

Pro gradu –tutkielma

**Biokaasua maissista – lajikkeen vaikutus
energiasaantoon sekä maissin ja lehmän lietelannan
yhteiskäsittely biokaasureaktorissa**

Ville Pyykkönen



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

15.12.2009

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

PYYKKÖNEN VILLE-AKUSTI:

Biokaasua maissista – lajikkeen vaikutus energiasaantoon sekä maissin ja lehmän lietelannan yhteiskäsittely biokaasureaktorissa

Pro gradu:

39 s.

Työn ohjaajat:

FM Mari Seppälä, Prof. Jukka Rintala

Tarkastajat:

Prof. Jukka Rintala, FT Sari Luostarinen

Joulukuu 2009

Hakusanat: biokaasu, CSTR, energiakasvi, energiasaanto, lietelanta, maissi, metaanipotentiali, metaanintuotto, yhteiskäsittely

TIIVISTELMÄ

Peltoenergiakasveilla tulisi olla mahdollisimman suuri hehtaarikohtainen nettoenergiasaanto. Maissi (*Zea mays ssp. mays*) on Keski-Euroopassa metaanisaannoltaan paras peltoenergiakasvi. Tässä työssä tutkittiin kuuden Piikkiössä (Etelä-Suomi) ja yhden Laukaassa (Keski-Suomi) v. 2008 kasvatetun maissilajikkeen, lehmän lietelannan sekä v. 2007 valmistetun maissisäilörehun metaanipotentialit panoskokeilla sekä v. 2008 kasvatettujen maissien hehtaarikohtaiset bruttoenergiasaannot. Lisäksi tutkittiin yhden maissilajikkeen ja lehmän lietelannan yhteistä metaanintuottoa maissin eri syötemäärillä ja kuormitustasoilla laboratoriossa mesofiilisessa lämpötilassa (35 °C) jatkuvatoimisilla täyssekoitteisilla reaktoreilla (CSTR). Piikkiössä kolme myöhäisintä energiamaissilajiketta tuottivat korkeimmat hehtaarikohtaiset bruttometaanisaannot (48-55 MWh/ha). Kolmella aikaisemmalla lajikkeella hehtaarikohtainen metaanisaanto oli 38-41 MWh/ha. Parhaan lajikkeen (Valdez) hehtaarikohtainen metaanisaanto oli 45 % korkeampi kuin huonoimmalla lajikkeella. Laukaassa aikaisen Revolver-rehumaissilajikkeen hehtaarikohtainen metaanisaanto (21 MWh/ha) oli 45-62 % pienempi kuin Piikkiön lajikkeilla. Piikkiössä ja Laukaassa eri lajikkeiden metaanipotentialit olivat 236-370 NI CH₄/kg VS. Lajikkeen kypsyysluokitus ei vaikuttanut VS-kohtaiseen metaanipotentialiin. Tässä tutkimuksessa Etelä-Suomessa maissin bruttoenergiasaanto oli suurempi kuin toisessa tutkimuksessa esim. ruokohelpillä. Keski-Suomessa esim. nurmikasvit saattavat olla maissia parempia biokaasukasveja. Reaktorikokeissa suurin metaanintuotto (259 NI CH₄/kg VS) saavutettiin, kun lehmän lietelannan ja maissin VS-suhde syötteessä oli 60:40 ja orgaanisen aineen kuormitus (OLR) 2 kgVS/m³/d. Tällöin saavutettiin 95 % panoskokeissa mitatusta syötteen metaanipotentialista. Optimaalisella kuormituksella myös prosessijäännöksen jälkikaasutuspotentiali on pienin. Suuremmilla maissin VS-osuuksilla ja OLR:lla metaanintuotto oli vähäisempää. Metaanintuotto onnistui (234 NI CH₄/kg VS) myös maissin 60 % VS-osuudella ja 2,5 kgVS/m³/d OLR:lla.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science

Department of Biological and Environmental Science
Environmental Science

PYYKKÖNEN VILLE-AKUSTI:

Biogas production from maize – effect of maize variety on energy yield and co-digestion of maize with cow slurry

Master of Science Thesis: 39 p.

Supervisors: MSc Mari Seppälä, Prof. Jukka Rintala

Inspectors: Prof. Jukka Rintala, PhD Sari Luostarinen

December 2009

Key Words: biogas, slurry, CSTR, energy crop, energy yield, maize, methane potential, methane yield

ABSTRACT

Energy crops should have a high net energy yield per hectare. Maize (*Zea mays ssp. mays*) has the highest methane potential per hectare in Central Europe. In this study specific methane yield of six maize varieties in Piikkiö (Southern Finland) and one variety in Laukaa (Central Finland) grown in 2008, and cow slurry, and maize silage after one year of storage was determined. Also methane yields per hectare were determined for varieties grown in 2008. The co-digestion of cow slurry and maize with contrasting VS proportions in the feedstock and organic loading rates (OLRs) was evaluated with laboratory scale continuously stirred tank reactors (CSTRs) in mesophilic (35 °C) temperature. In Piikkiö, highest methane yields per hectare (48-55 MWh/ha) were attained with three of the latest ripening varieties. The three earlier maturing hybrids yielded 38-41 MWh/ha. In Piikkiö, the best maize variety (Valdez) yielded 45 % more methane per hectare than the lowest yielding variety. In Laukaa, the early maturing silage maize variety yielded 21 MWh/ha, which was 45-62 % less than the methane yields per hectare with the varieties grown in Piikkiö. In Piikkiö and Laukaa, the specific methane yields varied between 236 and 370 Nl CH₄/kg VS. The maturity classification of the varieties did not have an effect on the specific methane yield. In Southern Finland, methane yields per hectare were higher than yields attained with e.g. reed canary grass in other study. In Central Finland, e.g. grasses may be more suitable than maize for biogas production. In the co-digestion of cow slurry and maize, highest specific methane yield (259 Nl CH₄/kg VS) was obtained with 40 % of maize in the feedstock VS, with OLR of 2 kgVS/m³/d. This methane yield corresponded to 95 % of the methane potential in the substrates as determined by batch assays. With this optimal loading rate, the post-methanation potential of the digestate was the lowest. With higher proportions of maize in the feedstock and higher OLRs, the methane production decreased. Methane production was feasible (234 Nl CH₄/kg VS) with up to 60 % of maize in the feedstock VS with 2,5 kgVS/m³/d OLR.

YKSIKÖT JA LYHENTEET

m	milli, 10^{-3}
k	kilo, 10^3
M	mega, 10^6
a	vuosi
d	vuorokausi
°C	Celciusaste
°C vrk	astepäivä
CH ₄	metaani
CO ₂	hiilidioksidi
CSTR	continuously stirred tank reactor, jatkuvatoiminen täyssekoitteinen reaktori
FAO-luku	maissin kypsymisnopeutta kuvaava luku
g	gramma
h	tunti
ha	hehtaari
HRT	hydraulic retention time, hydraulinen viipymä
l	litra
m	metri
NH ₄ -N	ammoniumtyppi
NI	normilitra (273 K, 1,013 bar)
Nm ³	normikuutiometri (273 K, 1,013 bar)
Ntot	total nitrogen, kokonaistyyppi
OLR	organic loading rate, orgaanisen aineksen kuormitus
SCOD	soluble chemical oxygen demand, liukoinen kemiallinen hapenkulutus
t	tonni
TS	total solids, kuiva-aine
VFA	volatile fatty acids, haihtuvat rasvahapot
VS	volatile solids, hehkutusjäännös, orgaaninen kuiva-aine
W	watti
Wh	wattitunti
ww	wet weight, märkäpaino, tuorepaino

Sisältö

1. JOHDANTO.....	6
2. TUTKIMUKSEN TAUSTA.....	7
2.1. Anaerobihajoamisen perusteet	7
2.2. Anaerobihajoamisen parametrit	8
2.3. Energiamaissin jalostus ja tuotanto	9
2.3.1. Maissin fenologia ja lämpötilavaatimukset	9
2.3.2. Energiamaissin jalostus	10
2.3.3. Maissin kemiallisen koostumuksen ja korjuuajankohdan vaikutus metaanisaantoon	11
2.3.4. Energiamaissin hehtaarikohtaiset metaanisaannot Keski-Euroopassa	12
2.3.5. Maissin tuotanto Suomessa	12
2.4. Ympäristömyötäinen energiamaissin tuotanto	17
2.5. Maissin ja lehmän lietalannan yhteiskäsittely biokaasureaktorissa	18
3. AINEISTO JA MENETELMÄT.....	19
3.1. Kokeen viljelyalueet, sääolosuhteet ja maissipellon kastelu.....	19
3.2. Maissilajikkeet, viljelytiedot ja näytteenotto.....	19
3.3. Metaanipotentialikokeet	20
3.4. Reaktorikokeet.....	20
3.5. Analyysit ja laskelmat	21
4. TULOKSET	22
4.1. Maissilajikkeiden ja lietalannan ominaisuudet ja metaanipotentialit	22
4.2. Maissilajikkeiden sadot ja hehtaarikohtaiset metaanisaannot	25
4.3. Maissin ja lietalannan yhteiskäsittely biokaasureaktoreissa	25
5. TULOSTEN TARKASTELU	31
5.1. Metaanipotentialit ja hehtaarikohtaiset metaanisaannot.....	31
5.2. Biokaasureaktorin optimaalinen kuormitus.....	33
6. JOHTOPÄÄTÖKSET.....	34
Kiitokset	36
Kirjallisuus	37

1. JOHDANTO

Suomessa bioenergian tuotanto on perustunut suurimmaksi osaksi metsästä saatavaan biomassaan. Viime vuosina esille on noussut myös bioenergian tuotanto peltobiomassasta. Peltobiomassan tuotannon ja käytön kehittäminen on osin alkuvaiheessa, koska nykyiset viljelykasvit on jalostettu ruuan ja rehun tuotantoon. Peltobiomassojen energiakäytöllä tarkoitetaan ensisijaisesti pellolla kasvatettavien kasvituotteiden käyttämistä kokonaan tai osittain energian tuotantoon. Toistaiseksi käyttötavoista yleisin on ollut tuotetun biomassan (esimerkiksi ruokohelpi ja olki) suora poltto sähkön tai lämmön tuotannossa. Jatkossa kuitenkin tämän käyttötavan rinnalla lisääntyvät muut energian tuotantomenetelmät, kuten biomassan käyttö biokaasun tuotannossa.

Peltoenergian tuotanto tarjoaa uuden käyttötarkoituksen kesantomaille, elintarviketuotannosta poistuville maille sekä ylituotannossa ja vuoroviljelyssä tuotetulle kasvibiomassalle. Energiakasvien tuotanto lisää energiantuotannon monipuolisuutta, kotimaisuutta ja vähentää uusiutumattomien luonnonvarojen kulutusta. Suomessa kasvukausi pitenee ilmaston lämmitessä ja nykyistä satoisampien lajien (esim. maissi) sekä lajikkeiden viljely energiantuotantoa varten tulee mahdolliseksi.

Kasvibiomassa soveltuu hyvin biokaasun tuotantoon. Biokaasun tuotanto on useissa tutkimuksissa todettu tehokkaaksi tavaksi tuottaa kasveista sähköä, lämpöä ja liikenteen biopolttoainetta. Biokaasusta jalostettu metaani on arvokasta liikenteen biopolttoainetta. Tuotantoprosessi on melko yksinkertainen ja kuluttaa vähemmän energiaa verrattuna moniin muihin biopolttoaineiden tuotantotapoihin. Biokaasun tuotannossa voidaan hyödyntää kaikki kasvinosat kuten nurmi- ja maissikasvustot sekä kasvijätteet (oljet, sokerijuurikkaan naatit), toisin kuin muiden liikenteen biopolttoaineiden tuotannossa (esim. etanolin tuotannossa ohran jyvät, biodieselin tuotannossa rypsin siemenet). Tästä johtuen energiasaannot hehtaaria kohti ovat korkeampia kuin ensimmäisen sukupolven biopolttoaineilla (bioetanolin ja biodieselin) (Tuomisto & Helenius 2008). Biokaasuprosessissa syntyvän lopputuotteen hyödyntäminen kasvien viljelyssä lannoitteena vähentää kemiallisten lannoitteiden tarvetta. Tämä parantaa erityisesti energiakasvien tuotannon energiatasetta ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä (Gerin ym. 2008). Tällöin saavutetaan myös lähes täydellinen ravinteiden kierto.

Saksassa biokaasulaitosten lukumäärä lisääntyi vuoden 1995 274:stä (Schittenhelm 2008) n. 4000:ään v. 2008 (Weiland 2009). Tätä kehitystä edisti vuoden 2000 Uusiutuvien energialähteiden laki (EEG) ja erityisesti sen muutos vuonna 2004 (Schittenhelm 2008). Maissi on korkean hehtaarikohtaisen metaanisaannon sekä helpon koneistamisen ja maatalaorganisaatioon integroimisen vuoksi Keski-Euroopan olosuhteissa erittäin kilpailukykyinen energiakasvi (Schittenhelm 2008). Saksassa n. 90 % biokaasulaitoksista käyttää maissia ainakin yhtenä substraattinaan (Amon ym. 2007).

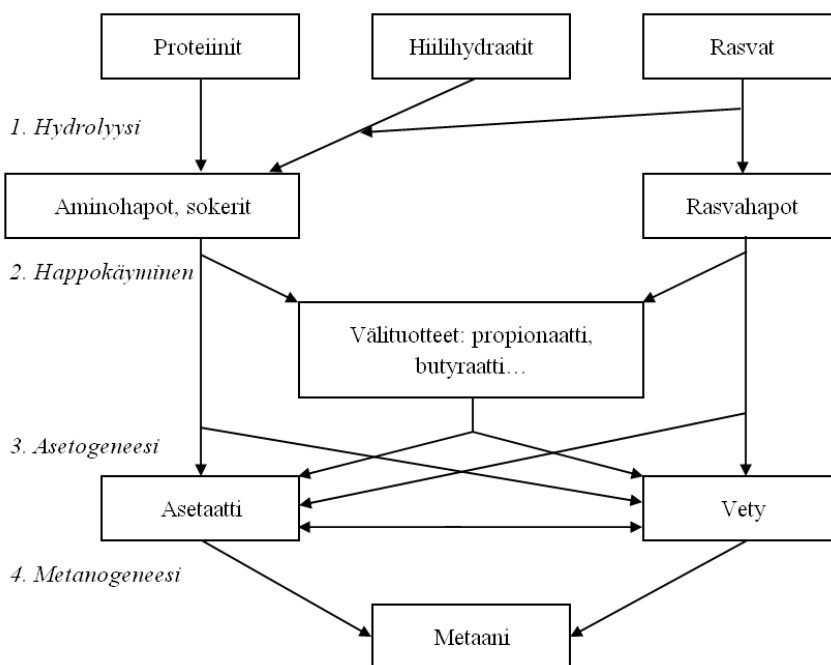
Biokaasukäytön myötä lisääntyntä maissin viljelyä on myös arvosteltu siihen liittyvien ympäristövaikutusten vuoksi (Kruska & Emmerling 2008). Maissin monokulttuurista seuraavaa eroosiota pidetään eräänä kriittisimmistä tekijöistä (Böhmel 2008). Muita vaikutuksia ovat ravinteiden huuhtoutuminen ja N₂O-päästöt ilmakehään, tuholaiset ja rikkakasvit ja niiden torjunnasta seuraava pestisidikontaminaatio sekä biodiversiteetin väheneminen (Finke ym. 1999, Kauter & Claupein 2004, Tan ym. 2009).

Suomessa maissinviljelyyn sopivana alueena on pidetty eteläisintä rannikkoa aina Vaasan korkeudelle asti (Laine 2009a). Energiamaissin jalostus ja ilmastonmuutos parantavat maissin viljelymahdollisuuksia Suomessa.

2. TUTKIMUKSEN TAUSTA

2.1. Anaerobihajoamisen perusteet

Anaerobihajoaminen on mikrobiologinen prosessi, jossa orgaaninen kuiva-aine (VS) hajoaa hapettomassa tilassa. Prosessissa muodostuva biokaasu on palava kaasu, joka koostuu lähinnä metaanista (CH_4 , n. 65 %) ja hiilidioksidista (CO_2 , n. 35 %) (Mata-Alvarez 2003, Al-Seadi 2008). Biokaasun lisäksi anaerobihajoamisen lopputuotteena on lietemäinen prosessijäännös. Biokaasun muodostus on ketjumainen prosessi, jossa erityyppiset mikrobit hajottavat orgaanista ainesta vaiheittain (Al-Seadi 2008). Anaerobihajoamisen päävaiheet ovat hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi (Kuva 1).



Kuva 1. Orgaanisen aineksen anaerobihajoamisen vaiheet (Gujer & Zehnder 1983, Siegrist ym. 1993).

Eri prosessivaiheet tapahtuvat biokaasureaktorissa samanaikaisesti. Hajoamisnopeus määräytyy hajoamisketjun hitaimman reaktion mukaan. Kasvimassaa käsittelevissä biokaasulaitoksissa hydrolyysi on hajoamisnopeuden määrittävä vaihe (Al-Seadi 2008). Hydrolyyttiset organismit hajottavat pitkäketjuisia polymeereja (proteiineja, hiilihydraatteja ja rasvoja) monomeerisiksi yhdisteiksi (aminohapoiksi, sokereiksi, rasvahapoiksi) (Pohland 1992). Happokäymisen aikana asidogeeniset bakteerit muuntavat hydrolyysituotteet asetaatiksi, CO_2 :ksi, vedyksi sekä haihtuviksi rasvahapoiksi (VFA) ja alkoholeiksi (Al-Seadi 2008). Asetogeneesissa happokäymisen tuotteet (yli kaksi hiiliatomia sisältävät VFA:t ja alkoholit) hapettuvat metanogeenisiksi substraateiksi kuten asetaatiksi, vedyksi ja CO_2 :ksi.

Metanogeenien muodostamasta CH_4 :sta 70 % on peräisin asetaatista ja 30 % vedystä ja CO_2 :sta. Metanogeneesiin vaikuttavat suuresti prosessiolosuhteet. Esimerkiksi prosessisyötteen koostumus ja syöttötiheys, prosessin lämpötila ja pH vaikuttavat metanogeneesiin. Biokaasureaktorin ylikuormitus, lämpötilan muutokset tai suuri hapen määrä reaktorissa voivat keskeyttää metanogeenin (Al-Seadi 2008).

2.2. Anaerobihajoamisen parametrit

Anaerobihajoaminen voi tapahtua psykoofiilissa (alle 25 °C), mesofiilissä (25-45 °C) tai termofiilissä (45-70 °C) olosuhteissa (Al-seadi 2008). Yleisimmin biokaasulaitoksissa käytetyn mesofiilisen prosessin optimilämpötila on yleensä 35 °C (Rittman & McCarty 2001).

Biokaasulaitoksen perustamisessa ja käytössä tulee huomioida taloudellisia ja teknisiä näkökohtia. VS:n maksimaalinen hajoaminen ja maksimaalinen biokaasun tuotto vaatisi pitkän ajan ja vastaavasti suuren reaktorin. Käytännössä reaktorin koko ja tyyppi sekä substraatin viipymä reaktorissa valitaan niin, että saadaan tuotettua taloudellisesti mahdollisimman paljon metaania (Al-Seadi ym. 2008).

Biokaasureaktorin mitoituksessa tärkeä tekijä on hydraulinen viipymä (HRT). HRT (esim. päiviä, d) on aika, jonka hajotettava materiaali keskimäärin viipyy reaktorissa. HRT on reaktorin tilavuudesta (V, esim. m³) ja aikayksikössä reaktorin sisään ja sieltä ulos virtaavan substraatin tilavuudesta (Q, esim. m³/d) riippuvainen ($HRT = V/Q$). HRT:n tulee olla tarpeeksi pitkä, jotta reaktorista poistettavan prosessijäännöksen mukana ei poistu enemmän anaerobihajottajia, kuin niitä ehtii prosessissa muodostua. Anaerobisten bakteerien kahdentumisaika on yleensä 10 d tai enemmän. Mesofiilisessä prosessissa HRT on yleensä vähintään 30-40 d (Al-Seadi ym. 2008). Saksassa täyden mittakaavan biokaasulaitoksissa HRT vaihteluväli on <30 - >150 d, yleisimmin kuitenkin 60-90 d (Weiland 2006).

VS:n kuormitus (OLR, esim. kg VS/m³/d) on myös tärkeä operationaalinen parametri. OLR määräytyy aikayksikössä reaktoriin syötettävän aineen massan (m, esim. kg/d), massan VS-pitoisuuden (c) ja reaktorin tilavuuden (V) mukaan ($OLR = m \cdot c / V$) (Al-Seadi ym. 2008). Saksalaisissa biokaasulaitoksissa OLR on yleensä 1,0-4,0 kg VS/m³/d (Weiland ym. 2004) ja itävaltalaisissa laitoksissa mediaani-OLR on 3,39 kg VS/m³/d (Laaber ym. 2005). Metaanintuotto ilmaistaan yleensä lisättyä VS:sta kohti NTP-olosuhteissa (Nm³ CH₄/kg VS, Nm³ CH₄/t VS).

Mesofiilissä olosuhteissa anaerobiprosessin optimi-pH on 6,5-8,0. VFA-pitoisuuden kasvaminen pienentää pH-arvoa. Tärkein biokaasureaktorin pH-arvoa kontrolloiva tekijä on bikarbonaatti-puskurisysteemi. Jos puskurointikapasiteetti ylittyy, pH-arvo voi muuttua suuresti, minkä seurauksena anaerobihajotus inhiboituu (Al-Seadi ym. 2008).

Anaerobiprosessin vakautta voidaan arvioida välituotteiden, kuten VFA-pitoisuuden tarkkailun avulla. VFA:n kertyminen prosessiin ei aina laske pH:ta reaktorin puskurointikyvyn ansiosta. Kaksi eri reaktoria voi toimia aivan erilailla samanlaisella VFA-pitoisuudella: toisessa tietty pitoisuus voi olla optimaalinen ja toisessa aiheuttaa inhibitiota (Al-Seadi ym. 2008). pH:n tulisi olla yli 6,6, koska orgaaniset hapot (kuten VFA:t) voivat välituotteina laskea pH:ta nopeasti ja keskeyttää metaanintuoton prosessin käynnistyksessä, ylikuormituksessa tai muussa häiriötilanteessa. Jos puskurointikyky ylitetään, voidaan joutua lisäämään nopeasti kemiallista emästä, ettei pH:n aleneminen tuhoaisi metanogeenipopulaatiota (Rittman & McCarty 2001).

Anaerobiprosessin reaktioiden inhibiatio tai orgaanisen aineksen ylikuormitus ilmenee VFA-pitoisuuden äkillisenä kohoamisena. (Rittman & McCarty 2001). Anaerobiprosessin häiriöt vaikuttavat lähinnä metanogeeneihin (Taulukko 1), kun taas häiriötekijöitä paremmin kestävät asidogeeniset (happokäymisestä vastaavat) bakteerit tuottavat edelleen happoja. Nämä hapot puolestaan inhiboivat metanogeenien toimintaa (Mata-Alvarez 2003).

Taulukko 1. Mahdollisia häiriöitä ja häiriöiden vaikutuksia biokaasureaktorissa (Mata-Alvarez 2003).

Häiriötekijä	Seuraus	Lopullinen vaikutus (ellei prosessin epäonnistuminen)
HRT:n lyhentäminen	Mikro-organismien huuhtoutuminen pois prosessista. Metanogeenit altteimpia, koska niillä on pitkä kahdentumisaika	<i>Pienenevät:</i> Biokaasun CH ₄ -% pH CH ₄ -tuotto Alkaliteetti
Syötteen pitoisuuden kasvattaminen (ylikuormitus)	Prosessin epätasapaino, mikä vaikuttaa lähinnä metanogeeniin, mistä seuraa VFA:n kertyminen prosessiin	<i>Kasvat:</i> VFA-pitoisuudet Muiden happojen kuin etikkahapon pitoisuudet
Toksisia yhdisteitä prosessiin		
Lämpötilan vaihtelut		
Altistuminen hapelle		

Esim. reaktoriin syötettävän lietelannan sisältämä ammoniakki, jota muodostuu proteiinien hajotessa, lisää puskurointikykyä. Toisaalta metanogeenit ovat herkkiä korkeille ammoniakkipitoisuuksille. Vapaan (inonisoitumattoman) ammoniakin pitoisuus tulisi olla alle 80 mg/l:ssa. Vapaan ammoniakin osuus on sitä suurempi, mitä suurempi on reaktorin lämpötila ja pH (Al-Seadi ym. 2008).

Mikrobit voivat adaptoitua reaktorin syötteen vaatimiin olosuhteisiin. Adaptoituminen voi vaatia jopa kuukausia (Lindorfer ym. 2008), tai esim. entsyymisäätelyn avulla vain tunteja oikeanlaisen mikrobipopulaation ollessa läsnä (Rittmann & McCarty 2001).

2.3. Energiamaissin jalostus ja tuotanto

2.3.1. Maissin fenologia ja lämpötilavaatimukset

Maissin kasvusykli jaetaan yksinkertaisimmillaan kasvulliseen ja lisääntymisvaiheeseen. Kasvullinen vaihe loppuu hedekukinnon ilmaantuminen. Lisääntymisvaihe alkaa muutaman päivän jälkeen hedekukinnasta, ja sille tunnusomainen on tähkän ilmaantuminen ja kehitys (Tatah 2008). Schittenhelmin (2008) tutkimuksessa emikukintavaihe saavutettiin eri lajikkeilla Pohjois-Saksassa 83-96 d kasvuajan jälkeen. Tällöin maissin kuiva-ainepitoisuus (TS-pitoisuus) oli n. 10-15 % (Schittenhelm 2008). Maissin tähkän (jyvien) kypsymisvaiheet (tuleentumisvaiheet) ovat maitotuleentuminen (milk ripeness, koko kasvin TS n. 18-19 %), taikina-aste (wax ripeness, TS n. 30 %) ja täystuleentuminen (full ripeness, TS n. >43 %) (Amon ym. 2007, Laine 2009a)

Kukin maissin kehitysvaihe vaatii tietyn tehoisan lämpötilasumman kertymän (astepäiviä, °C vrk) (Tatah 2008). Maissinjalostajat luokittelevat maissilajikkeita esim. aikaisiin, keskiaikaisiin, keskimyöhäisiin ja myöhäisiin lajikkeisiin FAO-luvun perusteella. Kypsymisnopeutta ilmaisevat FAO-luvut ovat maa- tai aluekohtaisia. Suomessa käytetään yleensä Saksan FAO-lukuja (Laine 2009b). Tehoisan lämpösumman vaatimus on erilainen eri kypsymisluokan maissille (Taulukko 2).

Taulukko 2. Saksassa käytettävä maissilajikkeiden kypsyysluokitus, kypsyysluokkia vastaavat FAO-luvut ja kypsyysluokkien vaatimat keskilämpötilat touko-syyskuussa (Tatah 2008) sekä keskilämpötilavaatimuksen perusteella laskettu Suomalaisen laskutavan (Hyytiäinen & Hiltunen 1992) mukainen tehokas lämpötilasumman vaatimus touko-syyskuussa.

Kypsyysluokitus	FAO-luvun vaihteluväli	Keskilämpötilan vaatimus touko-syyskuu (°C)	Lämpösumman vaatimus touko-syyskuu (°Cvrk)
Aikainen	170-220	14,0-15,0	1377-1530
Keskiaikainen	230-250	15,0-15,5	1530-1607
Keskimyöhäinen	260-290	15,6-16,4	1622-1744
Myöhäinen	300-350	16,5-17,4	1760-1897

Esimerkiksi Itävallassa FAO-lukuluokitus on hieman erilainen kuin Saksassa, Amonin ym. (2007) mukaan aikaisten ja keskiaikaisten/keskimyöhäisten lajikkeiden FAO-luku on 240-390.

2.3.2. Energiamaissin jalostus

Energiamaissille ei ole vielä yhdenmukaista määritelmää. Kauterin & Claupeinin (2004) mukaan termiä energiamaissi käytetään suuria satoja tuottavista ja biokaasun tuotantoon soveltuvista maissin genotyypeistä, jotka korjataan TS-pitoisuuden ollessa n. 35 % ja varastoidaan säilörehuna. Saksassa käytettävissä säilörehusiiloissa varastoitavan maissin optimaalinen TS-pitoisuus on 28-35 %, jotta vältetään VS:n tappioilta varastoinnin aikana. (Tatah 2008).

Energiamaissin laatuvaatimukset ovat kiistanalaisia. Joidenkin tutkijoiden mielestä hehtaarikohtainen metaanisaanto kasvaa samassa suhteessa kuin hehtaarikohtainen VS-sato. Toisten tutkijoiden (esim. Amon ym. 2007) mielestä taas biomassan koostumuksella on suuri merkitys maissin VS-kohtaiseen metaanipotentialiin (Kauter & Claupein 2004).

Energiamaissin laatuvaatimukset vaikuttavat jalostusstrategiaan. Konservatiivisen jalostusstrategian maissilajikkeet ovat rehu- tai jyvämaissin genotyyppejä, joilla kasvullinen kehitysvaihe on korostunut, mutta joilla on silti tietylle viljelyalueelle sopiva kypsymisnopeus. Tässä jalostusstrategiassa maissin tähkänmuodostus on toivottavaa, sillä sen oletetaan vaikuttavan oleellisesti metaanisaantoon (Kauter & Claupein 2004).

Progressiivista jalostusstrategiaa edustavat maissin genotyypit ovat korkeasatoisia Pohjois-Italian ja Etelä-Ranskan klooneja, joihin on yhdistetty Keski-Euroopassa kasvatettavien maissien geenipoolin kylmyydenkestävyyden ja pienten viljelypanostusten genejä sekä Etelä- ja Keski-Amerikan geenipoolin lyhyen päivän genejä. Progressiivista jalostusstrategiaa edustavat maissit ovat suuresti riippuvaisia veden saatavuudesta ja lämpösummasta. Kaikkia yllä mainittuja ominaisuuksia yhdistäviä lajikkeita ei kuitenkaan ole tullut vielä markkinoille (Kauter & Claupein 2004).

Perinteisesti kukin jalostuslinja on optimoitu maantieteellisen sijainnin mukaan niin, että kasvullinen vaihe ja jyvän täyttymiseen tarvittava aika ovat tasapainossa (Colosanti & Muszynski 2009). Progressiivisen jalostusstrategian energiamaisseilla ei tapahdu välttämättä täydellistä tähkän täyttymistä. Tähkän täydellinen kehittyminen ei ole ehkä välttämätöntä kuiva-ainesadon maksimoimiseksi alueilla, joilla auringonsäteily on vähäistä ja syksyt kylmiä, kuten Pohjois-Euroopassa, koska resurssirajoitteisissa ympäristöissä kasvullisten osien fotosynteesikapasiteetti ei riitä jyvien kehittymiseen (Schittenhelm 2008). Keski-Euroopan olosuhteissa syksyllä tietyn lämpösumman kerryttyä rehumaisilajikkeiden lopetettua kasvunsa niiden hehtaarikohtainen TS-sato alkaa laskea,

kun samaan aikaan uusilla, myöhäisemmällä energiamaissilajikkeilla biomassa ja hehtaarikohtainen TS-sato kasvaa edelleen (Kreps 2008).

2.3.3. Maissin kemiallisen koostumuksen ja korjuuajankohdan vaikutus metaanisaantoon

Amonin (2007) mukaan eri maissilajikkeiden metaanipotentiali riippuu suuresti kemiallisesta koostumuksesta. Koostumus määräytyy esim. genotyypin, ilmaston, viljelyalueen ja korjuuajankohdan mukaan (Amon ym. 2007, Tatah 2008). Itävallassa Amon ym. (2007) johtivat myöhäisillä maissilajikkeilla (FAO n. 600) sekä aikaisemmilla lajikkeilla (FAO 240-390) tekemistä tutkimuksistaan lineaarisen regressioyhtälön, joka estimoii metaanintuoton maissin raakavalkuaisen, raakarasvan, selluloosan ja hemiselluloosan perusteella. Yhtälön mukaan raakarasva ja raakaproteiini vaikuttavat eniten maissisäilörehun metaanin kokonaistuottoon. Degenhardt (2005, Schittenhelmin 2008 mukaan) suosittelee biokaasumaissiksi lajikkeita, jotka kypsyvät vain hieman (enintään 50 FAO-yksikköä) myöhemmin kuin tietyllä alueella viljeltävä rehumaissi. Hänen mukaansa jalostuksella tulisi lisätä maissin tällä hetkellä alhaisia rasva- ja proteiinipitoisuuksia, sillä niillä on hiilihydraatteja korkeampi metaanisaanto (Angelidaki & Sanders 2004).

Amonin ym. (2007) tutkimuksesta poiketen Schittenhelmin (2008) tutkimuksessa mikään ravinne (proteiini, rasva, tärkkelys, vesiliukoiset hiilihydraatit, hemiselluloosa ja selluloosa) ei vaikuttanut merkittävästi maissin metaanintuotantopotentiaaliin. Sekä Amonin (2007) että Schittenhelmin (2008) tutkimuksessa eri lajikkeiden tuhka-, raakavalkuais-, raakakuitu- ja selluloosapitoisuudet pienenevät kaikilla lajikkeilla kasvukauden edetessä. Schittenhelmin tutkimuksessa rasvapitoisuus kasvoi koko maissin kasvukauden ajan, kun taas Amonin (2007) tutkimuksessa puolella lajikkeista (2 kpl) rasvapitoisuus pieneni taikina-asteen (122 d) ja täystuleentumisen (151 d) välisenä aikana.

Schittenhelmin (2008) mukaan pitkäksi kasvavalla energiamaissilla täytyy olla pienisatoisempia lajikkeita enemmän lignoselluloosaa varressaan, jottei se lakoutuisi. Hänen tutkimuksessaan energiamaissiprototyypin metaanipotentiali ei ollut suuremmasta selluloosa- ja ligniinipitoisuudesta huolimatta pienempi kuin aikaisemmilla lyhyemmällä rehumaissilajikkeilla. Hän päätteli tämän johtuvan siitä, että soluseiniin hiilihydraattikompleksien sidosten monimutkaisuus lisääntyy vasta kasvin fysiologista kypsyyttä lähestyttäessä, ja myöhään kypsyvällä energiamaissilla varren soluseinäfraktio oli vielä pitkän kasvuajankin jälkeen hyvin biohajoavassa muodossa.

Amonin (2007) tutkimuksessa myöhäisillä lajikkeilla metaanipotentiali pieneni maissin lähestyessä täystuleentumisvaihetta. Metaanipotentialit olivat myöhäisillä lajikkeilla suurimmat maitotuleentumisvaiheessa (TS 18-19 %), 312-365 NI CH₄/kg VS ja pienimmät täystuleentumisvaiheessa (TS 41-47 %), 268-286 NI CH₄/kg VS.

Schittenhelmin (2008) tutkimuksessa v. 2004 metaanipotentiali vaihteli Gavott-lajikkeen (FAO 250) 124 d kasvuajan 287 NI CH₄/kg VS:sta Doge-lajikkeen (FAO 700) 419 NI/kg VS:ään 180 d kasvuajalla. Vuonna 2005 metaanipotentiali vaihteli PR36K67-lajikkeen (FAO 350) 282 NI/kg VS:n (kasvu aika 118 d) ja Flavi-lajikkeen 379 NI/kg VS:n (kasvu aika 137 d) välillä. Myöhäisillä energiamaissiprototyypeillä saavutettiin Pohjois-Saksassa paras metaanipotentiali (n. 340-419 NI CH₄/kg VS) viimeisessä määrittäjäajankohdassa (kasvu aika 180 d), jolloin koko kasvin TS-pitoisuus oli 21-24 %. Nopeammin kehittyvillä keskiaikaisilla lajikkeilla metaanipotentiali oli tutkimuksen molempina vuosina suurempi 153-159 d kasvuajan jälkeen kuin 180 d kasvuajan jälkeen (Schittenhelm 2008).

Maissi voidaan korjata pellolta niin, että talteen otetaan koko kasvi, vain jyvät, tai jyvä-tähkä -seos (corn cob mix). Maissilla koko kasvin metaanipotentiali on parempi kuin kasvinosilla erikseen, koska se sisältää enemmän metaanintuottoon tarvittavia ravinteita. Säilörehuksi valmistettu maissi voi tuottaa esim. 25 % enemmän metaania kuin säilömätön tuore maissi (Amon ym. 2007). Neureiterin ym. (2005) tutkimuksessa maissisäilörehun metaanipotentiali oli korkeampi 119 d varastoinnin jälkeen kuin 44 d varastoinnin jälkeen.

2.3.4. Energiamaissin hehtaarikohtaiset metaanisaannot Keski-Euroopassa

Amonin ym. (2007) mukaan hehtaarikohtaisen metaanisaannon maksimoimiseksi myöhäisillä lajikkeilla korjuu kannattaa tehdä lähellä täystuleentumisvaihetta. Itävallan hedelmällisellä viljelyalueella myöhäiset lajikkeet tuottivat maitotuleentumisvaiheeseen mennessä 17,2-20,2 t VS/ha, taikinavaiheessa 21,9-26,7 t VS/ha ja täystuleentuneena 22,3-31,4 t VS/ha. Hehtaarikohtainen energiasaanto oli myöhäisillä lajikkeilla täystuleentumisvaiheessa 7100-9000 Nm³/ha (70-89 MWh) (Amon ym. 2007). Saksassa Schittenhelmin (2008) tutkimuksessa myöhäiset lajikkeet saavuttivat suurimman hehtaarikohtaisen metaanisaantonsa (7719-9370 Nm³/ha) viimeisessä metaanipotentialin määrittäjäajankohdassa (kasvu-aika 180 d), jolloin maissi oli TS-pitoisuuden perusteella maitotuleentumisvaiheessa.

Aikaisin ja keskinopeasti kypsyvät lajikkeet kasvattavat biomassaa taikinavaiheeseen asti ja niillä optimaalinen korjuu-aika oli taikinavaiheen lopussa (TS 35-39 %). Tällöin näillä lajikkeilla on saatu Itävallassa hyvissä viljelyolosuhteissa sadoksi 21,7-35,5 t TS/ha ja metaanisaannoksi 5300-8500 Nm³/ha (Amon ym. 2003, Amon ym. 2007, Kauter & Claupein 2004). Itävallassa saatiin aikaisilla ja keskinopeasti kypsyvillä konservatiivisen jalostusstrategian maissilajikkeilla (Itävallan FAO-luku 240-360) huonommalla viljelyalueella sadoksi 8-20 t TS/ha (Kauter & Claupeinin 2004 mukaan Amon 2002).

Kauterin & Claupeinin (2004) kokoamien tutkimustulosten mukaan Luxemburgissa viiden eri maissilajikkeen (FAO 240-420) sadot olivat taikina-asteella (TS 30-42 %) 14-26 t TS/ha ja hehtaarikohtaiset metaanisaannot 5394-8132 Nm³/ha. Progressiivisen jalostusstrategian Doge-lajikkeella (FAO 700) TS-sato kasvoi maitotuleentumisvaiheen (TS 20 %) ja taikinavaiheen (TS 35 %) välillä 14,6 t TS/ha:stä 25,8 t TS/ha:een. Hehtaarikohtainen metaanisaanto kasvoi samalla 4584 Nm³/ha:sta 9920 Nm³/ha:ään.

Kuivuus voi rajoittaa maissin satoa Keski-Euroopassa. Saksassa v. 2003 rehumaisiin sato oli lämpimissä (huhti-syyskuun keskilämpötila 16,9 °C) mutta kuivissa (sadetta huhti-syyskuussa 282 mm) olosuhteissa Stuttgartin lähellä alle 10 t TS/ha. Progressiivisen jalostusstrategian lajikkeet tuottivat kolmella vedenpuutteen vaivaamalla alueella 15-19 t TS/ha, mutta Baijerin maakunnassa hyvissä kosteusolosuhteissa 19-28 t TS/ha (Kauter & Claupein 2004). EU15-maiden keskimääräinen rehumaisisato on 12,6 t VS/ha (Amonin ym. 2007 mukaan Eurostat 2003).

2.3.5. Maissin tuotanto Suomessa

Etelä-Suomessa voidaan viljellä v. 1971-2000 keskimääräisten touko-syyskuun lämpötilojen (Ilmatieteen laitos 2009a-e) perusteella korkeintaan Saksan aikaisia lajikkeita (Taulukot 2 ja 3). Toisaalta esim. v. 2006 ja 2007 olivat keskivertoa huomattavasti lämpimämpiä. Piikkiössä Lounais-Suomessa Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen (MTT) kokeissa maissit saivat näinä vuosina 1540 ja 1419 °Cvrk lämpösumman ja suuret sadot korjattiin vasta lokakuun puolivälin jälkeen. Piikkiön kokeissa kylvöajankohta on ollut noin toukokuun puolivälissä (Laine & Tahvonon 2007,

Laine 2009a). Keski-Euroopassa kylvö tapahtuu huhtikuun loppupuolella (Amon ym. 2007, Schittenhelm 2008).

Taulukko 3. Kuukausien keskilämpötilat touko-syyskuussa (Ilmatieteen laitos 2009a-e), touko-syyskuun keskilämpötila sekä touko-syyskuun, kesä-syyskuun ja kesä-elokuun tehoisa lämpötilasumma eri puolilla Suomea v. 1971-2000.

Paikka	Keskilämpötilat v. 1971-2000						Tehoisa lämpötilasumma			
	Touko (°C)	Kesä (°C)	Heinä (°C)	Elo (°C)	Syys (°C)	Loka (°C)	Touko- syyskuu (°C)	Touko- syyskuu (°C vrk)	Kesä- syyskuu (°C vrk)	Kesä- elokuu (°Cvrk)
Hki Kaisaniemi	9,9	14,8	17,2	15,8	10,9	6,2	13,7	1325	1171	995
Turku	10,0	14,7	16,9	15,5	10,3	5,5	13,5	1289	1131	974
Jyväskylä	8,7	14,0	16,0	13,7	8,2	3,2	12,1	1082	965	871
Oulu	7,5	13,6	16,2	13,7	8,4	2,7	11,9	1046	965	865
Sodankylä	4,9	11,6	14,3	11,2	5,8	-0,6	9,6	693	693	670

Maissin hallanarkuuden sekä elokuussa tapahtuvan biomassan nopean lisääntymisen vuoksi (Niiranen 2008b) hallojen esiintyminen on maissinviljelyn kannalta tärkeä tekijä. Suurin piirtein viljelyalueiden III ja IV rajasta pohjoiseen päin hallaöiden todennäköinen määrä elokuussa on 2,5 ja eteläisemmässä Suomessa 0,4-1,5 (Hyytiäinen & Hiltunen 1992). Maissi täytyy korjata pian paleltumisen jälkeen (Niiranen 2008b). Lievä halla ei kuitenkaan aiheuta välttämättä merkittäviä maissikasvuston vaurioita ja kasvun pysähdystä. Vuonna 2007 Piikkiössä maissisato korjattiin syyskuun alkupuolen kahdesta pakkasyöstä (-0,6 ja -0,3 °C) huolimatta vasta 22.10. (Laine 2009a, Seppälä 2009). Jos pakkasta on kunnolla, maissin nestejännitys katoaa ja kasvi alkaa ränsistymään (Niiranen 2008a).

Laineen (2009a) mukaan maissin vedentarve Suomessa on vähintään 50 mm/kk. Piikkiössä saavutettiin 20 t TS/ha sato, kun rehumaiskasvusto sai 151 d aikana vettä 253 mm (Laine & Tahvonen 2007). Pitkän ajanjakson (v. 1971-2000) keskiarvojen perusteella (Ilmatieteen laitos 2009a-2009e) touko-syyskuussa sataa eri puolella Suomea keskimäärin 49-65 mm/kk (toukokuu vähäsateisin), joten keskivertovuotena sade riittää Suomessa suurienkin maissisatojen kasvatukseen. Vähäsateisina kuukausina, kuten Piikkiössä v. 2006 (Laine & Tahvonen 2007) maissinviljelyssä joudutaan sadon varmistamiseksi turvautumaan kasteluun.

Maissi on vaativa viljelykasvi. Suuren lämpösumman (Tatah 2008) ja veden tarve (Laine 2009a) sekä hallanarkuus (Niiranen 2008b) rajoittavat eri lajikkeiden soveltuvuutta Suomen eri viljelyalueille. Lisäksi paikallisesti energiamaissille sopivia peltolohkoja on vähemmän kuin esim. ruokohelpin viljelyyn sopivia lohkoja. Tiivistyneet savimaat eivät sovi maissin viljelyyn (Laine 2009a).

Piikkiössä (Lounais-Suomi, I viljelyvyöhyke) rehu- ja energiamissilajikkeiden kuiva-ainesadot olivat MTT:n kokeissa v. 2006-2007 12-28 t TS/ha (Laine & Tahvonen 2007, Laine 2009a), joillakin lajikkeilla sato oli noin kaksinkertainen nurmikasvien satoihin (Kangas ym. 2007) verrattuna (Taulukot 4 ja 5).

Taulukko 4. Rehumaisilajikkeiden saama tehoisa lämpötilasumma ja vesi, hehtaarikohtaiset TS-sadot sekä typenkäytön tehokkuus Piikkiössä v. 2006 (Laine & Tahvonen 2007).

Maissilajike	FAO	Kasvu- aika (d, pvm)	Lämpö- summa (°C vrk)	Sade + kastelu (mm)	TS-sato (t TS/ha)	TS-sato/ lannoite N kg
<i>Muovikalvon kanssa:</i>						
Maeva SGN	ei tietoa	151,		256	20,3	115
Cerruti	k.myöh.	17.5.- 16.10.	1540	(17.5.- 30.9.)	20,0	113
Birko	ei tietoa				20,5	116
Keskiarvo					20,3	115
<i>Ilman muovikalvoa:</i>						
Maeva SGN	ei tietoa	151,		256	20,5	116
Cerruti	k.myöh.	17.5.- 16.10.	1540	(17.5.- 30.9.)	15,7	89
Birko	ei tietoa				16,8	94
Keskiarvo					17,7	100

Piikkiössä kertyi v. 2006 koko kasvukaudella lämpösommaa 1700 °C vrk, josta maissi käytti hyväkseen kylvön ja sadonkorjuun välillä 1540 °Cvrk (91 %). Kokeissa testattiin mustan muovikalvon vaikutusta maissin satoisuuteen. Kahdella lajikkeella se lisäsi satoa n. 3-4 t TS/ha, mutta kalvon käyttö ei ollut kustannustehokasta, sillä Maeva-lajikkeella saatiin jopa hieman suurempi sato ilman muovikalvoa (Laine & Tahvonen 2007).

Piikkiössä testattiin v. 2007 kahdeksaa rehu- tai energiamaissilajiketta kahdella eri kylvöajankohdalla (Taulukko 5). Tulosten perusteella aikainen kylvö on Suomessa tärkeä tekijä. Amara-lajikkeella saavutettiin yhtä suuri TS-sato molemmilla kylvöajankohdilla, mutta muilla lajikkeilla aikaisempi kylvö tuotti 10-45 % suuremman TS-sadon kuin myöhäisempi kylvö (Laine 2009a).

Taulukko 5. Energia- ja rehumaisilajikkeiden saama tehoisa lämpötilasumma, sade sekä hehtaarikohtaiset TS-sadot kahdella kylvöajankohdalla Piikkiössä v. 2007 (Laine 2009a).

Maissilajike (tyyppi, energiamaisin sukupolvi*)	FAO	Kasvu-aika (d, pvm)	Lämpösumma (°C vrk)	Sade (mm)	TS-sato (t TS/ha)
<i>Kylvö 17.5.:</i>					
Amadeo (rehu/jyvä/energia)	220				20,4
Sampaio (rehu)	230				16,0
Ronaldinio (rehu/jyvä/energia)	240			320 (309),	22,5
Amara (energia, 2.)	260	158, 17.5. -	1419	heinäkuu: sade 121 mm	20,0
Marcello (rehu/jyvä)	260	22.10.			27,6
Francisco (rehu/energia, 1.)	270				19,7
Cerruti (rehu)	k.myöh.				13,9
Birko (rehu)	ei rap.				18,7
Keskiarvo					19,8
<i>Kylvö 29.5.:</i>					
Amadeo (rehu/jyvä/energia)	220				14,6
Sampaio (rehu)	230				14,1
Ronaldinio (rehu/jyvä/energia)	240			309, heinäkuu: sade 121 mm	15,7
Amara (energia, 2.)	260	146, 29.5.-	1322		20,2
Marcello (rehu/jyvä)	260	22.10.			19,1
Francisco (rehu/energia, 1.)	270				17,8
Cerruti (rehu)	k.myöh.				11,5
Birko (rehu)	ei rap.				15,6
Keskiarvo					16,1

* Krepis 2008

Vuonna 2007 Piikkiön maissit saivat kylvöajankohdasta riippuen n. 120 tai 220 °C vrk vähäisemmän lämpösumman, mutta vettä 60 tai 50 mm enemmän kuin v. 2006. Vuoden 2006 vähäinen vedensaanti (256 mm) riitti tuottamaan 20 t TS/ha sadon (ilman muovikalvoakin Maeva SGN-lajikkeella). Tämä sademäärä ei olisi välttämättä kuitenkaan riittänyt v. 2007 Marcello-lajikkeella 28 t TS/ha sadon tuottamiseen. Marcellon sato on ollut KWS:n kokeissa Keski-Euroopassa n. 22-24 t TS/ha. KWS:n energiamaisilajikkeilla (Francisco ja Amara) taas sadot ovat olleet Keski-Euroopassa 3-5 t TS/ha suurempia kuin Piikkiössä aikaisemmalla kylvöllä v. 2007 (Krepis 2008).

Vuonna 2007 aikaisemmin kylvetyillä maissikasvustoilla oli suuremmat koko kasvin TS-pitoisuudet (36-43 %) kuin 12 d myöhemmin kylvetyillä kasvustoilla (31-36 %) (Taulukko 6.). Suurimmat TS-pitoisuudet vastaavat lähes Amonin ym. (2007) tutkimuksen täystuleentuneen ja muut suurin piirtein taikina-asteella olevan maissin TS-pitoisuuksia. Useiden tutkijoiden (esim. Kauter & Claupein 2004, Tatah 2008) mukaan n. 35 %:n TS-pitoisuuden saavuttanut maissi on laadultaan ja kuiva-ainesadoltaan optimaalinen biokaasuntuotantoa varten. Piikkiön tulosten perusteella suurimman TS-sadon saamiseksi joidenkin lajikkeiden (etenkin Marcello, Amadeo ja Ronaldinio) sato kannattaisi kuitenkin korjata vasta TS-pitoisuuden ylitettyä 35 %. Myös tähkän suhteellinen osuus ja kehitysaste voi vaikuttaa maissin metaanipotentiaaliin (Amon ym. 2007). Piikkiössä useimmilla lajikkeilla tähkän osuus koko kasvin massasta sekä tähkän TS-pitoisuus olivat suurempia pitempään kasvaneilla maisseilla (Laine 2009a).

Taulukko 6. Vuoden 2007 Piikkiössä kasvatettujen maissilajikkeiden eri kasvosien %-osuudet kasvin massasta sekä eri kasvosien (Laine 2009a) ja koko kasvin kuiva-ainepitoisuudet.

Lajike	FAO	Osuus kasvin massasta (%)			TS-pitoisuus (%)			Koko kasvi*
		Varsi	Lehdet	Tähkät	Varsi	Lehdet	Tähkät	
<i>KYLVÖ 17.5.</i>								
Amadeo	220	24	23	53	23	68	42	43
Sampaio	230	35	26	39	26	68	36	41
Ronaldinio	240	28	23	49	24	63	44	43
Amara	260	37	23	40	24	63	32	36
Marcello	260	38	25	37	27	65	32	38
Francisco	270	36	29	35	23	67	30	38
Cerruti	k.myöh.	26	24	50	26	58	44	43
Birko		25	26	49	21	66	38	41
Aikainen kylvä k.a.		31 ± 6	25 ± 2	44 ± 7	24 ± 2	65 ± 3	37 ± 6	40 ± 3
<i>KYLVÖ 29.5.</i>								
Amadeo	220	30	20	50	22	54	37	36
Sampaio	230	31	26	42	21	62	33	36
Ronaldinio	240	39	21	40	23	55	33	34
Amara	260	40	22	37	26	50	27	31
Marcello	260	34	26	40	22	60	29	35
Francisco	270	38	35	27	22	60	23	36
Cerruti	k.myöh.	30	19	51	23	46	33	32
Birko		31	25	44	21	56	30	34
Myöhäinen kylvä k.a.		34 ± 4	24 ± 5	41 ± 8	23 ± 2	55 ± 5	31 ± 4	34 ± 2

* Laskettu kasvosien massaosuuksien ja TS-pitoisuuksien (Laine 2009a) perusteella

Helsingin yliopiston alustavien koetulosten (Santanen ym. 2008a) mukaan Viikissä saatiin v. 2007 erittäin suuria TS-satoja. Maissit saivat Helsingissä normaalivuotta enemmän lämpöä ja vettä, sillä lämpösummaa kertyi koko kasvukauden aikana Helsingissä 1558 °C vrk (114 % v. 1971-2000 keskiarvosta) ja sadetta 407 mm (10 % normaalia enemmän) (Ilmatieteen laitos 2007). Lannoitusmäärät olivat kokeen ravinteikkaalla lohkollla pieniä (lannoitustasot 20 ja 100 kg N/ha). Maissia kasvatettiin puhdaskasvustona sekä seoskasvustona typensitojakasvien kanssa. Maissin TS-sato oli persianapilan kanssa syyskuun puolessa välissä yli 20 t/ha (TS-pitoisuus 22 %) ja lokakuun puolessa välissä hieman alle 25 t/ha (TS 30 %). Puhdaskasvustoissa maissisato oli lannoitustasosta ja korjuuajankohdasta riippumatta n. 30 t TS/ha. Puhdaskasvustoissa TS-pitoisuus nousi korjuuajankohtien välillä 21 %:sta 28 %:iin (Santanen ym. 2008a).

Pohjoisemmilla viljelyvyöhykkeillä maissisadot ovat olleet yleisesti Piikkiön ja Helsingin kokeiden satoja huomattavasti pienempiä (Taulukko 7). Maissi on kylvetty III-IV viljelyvyöhykkeillä vasta touko-kesäkuun vaihteessa ja lämpösummat ovat olleet pienempiä. II viljelyvyöhykkeeltä ei ole vertailukelpoisia maissin satotietoja, sillä MTT Mikkelin kokeessa viljeltiin maissia luonnonmukaisesti v. 2007 ja kylvöajankohta oli myöhäinen (Niiranen 2008b, Sairanen 2009).

MTT Maaningan kokeisiin v. 2004-2008 oli valittu lajikkeita, jotka pärjäävät suhteellisen vähäisellä lämpösummalla. Keskimyöhäinen rehumaislajike Cerruti oli Maaningalla paras lajike kolmena peräkkäisenä vuotena (2005-2007). Samana vuonna Laukaassa Cerrutin sato oli peltoviljelyssä samankaltainen (10,1 t TS/ha) kuin Maaningalla, ja myös lämpökertymä oli todennäköisesti samaa luokkaa (n. 1100 °C vrk). MAS09-lajike tuotti Laukaassa 7,4 t TS/ha (Niiranen 2008b, Seppälä ym. käsikirjoitus). Vuonna 2004 paras lajike Maaningalla oli aikainen Rosalie ja v. 2008 aikainen energiamaissi Amadeo, jonka sato jäi aiempia kylmempänä vuonna erittäin pieneksi (Niiranen 2008b).

MTT:n eri toimipisteissä III ja IV viljelyvyöhykkeillä saatiin v. 2007 (Niiranen 2008 b) sitä suurempi TS-sato, mitä suurempi oli maissin kasvuajan lämpösumma. Maaningalla aikaisempi kylvö tuotti 1 t TS/ha (10 %) suuremman sadon kuin 11 d myöhäisempi kylvö (Niiranen 2008b).

Taulukko 7. Suurisatoisimmat maissilajikkeet alustavissa kokeissa MTT Maaningalla v. 2004-2008 sekä kaikkien kokeissa mukana olleiden lajikkeiden satojen keskiarvot MTT:n eri toimipisteissä v. 2007 (Niiranen 2008b, Sairanen 2009).

Vuosi, paikkakunta/ lajike (viljelyvyöhyke)	FAO	Kasvu-aika (d, pvm)	Lämpö- summa (°C vrk)	Sade +mahd. kastelu (mm)	Kuiva-aine- sato (t TS/ha)
<i>2004-2008 Maaninka</i>					
2004 Rosalie	ei tietoa	ei tietoa	968	ei rap.	4,4
2005 Cerruti	k.myöh.	ei tietoa	1120	ei rap.	10,0
2006 Cerruti	k.myöh.	ei tietoa	1245	ei rap.	5,3
2007 Cerruti	k.myöh.	110, 24.5.-11.9.	1096	240	10,6*
2008 Amadeo	220	ei tietoa	838	ei rap.	4,7
Keskiarvo 2004-2008			1015	ei rap.	7,0
<i>2007 eri paikkakunnat MTT:n kokeissa:</i>					
Mikkeli (II)	ei tietoa	102, 7.6.-17.9.	947	328	4,5
Maaninka (III)	ei tietoa	99, 4.6.-11.9.	994	213	9,2
Maaninka (III)	ei tietoa	110, 24.5.-11.9.	1096	240	10,2
Ruukki (IV)	ei tietoa	110, 31.5.-18.9.	933	240	8,7
Sotkamo (IV)	ei tietoa	101, 4.6.-13.9.	839	301	7,2

* Sairanen 2009

2.4. Ympäristöyötäinen energiamaissin tuotanto

Maissin ja muiden biokaasukasvien viljelyssä tulisi käyttää lannoitteena prosessijäännöstä, jotta ravinteet saataisiin kestäväen kehityksen mukaisesti kierto. Belgialaisen tutkimuksen (Gerin ym. 2008) mukaan biokaasumaissin tuotannossa saavutetaan suurin nettoenergiasaanto (47,5 MWh/ha), kun orgaanisen lannoitteen lisäksi käytetään väkilannoitteita. Paras energiatase (tuotos/panos-suhde 6,3) ja CO₂-tase biokaasumaissilla saavutetaan kuitenkin, kun lannoitteena käytetään pelkästään biokaasutuksen prosessijäännöstä, koska väkilannoitteiden valmistus vaatii paljon energiaa. Prosessijäännöksellä lannoitettu maissi on Belgiassa biokaasuntuotannossa energia- ja CO₂-taseen perusteella prosessijäännöksellä lannoitettua nurmea (tuotos/panos-suhde 3,9) parempi vaihtoehto (Gerin ym. 2008).

Energia- ja CO₂-tasetutkimuksia tulisi kuitenkin täydentää laajemmalla energiakasvien ympäristövaikutusten arvioinnilla. Arvioinnissa tulisi tarkastella orgaanisen aineen kierron ja typpilannoituksen vaikutusta muidenkin kasvihuonekaasujen (CH₄, NH₃, N₂O) päästöihin (Gerin ym. 2008). Tuomiston (2006) selvityksen perusteella monivuotisilla nurmikasveilla, kuten Suomen oloissa ruokohelpillä on paljon positiivisia ympäristövaikutuksia (esim. vähäinen lannoitustarve ja pieni eroosioriski) maissin viljelyyn verrattuna.

Maissin viljelyyn liittyviä eroosiota, lannoitetyypin huuhtoutumista ja haihtumista N₂O:na, maaperän köyhtymistä, pestisidikontaminaatiota sekä biodiversiteetin vähenemistä voidaan ehkäistä viljelytoimenpiteillä ja viljelykierroilla (Finke ym. 1999, Kauter & Claupein 2004). Viljelytoimenpiteitä ovat esim. mekaaninen rikkakasvien torjunta, oikea-aikainen ja sopivan suuri typpilannoitus sekä kevennetty maanmuokkaus (Finke ym. 1999).

Kaikkien maissinviljelyn ympäristövaikutuksien vähentäminen samanaikaisesti viljelytoimenpiteillä ei ole kuitenkaan helppoa. Esimerkiksi suorakylvö vähentää tehokkaasti eroosiota, mutta voi lisätä N_2O -päästöjä (Tan ym. 2009). Tanin ym. (2009) mukaan maissin starttilannoituksen jälkeinen rankkasade (50 mm) keväällä voi aiheuttaa suorakylvetyllä maalla N_2O -päästön, joka olisi CO_2 -ekvivalenttina (2600 kg CO_2 -ekv./ha) moninkertainen Gerinin ym. (2008) raportoimiin biokaasumaissin viljelypanosten CO_2 -päästöihin (n. 10-26 kg CO_2/MWh_{CH_4}) verrattuna. Tatahin (2008) mukaan Keski-Euroopassa käytetään maissinviljelyssä yleensä suuria lannoitusmääriä (180-200 kg N/ha). Böhmelin ym. (2008) energiamaissille suosittelema vähäisempi typpilannoitusmäärä (120 kg N/ha) vähentää myös N_2O -päästöjä. Joidenkin viljelytoimenpiteiden käyttöönotto voi vaatia esim. koulutusta, erikoiskoneita, taloudellisia kannustimia tai lakeja ja säädöksiä (Finke ym. 1999).

Viljelykierroissa voidaan kylvää maissin sekaan aluskasvi (esim. nurmi) tai käyttää välikasveja, jotka sitovat ylimääräisiä ravinteita ja pitävät pellon talven ajan kasvipeitteisenä. Maissi ja aluskasvi kuitenkin myös kilpailevat vedestä ja ravinteista, joten aluskasvi voi vähentää maissin satoa (Kauter & Calupein 2004). Etelä-Suomen oloissa maissin viljely seoskasvina palkonurmikasvien kanssa on onnistunut alustavissa kokeissa hyvin (Santanen ym. 2008).

2.5. Maissin ja lehmän lietelannan yhteiskäsittely biokaasureaktorissa

Tuomiston (2006) mukaan biokaasun tuotantoon on kannattavinta käyttää kasvin- ja eläintuotannon sivutuotteita (esim. kasvijätteet ja lanta), ettei bioenergian tuotanto valtaisi alaa elintarviketuotannolta. Laineen & Tahvosen (2007) arvion mukaan Suomessa voidaan kuitenkin käyttää v. 2020 peltoalasta 30 % bioenergian viljelyyn ilman, että ruoka- ja rehutuotanto vaarantuu. Lannan ja kasvimassan yhteiskäsittelyssä lanta tarjoaa puskurointikapasiteettia ja erilaisia anaerobihajottajien tarvitsemia ravinteita, kun taas kasvimassa vähentää ammoniakki-inhibition mahdollisuutta kasvattamalla syötteen C/N-suhdetta (Hashimoto 1983, Hills & Roberts 1981). Käsiteltäessä pelkkää maissia pitkään (8 kk) biokaasulaitoksessa metanogeenit alkavat kärsiä hivenaineiden puutoksesta, ja metaanintuotto pienenee ilman näiden ravinteiden lisäystä (Hinken ym. 2008, Lebuhn ym. 2008).

Lehtomäen ym. (2007) laboratoriotutkimuksessa metaanintuotto jatkuvatoimisissa täyssekoitteisessa (CSTR-) 5 l reaktorissa oli suurinta, kun lehmänlannan ja energiakasvin (nurmi) VS-suhde syötessä oli 70:30 ja OLR 2 kg VS/m³/d. Nurmen lisääminen lehmänlannan sekaan tuotti synergistisen vaikutuksen: lyhyelläkin (20 d) HRT:llä metaanintuotto oli 105 % verrattuna panoskokeiden perusteella laskettuun syötteen metaanipotentialiin. Kasvin osuuden kasvattaminen 40 %:iin sekä OLR:n lisääminen 3:een ja 4 kg VS/m³/d:ään pienensi metaanintuottoa.

Cornell ym. (2008) saavuttivat laboratorioskokeissa maissin ja lehmän lietelannan yhteiskäsittelyssä suurimman metaanintuoton (304 NI CH_4 /kg VS), kun lietelannan ja maissin VS-syötösuhde oli 50:50 ja OLR 4 kg VS/m³/d ja edelleen 300 NI CH_4 /kg VS suhteella 40:60 OLR:n ollessa 5 kg VS/m³/d. Laboratorioskokeissa on harvoin saatu reaktori toimimaan näin suurilla OLR:lla (Lindorger ym. 2008). Lindorferin ym. (2008) täyden mittakaavan sianlantaa ja energiakasveja (maissi ja ruis) käsittelevässä laitoksessa metaanintuotto onnistui muutaman kuukauden adaptaatioajan jälkeen, kun OLR nostettiin 2,11:sta 4,25 kg VS/m³/d:een ja samalla kasvin VS-osuus syötessä 92,5 %:sta 96,5 %:iin. Ennen kokeen loppua metaanintuotto onnistui myös useita viikkoja OLR:n ollessa 5,5 kg VS/m³/d (Lindorfer ym. 2008). Täyden mittakaavan laitoksen suurempi metaanintuotto voi

johtua esim. paremmin syötteeseen adaptoituneesta mikrobipopulaatiosta ja niissä käytettävästä pidemmästä HRT:stä.

3. AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1. Kokeen viljelyalueet, sääolosuhteet ja maissipellon kastelu

Kokeissa käytetyt maissisadot kasvatettiin vuonna 2008 MTT:n koealoilla Piikkiössä (I viljelyvyöhyke), Lounais-Suomessa, sekä vuonna 2007 ja 2008 Kalmarin tilan pelloilla Laukaassa (III viljelyvyöhyke), Keski-Suomessa. Piikkiön koepelloilla kertyi 19.5.-1.9. välisenä aikana sadetta 239 mm ja tehoisaa lämpösummaa 1045 °C. Vähäsateisina aikoina Piikkiön peltoja sadetettiin, kerran toukokuussa (29.5., 30 mm) ja kaksi kertaa heinäkuussa (21.7. ja 29.7., molemmilla kerroilla 35 mm). Piikkiössä kertyi v. 2008 touko-syyskuussa v. 1971-2000 alueen (Turun) keskiarvoon (Ilmatieteen laitos 2009a-e) verrattuna keskimääräinen (98 %) lämpösumma.

Jyväskylän säätiöjen (Ilmatieteen laitos 2009a-e) perusteella arvioiden Laukaassa kertyi v. 2008 maissisadolle ensimmäiseen korjuuajankohtaan mennessä tehoisaa lämpötilasummaa 747 °C vrk ja sadetta 344 mm. Toiseen korjuuajankohtaan mennessä lämpösummaa kertyi 811 °C vrk ja sadetta 376 mm. V. 2008 touko-syyskuu oli Keski-Suomessa tavallista kylmempi: Jyväskylässä kertyi 12 % vähemmän tehoisaa lämpötilasummaa kuin keskimäärin v. 1971-2000. Sadetta Jyväskylässä taas kertyi 5 kk aikana 22 % normaalia enemmän ja kesäkuu oli poikkeuksellisen sateinen (131 % enemmän sadetta kuin vertailuajanjaksolla).

3.2. Maissilajikkeet, viljelytiedot ja näytteenotto

Piikkiössä viljeltiin kokeita varten kuutta biokaasumaissilajiketta. Lajikkeista Amadeo oli luokiteltu aikaiseksi (FAO-luku 220), Ronaldinio keski-aikaiseksi (FAO-luku 240) sekä Amara (260) ja Valdez (290) keski-myöhäiseksi. Kahden ns. numerolajikkeen, XA7251 ja KXA7254, tarkkoja FAO-lukua ei ollut saatavilla, mutta numerolajikkeet kuuluvat KWS:n jalostamiin 2. sukupolven energiamaissilajikkeisiin ja ovat yrityksen jalostusstrategian (Kreps 2008) perusteella myöhäisiä lajikkeita (FAO-luku >300). Jalostajan numerolajikkeet ovat testausvaiheessa ja vain osa numerolajikkeista tulee markkinoille ja viljelyyn asti.

Piikkiön maissit kylvettiin 19.5.2008 ja näytteet otettiin (korjuuaika) 1.9.2008 (kasvu-aika 105 d). Koealan maalaus oli runsasmultainen karkea hieta (rm kHt). Kasviyksilöiden laskennallinen määrä oli 8,3 yksilöä/m². Lannoitteena käytettiin Kemira Oyj:n kevätiljan Y1 -väkilannoitetta (26-2-3), 455 kg/ha, josta laskettuna kasvit saivat tyypeä 118 kg/ha, fosforia 9 kg/ha ja kaliumia 14 kg/ha. Kasvinsuojeluaineena käytettiin Berner Oy:n Ariane S rikkakasvihävitettä 1,5 l tehoainetta/ha, jota ruiskutettiin koealalle 19.6.2008.

Laukaassa erittäin aikainen Revolver-rehumaissilajike (FAO 160) kylvettiin 26.5.2008. Lajike on tarkoitettu vaikeille viljelyalueille, kuten Etelä-Suomeen (Saaten Union 2009). Näytteenoton yhteydessä mitattu populaatiotiheys oli 9,5 yksilöä/m². Lannoitteena oli biokaasulaitoksen prosessijäännös ja väkilannoite (yhteensä 80 kg N/ha). Revolverista korjattiin kaksi satoa maissipellon parempikasvuisesta osasta, 25.8.2008 (kasvu-aika 91 d) ja 11.9.2008 (kasvu-aika 108 d). Toinen sato oli pakkasen vioittama. Laukaassa ei käytetty v. 2008 kasvinsuojeluaineita. Lisäksi kokeissa määritettiin myös metaanipotentiali Laukaassa v. 2007 lajikkeista Cerruti ja MAS09 valmistetusta maissisäilörehusta.

Metaanipotentialikokeisiin (panoskoe) valittiin satunnaisotannalla kustakin v. 2008 kasvatetusta lajikkeesta kolme kymmenestä kasvinäytteestä. Valitut kasvit murskattiin oksaleikkurilla (Wolf Garten SD 180E) ja lopuksi saksilla <3 cm kokoisiksi partikkeleiksi. Lisäksi lajikkeesta Valdez valittiin satunnaisesti vielä kolme kasvia reaktorikokeita varten, jotka silputtiin <3 mm partikkeleiksi. Silputtua Valdez-lajiketta säilytettiin -20 °C:ssa reaktorikokeita varten.

3.3. Metaanipotentialikokeet

Metaanipotentialikokeet tehtiin kolmena rinnakkaisena 1 l lasipulloissa (lietetilavuus 0,75 l), 35±1 °C:ssa. Pulloihin lisättiin Kalmarin tilan biokaasureaktorista saatua mikrobiympästä (300 ml) ja maissia niin, että niiden $VS_{\text{maissi}}/VS_{\text{ympä}}$ -suhde oli 1:1. Tämän jälkeen pulloja täytettiin 0,75 litraan hanavedellä. Pulloihin lisättiin pH-puskuriksi NaHCO_3 :a 3 g/l. Pulloja suljettiin butyyli-kumikorkeilla ja niistä poistettiin ilma typtämällä 5 min ajan N_2/CO_2 -kaasuseoksella (70%:30%, Aga oy). Pulloja suljettiin butyyli-kumikorkeilla. Korkkien läpi oli laitettu PVC-pohjaisesta materiaalista valmistetut kaasunkeräysletkut (Master-flex Tygon fuel® & lubricant).

3.4. Reaktorikokeet

Reaktorikokeissa käytettiin kahdessa erässä hankittua lypsykarjan lietelantaa, jota säilytettiin 4 °C:ssa ennen reaktoreihin syöttöä. Toisen lietelantaerän TS-pitoisuus oli lähes kaksinkertainen ensimmäiseen erään verrattuna, ja sitä laimennettiin hanavedellä reaktoreiden syöttämisen helpottamiseksi (Taulukko 9).

Reaktorikokeissa käytettiin kolmea jatkuvatoimista täyssekoitteista 5 l lasireaktoria (CSTR, continuously stirred tank reactor), joiden lietetilavuus oli 4 l. Reaktorit olivat 35±1 °C:ssa lämpökaapissa ja niiden sisältöä sekoitettiin magneettisekoittajilla (300-350 rpm). Kokeen alussa reaktoreihin lisättiin 4 l mikrobiympästä ja odotettiin, kunnes tuotetun biokaasun CH_4 -pitoisuus nousi n. 50 %:iin. Sen jälkeen reaktoreihin alettiin syöttää lietelantaa (R1) sekä lietelantaa ja maissia eri maissin osuuksilla ja kuormituksilla (R2 ja R3) niin, että kukin kuormitusporras kesti 35-48 d (Taulukko 8). Osa korkean maissikuormituksen reaktorin (R3) prosessijäännöksen sentrifugoinnilla (350 rpm, 10 min) erotetusta nesteosasta (poistoneste) palautettiin reaktoriin, jotta HRT:ksi saatiin 25 d kussakin kuormitusportaassa. Reaktoreita syötettiin arkipäivisin. Syötöissä pidettiin viikon mittainen tauko (d 94-101).

Taulukko 8. Lietelantareaktorin (R1), matalan maissikuormituksen reaktorin (R2) ja korkean maissikuormituksen reaktorin (R3) eri kuormitusportaiden maissin osuudet syötteestä, OLR:t, viipymät sekä kuormitusportaiden kestot päivinä ja HRT:ään verrattuna.

	Syöte						
	Lietelanta	Lietelanta, maissi 20-30-40 %				Lietelanta, maissi 50-60-67 %	
Reaktori	R1		R2		R3		
Kuormitusporras	1	1	2	3	1	2	3
Maissin osuus syötteestä							
(% VS)	0	20	30	40	50	60	67
(% ww)	0	8	11	17	18	26	35
OLR (kg VS/m ³ /d)	2	2	2	2	2	2,5	3
HRT (d)	23	27	28	30	25	25	25
Poistonesteen osuus syöt.							
(% ww)	-	-	-	-	29	15	6
Kuormitusportaan kesto							
(d)	0-42	0-42	43-91	98-140	0-42	43-83	84-91, 98-126
(d/HRT)	1,8	1,6	1,7	1,4	1,7	1,6	1,4

Prosessijäännöksen metaanipotentiaali (jälkikaasutuspotentiaali) tutkittiin maissilla ja lietelannalla syötettyjen reaktoreiden (R2 ja R3) toisen ja kolmannen syöteportaan poistolietteistä. Koetta varten toisen kuormitusportaan poistolietteitä kerättiin kuormitusportaan kahden viimeisen viikon ajan. Kolmannen kuormitusportaan jälkikaasutuskokeissa käytettiin reaktoreihin kokeen lopussa jäänyttä prosessijäännöstä. Kokeet toteutettiin kolmena rinnakkaisena panoskokeena 120 ml serumpulloissa 35 °C:ssa. Kaksi viikkoa 4 °C:ssa säilytettyä prosessijäännöstä lisättiin pulloihin 40 g, sisältöä typetettiin N₂/CO₂-kaasuseoksella (70%:30%%, Aga oy) 5 min ja pullot suljettiin butylikumikorkeilla ja alumiinisulkijoilla. Jälkikaasutuskokeet kestivät 125-136 d.

3.5. Analyysit ja laskelmat

Metaani- ja VFA-mittaukset tehtiin kaasukromatografisesti liekki-ionisaatiodektoreilla (metaani: Perkin-Elmer Clarus 500, Perkin-Elmer Alumina kolonni 30 m * 0,53 mm, VFA: Perkin-Elmer Autosystem XL, HP-INNOWax kolonni, 30 m * 0,32 mm). Ajo-olosuhteet metaanimittauksissa: Injektori ja detektori 225 °C, uuni 100 °C. Ajo-olosuhteet VFA-mittauksissa: Injektori 230 °C, detektori 225 °C, uuni 100-160 °C (25 °C / min). Kantajakaasuina olivat argon (metaani) ja helium (VFA). Biokaasu kerättiin alumiinipusseihin ja sen tilavuus mitattiin syrjäytysperiaatteella.

Maissilajikkeiden liukoisen kemiallisen hapenkulutuksen (SCOD) ja ammoniumtypen (NH₄-N) määrittämistä varten maissinäytteet uutettiin standardin EN 12457-1 mukaisesti ja reaktoreiden prosessijäännös sentrifugoitiin (350 rpm, 10 min). Tämän jälkeen uutosta saatu neste sekä sentrifugoitu prosessijäännös suodatettiin (Whatman ja VWR suodatinpaperit). SCOD määritettiin standardin SFS-EN 5504 (Suomen standardoimisliitto 1988) mukaisesti ja NH₄-N standardin SFS-EN12457-4 (Suomen standardoimisliitto 2002) mukaisesti. Myös VFA-määrittämisessä käytettiin sentrifugoitua ja suodatettua prosessijäännöstä. Jälkikaasutuskokeiden prosessijäännöksen pH:n mittauksessa käytettiin Mettler Toledo Seven Easy -mittaria. Muissa pH-mittauksissa ja NH₄-N:n titrauksessa käytettiin Metrohm 774 pH-mittaria.

Reaktorikokeiden metaanintuotot ja prosessijäännöksen ominaisuudet on esitetty viikkokeskiarvoina (Kuva 3) tai kunkin kuormitusportaan kahden viimeisen viikon (14-15

d) keskiarvoina. Ennen kuormitusportaan kahta viimeistä viikkoa kuormitusta oli jatkunut noin yhden viipymän verran (Taulukko 8).

Syötteiden lyhyenajan metaanintuotot (Taulukko 8) laskettiin lietalannan ja Valdezmaissilajikkeen panoskokeissa 30 d aikana tuottaman metaanimäärän sekä syötteen lietalannan ja maissin prosenttiosuuksien perusteella.

Maissilajikkeiden metaanisaannot laskettiin normaalitroina (NTP-olosuhteet) panoskoepulloihin lisättyä orgaanisen kuiva-aineen määrää kohti (NI CH₄/kg VS), kuiva-ainemäärää kohti (NI CH₄/kg TS) ja tuorepainoa kohti (NI CH₄/kg WW). Maissilajikkeiden panoskoepullojen metaanintuottotuloksista vähennettiin mikrobiympä-panoskoepullojen metaanintuotto. Hehtaariohtaiset potentiaaliset metaanisaannot laskettiin kunkin lajikkeen metaanisaannon sekä näytekasvien massan ja viljelytietojen perusteella.

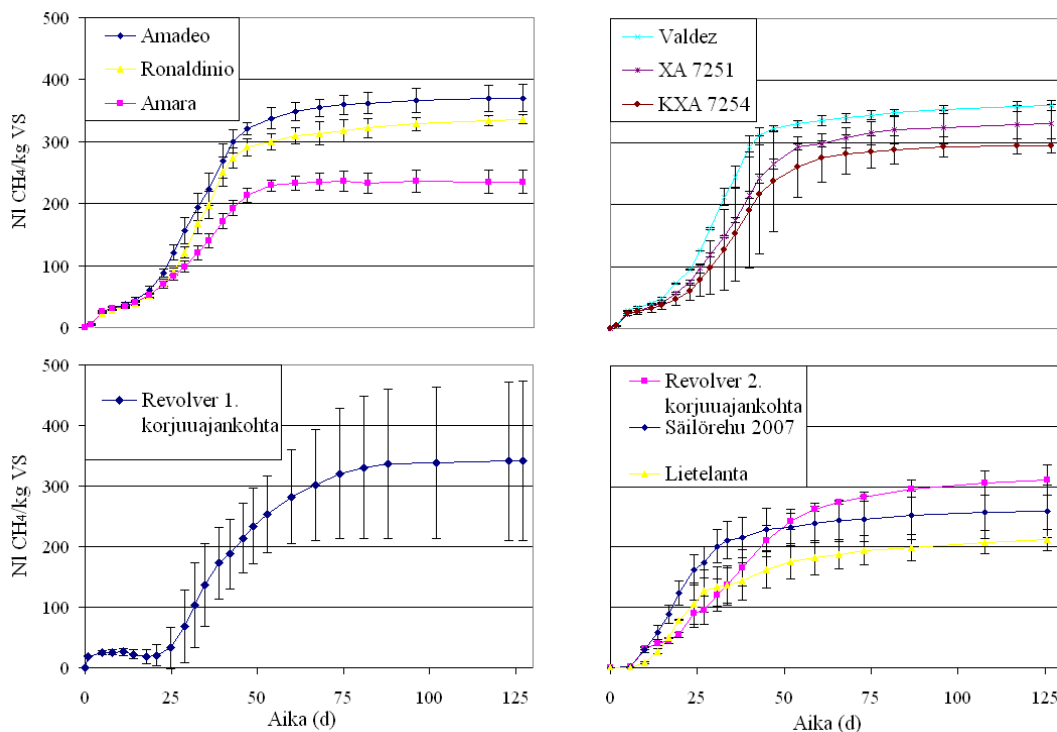
Prosessijäännöksen vapaan ammoniakkin osuus laskettiin prosessijäännöksen NH₄-N-pitoisuuden ja pH:n sekä reaktorin toimintalämpötilan perusteella.

Laukaan maissikasvuston saama tehoisa lämpötilasumma ja sade arvioitiin säätiötojen puuttuessa Jyväskylän säätiötojen (Ilmatieteen laitos 2009a-e) perusteella. Maissin saama tehoisa lämpötilasumma toukokuussa ja elokuussa/syyskuussa laskettiin kylvö- ja korjuupäivämäärien ja kuukausien keskilämpötilojen perusteella.

4. TULOKSET

4.1. Maissilajikkeiden ja lietalannan ominaisuudet ja metaanipotentialit

Tutkimuksessa määritettiin v. 2008 Piikkiön maissilajikkeiden ja Laukaan Revolverlajikkeen 1. korjuuajankohdan näyteyksilöiden pituudet, massat, lehtien ja tähkien lukumäärät sekä kolmelta Piikkiön lajikkeelta eri kasvinosien %-osuudet kasvin koko massasta (Taulukko 10). Lisäksi määritettiin Piikkiön lajikkeiden sekä Revolverlajikkeen molempien korjuuajankohtien, Kalmarin tilan lypsylehmien lietalannan ja syksyllä 2007 valmistetun säilörehun kemialliset ominaisuudet ja metaanipotentialit (Kuva 2, Taulukko 9).



Kuva 2. Vuonna 2008 Piikkiössä ja Laukaassa kasvatettujen maissilajikkeiden sekä lehmän lietalannan 1. erän ja v. 2007 valmistetun maissisäilörehun kumulatiivinen metaanintuotto panoskoikeissa (\pm kumulatiivisen metaanintuoton keskihajonta).

Taulukko 9. Vuonna 2008 Piikkiössä ja Laukaassa kasvatettujen maissilajikkeiden sekä lehmän lietalannan 1. erän ja v. 2007 valmistetun maissisäilörehun metaanipotentialit ja kemialliset ominaisuudet (\pm keskihajonta).

Näyte	Potentiaali NI CH ₄			TS (%)	VS (%)	VS/TS (%)	SCOD (mg/gTS)	Ntot (mg/gTS)	NH ₄ -N (mg/gTS)
	/kg VS	/kg TS	/kg ww						
Amadeo	370 \pm 22	346 \pm 20	54 \pm 3	15,7	14,7	93,4	105	14	0,18
Ronaldinio	336 \pm 7	310 \pm 7	52 \pm 1	16,8	15,5	92,4	124	12	0,25
Amara	236 \pm 18	219 \pm 18	39 \pm 3	17,6	16,4	93,2	134	18	0,19
Valdez	360 \pm 8	334 \pm 7	55 \pm 1	16,4	15,2	92,6	134	15	0,15
XA 7251	331 \pm 32	307 \pm 29	48 \pm 5	15,7	14,5	92,8	134	19	0,24
KXA 7254	295 \pm 11	272 \pm 10	42 \pm 2	15,6	14,4	92,2	128	14	0,18
Piikkiö k.a.±std	321 \pm 49	298 \pm 46	48 \pm 7	16,3 \pm 0,8	15,1 \pm 0,8	92,8 \pm ,5	126 \pm 11	15 \pm 3	0,20 \pm 0,04
Revolver, 1. k.	341 \pm 131	314 \pm 121	43 \pm 16	13,6	12,5	92,1	106	22	0,28
Revolver, 2. k.	311 \pm 25	276 \pm 23	74 \pm 3	27,0	23,9	88,5	153	20	0,73
Säilörehu 2007	259 \pm 43	236 \pm 40	35 \pm 6	15,0	13,7	91,1	82	15	0,92
Lietelanta 1. erä	212 \pm 18	172 \pm 16	10 \pm 2	5,7	4,7	81,4	228	40	13
Lietelanta 2. erä	-	-	-	5,0	4,3	85,1	190	31	10

Piikkiön maissilajikkeiden TS-pitoisuudet olivat 15,6-17,6 % ja VS-pitoisuudet 14,4-16,4 %. Laukaassa Revolver-lajikkeen 1. korjuuajankohdan sekä säilörehun TS-pitoisuudet olivat 13,6 ja 15,0 %. Laukaan 2. korjuuajankohdan maissi poikkesi eniten muista maissinäytteistä: TS % oli kaksinkertainen (27 %) 1. satoon verrattuna ja VS/TS-suhde (88,5 %) oli pienempi kuin muissa maissinäytteissä (91,1-93,4 %). Kaikkien maissinäytteiden SCOD-arvot olivat 105-153 mg/gTS. Ntot-pitoisuudet olivat 14-22 mg/gTS ja NH₄-N-pitoisuudet 0,15-0,92 mg/gTS. Toisen lietalantaerän TS-pitoisuus oli lähes kaksinkertainen ensimmäiseen erään verrattuna. Hanavedellä laimennetun toisen

lietelantaerän TS oli 5,0 % ja sen TS sisälsi ensimmäistä erää vähemmän Ntot:ä ja NH₄-N:ä (Taulukko 9).

Piikkiössä aikaisella Amadeo- ja keski-aikaisella Ronaldinio-lajikkeella maissiyksilöiden pituudet, massat ja lehtien lukumäärät olivat keskimäärin pienempiä kuin myöhäisemmällä lajikkeilla. Lajikkeilla Amadeo, Amara ja Ronaldinio määritettiin myös eri kasvinosien massat. Tähkän osuus koko kasvin massasta oli suurempi aikaisemmilla Amadeo- (29 %) ja Ronaldinio-lajikkeilla (32 %) kuin keskimyöhäisellä Amara-lajikkeella (22 %). Pienen tähkäosuuden lisäksi Amara-lajikkeella varren osuus massasta oli 6 %-yksikköä kahta muuta lajiketta suurempi. Tähkiä oli myös lukumääräisesti enemmän Piikkiön aikaisemmilla, nopeammin kehittyvillä lajikkeilla. Piikkiön muista lajikkeista poiketen Valdezilla viiden näytekasvin tähkät olivat erittäin pieniä ja yhdestä kasvista tähkät puuttuivat kokonaan. Aikaisuudesta huolimatta Revolver-lajikkeen tähkät eivät olleet ehtineet kehittyä 1. korjuuajankohtaan mennessä Laukaan vähäisen lämpösumman kertymän vuoksi. Keski-myöhäisillä ja myöhäisillä lajikkeilla lehtien lukumäärä (keskimäärin 13-15 kpl) sekä koko kasvin massa olivat suurempia kuin aikaisemmilla lajikkeilla (lehtiä 10-11 kpl). Lajikkeiden (Piikkiö ja Laukaa) välisessä tarkastelussa lehtien lukumäärä korreloi kasvin kokonaismassan kanssa. Lajikkeen sisäisessä tarkastelussa yksittäisten kasvien lehtien ja tähkien lukumäärät eivät kuitenkaan korreloineet kokonaismassan kanssa.

Taulukko 10. Maissiyksilöiden pituuksien, massojen, eri kasvinosien %-osuuksien sekä lehtien lukumäärien keskiarvot (\pm keskihajonnat)

Lajike	Pituus (cm)	Massa (g)	Osuus kasvin massasta (%)			Lehtiä (kpl)	Tähkiä (kpl)
			Varsi	Lehdet	Tähkät		
Amadeo	249 \pm 23	886 \pm 191	53 \pm 3	18 \pm 2	29 \pm 4	11,2 \pm 1,1	2,2 \pm 0,4
Ronaldinio	272 \pm 21	957 \pm 225	53 \pm 6	16 \pm 4	32 \pm 8	11,2 \pm 0,8	2,5 \pm 0,7
Amara	305 \pm 9	1213 \pm 225	59 \pm 4	19 \pm 2	22 \pm 4	13,4 \pm 0,7	2,0 \pm 0,0
Valdez	303 \pm 17	1229 \pm 228	-	-	-	14,6 \pm 0,8	1,6 \pm 0,7
XA 7251	311 \pm 17	1210 \pm 250	-	-	-	13,2 \pm 0,6	1,9 \pm 0,6
KXA 7254	308 \pm 12	1398 \pm 302	-	-	-	13,9 \pm 1,0	2,1 \pm 0,3
Piikkiö k.a.	291 \pm 25	1149 \pm 191	55 \pm 4	18 \pm 2	28 \pm 5	12,9 \pm 1,4	2,1 \pm 0,3
Revolver 1. k.	185 \pm 12	523 \pm 135	-	-	-	10 \pm 0,3	-

Piikkiön maissilajikkeiden metaanipotentiaalit olivat 236-370 NI CH₄/kg VS (Taulukko 9.). Korkein potentiaali oli aikaisella Amadeo-lajikkeella (370 NI CH₄/kg VS) ja toiseksi korkein lajikkeella Valdez (360 NI CH₄/kg VS).

Revolver-lajikkeen metaanipotentiaali oli ensimmäisellä korjuuajankohdalla (341 \pm 131 NI CH₄/kgVS) ja toisella korjuuajankohdalla (311 \pm 25 NI CH₄/kgVS). Ensimmäisen korjuuajankohdan metaanipotentiaalikokeessa rinnakkaisten pullojen metaanintuottojen keskihajonta oli suuri. Maissisäilörehun metaanipotentiaali oli (259 NI CH₄/kg VS). Lietelannan metaanintuotto oli 212 NI CH₄/kg VS.

Panoskokeissa maissinäytteiden ja lietelannan metaanintuottoa seurattiin 126-127 d ajan. Metaanintuotto lähti eri substraateilla n. 5-22 d jälkeen n. 20 d kestäneeseen lineaariseen kasvuun (Kuva 2). Metaanintuotto oli alkuvaiheessa nopeinta maissisäilörehulla ja lietelannalla, joilla koko metaanipotentiaalista 50 % saavutettiin n. 20 päivässä, mutta sen jälkeen 90 % potentiaalista saavutettiin vasta n. d 69 mennessä. Piikkiössä kasvatettujen maissilajikkeiden ja Revolver-lajikkeen molempien korjuuajankohdien näytteiden metaanipotentiaalista 50 % saavutettiin keskimäärin d 33-39 mennessä ja 90 % n. d 56-68 mennessä.

Reaktorikokeissa käytetyn Valdez-lajikkeen lyhyenajan (30 d) metaanipotentiaali oli 186 $\text{NiCH}_4/\text{kgVS}$, mikä oli 52 % koko metaanipotentiaalista.

4.2. Maissilajikkeiden sadot ja hehtaarikohtaiset metaanisaannot

Suurin hehtaarikohtainen metaanisaanto oli lajikkeella Valdez, 55 MWh/ha (sato 16,7 t TS/ha). Muilla Piikkiössä kasvaneilla lajikkeilla kuiva-ainesadot olivat 11,6-18,1 t/ha ja metaanisaannot 38-49 MWh/ha. Erot Piikkiön lajikkeilla olivat suuria, parhaan lajikkeen hehtaarikohtainen metaanisaanto oli 45 % suurempi kuin huonoimmalla lajikkeella. Laukaassa Revolver-lajikkeen sato (6,8 t TS/ha) ja hehtaarikohtainen metaanisaanto (21 MWh/ha) jäivät Piikkiön lajikkeita pienemmiksi (Taulukko 11).

Taulukko 11. Piikkiössä ja Laukaassa v. 2008 kasvatettujen maissilajikkeiden kasvuolosuhteet, hehtaarikohtaiset TS-sadot ja metaanisaannot sekä lannoitetypen käytön tehokkuus.

Maissilajike	FAO-luku	Kasvu-aika (d)	Lämpö ($^{\circ}\text{Cvrk}$)	Vesi (mm)	Sato (t TS/ha)	Metaania (m^3/ha)	Energiaa (MWh/ha)	TS-sato/lannoite N kg	kWh/lannoite N kg
Amadeo	220				11,6	4001	40	98	336
Ronaldinio	240				13,4	4146	41	113	348
Amara	260	105	1045	239	17,8	3887	38	150	326
Valdez	290				16,7	5581	55	142	468
XA 7251	>300				15,8	4832	48	133	405
KXA 7254	>300				18,1	4911	49	153	412
Piikkiö k.a.					$15,5 \pm 2,6$	4560 ± 660	45 ± 7	132 ± 22	383 ± 55
Revolver 1. k.	160	91	769	344	6,8	2132	21	85	263

4.3. Maissin ja lietalannan yhteiskäsittely biokaasureaktoreissa

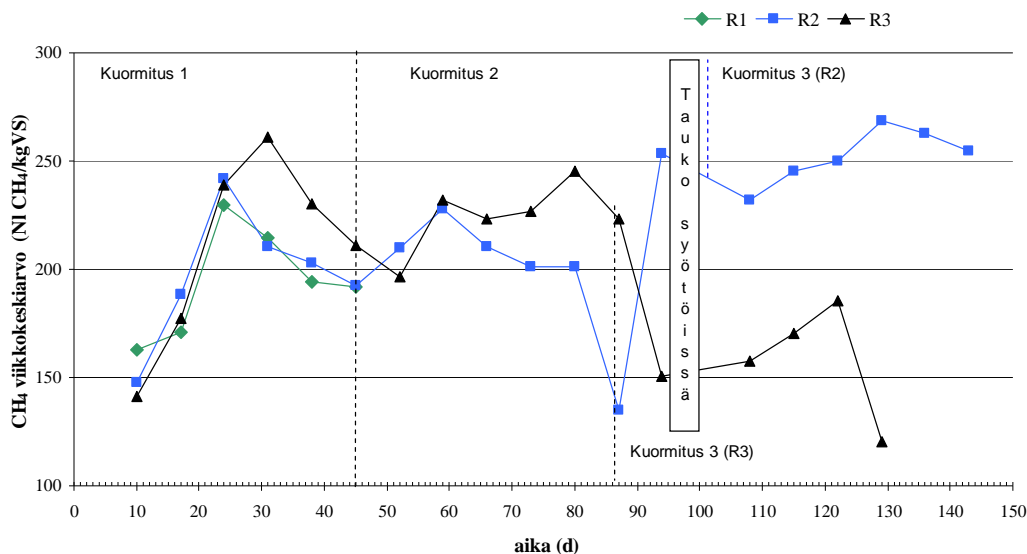
Tutkimuksessa testattiin biokaasuntuottoa CSTR-reaktoreilla lietalannan ja maissin eri VS-suhteilla. Korkein metaanintuotto yhteiskäsittelyssä saavutettiin, kun maissin osuus syötteen VS:sta oli 40 % ja kuormitus 2 $\text{kg VS}/\text{m}^3/\text{d}$ (R2, kuormitusporras 3). Tällöin metaanintuotto oli $259 \pm 6 \text{ Ni CH}_4/\text{kg VS}$. Kyseisellä kuormituksella metaanintuotto oli myös tasaisinta (Kuva 3) ja saavutettiin suurin metaanintuotto suhteessa syötteen metaanipotentiaaliin (95 % syötteen potentiaalista). Toiseksi suurin metaanintuotto ($234 \pm 16 \text{ Ni CH}_4/\text{kg VS}$, 78 % syötteen potentiaalista) saavutettiin, kun maissin osuus oli 60 % ja kuormitus 2,5 $\text{kgVS}/\text{m}^3/\text{d}$ (Taulukko 8). Koko koejaksoa tarkasteltaessa metaanintuotto vaihteli kuitenkin viikosta toiseen, kun maissin osuus syötteestä ja kuormitus olivat suuria (50-67 %, 2-3 $\text{kg VS}/\text{m}^3/\text{d}$) (Kuva 3).

Muilla maissisyötteen prosentiosuuksilla ja kuormituksilla metaanintuotto vaihteli välillä 194-221 $\text{Ni CH}_4/\text{kg VS}$ ja metaanintuotto oli 49-82 % syötteen potentiaalista. Pelkän lietalannan metaanintuotto kuormituksella 2 $\text{kgVS}/\text{m}^3/\text{d}$ oli $193 \pm 2 \text{ Ni CH}_4/\text{kg VS}$ (91 % syötteen potentiaalista) (Taulukko 12, Kuva 3).

Taulukko 12. Lietelantareaktorin (R1), matalan maissikuormituksen reaktorin (R2) ja korkean maissikuormituksen reaktorin (R3) operationaaliset olosuhteet, syötteiden ja prosessijäännösten ominaisuudet ja metaanintuotot kuormitusportaiden viimeisten 14-15 d aikana (\pm keskihajonta).

	Syöte						
	Lietelanta	Lietelanta, maissi 20-30-40 %				Lietelanta, maissi 50-60-67 %	
Reaktori	R1		R2			R3	
Kuormitusporras	1	1	2	3	1	2	3
Maissin osuus syötteestä							
(% VS)	0	20	30	40	50	60	67
(% ww)	0	8	11	17	18	26	35
Poistonesteen osuus syöt.							
(% ww)	-	-	-	-	29	15	6
OLR (kg VS/m ³ /d)	2	2	2	2	2	2,5	3
HRT (d)	23	27	28	30	25	25	25
Kuormitusportaan kesto							
(d)	0-42	0-42	43-91	98-140	0-42	43-83	84-91, 98-126
(d/HRT)	1,8	1,6	1,5	1,4	1,7	1,6	1,4
Syöte							
TS (%)	5,7	6,4	6,2	6,7	5,7	6,9	8,3
VS (%)	4,7	5,4	5,4	5,9	5	6,3	7,5
SCOD (g/l)	13,6	14,5	11,7	11,7	14,8	13,9	14,9
NH ₄ -N (g/l)	0,72	0,67	0,45	0,33	0,63	0,41	0,32
Kokonais-N (g/l)	2,3	2,4	1,6	1,7	2,2	1,8	1,9
Prosessijäännös							
TS (%)	4,8 \pm 0,2	5,0 \pm 0,4	4,5 \pm 0,1	4,0 \pm 0,1	4,7 \pm 0,0	4,7 \pm 0,2	4,9 \pm 0,1
VS (%)	3,7 \pm 0,3	3,9 \pm 0,4	3,4 \pm 0,1	3,1 \pm 0,1	3,7 \pm 0,1	3,7 \pm 0,2	4,0 \pm 0,1
SCOD (g/l)	10,0 \pm 1,0	10,4 \pm 0,4	12,2 \pm 1,0	10,3 \pm 1,0	10,5 \pm 0,8	9,1 \pm 0,7	12,7 \pm 1,0
NH ₄ -N (g/l)	0,87 \pm 0,04	0,81 \pm 0,05	0,84 \pm 0,03	0,66 \pm 0,03	0,79 \pm 0,04	0,65 \pm 0,05	0,53 \pm 0,05
Kokonais-N (g/l)	2,5 \pm 0,1	2,5 \pm 0,1	2,3 \pm 0,1	1,9 \pm 0,1	2,4 \pm 0,0	2,2 \pm 0,1	1,9 \pm 0,1
pH	7,5 \pm 0,1	7,5 \pm 0,1	7,4 \pm 0,1	7,4 \pm 0,1	7,47 \pm 0,1	7,4 \pm 0,1	6,9 \pm 0,3
VFA _{tot} (mg/l)	60 \pm 104	69 \pm 119	1918 \pm 568	55 \pm 22	112 \pm 165	1079 \pm 129	4854 \pm 798
TS-vähennemä (%)	16	22	28	41	18	32	41
VS-vähennemä (%)	21	27	36	48	26	41	47
CH ₄ -pitoisuus (%)	57 \pm 2	52 \pm 1	44 \pm 6	52 \pm 2	51 \pm 3	48 \pm 2	41 \pm 9
Syötteen CH ₄ -potentiaali	212	241	256	271	286	301	311
Lyhyen ajan CH ₄ -pot.	137	147	152	157	162	167	170
CH ₄ -saanto							
(Nl/kg VS)	193 \pm 2	198 \pm 7	194 \pm 84	259 \pm 6	221 \pm 14	234 \pm 16	153 \pm 46
(Nl/kg ww)	9,0 \pm 0,1	10,7 \pm 0,4	10,5 \pm 4,5	15,3 \pm 0,3	11,0 \pm 0,7	14,6 \pm 1,0	11,5 \pm 3,5
%:ia syötteen							
CH ₄ -potentiaalista	91	82	76	95	77	78	49
%:ia syötteen lyhyen ajan							
CH ₄ -potentiaalista	141	135	128	165	136	141	90

Kokeen alussa, ensimmäisessä kuormitusportaassa viikkokohtainen metaanintuotto vaihteli suuresti kaikissa reaktoreissa (Kuva 3). Kussakin kuormitusportaassa kahden viimeisen viikon metaanintuotto oli suhteellisen tasaista muilla kuormituksilla, paitsi 30 % maissiosuuden kuormituksessa (R2, kuormitus 2) ja 67 % maissiosuudella (R3, kuormitus 3).

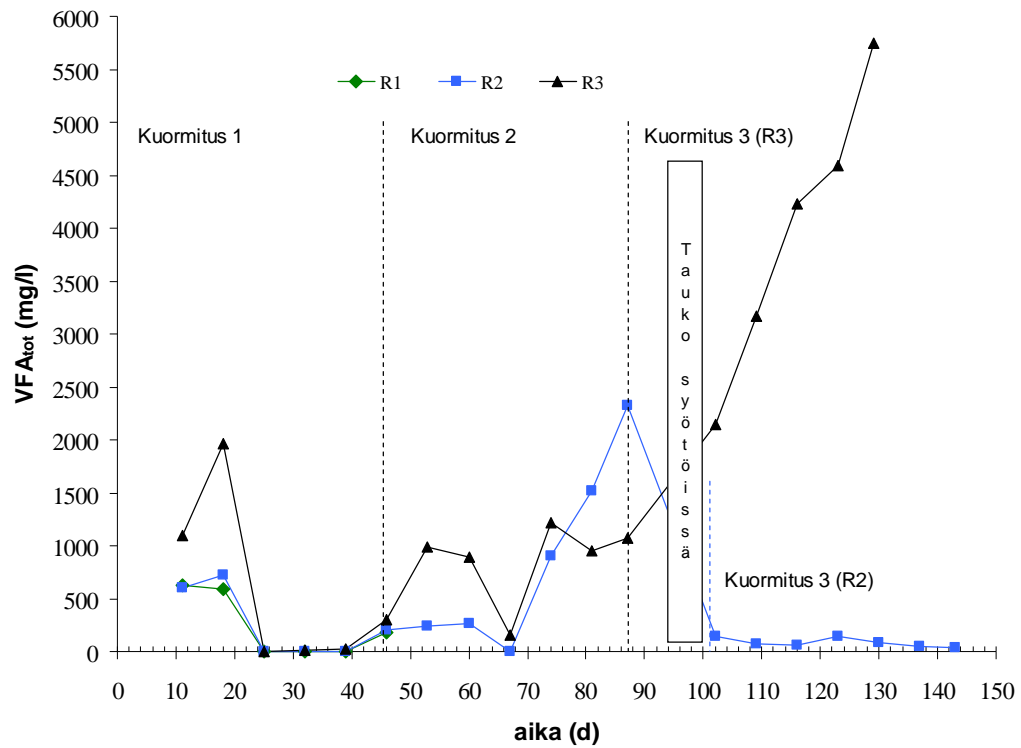


Kuva 3. Metaanintuotto viikkokeskiarvoina lietelantareaktorissa (R1), matalan maissikuormituksen reaktorissa (R2) ja korkean maissikuormituksen reaktorissa (R3) eri kuormitusportaisissa.

Lietelantareaktorissa TS-vähennelmä oli 16 % ja VS:n vähennelmä 21 %. Maissireaktoreilla TS:n vähennemät olivat 18-41 % ja VS:n vähennemät 26-47 %. Vähennemät kasvoivat molemmissa maissireaktoreissa aina, kun siirryttiin seuraavaan kuormitusportaiseen. Prosessijäännöksen SCOD-arvo kasvoi, kun matalan maissikuormituksen reaktorissa oli toimintahäiriöitä (R2, kuormitusporras 2).

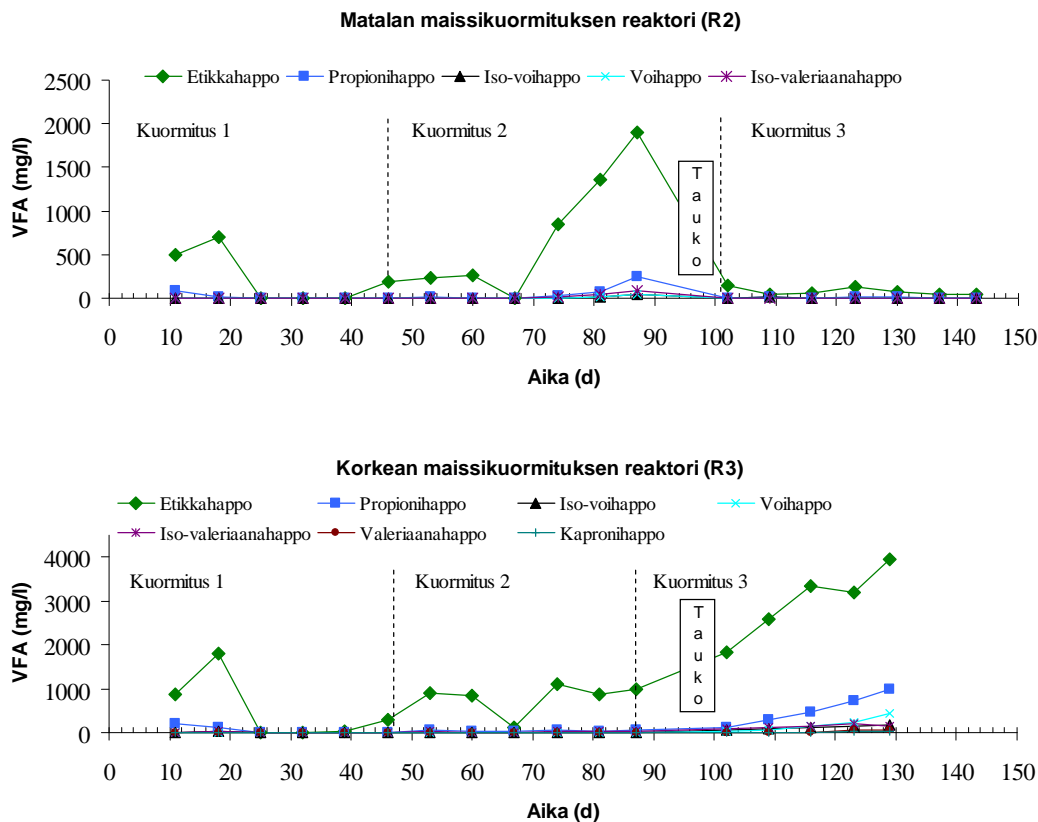
Metaanintuoton heikkenemistä (d 80-87) matalan maissikuormituksen reaktorissa (kuormitus 2, maissin osuus 30 %) edelsi d 67 jälkeen alkanut VFA-pitoisuuden merkittävä kasvu. VFA-pitoisuus oli d 67 aikaan alle määritysrajan, mutta kasvoi lähes lineaarisesti d 88 mennessä arvoon 2320 mg/l. Tämän jälkeen, reaktoreiden syöttötauon aikana (d 94-101), matalan maissikuormituksen reaktorissa (R2) VFA-pitoisuus laski 2320 mg/l:sta 140 mg/l:een. Syöttötauon jälkeen VFA-pitoisuus pysyi alhaisena (38-148 mg/l), vaikka maissin osuutta VS-kuormituksesta lisättiin 40 %iin (Kuva 4).

Korkean maissikuormituksen reaktorissa (R3) siirryttiin viimeiseen kuormitusportaiseen jo viikkoa ennen reaktoreiden syöttötaukoja. Syöttötauko ei kuitenkaan kyseisessä reaktorissa pienentänyt VFAtot-pitoisuutta, vaan pitoisuus oli korkeampi tauon jälkeen. Lietelantareaktorin (R1) VFA-pitoisuudet pysyivät matalina koko kokeen ajan.



Kuva 4. VFAtot-pitoisuudet lietelantareaktorissa (R1) sekä matalan maissikuormituksen reaktorissa (R2) ja korkean maissikuormituksen reaktorissa (R3).

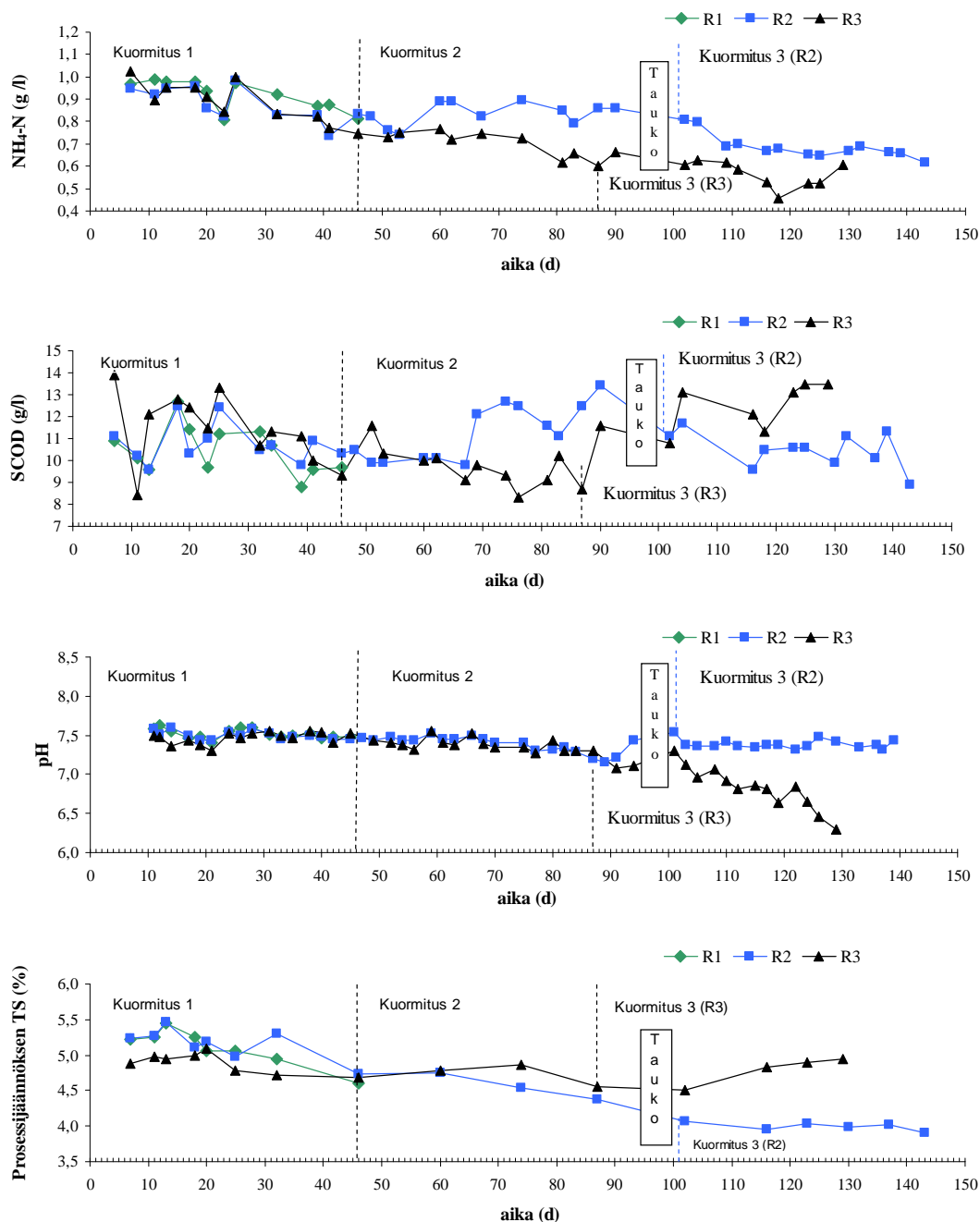
Eri VFA:sta suurimmat pitoisuudet koko reaktorikokeiden ajan oli etikkahapolla. Propionihappoa alkoi kertyä prosessiin korkeimmalla maissikuormituksella (R3), enenevästi kohti kokeen loppua (lopussa 983 mg/l), samoin voihiappoa (lopussa 438 mg/l). Prosessiin kertyi lopussa myös pieniä määriä (25-133 mg/l) iso-valeriaanahappoa, valeriaanahappoa ja kapronihappoa (Kuva 5).



Kuva 5. Eri VFA:jen pitoisuudet matalan maissikuormituksen reaktorissa (R2) ja korkean maissikuormituksen reaktorissa (R3).

Korkean maissikuormituksen reaktorissa (R3) viimeisessä kuormitusvaiheessa havaittiin korkean VFA-pitoisuuden myötä nopea pH:n lasku reaktoreiden syöttötaun jälkeen (pH lopussa 6,30). VFA-pitoisuuden kohotessa matalan maissikuormituksen reaktorissa (R2) maissiosuudella 30 % pH laski alimmillaan arvoon 7,15. Muulloin pH-arvo pysyi vakaana (7,3-7,6) kaikissa reaktoreissa (Kuva 6).

$\text{NH}_4\text{-N}$:n osuus N_{tot} :stä oli syötteissä 17-31 % ja prosessijäännöksissä 30-39 %. Prosessijäännösten $\text{NH}_4\text{-N}$ -pitoisuudet pienenevät, kun kokeessa siirryttiin käyttämään vähemmän $\text{NH}_4\text{-N}$:ä sisältävää lietelantasyötettä (2. lietelantaerä), ja kun maissin osuutta syötteessä kasvatettiin. Laskennallinen vapaan ammoniakkin pitoisuus oli suurin lietelantareaktorissa (n. 30 mg/l) ja alhaisin korkeimmalla maissikuormituksella (n. 4 mg/l), alhaisien $\text{NH}_4\text{-N}$ -pitoisuuden ja pH:n vuoksi.



Kuva 6. NH₄-N, SCOD, pH ja TS-pitoisuus ajan funktiona lietelantareaktorissa (R1) sekä matalan maissikuormituksen reaktorissa (R2) ja korkean maissikuormituksen reaktorissa (R3).

Jälkikaasutuspotentiaali 35 °C:ssa oli pienin (123 NI CH₄/kg VS), kun metaanintuotto oli reaktorissa suurinta (maissin VS-osuus 40 %) ja vastaavasti suurin (254 NI CH₄/kg VS), kun metaanintuotto oli reaktorissa heikointa (maissin VS-osuus 67 %) (Taulukko 13).

Taulukko 13. Maissireaktoreiden (R2 ja R3) prosessijäännösten toisen ja kolmannen kuormitusportaan TS-pitoisuudet, VS-pitoisuudet ja jälkikaasutuspotentiaalit (\pm keskihajonta).

Maissin osuus (OLR)	TS (%)	VS (%)	Jälkikaasutuspotentiaali		
			NI CH ₄ /kg/Vs	NI CH ₄ /kg/TS	NI CH ₄ /kg/ww
30 % (2 kgVS/m ³ /d)	4,5	3,4	157 \pm 1	121 \pm 1	5 \pm 0
40 % (2 kgVS/m ³ /d)	3,9	3,0	123 \pm 1	96 \pm 1	4 \pm 0
60 % (2,5 kgVS/m ³ /d)	4,7	3,7	163 \pm 9	130 \pm 7	9 \pm 0
67 % (3 kgVS/m ³ /d)	5,0	4,1	254 \pm 4	208 \pm 3	11 \pm 0

5. TULOSTEN TARKASTELU

5.1. Metaanipotentiaalit ja hehtaarikohtaiset metaanisaannot

Tässä tutkimuksessa Piikkiössä saavutettiin keskimyöhäisellä (Valdez) ja myöhäisillä (XA 7251 ja KXA 7254) maissilajikkeilla lämpöoloiltaan keskivertovuotena suhteellisen aikaisella korjuuajankohdalla korkeampi hehtaarikohtainen metaanisaanto (48-55 MWh) kuin esim. Lehtomäen (2006) tutkimuksessa useimmilla boreaalisilla energiakasveilla (28-53 MWh) ja Seppälän ym. (2008) tutkimuksessa ruokohelpillä Etelä-Suomessa lämpimänä vuonna 2007 (35 MWh). Piikkiön maissilajikkeilla hehtaarikohtaiset metaanisaannot olivat noin puolet pienempiä kuin saksalaisessa (Schittenhelm 2008) ja itävaltalaisessa (Amon ym. 2007) tutkimuksessa.

Keskimyöhäinen Valdez-lajike oli Piikkiössä hehtaarikohtaiselta metaanisaannoltaan paras lajike, koska sen metaanipotentiaali ja TS-sato olivat molemmat korjuuajankohtana suhteellisen korkeita. Lajikkeiden paremmuus metaanisaannon kannalta voi kuitenkin vaihdella kasvuympäristöstä ja vuodesta riippuen. Eri lajikkeiden metaanipotentiaali ja hehtaarikohtainen metaanisaanto voivat muuttua eri tavalla kasvukauden edetessä (Schittenhelm 2008). Keski-Euroopassa voidaan yleensä valita optimaalinen korjuuajankohta lajikekohtaisesti, mutta Suomessa varsinkaan myöhäiset energiamaissilajikkeet eivät yleensä ehdi saavuttaa suurinta metaanipotentiaaliaan ja hehtaarikohtaista metaanisaantoaan maamme lyhyen kasvukauden, pienen lämpösumman ja mahdollisen hallan vuoksi (Taulukko 14). Etelä-Suomessa voidaan kuitenkin saada lämpiminä vuosina ainakin keskiaikaisilla ja keskimyöhäisillä lajikkeilla suuria (20-28 t TS/ha) ja hyvälaatuisia (TS n. 35 %) satoja (Laine & Tahvonen 2007, Laine 2009a).

Taulukko 14. Kahden Piikkiössä kasvatetun maissilajikkeen TS-pitoisuudet, TS-sadot, metaanipotentiaalit ja hehtaarikohtaiset metaanisaannot verrattuna Saksassa ja Itävallassa kasvatettujen lajikkeiden ominaisuuksiin eri kasvuajoilla ja lämpösommilla.

Lajike	Vuosi	FAO	Kasvu- aika (d)	Lämpö- summa (°Cvrk)	TS (%)	TS- sato (t TS/ha)	CH ₄ - potentiaali (NI CH ₄ / kg VS)	CH ₄ - saanto (m ³ /ha)	Energia- saanto (MWh/ha)
<i>Piikkiö, Etelä-Suomi (tämä tutkimus, Laine 2009a):</i>									
Valdez	2008	290	105	1045	16	17	370	5581	55
Ronaldinio	2008	240	105	1045	17	13	336	4146	41
			125	1134	ei tietoa	15	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa
Ronaldinio	2007	240	146	1322	34	16	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa
			158	1419	43	23	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa
<i>Braunschwig, Pohjois-Saksa (Schittenhelm 2008):</i>									
Gavott	2004	250	96	1000 ^a	14	ei tietoa	300	ei tietoa	ei tietoa
			124	1360 ^a	23	ei tietoa	287	ei tietoa	ei tietoa
			153	1650 ^a	32	23 ^b	340	7453	74
			180	1810 ^a	35	ei tietoa	330	ei tietoa	ei tietoa
			194	1860 ^a	39	ei tietoa	-	ei tietoa	ei tietoa
Mikado	2004	500	96	1000 ^a	11	ei tietoa	310	ei tietoa	ei tietoa
			124	1360 ^a	18	ei tietoa	335	ei tietoa	ei tietoa
			153	1650 ^a	21	ei tietoa	320	ei tietoa	ei tietoa
			180	1810 ^a	24	23 ^b	350	7719	76
			194	1860 ^a	35	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa
Doge	2004	700	96	1000 ^a	11	ei tietoa	330	ei tietoa	ei tietoa
			124	1360 ^a	17	ei tietoa	295	ei tietoa	ei tietoa
			153	1650 ^a	19	ei tietoa	360	ei tietoa	ei tietoa
			180	1810 ^a	22	24 ^b	419	9370	93
			194	1860 ^a	26	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa
<i>Ludersdorf, Etelä-Itävalta (Amon ym. 2007):</i>									
LZM 600	2003	600	97	1190 ^c	18	21	313	6200	61
			122	1540 ^c	29	28	326	8600	85
			151	1850 ^c	48	32	287	9000	89

a Braunschweigin lämpösomma on laskettu v. 2004 huhti-lokakuun keskilämpötilan (14,1 °C) (Schittenhelm 2008) ja Hannoverin v. 1961-1990 huhti-lokakuun kuukausien keskilämpötilojen perusteella (Euroweather 2009a)

b TS-sato laskettu CH₄-potentialin ja hehtaarikohtaisen CH₄-saannon perusteella olettaen, että VS/TS-suhde on 95 %

c Laskettu Wienin v. 1961-1990 huhti-lokakuun kuukausien keskilämpötiloista (Euroweather 2009b)

Laukaassa Revolver-lajikkeen sato (7 t TS/ha) ja hehtaarikohtainen metaanisaanto (21 MWh) jäivät pieniksi normaalia kylmemmän kasvukauden takia. Lämpimänä vuonna 2007 Cerruti-rehumaissin sadot olivat Maaningalla ja Laukaassa n. 10 t TS/ha (Niiranen 2008b, Seppälä ym. käsikirjoitus). Samana vuonna Saarijärvellä koiranheinä ja ruokonata tuottivat yli 11 t TS/ha sadot ja 36 MWh/ha metaanisaannon (Seppälä ym.2008). Tässä sekä muissa tutkimuksissa (Taulukot 4, 5 ja 6) maissin saamien lämpösommien ja satojen perusteella Cerrutia tuottoisammilla lajikkeilla on mahdollista saada Keski-Suomessakin nurmea suurempia satoja, jos kylvä ei myöhästy ja halla ei lopeta syksyllä maissin kasvua. Maissin viljelyyn liittyvien epävarmuuksien ja ympäristövaikutusten vuoksi esim. monivuotiset nurmikasvit ovat Keski-Suomessa todennäköisesti maissia parempia biokaasukasveja tällä hetkellä.

VS-kohtaiset metaanipotentiaalit eivät olleet tässä tutkimuksessa riippuvaisia lajikkeen aikaisuudesta/myöhäisyydestä tai TS-sadosta. Amadeo-lajikkeen tämän tutkimuksen paras metaanipotentiaali (370 NI CH₄/kg VS) saattoi olla seurausta suuresta tähkän osuudesta johtuvasta tasapainoisesta ravinnekoostumuksesta (Amon ym. 2007).

Toisaalta Valdez-lajike tuotti toiseksi suurimman metaanipotentialin, vaikka sen tähdät eivät olleet yhtä pitkälle kehittyneitä kuin muilla Piikkiön lajikkeilla. Kypsymättömän maissin suhteellisen hyvä metaanipotentiali voi osin selittyä varren lignoselluloosan hyvällä biohajoavuudella, joka muuttuu huonommaksi kasvin kypsyessä pidemmälle (Schittenhelm 2008). Metaanipotentialit olivat tässä tutkimuksessa pienempiä kuin suurimmat Keski-Euroopassa saavutetut potentialit (esim. Schittenhelm 2008), mutta samankaltaisia kuin esim. Amonin ym. (2007) tutkimuksissa maissin eri tuleentumisasteilla (268-365 NI CH₄/kg VS).

Lehmän lietalannan metaanipotentiali oli Al-Seadin (2001) raportoimaan lehmän lietalannan potentialin vaihteluvälin (200-300 NI CH₄/kg VS) rajoissa. Maissisäilörehun alhainen (259 NI CH₄/kg VS) metaanipotentiali saattoi johtua pitkän varastointiajan ja korjuuhetken alhaisen TS-pitoisuuden aiheuttamista VS:n tappiosta, sekä kyseisten lajikkeiden mahdollisesti alhaisesta metaanipotentialista. Revolver-lajikkeen toisen korjuuajankohdan korkeampi TS-pitoisuus ja pienempi VS/TS-suhde sekä alentunut metaanipotentiali johtuivat todennäköisesti hallan aiheuttamasta VS:n ja veden menetyksestä.

5.2. Biokaasureaktorin optimaalinen kuormitus

Suurin ja vakain metaanintuotto (259 ± 6 NI CH₄/kg VS) saavutettiin, kun maissin osuus oli 40 % syötteen VS:sta ja kuormitus 2 kgVS/m³/d (R2). Metaanintuotto oli 95 % syötteen panoskokeissa tuottamasta metaanipotentialista, mutta tuotto oli nopeampaa (HRT 30 d) kuin panoskokeissa (HRT n. 120 d). Tällä kuormituksella myös VFAtot-pitoisuus pysyi reaktorin syöttötaun jälkeen edellistä kuormitusporrasta alhaisempana. Edellisessä kuormitusportaassa (R2, maissin osuus 30 %) VFA-pitoisuuden kasvu ja metaanintuoton aleneminen johtuivat todennäköisesti ainakin osittain syötön teknisistä ongelmista (tukoksen aiheuttama ylipaine, hapen pääsy reaktoriin,). Lehtomäen ym. (2007) reaktorikokeissa boreaalisilla energiakasveilla suurin metaanintuotto saavutettiin kasvin 30 %:n VS-osuudella OLR:n ollessa 2 kgVS/m³/d (Taulukko 14).

Tämän tutkimuksen perusteella CSTR-prosessi on mahdollinen ainakin 3 kg VS/m³/d OLR:een ja maissin 60 % VS-osuuteen asti. Tällä kuormituksella metaanintuotto oli toiseksi suurinta ja suhteellisen vakaata (234 ±16 NI CH₄/kg VS). Kun samassa reaktorissa (R3) OLR nostettiin edelleen 3,5 kg VS/m³/d:een (maissin osuus 67 %), ylikuormitus nosti VFA-pitoisuuksia kuormitusportaan alusta alkaen. VFA-pitoisuuden kasvu ylitti reaktorilietteen (HCO₃⁻:n, lannan NH₄-N:n) puskurikapasiteetin ja pH alkoi laskea. pH:n laskiessa metanogeneesi inhiboitui yhä enemmän kokeen loppua kohden.

Cornell ym. (2008) saivat laboratoriokokeessa lehmän lietalannan metaanintuoton kasvamaan maissin lisäyksellä siihen asti, kunnes kokonaiskuormitus oli 4 kg VS/m³/d ja maissin osuus 50 % syöttestä (304 l CH₄/kg VS). Suuremmalla kuormituksella (5 kg VS/m³/d, maissin osuus 60 %) metaanintuotto oli edelleen korkeaa (300 l CH₄/kg VS). Heidän kokeessaan nämä kuormitukset paransivat pelkän lietalannan metaanintuottoa enemmän (77 ja 75 %) kuin tämän tutkimuksen optimaalinen kuormitus (34 %) (Taulukko 14). Cornellin ym (2008) tutkimuksen lisäksi vain harvoissa laboratoriokokeissa on prosessi saatu toimimaan hyvin korkeilla (4-5 kg VS/m³/d) energiakasvien OLR:lla (Lindorfer ym. 2008). Stewart (1980) saavutti laboratoriokokeessaan 6,7 kg TS/m³/d OLR:n (Lindorfer ym. 2008).

Lindorferin ym. (2008) täyden mittakaavan kokeessa OLR:n kaksinkertaistaminen 2,11:sta 4,25 kg VS/m³/d:ään ja samanaikainen energiakasvin (maissi, ruis) VS-osuuden kasvattaminen 92,5 %:sta 96,5 %:iin syöttestä aiheutti aluksi samanlaisen metaanisaannon

pienenemisen kuin Lehtomäen ym. (2007) tutkimuksessa siirryttäessä 2:sta 3 kg VS/m³/d:een (energiakasvin 40 % VS-osuudella). Metaanintuotto palasi kuitenkin lähes ennalleen muutaman kuukauden kuluttua mikrobipopulaation adaptoiduttua syötteeseen. Kokeessa metaanintuotto onnistui myös 5,5 kg VS/m³/d OLR:lla usean viikon ajan ilman häiriöitä (Lindorfer ym 2008).

Taulukko 14. Tämän tutkimuksen reaktorikokeiden prosessiparametrit ja metaanintuotot verrattuna muihin energiakasveja käsitelleiden laboratoriomittakaavan CSTR-reaktoreiden (Cornell ym. 2008, Lehtomäki ym. 2007) sekä täydenmittakaavan (Lindorfer ym. 2008) CSTR-reaktorin prosessiparametreihin ja metaanintuottoihin.

Syötteen	Lannan ja kasvin VS-suhde	OLR (kg VS/m ³ /d)	HRT (d)	CH ₄ -tuotto (NI CH ₄ /kg VS)	CH ₄ -tuotto/lietelannan CH ₄ -tuotto (%)
Lehmän lietelanta (R1)	100:0	2	23	193	100
Lietelanta, maissi (R2)	80:20	2	27	198	103
	70:30	2	28	194	101
	60:40	2	30	259	134
Lietelanta, maissi (R3)	50:50	2	25	221	115
	40:60	2,5	25	234	121
	33:67	3	25	153	79
<i>Cornell ym. 2008</i>					
Lehmän lietelanta	100:0	2	33	171	100
Lietelanta, maissi	67:33	3	30	263	154
	50:50	4	28	304	178
	40:60	5	26	300	175
<i>Lehtomäki ym. 2007:</i>					
Lehmän lietelanta	100:0	2	20	151	100
Lietelanta, nurmisäilörehu	10:90	2	20	143	95
	80:20	2	20	178	118
	70:30	2	20	268	177
	60:40	2	20	250	166
	60:40	3	18	233	154
	60:40	4	16	186	123
<i>Lindorfer ym. 2008:</i>					
Sianlanta, maissi, ruis	7,5:92,5	2,11	130	400	Ei tietoa
	3,5:96,5	4,25	75	360	Ei tietoa

Käytännön sovelluksessa lietetilavuudeltaan 2000 m³ biokaasureaktori (nimellisteho 430 kW) vaatisi tämän tutkimuksen optimaalisella maissin ja lietelannan yhteiskäsittelyllä (maissin VS-osuus 40 %, OLR 2 kg VS/m³/d) 38 ha maissin viljelyalan Etelä-Suomessa sekä 930 lypsylehmää, jotka tuottavat lietelantaa 18600 m³/a.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa keskimyönteisellä (Valdez, 55 MWh/ha) ja kahdella myönteisellä (48-49 MWh/ha) energiamaissilajikkeella oli Etelä-Suomessa suurimmat hehtaarikohtaiset metaanisaannot. Etelä-Suomessa parhaalla lajikkeella hehtaarikohtainen metaanisaanto oli 45 % suurempi kuin huonoimmalla lajikkeella. Keski-Suomessa aikaisen rehumaislajikkeen hehtaarikohtainen metaanisaanto (21 MWh/ha) oli pienemmän tehoisan lämpötilasumman kertymän vuoksi 45-62 % pienempi kuin Etelä-Suomessa

energiamaissilajikkeilla. VS-kohtainen metaanipotentiaali (236-370 NI CH₄/kg VS) vaihteli lajikekohtaisesti, mutta ei ollut riippuvainen lajikkeen kypsyysluokituksesta.

CSTR-reaktorissa saatiin Valdez-maissilajikkeella paras metaanisaanto, kun lehmän lietelannan ja maissin VS-suhde oli 60:40 ja OLR 2 kg VS/m³/d. Metaanintuotto onnistui myös VS-suhteella 40:60 ja OLR 2,5 kg VS/m³/d:lla, mutta oli 10 % vähäisempää kuin optimaalisella kuormituksella. Käyttämällä optimaalista kuormitusta prosessijäännöksen varastoinnissa syntyvät metaanipäästöt (jälkikaasutuspotentiaali) pienenevät.

KIITOKSET

Kiitos Fortumin säätiölle tutkimuksen rahoittamisesta. Kiitokset ohjaajille/tarkastajille: Mari Seppälälle, Jukka Rintalalle ja Sari Luostariselle. Kiitokset myös Metener Oy:n Erkki Kalmarille ja Juha Luostariselle, MTT:n Erkki Laineelle ja Auvo Sairaselle sekä Mervi Koistiselle, Viljami Kinnuselle, Outi Pakariselle ja muille apua antaneille. Kiitos äidille.

KIRJALLISUUS

- Al-Seadi, T. 2001. Good practice in quality management of AD residues from production. Report made for International Energy Agency, Task 24 – Energy and biological conversion of organic waste.
- Al-Seadi, T., Rutz, D., Prasel, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen, R. 2008. Biogas handbook. University of Southern Denmark Esbjerg, 125 s.
- Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Zollitsch W., Mayer K. & Gruber L. 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118: 173–182.
- Amon, T., Kryvoruchko V., Amon, B., Moitzi, G., Buga, S. Lyson, D.F., Hackl, e., Jeremic, D., Zollitsch, W. & Pötsch, E. 2003. Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. final report for Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft.
- Amon, T., Kryvoruchko V., Amon, B., Moitzi, G., Buga, S. & Zollitsch, W. 2002. Methanbildungsvermögen von Mais. Final report for Pioneer Saaten Ges.m.b.H., Parndorf.
- Angelidaki, I. & Sanders, W. 2004. assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3: 117-129.
- Böhmel, C., Lewandowski, I. & Claupein, W. 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agricultural systems* 96: 224-236.
- Colosanti, J. & Muszynski, M. 2009. The maize floral transition. Teoksessa: Bennetzen J. & Hake, S. (toim.), *Handbook of Maize: Its biology*, Springer, New York, 41-55.
- Cornell, M., Banks, C.J. & Heaven, S. 2008. Impact of the addition of maize on the anaerobic digestion of cattle slurry. Teoksessa: 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes and Energy Crops, Hammamet, Tunisia, 25-28 May 2008.
- Euroweather 2009a. Climate averages, Hannover. Internet 29.11.2009. http://www.eurometeo.com/english/climate/city_EDDV/clima_select/meteo_Hannover - Viitattu 25.11.2009.
- Euroweather 2009b. Climate averages, Vienna. http://www.eurometeo.com/english/climate/city_LOWW/meteo_Vienna - Viitattu 25.11.2009.
- Finke, C., Möller, K., Schlink, S., Gerowitt, B. & Isselstein, J. 1999. The environmental impact of maize cultivation in the European Union: Practical options for the improvement of the environmental impact – Case study Germany -.Georg-August-University of Göttingen.
- Gerin, P.A., Vliegen, F. & Jossart, J.-M. 2008. Energy and CO₂ balance of maize and grass as energy crops for anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 99: 2620-2627.
- Gujer, W. & Zehnder, A.B.J. 1983. Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Science & Technology* 15: 127-167.
- Ilmatieteen laitos 2007. Terminen kasvukausi 2007. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_168.html - Viitattu 6.10.2009.
- Ilmatieteen laitos 2009a. Toukokuun 2009 sää ja tilastot. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_59.html - Viitattu 28.6.2009.
- Ilmatieteen laitos 2009a. Kesäkuun 2009 sää seuranta ja tilastot. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_60.html - Viitattu 28.6.2009.
- Ilmatieteen laitos 2009c. Heinäkuun 2009 sää seuranta ja tilastot. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_61.html - Viitattu 28.6.2009.
- Ilmatieteen laitos 2009d. Elokuun 2009 sää ja tilastot. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_62.html - Viitattu 28.6.2009.

- Ilmatieteen laitos 2009e. Syyskuun 2009 sää ja tilastot. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_63.html - Viitattu 28.6.2009.
- Hashimoto 1983. Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. *Biotechnology and Bioengineering* 25: 185-200.
- Hills, D.J. & Roberts D.W. 1981. Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues. *Agricultural Wastes* 3:179-189.
- Hyttiäinen & Hiltunen 1992. Kasvintuotanto 1. Gummerus kirjapaino Oy, Jyväskylä, 171 s.
- Kangas, A., Laine, A., Niskanen, M., Salo, Y., Vuorinen, M., Jauhiainen, L. & Nikander, H. 2007. Virallisten lajikekokeiden tulokset 2000-2007. MTT:n selvityksiä 150.
- Kauter, D. & Claupein, W. 2004. Cropping systems for energy supply with catchment crops and energy maize in Central Europe: principles and agronomic problems. Book of proceedings of 2nd World Conference on Biomass for Energy and Industry, Rome, 2004.
- Kreps, R. 2008. Energy maize breeding – current state. Pdf-tiedosto. http://www.tll.de/ainfo/pdf/epfl/epf11_08.pdf - Viitattu 7.10.2009.
- Kruska, V. & Emmerling, C. 2008. Flächennutzungswandel durch Biogaserzeugung (Changing land use due to biogas production). *Naturschutz und Landschaftsplanung* 40: 69-72.
- Laaber, M., Kirchmayr, R., Madlener, R. & Braun, R. 2005. Development of an evaluation system for biogas plants. Teoksessa: Proceedings of the Fourth International Symposium Anaerobic Digestion of Solid Waste, Copenhagen, Denmark, 1: 631-635.
- Laine, A. 2008a. Henkilökohtainen tiedonanto. Sähköpostiviesti 30.10.2008.
- Laine, A. 2008b. Piikkiö kasvukauden sää 2008. Excel tiedosto. Sähköpostiviesti 30.10.2008
- Laine, A. 2009a. Maissin viljelyn mahdollisuudet ja viljelytekniikka koetulosten valossa. ProAgria Pirkanmaa Tampere 3.2.2009. pdf-tiedosto. https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/Artturi/Artturikirjasto/Esitelmadiasarjat/Maissinviljely_3.2.2009_AL_Tampere.pdf - Viitattu 21.3.2009.
- Laine, A. 2009b. Henkilökohtainen tiedonanto. Sähköpostiviesti 8.6.2009.
- Laine, A. 2009c. Henkilökohtainen tiedonanto. Sähköpostiviesti 17.6.2009.
- Lehtomäki, A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. *Jyväskylä studies in biological and environmental science* 163. Jyväskylä university printing house, Jyväskylä
- Lehtomäki, A, Huttunen, S. & Rintala, J.A. 2007. Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to maize ratio. *Resources, Conservation and Recycling* 51: 591-609.
- Mata-Alvarez, J. 2003. Fundamentals of anaerobic digestion process. Teoksessa: Mata-Alvarez, J.(toim.), Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, IWA Publishing, London, 1-20.
- Neureiter 2005. Effect of silage preparation on methane yields from whole crop maize silage. Proceedings of 4th international Symposium anaerobic digestion of solid waste, Copenhagen, Denmark. <http://www.iea-biogas.net/Dokumente/memberpublications/Neureiter.pdf> - Viitattu 20.5.2009.
- Niiranen, R. 2008a. Maissi kasvaa pitkäksi myös Pohjois-Savossa. *Maaseudun tiede* 65.
- Niiranen, R. 2008b. MTT Maaningalla tutkitaan maissia. *Maaseudun tiede* 65.
- Rittmann, B. E. & McCarty, P. L. 2001. Environmental biotechnology: principles and applications. McGraw-Hill Book Co, Singapore, 755 s.
- Saaten Union 2009. Revolver. Internet 5.8.2009. <http://www.saaten-union.com/index.cfm/article/2368.html> - Viitattu 5.8.2009.

- Sairanen, A. 2009. Cerruti-lajikkeen sato Maaningan alustavissa kokeissa 2007. Henkilökohtainen tiedonanto. Sähköpostiviesti 26.11.2009.
- Schittenhelm, S. 2008. Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *European Journal of Agronomy* 29: 72-79.
- Seppälä, M., Laine, A., Tahvonen, R. & Rintala, J. Methane production from different maize species in Finland. *Käsikirjoitus*.
- Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. & Rintala, J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare. *Bioresource Technology* 100: 2952-2958.
- Seppälä 2009. Piikkiö kasvukauden sää 2007. Henkilökohtainen tiedonanto. Excel-tiedosto.
- Tan, I.Y.S., van Es, H.M., Duxbury, J.M., Melkonian, J.J., Schindelbeck, R.R., Geohring, L.D., Hively, W.D. & Moebius, B.N. 2009. Single-event nitrous oxide losses under maize production as affected by soil type, tillage, rotation, and fertilization. *Soil & Tillage Research* 102: 19-26.
- Tatah, E. L. 2008. The impacts of genotype and harvest time on dry matter, biogas and methane yields of maize (*Zea mays* L.). Dissertation. Justus-Liebig-University Giessen.
- Tuomisto, H. 2006. Biokaasun ja peltoenergian tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset. Maa- ja metsätalousministeriö. [http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmuistiot/2006/siirto/trm2006_1_biokaasun%20ja%](http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmuistiot/2006/siirto/trm2006_1_biokaasun%20ja%20)
- Tuomisto, H.L. & Helenius, J. 2008. Comparison of energy and greenhouse gas balances of biogas with other transport biofuel options based on domestic agricultural biomass in Finland. *Agricultural and Food Science* 17: 240-251.
- Weiland, P., Melcher, F., Rieger, Ch., Ehrmann, Th., Helffrich, D. & Kissel, R. 2004. Biogas-Messprogramm – Bundesweite Bewertung von Biogasanlagen aus technologischer Sicht. FAL, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft.
- Weiland, P. 2006. Biomass digestion in agriculture: A successful pathway for the energy production and waste treatment in Germany. *Engineering Life in Sciences*. 6: 302-209.
- Weiland, P. 2009. Country report Germany. IEA Bioenergy Task 37. Jyväskylä. http://www.iea-biogas.net/Dokumente/countryreports/09/germany_report4-09.pdf - Viitattu 24.7.2009