolta.

Maatilakohtainen biokaasulaitoskonsepti koostuu yleensä vähintään neljästä osiosta, jotka ovat navetta, raakalieteallas, biokaasureaktori ja jälkivarasto. Tilan ulkopuolisia materiaaleja käsiteltäessä laitteistoon voi kuulua myös esimerkiksi varastointitilaa, hygienisointiyksikkö, jätteen murskauslaitteisto sekä syöttösäiliö. Kasvien hyödyntäminen biokaasun tuotannossa edellyttää myös omat rakenteensa, kuten laakasiilot kasvien varastointiin ja koneketjun kasvien korjuuseen. Lisäksi laitokseen kuuluvat turvallisuus- ja kaasunpuhdistuslaitteet, kaasuväestö ja laitteistot kaasun ja käsittelyn jäännöksen hyödyntämiseksi. Kaikille osioille on olemassa lukuisia erilaisia teknisiä ratkaisuja. Lainsäädäntö edellyttää monissa maissa, myös Suomessa, mautiloille lannan varastointikapasiteetin rakentamista. Katettuna kyseistä allastilavuutta voidaan käyttää biokaasureaktorissa käsitellyn materiaalin jälkivarastona, jossa pitkän viipymän (jopa 12 kk) aikana materiaali hajoaa edelleen biokaasuksi eli tapahtuu nk. jälkikaasuuntumista, joka voi tuottaa 10–15 % koko prosessin kaasutuotannosta.

Biokaasuprosessin kannalta tärkein on biokaasureaktori, jonka valinnassa ja operoinnissa on huomioitava käsiteltävän materiaalin ominaisuudet, erityisesti sen homogeenisuus ja kuiva-

ainepitoisuus. Mikäli maatilakohtaisessa biokaasureaktorissa käsitellään muualta tulevia orgaanisia jätteitä, voidaan tarvita niiden esikäsittelyä. Esikäsittelyssä erotetaan käsittelyyn kelpaamaton aines (jo syntypaikalla), pilkotaan suuret kappaleet, sekoitetaan eri jättejakeet keskenään ja hygienisoidaan sitä vaativat materiaalit. Maatilakohtaisiin laitoksiin ei työlästä erotelua vaativaa jätettä kannata ottaa käsiteltäväksi. Sen sijaan nk. puhdasta jätettä (elintarviketeollisuuden jätteet, puutarhajäte) voidaan suositella (Wellinger 1999).

7.1 Biokaasuprosessin mitoitus

Biokaasuprosessin viipymä (hydraulic retention time, HRT) tarkoittaa keskimääräistä aikaa, jonka käsiteltävä jäte viipyy reaktorissa. Se lasketaan jakamalla biokaasureaktorin nestetilavuus päivittäisen syötön määrällä. Jatkuvasyötteisessä reaktorissa viipymän on oltava pidempi kuin bakteereiden kaksinkertaistumisajan, jottei bakteerimassa huuhtoudu ulos reaktorista. Minimiviipymä riippuu käsiteltävästä jätteestä ja lämpötilasta. Hajoaminen nopeutuu seuraavassa järjestyksessä: selluloosa, hemiselluloosa, proteiinit, rasvat, hiilihydraatit. Lehmänlannan keskimääräinen viipymä mesofiilisessa (lämpötila noin 35–38°C) biokaasuprosessissa on 12–20 päivää ja lannan, jossa on runsaasti heinää, 18–36 päivää (Wellinger 1999). Energiakasveja käsittelevissä biokaasuprosesseissa on käytetty pitkiä, jopa 60–90 päivän viipymiä syötteen korkeasta kiintoainepitoisuudesta johtuen (Weiland 2006). Vaikka lipidit eli rasvahdisteet ovat melko helposti hajoavia, niiden hajoamistuotteet, pitkäketjuiset rasvahapot (LCFA) voivat kertyessään inhiboida prosessia. Siksi esimerkiksi teurastamoiden sivutuotteiden käsittely voi vaatia pidemmän viipymän. Alemmissa lämpötiloissa rajoittava vaihe on haihtuvien rasvahappojen (VFA) hajoaminen, ja niiden kertymisen estämiseksi viipymän on oltava riittävän pitkä (Wellinger 1999).

Kuormitus (organic loading rate, OLR) tarkoittaa reaktoriin lisätyn orgaanisen aineen määrää reaktoritilavuutta kohti, ts. se on päivittäin lisätty jättemäärä (m^3) kertaa jätteen orgaanisen aineen pitoisuus kuutiometrissä jätettä jaettuna reaktorin (neste)tilavuudella. Se ilmaistaan joko kemiallisena hapenkulutuksena ($kgCOD/m^3d$, COD = chemical oxygen demand) tai orgaanisena aineena ($kgVS/m^3d$, VS = volatile solids). Yleisesti kuormitus mesofiilisisissa lehmänlantaa käsittelevissä täyssekoitteisissa reaktoreissa on 2,5–3,5 $kgVS/m^3d$ ja lantaa sekä muuta orgaanista jätettä yhteiskäsittelevissä reaktoreissa 5,0–7,0 $kgVS/m^3d$ (Wellinger 1999).

Kuormituksen säätely on yksi tärkeimmistä keinoista valvoa biokaasureaktorin toimintaa. Mikäli kuormitus on liian suuri, prosessi voi mennä nk. hapoille eli prosessiin kertyy hajoaamisen välituotteita. Tämän seurauksena prosessin metaanintuotto vähenee ja voi loppua kokonaan.

7.2 Biokaasuprosessin operointi

Biokaasulaitoksessa voidaan säädellä prosessiin lisättävää jätteen määrää ja osin myös koostumusta. Säätely tapahtuu toisaalta prosessin biologisen toimivuuden vaatimusten mukaan ja myös halutun energiantuotannon mukaan.

Biokaasulaitoksessa biologisen toimivuuden seurannan kannalta tärkein mitattava parametri on biokaasuntuotanto (m^3) ja biokaasun metaanipitoisuus. Erityisesti metaanintuoton seuranta on tärkeää, sillä mikäli se laskee, tiedetään prosessissa olevan ongelmia, joihin tulisi puuttua mahdollisimman nopeasti (Schomaker ym. 2000). Muita seurattavia parametreja voivat olla esim. käsitellyn materiaalin pH, alkaliniteetti, liukoinen orgaaninen aine (liukoinen kemiallinen hapenkulutus, soluble chemical oxygen demand, SCOD), haihtuvien rasvahappojen määrä (VFA), käsiteltävän ja käsitellyn materiaalin kuiva-aine- (TS) ja orgaanisen aineen (VS) pitoisuus ja typpipitoisuus (kokonais- ja/tai ammoniumtyppi).

Biokaasun tuotantoa voidaan säädellä energianhinnan mukaan, eli voidaan pyrkiä tuottamaan enemmän energiaa silloin, kun siitä maksettava hinta on korkein (esim. talvisin). Säätelyä voidaan tehdä energiasisällöltään korkeilla materiaaleilla sekä varastoimalla materiaaleja käytettäväksi haluttuna ajankohtana.

7.3 Keskitetty ja maatilakohtainen biokaasutuotanto

Maatilakohtaisessa biokaasulaitoksessa käsitellään useimmiten tilan eläinten tuottama lanta. Lisäksi voidaan yhteiskäsitellä jotain muuta lähialueella syntyvää orgaanista jätettä tai kasvi-biomassaa. Yhteiskäsittelyn mahdollisia etuja ovat jätteiden yhdistämisen positiiviset vaikutukset ravinteiden ja inhiboivien aineiden pitoisuuksiin sekä kosteustasapainoon, metaanin-

tuoton lisääntyminen, jätteen tuottajan mahdollisesti maksama käsittelymaksu (ns. porttimaksu) tai käsitellyn materiaalin lannoitearvon paraneminen. Tuotettu lannoite käytetään pääsääntöisesti tilan omilla pelloilla, ja muodostunut metaani hyödynnetään yleisimmin tilan lämmön- ja sähköntuotannossa. Mahdollinen ylijäämä voidaan myydä sähköyhtiölle tai tuottaa siitä liikennepolttoainetta.

Teknisten ratkaisujen kehittyessä maatilakohtaisista biokaasulaitoksista on tullut toimivampia ja helppohoitoisempia, minkä vuoksi ne ovat alkaneet kiinnostaa maaseudun toimijoita enenevästi viime vuosina. Lisäksi lainsäädäntö orgaanisen jätteen ja lannan loppukäytön osalta kiristyy jatkuvasti, minkä vuoksi maatilojen (ja muiden jätteiden tuottajien) on löydettävä uusia keinoja tuottamansa jätteen käsittelyyn. Tiloilla on jo tehty investointeja, jotka tukevat biokaasulaitoksen rakentamista, kuten lannan varastosäiliöt. Tilakoot ovat myös kasvaneet, jolloin biokaasulaitoksen vaatima investointi on pienempi tuotettua energiayksikköä kohti.

Keskitetty biokaasulaitos käsittelee usean maatilan lannat mahdollisesti yhdessä muun orgaanisen jätteen kanssa. Maailman ensimmäiset keskitetyt biokaasulaitokset rakennettiin 1980-luvun alussa, ja maatalouteen liittyvän lainsäädännön kiristyessä kiinnostus keskitettyihin laitoksiin kasvoi edelleen 1990-luvulla. Keskitetyn laitoksen kapasiteetti on huomattavasti suurempi kuin maatilakohtaisen laitoksen, ja tuotettu lannoite voidaan jakaa usean maatilan kesken. Energiantuotanto on huomattavasti suurempaa kuin maatilakohtaisella laitoksella. Laitos rakennetaan yleensä alueelle, jolla sen tuottama lämpö ja sähkö voidaan helposti siirtää verkkoon. Haittapuolina keskitetyissä laitoksissa ovat lannan, muun orgaanisen materiaalin ja lopputuotteen kuljetuskustannukset sekä tautien leviämisen riski (Anonymous 1999). Keskitettyjen biokaasulaitosten piiriin kuuluvilla maatioilla kuitenkin säästetään lannan varastointi-, käsittely- ja levityskuluissa (Tafdrup 1994). Lisäksi materiaalien ja käsittelykonseptin hygieenisyyden kiinnitetään lisääntyvästi huomiota.

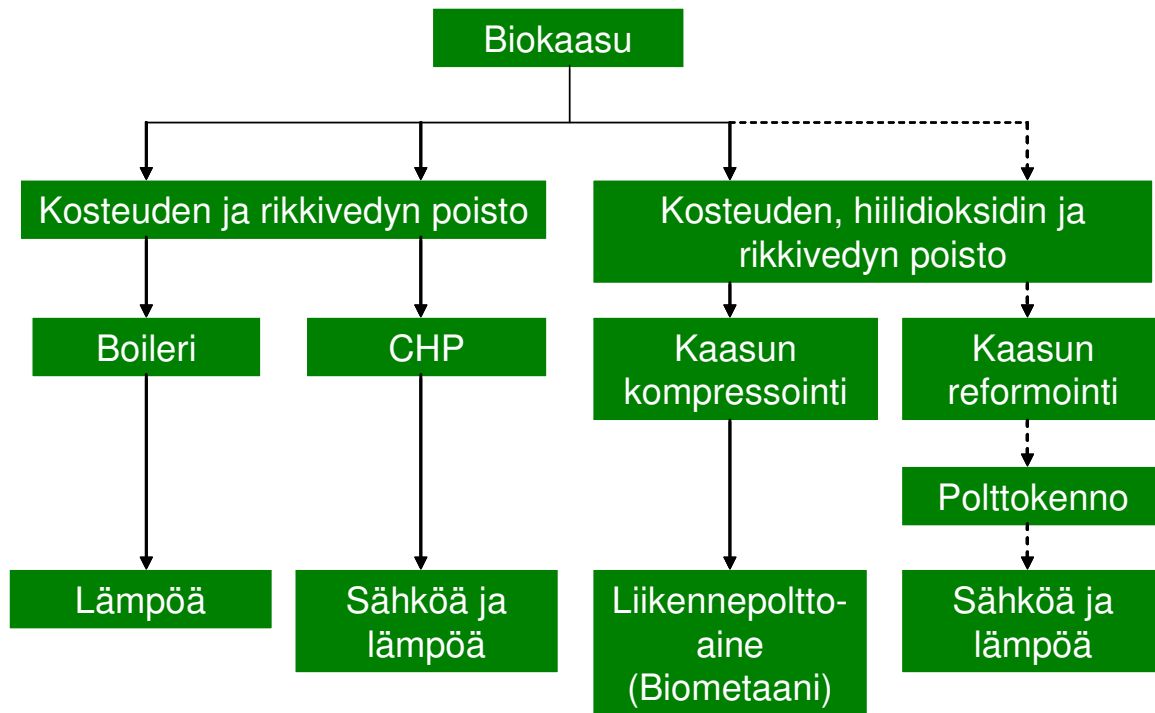
8 Biokaasuprosessin lopputuotteiden hyödyntäminen

8.1 Biokaasun hyödyntäminen liikenne- ja työkonepolttoaineena, sähköinä sekä lämpönä

Kuutio metaania normaali-ilmanpaineessa vastaa energiasisällöltään noin yhtä litraa kevyttä polttoöljyä (Taulukko 8.1). Biokaasusta tyypillisesti n. 60 % on metaania. Biokaasu on monipuolinen polttoaine, jota voidaan hyödyntää sekä sähkön ja/tai lämmöntuotannossa että ajoneuvojen ja työkoneiden polttoaineena (Kuva 8.1).

Taulukko 8.1. Polttoaineiden energiasisältöjä.

Polttoaine	Energiasisältö (Nm ³ tarkoittaa kuutiometriä normaalisolosuhteissa)
Vety	120 MJ/kg
Metaani	50 MJ/kg (36 MJ/Nm ³ = 10 kWh/Nm ³)
Biokaasu (60 % CH ₄)	30 MJ/kg (22 MJ/Nm ³)
Kevyt polttoöljy	43 MJ/kg (36 MJ/l)
Bensiini	42 MJ/kg (32 MJ/l)
Hiili (puuhiili)	33 MJ/kg
Kivihiili	29 MJ/kg
Kivihiili, kosteus 10 %	25 MJ/kg
Turve	20 MJ/kg
Puu	19 MJ/kg
Hiilihydraatti	16 MJ/kg
Turve, kosteus 50 %	10 MJ/kg
Puu, kosteus 50 %	9 MJ/kg



Kuva 8.1. Biokaasun hyödyntämismuuttokkeita.

Biokaasua voidaan käyttää samoissa sovelluksissa kuin maakaasua. Lämmön tuotannossa kaasun puhtausvaatimuksia ei juuri ole. Kaasun kuivausta suositellaan ja se poistaa samalla suurimman osan mahdollisesta rikkivedystä, jonka suositeltava pitoisuus on alle 1000 ppm korroosion eston vuoksi. Sähköntuotantoon biokaasua on käytetty jo pitkään polttomoottoreissa, joiden tehot vaihtelevat noin 45 kW_e:sta useisiin MW_e:hin. Käytännössä pienissä polttomoottoreissa (kapasiteetti <200 kW) päästään noin 25–30 % sähkön tuotannon hyötysuhteeseen. Isoimmissa moottoreissa hyötysuhde voi olla 30–40 %. Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa (combined heat and power, CHP) kokonaishyötysuhde nousee jopa yli 90 %:in. Valmistajasta riippuen kaasumoottoreissa käytettävästä biokaasusta voidaan joutua poistamaan rikkivety, ammoniakki ja partikkelit (IEA 2001; de Mes ym. 2003). Lisäksi biokaasua voidaan hyödyntää mm. kaasuturbiineissa, polttokennoissa ja Stirling-moottoreissa. Polttokennot mahdollistavat kaasun suoran elektrokemiallisen konversion lämmöksi ja sähköksi lähes päästöttömästi. Mahdollinen sähkön hyötysuhde on yli 50 % ja lämmön noin 35 %. Polttokennojen hinta on vielä toistaiseksi liian korkea laajamittaiselle käytölle, mutta sen odotetaan laskevan huomattavasti teknologian yleistymisen myötä (de Mes ym. 2003).

Toisin kuin monissa muissa Euroopan maissa, Suomessa ei toistaiseksi ole ollut käytössä merkittäviä kannustimia biokaasusta tuotetun sähkön myymiselle, ja sen tuottaminen on ollut kannattavinta lähinnä omaan käyttöön ostosähköä korvaamaan. Tähän on kuitenkin tulossa parannuksia, sillä huhtikuussa 2007 julkaistussa hallitusohjelmassa Vanhasen II hallitus on ilmoittanut toteuttavansa syöttötariffijärjestelmän biokaasusta tuotetulle sähkölle. Syöttötariffijärjestelmällä on tarkoitus kattaa sähkön markkinahinnan ja biosähkön hinnan välinen erotus alle 20 MW:n biokaasulaitoksissa (Hallitusohjelma 2007).

Biokaasun tuotanto on todettu yhdeksi puhtaimmista ja energiatehokkaimmista tavoista tuottaa liikenteen biopolttoainetta. Biokaasun ajoneuvo- ja työkonekäyttö edellyttää kosteuden, hiilidioksidin ja epäpuhtauksien poistamista sekä kaasun kompressointia. Puhdistettu biokaasu eli biometaani on maakaasua vastaava polttoaine sillä erotuksella, että maakaasu on fossiilinen polttoaine, kun taas biokaasusta erotettu biometaani on biopolttoaine, jonka polttaminen ei lisää ilmakehän nettokasvihiuonekaasupitoisuutta. Biokaasun puhdistukseen on olemassa useita kaupallisesti saatavilla olevia menetelmiä. Yleisimmät käytössä olevat tekniikat ovat vesipesu ja aktiivihiiliadsorptio (Wellinger ja Lindberg 2000).

Suomessa ei toistaiseksi ole laatustandardia liikennepolttoaineena käytettävälle biokaasulle. Esimerkiksi Ruotsissa liikennepolttoaineena käytettävän biokaasun vähimmäismetaanipitoisuus on 97 %, Sveitsissä 96 % ja USA:ssa 88 %. Kaasuajoneuvojen on EU-direktiivin (2001/27/EC) mukaan läpäistävä suorituskyky- ja päästöttestit 86 % vähimmäismetaanipitoisuudella.

Liikennepolttoaineeksi myytävän kaasun hinta on Euroopassa keskimäärin 40–80 % neste-
mäisten liikennepolttoaineiden hinnasta verotuksesta riippuen (Gasum Oy 2007). Suomessa liikennekäyttöön myyty biokaasu on vapautettu polttoaineverosta, eli siitä maksetaan vain arvonlisävero.

Suomessa on tällä hetkellä kuusi julkista maakaasun tankkauspistettä, jotka sijaitsevat Etelä-Suomessa maakaasuverkoston alueella. Gasum Oy on ilmoittanut suunnittelevansa maakaasun tankkausverkoston laajentamista nykyisestä kuudesta tankkauspisteestä 30:een vuoteen 2010 mennessä. Suomessa liikennepolttoaineen tuotanto maatilakokoluokan biokaasulaitoksessa on ollut käytössä vuodesta 2002 alkaen Kalmarin tilalla Laukaassa. Kyseessä on tietävästi yksi

harvoja maatilakohtaisia biokaasun tankkauspisteitä maailmassa. Tämän lisäksi julkisen biokaasun tankkausaseman perustamista suunnitellaan useilla paikkakunnilla. Alkuvuodesta 2007 Suomessa liikennöi noin 80 kaasukäyttöistä henkilöautoa, 88 linja-autoa ja 1 jäteauto. Jyväskylän seudulla on lokakuussa 2006 aloittanut liikennöintinsä Suomen ensimmäinen biokaasua polttoaineenaan käyttävä taksi.

Maailmalla kaasukäyttöisiä ajoneuvoja on käytössä yli viisi miljoonaa, ja määrä kasvaa jatkuvasti. Lukumäärällisesti eniten kaasujoneuvoja oli vuoden 2005 lopussa Argentiinassa, Brasiliassa ja Pakistanissa. EU-maista eniten kaasujoneuvoja oli Italiassa ja Saksassa (IANGV 2007).

Biokaasun liikennekäytön edelläkävijämaita ovat olleet Ruotsi, Ranska, Sveitsi, Islanti ja Italia. Ruotsi on kaikkein pisimmällä biokaasun liikennekäytössä, ja siellä oli vuoden 2006 lopussa käytössä n. 10 400 kaasukäyttöistä henkilöautoa, n. 1 100 kaasukäyttöistä raskasta ajoneuvoa (linja-autoja, rekkoja, jäteautoja) ja yksi biokaasulla kulkeva juna (Miljöfordon.se 2007). Kaasun tankkausasemia oli tammikuussa 2007 Ruotsissa 71 kappaletta 45 paikkakunnalla ja niitä rakennetaan jatkuvasti lisää parinkymmenen aseman vuosivauhtia (Fordonsgas 2007).

Useimmilla autonvalmistajilla on mallistossaan metaania, eli maakaasua ja biometaania polttoaineenaan käyttäviä ajoneuvoja, ja niitä löytyy kaikista kokoluokista. Useimmissa kaasua käyttävissä henkilöautoissa on käytössä nk. bi-fuel- eli kaksoispolttoainejärjestelmä, joka mahdollistaa sekä metaanin että bensiinin käyttämisen polttoaineena ja pidentää siten autojen toimintasädetä. Bi-fuel-autoissa on kaksi erillistä polttoainetankkia ja erilliset polttoaineen syöttöjärjestelmät, ja polttoaineen vaihtuminen toiseen tapahtuu tarvittaessa napinpainalluksella sekä automaattisesti toisen polttoaineen loppuessa. Edistyneimmät kaksoispolttoainejärjestelmällä varustetut moottorit on optimoitu siten, että auto antaa parhaimman suorituskyvyn kaasulla ajettaessa. Pelkästään metaanille tarkoitettujen moottorien ovat tyypillisiä raskaammissa ajoneuvoissa kuten linja-autoissa, rekoissa ja jäteautoissa.

Kaasujoneuvojen turvallisuus on tiukkojen laatuvaatimusten ansiosta todettu vähintään yhtä hyväksi kuin vastaavien bensiini- tai dieselkäyttöisten ajoneuvojen. Kaasutankkien rakenne on perinteisiä tankkeja huomattavasti vahvempi ja tankeissa on onnettomuustilanteiden varal-

le turvaventtiilit. Vuodon sattuessa metaani ilmaa kevyempänä kaasuna laimenee tehokkaasti kohoamalla ilmakehässä ylöspäin, toisin kuin nestemäiset polttoaineet, jotka jäävät maan pinnalle aiheuttaen huomattavasti suuremman tulipaloriskin. Lisäksi useiden kaasumaisten ja hiukkasmaisten yhdisteiden päästöt sekä melutaso ovat kaasuaajoneuvojen kohdalla bensiini- ja diesel-käyttöisiä ajoneuvoja huomattavasti alhaisempia.

Suomeen maahantuodaan ainakin Volkswagen-, Fiat-, Volvo-, Opel-, Mercedes Benz- ja Iveco - merkkisiä kaasuaajoneuvoja. Uudet kaasuaajoneuvot ovat Suomessa hinnaltaan noin 10–30 % vastaavia bensiinikäyttöisiä malleja kalliimpia, mutta dieselkäyttöisiä halvempia. Kaasukäyttöisiä henkilö- ja pakettiautoja kohdellaan verotuksellisesti samalla tavalla kuin bensiinikäyttöisiä ajoneuvoja, eli niistä ei makseta käyttövoimaveroa.

Biokaasulle soveltuvat samat siirto-, varastointi- ja tankkausmenetelmät kuin maakaasulle. Puhdistettua biokaasua voidaan oman käytön lisäksi myydä oman jakeluaseman kautta tai siirtää muualla myytäväksi kaasuputkiston tai säiliöautokuljetuksen kautta. Kaasua voidaan varastoida esimerkiksi kaasukellossa, PVC-säkissä, muovikalvossa tai paineistetuissa metallisäiliöissä.

Kaasuaajoneuvojen tankkaus tapahtuu paineistetun liitännän kautta. Tankkaukseen on olemassa kaksi erilaista menetelmää, nk. hidastankkaus ja pikatankkaus. Hidastankkaus on tyypillisesti käytössä varikkotoiminnassa esim. linja-autojen tankkauksessa, sillä se kestää tyypillisesti 5-12 tuntia ja voidaan toteuttaa esim. yön aikana linja-autojen ollessa varikolla. Pikatankkaus sen sijaan kestää muutaman minuutin ja on käytössä julkisilla tankkausasemilla.

Henkilö- ja pakettiautoissa kaasu varastoidaan useimmiten noin 200 barin paineessa säiliöihin, jotka on yleensä sijoitettu auton keski- ja takaosaan lattian alle siten, että ne vievät mahdollisimman vähän tilaa matkustamosta tai tavaratilasta. Linja-autoissa säiliöt on yleensä sijoitettu katolle. Kaasutankkien koko mahdollistaa yleensä noin 300 km:n toimintasäteen, mutta joissakin malleissa jopa 700 km:n tankkausväli on mahdollinen. Lisäksi bensiinitankin avulla toimintasädetä voidaan pidentää noin 200 km (Gasum Oy 2007).

Ruotsissa biometaanin tuotantokustannukset ovat olleet alle 100 m³/h raakakaasua jalostavilla laitoksilla 0,34–0,45 €/m³ tuotettua biometaanina ja 200–300 m³/h jalostavilla laitoksilla 0,11–0,17 €/m³ tuotettua biometaanina (1 m³ biometaanina vastaa noin 1 l öljyä) (Persson 2003).

8.2 Käsitelty materiaali lannoitteena ja maanparannusaineena

Epäorgaanisten lannoitteiden valmistus, erityisesti typen sitominen ilmakehästä, on erittäin energiaintensiivistä, vastaten jopa 35–46 % kasvien viljelyn kuluttamasta energiasta. Suurin osa lannoitteiden valmistuksessa käytetystä energiasta on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla (Börjesson 2004; Salter ym. 2005). Biokaasulaitoksen jäännös soveltuu useimmiten hyvin käytettäväksi lannoitteena ja maanparannusaineena. Biokaasuprosessi on suljettu, joten materiaalien sisältämät ravinteet säilyvät prosessissa, ja biokaasuprosessissa käsiteltyjen materiaalien lannoittavat ominaisuudet ovat yleensä paremmat kuin käsittelemättömien materiaalien. Hyödyntämällä biokaasuprosessin jäännös lannoitteena vähennetään kemiallisten lannoitteiden tarvetta ja voidaan saavuttaa lähes suljettu ravinnekierto.

Biokaasuprosessissa 30–80 % materiaalien orgaanisesta aineesta muunnetaan metaaniksi ja hiilidioksidiksi, mikä laskee hiili/typpi-suhdetta, jolloin jäännöksen lannoitevaikutus paranee. Lisäksi suuri osa käsiteltävien materiaalien sisältämästä orgaanisesta tyyppistä muuttuu liukoiseksi ammoniumtyypeksi, joka on peltolevityksessä nopeammin kasvien hyödynnettävissä. Siten biokaasuprosessin jäännöksen lannoitekäytössä typen haihtuminen ja huuhtoutuminen vesistöihin jäävät alhaisemmaksi kuin esimerkiksi käytettäessä lantaa suoraan pelloilla. Teoriassa myös muut lannoitevaikutukseltaan tärkeät aineet, kuten kalium, fosfori, kalsium, magnesium ja mikroravinteet, saadaan kokonaan talteen, koska ne eivät muutu käsittelyn aikana. Lisäksi orgaanisten lannoitteiden käyttö lisää maaperän humuspitoisuutta, joten niiden käyttö ei köyhdytä maaperää samoin kuin mineraalilannoitteet (Field ym. 1985; Klingler 1999; Ørtenblad 1999).

Biokaasuprosessissa materiaalien kuiva-ainepitoisuus alenee ja viskositeetti nousee, jolloin lopputuote on tasalaatuisempaa ja juoksevampaa. Käsitellyt materiaalit imeytyvät maahan nopeammin, jolloin typen haihtuminen vähenee ja hajut katoavat nopeasti levityksen jälkeen (Klingler 1999; Ørtenblad 1999). Samalla mahdollisesti typpioksiduulipäästöt pelloilta pie-

nenevät, sillä alhaisempi orgaanisen aineen pitoisuus tehostanee nitrifikaatiota ja denitrifikaatiota pellossa. Lisäksi käsittely biokaasuprosessissa parantaa materiaalien hygieenistä laatua (Klingler 1999; Knudsen ja Birkmose 1997; Sahlström 2003).

Biokaasuprosessissa lannan pH nousee, sillä orgaaniset hapot hajoavat käsittelyssä. Tällöin suurempi osuus lannan typestä on helposti haihtuvana ammoniakkinä ja materiaalien varastointiin ja levittämiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Lietesäiliöiden kattamisella haihtumista voidaan kuitenkin vähentää. Lisäksi huuhtoutumista ja haihtumista jäännöksen peltolevityksen yhteydessä voidaan minimoida levittämällä se pelloille keväällä, jolloin se on heti kasvavien kasvien käytössä, peittämällä se heti maalla tai kasvavalla oraalla tai käyttämällä levityksessä niin kutsuttuja sijoitustekniikoita (Knudsen ja Birkmose 1997; Sommer 1997).

Fytotoksiset eli kasveille myrkylliset yhdisteet voivat aiheuttaa kasveihin tummentumia ja kovettumia, minkä vuoksi orgaanisia lannoitteita ei yleensä levitetä kasvien päälle. Biokaasuprosessi vähentää lannan fytotoksisten yhdisteiden määrää ja lisää lannan juoksevuuutta, jolloin se ei jää peittämään kasveja. Käsiteltyä lantaa voidaan siis levittää myös kasvien päälle, jolloin kemiallisten mineraalilannoitteiden tarve vähenee. Biokaasuprosessi voi myös hajottaa joitakin orgaanisia haitta-aineita, kuten fenoleita (Klingler 1999).

Maatiloilla on tärkeää varmistaa tilan ulkopuolelta tuotavien mahdollisten lisämateriaalien laatuominaisuudet. EU:ssa on kehitetty erilliset ympäristömerkit (Kuva 8.2) kuvaamaan tuotteiden ympäristöystävällisyyttä. Myös maanparannusaineille on oma eurooppalainen ympäristömerkkinsä, jonka saavat tietyt kriteerit täyttävät aineet (Taulukko 8.2). Maanparannusaineiden ympäristömerkintäkriteereitä ollaan päivittämässä. Ympäristömerkin saaneita maanparannusaineita ei tällä hetkellä Suomessa valmisteta, eikä Suomessa myöskään myydä muiden valmistajien ympäristömerkin saaneita maanparannusaineita (Euroopan ympäristömerkkiluetelo 2007).



Kuva 8.2. Euroopan unionin ympäristömerkki.

Taulukko 8.2. Maanparannusaineiden Euroopan ympäristömerkin kriteerit (Euroopan komissio 2001b, 2006c).

Kriteeri	Hyväksyttävä taso
Materiaalin lähde	Orgaaninen aine on tultava jätteen uudelleenkäytöstä tai käsitte-lystä eikä saa sisältää puhdistamolietettä
Vaaralliset aineet	Lopputuote ei saa ylittää seuraavia arvoja (mg/kg lopputuotteen kuivapaino): Sinkki 300, Kupari 100, Nikkeli 50, Kadmium 1, Lyijy 100, Elohopea 1, Kromi 100, tuotteet eivät saa sisältää torjunta-aineilla käsiteltyä puunkuorta
Ravinnepitoisuudet	Kokonaistyyppipitoisuus ei saa ylittää 2 % kuiva-aineesta, epä- orgaanisen tyyppien osuus $\leq 20\%$ Tuotteen enimmäisravinnepitoisuudet: 17 g/m ² kokonaistyyppiä 10 g/m ² P ₂ O ₅ 20 g/m ² K ₂ O
Pakolliset merkinnät	Markkinointiyritys, kuvaus, valmistuserä ja määrä Tuotteen valmistukseen käytetyt aineet Suositellut varastointiolosuhteet ja viimeinen käyttöpäivä Käsittely- ja käyttöohjeet Turvallisuusohjeet Ravinnepitoisuudet Raskasmetallipitoisuudet
Tuotteen käyttöominaisuudet	Tuotteet on toimitettava kiinteässä muodossa kuiva-aine (TS) $>25\%$, orgaaninen aine (VS) $>20\%$ kuiva-painosta Ei saa vaikuttaa haitallisesti kasvien itämiseen tai kasvuun Ei saa aiheuttaa epämiellyttävää hajua maaperään levittämisen jälkeen
Terveys ja turvallisuus	Ei saa ylittyä: <i>Salmonella spp.</i> negatiivinen 50 g:n näytteissä <i>E. coli</i> <1000 MPN/g
Häiritsevät tekijät	Lopullinen tuote saa sisältää rikkaruohojen siemeniä ja lisääntymiskykyisiä kasvinosia enintään kaksi yksikköä litrassa Tuotteen lasi-, metalli- ja muovipitoisuuden on oltava alle 0,5 % kuiva-aineen painosta mitattuna

9 Esimerkkejä biokaasulaitoksista

9.1 Kalmarin tila, Laukaa

Kalmarin tilalla Laukaassa on ollut vuodesta 1998 toiminnassa maatilakohtainen, oman tilan lietalannan ja kasvibiomassan lisäksi elintarviketeollisuuden sokeri- ja rasvasivutuotteita käsittelevä biokaasulaitos. Reaktorin tilavuus on 150 m^3 , käsittelylämpötila noin $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ja viipymä 20–30 päivää. Tuotettu biokaasu hyödynnetään sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä vuodesta 2002 lähtien myös ajoneuvopolttoaineena. Tilalla on 30 kW_e ja 60 kW_{th} kaasumootori sekä lisäksi 80 kW_{th} kaasuboiileri, jota käytetään lähinnä viljan kuivaukseen. Tuotettu lämpö ja osa sähköstä käytetään itse, ja ylijäämä sähköä myydään verkkoon. Kaasu jalostetaan liikennekäyttöön itse suunnitellussa biokaasun jalostusyksikössä, jolla biokaasun metaanipitoisuus nostetaan noin 95 prosenttiin ja paine 200 bar:iin. Tilalla on käytössä kaksi biokaasulla toimivaa henkilöautoa. Vuonna 2005 tilalla tuotettiin sähköenergiaa 47 MWh, lämpöenergiaa 274 MWh ja mekaanista energiaa 19 MWh (Kuittinen ym. 2006). Tilalla on syksyllä 2007 rakenteilla uusi noin 1000 m^3 biokaasureaktori, joten suunnitelmissa on kasvattaa kaasuntuotantoa ja erityisesti liikennepolttoaineeksi myytävän kaasun määrää voimakkaasti lähivuosina.



Kuva 9.1. Kalmarin tilan 150 m^3 :n biokaasulaitos (vasen kuva) ja biokaasun jalostusyksikkö ja tankkauspiste (oikea kuva) Laukaassa (kuva: Annimari Lehtomäki).

9.2 Biovakka Oy, Vehmaa

Vehmaalla on vuonna 2005 aloittanut toimintansa keskitetty, 20 sikalayrittäjän yhdessä omistama biokaasulaitos, joka käsittelee sikalalietteen lisäksi teollisuuden sivutuotteita ja puhdistamolietettä yhteensä n. 120 000 tonnia vuodessa. Reaktoritilavuus on 6600 m³ ja käsittelylämpötila noin 40 °C. Kaikki käsittelyyn menevät materiaalit hygienisoidaan 70 °C:ssa tunnin ajan. Kaasu käytetään sähkön ja lämmöntuotantoon CHP-yksikössä, jonka teho on 835 kW_e ja 1 MW_{th}. Lämpö käytetään lietteen hygienisointiin ja tilojen lämmitykseen, osa sähköstä prosessiin ja loppu myydään verkkoon. Vuonna 2005 laitos tuotti sähköä 2075 MWh, joka vastaa 600 omakotitalon tarvetta, ja lämpöä 2965 MWh. Käsitelty materiaali erotellaan lingolla ennen hyötykäyttöä runsaasti typpeä sisältävään nesteosaan ja fosforia sisältävään kiinteään jakeeseen, ja käsitelty liete palautetaan takaisin sikalayrittäjien pelloille lannoitteeksi (Kuittinen ym. 2006).



Kuva 9.2. Biovakka Oy:n biokaasulaitos Vehmaalla (kuva: Annimari Lehtomäki).

9.3 Riihimäen tila, Halsua

Halsualla on vuoden 2003 syksystä lähtien ollut käynnissä maatilakohtainen sikalalietettä sekä mm. kunnan puhdistamo- ja sakokaivolietteitä ja teollisuuden sivutuotteita käsittelevä biokaasulaitos. Reaktoritilavuus on 250 m³ ja käsittelylämpötila noin 55 °C. Aggregaatilla ja lämpökattilalla tuotettu lämpö ja sähkö käytetään sikalan ja biokaasulaitoksen tarpeisiin, ja

ylijäämä sähkö myydään verkkoon. Vuonna 2005 laitoksella tuotettiin sähköenergiaa 104 MWh ja lämpöenergiaa 386 MWh (Kuittinen ym. 2006).



Kuva 9.3. Riihimäen tilan biokaasulaitos Halsualla (kuva: Annimari Lehtomäki).

9.4 Laihian kunnan biokaasulaitos

Laihian kunnan biokaasulaitos otettiin käyttöön joulukuussa 2003. Panosperiaatteella toimivalla laitoksella käsitellään syntypaikkalajiteltua biojätettä, jätevesilietteitä ja mallastehtaan lietettä. Reaktoritilavuus on 325 m³. Reaktorikäsitellyt materiaalit hygienisoidaan 70 °C:ssa ja lopputuote lingotaan. Vuonna 2005 laitos tuotti 485 MWh lämpöenergiaa (Kuittinen ym. 2006).



Kuva 9.4. Laihian kunnan biokaasulaitos (kuva: Teuvo Rajamäki).

10 Tulevaisuuden näkymiä

Kiinnostus biokaasuteknologian käyttöönottoa kohtaan Suomessa on suurta, ja sen voidaan odottaa tulevaisuudessa lisääntyvän merkittävästi. Teknologian käyttöönotto kuitenkin riippuu merkittävästi siitä, millainen biokaasutuotantoa koskeva tukipolitiikka Suomessa otetaan käyttöön. Tätä kirjoitettaessa marraskuussa 2007 Kauppa- ja teollisuusministeriössä on valmistella ns. syöttötariffijärjestelmä biokaasusta tuotetulle sähkölle, ja tämä järjestelmä sekä biokaasulaitoksia koskevien investointitukien laajuus tulevat merkittävästi vaikuttamaan biokaasuteknologian yleistymiseen Suomessa tulevaisuudessa.

Biokaasutuotanto on todettu yhdeksi puhtaimmista ja energiatehokkaimmista tavoista tuottaa liikenteen biopolttoainetta, ja sen liikennekäyttö tulee todennäköisesti lisääntymään merkittävästi Euroopassa lähivuosina. Myös jalostetun biokaasun injektointi maakaasuverkkoon on lisääntynyt nopeasti useissa maissa (esim. Sveitsi, Saksa, Ruotsi) viime vuosina. Maakaasuverkko tarjoaa tehokkaan ja edullisen keinon jaella kaasua kuluttajille ja saavuttaa uusia käyttäjiä, sekä tasaa vaihteluita kaasun tuotannossa ja käytössä, vähentäen tarvetta esim. ylijäämäkaasun soihduttamiseen. Maakaasuverkoston ja sen myötä myös maakaasun tankkausasemien verkoston ollaan laajentamassa Suomessakin, ja kaasujoneuvojen yleistyminen Suomessa tämän myötä tukee myös biokaasun käyttöönottoa liikennepolttoaineena.

Jalostettaessa biokaasua liikennepolttoaineeksi syntyy sivutuotteena lähes puhdasta hiilidioksidia. Nykyään lähes yksinomaan fossiilisilla polttoaineilla tuotettu hiilidioksidi on tärkeä raaka-aine ja kemikaali erittäin monilla teollisuudenaloilla, ja uusiutuviin raaka-aineisiin perustuvaa biokaasutuotannon hiilidioksidia käyttämällä voitaisiin korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä esimerkiksi maataloudessa ja teollisuudessa. Biokaasutuotannon hiilidioksidin käyttökohteita selvitetään parhaillaan, ja se soveltuu puhdistettuna hyvin esimerkiksi kasvihuoneviljelyn hiilidioksidilannoituksessa käytettäväksi fossiilisista polttoaineista tuotetun hiilidioksidin sijaan.

Uusia vähäpäästöisiä teknologioita biokaasun hyödyntämiseksi energiana on kehitteillä ja tulossa markkinoille, esim. polttokennot, stirling-koneet, mikroturbiinit. Erityisesti polttokennojen kehitystyöhön on panostettu voimakkaasti viime vuosina. Polttokennot mahdollistavat kaasun suoran elektrokemiallisen konversion lämmöksi ja sähköksi lähes päästöttömästi. Nii-

den hinta on vielä toistaiseksi liian korkea laajamittaiselle käytölle, mutta sen odotetaan laskevan huomattavasti teknologian yleistymisen myötä.

Kiinnostus biokaasun tuotantoon kasvibiomassasta on kasvanut useissa EU-maissa. Tämä johtuu paitsi uusiutuvan energian tuotannolle asetetuista tavoitteista ja kannustimista, myös peltopinta-alan vapautumisesta ruokatuotannosta energiakasvien tuotantoon useissa maissa. Useiden biokaasutuotantoon soveltuvien kasvien viljelyn ympäristövaikutukset ovat vähäisemmät kuin esimerkiksi ohraetanolin ja rypsi biodieselin tuotantoon soveltuvien kasvien viljelyssä. Ilmaston lämmettyä uusien lajikkeiden, kuten esimerkiksi energiamaissin viljely Suomessa on tullut mahdolliseksi, ja uusien runsaasti biomassaa tuottavien lajikkeiden viljelyä tutkitaan aktiivisesti eri puolilla maata.

11 Lähteet

- Angelidaki, I. ja Ahring, B.K. 1993: Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: effect of ammonia. *Applied Microbiology and Biotechnology* 38:560-564.
- Angelidaki, I., Heinfelt, A. ja Ellegaard, L. 2006: Enhanced biogas recovery by applying post-digestion in large-scale centralized biogas plants. *Water Science and Technology* 54(2):237-244.
- Anonymous 1999: Centralised biogas plants – integrated energy production, waste treatment and nutrient redistribution facilities. Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics.
- Asplund, D., Korppi-Tommola, J. ja Helynen, S. 2005: Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015. Jyväskylän Teknoliakeskus Oy.
- de Baere, L.A., Devocht, D. ja van Assche, P. 1984: Influence of high NaCl and NH₄Cl salt levels on methanogenic associations. *Water Research* 18:543-548.
- Bendixen, H.J. 1997: Hygiene and sanitation requirements in Danish biogas plants. –Teoksessa: Holm-Nielsen, J.B. (toim.): *The Future of Biogas in Europe*, Proceedings. Biopress, Risskov, Denmark. ss. 50-57.
- Berglund, M. ja Börjesson, P. 2004: Energy analysis of biogas systems. –Teoksessa: *Proceedings of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, 10.-14.5.2004, Rome. ss. 687-690.
- Björnsson, L., Mattiasson, B. ja Henrysson, T. 1997: Effects of support material on the pattern of volatile fatty acid accumulation at overload in the anaerobic digestion of semi-solid waste. *Applied Microbiology and Biotechnology* 47: 640-644.
- Braun, R., Brachtel, E. ja Grasmug, M. 2003: Codigestion of proteinaceous industrial waste. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109:139-153.
- Börjesson, P. 2004: Energianalys av drivmedel från spannmål och vall. Rapport nro 54, Avdelningen för miljö- och energisystem, Lunds Tekniska Högskola, Lund.
- Börjesson, P. ja Berglund, M. 2007: Environmental systems analysis of biogas systems – Part II: The environmental impact of replacing various reference systems. *Biomass & Bioenergy* 31:326-344.
- Campos, E., Palatsi, J. ja Flotats, X. 1999: Codigestion of pig slurry and organic wastes from food industry. –Teoksessa: Mata-Alvarez, J., Tilche, A. ja Cecchi, F. (toim.): *Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes*, Barcelona, vol. 2, Grafiques 92, 15-17 June. ss. 192-195.
- Colleran, E. 1999: Hygienic and sanitation requirements in biogas plants treating animal manures or mixtures of manures and other organic wastes. <http://www.ad-nett.org>
- Dolfing, J. 1988: Acetogenensis. –Teoksessa: Zehnder, A.J.B (toim.): *Biology of Anaerobic Microorganisms*. John Wiley & Sons, Inc. 872 s.

EEA 2006: Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2004 and inventory report 2006. Submission to the UNFCCC Secretariat. Final version. EEA Technical report No 6/2006. European Environment Agency.

Einola, J-K.M., Luostarinen, S.A., Salminen, E.A. ja Rintala, J.A. 2001: Screening for an optimal combination of municipal and industrial wastes and sludges for anaerobic co-digestion. –Teoksessa: Proceedings of 9th International Congress of Anaerobic Digestion. Antwerpen, Belgium. ss. 357-362.

Eskola, E. (KTM) 2007: Henkilökohtainen tiedonanto 31.5.2007.

EU CROPGEN project 2007: D30b – Assessment of the potential for crop-derived biogas as an energy source in the EU, taking into account technical and environmental issues and sosio-economic impact.

Euroopan komissio 1997: Tulevaisuuden energia: uusiutuvat energialähteet - Yhteisön strategiaa ja toimintasuunnitelmaa koskeva valkoinen kirja. KOM(97) 599 lopullinen.

Euroopan komissio 2000: Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on EU policies and measures to reduce greenhouse gas emissions: Towards a European Climate Change Programme (ECCP). COM(2000)88.

Euroopan komissio 2001a: Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction. Final report. Euroopan yhteisö. Luxembourg, 44 s.

Euroopan komissio 2001b: Komission päätös 688/2001/EY ekologisista arviointiperusteista yhteisön ympäristömerkin myöntämiseksi maanparannusaineille ja kasvuvalustoille. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 242/17.

Euroopan komissio 2005: Communication from the Commission, Biomass action plan. COM(2005)628 final.

Euroopan komissio 2006a: Komission tiedonanto, EU:n biopolttoainestrategia. KOM(2006) 34 lopullinen.

Euroopan komissio 2006b: Komission asetus (EY) N:o 208/2006, Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 1774/2002 liitteiden VI ja VIII muuttamisesta biokaasu- ja kompostointilaitoksia koskevien käsittelyvaatimusten ja lantaa koskevien vaatimusten osalta. Euroopan unionin virallinen lehti L36/25.

Euroopan komissio 2006c: Draft of the Commission decision of establishing revised ecological criteria and the related assessment and verification requirements for the award of the Community eco-label to growing media. Commission of the European Communities.

Euroopan komissio 2007: Uusiutuvia energialähteitä koskeva etenemissuunnitelma – Uusiutuvat energialähteet 2000-luvulla: kestävämmän tulevaisuuden rakentaminen. KOM(2006) 848.

Euroopan parlamentti ja neuvosto 2002: Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 1774/2002 muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden terveystieteiden sääntöistä. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 273/1.

Euroopan parlamentti 2003: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/30/EY, annettu 8. päivänä toukokuuta 2003, liikenteen biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti L 123:42-46.

Euroopan ympäristömerkkiluettelo 2007. <http://www.eco-label.com/finnish/>

Field, J.A., Reneau, R.B.Jr., Kroontje, W. ja Caldwell, J.S. 1985: Nutrient recoveries from plug-flow anaerobic digestion of poultry manure. *Agricultural Wastes* 13: 207-216.

Fordonsgas 2007: Tankställen i Sverige. <http://www.fordonsgas.se/>

Fredriksson, H., Baky, A., Bernesson, S., Nordberg, Å., Norén, O. ja Hansen, P.-A. 2006: Use of on-farm produced biofuels on organic farms – Evaluation of energy balances and environmental loads for three possible fuels. *Agricultural Systems* 89:184-203.

Gasum Oy 2007, <http://www.gasum.fi/>

Hallitusohjelma 2007: Pääministeri Matti Vanhasen II hallituksen ohjelma. Edita Prima Oy, Helsinki.

Hansen, K.H., Angelidaki, I. ja Ahring, B.K. 1998: Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. *Water Research* 32:5-12.

Hashimoto, A.G. 1983: Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. *Biotechnology and Bioengineering* 25:185-200.

Hills, D.J. 1979: Effects of carbon:nitrogen ratio on anaerobic digestion of dairy manure. *Agricultural Wastes* 13:267-278.

Hobson, P.N., Bousfield, S. ja Summers, R. 1981: Methane Production from Agricultural Wastes. Applied Science Publishers Ltd. 269 s.

Hobson, P.N. ja Wheatley, A.D. 1993: Anaerobic Digestion – Modern Theory and Practice. Elsevier Science Publishers LTD. Great Britain. 261 s.

Horan, N., Fletcher, L., Betmal, S., Wilks, S. ja Keevil, C. 2004: Die-off of enteric bacterial pathogens during mesophilic anaerobic digestion. *Water Research* 38:1113-1120.

IANGV 2007: Natural gas vehicles. <http://www.iangv.org/>

IEA 2001: Biogas and More! Systems and Markets Overview of Anaerobic digestion. IEA Bioenergy. UK. 12 s.

Kauppa- ja teollisuusministeriö 2007: Biokaasun syöttötariffi käyttöön 2008. Tiedote, <http://www.ktm.fi/?i=2248&s=222> 2.8.2007.

Kearney, T., Larkin, M. ja Levett, P. 1993: The effect of slurry storage and anaerobic digestion on survival of pathogenic bacteria. *Journal of Applied Bacteriology* 74:86-93.

Kearney, T.E., Larkin, M.J. ja Levett, P.N. 1994: Metabolic activity of pathogenic bacteria during semicontinuous anaerobic digestion. *Applied and Environmental Microbiology* 60:3647-3652.

Klingler, B. 1999: Environmental aspects of biogas technology. German Biogas Association. <http://www.ad-nett.com>

Knudsen, L. ja Birkmose, T. 1997: Biogas – agriculture and environment. –Teoksessa: Holm-Nielsen, J.B. (toim.): The Future of Biogas in Europe, Proceedings. Biopress, Risskov, Denmark. ss. 39-49.

Kuittinen, V, Huttunen, M.J. ja Leinonen, S. 2006: Suomen biokaasulaitosrekisteri IX. Joensuun yliopisto, Karjalan tutkimuslaitoksen raportteja N:o 3/2006.

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

Lannoitevalmistelaki 539/2006. <http://www.finlex.fi>

LBS, GM 2002: Well-to-Wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems – A European Study. L-B-Systemtechnik GmbH.

Lindorfer, J., Kirchmayr, R. ja Braun, R. 2005: Self-heating of anaerobic digesters using energy crops. –Teoksessa: Proceedings of 4th International Symposium on Anaerobic Digestion 2005, Vol. 1. Copenhagen, Denmark. ss. 511-518.

Lehtomäki, A. 2006: Biogas production from energy crops and crop residues. Väitöskirja, Jyväskylän yliopisto. Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 163.

Lehtomäki, A., Huttunen, S. ja Rintala, J. 2007: Laboratory investigations on co-digestion of energy crops, crop residues and cow manure: Effect of crop to manure ratio. Resources, Conservation and Recycling 51(3):591-609.

Lehtomäki, A., Ronkainen, O. ja Rintala, J. 2005: Developing storage methods for optimised methane production from energy crops in northern conditions. –Teoksessa: Ahring, B. K. & Harmann, H. (Toim.), Proc. of 4th Int. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste, August 31- September 2, 2005, Copenhagen, Denmark, vol. 1. ss. 101-108.

Lehtomäki, A., Viinikainen, T. A., Ronkainen, O. M., Alen, R. ja Rintala, J. A. 2004: Effect of pre-treatments on methane production potential of energy crops and crop residues. –Teoksessa: Proceedings of the 10th World Congress on Anaerobic Digestion, August 29 – September 2, 2004, Montreal, Canada. ss. 1016-1021.

Lewandowski, I., Scurlock, J.M.O., Lindvall, E. ja Christou, M. 2003: The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. Biomass and Bioenergy 25:335-361.

Luostarinen, J. 2007: Energiakasveista tuotetun biokaasun energiatase suomalaisessa maatilakokoluokan biokaasulaitoksessa. Pro gradu-tutkielma, Jyväskylän yliopisto. 52 s.

Luostarinen, S., Einola, J., Salminen, E. ja Rintala, J. 2000: Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamolietteen ja syntypaikkalajitellun biojätteen anaerobinen yhteiskäsittely. Vesitalous 6/2000. ss. 34-37.

Maa- ja metsätalousministeriö 2000: Horisontaalinen maaseudun kehittämissuunnitelma. EU:n yhteisen maatalouspolitiikan liitännäistoimenpiteet. Manner-Suomi. 229 s.

Maa- ja metsätalousministeriö 2002: Eläinjättestratégia vuoteen 2007. Työryhmämuistio MMM 2002:17. Helsinki. 46 s.

Maa- ja metsätalousministeriö 2004: Peltobiomassa, liikenteen biopolttoaineet ja biokaasu –jaosto. Väiliraportti. Työryhmämuistio 2004:11. Helsinki. 51 s.

Maa- ja metsätalousministeriö 2007a: Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelma 2007-2013. Esitys 3.8.2006 (muutettu 4.4.2007). 245 s. + liitteet.

Maa- ja metsätalousministeriö 2007b: Maatalouden ympäristötuen sitoumusehdot 2007. 30 s.

Saatavilla:

<http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu/maatalous/tuet/viljelijatu/maataloustukienhakuoppaat/ymparistotuensitoumusedot.html>

Maa- ja metsätalousministeriö 2007c: Bioenergia Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelmassa 2007-2013. Muistio 31.5.2007.

Maa- ja metsätalousministeriön asetus 12/07 lannoitevalmisteista. Saatavilla: www.finlex.fi.

Maa- ja metsätalousministeriön asetus 13/07 lannoitevalmisteita koskevan toiminnan harjoittamisesta ja sen valvonnasta. Saatavilla: www.finlex.fi.

Mackie, R.I. ja Bryant, M.P. 1995: Anaerobic digestion of cattle waste at mesophilic and thermophilic temperatures. *Applied Microbiology and Biotechnology* 43:346-350.

Madigan, M.T., Martinko, J.M. ja Parker, J. 1997: Brock – Biology of Microorganisms. 8th Edition. Prentice Hall International Inc. 986 s.

Maibaum, C. ja Kuehn, V. 1999: Thermophilic and mesophilic operation of an anaerobic treatment of chicken slurry together with organic residual substances. *Water Science and Technology* 40:231-236.

Marchaim, U. ja Krause, C. 1993: Propionic to acetic acid ratios in overloaded anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 43:195-203.

Mata-Alvarez, J., Macé, S. ja Llabrés, P. 2000: Anaerobic digestion of organic solid waste. An review of research achievements and perspectives. Review paper. *Bioresource Technology* 74:3-16.

Mata-Alvarez, J. 2003. Fundamentals of the anaerobic digestion process. –Teoksessa: Mata-Alvarez (Toim.) Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA. London. ss.1-20.

de Mes, T., Stams, A., Reith, J. ja Zeeman, G. 2003: Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. –Teoksessa: Reith, J., Wijffels, R. ja Barten, H. (toim.): Bio-methane & Bio-hydrogen. Status and perspectives of biological methane and hydrogen production. Dutch Biological Hydrogen Foundation, Netherlands. ss. 58-102.

Mikkola, H., Puumala, M., Kallioniemi, M., Grönroos, J., Nikander, A. ja Holma, M. 2002: Paras käytettävissä oleva tekniikka kotieläintaloudessa. Suomen ympäristö 564. Suomen ympäristökeskus. Helsinki. 166 s.

Miljöfordon.se 2007. <http://www.miljofordon.se/>

MMMELO 2915/835/2005: Maa- ja metsätalousministeriön ja Kasvintuotannon tarkastuskeskuksen ohje maataloudessa käytettävälle puhdistamolietteelle. Maa- ja metsätalousministeriö, Elintarvike- ja terveysosasto.

Motiva 2007: Uusiutuva energia. <http://www.motiva.fi/fi/toiminta/uusiutuva-energia/>

Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. ja Mikkola, H. 2006: Liikenteen biopolttoainoiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. VTT Tiedotteita 2357.

Nicholson, F., Groves, S. ja Chambers, B. 2004: Pathogen survival during livestock manure storage and following land application. *Bioresource Technology* 96:135-143.

Nordberg, Å. ja Edström, M. 1999: Co-digestion of ley crop silage, straw and manure. <http://www.ad-nett.org>

Ørtenblad, H. 1999: The use of digested slurry within agriculture. <http://www.ad-nett.org>

Paavola, T. ja Rintala, J. 2006: Effect of hygienisation (1 hour at 70 °C) on methane production of manure, biowaste and sewage sludge. – Teoksessa: Proceedings Venice 2006, Biomass and Waste to Energy Symposium, Venetsia, Italia 29.11.–1.12.2006 (cd-rom).

Paavola, T., Syväsalu, E. ja Rintala, J. 2006: Co-digestion of manure and biowaste according to the EC Aminal By-Products Regulation and Finnish national regulations. *Water Science and Technology* 53(8):223-231.

Persson, M. 2003: Utvärdering av uppgraderingstekniker för biogas. Svenkt Gastekniskt Center AB, Rapport SGC 142. <http://www.sgc.se/>.

Ronkainen, O., Koskinen, P., Lehtomäki, A., Lampinen, A., Toivainen, K., Kaksonen, A., Puhakka, J. ja Rintala, J. 2005: Biologinen vedyntuotanto pimeäfermentaatioprosessilla. Jyväskylän yliopiston Bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 82.

Sahlström, L. 2003: A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. *Bioresource Technology* 87:161-166.

Sahlström, L., Aspan, A., Bagge, E., Danielsson-Tham, M-L. ja Albihn, A. 2004: Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Research* 38:1989-1994.

Salminen, E. 2000: Anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse by-products and wastes. *Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science* 90. Jyväskylä University.

Salter, A., Holliday, L., Banks, C., Chesshire, M. ja Mulliner, R. 2005: Plant biomass as an energy efficient feedstock in the production of renewable energy. - Teoksessa: Proceedings of the 14th European Biomass Conference: Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17.-21.10.2005, Paris.

Schomaker, A.H.H.M., Boerboom, A.A.M., Visser, A. ja Pfeifer, A.E. 2000: Anaerobic digestion of agro-industrial wastes: information networks. Technical summary on gas treatment. <http://www.ad-nett.org>

Sommer, S. 1997: Ammonia volatilization from farm tanks containing anaerobically digested animal slurry. *Atmospheric Environment* 31:863-868.

Stubsgaard, A. 2001: Hygienic aspects of solid fractions of waste water. –Teoksessa: Lens, P., Zeeman, G. ja Lettinga, G. (Toim.). Decentralised Sanitation and Reuse. Concepts, systems and implementation. IWA Publishing, Lontoo. ss. 485-500.

Tafdrup, S. 1994: Centralized biogas plants combine agricultural and environmental benefits with energy production. *Water Science and Technology* 30:133-141.

Tafdrup, S. 1997: Centralised co-digestion and efficient nutrient recycling. –Teoksessa: Holm-Nielsen, J.B. (toim.): The Future of Biogas in Europe, Proceedings. Biopress, Risskov, Denmark. ss. 15-20.

Termorshuizen, A., Volker, D., Blok, W., ten Brummeler, E., Hartog, B. Janse, J., Knol, W. ja Weneker, M. 2003: Survival of human and plant pathogens during anaerobic mesophilic digestion of vegetable, fruit, and garden waste. *European Journal of Soil Biology* 36:25-32.

Tilastokeskus 2006a: Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskuksen Matilda-palvelu. <http://www.matilda.fi>

Valtioneuvoston asetus 931/2000 maataloudesta peräisin olevien nitraattien vesiin pääsyn rajoittamisesta. <http://www.finlex.fi>

Valtioneuvoston asetus 542/2003 talousjätevesien käsittelystä vesihuoltolaitosten viemäriverkoston ulkopuoleisilla alueilla. <http://www.finlex.fi>

Valtioneuvoston päätös 282/1994 puhdistamolietteen käytöstä maanviljelyksessä. <http://www.finlex.fi>

Valtioneuvoston päätös 861/1997 kaatopaikoista. <http://www.finlex.fi>

Watanabe, H., Kitamura, T., Ochi, S. ja Ozaki, M. 1997: Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions. *Water Science and Technology* 36:25-32.

Weiland, P. 2003: Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109:263-274.

Weiland, P. 2006: Anaerobic digestion of agricultural waste and selected biomass. – Teoksessa: Proceedings Venice 2006, Biomass and Waste to Energy Symposium, Venetsia, Italia 29.11.–1.12.2006 (cd-rom).

Wellinger, A. 1999: Process design of agricultural digesters. <http://www.ad-nett.org>

Wellinger, A. & Lindberg, A. 2000: Biogas upgrading and utilisation. IEA Bioenergy Task 24. <http://www.iea-biogaz.net/publicationspublic.htm>.

Widdel, F. 1988: Microbiology and ecology of sulfate- and sulfur-reducing bacteria. –Teoksessa: Zehnder, A.J.B (Toim.): *Biology of Anaerobic Microorganisms*. John Wiley & Sons, Inc. 872 s.

Zeeman, G., Wiegant, W.M., Koster-Treffers, M.E. ja Lettinga, G. 1985: The influence of the total ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure. *Agricultural Wastes* 14:19-35.

12 Julkaisussa käytettyjen termien selitykset

Aerobinen	happipitoinen, happea tarvitseva
Alkaliniteetti	ks. puskurointikyky
Anaerobinen	ilman happea, aerobisen vastakohta
Asidogeneesi	ks. happokäyminen
Asetogeneesi	asettiin sekä vedyn ja hiilidioksidin muodostaminen; orgaanisen aineen anaerobisen hajoamisen vaihe
Biokaasu	orgaanisesta aineesta anaerobisen mikrobitoiminnan seurauksena muodostuva kaasu, joka koostuu lähinnä metaanista ja hiilidioksidista
Biosfääri	elonkehä, maapallon pinnan osa, jolla elämä on mahdollista
CO ₂ -ekvivalentti	kasvihuonekaasuista käytetty termi, joka kuvaa eri kaasujen voimakkuutta verrattuna hiilidioksidiin
COD	ks. kemiallinen hapen kulutus
CSTR	jatkuvasekoitteinen reaktori
Denitrifikaatio	anaerobinen prosessi, jossa bakteerit pelkistävät nitraatti- ja nitriitti-ioneja energianlähteekseen (anaerobinen respiraatio), tuloksena typen oksideja, täydellisesti etenevässä denitrifikaatiossa syntyy typpikaasua
Energiakasvi	kasvit, joita viljellään / kasvatetaan erityisesti energiantuotantoa varten
Entsyymi	proteiini, joka nopeuttaa, tekee mahdolliseksi tai säätelee kemiallisia reaktioita muuttumatta itse reaktioissa
Fakultatiivinen bakteeri	bakteeri, joka voi elää sekä hapellisissa että hapettomissa/vähähappisissa ympäristöissä
Fotosynteesi	yhteyttäminen, biokemiallinen prosessi, jossa kasvisolut tuottavat hiilidioksidista ja vedestä auringon säteilyenergian avulla happea sekä glukoosia, jota kasvi käyttää ravintona
Fytotoksinen	kasvimyrkyllinen
Haihtuvat rasvahapot	lyhytketjuiset rasvahapot, esim. asetaatti (etikkahappo), propionaatti, butyraatti (voihappo), isobutyraatti, valeriaatti, isovaleriaatti, lyhenne VFA
Happokäyminen	asidogeneesi, yksinkertaisten sokerien, aminohappojen ja rasvojen hajoaminen lyhytketjuisiksi, haihtuviksi rasvahapoiksi; orgaanisen aineen anaerobisen hajoamisen vaihe

Hemiselluloosa	heteropolysakkaridi, rakenteeltaan usein haaroittunut, muodostaa ristisidoksia selluloosan ja ligniinin välille
Homogeeninen	tasalaatuinen
Hydrolyysi	aineiden hajoaminen siten, että vesimolekyyli osallistuu reaktioon, entsyymien katalysoima
Hygienisointi	biokaasulaitoksessa käsiteltävän materiaalin lämpökäsittely (70 °C, 60 min, partikkelikoko <12mm), tavoite tuhota tautia aiheuttavat mikrobit
Ilmastonmuutos	Maan ilmastossa tai paikallisissa ilmastoissa tapahtuva muutos, viime aikoina yleensä ihmisen toimista johtuva globaalia ilmaston lämpeneminen
Indikaattoriorganismi	ilmentäjälaji, laji joka on erityisen herkkä jollekin ympäristötekijälle
Inhibitio	toiminnan estyminen tietyn aineen (inhibiittori) vaikutuksesta
Inhibiittori	ks. inhibitio
Kaatopaikkakaasu	kaatopaikoilla orgaanisen aineen hajotessa anaerobisesti muodostuva kaasu
Kasvihuoneilmiö	planeettojen kaasukehien prosessi, jossa kaasukehän kaasut imevät itseensä ja säteilevät infrapunasäteilyä lämmittäen planeetan ilmakehää ja pintaa, ilmasto uhkaa lämmitä kasvihuoneilmiön voimistuessa ihmisen aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen seurauksena
Kasvihuonekaasu	kaasu, joka ilmakehässä ollessaan imee ja heijastaa auringosta tulevaa ja planeetan pinnalta heijastuvaa lämpösäteilyä aiheuttaen kasvihuoneilmiön, Maassa merkittävimmät kasvihuonekaasut ovat vesihöyry, hiilidioksidi, metaani sekä otsoni
Kemiallinen hapenkulutus	näytteen orgaanisen aineen määrää kuvaava määrittely, lyhenne COD
Korroosio	ruostuminen
Kuiva-aine	määritetään pitämällä näytettä vuorokausi 105 °C:ssa ja vertaamalla alkupeleistä painoa kuivauksen jälkeiseen painoon, ilmoitetaan prosenttina märkäpainosta tai g/l, lyhenne TS
Kuormitus	orgaanisen aineen määrä, joka lisätään reaktoriin, ilmaistaan usein kg orgaanista ainetta per tilavuus per vuorokausi (kgVS / m ³ d), lyhenne OLR
LCFA	ks. pitkäketjuiset rasvahapot
Ligniiini	kasvisolujen seinien puutumisen yhteydessä muodostuva yhdiste, sitoo puukuituja
Lipidi	rasva-yhdiste
Mesofiilinen	lämpötila-alueella 30–38 °C toimiva
Metaanintuottopotentiali	

	orgaanisen materiaalin anaerobinen hajoavuus ja maksimaalinen metaanintuotto tietyssä lämpötilassa ja tietyllä bakteeriseoksella määritettynä
Metanogeeni	metaania muodostava bakteeri
Metanogeneesi	metaanin muodostuminen
Nitrifikaatio	mikrobiologinen prosessi, jossa ammonium (NH_4^+) hapettuu nitriitin (NO_2^-) kautta nitraatiksi (NO_3^-)
Orgaaninen aine	biohajoava aine, määritetään hehkuttamalla kuivattua näytettä (ks. kuiva-aine) 2 tunnin ajan $550\text{ }^\circ\text{C}$:ssa ja vertaamalla kuivattua painoa hehkutuksen jälkeiseen painoon, ilmoitetaan prosenttina kuiva-aineesta tai g/l, lyhenne VS
Patogeeni	tautia aiheuttava bakteeri
Pitkaketjuiset rasvahapot	rasvojen anaerobisen hajoamisen välituote, esim. öljyhappo, palmitiinihappo, steariinihappo, lyhenne LCFA
pmy	pesäkkeitä muodostava yksikkö
Polymeeri	useiden samanlaisten molekyylien, monomeerien, yhteenliittymä
Psykrofiilinen	lämpötila-alueella $\leq 20\text{ }^\circ\text{C}$ toimiva
Puskurointikyky	kyky vastustaa pH:n muutoksia
SCOD	näytteen liukoisen orgaanisen aineen määrittäminen, liukoinen kemiallinen hapenkulutus
Sterilointi	biokaasulaitoksessa käsiteltävän materiaalin käsittely ($131\text{ }^\circ\text{C}$, 60 min, 3bar, partikkelikoko $< 50\text{ }\mu\text{m}$), joka pyrkii patogeenien tuhoamiseen
Termofiilinen	lämpötila-alueella $> 50\text{ }^\circ\text{C}$ toimiva
TS	ks. kuiva-aine
TSE-tauti	tarttuva spongiforminen enkefalopatia, kokoomanimi usealle eri eläinlajeilla esiintyvälle samankaltaiselle taudille, joita aiheuttaa muuntunut prioniproteiini, esim. naudalla esiintyvä BSE eli hullun lehmän tauti, lampailla ja vuohilla esiintyvä scrapie ja ihmisellä esiintyvä Creutzfeld-Jacobin tauti eli CJD
VFA	ks. haihtuvat rasvahapot
Viipymä	käsiteltävän jätteen/jäteveden viipymä käsittelyprosessissa, lyhenne HRT
VS	ks. orgaaninen aine

Jyväskylän yliopiston biologian laitoksen tiedonantoja -sarjassa ilmestyneet julkaisut

- 1 SIENITALOUSSEMINAARI 7.–8.4.1975.
- 2 RAATIKAINEN M, SAARI V, KANKAALA P, KARILA V, KOVANEN J ja PULKKINEN E 1975: Korospohjan pumppuvoimalaitosalueen kasvisto ja eläimistö.
- 3 KEVOJÄRVEN JA SEN LÄHILAMPIEN HYDROBIOLOGIASTA. Hydrobiologian laudaturkurssi Utsjoen Kevolla 15.–22.7.1974. 1976.
- 4 ELORANTA V 1976: Levätestit selluloosateollisuuden prosessi- ja pääkanaalijätevesien sekä eräiden limantorjunta-aineiden vaikutusten selvittämisessä.
- 5 SAARI V ja OHENOJA E 1976: Korpilahden Vaarunvuorten suursienistä.
- 6 JUSSILAINEN M ja ELORANTA P 1976: Ilmakuviin perustuva tutkimus Konneveden ja Peurunkajärven vesikasvillisuudesta.
- 7 VESAKONTORJUNTA-AINESYMPOSIUMI. 1977.
- 8 PALOKANGAS R 1977: Studies on avian thermoregulation with special reference to heat production in cold and seasonal acclimatization.
- 9 SAARI V 1978: Korpilahden Vaarunvuorten lehtisammalkasvistosta.
- 10 ELORANTA P ja ELORANTA A 1978: Tutkimus kalaston rakenteesta ja kalojen kasvusta Kuusvedessä, Ahvenisessa ja Leivonvedessä (Laukaa).
- 11 HUHTA V, SUNDMAN V, IKONEN E, SIVELÄ S, WARTIOVAARA T ja VILKAMAA P 1978: Jäteliete-kuorirouheseosten maatumisen biologia.
- 12 KOSKELA H 1979: Structure and dynamics of the beetle community inhabiting cow dung.
- 13 VIHKO V 1979: Response of the lysosomal system of skeletal muscle to exercise.
- 14 NORD-EUROPEISKA OGRÄSSYMPOSIET I DICKURSBY, FINLAND DEN 7.–10.9.1976 DEL I. 1979.
- 15 NORD-EUROPEISKA OGRÄSSYMPOSIET I DICKURSBY, FINLAND DEN 7.–10.9.1976 DEL II. 1979.
- 16 NURMELA P-L 1979: Jämsän ympäristönhoitotutkimus.
- 17 RÄSÄNEN L 1979: Elaboration of leukocyte inhibitory factor (LIF) by human peripheral blood lymphocytes and cellular collaboration in LIF production.
- 18 SIHVONEN H 1979: Jämsänkosken kunnan ympäristönhoitosuunnitelma.
- 19 NCE-SYMPOSIUM "Ecology and fishery biology of small forest lakes" Lammi 15.–17.11.1978.
- 20 I. LUONNONTIETEELLISTEN MUSEOIDEN IV VALTAKUNNALLISET NEUVOTTELUPÄIVÄT 2.4.–3.4.1979 JYVÄSKYLÄSSÄ. II. YLIOPISTOJEN PUUTARHOJEN II VALTAKUNNALLISET NEUVOTTELUPÄIVÄT 2.4.–3.4.1979 JYVÄSKYLÄSSÄ.
- 21 RAATIKAINEN T 1979: Jyväskylän yliopiston viheraluepuutarhan esiselvitys.
- 22 FINEM-79. SUOMALAISTEN ELEKTRONIMIKROSKOPISTIEN SYMPOSIUMI 27.-28.9.1979 JYVÄSKYLÄSSÄ.
- 23 HIRSIMÄKI P 1980: Studies on vinblastine-induced autophagocytosis in mouse liver.
- 24 KOLEHMAINEN K 1980: Saarijärvi-Kalmari. Kalmarin kyläkuva, suunnitelmia ja toimenpide-ehdotuksia.
- 25 JYVÄSKYLÄN YLIOPISTON BIOLOGIAN LAITOS 10 VUOTTA.
- 26 SELIN P, KOKKO H ja HAKKARI L 1981: Sulfiittiseluteollisuuden jätevesien liikaaman Lievestuoreenjärven pelagiaalin ravintoketjututkimus.
- 27 VIHKO V ja SALMINEN A 1981: Raajalihaksen lysosomaalisen järjestelmän mukautuminen fyysiseen kuormitukseen. Loppuraportti Valtion liikuntatieteellisen toimikunnan rahoittamasta tutkimuksesta vuosina 1978-1980.
- 28 KÄPYLÄ M, TÖNNES P ja VEIJOLA H 1981: Siitepölyn, sieni-itiöiden ja puupölyn esiintyminen Jyväskylän kaupunki-ilmassa.
- 29 Saarijärven Pyhä-Häkin kansallispuiston ja sen lähiympäristön metsäjärvien veden laatu, klorofyllipitoisuus, eläinplankton, pohjaeläimistö sekä vesihyönteis- ja vesipunkkilajisto. 1982.
- 30 ELORANTA A 1982: Tutkimuksia eräiden kivikorantojen kalalajien biologiasta. I.
- 31 LAHTI T 1983: Ruoveden Siikanevan linnusto.
- 32 RAATIKAINEN M 1983: Kasvitieteellinen julkaisutoiminta Jyväskylän yliopistossa. RAATIKAINEN, M. ja NIEMELÄ, M. 1983: Mustikan poimintatarkkuuden määrittäminen. RAATIKAINEN M, RAATIKAINEN T ja SAARI V 1983: Saarijärven Voudinnemen kasvilajisto.
- 33 KONNEVESISYMPOSIO. I. 7.–8.4.1983.
- 34 KONNEVESISYMPOSIO. II. 7.–8.4.1983.
- 35 MARTTINEN KMJ 1983: Tutkimus Kynsiveden syvänteiden kalastosta touko-lokakuussa 1980.
- 36 HUHTA V, HYVÖNEN R, KOSKENNIEMI A, VILKAMAA P, KAASALAINEN P ja SULANDER M 1984: Metsänlannoituksen ja pH:n vaikutus maaperäeläimistöön.
- 37 LUOTOLA M 1984: Behaviour and effects of some xenobiotics as studied in laboratory model ecosystems.
- 38 JÄRVEN JA JOKIEN POHJAELÄINTUTKIJOIDEN KOKOUS 13.–15.10.1983.
- 39 SAARI V, RAATIKAINEN T ja VÄLIVAARA R 1984: Korpilahden ja Muuramen uhanalaiset kasvit.
- 40 V EKOLOGIPÄIVÄT JYVÄSKYLÄSSÄ 12.–13.4.1984.
- 41 SALONEN HW 1985: Salamajärven kansallispuistossa sijaitsevan Koirajoen rantojen kasvillisuus ja kasvisto.

- 42 SALONEN V ja SAARI V 1985: Korpilahden Ristisuon kasvisto, kasvillisuus ja suojele.
- 43 ELORANTA A 1985: Tutkimuksia eräiden kivikkorantojen kalalajien biologiasta. II.
- 44 KALLIO-MANNILA K, RAATIKAINEN M ja RAATIKAINEN T 1985: Kevätviljapeltojen rikkaruoholajiston muutoksista 1960-luvulta 1980-luvulle.
- 45 VIII NORDIC MYCOLOGICAL CONGRESS 18.–22.8.1986.
- 46 MIKOLA L 1986: Cereal carboxypeptidases: occurrence, properties and possible functions.
- 47 SUNDELL P ja SAARI V 1986: Jyväskylän maalaiskunnan ja Laukaan uhanalaiset kasvit.
- 48 SIPPONEN M 1987: Keskisuomalaisten kotitarve- ja virkistyskalastuksesta ja sen arvosta v. 1981 erityisesti vesioikeudellisen intressivertailun kannalta.
- 49 HIRSIMÄKI P ja REUNANEN H 1987: Autofagocytoosin mekanismi ja säätely.
- 50 RAATIKAINEN T ja RAATIKAINEN M 1988: Pihtiputaan uhanalaiset putkilokasvit ja niiden suojele.
- 51 ELORANTA P 1988: Etelä- ja Keski-Suomen kansallispuistojen järvien kasviplanktonista heinäkuussa 1987.
- 52 HALTTUNEN-KEYRILÄINEN L 1988: Ympäristöviranomaisten koulutus- ja pätevyysvaatimuksista kunnissa. Kuntakyselyn tulokset.
- 53 REUNANEN H 1989: Ultrastructural studies on cellular autophagocytosis in vivo and in vitro.
- 54 HARVISALO S ja RAATIKAINEN T 1989: Kinnulan, Kivijärven ja Kyyjärven uhanalaiset putkilokasvit.
- 55 RAATIKAINEN M, IHANAINEN E ja RAATIKAINEN T 1989: Viitasaaren uhanalaiset putkilokasvit ja niiden suojele.
- 56 HUHTA V, HAIMI J, SETÄLÄ H, BOUCELHAM M, MARTIKAINEN E ja TYYNISMAA M 1989: Maaperäeläinten merkitys tuoreen kangasmetsän hajotuksessa, ravinnekierrossa ja maannostumisessa.
- 57 PEITSENHEIMO-AARNIO S ja RAATIKAINEN T 1989: Joutsan, Leivonmäen ja Luhangan uhanalaiset putkilokasvit ja niiden suojele.
- 58 EISTO A-K ja RAATIKAINEN T 1989: Hankasalmen ja Toivakan uhanalaiset putkilokasvit.
- 59 EKOTOKSIKOLOGIAN SEMINAARI. Jyväskylän yliopisto 27.–28.11.1990.
- 60 RAATIKAINEN M 1990: Putkilokasvilajien yleisyyden muutokset 1900-luvun Pihtiputaalla.
- 61 USTINOV A ja RAATIKAINEN M 1991: Lestijärven ja Toholammin uhanalaiset putkilokasvit.
- 62 LIIKUNTA JA LUONTO -SEMINAARI. LIKES, Jyväskylän yliopisto, Keski-Suomen liitto, Jyväskylän latu ry. 21.5.1991.
- 63 HAMARUS A, HELENIUS M ja SAARI V 1991: Jyväskylän uhanalaiset kasvit.
- 64 CONFERENCE ON THE ECOPHYSIOLOGY OF THE LIFE CYCLES OF FISH AND THEIR PARASITES. Konnevesi Research Station 10.3.–11.3.1992.
- 65 HALLMAN J ja RAATIKAINEN M 1992: Halsuan ja Perhon uhanalaiset putkilokasvit.
- 66 ERVI LO ja RAATIKAINEN M 1993: Multian putkilokasvit.
- 67 RAATIKAINEN M ja SAARI V 1994: Viitasaaren seutukunnan lehtisammalet.
- 68 MARJOMÄKI T ja HUOLILA M 1994: Puulaveden kalatutkimuksia I.
- 69 HÄNNINEN K, KOIVULA N, MIIKKI V ja TOLVANEN O 1999: Erilliskerätyn biojätteen aumakompostointi Mustankorkealla Jyväskylässä.
- 70 HÄNNINEN K, ASIKAINEN A, YLI-KETURI N, RUOKOJÄRVI P, AATAMILA M, HALONEN I, TUPPURAINEN K, VESTERINEN R, MIKKELSON P ja RUUSKANEN J 2000: Nestemäisen inhibiittoriyhdisteen käyttö todellisen yhdyskuntajätteen poltossa muodostuvien kloorattujen PCDD/F-yhdisteiden vähentämiseen.
- 71 HÄNNINEN K, YLI-KETURI N, MIKKELSON P, PENTTILÄ H, VESTERINEN R, PAAKKINEN K, HALONEN I, ASIKAINEN A, RUOKOJÄRVI P, TUPPURAINEN K ja RUUSKANEN J 2000: Kemiallis-fysikaalisten tekijöiden vaikutus PCDD/F-yhdisteiden *de novo*-muodostumiseen ja sen ehkäisemiseen jätteenpoltossa.
- 72 HÄNNINEN K, AILUNKA H, KOTIMÄKI I, MAIJALA V, LAMBACKA H, HEIMONEN R ja KUOSKU V 2001: Poron teurasjätteen kompostointi ja kasvatuskokeet kompostilla.
- 73 HÄNNINEN K, KOIVULA N, MIIKKI V, URPILAINEN S and RÄIKKÖNEN T 2001: Source separation and composting of biowaste with a view to recycling of the end product.
- 74 LAMPINEN A 2001: Jyväskylän yliopiston uusiutuvan energian koulutus- ja tutkimusohjelma – Tausta ja toimintaympäristö.
- 75 LAMPINEN A 2001: Co-operation possibilities on renewable energy between Finland and India.
- 76 TOLVANEN O ja HÄNNINEN K 2001: Uusinta teknologiaa hyödyntävien jätteenkäsittelylaitosten työhygieniä v. 1998-2001: bioaerosoli- ja melumittaukset. Suomen Akatemian projekti n:o 42503/1998. Loppuraportti.
- 77 VILOS P, IMPPOLA U, VEIJANEN A ja HÄNNINEN K 2002: Uusinta teknologiaa hyödyntävien jätteenkäsittelylaitosten työhygieniä v. 1998-2001: haihtuvat, haisevat yhdisteet. Suomen Akatemian projekti n:o 42503/1998. Loppuraportti.
- 78 RAHEEM K, HÄNNINEN K and AKINROYE K (eds.) 2002: West Africa clean studies. Proceedings of the 1st and 2nd international conferences on waste management. Lagos, Nigeria, 2000 and 2001.
- 79 HÄNNINEN K ja MIIKKI V (toim.) 2003: Biojätteiden paineistettu anaerobinen biokonversio.
- 80 HUTTUNEN S 2004: Paikallista kestävä energiaa – Uusiutuvan energian mahdollisuudet maataloilla.

Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja -sarjassa ilmestyneet julkaisut
RESEARCH REPORTS IN BIOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

- 81 HUTTUNEN S and LAMPINEN A 2005: Bioenergy technology evaluation and potential in Costa Rica.
- 82 RONKAINEN O, KOSKINEN P, LEHTOMÄKI A, LAMPINEN A, TOIVAINEN K, KAKSONEN A, PUHAKKA J ja RINTALA J 2005: Biologinen vedyntuotanto pimeäfermentaatioprosessilla.
- 83 KUMPULAINEN T 2005: Jyväskylän kaupungin perhoslajisto vuosina 1995 - 2005: I - päiväperhoset ja muu huomionarvoinen perhoslajisto.
- 84 LAMPINEN A ja JOKINEN E 2006: Suomen maatalojen energiantuotantopotentiaalit – Ekologinen perspektiivi.
- 85 LEHTOMÄKI A, PAAVOLA T, RINTALA J ja LUOSTARINEN S 2007: Biokaasusta energiaa maatalouteen - Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet.

DEPARTMENT OF BIOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, FINLAND