

Kuivalannan kaksivaiheinen jatkuvatoiminen mädätys maatilalla: Reaktorin rakenne sekä aine-, ravinne- ja energiataseet

Winfried Schäfer¹⁾, Lars Evers²⁾, Marja Lehto¹⁾, Sanna Sorvala¹⁾, Frederick Teye¹⁾, Artur Granstedt²⁾

¹⁾ MTT Maatalousteknologian tutkimus, Vakolantie 55, 03400 Vihti, winfried.schafer@mtt.fi

²⁾ Biodynamic Research Institute, Skilleby gård, S-15391 Järna, sbfi@jdb.se

Tiivistelmä

Viime vuosikymmeninä on maataloille kehitetty muutamia kuivamädätyslaitosten prototyyppijä. Kuivamädätyslaitosten etuja, verrattuna lietteiden mädätyslaitoksiin, ovat pienempi reaktorin koko, prosessienergian kulutus ja kuljetustarve sekä pienemmät hajukaasupäästöt. Kuivamädätyslaitokset eivät kuitenkaan ole yleistyneet maataloilla, koska reaktorin syöttö- ja tyhjennysvaiheet ovat olleet hankalia toteuttaa. Tässä esitetään uudenlainen kaksivaiheinen tilatason biokaasulaitos, joka on jatkuvatoiminen ja jolla mädätetään lypsykarjan kuivalantaa.

Lypsykarjatilalta tuleva kuivalanta siirretään hydraulisella raapalla hydrolyysireaktorin syöttökanaavaan, josta se puristetaan hydrolyysireaktorin yläosaan. Reaktori on vinossa, 30° kulmassa, ja sen tehollinen tilavuus on 53 m³. Tuore materiaali sekoittuu muuhun materiaaliin painovoiman avulla. Viipymäaika on 22 - 25 päivää 38 °C:ssa, minkä jälkeen materiaali poistetaan reaktorin alaosaan laatikon avulla. Osa materiaalista putoaa kuljetusruuvien alapuolella olevaan puristimeen, missä erotetaan toisistaan kiinteä ja nestemäinen jae. Toinen osa johdetaan takaisin syöttökanaavaan ja syötetään tuoreen lannan sekaan. Kiinteä jae, joka saadaan puristimesta, kompostoidaan lantalassa. Nestemäinen jae kerätään ja pumpataan metaanireaktoriin, jonka tehollinen tilavuus on 17 m³. Nestemäinen jae, altaasta ja metaanireaktorista, palautetaan osittain syöttöputkeen, tukkeutumisen estämiseksi. Mädätetty neste pumpataan 15 - 16 päivän hydraulisen viipymäajan jälkeen varastosäiliöön. Vertailukokeessa kompostoituihin rinnakkain käsittelemätöntä lantaa sekä hydrolyysireaktorista tulevaa kiinteää jaetta.

Biokaasulaitos tuotti kaasua keskimäärin 52 m³ vuorokaudessa, suurin mitattu saanto vuorokaudessa oli 91 m³ biokaasua tai metaanin määränä ilmaistuna 0,17 m³ CH₄ orgaanista kuiva-ainekiloa kohti. Kiinteä jae sisälsi 73 ± 2 % syötetystä orgaanisesta kuiva-aineesta ja nestemäinen mädätysjäännös 10 ± 2 %. Kompostoitu kiinteä jae ja nestemäinen mädätysjäännös sisälsivät yhteensä 70 – 81 % kuivalannan kokonaistyyppimäärästä ja 94 – 111 % kuivalannan ammoniumista. Kokonaistyyppihäviö oli 19 - 29 %. Lannan kompostoinnissa ammoniumhäviö oli 96 % ja kokonaistyyppihäviö 30 – 48 %. Tuotetusta metaanista kului keskimäärin 76,3 % prosessin lämmittämiseen ja enimmillään 56 % tuotetusta energiasta (305 kWh d⁻¹) oli käytettävissä maatilan lämmitykseen.

Kaksivaiheinen biokaasureaktorin prototyyppi on toimiva ratkaisu Ytterenebyn maatilan ja läheisen elintarvikeyrityksen orgaanisen jätteen käsittelyyn. Biokaasulaitoksen rakenteessa on otettu huomioon uusimmat tutkimustulokset. Prosessioptimoinnin jälkeen taloudellinen arviointi on tarpeellista arvioitaessa uuden tekniikan kilpailukykyä.

Asiasanat

Biokaasu, kuivalanta, mädätys, jatkuvatoiminen prosessi, maatilataso

Johdanto

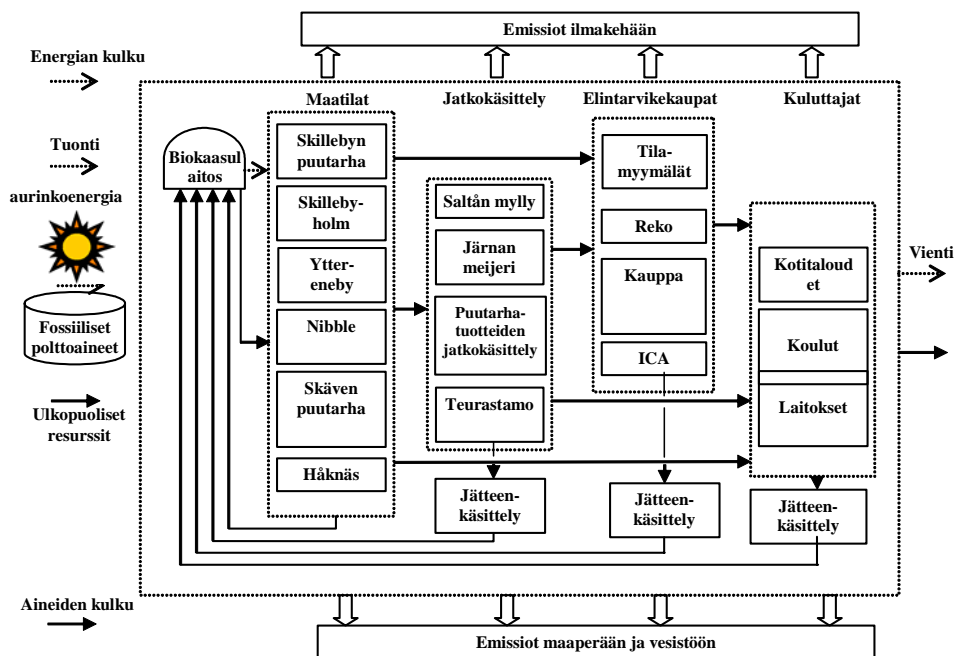
Nykyisin myynnissä olevat biokaasulaitokset on kehitetty pääasiassa lietteiden ja muiden orgaanisten aineiden mädätykseen. Kuivalantaketjua käyttävien nauta-, hevos- ja siipikarjatilojen kilpailukykyä rajoittaa se, että lietemenetelmään siirtyminen vaatii merkittäviä lisäinvestointeja. Kiinteiden yhdyskuntabiojätteiden käsittelemiseen kehitetty teknologia on edistänyt myös maataloudessa käytettävien ns. kuivamädätyslaitosten kehitystä. Näissä laitoksissa käytettävän raaka-aineen kuiva-ainepitoisuus on 15 – 50 % (Hoffman 2001). Tällaisten laitosten etuja, verrattuna lietteen mädätyslaitoksiin, ovat reaktorin pienempi koko, prosessin pienempi energiakulutus, vähäisempi kuljetustarve sekä pienemmät hajukaasupäästöt.

Maatilatason tutkimuksissa, jotka käsittelevät kuivamädätystä panosreaktoreissa (Gronauer ja Aschman 2004, Kusch ja Oechsner 2004) sekä prototyypitutkimuksessa (Linke 2004), on todettu, että täyttö- ja poistovaiheet ovat panosreaktorissa hankalia ja/tai vievät paljon aikaa verrattuna lieteraktoreihin. Tasainen kaasuntuotanto edellyttää useaa peräkkäistä panosreaktoria, joita täytetään tietyin aikaväleihin. Baserga ym. 1994 kehittivät tilatasolle 9,6 m³:n pilottilaitteiston, joka mädättää jatkuva-toimisesti kiinteää lihakarjan lantaa. Kuivamädätyslaitokset eivät kuitenkaan ole yleistyneet ja niitä on vähän kaupallisesti saatavilla. Testattujen teknisten ratkaisujen puute ja vähäiset tilatason tutkimustulokset ovat pääasiassa syynä kuivamädätysteknologian vähäisyyteen maataloilla.

Tässä tutkimuksessa saatiin tietoa uudenlaisesta, kaksivaiheisesta tilatason biokaasulaitoksesta. Laitos käsittelee lypsykarjan lantaa ja tilan sekä läheisen elintarvikeyrityksen orgaanista jätettä. Kaksivaiheista reaktoritekniikkaa on käytetty siksi, että tällä saadaan erotettua nestemäinen ja kiinteä jae toisistaan. Kiinteä jae kompostoidaan hydrolyysivaiheen jälkeen. Nestemäisen jakeen anaerobisessa mädätyksessä voidaan käyttää biofilmitekniikkaa, jonka etuja ovat lyhyt hydraulinen viipymä, pienempi reaktoritilavuus ja biokaasun suurempi metaanipitoisuus, verrattuna ilman suodatinmateriaalia toimiviin reaktoreihin, (Lo ym. 1984).

Aineisto ja menetelmät

Biokaasulaitos sijaitsee Ytterenebyn tilalla Järnassa, Ruotsissa, noin 50 km Tukholmasta etelään. Laitos on suunniteltu käsittelemään kuivalantaa, jota saadaan 65 eläinpaikkaisesta lypsykarjanavetasta, sekä läheisen elintarvikeyrityksen orgaanista jätettä, kuva 1.



Kuva 1: Pääperiaate kokonaisuudesta, johon Järnan biokaasulaitos sijoittuu. Tavoitteena on korkea kierrätysaste, uusiutumattoman energian käytön vähentäminen sekä parhaan tunnetun ekologisen teknologian käyttö järjestelmän jokaisessa vaiheessa. Tavoitteena on vähentää uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöä ja vähentää haitallisia päästöjä ilmakehään, maaperään ja vesistöihin (Granstedt ym. 2005).

Laitoksen rakenne

Biokaasulaitoksen molemmat reaktorit on valmistettu COR-TEN-terässylinteristä, jota on aikaisemmin käytetty savupiippuna. Sylinterin seinämän paksuus on 10 mm ja sisähalkaisija 2,85 m. Sylinteri on päällystetty 20 cm paksulla selluvillaeristeellä sekä poimulevyllä. Kuvassa 2 on esitetty biokaasulaitoksen prosessivirtauskaavio.

Lypsykarjatilán parsinavetassa on 65 eläinpaikkaa. Kuivalanta on sekoitus sonnasta, oljesta ja kaura-akanoista. Lanta siirretään hydraulisella raapalla hydrolyysireaktorin syöttökanavaan. Syöttökanavasta lanta puristetaan toisella hydraulisella raapalla (180 bar, 2700 mm isku) 400 mm leveän PVC-putken läpi hydrolyysireaktorin yläosaan. Reaktori on vinossa, 30° kulmassa, ja sen tehollinen tilavuus on 53 m³. Tuore materiaali sekoittuu muuhun materiaaliin painovoiman avulla. Hydrolyysireaktorin pohjalla, syöttöputken molemmilla puolilla, ovat kuumavesikanavat. Hydraulisen viipymän, 22 - 25 päivää 38 °C:ssa, jälkeen materiaali poistetaan reaktorin alaosaan pohjatonta laatikkoa käyttäen. Laatikko kulkee suorakulmaisessa kanavassa hydraulisen sylinterin avulla (180 bar, 1000 mm isku). Jokainen työntö poistaa reaktorista noin 0,1 m³ materiaalia alapuolella olevaan kuljetusruuviin (Spirac, Ø 260 mm). Osa materiaalista putoaa kuljetusruuvin alapuolella poikittain olevaan puristimeen (Spirac, Ø 200 mm), missä erotetaan toisistaan kiinteä ja nestemäinen jae. Toinen osa johdetaan takaisin syöttökanavaan ja syötetään tuoreen lannan sekaan. Kuivajae, joka saadaan puristimesta, kompostoidaan lantalassa.

Nestemäinen jae kerätään 2 m³:n välivarastoon, josta se pumpataan metaanireaktoriin. Nestemäinen jae, välivarastosta ja metaanireaktorista, palautetaan osittain syöttöputkeen tukkeutumisen estämiseksi. Metaanireaktori on 4 m korkea ja sisältää 10.000 muovista suodatinkappaletta. Reaktorin tehollinen tilavuus on 17,6 m³. Hydraulisen viipymän, 15 - 16 d 38 °C:ssa, jälkeen neste pumpataan ruuvipumpulla (Pumpenfabrik, Wangen, Typ KL 30S-500) neljän paineilmalla ohjatun venttiilin kautta varastosäiliöön, jota peittää kelluva kangas. Molemmissa reaktoreissa muodostunut kaasu kuivataan ja varastoidaan säkissä. Kompressori, joka tuottaa 170 mbar paineen, syöttää kaasua laitoksen prosessipolttimeen sekä kartanon lämmityskattilan polttimeen. Biokaasulaitosta ohjataan Mitsubishi FX 2N 48 MR ohjelmoitavan logiikan ohjauslaitteella.

Näytteenotto

Molemmista reaktoreista saatavaa kaasumäärää mitattiin kaasumittareilla (Actaris G6 RF1) ja lukemat luettiin päivittäin. Biokaasun CO₂-pitoisuus määritettiin natriumhydroksidiliuoksen avulla. Biokaasun höyrypitoisuuden arvioitiin olevan 3 % (Weiland 2004). Keväällä 2004 asennettiin kolmas kaasumittari (Krom-Schröder BK-G4T) rekisteröimään prosessilämmittimen kaasunkulutusta, lisäksi mitattiin koko laitoksen sähkönkulutusta.

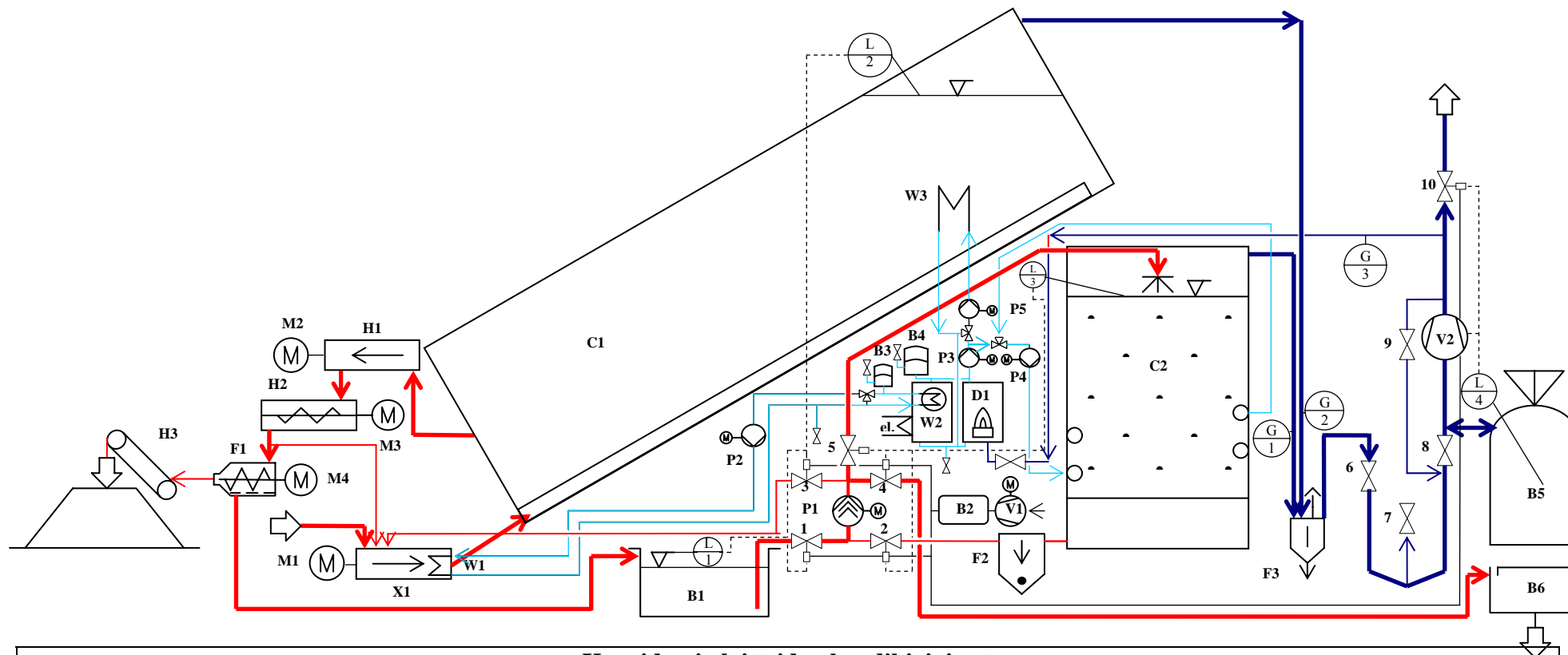
Näytteenotto suoritettiin tilalla kolmena ajankohtana: 3.3., 6.5. ja 26.10.2004. Syöttökanavasta otettiin lantanäytteet, samoin kiinteästä jakeesta, laitoksesta poistuvasta nesteestä, oljesta ja akanoista. Kompostointikokeet tehtiin ajanjaksoina 10.5. - 13.8.2004 ja 27.10.2004 - 16.3.2005. Rinnakkain kompostoitiin käsittelemätöntä lantaa sekä hydrolyysireaktorista poistuvaa kuivajaeetta. Näytteiden tilavuus oli 50 l ja ne kompostoitiin 15 °C ja 20 °C lämpötiloissa MTT/Vakolan säähuoneessa. Kuiva-aine ja ravinnepitoisuudet määritettiin HS miljölab Ab:ssä Ruotsissa ja Novalab Oy:ssä Suomessa. Orgaaninen kiintoaine analysoitiin MTT/Vakolan laboratoriossa (3 h 550 °C:ssa).

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Kevään tulokset ovat keskiarvoja näytteistä, jotka otettiin 3.3.2004 ja 6.5.2004. Syksyn tulokset ovat näytteistä, jotka otettiin 26.10.2004.

Ainetase

Taulukossa 1 on esitetty biokaasulaitoksen ainetase. Biokaasulaitokseen syötetystä orgaanisesta materiaalista 53 – 70 % oli peräisin kaura-akanoista ja oljesta. Kiinteässä jakeessa oli jäljellä 70 – 75 %, nestejakeessa 10 – 15 % ja biokaasussa 14,5 – 15 % kokonaiskuiva-aineesta. Kompostoitu kiinteä jae ja nestejake sisälsivät yhteensä n. 48 % laitokseen syötetyn materiaalin kuiva-aineesta. Käsittelemättömän lannan kompostoinnissa kuiva-ainehäviö oli n. 47 - 49 %.



Koneiden ja laitteiden koodikirjaimet

B1	Puskurisäiliö	B2	Paineilmasäiliö	B3-B4	Paisuntasäiliö	B5	Kaasusäkki	B6	Mädätysjäännöksen säiliö	C1	Hydrolyysireaktori
C2	Metaanireaktori	D1	Poltin	F1	Puristin	F2	Rae-erotin	F3	Vedenerotin	H1	Tyhjennyslaatikko
H2	Kuljetusruuvi	H3	Kuljetushihna	M1, M2	Hydraulispumpun moottori	M3, M4	Vaihteistomoottorit	P1	Ruuvipumppu	P2-P5	Lämmin veden pumput
V1	Paineilmakompressori	V2	Kaasukompressori	W1	Syöttökanavan lämmitys	W2	Kuumavesisäiliö	W3	Hydrolyysireaktorin lämmitys	X1	Hydraulinen raappa

Venttiilien koodinumerot

1-5	Massavirtojen ohjausventtiilit	6-9	Kaasuputken vedenpoistoventtiilit	10	Kaasuventtiili kartanon lämmityskattilaan
-----	--------------------------------	-----	-----------------------------------	----	---

Mittaus- ja ohjaustoiminnan koodikirjaimet

$\frac{L}{1}$	Puskurisäiliön pinta- korkeusanturi	$\frac{L}{2}$	Hydrolyysireaktorin pintakorkeusanturi	$\frac{L}{3}$	Metaanireaktorin pintakorkeusanturi	$\frac{L}{4}$	Kaasusäkin täyt- töasteen anturi	$\frac{G}{1}$	Metaanireaktorin kaasumittari	$\frac{G}{2}$	Hydrolyysireaktori- nin kaasumittari	$\frac{G}{3}$	Polttimen kaasumittari
---------------	--	---------------	---	---------------	--	---------------	-------------------------------------	---------------	----------------------------------	---------------	---	---------------	---------------------------

Kuva 2: Biokaasulaitoksen prosessivirtauskaavio, Yttereneby, Järna

Biokaasulaitos tuotti kaasua keskimäärin $52 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, suurin mitattu saanto vuorokaudessa oli 91 m^3 biokaasua tai metaanin määränä ilmaistuna $0,17 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$. Basergan ym. (1994) tutkimuksen mukaan lihakarjan lannan biokaasutuksesta saatiin metaania $0,186 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$. Møller ym. (2004) saivat lypsykarjan lannan mädätyksen metaanisaannoksi $0,1 - 0,16 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$.

Taulukko 1: Keväällä ja syksyllä 2004 mitattujen näytteiden ainetase: Tuoremassa FM, kuiva-aine TS ja orgaaninen kuiva-aine VS.

Massa	FM kg d^{-1}		TS kg d^{-1}		VS kg d^{-1}		
	2004	Kevät	Syksy	Kevät	Syksy	Kevät	Syksy
Syötetty sonta		1717	2175	123	199	99	176
Syötetty olki		27	58	24	44	23	37
Syötetty kaura-akana		256	198	238	181	218	162
Syötetty yhteensä		2000	2430	385	424	340	376
Poistuva kiinteä jae		919	1188	271	317	243	282
Poistuva neste		1025	1176	58	45	41	32
Poistuva CO_2		34	40	34	40	34	40
Poistuva CH_4		21	22	21	22	21	22
Poistuva vesihöyry		1	2				
Poistuva yhteensä		2000	2428	384	423	339	375

Ravinnetase

Taulukkoon 2 on koottu eri jakeista määritetyt ravinnepitoisuudet ja kuvassa 3 on esitetty typen esiintymisen erilaisina typen yhdisteinä. Kokonaistypen häviöt vaihtelivat mädätyksessä 19 – 29 % ja käsittelemättömän lannan kompostoinnissa välillä 30 – 48 %. Samansuuntaisia arvoja mitattiin myös ammoniumille, häviö lannan anaerobisessa mädätyksessä oli vain 6 %, mutta lannan aerobisessa kompostoinnissa se oli 96 %. Kaliumin ja fosforin häviöt olivat suuremmat anaerobisessa kuin aerobisessa hajotuksessa. Kompostoitu kiinteä jae ja nestejake sisälsivät yhteensä laitokseen syötetystä kokonaistypestä 70 – 81 % ja ammoniumtypestä 94 – 111 %. Tulokset vahvistavat Möllerin (2002) laskelmia, joiden mukaan biokaasutuotanto lisää ammoniakki kiertoa ja vähentää typen häviötä verrattuna pelkkään aerobiseen kompostointiin.

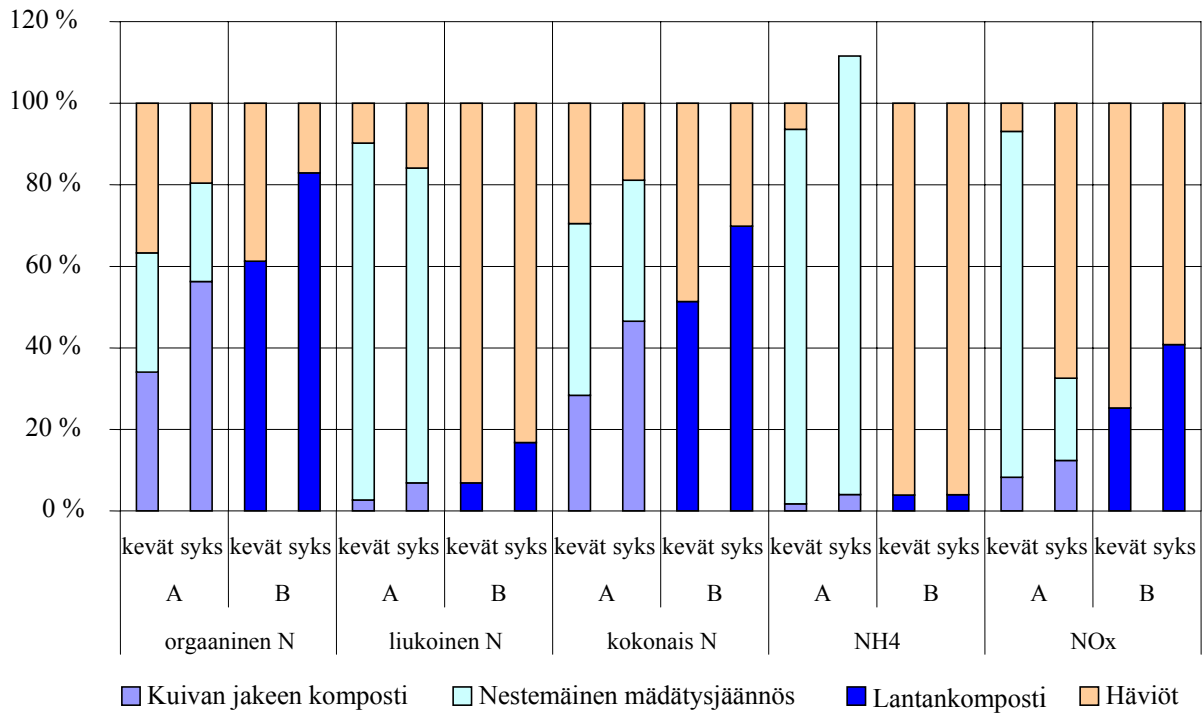
Taulukko 2: Biokaasulaitokseen syötetyn ja sieltä poistuvan materiaalin ravinnepitoisuudet. N_{tot} on kokonais-N.

Ravinne	$N_{\text{tot}} \text{ kg d}^{-1}$		K kg d^{-1}		P kg d^{-1}		
	2004	Kevät	Syksy	Kevät	Syksy	Kevät	Syksy
Syötetty sonta		8,29	7,68	6,06	10,02	2,01	1,40
Syötetty olki		0,14	0,24	0,61	0,31	0,04	0,05
Syötetty kaura-akana		0,56	0,59	1,13	1,09	0,20	0,20
Syötetty lanta		9,00	8,50	7,80	11,42	2,25	1,65
Poistettu kiinteä jae		3,95	4,40	2,85	4,63	0,76	0,84
Poistettu neste		3,79	2,94	3,49	3,76	0,81	0,60
Poistettu yhteensä		7,74	7,34	6,33	8,40	1,57	1,44
Häviö		1,26	1,17	1,47	3,02	0,68	0,21

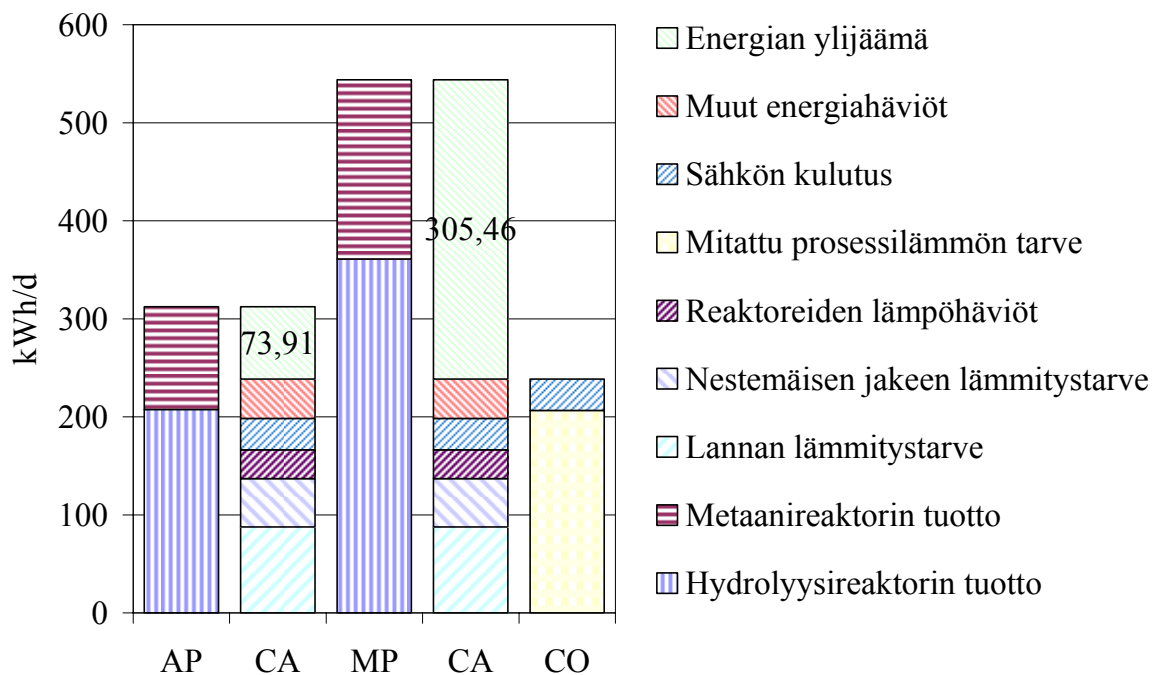
Energiatase

Kuvassa 4 on esitetty biokaasulaitoksen tuottama ja kuluttama energiamäärä ajalta 23.11.2003 - 7.5.2004. Päivän keskilämpötila oli tuona ajanjaksona $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Tuotetusta metaanista kului keskimäärin 76,3 % prosessin lämmittämiseen. Enintään 56 % tuotetusta energiasta jäi kartanon lämmitykseen. Laskennallisesti lämpöenergiaa kului lannan ja nestemäisen jakeen lämmitykseen 53,3 % ja lämpöhäviöihin vain 9,5 % tuotetusta energiasta. Koko biokaasulaitoksen suurin saavutettu hyötysuhde oli n.

49 % ja keskimääräinen hyötysuhde 24 % tuotetusta energiasta. Biokaasureaktorin kokonaislämmönkulutus oli 206 kWh/d ja sähköenergian kulutus 32 kWh/d.



Kuva 3: Biokaasulaitoksen (A) ja aerobisen kompostin (B) tyypitase keväällä ja syksyllä 2004. 100 % = syötetyn lannan tyypimäärä.



Kuva 4: Biokaasulaitoksen tuottama ja kuluttama energia. AP: keskimääräinen metaanintuotto. CA: laskettu energian kulutus. MP: maksimi metaanin tuotto. CO: mitattu energian kulutus.

Johtopäätökset

Järnassa sijaitseva kaksivaiheinen biokaasulaitos on toimiva ratkaisu maatilan ja läheisen elintarvikemyrityksen orgaanisen jätteen käsittelyyn. Prototyypireaktorin rakenteessa on otettu huomioon uusimmat tutkimustulokset. Lisää teknisiä ratkaisuja kuitenkin tarvitaan korkean kuiva-ainepitoisuuden omaavan orgaanisen materiaalin käsittelyyn ja prosessien optimointiin.

Edellä esitetty jatkuvatoiminen lannan syöttö- ja poistotekniikka soveltuu maatilan orgaanisen materiaalin koostumukselle ja kuiva-ainepitoisuudelle. Se ei välttämättä kuitenkaan sovi suurille olkimäärille tai viherjätteelle. Verrattuna pelkkään kompostointiin, orgaanisen materiaalin mädätys ja sen jälkeen kiinteän jakeen kompostointi, parantavat maatilan energia- ja ravinnetasetta. Avaintekijä on kuitenkin tarkoituksenmukainen, uusi tekniikka. Jotta Järnan biokaasulaitoksen tulokset voidaan varmistaa tilastollisesti, tarvitaan kuitenkin lisää mittauksia. Hydraulisen viipymäajan ja kuormituksen optimoinnilla voidaan päästä suurempaan kaasuntuotantoon, mutta tähän tarvitaan parempaa mittaus-tekniikkaa.

Taloudellinen arviointi on tarpeellista arvioitaessa uuden tekniikan kilpailukykyä. Biokaasulaitoksesta saatavaa hyötyä voidaan parantaa, jos otetaan huomioon paitsi reaktorin ravinnetase myös koko tilan ravinnetase viljelykiertokauden aikana. Ravinteiden laatu vaikuttaa maaperän viljavuuteen, sen kautta rehun laatuun ja lopulta eläinten terveyteen.

Kirjallisuus

Baserga, U., Egger, K., Wellinger, A. 1994. Biogas aus Festmist. Entwicklung einer kontinuierlich betriebenen Biogasanlage zur Vergärung von strohreichem Mist. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) Tänikon. FAT-Berichte Nr. 451, 12p.

Granstedt, A., Thomsson, O. and Schneider, T. 2005. BERAS WP2 draft report August 2005. <http://www.jdb.se/beras/>

Gronauer, A. & Aschmann, V. 2004. Wissenschaftliche Begleitung einer Pilotanlage zur Feststoffvergärung von landwirtschaftlichen Gütern. Gelbes Heft Nr. 77 des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten in München. 140p.

Hoffmann, M. 2001. Trockenfermentation. Entwicklungsstand und Perspektiven. Landtechnik 56, 410-411.

Kusch, S., Oechsner, H. 2004. Feststoffvergärung in Batchreaktoren – erste Versuchsergebnisse. In Tagungsband zur 13. Jahrestagung, Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft. 2.-4. Dezember 2004 in Wolpertshausen. (Ed. Internationales Biogas und Bioenergie Kompetenzzentrum, Fachgruppe Biogas), 115-124.

Linke, B. 2004. Substrateinsatz bei der Trockenfermentation – Einschätzung des F+E-Bedarfs. In Gülzower Fachgespräche 23, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 35-48.

Lo, K. V., Liao, P. H., Bulley, N. R., Chieng, S. T. 1984. A comparison of biogas production from dairy manure filtrate using conventional and fixed-film reactors. Canadian Agricultural Engineering 26, 73-78.

Möller, K. 2003. Systemwirkungen einer "Biogaswirtschaft" im ökologischen Landbau: Pflanzenbauliche Aspekte, Auswirkungen auf den N-Haushalt und auf die Spurengasemissionen. Biogas Journal 1, 20-29.

Møller, H., Sommer, S., Ahring, B. 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. Biomass & Bioenergy 26, 485-495.

Weiland, P. 2004. Notwendigkeit der Biogasaufbereitung und Stand der Technik. Ed. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. In: Workshop Aufbereitung von Biogas. Gülzower Fachgespräche Bd. 21, Gülzow, 23-35.