

Pro gradu –tutkielma

Energiakasveista tuotetun biokaasun energiatase suomalaisessa maatilakokoluokan biokaasulaitoksessa

Juha Luostarinen



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede

2007

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Bio- ja ympäristötieteiden laitos
Ympäristötiede

LUOSTARINEN, JUHA: Energiakasveista tuotetun biokaasun energiatase suomalaisessa maatilakokoluokan biokaasulaitoksessa
Pro gradu: 52 s.
Työn ohjaajat: Prof. Jukka Rintala, Yliass. Margareta Wihersaari
Tarkastajat: Prof. Jukka Rintala, FT Annimari Lehtomäki
Syyskuu 2007

Hakusanat: biokaasu, metaani, energiatase, energiakasvit

TIIVISTELMÄ

Uusiutuvia ja kotimaisia energialähteitä käyttämällä voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja riippuvuutta tuontipolttoaineista. Eloperäisen aineen anaerobisessa hajoamisessa syntyvä biokaasu täyttää nämä molemmat kriteerit, ja on monipuolinen energiamuoto, sillä sitä voi käyttää sähkön- ja lämmöntuotantoon, sekä puhdistettuna liikennepolttoaineena. Energiatase, joka kattaa energiantuotantoketjun kuluttamat ja tuottamat energiapanokset, kuvaa energiantuoton hyötysuhdetta.

Tämän työn tavoite oli määrittää koko tuotantoketjun energiatase tuotettaessa energiakasveista biokaasua Suomen olosuhteissa. Työssä tutkittiin tuotantoketjuja eri kasvilajeilla ja erilaisilla prosessin rajauksilla ja lähtöoletuksilla.

Biokaasun tuotanto timoteinurmesta maatilatalouden kokoluokan (1000 m³) mesofiilisesä biokaasureaktorissa kuluttaa primäärienergiaa 16,4 % tuotetusta energiasta, eli tuotantoon käytettyä primäärienergiayksikköä kohti saadaan 5,9 yksikköä energiaa biokaasuna.

Biokaasun tuotannossa suurimpia energiankuluttajia ovat reaktorin ja syötteen lämmitys, joka kuluttaa 9,1 % tuotetusta energiasta. Biokaasuprosessin sähkönkulutus on 2,6 % tuotetusta energiasta. Peltotyöt kuluttavat tuotetusta energiasta 1,7 – 4,9 % käytetystä kasvilajista riippuen, lannoitteisiin ja muihin kemiallisiin panoksiin kuluu kasvilajista ja väkilannoitteiden käyttöasteesta riippuen 1,7 – 16,6 %. Mikäli liikennepolttoaineeksi jalostaminen sisällytetään laskelmiin, se kuluttaa 8,2 % tuotetusta energiasta, jolloin tuotospanossuhde koko tuotantoketjulla on 4,1. Peltihehtaarilta nettoenergiaa saadaan 20,0 MWh vuodessa, liikennepolttoaineena 17,6 MWh.

Maa- ja metsätalousministeriö arvioi, että vuonna 2012 energiakasvien viljelyyn käytetään Suomessa 200 000 – 500 000 hehtaaria peltoalaa. Mikäli tämä ala käytettäisiin biometaanin tuotantoon liikennekäyttöön, voitaisiin sillä kattaa 9,3 - 23,3 % liikenteen nykyisestä tarpeesta. EU:n asettama tavoite liikenteen biopolttoaineiden käytölle on 5,75 % vuoteen 2010 mennessä.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science

Department of Biological and Environmental Science
Environmental Sciences

LUOSTARINEN, JUHA: Energy balance in Finnish farm-scale biogas plant using energy crops

Master of Science Thesis: 52 p.

Supervisors: Prof. Jukka Rintala, Assoc. Prof. Margareta Wihersaari

Inspectors: Prof. Jukka Rintala, PhD Annimari Lehtomäki

September 2007

Key Words: biogas, methane, energy balance, energy crops

ABSTRACT

By using renewable and domestic energy sources it is possible to mitigate greenhouse gas emissions and decrease dependence fossil fuels. Biogas produced by anaerobic digestion of organic matter is renewable and domestic versatile energy carrier. It can be used in production of heat and electricity, and as vehicle fuel if upgraded. Energy balance, which covers all energy inputs and outputs in the production chain, represents energy efficiency of production system.

In this thesis, energy balance of biogas production from energy crops was determined in Finnish conditions. Production chain was determined for different crops and system boundaries.

Production of biogas from grass silage in mesophilic farm-scale (1000 m³) biogas plant uses 16,4 % of produced primary energy in production chain, corresponding input-output ratio of 5,9.

The most significant energy consumers in biogas production is heating of the reactor and feedstock, which uses 9,1 % of produced energy. Electricity consumption is 2,6 % of produced energy. Cultivation of crops consumes 1,7 – 4,9 %, depending on crop species, fertilisers and other chemical inputs corresponds 1,7 – 16,6 % depending on crop species and degree of artificial fertiliser use. Upgrading biogas to vehicle fuel uses 8,2 % of produced energy, making input-output ratio 4,1. Net energy yields per hectare per annum are 20,0 MWh as biogas, and 17,6 MWh as upgraded vehicle fuel.

Finnish Ministry of agriculture and forestry estimates that in year 2012 up to 200 000 – 500 000 hectares of field acreage is used in energy crop production. If this acreage is used for biogas production, could 9,3 – 23,3 % of current consumption of traffic be met. EU sets target of 5,75 % in renewable traffic fuels by 2010.

YKSIKÖT JA LYHENTEET

k	kilo, 10^3
M	mega, 10^6
T	tera, 10^{12}
a	vuosi
°C	Celsiusaste
g	gramma
h	tunti
ha	hehtaari
J	joule, $0.278 \cdot 10^{-3}$ Wh
l	litra
m	metri
t	tonni
W	watti
W_e	watti, sähköteho

CSTR continuous stirred-tank reactor, jatkuvatoiminen täyssekoitusreaktori

UASB upflow anaerobic sludge blanket, lietepatjareaktori

HRT hydraulic retention time, hydraulinen viipymä

OLR organic loading rate, orgaaninen kuormitus

CHP combined heat and power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto

CH₄ metaani

TS total solids, kuiva-aine

ww wet weight, märkäpaino

VS volatile solids, hehkutushäviö, orgaaninen kuiva-aine

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
YKSIKÖT JA LYHENTEET	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 TUTKIMUKSEN TAUSTA	7
2.1 Anaerobisen hajoamisen perusteet.....	7
2.2 Prosessiparametrit ja -olosuhteet	9
2.3 Energian tuotanto energiakasveista.....	11
2.4 Biokaasun tuotanto energiakasveista	12
2.4.1 Kasvintuotannon vaiheet.....	14
2.4.2 Peltobiomassan varastointi ja esikäsittely.....	15
2.4.3 Reaktoritekniikka	16
2.4.4 Prosessijäännöksen varastointi ja käyttö.....	19
2.5 Biokaasun käyttö.....	19
2.6 Energiatase tuotettaessa kasveista biokaasua.....	20
3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT	22
3.1 Tuotantoketju ja mallin rajat	22
3.2 Mallin lähtötiedot.....	23
3.2.1 Viljelyn lähtötiedot	23
3.2.2 Biokaasuprosessin lähtötiedot.....	26
4 TULOKSET	27
4.1 Biokaasun tuotantoketjun kokonaisenergiatase	27
4.2 Kasvin viljelyn ja korjuun energiankulutus	29
4.3 Kasvimassan kuljetuksen ja varastoinnin energiankulutus.....	32
4.4 Biokaasuprosessin energiankulutus	32
4.4.1 Lämpöenergian kulutus.....	32
4.4.2 Sähköenergian kulutus	34
4.5 Biokaasun jalostuksen energiankulutus	34
4.6 Energiatase käytettäessä biokaasua prosessienergiana	34
4.7 Herkkyystarkastelu	36
4.7.1 Kasvinviljely	36
4.7.2 Biokaasuprosessi.....	37
5 TULOSTEN TARKASTELU	38
5.1 Energiakasveista tuotetun biokaasun tuotannon kokonaisenergiatase.....	38
5.2 Energiakasvien tuotannon ja kuljetusten energiankulutus.....	39
5.3 Biokaasuprosessin energiankulutus	41
5.5 Energiakasveista tuotetun biokaasun potentiaali Suomessa	44
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	45
KIRJALLISUUSLUETTELO	46

1 JOHDANTO

Kiinnostus uusiutuvan energian tuotannon lisäämiseen on kasvanut. Tärkeimpinä tavoitteina on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja riippuvuutta tuontipolttoaineista. Biokaasu on monipuolinen energiamuoto, jota voidaan tuottaa monenlaisista uusiutuvista raaka-aineista. Biokaasusta voidaan tuottaa lämpöä ja sähköä tai biokaasu voidaan jalostaa polttoaineeksi autoihin ja työkoneisiin. Biokaasusta erotettu hiilidioksidi voidaan käyttää esimerkiksi kasvihuoneviljelyssä. Perinteisesti biokaasuteknologiaa on sovellettu jätteenkäsittelyssä puhdistamolietteiden sekä yhdyskuntien ja teollisuuden biojätteiden käsittelyssä, mutta käyttämällä viljeltyjä energiakasveja voidaan biokaasun tuotantopotentiaalia merkittävästi lisätä (Asplund ym. 2005, Lehtomäki 2006).

On esitetty, että EU-25 maiden alueella voitaisiin biokaasuteknologiaa käyttäen tyydyttää 96 % (3722 TWh) vuoden 2005 liikenteen polttoaineentarpeesta, mikäli energiakasvien viljely integroitaisiin viljelykiertoon. Viljelyn oletettiin kattavan myös ravinnontuotannon tarpeet ja tapahtuvan kestävien viljelykiertojen mukaisesti (Amon ym. 2006). Mikäli Suomessa maa- ja metsätalousministeriön arvioima peltoenergiakasvien maksimimäärä, 500 000 ha, käytetään biokaasun tuotantoon, on mahdollista saada energiaa 14,0–26,5 TWh vuodessa (Lehtomäki 2006, Vainio-Mattila ym. 2005). Vuoteen 2015 Suomessa teknis-taloudellinen biokaasupotentiaali jätteistä on 4,6 - 15,9 TWh vuodessa (Asplund ym. 2005).

Saksassa, joka on yksi Euroopan johtavia maita biokaasuteknologian käytössä, maatalouden biokaasulaitoksia oli vuonna 2005 noin 2700, ja niiden yhteenlaskettu sähköteho oli 650 MW ja tuotettu energiamäärä 3,2 TWh. Vuoteen 2020 mennessä sähkön tuotantokapasiteetin on arvioitu voitavan nostaa 9500 MW:iin (FvB 2006). Suurin osa laitoksista käyttää lannan lisäksi energiakasveja. Saksassa biokaasulaitosten määrää selittää laitoksen rakentamiseen myönnettävät matalakorkoiset lainat sekä ympäristöystävällisestä sähköstä maksettava syöttötariffi.

Kaikessa energiantuotannossa on tärkeää, että energian tuotanto tapahtuu mahdollisimman tehokkaasti sekä taloudellisesta että ympäristönäkökulmasta. Viljelykasveista energiaa tuotettaessa on tärkeää, että koko tuotantoketjun (kasvin tuotanto, korjuu, kuljetus, varastointi, esikäsittely ja konvertointiprosessi) energiatase on korkea. Tuotantoon

kuluvien panosten ollessa mahdollisimman pienet suhteessa tuotettuun energiaan saavutetaan eniten haluttua vähennystä kasvihuonekaasupäästöissä ja riippuvuudessa tuontipolttoaineista.

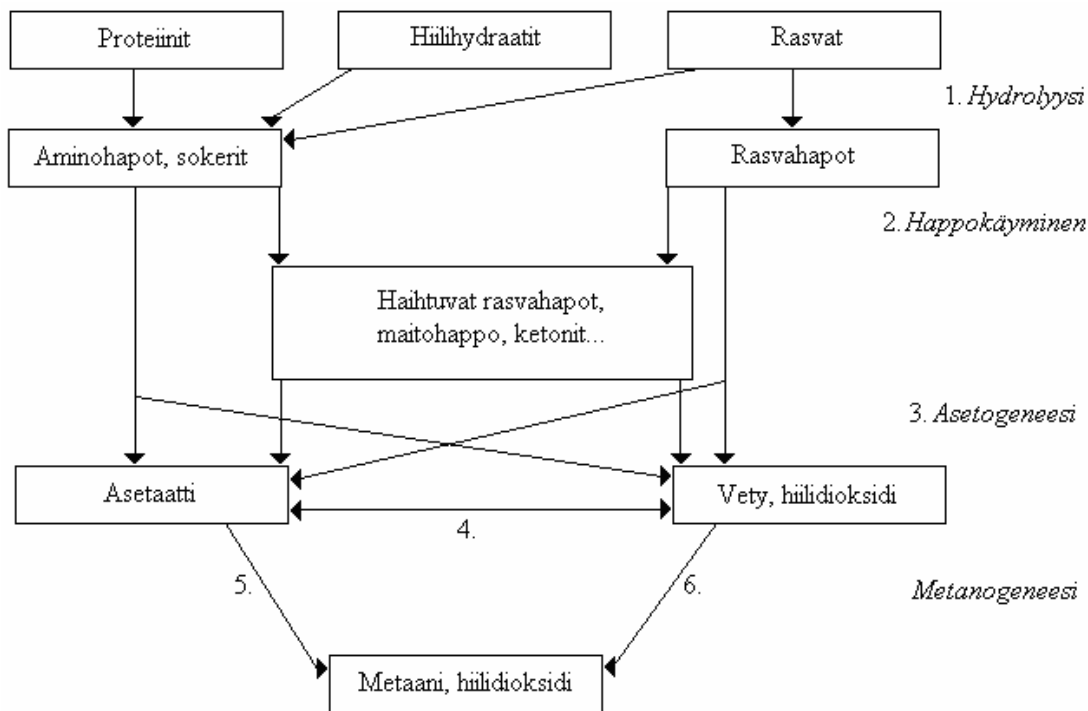
Myös biokaasun tuotantoprosessin tehokkuutta tulee arvioida taloudellisen kannattavuuden sekä energia- ja kasvihuonekaasutaseen näkökulmista, erityisesti koska biokaasun tuotanto on muuttumassa enenevässä määrin jätteenkäsittelystä energiantuotantoon painottuvaksi. Maatalouden biokaasuteknologia on ulkomaisissa elinkaarianalyysissä havaittu sekä kasvihuone- että energiataseeltaan tehokkaaksi käytettäessä energia-kasveja (Fredrikson ym. 2006, Quirin ym. 2004).

Tämän työn tavoite oli määrittää koko tuotantoketjun energiatase tuotettaessa energiakasveista biokaasua Suomen olosuhteissa. Työssä tutkittiin tuotantoketjuja eri kasvilajeilla ja erilaisilla prosessin rajauksilla ja lähtöoletuksilla.

2 TUTKIMUKSEN TAUSTA

2.1 Anaerobisen hajoamisen perusteet

Biokaasun tuotanto kasvimassasta perustuu biologiseen anaerobiseen hajotusprosessiin (kuva 1). Anaerobisella hajoamisella tarkoitetaan orgaanisen aineen hajoamista hapettomissa olosuhteissa, jolloin hajoamisketjun lopputuotteina ovat metaani, hiilidioksidi sekä hajoamatta jäänyt osuus aineesta. Luonnossa anaerobista hajoamista tapahtuu mm. soissa ja vesistöjen pohjasedimenteissä. Viljelykasvien biomassan kuiva-ainepitoisuus on yleensä 10 – 30 % (Lehtomäki 2006). Suurin osa kuiva-aineesta on hiilihydraatteina lignoselluloosassa. Kuiva-aineesta on keskimäärin 35-60 % selluloosaa, 10-30 % hemiselluloosaa ja 4-18 % ligniiniä. Kasvimassan tuhkapitoisuus on 5-20 % (Moo-Young ym. 1978). Hemiselluloosa on nopeinten hajoavaa, se hajoaa muutamassa päivässä ja selluloosan hajoaminen vie useita viikkoja. Ligniini ei merkittävästi hajoa anaerobisissa olosuhteissa, ja lisäksi se saattaa suojata selluloosaa hajoamiselta kiderakenteensa vuoksi (Coldberg 1988, Steffen ym. 1998). Hydrolyysi onkin usein rajoittava tekijä tuotettaessa kasvimassasta metaania (Mata-Alvarez ym. 2000).



Kuva 1. Orgaanisen aineen anaerobiset hajoamisreitit (Gujer & Zehnder 1983).

Anaerobisen hajoamisen vaiheet ovat (Pohland 1992):

1. Hydrolyyttisten bakteerien pinnalla olevat entsyymit hajottavat kiinteät ja liukoiset polymeerit liukoiksi monomeereiksi.
2. Fermentatiivisten bakteerien solukalvon läpäisevät liukoiset monomeerit hajoavat sisällä vedyksi, hiilidioksidiksi, formiaatiksi, haihtuviksi rasvahapoiksi ja vähäisessä määrin muiksi orgaanisiksi aineiksi, kuten etanoliksi, ketoneiksi tai maitohapoksi.
3. Asetogeeniset bakteerit hajottavat syntyneet pelkistyneet yhdisteet vedyksi, hiilihapoksi ja asetaatiksi.
4. Homoasetogeeniset bakteerit hajottavat osan bikarbonaatista vedyksi ja asetaatiksi, bikarbonaatista kilpailevat myös hydrogenofiiliset metanogeenit.
5. Asetoklastiset metanogeenit muuttavat asetaattia hiilidioksidiksi ja metaaniksi.
6. Hydrogenofiiliset metanogeenit muuttavat vetyä ja bikarbonaattia metaaniksi.

Lisäksi sulfaatin- ja nitraatinpelkistäjäbakteerit hapettavat pelkistyneitä yhdisteitä asetaatiksi ja hiilidioksidiksi sulfaattien ja nitraattien ollessa läsnä. Sulfaatin- ja nitraatinpelkistäjäbakteerit hapettavat myös asetaattia ja vetyä.

2.2 Prosessiparametrit ja -olosuhteet

Biokaasuprosessin prosessiparametreina käytetään yleensä hydraulista viipymää (HRT, d), orgaanista kuormitusta (OLR, kgVS m⁻³ d⁻¹) sekä metaanintuottoa lisättyä orgaanisen aineen määrää (m³ CH₄ kg⁻¹ VS_{lisättyä}) ja / tai reaktoritilavuutta (m³ CH₄ m⁻³ reaktori) kohti. Näiden parametrien perusteella voidaan verrata eri prosesseja ja ne kertovat myös energi-
antuotannon tehokkuudesta.

HRT on aika, jonka reaktoriin lisätty materiaali keskimäärin viipyy reaktorissa. Viipymä lasketaan kaavalla 1, jossa V on reaktorin tehollinen tilavuus ja Q päivittäin lisättävä syöte. Vaatimus viipymän pituudelle riippuu käsiteltävästä substraatista, esimerkiksi hitaasti hajoava lignoselluloosa vaatii pitkän viipymän, jotta saavutetaan hyvä kaasuntuotto (Garcia-Heras 2003). Saksassa energiakasvien ja lannan yhteiskäsittelylaitoksissa viipymä on keskimäärin 55 d yksivaiheisissa ja 110 d kaksivaiheisissa prosesseissa (LAB 2005).

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

OLR on reaktoritilavuutta kohti päivässä lisätyn orgaanisen aineen massa, ja se lasketaan kaavalla 2, jossa S₀ on substraatin orgaanisen aineen pitoisuus (Garcia-Heras 2003). Orgaanisen aineen pitoisuus ilmoitetaan VS:nä kiinteille substraateille, kuten kasveille ja kemiallisena hapenkulutuksena (COD) nestemäisille substraateille. Kasveja käytävissä laitoksissa kuormitus on yleensä pienempi kuin teollisuuden ja yhdyskuntien jätteitä käsittelevissä laitoksissa: Saksalaisilla energiakasveja käyttävillä yhteiskäsittelylaitoksilla 74 %:lla kuormitus on 1-3 kgVS m⁻³ d⁻¹.

$$OLR = \frac{Q * S_0}{V} = \frac{S_0}{HRT} \quad (2)$$

Metaanintuotto ilmaistaan yleensä lisättyä orgaanista ainetta (kaava 3) tai reaktorin tehollista tilavuutta (kaava 4) kohti. Kaavoissa V_{CH₄} on kaasuntuotto vuorokaudessa. Saksalaisilla energiakasveja käyttävillä yhteiskäsittelylaitoksilla tilavuudellinen metaanintuotto on useimmiten välillä 0,50–0,75 m³ CH₄ m⁻³ reaktori (FAL 2005).

$$\text{Ominaismetaanintuotto} = \frac{V_{CH_4}}{S_{0\text{lisättyä}}} \quad (3)$$

$$\text{Tilavuudellinen metaanintuotto} = \frac{V_{CH_4}}{V} \quad (4)$$

Anaerobisen hajoamisen eri vaiheissa toimivilla bakteereilla on erilaiset pH- ja lämpötilaoptimit. Metanogeenien lämpötila- ja pH-optimeja pidetään tarkimpina (Mata-Alvarez 2003). Yleensä anaerobisen prosessin aktiivisuus ja metaanintuottonopeus kasvavat lämpötilan noustessa, mutta lämpötiloissa on kaksi optimia: Mesofiilinen n. 35 °C ja termofiilinen n. 55 °C (Mata-Alvarez 2003). Termofiilisessä prosessissa saadaan suurempia metaanintuottoja ja kuormituksia kuin mesofiilisessä prosessissa, mutta saavutettu lisäenergia voi kuluu laitoksen suurempaan lämpöenergian kulutukseen (Mata-Alvarez 2003). Termofiilisen prosessin haittapuolena herkkyys inhibitiolle (Mata-Alvarez 2003). Saksan energiakasveja käyttävistä laitoksista 95 % on mesofiilisiä ja 5 % termofiilisiä (LAB 2005). Keski-Euroopassa tärkeilyspitoisia substraatteja, kuten energiakasveja, käyttävissä mesofiilisisä laitoksissa on havaittu reaktorien lämpötilojen nousevan ilman ulkoista lämmitystä, sillä bakteerien metaboliaalämpö voi olla suurempaa kuin lämmönhukat. Tarkkaa tietoa metaboliaalämmön määrästä ei kuitenkaan ole (Lindorfer ym. 2005, Weiland 2005).

Metanogeenien optimi-pH on yleensä 6,5 – 7,5, mutta eri metanogeenikannoilla saattaa olla hyvinkin erilainen optimi-pH (Taconi 2004). Anaerobisessa hajoamisessa muodostuvat ammoniakkin ja hiilidioksidin liuenneet yhdisteet puskuroivat prosessia neutraalille tasolle.

Hajoamisessa muodostuvat haihtuvat rasvahapot ja ammoniumtyppi voivat inhiboida anaerobista hajoamista. Inhibitiolle erityisen herkkinä pidetään metanogeenijä. Inhibutio ei ole pelkästään riippuvainen haitta-aineen pitoisuudesta, vaan myös lämpötilasta ja pH:sta, jotka vaikuttavat haitta-aineen kemialliseen tasapainoon (Mata-Alvarez 2003).

2.3 Energian tuotanto energiakasveista

Energiakasveilla tarkoitetaan kasveja, joita viljellään ensisijaisesti energiantuotantotarkoitukseen. Biomassan auringon säteilystä sitoma energia voidaan käyttää suoraan polttamalla tai termisesti kaasuttamalla, tai energia voidaan jalostaa biologisesti biokaasuksi, vedyksi tai etanoliksi, tai kemiallisesti kuten biodieselin tuotannossa, jolloin energia on monipuolisemmin käytettävissä. Eri energiakasvilajien ja konversiotapojen tuotospanossuhteet voivat vaihdella välillä 2,2 – 15,7 ja hehtaariohittaiset energiasaannot välillä 9,5 – 28,8 MWh ha⁻¹ a⁻¹ (Salter 2005). Energiakasvien viljelyalat ovat kasvussa monissa maissa ja suunnitelmat energiantuotantoon käytettävistä peltopinta-aloista vaihtelevat (taulukko 1).

Taulukko 1. Eri maissa esitettyjä potentiaalisia pinta-aloja energiakasvien tuotantoon; hehtaariumäärä ja osuus nykyisestä kokonaisviljelyalasta.

	Pinta-ala, ha	Osuus kokonaisviljelyalasta, %	Lähde
Suomi	200 000 – 500 000	9-23	Vainio-Mattila ym. 2005
Ruotsi	650 000	21	Swedish Environmental Protection Agency 1998
Tanska	300 000	11	EECI 1999
Iso-Britannia	750 000	5	BABFO 2005
Itävalta	150 000	4	Luger 1999
Yhdysvallat	17 000 000	9	Oak Ridge National Laboratory 2006

Suomessa on peltopinta-alaa noin 2,2 miljoonaa hehtaaria. Maa- ja metsätalousministeriön arvion mukaan vuonna 2012 tästä peltoenergian tuottoon käytetään 200 000 ha ja tarvittaessa käyttöön voidaan ottaa 500 000 ha (Vainio-Mattila ym. 2005). Maatalouden ylituotannon johdosta EU:n alueella kesantoalan määrä on lisääntynyt, ja tämä ylimääräinen viljelyala voidaan hyödyntää energiakasvien viljelyyn (Weiland 2003). Pitämällä kesantoalat kasvipeitteisinä, voidaan vähentää maan eroosiota (Hartikainen 1992).

Energiakasveja ja niistä jalostettuja polttoaineita käyttämällä voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Toisaalta kasvihuonekaasupäästöt ei välttämättä tuotantoprosessista riippuen alene verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin (Mäkinen ym. 2006). Esimer-

kiksi korvaamalla henkilöautoissa bensiini E85-polttoaineella (85 % etanolia, 15 % bensiiniä), voidaan yhdysvaltalaisen olosuhteiden perusteella suoritetun koko ketjun elinkaarianalyysin mukaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 41 -61 % (Seungdo & Bruce 2005). Ruotsalaisen elinkaarianalyysin mukaan nurmikasveista tuotetun biokaasun tuotantoketjun ja käytön hiilidioksidipäästöt ovat 18 – 32 t_{CO2} TJ⁻¹, kun Suomessa maakaasun ominaishiilidioksidipäästö on 55 t_{CO2} TJ⁻¹ (Börjesson & Berglund 2006, Tilastokeskus 2005a). Biokaasun koko elinkaaren hiilidioksidipäästöt ovat siten 32 – 42 % maakaasun hiilidioksidipäästöistä.

Energiakasvien viljely voi vähentää lisäksi viljelymaan kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna perinteisiin viljelykasveihin (Börjesson 1999). Energiakasvien viljely voi vähentää paikallisia haitallisia ympäristövaikutuksia, kuten huuhtoumia ja lisätä maan viljavuutta sekä viljely-ympäristön biodiversiteettiä (Börjesson 1999).

2.4 Biokaasun tuotanto energiakasveista

Biokaasuprosessissa voidaan käyttää useita perinteisiä viljelykasveja, kuten nurmikasveja, maissirehua, vihantaviljoja ja viljan jyviä (Weiland ym. 2003). Tärkeimpiä kriteerejä valittaessa kasvilajia biokaasun tuotantoon ovat suuri biomassan tuotto, kasvimassan hyvä soveltuvuus metaanin tuottoon, kasvin helppo käsittely ja vaatimattomuus sääolojen ja maan laadun suhteen, sekä viljelyn tarvitsemat mahdollisimman pienet panokset (Lehtomäki 2006). Saksan biokaasulaitoksissa käytetään yleisesti maissi-, nurmi- ja vihantaruis-säilörehua (Fischer 2007).

Viljelemällä biokaasuprosessia varten typensitojakasveja, kuten apiloita, virnoja tai lupiineja, voidaan niiden ilmakehästä sitoma typpi hyödyntää lannoituksessa. Biokaasuprosessiin soveltuvat myös kasvit, jotka usein ajatellaan rikkakasveiksi, kuten jättitatar. Kiinnostusta rikkakasveiksi luokiteltuihin kasveihin lisää niiden tehokas fotosynteesi, hyvä kilpailukyky ja toistuvan korjuun kestäminen. Kasvilajeja on myös mahdollista jalostaa biokaasun tuotantoon paremmin sopiviksi, kuten nopeammin ja enemmän biomassaa tuottaviksi ja helpommin prosessoitaviksi (Friedt 2005).

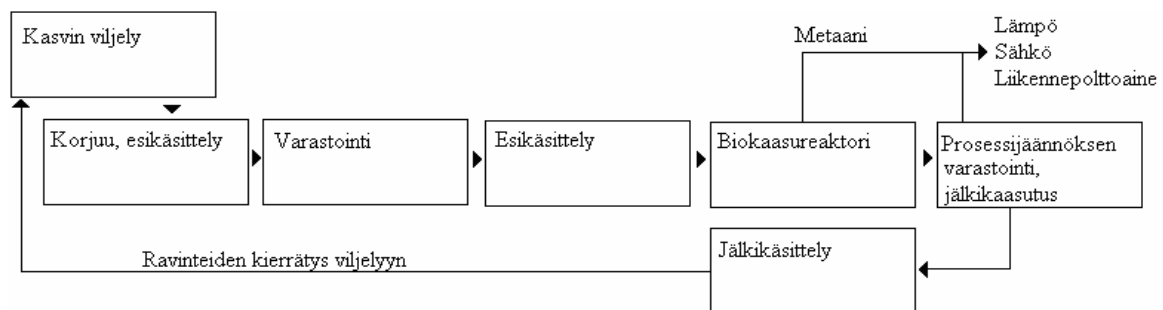
Eri kasvien metaanintuottopotentiaaliin ja biokaasuprosessiin soveltuvuuteen vaikuttaa kemiallinen koostumus, joka on eri kasvilajeilla erilainen ja muuttuu kasvin vanhe-

nessa (taulukko 2.). Sadon korjuuajankohta vaikuttaa kasvin metaanintuottopotentiaaliin (Lehtomäki ym. 2006).

Taulukko 2. Eri kasvilajien metaanintuottopotentiaaleja (Lehtomäki ym. 2006).

Kasvilaji	Kokonaismetaanintuotto, $\text{m}^3 \text{CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ VS}_{\text{lisättyä}}$	Kokonaismetaanintuotto, $\text{m}^3 \text{CH}_4 \text{ t}^{-1} \text{ ww}$	Bruttoenergian- tuotto $\text{MWh ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Timotei-apilaseos	0,37 – 0,38	85 – 72	28 – 38
Ruokohelpi,	0,34 – 0,43	97 – 167	37 – 41
Kaura-virnaseos	0,40 – 0,41	57 – 95	18 – 25
Jättitatar	0,17 – 0,27	32 – 76	36
Maa-artisanokka	0,36 – 0,37	93 – 110	30 – 53
Nokkonen	0,21 – 0,42	25 – 60	21 – 35

Biokaasuprosessilla peltokasveista (timotei-apilanurmi, ruokohelpi, maa-artisanokka, jättitatar) voidaan saada bruttoenergiaa Suomen oloissa arviolta 30–50 $\text{MWh ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Lehtomäki ym. 2006), poltettavalla ruokohelvellä saanto on 27–36 $\text{MWh ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Vapo 2006). Energian saanto Maa- ja metsätalousministeriön arvioimalta 500 000 hehtaarilta olisi 14–26 TWh a^{-1} . Maankäytöllisesti tarkasteltuna on tärkeää, että voidaan tuottaa mahdollisimman suuri energiamäärä mahdollisimman pienellä pinta-alalla.



Kuva 2. Energian tuotantoketju peltobiomassasta biokaasuprosessilla (Weiland 2003, Lehtomäki 2006).

Biokaasun tuotantoketju (kuva 2.) energiakasveista voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Tuotantoketjussa energiapanoksia tarvitaan lannoitteina ja torjunta-aineina sekä työkonien polttoaineena, lisäksi biokaasureaktori tarvitsee toimintaansa sähköä ja lämpöä. Energianlähteenä moniin kohteisiin voidaan käyttää biokaasua, ja kasvimassan ravinteet voidaan kierrättää takaisin viljelyyn lannoitteeksi. Prosessista saatavaa metaania

voidaan käyttää traktorin polttoaineena ja prosessin lämmön- ja sähköntarve voidaan kat-
taa CHP-tuotannolla biokaasusta. Ulkopuolista energiaa tarvitaan vähimmillään pellolta
huuhtoutuneiden ravinteiden korvaamiseen väkilannoitteilla, torjunta- ja säilöntäaineiden
valmistukseen sekä laitteiden ja rakennusten valmistamiseen.

2.4.1 Kasvintuotannon vaiheet

Biokaasun tuotannon kannalta on tärkeää, että viljeltävästä kasvista saadaan suuri hehtaa-
risato (Lehtomäki 2006). Perinteisistä viljelykasveista eniten biomassaa tuottavat moni-
vuotiset nurmikasvit, parhaimmillaan $10 \text{ t TS ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Hyytiäinen ym. 1995). Biomassan
tuotoltaan yksivuotiset rehukasvit ovat lähellä monivuotisia, mutta niitä käytetään lähinnä
silloin, kun monivuotisten kasvien talvehtiminen on epäonnistunut. Niitä voidaan käyttää
myös välikasveina nurmikierrossa tai perustettavien monivuotisten nurmien suojakasvei-
na. Koska nurmikasveja käytetään rehuna karjataloudessa, niiden viljelyyn on olemassa
koneet ja viljely- ja varastointitavat.

Nurmikasvien viljelyssä nurmen perustaminen on tärkeä vaihe, sillä se vaikuttaa
usean vuoden satoon. Nurmi perustetaan useimmiten keväisin suojaviljaan. Suojaviljan
käyttö estää maan kuorettumista ja rikkakasvien kasvua. Suojaviljasta saadaan myös sato
nurmen perustamisvuonna, ja se voidaan korjata tuleentuneena tai vihantaviljana. Nur-
men talvehtimista haittaavat talvituhosienet, vesi, pakkasen ja väärä viljelytekniikka.
Huolellinen perustaminen ja oikeat niittoajat parantavat nurmen talvenkestävyyttä (Hyy-
tiäinen ym. 1995).

Nurmisiemenet ovat pieniä, joten pelto tulee muokata mahdollisimman tasaiseksi.
Nurmea perustettaessa maa lannoitetaan, kynnetään eli perusmuokataan ja äestetään.
Äestyksen tarkoituksena on saada pellon pintaan hienojakoinen kerros, joka hidastaa ve-
den haihtumista. Äestyksen jälkeen maa kylvömuokataan kahdesti, jotta pinnasta saadaan
tarpeeksi hienojakoinen. Muokattuun maahan kylvetään suojavilja ja maa kylvö-
lannoitetaan samassa yhteydessä. Seuraavaksi pelto jyrätään, nurmen siemen kylvetään ja
maa jyrätään uudestaan.

Säilörehuksi korjattavan vihantaviljan perustaminen tapahtuu samaan tapaan kuin nurmen, mutta jyräystä ja nurmisiemenen kylvöä ei tehdä. Koska vihantavilja on yksi-vuotinen, maa on muokattava vuosittain.

Pellot kalkitaan yleensä neljän tai viiden vuoden välein. Maa kalkitaan maaperän pH-arvon ylläpitämiseksi, sillä happamassa maaperässä kasvien ravinteidenotto kyky heikkenee. Rehukasveja viljeltäessä torjunta-aineiden tarve on satovuosina vähäinen (Hyytiäinen ym. 1995). Käytettäessä kasveja biokaasun tuotantoon rikkakasveista ei ole yhtä suurta haittaa kuin karjataloudessa. Biokaasun tuotannossa rikkakasvit voivat pienentää satotasoa tai kasvimassan ominaismetaanintuottoa.

Suomen oloissa nurmisatoa voidaan korjata kasvualueesta ja vuosittaisista sääoloista riippuen 1 - 3 kertaa kasvukaudessa. Nurmiviljelmä lannoitetaan mahdollisimman pian sadonkorjuun jälkeen. Nurmi niitetään, ja jätetään mahdollisesti esikuivumaan ennen korjuuta. Jos sato esikuivataan yli 30 % kuiva-ainepitoisuuteen, varastointiin voidaan käyttää pyöröpaaleja sillä silloin ei muodostu puristenestettä (Nousiainen 2007). Suomessa kolmasosa säilörehusta säilötään tuorerehuna, tällöin sato voidaan säilöä aumoihin ja siiloihin. Tuorerehuna korjaaminen vähentää biomassan lämpenemisen riskiä ja korjuun alttiutta sateelle.

Kasvimassa voidaan korjata joko kela- tai tarkkuussilppurilla. Kelasilppurissa silppun pituus vaihtelee paljon, koska sen varstat eivät leikkaa, toisin kuin tarkkuussilppurin, joka silppuaa kasvin 3 - 4 cm pituiseksi (Hyytiäinen 1995). Tarkkuussilppurilla silputtu kasvimassa tiivistyy paremmin ja tarvittavien rehukuormien määrä on noin puolet verrattuna kelasilppuriin (Hyytiäinen ym. 1995). Lisäksi tarkkuussilputtu kasvimassa on helpompi syöttää reaktoriin eikä se aiheuta tukkeumia kuljettimissa kuten partikkelikooltaan suurempi aines (Fischer 2007).

2.4.2 Peltobiomassan varastointi ja esikäsitteleminen

Jotta energian tuotanto kasveista olisi mahdollista koko vuoden, kasveja on pystyttävä varastoimaan. Biokaasun tuottoa varten kasvimassan varastointiin suositetaan säilörehu- menetelmiä. Säilörehussa metaanin tuotantopotentiaali säilyy parhaimmillaan useita kuukau-

sia laskematta merkittävästi (Lehtomäki 2006). Kasvien kuivauksessa voidaan menettää orgaanista ainetta ja kasvien kuivaaminen on altis epäsuotuisalle säälle (Egg ym. 1993).

Säilörehua valmistettaessa kasvimateriaalin liukoiset hiilihydraatit hajoavat maitohappokäymisessä ja pH laskee, jolloin haitallisten hajottajaeliöiden kasvu estyy. Maitohappokäymistä voidaan säädellä lisäämällä kasveihin varastoimisen yhteydessä happoja, bakteeriympästä tai hiilihydraatteja vapauttavia entsyymejä. Optimaalisissa olosuhteissa säilörehun orgaanisesta aineesta (VS) menetetään varastoinnissa alle 2 % (Zubr 1986). Metaanintuottopotentiaalia voidaan parhaimmillaan lisätä säilörehumenetelmillä, sillä varastoinnin aikana kasvien hajotessa saattaa syntyä biokaasuprosessissa helpommin hajoavia yhdisteitä. (Lehtomäki 2006). Varastointia voidaankin pitää esikäsittelynä tai prosessin vaiheena metaanintuottoa optimoitaessa.

Koska hydrolyysi on rajoittava tekijä lignoselluloosan hajoamisessa, metaanisaantoja voidaan parantaa erilaisilla erillisillä esikäsittelyillä, joilla nopeutetaan aineen liukoistumista. Esikäsittelyt metaanintuoton kasvattamiseksi voidaan jakaa fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin (Delgenes ym. 2003). Fysikaalisista menetelmistä tärkein on partikkelikoon pienennys, jolloin hydrolyyttisille bakteereille käytettävissä oleva pinta-ala kasvaa (Delgenes ym. 2003). Lisäksi pienempi partikkelikoko helpottaa kasvimassan käsittelyä, sillä pitkät kasvukuidut kiertyvät pyöriviin osiin kuljettimissa ja sekoittimissa.

Kemiallisia käsittelyitä ovat käsittelyt hapoilla ja emäksillä, jolloin ligniinin kemialliset siteet katkeavat. Biologisia käsittelyjä ovat erilaiset mikrobi- ja entsyymikäsittelyt, joiden tavoitteena on hajottaa ligniiniä. Erityisesti biologisissa käsittelyissä voidaan menettää orgaanista ainetta, mikä vähentää metaanintuottoa. Tutkimuksissa on saatu eriäviä tuloksia esikäsittelyjen vaikutuksesta metaanintuottoon, mutta yleisesti ainakin partikkelikoon pienennys tiettyyn rajaan asti parantaa metaanintuottoa (Delgenes ym. 2003).

2.4.3 Reaktoritekniikka

Energiakasveista voidaan tuottaa biokaasua joko yksin tai yhteiskäsittelyssä jonkin muun substraatin, kuten lannan kanssa. Prosessit jaotellaan lisäksi substraatin kuiva-ainepitoisuuden mukaan kuiva- tai märkäprosesseiksi, tosin selkeää rajaa prosessityypit

erottavalle kuiva-ainepitoisuudelle ei ole. Luokittelua vaikeuttaa substraatin kuiva-ainepitoisuuden lasku prosessissa orgaanisen aineksen hajotessa prosessissa biokaasuksi.

Saksassa energiakasveja käyttävissä laitoksissa käsitellään useimmiten kasvien lisäksi lantaa jatkuvatoimisissa täyssekoitteisissa (CSTR) märkäprosesseissa (FAL 2005). Sekoituksen tavoite on levittää syöte kaikkialle reaktoriin ja estää lämpö- tai kiintoainekerrosten muodostumista. Sekoitus myös edesauttaa substraatin ja bakteerien yhteen saattamista (Hobson & Wheatley 1993). Sekoitusenergiaa käytetään täyssekoitusreaktorissa yleensä $4,9\text{--}7,9 \text{ W m}^{-3}_{\text{reaktori}}$ (Tchobanoglous & Burton 1991). Biokaasua voidaan tuottaa kasveista erityyppisillä reaktoriteknikoilla (kuva 3) (Vandevivere ym 2003).

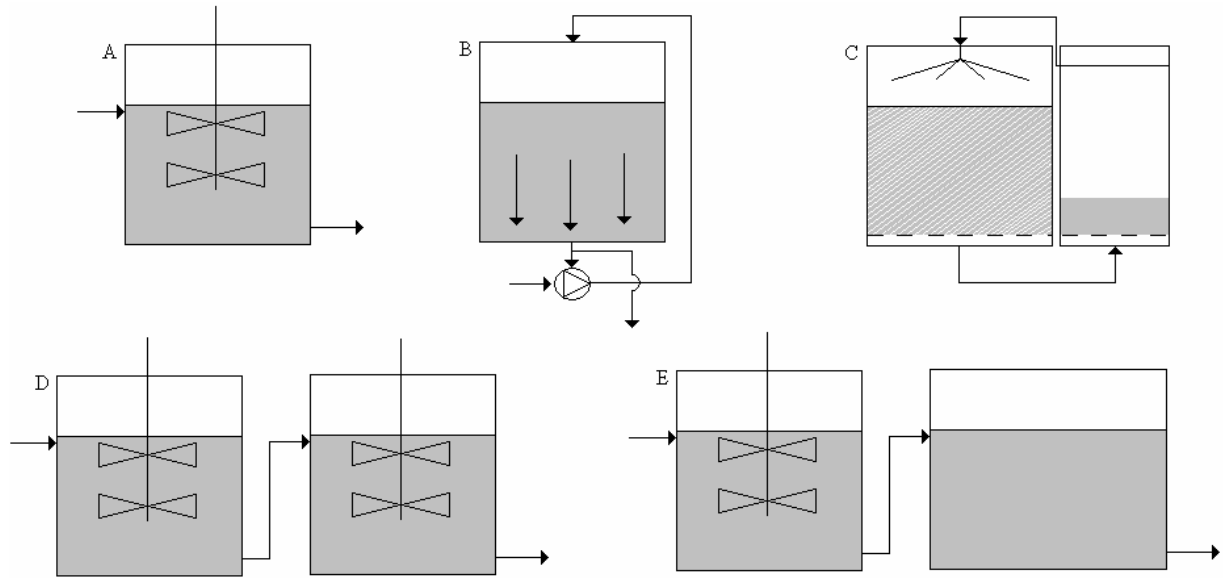
Maatalouden biokaasuprosesseissa on usein 2-3 vaihetta. Kaasuntuotoissa ei kuitenkaan ole havaittavaa eroa yksi- ja monivaiheisten prosessien välillä (FAL 2005). Vaikka useampi reaktori lisää investointikustannuksia, prosessista saadaan vakaampi, sillä useampi vaihe tasaa huippukuormia, ja eri reaktoreissa on sopivammat olosuhteet vaatimuksiltaan erilaisille mikrobeille (Vandevivere ym. 2003). Lisäksi useampaa vaihetta käytettäessä vältytään oikovirtaukselta (Hartmann ym 2003).

Biokaasuprosessissa voi olla myös katettu jälkikaasutusallas, johon käsitelty materiaali varastoidaan. Jälkikaasuuntumisallas voi olla ilman sekoitusta ja lämmitystä. Jälkikaasutusallasta käytettäessä saadaan käsitellyn materiaalin tuottama jäännösmetaanitilteen ja estetään kasvihuonekaasupäästöjä (Kaparaju 2003, Weiland 2003).

Kasvimassan käsittelyä märkäprosessissa haittaa materiaalin taipumus muodostaa kiinteitä kerroksia, jotka aiheuttavat tukkeumia ja rasiutusta mekaanisissa osissa ja putkissa (Weiland 2005). Märkäprosessia voidaan operoida myös kierrättämällä nestettä, jolloin reaktorista poistuvasta materiaalista erotetaan kiinteä- ja nestefraktio, ja osa nesteestä palautetaan reaktoriin. Tällöin massan kuiva-ainepitoisuus pysyy alempana, ja käsiteltävyys paranee. Nesteen kierrätyksen on todettu lisäävän metaanintuottoa kokeessa, jossa käytettiin substraattina nurmikasveja (Jarvis 1996). Nestettä kierrätettäessä substraatin on kuitenkin oltava typpipitoisuudeltaan riittävän alhainen, ettei typpeä kerry prosessia inhiboivalle tasolle (Norberg & Edström 1997).

Kasveista voidaan tuottaa biokaasua myös leach bed –reaktorilla, jolloin substraattia huuhdotaan kierrätettävällä nesteellä. Laboratoriotutkimuksessa suurimpiin kaasuntuottoihin tällä tekniikalla on päästy käyttämällä kaksivaiheista reaktoria, jossa leach

bed –panoksista kierrätetystä nesteestä tuotettiin metaania UASB -reaktorissa tai metanogeenisessa suotimessa (Lehtomäki 2006).



Kuva 3. A. Yksivaiheinen märkä CSTR- prosessi, B. Yksivaiheinen kuivaprosessi, C. Leach bed – UASB –yhdistelmä, D. Kaksivaiheinen märkä CSTR-prosessi ja E. Yksivaiheinen märkä CSTR- prosessi jälkikaasuuntumisaltaalla.

Reaktorin lämpötila vaikuttaa energiantuotannon hyötysuhteeseen. Lämpöenergiaa kuluu reaktorilämpötilan ylläpitoon ja syötteen lämmitykseen prosessilämpötilaan. Lämpö pyrkii siirtymään reaktorista ympäristöön reaktorin kuoren läpi. Siirtymistä pyritään vähentämään eristämällä. Eristeaineena voidaan käyttää polyuretaania, joka voidaan asentaa reaktorin sisä- tai ulkopinnalle tai lasi- tai vuorivillaa, joka asennetaan ulkopinnalle (Hobson & Wheatley 1993). Suuri reaktorikoko pienentää lämmönkulutusta reaktoritilavuutta kohti, sillä reaktorin kuoren pinta-alan kasvaessa tilavuus kasvaa eksponentiaalisesti.

Syötteen lämmittämiseksi prosessilämpötilaan voidaan käyttää lämpöä, joka otetaan talteen käsitellystä materiaalista. Lämpö voidaan ottaa talteen lämmönjohtumiseen perustuvalla lämmönvaihtimella tai lämpöpumpulla. Lämmönvaihdin voi toimia siirtämällä lämpöenergiaa suoraan käsitellystä materiaalista syötteeseen, tai energiaa voidaan siirtää veteen sitoutuneena.

2.4.4 Prosessijäännöksen varastointi ja käyttö

Biokaasuprosessin jäännöstä voidaan käyttää lannoitteena. Prosessissa kasvimassan ravinteet säilyvät, osa typestä muuttuu liukoiseen muotoon ja osa hiilestä poistuu, jolloin kasvien saatavilla olevien typpi- ja fosforiravinteiden pitoisuudet nousevat. Lisäksi biokaasuprosessi vähentää rikkakasvien siementen ja kasveille haitallisten yhdisteiden määrää (Chynoweth ym. 2001, Hons ym. 1993).

Suomessa prosessijäännöksellä on oltava riittävät varastointitilat kattamaan talvi-kuukaudet, sillä lannoitteita saa levittää vain aikana, jolloin maa on sula ja lumipeitteetön (Valtioneuvosto 2000). Prosessijäännöksen varastointi voidaan yhdistää jälkikaasutukseen, sillä syötteestä ja prosessista riippuen 5-30 % metaanintuotosta voidaan saada varsinaisen reaktorin jälkeen (Kaparaju 2003, Weiland 2003). Kattamattomassa jälkivarastoinnissa metaani, voimakas kasvihuonekaasu, vapautuu ilmakehään ja lisäksi typestä 6-9 % voi haihtua ammoniumina. Kattaminen vähentää merkittävästi (96 %) myös typen haihtumista (Örtenblad 1999).

2.5 Biokaasun käyttö

Biokaasua voidaan käyttää lämmön tuottamiseen polttamalla sitä kaasupolttimessa tai yhdistettyyn lämmön- ja sähköntuotantoon polttomoottorissa tai –turbiinissa. Polttomoottori voi olla kaasumoottori, joka käyttää pelkää biokaasua polttoaineena tai dual-fuel –moottori, jossa sytytykseen käytetään dieselöljyä (Walsh ym. 1988). Vuonna 2004 saksalaisista maatalouden biokaasulaitoksista kaasumoottoria käytti 40 % ja dual-fuel moottoria 60 % (FAL 2005).

Biokaasua voidaan käyttää yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa polttokennoissa, jolloin sähköntuotannon hyötysuhde on 40 - 60 %. Polttokennokäyttöä varten kaasu on puhdistettava epäpuhtauksista. Teknologia on pilotointivaiheessa (Weiland ym. 2003).

Ajoneuvokäyttöä varten biokaasusta on rikastettava metaania eli poistettava hiili-dioksidia ja epäpuhtauksia. Kaasu on lisäksi paineistettava noin 200 barin paineeseen, jotta kaasun tilantarve pienenee. Tekniikoita kaasun puhdistukseen ovat mm. paine-

vesiabsorbtiio, Selexol-absorbtiio, jossa käytetään veden tilalla liuotinta ja paineenvaihteluabsorbtiio, jossa käytetään molekyyliseulaa. Painevesiabsorbtiio paineistuksineen kuluttaa energiaa 0,5 kWh, paineenvaihteluabsorbtiio n. 0,476 kWh ja Selexol-puhdistus 0,455 kWh tuotekaasukuutiota kohti (Nilsson 2001).

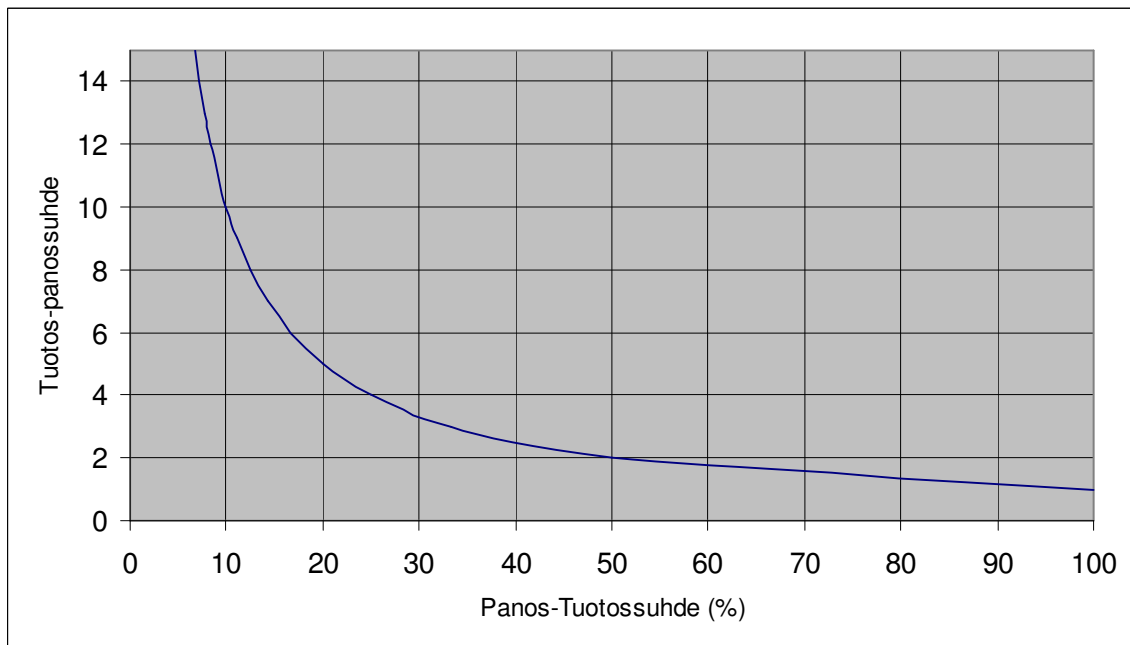
Metaania voidaan käyttää myös traktorin polttoaineena (Baky ym. 2002). Käyttämällä energiakasvien viljelyyn traktorin polttoaineena puhdistettua biokaasua, voidaan energiantuotannossa vähentää ulkopuolisen energian suoraa tarvetta.

2.6 Energiatase tuotettaessa kasveista biokaasua

Energiatase kertoo kuinka paljon energiaa kuluu koko tuotantoketjussa energian tuottamiseen. Energiatase tuotos-panossuhteena lasketaan kaavalla 5.

$$\text{Tuotos} - \text{panossuhde} = \frac{E_{\text{tuotos}}}{E_{\text{panos}}} \quad (5)$$

Energiatase voidaan ilmoittaa myös käänteisesti prosenttilukuna, jolloin ilmaistaan kuinka monta prosenttia tuotetusta energiasta kuluu tuotantoprosessissa. Riippuvuus energiataseen ilmaisutapojen välillä on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Tuotos-panossuhteen ja prosentuaalisen energiataseen suhde.

Biokaasuprosessin energiatase on riippuvainen prosessin toteutuksesta ja käytetyistä rajauksista. Peltobiomassasta biokaasua maatilamittakaavassa tuottaessa energiatase on eri rajauksin ja eri kasvilajein elinkaarianalyseissä ollut 3,7 (CROPGEN 2005a), 4,7 - 10,2 (CROPGEN 2005b), 2,17 - 3,85 (Berglund & Börjesson 2006) ja 4,4 (Holliday ym. 2005) tuotettua energiayksikköä kulutettua energiayksikköä kohti. Kaikissa tutkimuksissa suurin osa käytetystä energiasta kuluu reaktorin ja syötteen lämmitykseen, tuotetusta energiasta tähän kuluu 6,6–22 % (CROPGEN 2005a, Berglund & Börjesson 2006). Reaktorin lämpöeristys, lämmön talteenotto ja suuri laitoskoko parantavat energiatasetta. Vaihtelut tutkimusten energiataseissa johtuvat suurimmalta osalta erilaisista systeemin rajauksista ja oletetuista laitoskoista. Vaikutusta on myös eri alueiden vuotuisilla keskilämpötiloilla ja satotasoilla sekä laskelmissa käytetyillä metaanintuoton arvoilla. Näissä tutkimuksissa lämmitysenergian tarve on laskettu substraatin lämmittämisen reaktorilämpötilaan ja reaktorin lämmönhukan perusteella, eikä huomioon ole otettu kaikkia lämmönlähteitä.

Mikäli energiataseen laskemisessa otetaan huomioon lämpö, joka muodostuu reaktorin sekoittamisesta, biologisesta rikinpoistosta, syötteen mukana tulevasta hapestasta sekä mikrobien aineenvaihdunnasta, reaktorin lämpötase voi olla positiivinen, ja reaktoria joudutaan jäädyttämään, mikäli prosessi halutaan pitää mesofiilisenä. Reaktorin itselämpenemisilmiö on havaittu Keski-Euroopassa etenkin tärkkelyspitoisia substraatteja, kuten energiakasveja, käyttävissä laitoksissa (Lindorfer ym. 2005, Weiland 2005). Lämmönlähteiden määrää on kuitenkin vaikea arvioida energiatasemalleissa, sillä anaerobisen metabolian lämmöntuotto vaihtelee substraatista riippuen, eikä tarkkaa tietoa suuruusluokista ole.

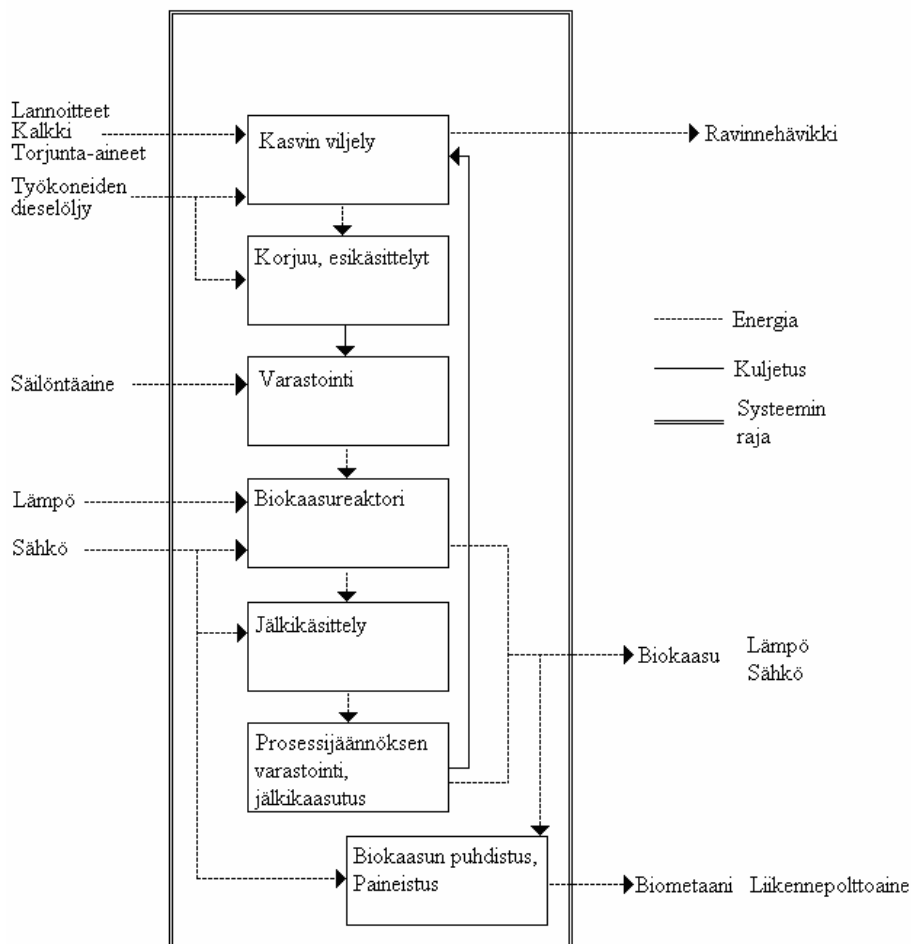
Energiatasearkasteluissa kasvien viljely käyttää 10–19,6 % tuotetusta energiasta (CROPGEN 2005b, CROPGEN 2005a). Biokaasulaitoksen rakentamisen osuus on 0,6-2 % laitoksen koko elinkaaren aikana kuluttamasta energiasta (Berglund & Börjesson 2003).

Liikenteen biopolttoaineen tuotantoa peltokasveista analysoitaessa biokaasutus on havaittu energiataseeltaan tehokkaaksi biodieseliin tai bioetanoliin verrattaessa, johtuen mm. biokaasuprosessiin soveltuvien kasvien korkeasta hehtaarisäännöstä ja koko kasvin hyödyntämisessä polttoaineen tuotannossa (Fredrikson ym. 2006).

3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

3.1 Tuotantoketju ja mallin rajat

Työssä tutkittiin kasvibiokaasun tuotantoketjun (kuva 5) energiataaseita simulointimallilla. Mallissa laskettiin prosessin energiapanokset ja –tuotokset. Mallin tuotantoketju alkaa kasvin viljelystä ja päättyy biokaasuun. Mallissa prosessijäännös palautetaan energiakasvin viljelyyn, ja teollisilla lannoitteilla katetaan ravinteiden hävikki, joka tapahtuu huuhtoumina vesistöihin ja denitrifikaatiossa ilmaan. Energiataselaskenta suoritettiin Excel-
taulukkomallilla.



Kuva 5. Tuotantoketjun energia- ja massavirrat tuottaessa biokaasua energiakasveista sekä käytetyn mallin systeemin rajaus.

3.2 Mallin lähtötiedot

Mallissa käytettiin energiapanoksina primäärienergiaa eli raaka-aineiden (lannoitteet, dieselöljy, jne.) sisältämää energiaa ennen jalostusta. Koska mallissa käytetyssä tuotantoketjun rajauksessa ei muodostu sivutuotteita, kaikki energiapanokset kohdennettiin biokaasun tuotannolle. Tutkittavana aikajaksona käytettiin yhtä vuotta, joten energiapanokset kohdennettiin yhdelle vuodelle ja niitä verrattiin vuotuisen energiantuottoon. Näiden kohdennuksien perusteella laskettiin prosentuaalinen suhde energian kulutukselle tuotettuun energiaan nähden sekä ketjun tuotos-panossuhteet.

Tarkasteltaviksi kasvilajeiksi valittiin timoteinurmi, ruokohelppi sekä vihantakaura. Näitä kasveja voidaan kasvattaa viljelijöillä olevilla välineillä ja tietotaidolla, ja ne eivät sido maata pitkäksi aikaa pois muusta viljelykäytöstä. Tärkeää oli myös niiden suuri biomassan tuotantokyky, kestävyys ja viljelyvarmuus, sekä mahdollisuus säilöä kasvimassaa ympärivuotiseen käyttöön helposti. Vihantakauraa ja timoteinurmea voidaan myös käyttää karjan rehuna, ruokohelpeä lajikkeesta riippuen, joskin sen soveltuvuus rehuksi on heikompi.

3.2.1 Viljelyn lähtötiedot

Viljelyssä suoritettavat työvaiheet, kasvuston uusimisvälit ja satotasot (taulukko 3) ovat kirjallisuudesta (Hyytiäinen ym. 1995, Pahkala ym. 2005). Nurmikasvien ensimmäisen vuoden sato oletettiin puoleksi normaalivuoden sadosta. Kaikista kasveista oletettiin korjattavan kaksi satoa kasvukaudessa.

Taulukko 3. Kasvilajien satotasot, uusimisvälit ja viljelymenetelmien lähteet.

	Satotasot, t TS ha ⁻¹ a ⁻¹	Uusimisväli, a
Ruokohelppi	11,0 (Lamminen ym. 2005)	5 (Evira 2006)
Timotei	9,0 (Hyytiäinen ym. 1995)	4 (Hyytiäinen ym. 1995)
Vihantakaura	6,1 (Hyytiäinen ym. 1995)	1 (Hyytiäinen ym. 1995)

Kasvinviljelyssä oletettiin käytettävän maatalouskoneita, jotka ovat tiloilla yleisesti käytettävissä olevaa kokoluokkaa. Maataloustyökoneiden tekniset tiedot (työleveydet ja –nopeudet) ovat jälleenmyyjältä (Agrimarket 2006). Kaikkien kolmen kasvin sato oletettiin korjattavan tuorerehuna tarkkuussilppurilla. Tuorerehun kuiva- ja orgaanisen aineen pitoisuuksiksi oletettiin TS 23 % ja VS 20,7 % (Lehtomäki ym. 2006). Viljelyssä ja kuljetuksissa käytetyn traktorin polttoaineenkulutuksena käytettiin Valtra –traktorin kulutusta, 18 l h⁻¹ (FAT 2006). Viljelyssä ja kuljetuksissa käytettävän traktorin dieselöljyn oletettiin sisältävän 1,16 kertaisesti (Edwards ym. 2003) primäärienergiaa energiasisällöstään, 42,7 MJ kg⁻¹ (Tilastokeskus 2005a).

Biomassan ja prosessijäännöksen kuljetukset laskettiin traktorikuljetuksina siten, että keskimääräinen kuljetusmatka on 4 km ja että paluumatka ajettiin ilman kuormaa. Sato ja kiinteä prosessijäännös kuljetettiin 10 tonnin peräkärriässä ja nestemäinen jäännös 15 m³ säiliössä.

Kasvintuotannossa käytettyjen koneiden työleveydet ja –nopeudet sekä toimenpiteiden toiston tiheydet eri kasvien tuotannossa on esitetty taulukossa 4. Taulukossa alle yhden olevat arvot tarkoittavat, että toimenpidettä ei suoriteta joka vuosi.

Taulukko 4. Peltotyöpanoksien laskemisessa käytetyt peltotöiden lähtötiedot (Hyytiäinen ym. 1995, Agrimarket 2006, Evira 2006).

	kyntö	lietelannoitus	kiinteä lannoitus	tasausäestys	kylvömuokkaus	jyräys	kylvö-lannoitus	niitto	korjuu	kalkitus	ruiskutus
Työleveys, m	2	15	6	4,5	4	4,5	3	3,2	6,4	12	20
Nopeus, km h ⁻¹	7	8	8	7	7	7	6	7	7	7	8
Toimenpide suoritetaan krt a ⁻¹ :											
Vihantakaura	1	2	1	1	1	0	1	2	2	0,25	1
Timoteinurmi	0,25	2	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	2	2	0,25	0,5
Ruokohelvi	0,2	2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,2	2	2	0,2	0,5

Torjunta-aineita oletettiin käytettävän vihantaviljalle vuosittain ja nurmikasveille joka toinen vuosi 0,15 kg ha⁻¹. Orgaanista rehunsäilöntäainetta oletettiin käytettävän 3 kg t⁻¹_{ww}. Suositellut kemiallisen lannoitteen määrät eri kasvilajeille on esitetty taulukossa 5 (Hyytiäinen ym. 1995). Laskelmissa oletettiin, että väkilannoitteilla korvataan vuosittaisesta tarpeesta huuhtoutumina ja denitrifikaatiossa menetetyt typen, kaliumin ja fosforin määrät, 10 % (Bouwman 1996, Esala 1998, Tolppa ym. 2002). Loput ravinteet palaavat prosessijäännöksessä takaisin pellolle. Vertailuna tutkittiin myös vaihtoehto, jossa prosessijäännöksen ravinteita ei hyödynnetä, jolloin väkilannoitteita käytettiin kattamaan

kaikki tarve. Väkilannoitteiden ja kalkin sekä torjunta- ja säilöntäaineiden valmistuksen energiankulutuksen tiedot ovat kirjallisuudesta (taulukko 6).

Ympärivuotista biokaasun tuotantoa varten kasvimassa säilötään muovilla katettuna aumaan tai siiloon biokaasulaitoksen lähettyville. Säilöntäaineen käytön oletettiin säilyttävän kasvimassan biokaasupotentiaalin varastoinnin aikana.

Tuotantopanoksissa ei huomioitu ostosiemenen eikä pakkauksien tuotannon energiankulutusta, sillä ne ovat vähäiset (Katajajuuri ym. 1995). Myöskään tuotantovälineiden valmistuksen energiankulutusta ei huomioitu, vaikka se saattaisi olla merkittävä niiden käytön energiankulutukseen verrattuna, sillä joidenkin maatalouslaitteiden elinkaaren käyttömäärä jää usein vähäiseksi (Börjesson 1996).

Taulukko 5. Suositellut lannoitemäärät eri kasvilajeille, kg ha⁻¹ a⁻¹ (Hyytiäinen ym. 1995).

	Typpilannoite	Fosforilannoite	Kaliumlannoite	Kalkki
Vihantakaura	200	10	70	1000
Timoteinurmi	220	10	70	1000
Ruokohelpi	120	10	70	1000

Taulukko 6. Kasvien tuotannossa käytettävien lannoitteiden ja kalkin sekä torjunta- ja säilöntäaineiden tuotannon primäärienergiankulutus

	Energiankulutus kWh kg ⁻¹	Lähde
Typpilannoite	13,89	Ramirez & Worrel 2005
Fosforilannoite	2,67	Ramirez & Worrel 2005
Kaliumlannoite	1,86	Ramirez & Worrel 2005
Kalkki	0,12	Katajajuuri ym. 2000
Pestisidit	15,83	Pimentel 1980
Rehunsäilöntäaine	1,03	Grönroos & Voutilainen 2001

3.2.2 Biokaasuprosessin lähtötiedot

Biokaasuprosessin käyttämän verkkosähkön sähköntuotannon primäärienergian kulutus laskettiin jakamalla Suomen sähköntuotannossa muodostuva hyödynnetty lämpö- ja sähköenergia tuotannossa käytetyllä primäärienergialla (Tilastokeskus 2006). Sähköntuotannon keskimääräinen hyötysuhde Suomessa on näin laskettuna 61 %.

Lähtötiedot eristeaineista ja laskukaavoista kuoren läpi tapahtuvan lämmönhukan laskemiseksi ovat Suomen rakentamismääräyskokoelmasta (Ympäristöministeriö 2002). Reaktorin maanpäälliset osat oletettiin eristetyn 20 cm paksulla lasivillalla. Perustuksen oletettiin olevan betonia, jonka paksuus on 0,4 m. Reaktorin oletettiin olevan sylinterimäinen, ja halkaisijan ja korkeuden suhteen 1:1,5. Reaktoritilavuutena laskuissa käytettiin 1000 m³, josta nestetilavuudeksi oletettiin 80 %. Säilörehun ominaislämpökapasiteettina käytettiin veden ominaislämpökapasiteettia, sillä säilörehun vesipitoisuus on 70-80 %. Biokaasureaktorin lämmityksen energian tuoton oletettiin tapahtuvan 85 % hyötysuhteella. Vuoden keskilämpötilana käytettiin Keski-Suomen 30 vuoden keskilämpötilaa, +2 °C (Ilmatieteen laitos 2007). Laskelmissa oletettiin, että lämmön talteenotolla voidaan kattaa syötteen lämmityksestä prosessilämpötilaan 30 %.

Laskelmissa käytetyt kasvien ominaismetaanintuotot vihantakauralle, timoteille ja ruokohelvelle olivat 0,370, 0,340 ja 0,320 m³ CH₄ kg⁻¹ VS_{lisättyä} (Lehtomäki 2006). Prosessissa oletettiin saavutettavan kasvien ominaismetaanintuotosta osuus, joka saavutetaan 50 päivän kuluessa kasvimateriaalin anaerobisen hajoamisen käynnistyttyä, eli 89 %. Biokaasureaktorin kuormituksena käytettiin 3 kgVS m⁻³ d⁻¹, joka on yleinen kuormitus maatalouden biokaasulaitoksilla (FAL 2005).

Biokaasulaitoksessa käytettävien sähkölaitteiden (syötin, sekoitin, pumppu, suotonauhapuristin ja kaasuvälikon puhallin) energiankulutuksen tiedot ovat valmistajilta ja täyden mittakaavan laitoksilta (Mulliner 2006). Jatkuvaa energiankulutusta vaativat biokaasureaktorin sekoitus, 5 W m⁻³ ja kaasuvälikon paineen ylläpito 0,2 kW. Tarvittavassa sekoitustehossa ei ole eroja käytettäessä kaasui- tai mekaanista sekoitusta, mutta kaasusekoitus on mainittu teknisesti toimivammaksi (Hobson & Wheatley 1993). Prosessijännöksen pumppaukseen oletettiin käytettävän pumppua, jonka teho on 4 kW ja kapasiteetti 20 m³ h⁻¹ ja syöttöön ruuvikuljetinta, jonka teho on 15 kW ja kapasiteetti 50 m³ h⁻¹.

Vedetöintiin oletettiin käytettävän suotonauhapuristinta, jonka teho on 1 kW ja kapasiteetti 200 kgTS h⁻¹. Näiden laitteiden vuosittaiset käyttötunnit laskettiin sen mukaan, kuinka kauan prosessissa käsiteltävän massan käsittely laitteen nimelliskapasiteetilla kestää.

Biokaasun käytön vaikutuksia tutkittaessa oletettiin lämmön tuotannon hyötysuhteeksi 85 %. CHP -skenaariossa sähköntuotannon hyötysuhteeksi oletettiin 30 % ja lämmöntuotannon 55 %.

Lähtötiedot kaasun puhdistuksesta ja paineistuksesta liikennekäyttöön ovat Ruotsin kaasutekniikan keskuksen tutkimusraportista. Kaasu oletettiin puhdistettavan painevesiabsorbtiota käyttäen, jolloin sähköenergian kulutus on 0,3 kWh m⁻³_{CH₄}. Paineistus 250 baariin kuluttaa 0,2 kWh m⁻³_{CH₄} (Nilsson 2003). Metaanihävikki puhdistuksessa on 2 % (Nilsson 2003). Jalostetun biokaasun jakelun oletettiin tapahtuvan tuotantopaikalla, joten energiapanoksia kaasun kuljetukselle ei tule.

Biokaasulaitoksen rakennusten ja laitteiden valmistuksen energiankulutus suljettiin tarkastelun ulkopuolelle. Mallissa ei otettu huomioon laitoksen välillistä energiankulutusta, kuten esimerkiksi valaistusta tai lämpimän veden käyttöä puhdistuksissa.

4 TULOKSET

4.1 Biokaasun tuotantoketjun kokonaisenergiatase

Tuotantoketjun energiatasetta tutkittiin määrittelemällä kasvintuotannon energiakulutus tutkituille kolmelle kasville (vihantakaura, timoteinurmi ja ruokohelpi). Lisäksi tutkittiin timoteinurmea käyttävän biokaasuprosessin ja kaasunjalostuksen energiankulutusta. Mallilaitoksena käytettiin 1000 m³ mesofiilistä prosessia, jonka kuormitus on 3 kgVS m⁻³ d⁻¹ ja HRT 73 d. Koska mallilaitoksen lähtökohtana oli laitoksen koko, eri kasvilajien tuottamat energiamäärät ja tarvittavat viljelypinta-alat vaihtelevat (taulukko 7).

Taulukko 7. Mallilaitoksen tuottamat metaani- ja energiamäärät ja sen tarvitsemat biomassamäärät ja viljelypinta-alat.

	Metaanintuotto, $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$	Energian- tuotto, MWh a^{-1}	Tarvittava kasvimassa, t a^{-1}	Tarvittava kuiva- ainemassa, $\text{t}_{\text{TS}} \text{a}^{-1}$	Tarvittava viljelypinta- ala, ha
Ruokohelpi	311749	3083	4976	1095	109
Timoteinurmi	331234	3276	4976	1095	137
Vihantakaura	360460	3565	4976	1095	179

Biokaasun tuotantoketju timoteinurmesta kuluttaa mallilaitoksessa primäärienergiaa 16,8 % tuotetusta energiasta. Nettoenergiaa tuotetaan $20,0 \text{ MWh ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, jatkuvana tehona 374 kW. Liikennepolttoaineeksi valmistettaessa tuotanto kuluttaa 24,4 % tuotetusta energiasta ja nettoenergian saanto on $17,6 \text{ MWh ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

Tuotetusta energiasta kuluu mallilaitoksessa viljelyyn ja kuljetuksiin 5,2 %, ja biokaasuprosessiin 11,7 %. Suurin osa prosessin tarvitsemasta energiasta kuluu reaktorin lämpötilan ylläpitämiseksi ja syötteen lämmitykseen prosessilämpötilaan, jotka kuluttavat 9,1 % tuotetusta energiasta.

Käytettäessä viljelyssä vihantakauran ja ruokohelven lähtötietoja, tuotantoketju kulutti 18,2 % ja 16,1 % tuotetusta energiasta. Vaikka energiataseessa ei ole suurta eroavaisuutta, erilaisista hehtaarisadoista johtuen tarvittavan ruokohelpimäärän viljelyyn riittää 109 ha, kun vihantakauralle pinta-alaa tarvitaan 179 ha (taulukko 7).

Suorat energiapanokset jakautuvat laitoksessa siten, että tuotantoketjun päättyessä biokaasuun laitoksen lämmönkulutus on yli kaikesta tarvitusta sekundäärienergiasta (taulukko 8). Liikennepolttoainetta tuottaessa sähkönkulutuksen suhteellinen osuus kasvaa (taulukko 8).

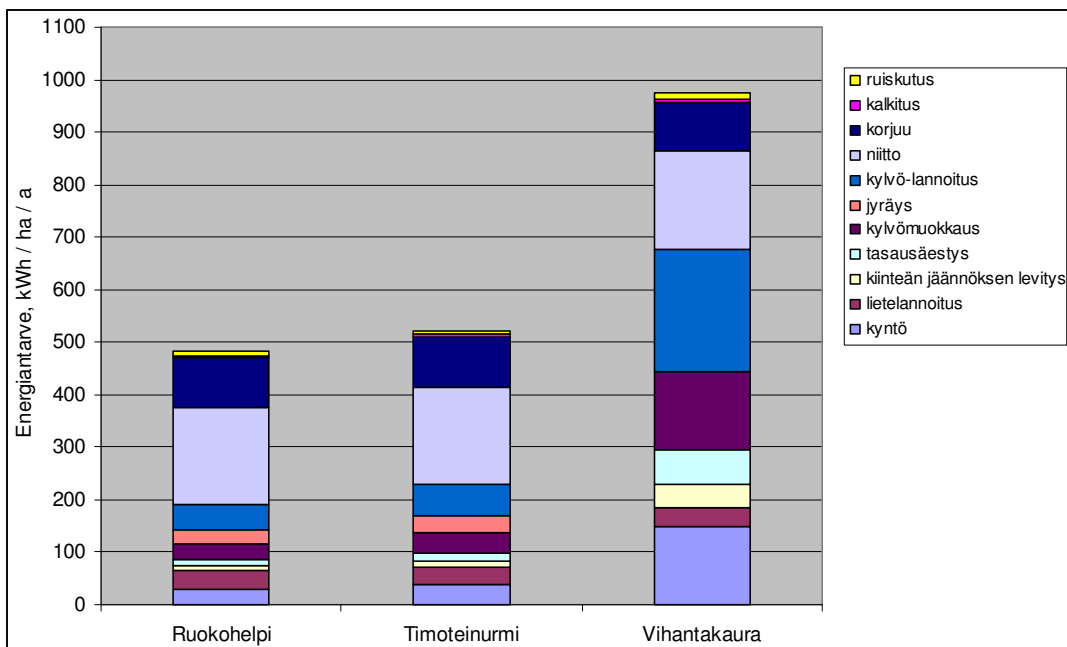
Taulukko 8. Energiankulutuksen jakautuminen mallilaitoksessa tuotantoketjun päättyessä biokaasuun ja jalostettuun liikennepolttoaineeseen.

	Energiankulutuksen prosent- tiosuus tuotantoketjun päätty- essä biokaasuun, %	Energiankulutuksen prosenttiosuus tuotantoketjun päättyessä jalostettuun liikennepolttoaineeseen, %
Kasvinviljely	26	18
Lämmönkulutus	61	43
Sähkönkulutus	13	39

4.2 Kasvin viljelyn ja korjuun energiankulutus

Ruokohelven, timoteinurmen ja vihantakauran viljelyn energiankulutusta tutkittiin laskennallisesti. Energiankulutus laskettiin vaihtoehdoille, joissa kasvimassan ravinteet palautetaan viljelyyn sekä tilanteessa jossa kasvinviljely tapahtuu pelkkiä väkilannoitteita käyttäen.

Monivuotisten kasvien (timoteinurmi ja ruokohelvi) viljelyn traktoriyöt kuluttavat noin puolet vähemmän energiaa verrattuna yksivuotiseen vihantakauraan (kuva 6, taulukko 10), johtuen pääosin siitä että yksivuotisen kasvin viljelyssä maa kynnetään, tassaustetaan, kylvömuokataan ja kylvetään vuosittain.



Kuva 6. Ruokohelven, timoteinurmen ja vihantakauran viljelyn traktoriyön hehtaarikohmainen energian kulutus.

Kun prosessissa käsitelty kasvimassa ravinteineen palautetaan viljelymaalle, ja väkilannoitteilla korvataan vuosittain pellolta menetettävä osuus, kuluu energiaa lannoitteisiin kymmenesosa verrattuna tilanteeseen, jossa viljely tapahtuu pelkästään väkilannoitteita käyttäen (taulukko 10). Pelkillä väkilannoitteilla viljeltäessä lannoitteiden valmistus olisi suurin yksittäinen energian kuluttaja mallilaitoksessa.

Lannoitteiden, kalkin ja pestisidien valmistuksen energiankulutus on erilasta eri kasvilajeilla johtuen erilaisista viljelysuosituksista (taulukko 11). Typpilannoitteen osuus lannoitteiden energiapanoksesta on yli 90 %, sillä sitä tarvitaan ravinteista määrällisesti eniten ja sen valmistus vaatii eniten energiaa (taulukko 11). Kalkin valmistus on merkittävä energiankuluttaja suuren kulutuksen takia, sen osuus tuotetusta energiasta on noin 1 %. Torjunta-aineiden tuotannon tarvitsema energia on vähäistä (taulukko 11).

Taulukko 10. Väkilannoitteiden tuotannon energiankulutus vain väkilannoitteilla viljeltäessä ja ravinteita kierrättäen ja viljelyn dieselöljyn energiapanos eri kasveilla.

	Väkilannoitteiden energiankulutus, kaikki lannoitteena, kWh ha ⁻¹ a ⁻¹	Väkilannoitteiden energiankulutus, ravinteiden kierrätys, kWh ha ⁻¹ a ⁻¹	Peltotyön kuluttama energia, kWh ha ⁻¹ a ⁻¹
Ruokohelpi	1819	182	482
Timoteinurmi	3204	320	522
Vihantakaura	2927	293	975

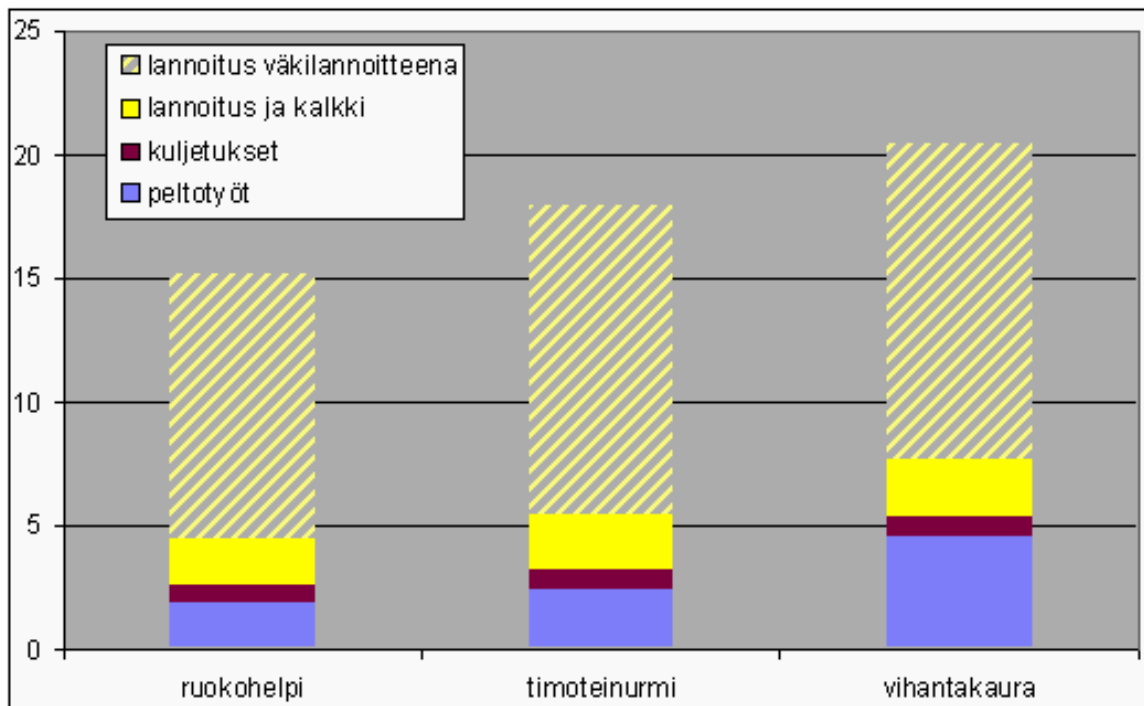
Taulukko 11. Lannoitteiden, kalkin ja pestisidien valmistuksen kuluttama energia eri kasvilajeilla ravinteita kierrättäen.

	Typpilannoite kWh ha ⁻¹ a ⁻¹	Fosforilannoite kWh ha ⁻¹ a ⁻¹	Kaliumlannoite kWh ha ⁻¹ a ⁻¹	Kalkki kWh ha ⁻¹ a ⁻¹	Pestisidit kWh ha ⁻¹ a ⁻¹
Ruokohelpi	166,2	2,7	13,0	166,0	4,3
Timoteinurmi	304,7	2,7	13,0	207,5	4,3
Vihantakaura	277,0	2,7	13,0	207,5	8,6

Vuosittainen viljelyn energiankulutus mallilaitoksessa on pelkkiä väkilannoitteita käyttäen 270 – 738 MWh a⁻¹ ja ravinteita kierrättäen 92 – 266 MWh a⁻¹ kasvilajista riippuen (taulukko 12). Mallilaitoksen käyttämän biomassan viljelyn energiankulutus tuotetusta energiasta on 5 % monivuotisilla kasveilla ja 7 % vihantakauralla (kuva 7). Väkilannoitteiden käyttö lisää osuuden 15 - 20 %:iin (kuva 7).

Taulukko 12. Mallilaitoksen tarvitseman biomassan viljelyn vuotuinen energiankulutus eri kasvilajeilla ravinteita kierrättäen ja pelkkiä väkilannoitteita käyttäen.

	Peltotyön kuluttama energia, MWh a ⁻¹	Pestisidit ja kalkki, MWh a ⁻¹	Lannoitteet, kaikki väkilannoitteena MWh a ⁻¹	Lannoitteet, ravinteiden kierrätys, MWh a ⁻¹	Yhteensä, kaikki väkilannoitteena, MWh a ⁻¹	Yhteensä, ravinteiden kierrätys, MWh a ⁻¹
Ruokohelpi	53	19	198	20	270	92
Timoteinurmi	72	29	489	49	590	150
Vihantakaura	175	39	524	52	738	266



Kuva 7. Ruokohelven, timoteinurmen ja vihantakauran viljelyn vaatimat energiapanokset, % tuotetusta energiasta

4.3 Kasvimassan kuljetuksen ja varastoinnin energiankulutus

Tuotetun tuoreen ja prosessissa käsitellyn kasvimassan kuljetusten sekä säilörehun varastoinnin energiankulutusta tutkittiin mallilaitoksen tapauksessa. Oletettu keskimääräinen kuljetusmatka oli 4 km tyhjällä paluukuormalla ja kuljetusten oletettiin tapahtuvan traktorilla. Mallilaitoksen kuljetusten energiantarve on ruokohelvellä 29,9 MWh a⁻¹, timoteinurmella 30,6 MWh a⁻¹ ja vihantakauralla 40,0 MWh a⁻¹. Mallilaitoksessa tuotetusta energiasta kuljetukset kuluttavat kaikilla kasveilla noin prosentin (kuva 7). Kun kuljetusetäisyys kasvaa, tarvittava energia kasvaa suoraan verrannollisesti matkaan nähden. Jos kuljetusetäisyys kaksinkertaistuu, kaksinkertaistuu myös energiankulutus.

Kasvimassan varastointiin oletettiin käytettävän orgaanisia happoja (tuotemerkki Kemira AIV2+). Happojen valmistuksen energiankulutus kaikilla kasveilla on 15 MWh a⁻¹, vastaten 0,5 % mallilaitoksessa tuotetusta energiasta.

4.4 Biokaasuprosessin energiankulutus

Eri prosessiparametrien ja teknisten ratkaisujen vaikutusta mallilaitoksen energiataseeseen tutkittiin simuloimalla käyttäen substraattina timoteinurmea. Timoteinurmi valittiin jatkotarkasteluun sen suhteellisen alhaisten viljelypanosten, sen viljelyn yleisyyden ja rehukäyttöön soveltuvuuden takia.

4.4.1 Lämpöenergian kulutus

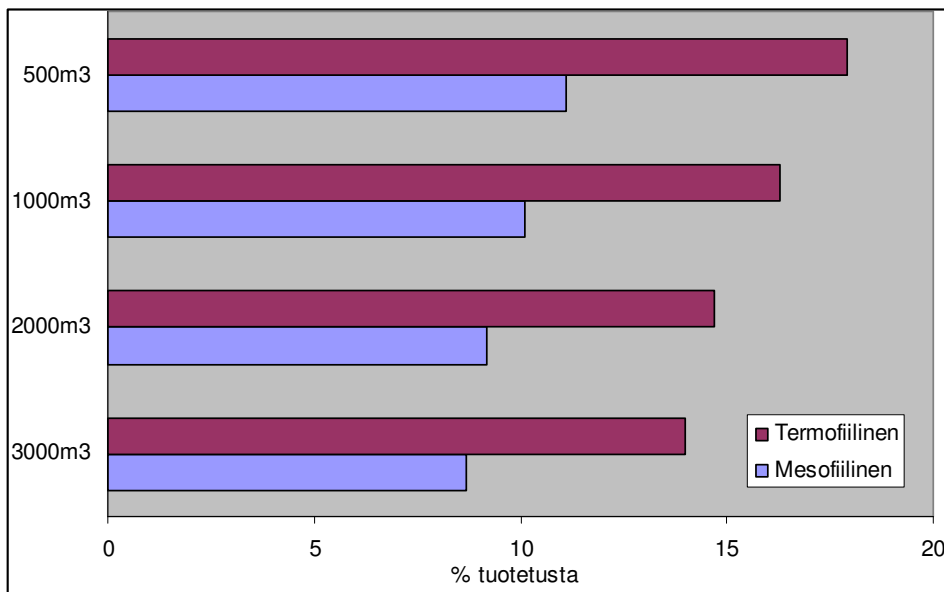
Biokaasuprosessissa lämpöenergiaa kuluu reaktorilämpötilan ylläpitoon sekä syötteen lämmitykseen prosessilämpötilaan. Mallilaitoksen lämmön tarpeesta kuluu 126 MWh a⁻¹ syötteen lämmitykseen ja 106 MWh a⁻¹ reaktorilämpötilan ylläpitoon, eli yhteensä 232 MWh a⁻¹. Ilman lämmön talteenottoa kokonaislämpöenergian kulutus on 285 MWh a⁻¹ (taulukko 13).

Mallilaitoksen lämpöenergiankulutusta vertailtiin vastaavan termofiilisen prosessin kulutukseen ja tutkittiin reaktorikoon vaikutusta lämmönkulutukseen (taulukko 13). Termofiilinen prosessi kuluttaa energiaa enemmän kuin mesofiilinen, sillä lämpöhukka

reaktorin kuoren läpi kasvaa korkeammassa lämpötilassa, ja syöte on lämmitettävä korkeampaan prosessilämpötilaan. Säilörehua käyttävän 1000m³ termofiilisen reaktorin lämpöenergian tarve on 1,6-kertainen mesofiiliseen verrattuna jos kasvimassan ominaismetaanintuotto ja kuormitus oletetaan samaksi (kuva 8, taulukko 13). Jotta saavutetaan sama tuotos-panossuhde kuin 1000m³ mesofiilisessä reaktorissa, on termofiilisessä prosessissa 2,5-kertaistettava kuormitus jolloin reaktorikoko pienenee samassa suhteessa. Mitä suurempi reaktori on, sitä vähemmän tuotetusta energiasta kuluu reaktorin lämmitykseen (kuva 8).

Taulukko 13. Reaktorikoon, prosessilämpötilan ja lämmön talteenoton vaikutus reaktorin lämmönkulutukseen.

Reaktorikoko, m ³	Termofiilinen, ei lämmön talteenottoa MWh a ⁻¹	Termofiilinen, lämmön talteenotto MWh a ⁻¹	Mesofiilinen, ei lämmön talteenottoa MWh a ⁻¹	Mesofiilinen, lämmön talteenotto MWh a ⁻¹
500	250	207	190	156
1000	458	372	285	232 (mallilaitos)
2000	1033	818	643	509
3000	1221	962	761	599



Kuva 8. Reaktorikoon vaikutus termofiilisen ja mesofiilisen prosessin lämmönkulutukseen, % tuotetusta energiasta. Oletuksena ei lämmön talteenottoa, sama ominaismetaanintuotto ja kuormitus.

4.4.2 Sähköenergian kulutus

Mallilaitos kuluttaa sähköenergiaa reaktorin sisällön sekoitukseen, kasvimassan syöttämiseen, käsittelyn massan pumppaamiseen, vedetöintiin sekä kaasuvaraston paineen ylläpitoon (taulukko 14). Sekoitus on suurin yksittäinen sähköenergian kuluttaja, 81 % kaikesta sähkökulutuksesta (taulukko 14).

Taulukko 14. Mallilaitoksen vuosittainen sähköntarve primäärienergiana ja osuutena laitoksen tuottamasta energiasta.

	Sähkökulutus, MWh a ⁻¹	Osuus tuotetusta energiasta, %
Sekoitus	71,0	2,2
Vedetöinti	4,4	0,14
Pumppaus	2,9	0,09
Kaasuvarasto	2,8	0,09
Syöttö	2,4	0,07
Yhteensä	83,5	2,59

4.5 Biokaasun jalostuksen energiankulutus

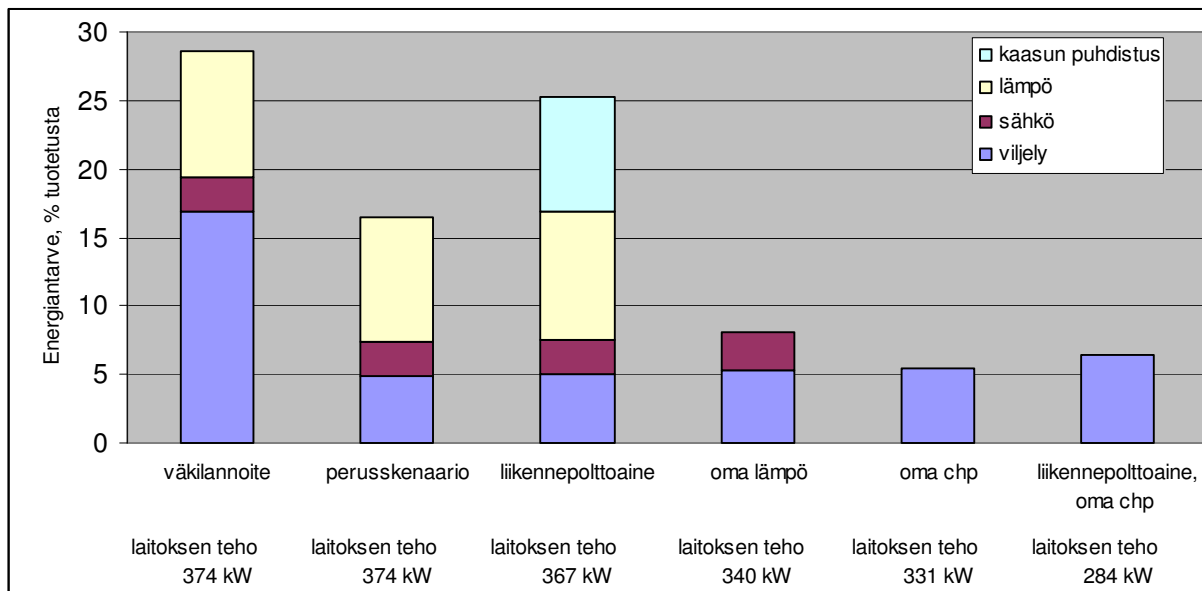
Työssä tutkittiin biokaasun liikennepolttoaineeksi jalostamisen energiankulutusta. Liikennepolttoaineeksi käytettäessä biokaasu tulee puhdistaa ja paineistaa. Mallilaitoksen biokaasun (331234 m³_{CH₄}) jalostaminen liikennepolttoaineeksi kuluttaa sähköä primäärienergiaa 215 MWh a⁻¹, joka on 8,2 % mallilaitoksen tuottamasta energiasta. Kaasun jalostus on selvästi suurin mallilaitoksen sähkökuluttaja, jos liikennepolttoaineeksi jalostaminen sisällytetään systeemin rajojen sisäpuolelle. Lisäksi metaania karkaa puhdistusprosessissa energiasisällöltään 52 MWh a⁻¹.

4.6 Energiatase käytettäessä biokaasua prosessienergiana

Työssä tutkittiin rajauksia, joissa mallilaitoksen energiantarvetta kattamaan käytetään osan tuottamasta biokaasusta (kuva 10). Mikäli mallissa laitoksen energiankulutusta kateetaan omalla energiantuotannolla, tuotantoon tarvittava ulkoinen primäärienergia vähenee, mutta koska osa biokaasusta kuluu laitoksen ylläpitoon, laitoksen teho alenee. Alenema

on 374 kW:sta 331 kW:iin, mikäli mallilaitoksen lämmön- ja sähkönkulutus katetaan omalla tuotannolla. (kuva 10). Jos laitoksen sähköntarve katetaan CHP-tuotannolla bio-kaasusta, on sähkön tarve on niin vähäistä, että CHP-tuotannon lisäksi on lämmöntarpeen kattamiseksi tuotettava lämpöä kaasupolttimella. Mikäli liikennepolttoaineeksi jalostaminen sisällytetään rajaukseen ja kaikki tarvittava sähkö tuotetaan itse, sähkön tarve on niin suuri, että hyödyntämättä jäävää lämpöä syntyy sähköntuotannon ohella.

Käytetyt rajaukset olivat viljely pelkillä väkilannoitteilla, liikennepolttoaineeksi jalostamisen sisällyttäminen tarkasteluun. Lisäksi tarkasteltiin vaihtoehdot, joissa laitoksen lämmön ja lämmön ja sähkön tarve katettiin biokaasusta tuotetulla energialla, sekä liikennepolttoainevaihtoehto, jossa lämmön ja sähkön tarve katettiin biokaasusta tuotetulla energialla.



Kuva 10. Erilaisten tuotantoketjun erilaisten rajausten vaikutus tuotantoketjun energiantarpeeseen (% mallilaitoksen tuottamasta energiasta) ja mallilaitoksen kaasutehoon.

4.7 Herkkyystarkastelu

Energiantuotantoketjun energiatase voi muuttua merkittävästi tiettyjä mallin lähtöarvoja tai oletuksia muuttamalla. Herkkyystarkastelussa tutkittiin eräiden muuttujien vaikutuksia tuotantoketjun energiataseeseen.

4.7.1 Kasvinviljely

Korjattavan sadon kuiva-ainepitoisuudella on vaikutus energiataseeseen, sillä mikäli sato korjataan esikuivattuna, kuluu prosessissa vähemmän energiaa syötteen lämmittämiseen prosessilämpötilaan ja kuljetuksiin kasvimassan sisältäessä vähemmän vettä. Esikuivatulla rehulla tuotantoketju kuluttaa 14,7 % tuotetusta energiasta (taulukko 15). Myös satotasotavoite vaikuttaa laitoksen energiataseeseen. Mikäli tarvittavaa kasvimassaa joudutaan viljelemään suurella pinta-alalla, peltotöiden ja lannoitteiden tarve kasvaa suoraan verrannollisesti. Jos satotasotavoite on 25 % korkeampi oletetusta, tuotantoketju kuluttaa 18,2 % tuotetusta energiasta (taulukko 15).

Kuljetusten merkitys energiataseeseen on pieni. Kaksinkertaisella 8 kilometrin kuljetusmatkalla kuljetusten osuus nostaa kulutettua energiamäärää yhden prosenttiyksikön verrattuna mallilaitokseen.

Taulukko 15. Kasvinviljelyn herkkyystarkastelun vaikutukset mallilaitoksen energiataseeseen

Muuttuja	Tuotantoketjun energian- kulutus, % tuotetusta	Peruste
Mallilaitos	16,4	
Esikuivattu säilörehu	14,7	Syötteen vähentynyt lämmitystarve
Satotaso + 25 %	18,2	Vähentyneet viljelypanokset
Satotaso - 25 %	15,9	Lisääntyneet viljelypanokset
Kaksinkertainen kuljetusmatka (8 km)	17,4	Lisääntynyt polttoaineentarve

4.7.2 Biokaasuprosessi

Biokaasuprosessin energiataseeseen vaikuttaa eniten prosessilämpötila. Energiataseen kannalta optimaalinen prosessin lämpötila on mahdollisimman alhainen, mutta silti korkean kaasuntuoton ja kuormitettavuuden kannalta tarpeeksi korkea. Mikäli saavutetaan sama kaasuntuotto ja kuormitus 20 % alhaisemmassa prosessilämpötilassa, kuluttaa tuotantoketju 14,9 % tuotetusta energiasta (taulukko 16). Energiataseen kannalta lämmön talteenotto käsitellystä biomassasta syötteen lämmitykseen on tärkeää. Ilman lämmön talteenottoa prosessissa kuluu energiaa 18,9 % tuotetusta (taulukko 16).

Keski-Euroopan suurissa energiakasveja käsittelevissä laitoksissa on havaittu, että mikrobien metabolian lämpö voi olla niin suurta, että reaktoreita joudutaan jäädyttämään lämmittämisen sijaan. Mikäli Suomen kylmemmissä oloissa metabolialämpö kattaisi lämmityspanoksesta puolet, kuluttaisi tuotantoketju 12,2 % tuotetusta energiasta (taulukko 16).

Prosessiparametreista suuri vaikutus on kasvimassan ominaismetaanintuotolla ja prosessin kuormitettavuudella. Mikäli prosessi toimii suurella kuormitettavuudella biologisesti ja saavutetaan hyviä kaasuntuottoja, pienenee tarvittava reaktorikoko, ja saavutetaan energiansäästöä lämmityksessä ja sekoituksessa.

Mikäli kuormitus voidaan nostaa mallissa käytetystä 3:sta 5:een $\text{kgVS m}^{-3} \text{d}^{-1}$, kuluttaa tuotantoketju 14,1 % tuotetusta energiasta (taulukko 16). Kuormitus $5 \text{ kgVS m}^{-3} \text{d}^{-1}$ on realistinen, monilla maatalouden laitoksilla käytössä oleva kuormitus. Merkittävämpi vaikutus on kuitenkin substraatin ominaismetaanintuotolla. Prosessissa saatavana timoteinurmen ominaismetaanintuotona käytettiin $0,303 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ VS}_{\text{lisätty}}$. Mikäli metaanintuotto jää 20 % alle oletetun, tuotantoketju kuluttaa 20,8 % tuotetusta energiasta. Metaanintuoton ollessa 20 % oletettua korkeampi, tuotanto kuluttaa 13,7 % tuotetusta energiasta (taulukko 16).

Laskelmissa biokaasuprosessissa kasvista saatavana ominaismetaanintuotona käytettiin arvoa, joka kaasuntuotokokeessa saavutettiin kokeen ensimmäisen 50 päivän aikana, eli 89 % kokonaiskaasuntuotosta. Mikäli oletetaan, että jälkikaasutuksella saavutettaisiin vielä 10 % lisää ominaiskaasuntuotosta, tuotantoketju kuluttaa 15,2 % tuotetusta energiasta (taulukko 16).

Laskelmissa Suomen sähköntuotannon hyötysuhteena käytettiin 61 %, jossa myös yhteistuotannossa syntyvä lämpö oletettiin hyödynnettävän täysimääräisesti. Mikäli hyötysuhde lasketaan ilman CHP-lämmön hyödyntämistä, Suomen sähköntuotannon hyötysuhteeksi saadaan 32 %, jolloin myös verkkosähköä käyttävän biokaasulaitoksen päämäärienergian kulutus kasvaa, ja tuotanto kuluttaa 19,2 % tuotetusta energiasta.

Taulukko 16. Biokaasuprosessin herkkyytarkastelun vaikutukset mallilaitoksen energiataseeseen

Muuttuja	Tuotantoketjun energiankulutus, % tuotetusta	Peruste
Mallilaitos	16,4	
Prosessilämpötila - 20 %	14,9	Vähentynyt lämpöenergian tarve
Ei lämmön talteenottoa	18,9	Lisääntynyt lämpöenergian tarve
Puolet lämpöenergiasta metaboliaalämpönä	12,2	Vähentynyt lämpöenergian tarve
Kuormituksen nosto 5 kgVS m ⁻³ d ⁻¹	14,1	Pienentynyt reaktorikoko
Ominaismetaanintuotto + 20 %	20,8	Suurentunut metaaninsaanto
Ominaismetaanintuotto - 20 %	13,7	Pienentynyt metaaninsaanto
Jälkikaasutus	15,2	Suurentunut metaaninsaanto

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Energiakasveista tuotetun biokaasun tuotannon kokonaisenergiatase

Energiakasveista tuotetun biokaasun energiataseesta vaihtelevat riippuen valituista lähtöarvoista ja rajoituksista. Tässä tutkimuksessa nurmikasveille ravinteita kierrättäen saatu tuotantoketjun tuotos-panossuhde 5,9 on korkeampi kuin aiemmissa pohjoisiin oloihin sovelletuissa analyyseissä; aiemmissä tutkimuksissa tuotos-panossuhteiksi on saatu 5,26 (CROPGEN 2005b) ja 2,5 (Berglund & Börjesson 2006). Molemmissa aiemmissä tutkimuksissa viljely on oletettu tapahtuvan väkilannoitteita käyttäen. Mikäli tässä tutkimuksessa käytetyn malli rajataan samoin, on tuotos-panossuhde 3,5.

Ruotsalaisen elinkaarianalyysin (Berglund & Börjesson 2006) suurin eroavuus tähän tutkimukseen on kasvimassan tuotantoon kuluvan energian suuruus; nurmen tuotanto kuluttaa 18,6 % (528 kWh t⁻¹ TS) tuotetusta energiasta, kun tässä tutkimuksessa vastaava luku on 16,9 % (462 kWh t⁻¹ TS) väkilannoitteilla viljeltäessä ja 4,9 % (142 kWh t⁻¹ TS) ravinteita kierrättäen. Ruotsalaisessa tutkimuksessa myös laitoksen sähkönkulutus on 2,8-kertainen tähän tutkimukseen verrattuna, mutta artikkelissa ei sähkönkulutusta ole tarkemmin eritelty, joten syytä erolle ei löydy.

Merkittävimmät eroavaisuudet EU:n 6. puiteohjelman tutkimushankkeeseen Southamptonin yliopiston laatimassa raportissa (CROPGEN 2005b) ja tässä tutkimuksessa ovat GROPGEN-raportin 50 % korkeampi nettoenergiasaanto hehtaarilta ja peltotöiden vaatimat 10 % alhaisemmat energiapanokset. Suurempi hehtaariohtainen energiasaanto johtuu nurmen korkeammasta satotasosta (10 t TS ha⁻¹) sekä korkeammasta ominaismetaanintuotosta (360 m³ CH₄ kg⁻¹ VS_{lisättyä}). Toisaalta reaktorin lämmönhukka CROPGEN-skenaarioissa oli 80 – 200 % suurempaa ohuemmasta eristyksestä johtuen.

5.2 Energiakasvien tuotannon ja kuljetusten energiankulutus

Biokaasun tuotannossa perinteisillä suomalaisilla viljelykasveilla parhaat energiataseet saavutetaan monivuotisilla nurmikasveilla. Monivuotisilla kasveilla peltotöiden energiankulutus ja konetyömäärä on tämän tutkimuksen perusteella noin puolet pienempi kuin yksivuotisilla kasveilla. Jotta yksivuotisilla kasveilla saavuttaisiin sama energiantuotto, olisi saavutettava noin puolitoistakertaisia hehtaarisatoja tai viidenneksen suurempia ominaismetaanintuottoja verrattuna tilanteeseen, jossa kasvusto uusittaisiin neljän vuoden välein. Suomessa yleisesti viljellyissä kasveissa tällaisia kasveja ei juuri ole, mutta vähemmän viljellyistä kasveista esimerkiksi maa-artisokka on potentiaalinen suuren hehtaarisatonsa ansiosta (Lehtomäki 2006). Saksalaisilla biokaasulaitoksilla käytetyistä energiakasveista suurin metaanintuotto hehtaarilta saadaan maissisäilörehusta (Fischer 2007).

Kokonaisenergiataseen kannalta viljelyn osuus on noin puolet mallilaitoksen energian käytöstä, mikäli kasveja viljellään ravinteita kierrättäen. Suurin vaikuttava tekijä viljelyssä on helposti hajoavan, ominaismetaanintuotoltaan hyvän kasvilajin valinta, sillä siten voidaan samoilla viljelyn ja syötteen lämmityksen panoksilla saada suurempi me-

taanisaanto. Tämän tutkimuksen mukaan viidenneksen korkeampi kasvimassan ominaismetaanintuotto nostaa energiatasetta viidenneksellä.

Maankäytöllisesti ja viljelijän työpanokselle hehtaarilta saatava metaanisaanto on tärkeä merkityksellinen muuttuja, vaikka energiataseeseen merkitys ei ole niin suuri ravinteita kierrätettäessä. Tässä tutkimuksessa vihantakauran vaatima viljelyala oli 64 % suurempi verrattuna ruokohelpeen, mutta vihantakauran tuotos-panossuhde oli vain 11 % alhaisempi. Tämä johtuu pääosin siitä, että energiataseessa traktorin polttoaineenkulutus ei ole merkittävää tuotettuun energiamäärään nähden, ja ravinteita kierrätettäessä lannoitteiden valmistuksen energiantarve ei ole niin suurta kuin väkilannoitteilla viljeltäessä. Hehtaarisato nousee kuitenkin merkittäväksi muuttujaksi, mikäli ravinteiden kierrätys poistetaan tuotantoketjusta ja viljely tapahtuu väkilannoitteita käyttäen.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin lähtökohtaa, että energiaa tuotetaan ainoastaan peltobiomassasta. Mikäli prosessiin syötetään lisäksi muuta materiaalia, kuten esimerkiksi jätteitä, prosessijäännös sisältää absoluuttisesti enemmän ravinteita kuin kasvimassan mukana pellolta on korjattu. Tässä tapauksessa pellon ravinnehävikkiä korvaavien väkilannoitteiden tarve vähenee entisestään, jopa häviten kokonaan, ja energiantuoton hyötysuhde paranee. Sama vaikutus on typensitojakasvien viljelyllä, jolloin typpiyhdisteiden määrä systeemissä kasvaa ja typpilannoitteiden tarve vähenee.

Laskelmissa oletettiin, että viljelymaa tarvitsee kalkkia samoja määriä kuin perinteinen viljelysmaa. Kasvimassan mädätysjäännöksen peltolevityksen vaikutuksia maan pH-arvoon ei kuitenkaan tunneta. Kasvimassa muuttuu prosessissa emäksisemmäksi, joten se saattaa vähentää maan kalkitustarvetta.

Biomassan kuljetukset eivät ole energiataseeseen merkittävästi vaikuttavia, mikäli tuotanto tapahtuu suhteellisen lähellä biokaasulaitosta. Tulos on samansuuntainen aieman tutkimuksen kanssa, jonka mukaan energiakasveja voidaan kuljettaa 300 kilometriä ennen kuin energiatase muuttuu negatiiviseksi (Berglund & Börjesson 2006). Kuitenkin taloudellisesti tarkasteltuna kuljetusetäisyydellä saattaa olla suurta merkitystä työvoima- ja polttoainekustannuksista johtuen. Mikäli laitos sijoitetaan mahdollisimman lähelle biomassan tuotantoa ja siirretään tuotettua energiaa, voidaan energiatasetta parantaa ja kuljetuksia vähentää. Kasvimassan ja mädätysjäännöksen kuljettaminen on pääosin veden kuljettamista paikasta toiseen. Jalostettua biokaasua voidaan siirtää putkistoissa ja pai-

neistettuna säiliöissä, mutta paineistus ja jalostaminen kuluttavat noin $0,5 \text{ kWh m}^{-3} \text{CH}_4$, noin 5 % kaasun energiasisällöstä (Nilsson 2003).

5.3 Biokaasuprosessin energiankulutus

Suomen oloissa alhaisesta vuotuisesta keskilämpötilasta johtuen merkittävin energiapanos tuotettaessa kasveista biokaasua kuluu reaktorin lämpötilan ylläpitämiseen sekä syötettävän materiaalin lämmittämiseen prosessilämpötilaan.

Biokaasuprosessin lämpötilalla on suuri merkitys sen energiataaseeseen. Mikäli käytetään termofiilistä prosessia, sillä on saavutettava 2,5 -kertaisia kuormituksia ja samassa suhteessa pienennettävä reaktorikokoa, että lämpötilan nosto parantaa energiatasetta. Toisaalta energiatasetta voidaan parantaa, mikäli pystytään saavuttamaan samantasoinen kaasuntuotto ja kuormitus alle 35 °C lämpötiloissa. Reaktorin tuottoon suhteutettua lämmitysenergiaa voidaan vähentää reaktorikokoa kasvattamalla, sillä tilavuutta suurentamalla reaktorin pinta-ala kasvaa tilavuutta hitaammin. Lämmitysenergian kulutusta voidaan vähentää myös syöttämällä kasvimassa kuivempana, jolloin voidaan saavuttaa merkittävä lämpöenergian säästö. Nostamalla timoteinurmen kuiva-ainepitoisuutta 22 % tuorehusta esikuivattuun 30 %:iin, laskee tuotantoketjun kuluttama energia 16,9 %:sta 14,7 %:iin tuotetusta. Reaktorin eristyksellä voidaan vaikuttaa huomattavasti energiankulutukseen.

Mikäli energiantuotanto metaanina halutaan maksimoida, voidaan biokaasureaktoria lämmittää biokaasun sijaan muilla edullisilla energialähteillä, kuten hakkeesta tuotetulla lämmöllä tai aurinkolämmöllä. Aurinkolämpö on kiinnostava vaihtoehto biokaasulaitoksen lämmittämiseksi, sillä reaktori tarvitsee lämpöä kesäisin, ja eristetty reaktori itsessään toimii puskuroivana lämpövarastona aurinkolämmön saatavuuden vuorokausivaihtelulle (Axaopoulos ym. 2001).

Keski-Euroopassa täyden mittakaavan tarkkelyspitoisia energiakasveja käsittelevillä laitoksilla reaktoreita on jäädytetty lämmittämisen sijasta (Linorfer ym. 2005). Tässä tutkimuksessa ei otettu lämmitysenergian tarvetta laskettaessa huomioon hajoamisprosessissa syntyvää aineenvaihduntalämpöä herkkystarkastelun karkeaa arviointia lukuun ottamatta, sillä aiheesta ei ole juurikaan kvantitatiivista tutkimusta. Sekoittamisesta joh-

tuva mekaanisen energian muuttumista lämpöenergiaksi ei myöskään huomioitu. Sekoitusenergialla saattaa kuitenkin olla merkitystä, sillä mikäli kaikki sekoitusenergia muuttuisi lämmöksi prosessiin, vastaisi se yli kymmenesosaa prosessin lämmöntarpeesta.

Biokaasuprosessin optimointi energiatehokkaammaksi jatkuvatoimisessa märkäprosessissa on mahdollista lähinnä lämpöenergian käytössä. Nykyisiä energiakasveja käyttäviä biokaasulaitoksia ei välttämättä ole optimoitu lämmönkulutuksen suhteen tehokkaiksi, sillä kun kaasu käytetään pääosin kaasumoottorissa sähköntuotantoon (FAL 2005), syntyy myös lämpöä, jolle ei välttämättä ole kannattavaa käyttökohdetta, joten laitoksen tuhaavalla lämpötaloudella ei ole merkitystä laitoksen käyttäjälle. Mikäli energia myytäisiin liikennepolttoaineeksi, nousisi myös reaktorin lämmönkulutuksen pienentäminen tärkeäksi.

Biokaasulaitoksen sähkönkulutukseen on vaikeampi vaikuttaa, sillä sähköä vaativa mekaaninen energia on välttämätöntä prosessin toimivuuden kannalta. Sähkönkulutus on sekoitusta lukuun ottamatta hyvin pieni osuus prosessin energiantarpeesta. Sekoituksen asettaminen alimmalle riittävälle tasolle (Stroot ym. 2000) on merkittävin mahdollinen sähköenergian säästömahdollisuus tässä tarkastellussa CSTR-prosessissa. Sähkön tarve vähenee myös, mikäli kuormitusta pystytään kasvattamaan ja siten pienentämään reaktorikokoa, jolloin sekoitusenergian tarve vähenee.

Sekoituksen tarve riippuu reaktorityypistä, leach bed –reaktorissa substraattia ei välttämättä edes tarvitse varsinaisesti sekoittaa.

Liikennepolttoainetta tuottaessa laitoksen sähköntarve on suuri verrattuna lämmönkulutukseen. Mikäli tässä tapauksessa tuotetaan kaikki laitoksen tarvitsema sähkö nykYTEKNIKALLA biokaasusta, syntyy lämmöstä ylituotantoa. Liikennepolttoainetta tuottavassa laitoksessa ratkaisuna voi olla mitoittaa CHP-tuotanto vastaamaan lämmöntarvetta, ja ostaa ylimääräinen tarvittava sähkö. Mikäli liikennebiokaasulle riittää kysyntää, on taloudellisesti kannattavaa jalostaa kaikki kaasu polttoaineeksi, ja tuottaa tarvittava lämpö mahdollisimman halvalla energiamuodolla ja ostaa sähkö verkosta.

5.4 Biokaasun energiataseen vertailu muihin polttoaineisiin

Kokonaisuudessaan biokaasun tuotto timoteisäilörehusta perusskenaarion mukaisessa 1000 m³ laitoksessa kuluttaa primäärienergiaa 16,4 % tuotetusta energiasta. Suomessa käytettävä Siperiasta tuotu maakaasu kuluttaa vastaavasti 14,3 %, suurimman osan kuluessa kuljetukseen, esim. kompressoriasemilla (Wihersaari 1996). Uusiutuvan kaasun tuotanto pelto- ja metsäbiomassasta on siis energiataseeltaan samaa luokkaa kuin vastaavan fossiilienergian käyttö. Lisäksi Suomessa käytettävä venäläinen maakaasu on metaanipitoisuudeltaan korkeaa jo kaasulähteessä. Mikäli raaka maakaasu olisi epäpuhtaampaa, kuten monissa kaasulähteissä maailmalla on, sen puhdistus lisäisi energiankulutusta.

Timoteinurmesta saadaan biokaasuprosessilla nettoenergiaa 20 MWh ha⁻¹. Vastaavasti keskitetyssä lämpölaitoksessa poltettavan pelto- ja metsäbiomassan nettoenergiasaanto on 25,5 – 34 MWh ha⁻¹ koko elinkaari huomioiden (Vapo 2006, Wihersaari 1996). Vaikka saanto poltettavalla pelto- ja metsäbiomassalla on parempi, nurmibiokaasun etuna on hyvä soveltuvuus myös pienen mittakaavan CHP-tuotantoon ja mahdollisuus jalostaa metaani liikennepolttoaineeksi. Lisäksi sama nurmi soveltuu käytettäväksi energiantuotantoon tai karjan rehuksi.

Mallissa biokaasu ei kuitenkaan ole jalostettu samaan puhtausasteeseen kuin maakaasu. Puhdistuksella ei ole merkitystä lämmön- ja sähköntuotannossa, mutta liikennekäyttöön biokaasu on puhdistettava, mikä lisää energiankulutusta. Liikennekäyttöön myös maakaasu on lisäksi paineistettava korkeaan paineeseen, mikä lisää maakaasunkin primäärienergian kulutusta mainittua korkeammaksi. Liikennekäyttöön jalostettu timoteisäilörehusta tuotettu biokaasu kuluttaa primäärienergiaa 24,9 % tuotetusta energiasta. Suomessa liikennekäytössä oleva paineistettu maakaasu kuluttaa vastaavasti 16,3 %.

Biokaasun tuotannon energiatase on korkeampi verrattuna muihin liikenteen biopolttoaineisiin, joista on tehty energiataseselvitys Suomen oloihin. Tuotettaessa ohrasta etanolia primäärienergiaa kuluu tuotantoprosessissa 80 % tuotetusta liikennepolttoaineen energiasisällöstä, biodieselin tuotanto kuluttaa 50 %, F-T diesel 50–60 % ja rypsipohjainen Neste Oy:n NExBTL-diesel 50 % (Mäkinen 2006). Biokaasun korkeampi energiatase johtuu alhaisemmista viljely- ja prosessipanoksista ja suuremmista hehtaarisannoista.

Vertailtaessa eri tutkimuksista saatuja tuloksia on huomioitava erot, jotka aiheutuvat erilaisista systeemin rajauksista tai käytetyistä lähtötiedoista.

5.5 Energiakasveista tuotetun biokaasun potentiaali Suomessa

Suomen liikenteen kuluttama energiamäärä vuonna 2004 oli 50,5 TWh (Tilastokeskus 2005b). Mikäli maa- ja metsätalousministeriön vuodeksi 2012 peltoenergialle arvioima 200 000 hehtaarin ala käytetään liikennepolttoaineeksi puhdistetun nurmibiokaasun tuotantoon, tuotettu nettoenergia vastaa 7 % liikenteen kulutuksesta, joka ylittäisi EU:n asettaman tavoitteen 5,75 %. Mikäli kaikki esitetty Suomen peltoenergian potentiaali, 500 000 ha, käytettäisiin liikennebiokaasun tuotantoon, liikenteen kulutuksesta katettaisiin 17,5 %. Edellisissä prosenttiluvuissa energia oli nettoenergiana, absoluuttisesti tarkasteltuna näillä pinta-aloilla voidaan liikenteen tarpeesta kattaa 9,3 ja 23,3 %, mikäli viljelyyn ja prosessointiin käytettävä primäärienergia on muuta kuin biokaasua.

Biokaasun tuotanto 200 000 hehtaarin alalta hajautetusti noin 1 MW laitoksin tarvitsisi tässä tutkimuksessa saadulla hehtaari tuotolla laskettuna noin 500 biokaasulaitosta. Lisäksi nämä peltobiomassaa käsittelevät laitokset voisivat myös käsitellä maatalouden, teollisuuden ja kotitalouksien orgaanisia jätteitä, jolloin uusiutuvien liikennepolttoaineiden tuotanto olisi suurempi. Teknillis-taloudellinen biokaasupotentiaali jätteistä on 4,6–15,9 TWh a⁻¹ (Asplund ym. 2005). Jäte- ja energiakasvipotentiaalit yhdistämällä Suomen liikenteen tarpeesta voitaisiin kattaa lähes puolet.

Energiatase on vain yksi aspekti energiantuotantovaihtoehtoja arvioitaessa. Suomen oloissa biokaasun tuotanto energiakasveista on tässä tutkimuksessa todettu energiataseeltaan kilpailukykyiseksi muihin vastaaviin energiamuotoihin verrattessa, mutta vertailua olisi suoritettava yksityiskohtaisesti myös kasvihuonekaasu- ja muiden ympäristöpäästöjen kannalta, sekä taloudellisten vaikutusten osalta.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen perusteella peltokasveista biokaasua tuottaessa primäärienergiaa kuluu 16,4 % tuotetusta energiasta. Energiatase lähellä vastaavan fossiilisen polttoaineen, maakaasun, energiatasetta. Liikennepolttoaineeksi jalostettuna biokaasun energiataset on alhaisempi kuin vastaavalla fossiilisella polttoaineella, mutta parempi kuin muilla liikenteen biopolttoaineilla. Tutkimuksen perusteella on siis mahdollista nykyteknikkaa käyttäen siirtyä fossiilisista kaasumaisista polttoaineista uusiutuviin energiahyötysuhteen karsimättä. Suomen potentiaali biokaasun hyödyntämiseen on merkittävä, noin neljännes liikenteen energiantarpeesta voidaan kattaa energiakasveista tuotetulla biokaasulla.

Kasvinviljelyssä merkittävimpiä muuttujia on kasvin ominaismetaanintuotto. Viljelyn energiankulutukseen vaikuttaa ratkaisevasti väkilannoitteiden tarve, mikäli kasvin tuotanto ei tapahdu prosessijäännöksen ravinteita kierrättäen. Mikäli ravinteita ei kierrätetä, nousee myös hehtaarisato erittäin vaikuttavaksi tekijäksi. Kasvimassan ja prosessijäännöksen kuljetukset eivät ole energiataseteseen käytännössä merkittävästi vaikuttavia maatilakokoluokan laitoksessa.

Biokaasuprosessissa laitoksen lämpötalous vaikuttaa eniten energiataseteseen. Lämmön käyttöä voidaan tehostaa suurella reaktorikoolla ja korkealla kuormituksella. Prosessilämpötilan suhteen olisi löydettävä optimaalinen tilanne kaasuntuoton ja lämmityspaneelin suhteen.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Agrimarket 2006: Työkoneet. – Viitattu 14.9.2006

Amon, T., Amon, B., Kryvorucho, V., Machmuller, A., Hopfner, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E., Wagentristsl, H., Scheiner, M & Zollitsch, W. 2006: Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* (2006), doi:10.1016/j.biortech. 2006.07.007 [painossa]

Asplund, D., Korppi-Tommola, J. & Helynen S. 2005: Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015. Kauppa- ja teollisuusministeriön selvityksiä ja raportteja. Kestävä kehitys ja ympäristö.

Axaopoulos, P., Panagakis, P., Tsavdaris, A. & Georgakakis D. 2001: Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester. *Solar energy*, 70: 155-164

Babel, S., Fukushi, K. & Sitanrassamee, B. 2004: Effect of acid speciation on solid waste liquefaction in an anaerobic acid digester. *Water Research*, 38: 2417-2423.

Baky, A., Hansson, P-A., Noren, O. & Norberg, Å. 2002: "Grön tractor" Alternativa drivmedel för det ekologiska lantbruket. *Lantbruk & Industri*, 302. Uppsala, S.

BABFO 2005: Memorandum from the British Association for biofuels and Oils. http://www.biodiesel.co.uk/press_release/royal_commission_on_environmenta.htm – Viitattu 18.12.2006

Berglund, M. & Börjesson P. 2003: Energianalys av biogassystem. Lunds tekniska högskola, Institution för teknik och samhälle. Lund, Sverige

Berglund, M. 2006: Biogas production from system analytical perspective. *Environmental and energy system studies*, Lund University, Lund ,Sweden

Berglund, M. & Börjesson P. 2006: Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy* 30: 254-266

Bouwman, A.F. 1996: Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient cycling in agroecosystems* 46: 53-70

Börjesson, P. 1996: Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy* 11: 305-318

Börjesson, P. 1999: Effects of energy crop cultivation in Sweden. I –Identification and quantification. *Biomass and Bioenergy* 16: 137-154

- Börjesson, P & Berglund, M 2006: Environmental system of biogas systems-Part I: Fuel cycle emissions. *Biomass and Bioenergy* 30: 469-485
- Chynoweth, D. P., Owens, J. M. & Legrand, R. 2001: Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy* 22: 1-8
- Coldberg, P. 1988: Anaerobic microbial degradation of cellulose, lignin, oligolignols and monoaromatic lignin derivatives. Teoksessa Zehnder, A. (toim.): *Biology of Anaerobic Microorganisms* s. 333-372. Wiley, USA.
- CROPGEN. 2005a: Deliverable 15: Large scale energy balance – interim version. University of Southampton. Southampton, UK.
- CROPGEN. 2005b: Deliverable 14: An accurate energy balance for the AD of selected crops. University of Southampton. Southampton, UK.
- Delgenes, J. P., Penaud, V. & Moletta, R. 2003: Pretreatments for the enhancement of anaerobic digestion of solid wastes – Teoksessa Mata-Alvarez, J. (toim.): *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes* s. 201-228, Padstow, Cornwall, UK.
- Edwards, R., Griesemann, J.C., Larive, J.F. & Mahieu, V. 2003: Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. EU-CAR, CONCAWE and JRC/IEA.
- EECI 1999: European Energy Crops InterNetwork. Country report Denmark. <http://www.eeci.net/countries/DK.html> – Viitattu 18.12.2006
- Egg, R., Coble, C., Engler, C. & Lewis, D. 1993: Feedstock storage, handling and processing. *Biomass Bioenergy* 5: 71-94.
- Euroopan parlamentti 2003: Direktiivi 2003/30/EY liikenteen biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti 123/42
- Esala, M. 1998: Typen ympäristöhaitat ja lannoitus. Maatalouden tutkimuslaitoksen julkaisu, sarja A 40: 83–90, Jokioinen.
- Evira 2006: Viljelystarkastajan käsikirja. Elintarviketurvallisuusvirasto Evira, Helsinki.
- FAL 2005: Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Gülzow, Germany
- FAT 2006: FAT Traktor Testberichte. <http://www.fat.admin.ch/d/publi/tbon/index.html> –Viitattu 24.8.2006.

- Fischer, T. 2007: Suullinen tiedonanto 9.6.2007
- Fredrikson, H., Baky, A., Bernesson, S., Noberg, Å., Norén, O., Hansson 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.
- Friedt, W. 2005: Plant breeding potential to improve energy crops for the use in biogas. Cropgen Utrecht 2005. http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/Dokumente/utrecht/Wolfgang_Friedt.pdf –viitattu 9.8.2006
- FvB 2006: The German biogas industry. <http://www.renewables-made-in-germany.com/en/biogas/> -Viitattu 2.8.2006.
- Garcia-Heras, J. L. 2003: Reactor sizing, process kinetics and modeling of anaerobic digestion of complex wastes. . – Teoksessa Mata-Alvarez, J. (toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes s. 201-228, Padstow, Cornwall, UK.
- Grönroos, J. & Voutilainen, P. 2001: Maatalouden tuotantotavat ja ympäristö – Inventaarioanalyysin tulokset. Suomen Ympäristökeskus 231, Helsinki.
- Gujer, W., & Zehnder, A. B. J. 1983: Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Science & Technology* 15: 127-167.
- Hartikainen, H 1992: Maatalous ja ympäristönsuojelu. – Teoksessa Heinonen, R. (toim.): Maa, viljely ja ympäristö. s. 301-334, WSOY, Helsinki.
- Hartmann, H., Angelidaki, I. & Ahring, B. K. 2003: Co-digestion of the organic fraction of municipal waste with other waste types. – Teoksessa Mata-Alvarez, J. (toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes s. 201-228, Padstow, Cornwall, UK.
- Hobson, P. N. & Wheatley, A. D 1993: Anaerobic digestion: Modern theory and practice. Elsevier applied science, London, UK.
- Holliday, L., Chesshire, M., Mulliner, R. 2005: Ryegrass as a energy crop using biogas technology. DTI new and renewable energy programme, Future energy solutions, UK.
- Hons, F. M., Cothren, J. T., Vincent, J. C. & Erickson N. L. 1993: Land application of sludge generated by the anaerobic fermentation of biomass to methane. *Biomass and Bioenergy*, 5: 289-300.
- Hyytiäinen, T., Hedman-Partanen, R. & Hiltunen, S. 1995: Kasvintuotanto 2. Kirjayhtymä Oy, Helsinki.

- Ilmatieteen laitos 2007: Keskiarvokartat 1971-2000.
http://www.fmi.fi/saa/tilastot_146.html – Viitattu 06.08.2007
- IPCC 2001: Climate change 2001: The scientific basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jarvis, Å. 1996: Evaluation of silage fed biogas process performance using microbiological and kinetic methods. Swedish university of agricultural sciences, Uppsala Genetic center, Uppsala, Sweden.
- Kaparaju, P. 2003: Enhancing methane production in a farm-scale biogas production system. Jyväskylä studies in biological and environmental sciences 124. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä
- Katajajuuri, J.-M., Loikkanen, T., Pahkala, K., Uusi-Kämppe, J., Voutilainen, P., Kurppa, S., Laitinen, P., Mikkola, H., Kivinen, T. & Salo, S. 2000: Ympäristöhallintaa tukevan tietopohjan kehittäminen osana maatalojen laatujärjestelmää. Case: Rehuohran elinkaariarviointi. VTT tiedotteita 2034. VTT, Espoo.
- Lamminen, P, Isolahti, M & Huuskonen, A. 2005: Turvesoiden jatkokäyttö kotieläintuotannossa. MTT:n selvityksiä 101, MTT, Jokioinen.
- Lampinen, A. 2003: Jätteiden liikennekäyttöpotentiaali Suomessa. Kuntatekniikka 1/2003. s. 31-34.
- Lehtomäki, A., Viinikainen, T. A. & Rintala, J. A. 2006: Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. manuscript.
- Lehtomäki, A 2006: Biogas production from crops and crop residues. Jyväskylä studies in biological and environmental sciences 163. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä
- Lindorfer, H., Kirchmayr, R. & Braun, R. 2005: Self-heating of anaerobic digesters using energy crops. ADSW 2005 Conference proceedings Vol. 1: 511-518. Copenhagen, Denmark.
- Luger, E 1999: Scenario's for the potential contribution of energy crops in Austria in 2010. European Energy Crops InterNetwork.
<http://www.eeci.net/archive/biobase/B10647.html> – Viitattu 18.12.2006
- Mata-Alvarez, J., Mace, S., & Llabres P. 2000: Anaerobic digestion organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresource Technology 74: 3-16.
- Mata-Alvarez, J. 2003: Fundamentals of the anaerobic digestion process. – Teoksessa Mata-Alvarez, J. (toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes s. 201-228, Padstow, Cornwall, UK.

- MK Protech 2005: Biokaasun hyötykäyttömuotojen kannattavuusselvitys. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy.
- Moo-Young, M., Moreira, A., Daugulis, A. & Robinson, C. 1978: Bioconversion of agricultural wastes into animal feed and fuel gas. *Biotechnology and Bioengineering Symp. No. 8*: 205-218.
- Mulliner, R. 2006: Suullinen tiedonanto 29.9.2006
- Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. 2006: Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. VTT tiedotteita 2357. Edita Prima Oy, Helsinki 2006
- Nilsson, M. 2001: Livscykelinventering för biogas som fordonsbränsle. SGC rapport 117. Svenskt gastekniskt center AB.
- Nordberg, Å. & Edström, M. 1997: Co-digestion of ley crop silage, straw and manure. Swedish institute of agricultural engineering. Uppsala, Sweden.
- Nousiainen, J. 2007: Nurmirehun säilöntämenetelmät. Artturipassi-aineisto, MTT. https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/Artturi/Artturikirjasto/Artturikoulutus/ArtturiPassi_aineisto/ – Viitattu 3.7.2007
- Nurmiyhdistys 2006: Nurmien osuus maatalousmaasta. <https://portal.mtt.fi/pls/portal/docs/PAGE/AGRO-NET/HTML/NURMIYHDISTYS/tilastokuva1.html> – Viitattu 13.9.2006
- Oak Ridge National Laboratory 2006: Biomass Resource Estimates. <http://bioenergy.ornl.gov/main.aspx> – Viitattu 18.12.2006
- Pahkala, K., Isolahti, M., Partala, A., Suokannas, A., Kirkkari, A-M., Peltonen, M., Sahramaa, M., Lindh, T., Paappanen, T., Kallio, E. & Flyktman, M 2005: Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotantoa varten. 2. korjattu painos. Maa- ja elintarviketalous 1. MTT tietopalvelut, Jokioinen.
- Pimentel, D. 1980: Handbook of energy utilization in agriculture. CRC press, Florida, US.
- Pohland, F. G. 1992: In desing of anaerobic process for the treatment of industrial and municipal wastes. *Water Quality management, Vol. 7*. Technomic Publishing Co. Lancaster, UK.
- Quirin, M., Gärtner S. O., Pehnt, M. & Reinhardt G. A. 2004: CO₂ Mitigation through Biofuels in the Transport Sector. Heidelberg, Germany.

- Ramirez, C.A. & Worrel, E. 2005: Feeding fossil fuels to the soil An analysis of energy embedded and technological learning in the fertilizer industry. *Resources, conservation and recycling* 46: 75-93.
- Salter, A. 2006: Evaluation of plant species for higher biomass production. <http://www.cropgen.soton.ac.uk/publication/Seville05CUC.pdf> – Viitattu 01.08.2007.
- Sanders, W. T. M., Veeken, A. H. M., Zeeman G. & van Lier, J. B. 2003: Analysis and optimization of the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. – Teoksessa Mata-Alvarez, J. (toim.): *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes* s. 201-228, Padstow, Cornwall, UK.
- Seungdo, K. & Bruce, E. D. 2005: Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain: nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions. *Biomass & Bioenergy* 28: 475-489
- Stroot, P. G., McMahon, K. D., Mackie, R. I. & Raskin, L. 2000: Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions. I. Digester performance. *Water Research* 35: 1804-1816
- Swedish Environmental Protection Agency 1998: *The agriculture of the Future*. In English. Ordering no. 9842, Stockholm
- Taconi, K. A. 2004: *Methanogenic generation of biogas from synthesis gas fermentation wastewaters*. Mississippi State University. MS, US.
- Tchobanoglous, G. & Burton F. L. 1991: *Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, Reuse*. 3rd edition. Metcalf & Eddy Inc. Singapore.
- Tilastokeskus 2005a: *Polttoaineluokitus, Kasvihuonekaasut*.
- Tilastokeskus 2005b: *Energia raportti 2004*.
- Tilastokeskus 2006: *Kotimainen sähkön ja lämmön tuotanto tuotantomuodoittain 2004*. http://www.stat.fi/til/salatuo/2004/salatuo_2004_2006-06-16_tie_001.html – Viitattu 26.10.2006.
- Tolppa, R., Eklund, S. & Hiltunen S. 2002: *Ravinnetase – ravinnehuollon tehokkuuden mittari*. ProAgria, Pirkanmaan maaseutokeskus.

- Vainio-Mattila, B., Ginström, T., Haaranen, T., Luomanperä, S., Lähdetie, P., Oravuo, M., Pietola, K., Suojanen, M., Virolainen, J., Knuutila, K., & Ovaska, S., 2005: Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa. Raportti 2005:15, Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki
- Valtioneuvosto 2000: Valtioneuvoston asetus maataloudesta peräisin olevien nitraattien vesiin pääsyn rajoittamisesta. Valtioneuvoston säädös 931/2000
- Vandevivere, P., De Baere, L. & Verstraete, W. 2003: Types of anaerobic digester for solid wastes. – Teoksessa Mata-Alvarez, J. (toim.): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes s. 201-228, Padstow, Cornwall, UK.
- Vapo 2006: Ruokohelvestä nopeasti uusiutuvaa energiaa.
http://www.vapo.fi/fin/kunta_ja_yritysasiakkaat/biopolttoaineet/peltoenergia/ruokohelpi/ - Viitattu 31.5.2006
- Walsh, J., Ross, C., Smith, M., Harper, S. & Wilkins W. 1988: Biogas utilization manual. Georgia Tech Research institute, Georgia, US.
- 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., Rieger, C. & Ehrmann, T. 2003: Evaluation of the newest biogas plants in germany with respect to renewable energy production, greenhouse gas reduction and nutrient management. –Teoksessa: The future of biogas in Europe 2, 122 s. Esbjerg, Denmark.
- Weiland, P. 2005: Results and bottlenecks of energy crop digestion plants – required process technology innovations. http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/Dokumente/utrecht/Peter_Weiland.pdf –Viitattu 27.7.2006
- Wihersaari, M. 1996: Biopolttoaineet ja ympäristö. Tutkimuksia ja raportteja 17/1996. Kauppa- Teollisuusministeriö.
- Ympäristöministeriö 2002: Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto, Helsinki.
- Zubr, J. 1986: Methanogenic fermentation of fresh and ensiled plant materials. Biomass 11: 159-171.
- Örtenblad, H. 1999: The use of digested slurry within agriculture. Herning Municipal Utilities, Denmark.
<http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d9manu.pdf> – Viitattu 3.8.2006