

**LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO**

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

**BIOENERGIAA JA RAVINTEITA KASVI- JA ELÄINPERÄISISTÄ  
SIVUAINEVIRROISTA PARIKKALASSA**

Tarkastajat                      Professori, TkT Mika Horttanainen

Diplomi-insinööri Mika Luoranen

Ohjaaja                              Diplomi-insinööri Päivi Karttunen

Lappeenranta, 16.3.2009

Jouni Havukainen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
LUT Energia

Jouni Havukainen

### **Bioenergiaa ja ravinteita kasvi- ja eläinperäisistä sivuaineista Parikkalassa**

Diplomityö

2009

127 sivua, 16 kuvaa, 15 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Mika Horttanainen  
Diplomi-insinööri Mika Luoranen

Avainsanat: Biohajoava, biomassat, mädätys, kompostointi, poltto  
Keywords: Biodegradable, biomass, digestion, composting, incineration

Euroopan unionissa pyritään lisäämään uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Tämän työn tavoitteena oli selvittää Parikkalan kunnan alueella muodostuvat biomassat sekä tutkia niiden hyötykäyttömahdollisuuksia sähkön, lämmön sekä lannoitteiden tuotannossa. Käsiteltäviä biomassoja ovat eläintilojen lietteet ja lannat, biojätteet ja yhdyskuntalietteet, vesistöjen kunnostuksessa syntyvät biomassat sekä peltobiomassat ja metsäbiomassa.

Mädätyksen kannalta olennaisinta on materiaalien kosteus ja haihtuvan orgaanisen aineksen pitoisuus sekä siitä saatava biokaasumäärä. Poltossa polttoaineen kuiva-aineen lämpöarvo ja kosteus määrittelevät saadun hyödyn. Kompostoinnissa on tärkeää huolehtia riittävästä ilman saannista ja riittävästä viipymäajasta. Hyödynnettäessä biokaasua sähkön ja lämmön yhteistuotannossa on tärkeää löytää hyötykäyttö myös muodostuvalle lämmölle. Poltosta saatavan tuhkan hyötykäyttö onnistuu metsälannoitteena, kun poltetaan turvetta tai puuta. Kompostia voidaan hyödyntää maanparannusaineena.

Parikkalan alueella tarkasteltiin biomassojen nykyistä ja mahdollista tulevaa hyötykäyttöä. Tarkastelu tehtiin skenaarioiden avulla. Skenaarioihin kuuluvat mädätyksen ja polton maksimipotentialit sekä keskitetyn ja hajautetun käsittelyn skenaariot. Alueelta on saatavissa paljon biomassoja, joista massaltaan suurin on eläintilojen lannat. Alueella on hankaluutena löytää sopiva kulutuskohte biokaasusta tuotetulle lämmölle, mutta sopivana kohteena voisi toimia alueella oleva suuri sikala tai lämpökeskukset.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
LUT Energy

Jouni Havukainen

### **Bioenergy and nutrients from plant- and animal based side products in Parikkala**

Master's thesis

2009

127 pages, 16 pictures, 15 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Mika Horttanainen  
Master of Science in engineering Mika Luoranen

Keywords: Biodegradable, biomass, digestion, composting, incineration

In European Union the use of renewable energy sources is pursued to increase. The aim of this study was to establish the amounts of biomasses in Parikkala municipality and examine their utilization possibilities in producing electricity, heat and fertilizer. Examined biomasses include slurry and manure from farms, biowaste, municipal sludge, biomasses from restoration of water areas, biomass from arable land and forests.

In digestion most essential is the moisture content, volatile organic compound content and the biogas potential from it. In incineration the heat value of dry material and moisture content define the achieved benefit. In composting it's important to take care of adequate availability of air and sufficient retention time. In utilizing biogas in joint production of electricity and heat it's important to find a use also for the heat. The ash from incineration can be used in forest fertilizer, when burning wood or turf. Compost can be used as soil amendment.

In Parikkala area the present and possible future utilization of biomasses were examined. This was done by forming different scenarios. These scenarios include the maximal available potential from digestion, maximal potential from incineration, centralized and decentralized utilization. There are a lot of biomasses available in Parikkala and the biggest biomass by mass quantity is manure from farms. The difficulty in the area is to find a proper consumption location where to use the warmth produced by biogas. Suitable locations could be big piggery situated in Parikkala or district heating plants.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö tehtiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa ympäristötekniikan osastolla. Työn mahdollisti Parikkalan kunnassa käynnissä oleva AMO- bioenergiaohjelma ja toivon, että tämän työn tuloksista on apua hankkeen eteenpäin viemisessä.

Kiitokset professori Mika Horttanaiselle, DI Mika Luoraselle ja DI Päivi Karttuselle työn ohjauksesta ja hyvistä neuvoista. Kiitokset myös muille ympäristötekniikan osastolla työskenteleville henkilöille, jotka edesauttoivat diplomityön teossa. Haluaisin myös kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta opintojeni aikana. Suurkiitokset Minnalle.

## SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO .....	3
LYHENNELUETTELO .....	3
1 JOHDANTO .....	4
2 PARIKKALAN ALUEEN PERUSTIEDOT .....	6
3 BIOMASSOJEN TÄRKEIMMÄT OMINAISUUDET .....	7
3.1 Biomassojen ominaisuudet mädätyksen kannalta.....	8
3.2 Biomassojen ominaisuudet kompostoinnin kannalta.....	11
3.3 Biomassojen ominaisuudet polton kannalta.....	13
4 BIOMASSOJEN KÄSITTELY JA HYÖDYNTÄMISEN .....	15
4.1 Lannan levitys sellaisenaan.....	16
4.2 Mädätys .....	19
4.2.1 Mädätysprosessin kuvaus.....	19
4.2.2 Mädätystekniikka .....	28
4.3 Kompostointi.....	41
4.3.1 Kompostointiprosessin kuvaus .....	42
4.3.2 Kompostointitekniikoita.....	48
4.4 Poltto .....	56
4.4.1 Lietteiden ja lantojen poltto .....	56
4.4.2 Metsäbiomassojen poltto.....	62
4.4.3 Peltobiomassojen ja järvivuo'on poltto .....	66
5 LOPPUTUOTTEET JA NIIDEN HYÖDYNTÄMINEN.....	75
5.1 Mädätyksen lopputuotteiden hyödyntäminen .....	75
5.1.1 Biokaasun hyödyntäminen .....	75
5.1.2 Mädätteen hyödyntäminen .....	80
5.2 Kompostoinnin lopputuotteen hyödyntäminen.....	82
5.3 Poltosta saatavan tuhkan hyödyntäminen .....	84
5.3.1 Metsälannoitus .....	84
5.3.2 Maarakentaminen.....	86
5.3.3 Kaatopaikkasijoitus .....	87
6 PARIKKALAN BIOMASSAT JA HYÖDYNTÄMISEN NYKYTILANNE .....	88

6.1 Eläintilojen lietteet ja lannat.....	89
6.2 Biojätteet ja yhdyskuntalietteet.....	89
6.3 Vesistöjen kunnostuksessa syntyvät biomassat .....	90
6.4 Peltobiomassat .....	91
6.5 Metsäbiomassa .....	91
7 BIOMASSOJEN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET PARIKKALASSA...92	
7.1 Menetelmät ja lähtöarvot.....	92
7.2 Skenaariot.....	96
7.2.1 Skenaario 1: Mädätyksen enimmäispotentiaali.....	97
7.2.2 Skenaario 2: Polton enimmäispotentiaali.....	98
7.2.3 Skenaario 3: Keskitetty mädätys.....	99
7.2.4 Skenaario 4: Keskitetty mädätys ja kasviperäisen materiaalin poltto .....	100
7.2.5 Skenaario 5: Hajautettu mädätys.....	101
7.2.6 Skenaario 6: Parikkalan alueen suurin lypsykarjatila .....	102
7.3 Biomassojen energian hyödyntäminen .....	103
7.4 Ravinteiden määrät.....	106
7.5 Kuljetuksen kustannukset .....	108
7.6 Herkkyystarkastelu.....	109
8 YHTEENVETO .....	112
LÄHTEET.....	117

Liite 1. Energian kulutus sekä tiloilla ja skenaarioissa tuotettavan energian potentiaalit

## SYMBOLILUETTELO

$l_{25}$	Veden höyrystymislämpö (25 °C:ssa)	[kJ/kg]
$q_{u,w}$	Polttoaineen alempi lämpöarvo käyttökosteudessa	[MJ/kg]
$q_{u,d}$	Kuivan polttoaineen alempi lämpöarvo	[MJ/kg]
$x_{vesi}$	Veden osuus polttoaineesta	[%]

## LYHENNELUETTELO

Ca	Kalsium
CHP	Yhdistetty sähkön- ja lämmön tuotanto
C-N suhde	Hiilen ja typen suhde
CSTR	Jatkuvasekoitteinen mädätysreaktori
Fe	Rauta
H <sub>2</sub> S	Rikkivety
LCFA	Pitkäketjuiset rasvahapot
Mg	Magnesium
MHF	Monikerrosuuni
N	Typpi
Na	Natrium
NH <sub>3</sub>	Ammoniakki
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammoniumtyppi
K	Kalium
P	Fosfori
TPAD	Lämpötilavaiheistettu mädätys (Temperature phased anaerobic digestion)
TS	Kiintoaines
VFA	Haihtuvat rasvahapot
VS	Haihtuva kiintoaines

## 1 JOHDANTO

Ilmastomuutosta aiheuttavien kasvihuonekaasupäästöjen rajoittaminen on tulevana vuosikymmeninä yksi keskeisimmistä haasteista ihmiskunnalle. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä tärkeimpinä keinoina pidetään energian käytön tehostamisen ohella uusiutuvia energialähteitä. Suomessa uusiutuvista energialähteistä on jo pitkään panostettu puuperäiseen biomassaan. Kiinnostusta on viime aikoina kohdistunut myös muihin biohajoaviin massoihin, kuten maatiloilla syntyviin lantoihin, peltobiomassoihin sekä vesistöjen kunnostuksesta saataviin biomassoihin. (Hagström et al. 2005, 5.)

Hyödyntämättä jäävät biohajoavat jätteet aiheuttavat myös ympäristökuormitusta, joutuessaan jätteen orgaanisen aineen hajoamisesta. Hapettomissa olosuhteissa jätteestä muodostuu kasvihuoneilmiötä kiihdyttävää metaania. Jätteen kaatopaikkasijoituksesta aiheutuukin suuri osa jätehuollon kokonaispäästöistä. Jätteen hyödyntämättä jättämisestä syntyy myös menetyksiä materiaali- ja energiavaroissa. Kaatopaikalle sijoitettu hyödyntämätön biohajoava jäte vähentää myös takaisin luontoon palaavaa orgaanista ainesta aiheuttaen maaperän köyhtymistä. (Tuovinen 2002, 5.)

Kansainvälisten ja kansallisten jätestrategioiden tavoitteena on viime aikoina ollutkin biojätteen kaatopaikkasijoittamisen vähentäminen ja uusiutuvan energian lisääminen. Biojätteiden osuus yhdyskuntajätteessä on suuri ja niiden kaatopaikkasijoittamista rajoitetaan kaatopaikkadirektiivin aikataulun mukaisesti. Vuoteen 2016 mennessä kaatopaikoille saa sijoittaa Suomessa alle miljoona tonnia biohajoavaa jätettä, kun vuonna 2005 kaatopaikkasijoitukseen sai vielä viedä yli puolitoista miljoonaa tonnia. (Maa- ja metsätalousministeriö 2008, 8.)

Euroopan komission 23.1.2008 julkaisemaan ilmasto- ja energiapakettiin sisältyy direktiiviehdotus uusiutuvien energialähteiden hyödyntämisen lisäämiseksi sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteet. Suomelle esitettiin uusiutuvien energian osuuden lisäämistä 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Vuonna 2005 tämä osuus oli 28,5



prosenttia. Liikennepolttoaineista tulisi myös vuonna 2020 olla vähintään 10 % tuotettu uusiutuvalla energialla. (Maa- ja metsätalousministeriö 2008, 6.)

Suomen kansallisessa ilmasto- ja energiastrategiassa on Suomella tavoitteena nousta bioenergian käytössä johtavien teollisuusmaiden joukkoon. Bioenergian tuotannolla on Suomessa myös huomattava merkitys maaseudun ja alueellisen kehityksen turvaamisessa. (Maa- ja metsätalousministeriö 2008, 4.) Vanhasen toinen hallitus onkin kiinnittänyt paljon huomiota energia- ja ilmastoasioihin. Maatalouteen perustuvaa energiantuotantoa pyritään lisäämään ja maatilojen biokaasuvoimaloita sekä maatilojen uusiutuvan energian investointeja tuetaan. Myös keskitettyjen biokaasulaitosten (peltobiomassa, teurasjätteet, karjanlanta, yhdyskuntajätteet) tarvetta ja investointimahdollisuuksia selvitetään. (Maa- ja metsätalousministeriö 2008, 5.)

Aiempaa tutkimusta liittyen biomassojen hyötykäyttöön on myös Suomessa tehty paljon. Jyväskylän ammattikorkeakoulussa on tutkittu paljon näiden materiaalien hyötykäyttömahdollisuuksia. Erityisesti ammattikorkeakoulun bioenergiakeskus on tuottanut paljon julkaisuja liittyen bioenergian tuotannon, jalostuksen ja käytön sekä siihen liittyvän yrittäjyyden edistämiseen. Energiakeskuksen julkaisusarjaan kuuluu muun muassa Biokaasulaitos esimerkimaatilalle – esiselvitys. Asiasta on myös kirjoitettu Jyväskylän ammattikorkeakoulussa monia loppuotöitä, kuten Biokaasun tuotanto – ja käyttömahdollisuudet Kanta-Hämeessä (Hatsala, A, 2004). Valtion teknillinen tutkimuslaitos on myös tuottanut asiaan liittyviä tutkimuksia, kuten Bioenergian tuotanto- ja käyttöketjut sekä niiden suorat työllisyysvaikutukset (Halonen et al. 2003).

Kauppa- ja teollisuusministeriön asettaman Energiansäästöohjelman ja Uusiutuvan energian edistämishjelman (UEO) 2003 - 2006 toteutus- ja seurantaryhmän esityksestä perustettu laaja Peltobiomassa, liikenteen biopolttonesteet ja biokaasu -jaosto teki myös paljon työtä asian tiimoilta. Tärkeimpiin toimialueisiin liittyivät peltobiomassan, liikenteen biopolttonesteiden ja biokaasun tuotannon, tutkimuksen ja käytön edistämistoimien suunnittelu ja seuranta. Jaosto seurasi kansallista ja kansainvälistä kehitystä ja laati ehdotuksia UEO:n tavoitteiden toteutukseen. Jaosto myös valmisti suunnitelman peltoenergian tuotannon ja käytön edistämiseksi. (Vesanto et al. 2007.) Jaosto julkaisi kak-

si väliraporttia vuosina 2004 ja 2006 sekä loppuraportin vuonna 2007. Näiden raporttien lisäksi jaosto teetti selvitykset Bioenergy crop production and climate policies (Lankoski ja Ollikainen 2006) ja Biokaasun maatilatuotannon kannattavuusselvitys (Hagström et al. 2005) sekä kirjallisuusselvityksen bioenergiantuotannon ympäristövaikutuksista (Tuomisto 2005). Jaoston työ päättyi vuoden 2006 loppuun.

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää Etelä-Karjalassa sijaitsevan Parikkalan kunnan alueella saatavissa olevat biomassapotentiaalit ja tutkia niiden hyödyntämismahdollisuuksia sähkön, lämmön sekä lannoitteiden tuotannossa. Tässä diplomityössä käsiteltäviä biomassoja ovat eläintilojen lietteet ja lannat, biojätteet ja yhdyskuntalietteet, vesistöjen kunnostuksessa syntyvät biomassat sekä peltobiomassat ja puusivutuotteet. Biomassoista selvitetään niiden tärkeimmät ominaisuudet, kuten energiasisällöt ja ravinnepitoisuudet sekä niiden hyödyntämisen nykytilanne. Käsittelyyn ja hyödyntämiseen soveltuvia tekniikoita ja niiden yhdistelmiä vertaillaan keskenään sekä eri käsittelyvaihtoehtojen lopputuotteiden määrää ja laatua tutkitaan.

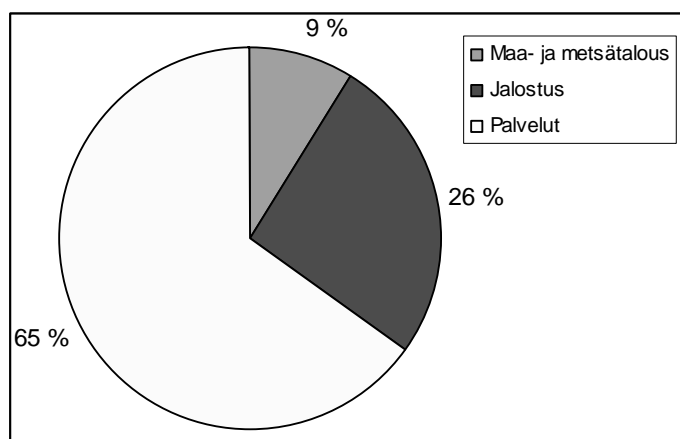
Diplomityö liittyy Parikkalan kunnan maaseutupoliittisen erityisohjelman alueellisen maaseutuosion ohjelmaehdotukseen. Ohjelmaehdotus jakautuu kahteen erilliseen ohjelmaan, jotka tukevat alueen elinkeinoelämän monipuolistamista ja maaseudun elinvoimaisuuden säilyttämistä. Tämä diplomityö kuuluu bioenergian tuotannon paikallisen toimintamallin luomisen ja toiminnan käynnistämisen kehittämisohjelmaan. Tämän kehittämisohjelman tavoitteena on selvittää bioenergian paikallisen tuotannon toimintamalli ja kehittää uusia vesistön suojelun mahdollisuuksia ja menetelmiä sekä monipuolistaa alueen elinkeinoelämää ja luoda perinteiselle maatalousalueelle uusia työpaikkoja. Lisäksi ohjelmaehdotukseen kuuluu Saimaa-Laatokka-kehityskäytävän vetovoimaisimmat palvelut Parikkalaan – ohjelma, jota ei tässä diplomityössä käsitellä.

## **2 PARIKKALAN ALUEEN PERUSTIEDOT**

Parikkala on Etelä-Suomen läänin koillisosassa sijaitseva Etelä-Karjalan maakuntaan kuuluva kunta, jonka asukasluku vuonna 2007 oli 6 070. Kunnan pinta-ala on 760 km<sup>2</sup>,

josta vesistöä on 168 km<sup>2</sup>. Parikkalan naapurikuntia ja kaupunkeja ovat Ruokolahden, Rautjärven, Punkaharjun ja Kesälahden kunnat sekä Kiteen kaupunki. Kunnalla on lisäksi 65,1 km rajavyöhyke Venäjän kanssa. Parikkala sijaitsee 60- 70 km päässä koulutuskeskuksista (Imatra, Savonlinna, Kitee), Laatokan Karjalassa Laatokan vaikutuspiirissä sekä Laatokan ja Järvi- Suomen vesistöalueiden leikkauskohdassa. Parikkalan läpi kulkevia suurempia valtaväyliä ovat Helsinki-Joensuu valtatie 6 ja Helsinki-Joensuu rautatie, jotka molemmat haarautuvat Parikkalassa Savonlinnan suuntaan.

Parikkalan kunnan väkiluku vähenee luonnollisen väestömuutoksen seurauksena, mutta muuttotappiota ei ole viime vuosina ollut. Työttömyys on valtakunnallista keskiarvoa korkeampi ja pitkäaikaistyöttömien osuus on suhteellisen suuri. Työttömyysaste oli joulukuussa 2007 13,3 %. Parikkala on vahvaa perusmaatalousaluetta ja kunta on Etelä-Suomen läänin suurin maidontuottaja. Parikkalan elinkeinorakenne on nähtävissä kuvassa 1. Vajaa kolmasosa on jalostusta, vajaa kaksi kolmasosaa on palveluita ja loput ovat maa- ja metsätaloutta. (Parikkala 2009.)



**Kuva 1.** Parikkalan elinkeinorakenne (Parikkala 2009).

### 3 BIOMASSOJEN TÄRKEIMMÄT OMINAISUUDET

Ennen biomassojen käsittelyä on tärkeää tietää niiden ominaisuudet, sillä ominaisuuksien perusteella pystytään selvittämään soveltuuko tietty materiaali johonkin käsittelytek-

niikkaan. Biomassojen ominaisuudet, kuten kosteus, orgaanisen aineksen ja ravinnepitoisuus, biohajoavuus sekä lämpöarvo määrittävät pitkälti materiaalien hyötykäyttömahdollisuudet. Esimerkiksi hyvin kosteaa ja alhaisen lämpöarvon omaavaa materiaalia tuskin kannattaa polttaa, vaan kannattaa selvittää soveltuisiko se vaikka mädätykseen.

### **3.1 Biomassojen ominaisuudet mädätyksen kannalta**

Biomassojen ominaisuuksista mädätyksen kannalta tärkeitä ovat kiintoainepitoisuus, ravinnepitoisuus, partikkelikoko, orgaanisen aineen pitoisuus, aineksen biohajoavuus ja ligniinipitoisuus. Nämä tekijät vaikuttavat biomassasta saatavaan metaanintuottopotentiaaliin. (Deublein ja Steinhauser (toim.) 2008, 79.) Biomassojen kuivaainepitoisuudella on vaikutusta prosessin valintaan, sillä hapettomassa tilassa tapahtuva anaerobinen mädätys voidaan toteuttaa märkä- tai kuivaprosessina. Märkäprosessin etuina ovat helpommin järjestettävät massan siirrot (pumppaukset) sekä sekoitukset. Kuivamädätyksessä taas etuna on pieni reaktoritilavuuden tarve sekä pienemmän tilavuuden lämmitystarve. Märkämädätyksessä kuiva-ainepitoisuus on alle 12 % ja kuivamädätyksessä 25 – 40 %. (Taavitsainen et al. 2002, 21.) Molemmissa näissä prosesseissa bakteerit tarvitsevat kuitenkin ympäristöstään tarpeeksi vettä elääkseen (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH 2006, 26). Märkä- ja kuivaprosessia selvitetään tarkemmin luvussa 4.2, jossa myös muita mädätystekniikkaan liittyviä asioita käsitellään.

Hydraulinen viipymäaika eli aika, jonka mädätettävä massa viipyy reaktorissa, riippuu mädätettävästä materiaalista. Jos materiaalilla on alhaisempi hajoamisnopeus, kasvavat bakteerit hitaammin. Tällöin hydraulinen viipymäaika pitenee ja reaktorin kokoa joudutaan kasvattamaan samaa massamäärää käsiteltäessä. Perusyhdisteet voidaan luetella hajoamisnopeuden perusteella hitaimmin hajoavasta nopeinten hajoavaan seuraavasti: ligniini, selluloosa, hemiselluloosa, proteiinit, rasvat ja hiilihydraatit. Sian lannan mädätyksellä on korkeamman rasvapitoisuuden takia lyhyempi hydraulinen viipymäaika kuin lehmän lannalla. (Wellinger 1999, 10; Lehtomäki et al. 2007, 23; Taavitsainen et al. 2002, 97.)

Ligniini suojaa kasvien soluseinämissä kuituja, kuten hemiselluloosaa ja selluloosaa. Ligniini myös hajoaa hitaasti mädätyksessä. Ligniinipitoisuus on suurempi kasvien ikääntyessä ja tämän takia kasvien ikä ja kypsyysaste vaikuttavat kasvien metaanituottopotentiaaliin. Biokaasun tuotantoon liittyvässä sadonkorjuussa pyritään siihen, että metaanintuottopotentiaali on korkea ja samalla myös sadon määrä olisi mahdollisimman suuri. Tähän päästään, kun korjataan useampi sato kasvukauden aikana. (Lehtomäki et al. 2007, 23.)

Mädättämällä käsiteltävissä jätteissä tulee olla mikrobikannan kasvua varten riittävä määrä ravinteita. Tärkeimmät ravinteet ovat typpi ja fosfori. Näiden lisäksi prosessille tärkeitä ravinteita ovat natrium, kalium, kalsium, magnesium ja rauta. (Taavitsainen et al. 2002, 23.) Ravinteiden suhteista erityisen tärkeä on hiili – typpisuhde (C:N- suhde). Sopiva C:N- suhde edistää solujen kasvua (Taavitsainen et al. 2002, 23). Mikroorganismit hyödyntävät hiiltä ja typpeä yleensä suhteessa 25 – 30:1. C:N - suhde voi kuitenkin olla hyvinkin paljon alhaisempi joillain mädätyksessä käytetyillä jakeilla, esimerkiksi puhdistamolietteellä tämä suhde on noin 9:1. Yhteismädätyksellä pystytään saamaan suhde lähemmäksi ideaalista. Yhdyskuntalietteen sekaan voidaan esimerkiksi sekoittaa biojätettä. (Ward et al. 2008, 7928.)

Ravinteiden lisäksi eräät metalli-ionit (hivenaineet) vaikuttavat prosessin toimintaan. Ne voivat olla joko edistäviä eli katalysoivia tai hidastavia eli inhiboivia riippuen pitoisuuksista. Tällaisesta ovat esimerkkinä  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  - ja  $\text{Mg}^{2+}$  - ionit, jotka stimuloivat 75 – 400 mg/l pitoisuudessa, inhiboivat vähän 1 000 – 5 500 mg/l pitoisuudessa ja ovat vahvasti inhiboivia 3 000 – 1 2000 mg/l pitoisuudessa. Etenkin karjanlannan anaerobisessa hajoamisessa on ammoniakki voimakas inhibiittori ja vaikutukseen riittää jo noin 150 mg/l. (Taavitsainen 2002, 23.) Tällöin puhutaan vapaan ammoniakin pitoisuudesta, jonka ajatellaan olevan aktiivinen komponentti ammoniakin aiheuttamassa inhibitiossa. Ammoniakille totutetut asetaattia hyödyntävät bakteerit voivat tosin myös toimia jopa 700 mg-N/l konsentraatiossa. Näissä korkeimmissa pitoisuuksissa metaanin tuotto on kuitenkin vähäisempää. (Hansen et al. 1998, 5 – 6.) Mädätystä inhiboivista tekijöitä selvitetään lisää luvussa 4.2.

Mädätyksessä mikrobit hyödyntävät mädätettävän materiaalin sisältämää orgaanista ainesta muodostaessaan biokaasua ja mädätettä. Tämän takia orgaanisen aineen pitoisuus vaikuttaa suoraan siihen, kuinka paljon voidaan tietystä materiaalista saada biokaasua. Orgaanisen aineen määrä ilmoitetaan yleensä haihtuvan kiintoaineen (VS) määränä ja suhteellisenä osuutena kiintoaineesta (TS).

Maatilojen lanta on hyvä biokaasuprosessin perusmateriaali, koska se sisältää useimmat biokaasuprosessin tarvitsemat ravinteet ja sillä on korkea puskurikapasiteetti eli se tasaa hyvin pH:n muutoksia (Lehtomäki 2007, 18). Tuoreesta lehmän ja sian lannasta saatavan biokaasun määrä on kuitenkin pieni johtuen orgaanisen kuiva-aineksen pienestä pitoisuudesta ja siitä, että suurimman osan rehun energiarikkaista ainesosista eläimet ovat jo hyödyntäneet. Tämän takia pelkästään lannan käyttö ainoana materiaalina ei ole usein kovin kannattavaa. Lisämateriaaleja voidaan saada ruoka- ja maatalousteollisuudesta, marketeista ja yhdyskuntasektorilta. (Weiland 2003, 264.)

Metaanin saatavuus voidaan mitata monin eri tavoin, esimerkiksi tuhoutunutta haihtuvaa kiintoainetta kohden ( $\text{m}^3/\text{t}_{\text{VS}}$ ), lisättyä haihtuvaa kiintoainetta kohden ( $\text{m}^3/\text{t}_{\text{VS}}$ ) tai mädätettävän materiaalin tilavuutta ( $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{m}^3$ ) kohden. Tuhoutuvaa haihtuvaa kiintoainesta kohden mitattu metaanin tuotto on verrattavissa teoreettiseen metaanin tuottoon, jos kaikki orgaaniset ainekset hajoavat. Lisättyä haihtuvaa kiintoainetta kohden saavutettua metaanin tuottoa kutsutaan maksimituotoksi, kun viipymäaika lähestyy ääretöntä. Maksimi metaanintuottopotentiaali on aina pienempi kuin teoreettinen tuotto, sillä osa orgaanisesta materiaalista jää hajoamatta ja ligniinipitoiset yhdisteet hajoavat vain osin. Mädätettävän materiaalin tilavuutta kohden laskettuun metaanintuottoon vaikuttaa kosteuspitoisuus. Eläinten lannan metaanintuottoa laskettaessa vaikuttavat tällöin hukkaan joutuneen juomaveden ja lannankeräyssysteemiin lisätyn veden määrä. (Møller et al. 2004, 485 - 486)

Muodostuvan biokaasun määrät vaihtelevat paljon riippuen lähteestä. Maatalouden lietteiden ja lantojen keskitetty mallinnus (Malla) -raportin mukaan biokaasumäärät ovat lehmän lannalle 200 – 600  $\text{m}^3/\text{t}_{\text{VS}}$ , sian lannalle 400 – 900  $\text{m}^3/\text{t}_{\text{VS}}$  ja kanan lannalle 300 – 800  $\text{m}^3/\text{t}_{\text{VS}}$  (Taavitsainen et al. 2002, 24). Itävaltalaisen tutkimuksen mukaan taas bio-

kaasua saadaan sian lietelannasta 250 – 500 m<sup>3</sup>/t<sub>VS</sub> ja lehmän lietelannasta 200 – 300 m<sup>3</sup>/t<sub>VS</sub> riippuen viipymääjasta mädätyslaitaitoksessa (Steffen et.al. 1998, 17).

### 3.2 Biomassojen ominaisuudet kompostoinnin kannalta

Kompostointiprosessin kulkua ohjaavat niin fysikaaliset kuin biologiset tekijät, ja lähtöaineiden ominaisuuksilla on prosessin kannalta suuri merkitys (Tontti ja Mäkelä-Kurtti 1999, 17). Raaka-aineiden käyttöominaisuudet kompostointiprosessin kannalta määräytyvät kosteuden, ravinneisuuden, lahoamistaipumuksen ja rakenteen pysyvyyden sekä epäsuotuisien aineiden pitoisuuden mukaan (Dredge et al. 2006, 161). Myös partikkelikoolta on merkitystä (Thobanoglous et al. 1993, 687).

Kosteuspitoisuuden tulisi kompostointiprosessissa olla välillä 50 – 60 %. Optimiarvo näyttäisi olevan 55 %. Tähän päästään sekoittamalla sopivassa suhteessa eri jätteitä tai lisäämällä vettä. Jos kompostoitavan massan kosteuspitoisuus putoaa alle 40 %:n, kompostointi hidastuu. (Thobanoglous et al. 1993, 691.) Kompostissa elävät pieneliöt tarvitsevat elääkseen ja toimiakseen vettä. Kuiva komposti ei toimi ja liian märkä komposti taas kärsii hapen puutteesta ja siitä voi myös huuhtoutua ravinteita hukkaan. (Dredge et al. 2006, 163.) Liiallinen kosteus estää kompostin lämpiämisen, koska veden haihtumiseen kuluu paljon energiaa (Hänninen et al. 1992, 13). Karkeaa ainesta, kuten kuorta ja olkia, sisältävä komposti saa olla hyvinkin kostea, mutta hienojakoinen lanta ja tuore ruoho taas painuvat märkinä helposti liian tiiviiksi ilmattomaksi massaksi. Kompostin kosteus on silloin sopiva, kun siitä irtoaa puristettaessa pari pisaraa vettä. Kuivat ainekset tulisi kompostoinnin yhteydessä kastella, mieluiten hienojakoisella vesisuihkulla. Materiaalin kyky varastoida vettä pitäisi myös olla riittävän suuri. Olkivaltaisella kompostilla kosteus saadaan pysymään tasaisena lisäämällä turvetta tai multaa. Syksyllä tai talvella ulkona oleva komposti voi kastua liikaa ja tämän estämiseksi kompostin yläpinta voidaan muotoilla kuperaksi ja sen päälle voidaan vielä laittaa vedenpitävä kate. (Dredge et al. 2006, 163.)

Eloperäiset kompostoituvat aineet voidaan jakaa ravinteiden perusteella hiilipitoisiin ja typpipitoisiin materiaaleihin. Pieneliöt tarvitsevat molempia sopivassa suhteessa saadakseen aikaan hyvää kompostia. (Dredge et al. 2006, 161.) Hiilen ja typen välinen C:N- suhde on kriittisin ympäristötekijä kompostoinnin kannalta. Kompostoinnille sopiva C:N suhde vaihtelee lähteiden mukaan useimmille orgaanisille jätteille 20 – 25:1 (Thobanoglous et al. 1993, 685 – 691) ja noin 25 – 35:1 (Taavitsainen et al. 2002, 97). Hiiltä tarvitaan enemmän kuin typpeä, sillä hiili toimii sekä energian lähteenä, että solujen hiililähteenä. Lehmän lannalla C:N- suhde perustuen koko massan kuiva-aineeseen on 18:1, sian lannalla 20:1 ja kanan lannalla 15:1. C:N- suhteiden ilmoittamisessa täytyy olla tarkkana. Orgaanisen aineksen sisältämästä typestä yleensä kaikki tulee hyötykäyttäväksi, mutta vain osa orgaanisesta hiilestä on biohajoavaa. Tämän takia C:N- suhteen ilmoittaminen koko kuiva-aineen määrästä, eikä biohajoavan massan määrästä, voi olla hieman harhaanjohtava. (Thobanoglous et al. 1993, 685 – 691.) Liian pienellä C:N- suhteella mikrobit eivät pysty hyödyntämään kaikkea typpeä ja syntyy mikrobeille haitallinen ammoniakkiylimäärä. Liian suuri suhde rajoittaa kompostointiprosessia, koska mikrobeilla ei ole tarpeeksi typpeä. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 17.)

Esimerkiksi yhdyskuntajätteen orgaaninen osuus on kokojakaumaltaan epähomogeeninen. Materiaalien murskauksella ennen kompostointia saadaan massa homogeenisempaan muotoon. Partikkelikoko vaikuttaa tiheyteen, sisäiseen kitkaan ja virtausominaisuuksiin. Tärkeintä on kuitenkin se, että pienempi partikkelikoko lisää biokemiallisten reaktioiden nopeutta. Partikkelikoko voidaan pienentää myös erilaisilla silppureilla. Kompostoitavan materiaalin koon määräävät jossain määrin kompostituotteen laatuvaatimukset sekä käsittelyn taloudellisuus. Halutuin partikkelikoko olisi alle 5 cm, mutta suurempiakin partikkeleja voidaan kompostoida. Optimaalisten tulosten saamiseksi pitäisi kiinteän jätteen partikkelikoon kuitenkin olla välillä 2,5 – 7,5 cm. (Thobanoglous et al. 1993, 686 – 687.)

Hajoamisnopeus vaikuttaa kompostointiprosessin nopeuteen. Helpoimmin hajoavia raaka-aineita ovat runsaasti hemiselluloosaa, selluloosaa, sokereita ja vähän ligniiniä sisältävät ainekset. Näihin kuuluvat mm. ruoho, vihannesjäte ja lanta. (Taavitsainen et al.



2002, 97.) Runsaasti ligniiniä sisältävät ainekset, kuten puuperäiset ainekset, puun kuori sekä olki taas hajoavat hitaasti (Dredge et al. 2006, 162).

Biojäte on yleensä puhdasta epäsuotuisista aineista, sillä niiden raskasmetallipitoisuudet ovat vain murto-osa sallituista raja-arvoista. Arvot ovat huomattavasti lietekompostien arvojen alapuolella. Puhdistamolietteen ja biojätteen yhteiskompostoinnista tulevan kompostin laatu voi olla heikompi ja täten myös markkinointimahdollisuudet voivat olla heikommät, kuin pelkästä biojätteestä valmistetun kompostin. Maatalouden orgaanisesta jätteestä ja kaupunkien kasvijätteistä valmistettu komposti on yleensä hyvää maanparannusainetta, mutta joissain tapauksissa voivat maatalouden orgaaniset jätteet sisältää orgaanisia haitta-aineita, kuten torjunta-ainejäämiä. Kaupunkien kasvijätteiden raskasmetallipitoisuudet taas voivat olla korkeita, mikäli se kerätään alueelta, jolla on paljon liikennettä. (Tontti ja Mäkelä-Kurto 1999, 17.)

### **3.3 Biomassojen ominaisuudet polton kannalta**

Biomassojen ominaisuuksista polton kannalta tärkeitä ovat koostumus, kosteus, lämpöarvo, haihtuvat aineet ja syttymislämpötilat sekä tuhkan määrä ja sen ominaisuudet. Polttoaine koostuu vedestä ja kuiva-aineesta. Kuiva-aine taas jakautuu tuhkaan ja orgaaniseen ainekseen, joka sisältää polttoaineen palavat osat. Kuiva-ainekoostumus ilmoitetaan yleensä hiilen, vedyn, hapen, typen ja rikin sekä tuhkan osuutena. Varsinaiset palavat ainesosat ovat hiili, vety ja rikki, joista rikkiä ei kuitenkaan toivota olevan, sillä siitä muodostuu poltettaessa ympäristölle haitallista rikkidioksidia. (Huhtinen et al. 2004, 37 – 38.) Biomassojen kiintoaineet eivät sisällä paljon rikkiä: kotitalouksien biojäte 0,4 % (Tchobanoglous et al. 1993, 80 - 81), viljan olki 0,01 – 0,13 %, rypsin olki 0,17 – 0,21 % ja rapsin olki 0,13- 0,21 %, ruokohelpi 0,1 – 0,17 % ja puu alle 0,05 % (Alakangas 2000). Myös polttoaineen tyyppi on ympäristölle haitallinen, sillä se voi muodostaa hapen kanssa typen oksideja. Polttoaineen kosteuden haihduttaminen taas sitoo paljon lämpöä, jota ei usein saada talteen. (Huhtinen et al. 2004, 37 – 38.)

Useimmat polttoaineet sisältävät kosteutta, joka on sitoutunut polttoaineisiin ulkoisena ja sisäisenä eli hygroskooppisena kosteutena. Hygroskooppinen kosteus tarkoittaa polt-

toaineen huokosiin sitoutunutta kosteutta. Polttoaineiden kosteuspitoisuudet voidaan määrittää lämmittämällä näyte 102 – 105 °C lämpötilaan ja punnitsemalla näyte ennen ja jälkeen kuivauksen. Polttoaineiden kosteuksista puhuttaessa tarkoitetaan usein polttoaineen sisältämän veden suhdetta märkään polttoaineeseen. Polttoaineen sisältämä vesi huonontaa polttoaineen lämpöarvoa. Mitä enemmän polttoaineessa on kosteutta, sitä enemmän polttoaineen sisältämästä energiasta kuluu sen höyrystämiseen ja tällöin polttoaineen kulutus kasvaa. Polttoaineen kulutuksen lisäksi polttoaineen sisältämä vesi lisää muodostuvia savukaasuvirtoja ja tarvittavaa puhallintehoa. (Huhtinen et al. 2004, 39.)

Merkittävin polttoaineiden ominaisuus on kuitenkin lämpöarvo, koska se ilmaisee polttoainetta poltettaessa polttoainemäärää kohden saatavan energian. Yleensä kiinteillä polttoaineilla, kuten biomassoilla, lämpöarvo ilmaistaan yksikössä MJ/kg. (Huhtinen et al. 2004, 43.) Lämpöarvosta käytetään nimitystä kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo tai tehollinen eli alempi lämpöarvo. Ylemmästä lämpöarvosta puhuttaessa oletetaan, että höyrystynyt palamistuotteena muodostunut vesi ja polttoaineen sisältämä vesi tiivistyvät nesteeksi. Alemman lämpöarvon tapauksessa kaiken veden oletetaan olevan höyrystyneessä muodossa, jolloin menetetään veden höyrystymiseen kuluva energia. Lämpöarvo määritetään kalorimetrisesti eli polttamalla tietty näyte puhtaassa hapessa ja mittaamalla vapautuva energiamäärä. (Raiko et al. (toim.) 2002, 123.) Polttoaineiden kosteudet vaihtelevat paljon ja tämän takia lämpöarvomäärittysten lähtökohtana käytetäänkin kuivan polttoaineen tehollista lämpöarvoa. Tästä arvosta pystytään laskemaan polttoaineen lämpöarvo käyttökosteudessa kun tiedetään kosteuspitoisuus.

Polttoaineiden tuhkapitoisuuden määrittäminen tehdään laboratoriossa polttamalla näyte noin 800 °C:n lämpötilassa ja jäljelle jäänyt palamaton materiaali on tuhkaa. Polttoaineen sisältämä tuhka vähentää polttoaineen lämpöarvoa, likaa kattilan lämpöpintoja, kuluttaa polttoaineen käsittelylaitteita ja voi muodostaa lämpöpinnoille syövyttäviä kerrostumia. Näiden lisäksi savukaasut on puhdistettava lentotuhkasta. Yksi tärkeimmistä tuhkan ominaisuuksista kattilan toiminnan kannalta on tuhkan sulamispiste. Jos tuhka pääsee sulamaan se muodostaa jäähtyessään kattilaan kerrostumia, jotka on hankala poistaa. (Huhtinen et al. 2004, 41.)

Sulamispisteet vaihtelevat paljon tuhkan eri komponenteille, joten tuhka ei sula tietyssä lämpötilassa, vaan se pehmenee vähitellen ja muuttuu kiinteästä nestemäiseksi lämpötilan kohotessa. Koekappaleilla määritetään tietyille polttoaineille muodonmuutospiste eli lämpötila missä koekappaleen nurkat alkavat pehmenemisen takia pyöristyä, puolipallopiste eli lämpötila, jossa tuhka muodostaa puolipallon muotoisen pisaran sekä juoksevuuspiste jolloin tuhka leviää sulana alustalleen. (Huhtinen et al. 2004, 41.)

Viljan oljen polttamiseen tarvitaan olkea varten suunniteltu kattila. Viljalajien oljen tuhkan sulamislämpötilat vaihtelevat huomattavasti ja tämän takia olkikattilan arinan pitää toimia niin sulalla kuin sulamattomalla tuhkalla. Tuhkanpoistolaitteiden pitää myös pystyä käsittelemään sekä uudelleen jähmettynyttä että sulamatta jäänyttä tuhkaa. Kauran oljen tuhkan juoksevuuspiste on alhaisin 1 175 °C ja vehnän oljen korkein 1 400 °C (Alakangas 2000, 98 - 101.)

Haihtuvien aineiden määrä määritetään lämmittämällä näyte hapettomasti asteittain n. 900 °C:een, jolloin näytteen paino pienenee, kun osa polttoaineesta kaasuuntuu ja jäljelle jää kaasuuntumaton koksi. Haihtuvien aineiden määrä määritetään tästä painohäviöstä ja se mitataan kuivasta ja tuhkattomasta polttoaineesta. Polttoaineen sisältämien haihtuvien aineiden määrä riippuu geologisesta iästä ja vanhemmat polttoaineet sisältävät vähemmän haihtuvia aineita. Biomassat sisältävät täten paljon haihtuvia ja puulla haihtuvien aineiden osuus tuhkattomasta ja kuivasta polttoaineesta vaihtelee välillä 70 – 85 %. Enemmän haihtuvia aineita sisältävät polttoaineet syttyvät alhaisimmissa lämpötiloissa kuin niitä vähemmän sisältävät polttoaineet. Nopeampi syttyminen vaikuttaa myös siihen, että palaminenkin on nopeampaa ja täydellisempää. (Huhtinen et al. 2004, 40.)

#### **4 BIOMASSOJEN KÄSITTELY JA HYÖDYNTÄMÄNEN**

Biomassoja hyödynnetään nykyisin usein kompostoimalla sekä polttamalla. Metsäbiomassoja hyödynnetään niin pienissä lämpökeskuksissa, kuin isoissa voimalaitoksissakin. Jätevesilietteet sekä erilliskerätyt biojätteet käsitellään usein kompostoimalla ja

joskus myös mädättämällä. Peltobiomassoista olki hyödynnetään usein kuivikkeena tai viherlannoitteena pelloilla. Maatiloilla muodostuneet lannat levitetään useimmiten suoraan pelloille. Maatiloilla muodostuneita lantoja, jätevesilietteitä sekä biojätteitä voitaisiin kuitenkin käsitellä mädättämällä, jolloin saataisiin lannoitteeksi kelpaavan mädätteen lisäksi energiaa. Peltobiomassoja voitaisiin myös hyödyntää energian tuotannossa polttamalla.

#### **4.1 Lannan levitys sellaisenaan**

Lantaa levitetään usein sellaisenaan pelloille, sillä lanta sisältää paljon kasveille hyödyllisiä ravinteita. Ravinteiden arvot voidaan johtaa väkilannoitteiden sisältämien ravinteiden hinnasta. Eläinten lannasta otetaan huomioon liukoinen typpi ja kalium kokonaan sekä 75 % kokonaisfosforista. (Heikkilä ja Salo (toim.) 2002, 81.) Esimerkiksi naudon lietelanta sisältää liukoista typpeä 1,8 kg/t ja fosforia 0,7 kg/t (Viljavuuspalvelu 1998, 21).

Lannan levitysmenetelmällä tai – ajalla ei ole typpeä lukuun ottamatta merkittävää vaikutusta ravinteiden hyväksikäyttöön, kunhan levitys on kohtuullisen tasaista. Typen häviöihin sen sijaan lannoitusajan ja -tavan valinnalla on merkittävä vaikutus. Typen häviöt voivat olla noin 38 – 50 % lietelannan arvosta. Lannan kehittyneimpien levitysmenetelmien kustannukset riippuvat levitysmääristä, koska osa kustannuksista on kiinteitä kustannuksia. Suurenevat yksikkökoot lisäävät täten mahdollisuutta käyttää kehittyneitä ja ympäristöystävällisiä levitysmenetelmiä tiloilla. Myös fosforin aiheuttamaan ympäristökuormaan voi levitysmenetelmillä ja – ajoilla olla huomattava vaikutus. (Heikkilä ja Salo (toim.) 2002, 82.)

Lannan levitysmääriä rajoittavat ravinteiden määrät. Fosforia saa levittää kasvista ja viljavuusluokasta riippuen keskimäärin 15 – 30 kg/ha. (Lehtomäki et al. 2007, 17.) Typpeä saa levittää nitraattiasetuksen (VNa 931/2000) mukaisesti sellaisen määrän, joka vastaa enintään 170 kg/ha/a typpeä. Tilalla voidaan käyttää typpeä enintään seuraavat määrä ottaen huomioon karjanlannan ja lannoitteiden sisältämät typpimäärät:

1. syysvilja: enintään 200 kg /ha/vuosi, josta 30 kg/ha syksyllä ja 170 kg/ha keväällä, kestotyyppiä käytettäessä levitetään enintään 40 kg /ha syksyllä ja 160 kg/ha keväällä
2. peruna: 130 kg/ha/vuosi
3. heinä ja laidun, säilörehu ja puutarhakasvit: 250 kg/ha/vuosi;
4. kevätvilja, sokerijuurikas, öljykasvit ja muut: enintään 170 kg/ha/vuosi.

Mikäli tilalla ei ole riittävää peltoalaa syntyvään lantamäärään nähden, voidaan ylimääräistä lantaa luovuttaa tiloille, joilla peltoala ei rajoita sen käyttöä tai lantaa ei ole käytettävistä omasta takaa ja lanta sopii viljelykiertoon. Mikäli lannan levitykseen on olemassa kalustoa, eikä lannan kuljetusmatka ole liian pitkä, lannan luovutus voi olla järkevä ratkaisu. Sopivimpia lannan vastaanottotiloja ovat sellaiset, joilla peltojen fosforitila on tyydyttävä tai huono, peltoja ei ole pitkään aikaan lannoitettu eloperäisillä lannoitteilla ja viljelyssä on kasveja, jotka hyödyntävät tehokkaasti karjanlannan ravinteita. (Maa- ja metsätalousministeriö 2007, 2.)

Lannasta saatavien ravinteiden hyötykäyttö on tehokkainta silloin, kun lanta levitetään kylvöjen yhteydessä. Tällöin on kuitenkin vaara peltojen tiivistymisestä, koska lantaa pyritään levittämään aikaisin keväällä käyttämällä raskasta kalustoa työn nopeuttamiseksi, jotta kasvukausi voitaisiin hyödyntää mahdollisimman hyvin. Lannan levitykseen on kehitetty ympäristöystävällisiä levitysmenetelmiä, jotka parantavat ravinteiden hyväksikäyttöä. Ne eivät kuitenkaan aina ole taloudellisesti perusteltavissa, vaikka vuotuiset käyttömäärät olisivatkin suuret, kuten esimerkiksi lietelannan sijoituksessa nurmeen. (Heikkilä ja Salo (toim.) 2002, 83 - 84.)

Kiinteän lannan levitys maatiloilla tapahtuu useimmiten kelalevitinvaunuilla, joissa on levityslaitteistona joko vaaka- tai pystyselä. Vaunuina voidaan käyttää pelkästään lannan levitykseen tarkoitettuja vaunuja tai yleisperävaunuja, jotka varustetaan lannanlevityslaitteilla. Lannan levitykseen tarvittavia varusteita ovat esimerkiksi etulaidan kivi-verkko, korokelaidat, hydraulinen takalaita ja pysty- tai vaakalevityselä. Lanta kuljetetaan vaunun perälle pohjakuljettimien työntämänä ja selä levittävät sen pelloille. Levitysmäärää voidaan säätää pohjakuljettimen nopeutta säätämällä ja uusimmissa vaunuis-

sa pohjakuljetin voidaan varustaa hydraulisella pohjakuljettimen nopeussäädöllä. Yhdellä levityskelalla varustettuna vaunun työleveys on hieman vaunun leveyttä leveämpi, mutta useammilla pystykeloilla levittävän vaunun työleveys on kahdeksan metriä. (Mikkola et al. 2002, 85.)

Levitysvaunut ovat varmatoimisia, mutta niiden pituussuuntainen levitystasaisuus ei ole kovin hyvä. Hydraulisella pohjakuljettimen nopeussäädöllä saadaan parempi levitystasaisuus ja uudet pystykeloilla varustetut levittimet levittävät lantaa tasaisemmin. Lannan kuormausta vaunuihin tehdään muun muassa traktorin etukuormaimella, kaivurilla tai kahmarein varustetulla nosturilla. Edellä mainittujen levitysvaunujen lisäksi on olemassa roottorilevitysvaunuja, jotka ovat kuljetuskapasiteetiltaan isoja, tehokkaita ja kalliita lannan levittämiä. Näissä vaunuissa on levitysaukko vaunun sivussa, josta roottori murskaa ja levittää lantaa. Levitysmäärän säätö onnistuu purkuluukkaa nostamalla ja laskemalla. Laparuuvi työntää lantaa roottorille. Tällaisen vaunun työleveys on jopa 15 metriä ja työjälki on tasainen, mutta laite rikkoutuu kuitenkin helposti, jos lannan joukossa on pieniä kiviä. (Mikkola et al. 2002, 85.)

Lietelantaa ja virtsaa levitetään lietevaunuilla, joihin liete imetään lietesäiliöstä joko lietevaunun imupainepumpulla tai erillisellä pumpulla. Lietteen levitys onnistuu halvasti levityslautasen avulla, mutta se on epätarkka ja ammoniakkitappioita aiheuttava. Multauslaitteilla liete sijoitetaan maan sisälle vantaiden avulla. Tällöin levitystarkkuus on hyvä ja levitystappiot ovat vähäisiä. Multauslaitteen huonoina puolina ovat kapea työleveys, pieni työsaavutus ja nurmen rikkoutuminen. Lisäksi lietelantaa voidaan levittää letkulevittimillä, jotka levittävät lietteen kasvuston tyveen maan pintaan. Tässä menetelmässä on hyvinä puolina vetotehon pieni tarve sekä puomiston työleveys, joka on 12 – 15 metriä. Tämä on huomattavasti suurempi kuin multauslaitteella. (Mikkola et al. 2002, 85 – 86.) Letkulevittimen hyviä puolia hajalevitykseen verrattuna on, että kasvusto likaantuu ja vahingoittuu vähemmän, jolloin se pystyy paremmin hyödyntämään ravinteet (Puumala ja Grönroos (toim.) 2004, 73). Lietelannan sijoittamisella eli multauslaitteilla levittäminen on ammoniakkipäästöjen kannalta parempi menetelmä kuin lietteen levittäminen pinnalle (Mattila 2006, 44).

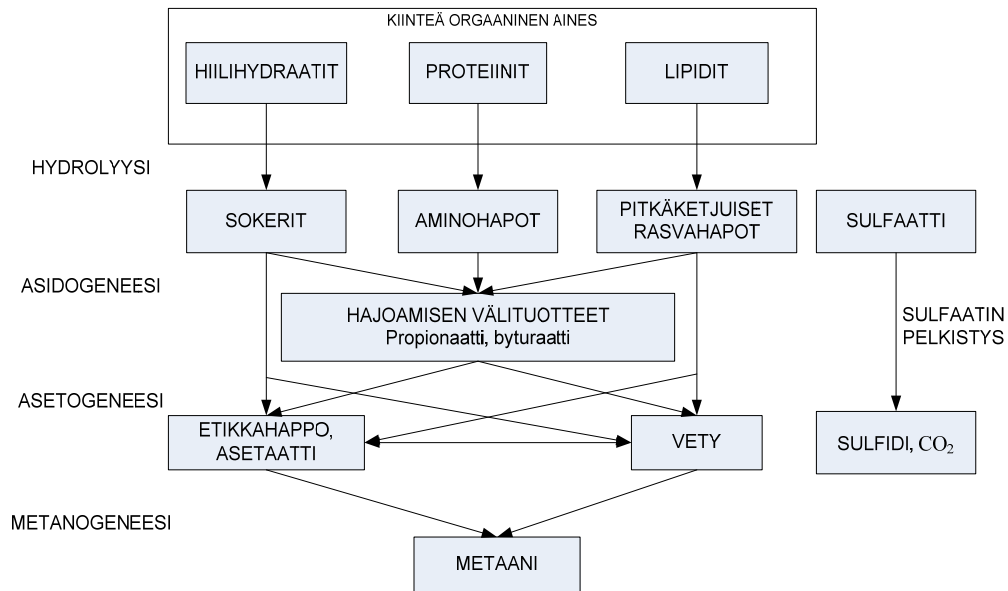
## 4.2 Mädätys

Anaerobinen mädätys tarkoittaa biomassan biologista käsittelyä hapettomassa tilassa. Anaerobisen mädätyksen tuloksena biomassasta muodostuu biokaasua, joka sisältää pääosin metaania (35 – 80 %) ja hiilidioksidia (20 – 65 %). (Alakangas 2000, 144.) Esimerkiksi lehmän lannasta tuotetun biokaasun metaanipitoisuus on välillä 55 – 75 % (Steffen et al. 1998, 17; Deublein ja Steinhauser (toim.) 2008, 62). Biokaasu sisältää myös lähteestä riippuen pieninä pitoisuuksina rikkivetyä (0 – 2 %), typpeä (0 – 25 %), kloori- ja fluoriyhdisteitä (Alakangas 2000, 144). Prosessista muodostuu biokaasun lisäksi mädätettä, joka on määrältään lähes samansuuruinen kuin systeemiin syötettyjen materiaalien määrä, mutta se on koostumukseltaan tasalaatuisempaa. Myös erilaiset patogeenit ovat tuhoutuneet käsittelyssä. Itse mädätysprosessissa ravinteet säilyvät, mutta mädätteen ja käsittelemättömän lannan varastoinnissa ja peltolevityksessä tapahtuu ravinnehävikkiä. Ravinteiden säilyminen on kuitenkin parempaa, kuin kompostoinnissa, koska käsittely tapahtuu suljetuissa reaktoreissa. Levityksen aikaisten päästöjen vertailut mädätteen ja kompostoidun lannan välillä on hankalampaa. Mädätystekniikat voidaan jakaa käsiteltävän aineen kiintoainepitoisuuden mukaan esimerkiksi kuivamädätykseen ja märkämädätykseen. Märkä- ja kuivamädätyksen kiintoainepitoisuudelle on lähteissä eri arvoja: märkämädätykselle 6 – 10 % (Taavitsainen et al. 2002, 21) ja 10 – 13 % (Lehtomäki et al. 2007, 32), kuivamädätykselle kiintoainepitoisuus on 25 – 40 % (Taavitsainen et al. 2002, 21) ja 20 – 40 % (Lehtomäki et al. 2007, 33).

### 4.2.1 Mädätysprosessin kuvaus

Anaerobinen prosessi sisältää neljä vaihetta, jotka ovat hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi. Hydrolyysivaiheessa haponmuodostaja bakteerien tuottamat entsyymit hajottavat orgaanisen aineksen sisältämät hiilihydraatit, proteiinit ja lipidit yksinkertaisemmiksi liukoisiksi yhdisteiksi, kuten sokereiksi, aminohapoiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi. Asidogeenisissä (happokäyminen) nämä yhdisteet hajoavat edelleen haihtuviksi rasvahapoiksi. Asidogeneesi vaiheessa rasvahapoista muodostuu asetaattia, vetyä ja hiilidioksidia vedynmuodostajabakteerien hajotustyön tuloksena.

Metanogeesissä metaanintuottajabakteerit muodostavat metaania asetaatista, vedystä ja hiilidioksidista. Nämä bakteerit eivät pysty hyödyntämään yhdisteitä, joissa on enemmän kuin kaksi hiiltä, minkä takia muita vaiheita tarvitaankin orgaanisten yhdisteiden hajottamisessa asetaatiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. (Lehtomäki et al. 2007, 22.) Kuvassa 2 on esitetty anaerobisen hajoamisen tärkeimmät vaiheet ja välituotteet.



**Kuva 2.** Anaerobisen hajoamisen tärkeimmät vaiheet ja välituotteet (Mukaihen: Lehtomäki et al. 2007, 24; Rintala et al. 2002, 18).

Mädätysprosessissa tärkeimpiä ympäristötekijöitä ovat lämpötila, pH, alkaliniteetti ja happo/alkaliniteetti suhde. (Taavitsainen et al. 2002, 20 – 23). Mädätystä voi tapahtua alle 20 °C:ssa, mutta useimmat reaktorit toimivat joko mesofiilisessa tai termofiilisessa lämpötila-alueessa. Mesofiilinen optimilämpötila on 35 °C ja termofiilinen optimilämpötila on 55 °C. Näissä eri lämpötiloissa on erilaiset mikrobikannat ja muutos mesofiilisesta lämpötilasta termofiiliseen tai päinvastoin aiheuttaa notkahduksen biokaasun tuotannossa ennen kuin sopiva mikrobikanta on muodostunut. (Ward et al. 2008, 7930.)

Lämpötilavaihtelut häiritsevät mikrobien toimintaa ja pienetkin lämpötilavaihtelut voivat aiheuttaa prosessissa häiriöitä. Termofiilinen prosessi erityisesti herkkä lämpötilan vaihteluille ja lämpötilan pitäisikin pysyä vakiona +/- 2 °C tarkkuudella. Termofiilisen prosessin etuina ovat lopputuotteen parempi hygieenisuus, lyhyempi viipymäaika, suu-



remppi kuormitettavuus. (Taavitsainen et al. 2002, 20.) Termofiilisella prosessilla saavutetaan myös parempi biokaasun tuotto. Termofiilinen prosessi tosin tarvitsee enemmän lämpöä pitääkseen yllä tarvittavan lämpötilan. (Ward et al. 2008, 7931.) Mesofiilisen prosessin etuna on prosessin helpompi hallittavuus prosessilämpötilan kannalta (Taavitsainen et al. 2002, 20). Anaerobiset bakteerit tuottavat vähän lämpöä aineenvaihdunnassaan ja tämän takia biokaasureaktoria on lämmitettävä (Lehtomäki et al. 2007, 25). Termofiilinen ja mesofiilinen prosessi voidaan myös yhdistää kaksivaiheiseksi käsitteilyketjuksi ja näin saavuttaa molempien prosessien edut. Ensimmäisessä vaiheessa käytetään termofiilistä ja toisessa vaiheessa mesofiilistä prosessia. (Sung ja Santha 2003, 1629.)

Optimaalinen pH- alue mädätyksessä on kapea 6,5 – 7,5 (Ward et al. 2008, 7931). Mikrobin on todettu kuitenkin pystyvän hajottamaan hiilihydraatteja jopa pH:ssa 5 – 6. Erityisesti viimeisin metaania tuottava vaihe on herkkä pH:n muutoksille. Happokäyminen aiheuttaa pH:n alenemista, erityisesti jätteen varastointivaiheessa. Biokaasuprosessit pystyvät kuitenkin itse puskuroimaan ja toimimaan täten optimaalisessa pH:ssa. Tarvittaessa voidaan pH:ta myös säätää, mutta kalkkia tulisi välttää, sillä se aiheuttaa hiilidioksidin kanssa reagoiessaan saostuvaa kalsiumkarbonaattia. (Lehtomäki et al. 2007, 25.) Metanogeneesivaiheen optimi pH on 7 ja metanogeenisten bakteerien kasvu hidastuu huomattavasti pH:n laskiessa alle 6,6. Asidogeneesissä taas optimi pH on välillä 5,5 – 6,5. Tämän takia monet suunnittelijat haluavatkin erottaa hydrolyysin ja asidogeneesin sekä asetogeneesin ja metanogeneesin kaksivaiheiseen prosessiin. (Ward et al. 2008, 7931.)

Alkaliniteetilla kuvataan reaktorin puskurikykyä ja se ilmoitetaan yksikössä mg/l. Orgaanisia jätteitä käsiteltäessä bikarbonaattialkaliniteetin tulisi olla välillä 3500 – 5000 mg CaCO<sub>3</sub>/l, mikä estää tilapäisten ylikuormitusten aiheuttamat häiriötilanteet. Haihtuvien happojen (mg CH<sub>3</sub>COOH/l) ja alkaliniteetin (mg CaCO<sub>3</sub>/l) suhdeluku (VA/Alk.) antaa selväpiirteisen kuvan anaerobisen prosessin toiminnasta. Tämä suhdeluku kertoo prosessin häiriötekijöistä ennen kuin esimerkiksi pH luvussa kerkiää tapahtua muutoksia. Hyvin toimivassa reaktorissa tämä suhdeluku on korkeintaan 0,25. (Taavitsainen 2002, 22.)

Käyttöparametreja ovat kuormitus, viipymäaika, sekoittaminen sekä metaanin tuotto sekä biokaasun metaanipitoisuus. Kuormitus kuvaa reaktoriin syötetyn materiaalin mukana tulevan orgaanisen aineen massaa verrattuna reaktorin tilavuuteen. Kuormituksen yksikkönä käytetään yleisesti kiloa orgaanista ainesta reaktorikuutiometriä ja vuorokautta kohden ( $\text{kg}_{\text{VS}}/\text{m}^3/\text{d}$ ). Reaktorissa käytettävät viiveet ja syötettävän materiaalin laadun vaihtelut aiheuttavat kuormituksen vaihteluja. Orgaanisten yhdyskuntajätteiden kohdalla reaktorikuormitus on mesofiilisella alueella noin  $5 - 6 \text{ kg}_{\text{VS}}/\text{m}^3/\text{d}$  ja termofiilisella alueella noin  $10 - 11 \text{ kg}_{\text{VS}}/\text{m}^3/\text{d}$ . Kuormitusta seurataan, koska, liian suuri kuormitus johtaa haponmuodostajabakteerien voimakkaaseen kasvuun. Tämä aiheuttaa pH:n alenemisen, minkä johdosta metaanintuotanto vähenee. (Taavitsainen 2002, 21.) Reaktoriin syötetystä orgaanisesta materiaalista ei ole mahdollista anaerobisesti hajottaa kaikkea, sillä tällöin viipymäaika ja reaktorin koko tulisivat liian suureksi. Tämän takia onkin etsittävä taloudellisesti järkevä optimi anaerobisen hajoamisen määrälle. Tässä mielessä kuormitus on tärkeä käyttöparametri, sillä se määrää kuinka paljon orgaanista kuivaainetta voidaan reaktorikuutiota ja päivää kohden syöttää. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH 2006, 28 – 29.)

Viipymäaikoja ovat hydraulinen ja biologinen viipymäaika. Hydraulisella viipymäajalla tarkoitetaan biomassan viipymistä reaktorissa ja biologisella viipymäajalla taas tarkoitetaan aikaa, jonka mikro-organismit ovat reaktorissa. Viipymään vaikuttavat käsiteltävän materiaalin koostumus, orgaanisen kiintoaineen määrä, käytettävä lämpötila-alue, reaktorin tilavuus ja sekoitus. Termofiilisessä käsittelyssä orgaanisen jätteiden viipymä on noin 15 vuorokautta ja mesofiilisella alueella noin kaksinkertainen siihen verrattuna. (Taavitsainen 2002, 21 – 22.) Maatalouden lietteitä käsiteltäessä hydrauliset viipymäajat mesofiiliselle käsittelylle ovat lehmän lietelannalle 12 – 18 vuorokautta, lehmän kuivalannalle 18 – 36 vuorokautta ja sian lietelannalle 10 – 15 vuorokautta (Wellinger 1998, 10). Pidemmällä viipymäajalla saavutetaan suurempi orgaanisen aineksen hajoaminen ja biokaasutuotanto, mutta samalla lämmitys- ja sekoitusenergian tarve kasvaa sekä tarvitaan suurempi reaktori, mitkä nostavat investointikustannuksia. Liian lyhyt viipymäaika taas aiheuttaa huonon orgaanisen aineksen hajoamisen sekä vähäisen biokaasun määrän

sekä biokaasun huonon laadun, mikä ilmenee hiilidioksidin suurena määränä. (Taavitsainen 2002, 21 – 22.)

Kuormitus ja viipymäaika korreloivat toisiaan. Mikäli kuormitus tulee suuremmaksi, joutuu reaktoriin enemmän orgaanista ainesta ja viipymäaika lyhenee. Hydraulinen viipymäaika täytyy valita siten, että reaktorin tyhjennyksissä ei poistu enemmän bakteereja kuin tässä ajassa ehtii muodostumaan. Lyhyellä viipymäajalla bakteereille jää vain vähän aikaa orgaanisen materiaalin hajottamiseen. Tällöin saadaan materiaalit virtaamaan nopeammin reaktorin läpi, mutta biokaasun saanto kärsii. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH 2006, 29.)

Mädätyslaitoksen toimivuuden kannalta tärkeitä parametreja on biokaasuntuotanto ja biokaasun metaanipitoisuus. Metaanituotannon seuranta on erityisen tärkeä, sillä sen laskiessa tiedetään prosessissa olevan ongelmia. Mädätysprosessissa voidaan myös seurata käsiteltävän ja käsitellyn materiaalin kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen aineen (VS) pitoisuuksia sekä typpipitoisuuksia (kokonais- ja/tai ammoniumtyppi) (Lehtomäki et al. 2007, 37). Biokaasulaitoksesta muodostuvan biokaasun määrä riippuu syötettyjen materiaalien koostumuksesta. Käytännössä biokaasuntuoton tarkka laskenta on hankalaa, sillä yksittäisten ravinteiden määriä ei tiedetä tarkkaan. Erityisesti tämä tilanne on yhteismädätyksessä. Lisäksi laskuissa lähdetään liikkeelle orgaanisen materiaalin täydellisestä tuhoutumisesta, mitä ei kuitenkaan todellisuudessa tapahdu. Teoreettista biokaasuntuotantoa pystytään kuitenkin laskemaan yksittäisten materiaalien osuuksien ja niiden teoreettisten biokaasuntuotantojen perusteella. Esimerkiksi voidaan lähteä liikkeelle materiaalin sisältämien hajoavien proteiinien, rasvan ja hiilihydraattien määristä. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH 2006, 29 - 30.)

Biokaasun tuotantoon vaikuttavat lisäksi materiaalien viipymäaika reaktorissa, kuivaainepitoisuus, mahdolliset inhibiittia aiheuttavat aineet sekä mädätyslämpötila. Pidemmällä viipymäajalla saavutetaan parempi orgaanisen materiaalin hajoamisaste ja täten parempi biokaasuntuotto. Biokaasun tuotannon lisäksi kiinnostaa biokaasun metaanipitoisuus. Metaanipitoisuuteen vaikuttavat myös edellä mainitut biokaasuntuotantoon vaikuttavat asiat. Saavutettava metaanimäärä riippuu pääasiallisesti käytettyjen

raaka-aineiden koostumuksesta eli mikä on rasvojen, proteiinien ja hiilihydraattien osuus. Materiaaleista saatava metaaninsaanto vähenee edellä mainitussa järjestyksessä eli rasvoilla saavutetaan massaa kohden parempi metaanintuotto kuin hiilihydraateilla. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH 2006, 30.)

Sekoittamattomassa mädätysreaktorissa tapahtuu ajan kuluessa lajittumista samanaikaisesti kerrosten muodostumisen kanssa, mikä johtuu materiaalien eri tiheyksistä. Suuri osa bakteerimassasta on tiheämpänä materiaalina reaktorin alaosassa, kun taas mädätettävä materiaali on usein kerääntynyt ylempään kerrokseen. Tällöin on kontaktipinta näiden kerrosten välillä rajoittunut ja hajoamista tapahtuu vain vähän. Tämä lisäksi kelluva materiaali muodostaa kelluvan kerroksen, joka vaikeuttaa kaasun poistumista. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH. 2006, 29)

Useimmissa anaerobisissa reaktoreissa on sekoitus, joka takaa orgaanisen materiaalin siirtymisen mikrobimassalle, erottaa materiaaliin jääneet kaasukuplat ja estää tiheimpien partikkelien sedimentoinnin (Ward et al. 2008, 7929). Mädätettävän materiaalin sekoittaminen auttaa organismien tasaisessa jakautumisessa ja lämmön siirrossa. Lisäksi sekoittaminen auttaa partikkelikoon pienennyksessä mädätysprosessin edetessä. Sekoitus voidaan tehdä monin eri tavoin: mekaanisilla sekoittimilla, mädätettävän massan kierrätyksellä tai syntyneen biokaasun kierrätyksellä takaisin reaktoriin reaktorin alaosasta. Kaksi tärkeää tekijää sekoittamisessa ovat sekoituksen teho ja kesto. (Karim et al. 2005, 3598.) Sekoitus ei ole aina jatkuvatoimista. Sekoitus voi tapahtua esimerkiksi säännöllisesti useita kertoja päivässä tai tunnissa. Energiantarve vaihtelee välillä 10 – 100 Wh/m<sup>3</sup> riippuen reaktorityypistä, sekoitintyyppistä ja kiintoainepitoisuudesta. (Ward et al. 2008, 7929.)

Karim et al. (2005) ovat tutkineet sekoituksen vaikutusta lehmän lannan mädätykseen eri kiintoainepitoisuuksissa. Tutkittuja sekoitusmenetelmiä olivat biokaasun kierrätys, käsiteltävän materiaalin kierrätys sekä mekaaninen sekoitus ja kiintoainepitoisuutena oli 5, 10 ja 15 %:a. 5 %:n kiintoainepitoisuudessa ei ollut eroja sekoitetun ja sekoittamattoman reaktorin välillä. Sakeammalla lietteellä (10 tai 15 %) sekoittaminen tuotti 10 – 30 % enemmän biokaasua. Mädätysprosessin alussa ei sekoitus kuitenkaan ollut hyödyksi, sillä se aiheutti alhaisemman pH:n, prosessin epätasaisuuksia ja pidemmän aloi-

tusajan. Biokaasulla sekoittamisen todettiin olevan tehoton 15 % kiintoainepitoisuudessa testatuissa olosuhteissa. (Karim et al. 2005, 3597.)

Liian voimakasta sekoittamista tulisi kuitenkin välttää. Erityisesti haponmuodostaja bakteerit (asetogeneesissä aktiiviset bakteerit) ja metanogeneesissä tarvittavat bakteerit rakentavat tiheän eliöyhteisön, joka on tärkeä häiriöttömälle biokaasun muodostukselle. Jos nämä eliöyhteisöt hajoavat liian voimakkaan sekoituksen aiheuttamien suurten leikkausvoimien seurauksena, voi pahimmassa tapauksessa koko prosessi pysähtyä. (Institut für Energetik und Umwelt gmbH. 2006, 29; Ward et al. 2008, 7930.) Sekoittamisen määrän vähentäminen voi jopa saada epästabiliin jatkuvasti sekoitetun reaktorin stabiiliksi (Ward et al. 2008, 7930). Sekoittamisen määrälle pitää siis löytää optimi, joka täyttää edellä esitetyt vaatimukset. Käytännössä tämä kompromissi voidaan saavuttaa hitaasti pyörivällä sekoittimella, joka aiheuttaa vain vähän leikkausvoimia tai sekoittamalla reaktorin sisältö tietyin väliajoin. (Institut für Energetik und Umwelt gmbH. 2006, 29; Ward et al. 2008, 7930.)

Prosessia häiritseviä tekijöitä ovat hajoamista hidastava inhibitio, lämpötila ja substraatin syötön ongelmat. Inhibitiolla tarkoitetaan biologisessa käsittelyssä jonkin kemiallisen tai fysikaalisen tekijän aiheuttamaa haittavaikutusta, joka johtaa prosessin normaalin toiminnan häiriöihin tai hajotuksesta vastaavien mikrobien tuhoutumiseen tai inaktivoitumiseen. Mädätysprosessissa inhibitio aiheuttaa metaanintuotannon laskua tai estää sen kokonaan. Inhibiittoreita on kahta eri laatua: normaalin hajotuksen välituotteet, jotka kertyessään haittaavat biokaasuprosessia (esimerkiksi rasvahappo). Prosessiin voi myös tulla materiaalin mukana aineita, jotka inhiboivat prosessia. (Lehtomäki et al. 2007, 26.)

Inhibitiota aiheuttavia aineita voivat olla typpi (ammoniakin pitoisuus), pitkäketjuiset rasvahapot (LCFA long-chain fatty acid) sekä haihtuvat rasvahapot (VFA volatile fatty acids), rikkivety sekä liuennut happi. Typpi on tärkeä ravinne maataloudessa ja mädätyksen lopputuotteen käyttökelpoisuutta arvioitaessa. Typpi voi olla kuitenkin korkeissa pitoisuuksissa metaanintuotantoa inhiboiva tekijä. Erityisesti maatalouden jätteitä käsiteltäessä on yksi tärkeimmistä inhibitiota aiheuttavista tekijöistä ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) eli ammoniumtyypen ( $\text{NH}_4^+$ ) ionisoimaton muoto. Tavallisesti ammoniumtyypen ja ammoni-

akin pitoisuuksien välille muodostuu tasapaino, mutta runsaasti typpeä sisältävien materiaalien kuten kanan lannan käsittelyssä voi ammoniakkin pitoisuus nousta inhiboivalle tasolle. (Lehtomäki et al. 2007, 26.) Ammoniakkipitoisuuteen vaikuttaa prosessin pH, lämpötila, reaktorin kuormitus ja biomassan viipymäaika (Taavitsainen 2002, 23). Termofiilinen mädätys on herkemmin inhiboituva kuin mesofiilinen mädätys (Hansen et al. 1998, 5-6).

Sian lannan käyttämisessä ainoana materiaalina mädätyksessä on huonona puolena korkea ammoniakkipitoisuus. Ammoniakin aiheuttamaa inhibiotta on erityisesti sian ja siipikarjan lantojen käsittelyissä. Niiden kokonaisammoniakkipitoisuudet ovat yleensä suuremmat kuin 4 g-N/l. Ammoniakkipitoisuus 4 g-N/l on inhiboiva karjan lannan mädätyksessä. Sopeutumattomilla metanogeenisillä viljelmillä ammoniakkin inhibiotta on todettu ammoniakkipitoisuuksilla 1,5 – 2 g-N/l. Mädätysprosessin sopeutuessa ammoniakkiin on havaittu prosessin sietävän jopa pitoisuuden 4 g-N/l. (Hansen et al. 1998, 5.)

Lyhytketjuiset rasvahapot (haihtuvat rasvahapot) ovat tärkeä anaerobisen prosessin väliaine, mutta ne voivat myös toimia inhiboivina tekijöinä metanogeenisille korkeissa pitoisuuksissa. Etikkahappo on yleensä suurempana pitoisuutena kuin muut rasvahapot, mutta propionihappo ja butaanihappo (voihappo) ovat metanogeenisille inhiboivempia. Rasvahappojen erityisesti butyraatin ja isobutyraatin pitoisuuksien seuranta kertoo prosessin stabiilisuudesta, sillä rasvahappojen lisääntyminen voi olla merkinä liian suuresta orgaanisen aineksen kuormituksesta. Pääsyyinä rasvahappojen lisääntymiseen on se, että metanogeenit eivät pysty hyödyntämään muodostunutta asetaattia, ennen kuin metanogeenisten mikro-organismien määrä on tarpeeksi suuri. (Ward et al. 2008, 7931.)

Pitkäketjuiset rasvahapot ovat lipideistä eli rasvoista muodostuva väliaine ja vaikka rasvat usein hajoavatkin nopeasti, ne voivat aiheuttaa inhibiotta. Lipidit ja niiden hydrolyysituotteet pitkäketjuiset rasvahapot voivat absorboitua pinnoille ja vähentää fyysisesti hydrolysoivien entsyymien vaikutusta ja materiaalin kulkeutumista bakteerien membraanien läpi. Pitkäketjuisten rasvahappojen korkea pitoisuus myös inhiboi niiden omaa hajoamista ja metaanintuottoa. (Wellinger 1999, 10.)

Rikkivedyn muodostuksessa on samanlainen riippuvuus kuin ammoniakkin muodostuksessa. Rikki on joko dissosioimattomassa ( $\text{HS}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ) muodossa nestefaasissa tai rikkivedynä ( $\text{H}_2\text{S}$ ) neste- ja kaasufaasissa. Nestefaasissa olevan rikkivedyn määrä riippuu nesteen rikkivetykonsentraatiosta ja kaasufaasin rikkivedyn osapaineesta (Henryn laki). Tähän tasapainoon vaikuttaa myös lämpötila sekä pH arvo. Lämpötilan kasvaessa vähenee liuenneen rikkivedyn määrä, mutta toisaalta kaasuntuotanto kasvattaa rikkivedyn osapainetta ja täten liuenneen rikkivedyn määrää. Liuenneen rikkivedyn määrä lisääntyy myös pH arvon laskiessa. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH. 2006, 33.)

Lämpötila voi olla myös yksi syy mädätysprosessin häiriöihin. Lämpötilahäiriöihin voi olla syynä yhteistuotantolaitoksen (CHP) häiriöt, jolloin mädätysprosessin lämmitys ei toimi. Tämä johtaa siihen, että metaanintuottobakteerien toiminta hidastuu, sillä ne toimivat hyvin pienellä lämpötila-alueella. Hydrolyysin ja asidogeneesin bakteerit pystyvät kuitenkin lämpötilan alentuessa aluksi toimimaan. Tämän seurauksena lisääntyy reaktorissa happojen määrä, etenkin jos ei kompostoituvan materiaalin syöttöä lopeteta ajoissa. Tällaisessa tapauksessa prosessin lämpötilan aleneman lisäksi koko prosessi happamoituu. Myös suuren esilämmittämättömän massan lisääminen mädätysprosessiin sekä mädätysreaktorin riittämätön lämmittäminen esimerkiksi lämpötila-anturien vian takia voivat johtaa lämpötilan alenemiseen prosessissa. Tämän takia on säännöllinen mädätyslämpötilan kontrollointi tärkeää koko prosessin kannalta. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH. 2006, 32.)

Mädätettävän materiaalin syötöllä ja laadulla voi myös olla prosessia häiritseviä vaikutuksia. Jo mädätysprosessia käynnistettäessä pitäisi mädätettävän materiaalin laatu pysyä pitämään mahdollisimman tasaisena, jotta bakteerit voisivat kehittyä tasaisesti. Voimakkaat vaihtelut tarkoittavat myös voimakkaita vaihteluita bakteerien elinympäristössä, joihin niiden pitää uudestaan sopeutua. Alusta pitäen on myös tärkeää lisätä kuormitusta hitaasti, jotta erityisesti metaanintuottajabakteereilla on aikaa kasvaa. Jos materiaalia syötetään liian nopeasti, voi hitaasti kasvavien metaanibakteerien takia mädätyksen välituotteet hajota liian hitaasti ja prosessi happamoituu. Myös jatkuvatoimi-

sessä käytössä pitää materiaalin syötöstä pitää huolta. . (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH 2006, 33 – 34.)

Alhaisemmalla kuormituksella eli pidemmällä viipymisajalla saavutetaan parempi biokaasuntuotanto syötettyä materiaalia kohden. Kaasuntuottomäärä on kuitenkin tällä prosessin ajotavalla alhainen. Jos materiaalin syöttöä lisätään, lisääntyy bakteerien tuotto, mutta massaa kohden laskettu biokaasun tuotanto pienenee lyhemmän viipymisajan ja korkeamman kuormituksen takia. Biokaasun tuotanto taas saavuttaa lisätyllä materiaalin syötöllä nopeasti maksiminsa. Mikäli materiaalin syöttöä vielä kasvatetaan biokaasun tuotanto kuitenkin romahtaa nopeasti, sillä mädätyksestä poistuu mädätteen mukana enemmän mikrobeja, kuin niitä ehtii muodostua. Mädätysprosessin ohjauksessa täytyykin huomioida, että materiaalin syöttöä lisätään hitaasti ja maksimisyöttömäärää ei ylitetä. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH 2006, 33 – 34.)

#### **4.2.2 Mädätystekniikka**

Maatilakokoluokan biokaasulaitos koostuu yleensä vähintään neljästä osiosta, jotka ovat navetta, raakalieteallas, biokaasureaktori sekä jälkivarasto. Laitokseen kuuluu edellä mainittujen lisäksi turvallisuus- ja kaasunpuhdistuslaitteet, kaasuväylä ja laitteistot kaasun ja käsitellyn jäännöksen hyötykäyttöön. Peltobiomassoja hyödynnettäessä pitää lisäksi olla omat rakenteensa, kuten laakasiilot kasvien varastointiin ja koneet sekä laitteet kasvien korjuuseen. Mikäli laitoksessa käsitellään myös tilan ulkopuolelta tulevia materiaaleja, tarvitaan lisäksi varastointitilaa, hygienisointiyksikkö, jätteen murskauslaitteisto sekä syöttösäiliö. Suomessa maatiloilla täytyy olla lannan varastointitilavuutta koko vuoden lannan tuotantoa varten. Kyseistä varastointitilavuutta voidaan käyttää katettuna mädätetyn massan jälkivarastointiin. Jälkivarastoinnin aikana materiaali hajoaa edelleen biokaasuksi eli tapahtuu jälkikaasuuntumista. (Lehtomäki et al. 2007, 35.)

Isomman kokoluokan laitos voi käsitellä teollisuuden, yhdyskuntien ja alkutuotannon sivutuotteita yhteiskäsittelyssä. Tällaisessa laitoksessa yksikköprosesseja voivat olla esimerkiksi vastaanotto, esikäsittely, homogenisointi, hygienisointi, biokaasureaktori,



kaasuvarasto ja mädätteen veden erotus, välivarastointi sekä terminen kuivaus ja rakeistus. Mikäli mädätteestä erotetaan vesi, tarvitaan lisäksi veden käsittelylaitos, johon voi kuulua typen konsentroitintia. Lisäksi laitokseen kuuluu lämpökattila, CHP -laitos sähkön- ja lämmön tuottamiseksi tai laitteisto biokaasun tuotteistamiseksi polttoaineeksi. (Watrec 2007, 15 – 16.)

Biokaasulaitoksella tarvitaan esikäsittelyä, kun harjoitetaan monien materiaalien yhteismädätystä. Esikäsittelyssä erotetaan käsittelyyn kelpaamattomat partikkelit, vähennetään partikkelikokoja ja sekoitetaan eri jätevirtoja. Pienissä mädätyslaitoksissa ei kannata käsitellä materiaaleja, jotka vaativat erottelua, kuten ravintola-, puutarha- ja kotitalousjätteet. Suuremman kokoluokan laitoksissa erottelu voidaan tehdä mekaanisesti tai käsin. Suuret materiaalit, kuten puun kappaleet, lasit ja muovit on parempi erottaa käsin kuljetushihnalta. Myös pyöriviä seuloja, joissa on 40 – 80 mm aukkoja voidaan käyttää. Molemmista tapauksista pitäisi kuitenkin olla vielä erillinen erottelu metalleille. Yleensä eri jätevirrat kootaan erillisiin vastaanottosäiliöihin, missä ne käsitellään. Tämän jälkeen ne voidaan homogenisoida syöttösäiliössä tai syöttää erikseen biokaasuprosessiin. (Wellinger 1999, 15.)

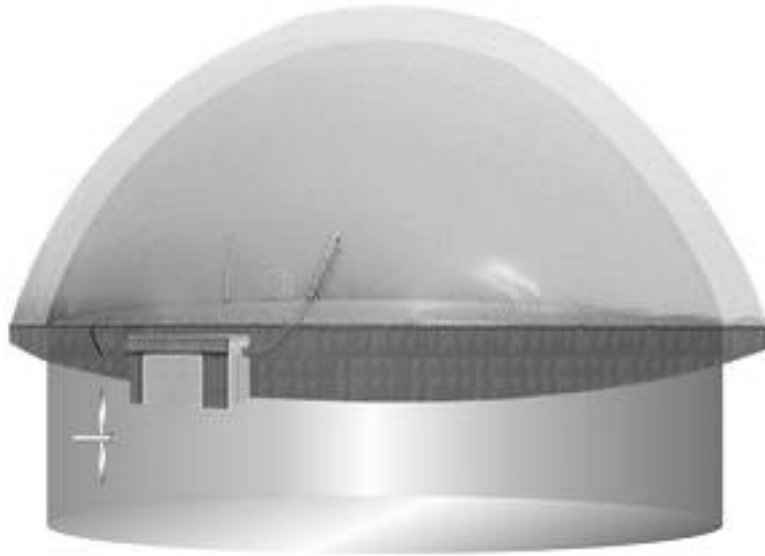
Käsiteltäessä lietteitä tulee olla riittävät esi- ja jälkivarastot. Puskurivarastokapasiteetilla voidaan varmistaa että kuljetukset pystytään järjestämään joustavasti ja että käsiteltävää lietettä on myös mahdollisten kuljetushäiriöiden aikana. Raakalietesäiliön koon pitäisi olla vähintään viikon lietteen tuottoa vastaava. Lietteen esi- ja jälkivarastot tulee kattaa ammoniakkipäästöjen estämiseksi. Erityisesti jälkivarastoinnissa tämä on tärkeää, koska prosessista tuleva liete on alttiimpaa ammoniakkin haihtumiselle kohonneen lämpötilan ja pH:n takia. Kattamisella pystytään myös estämään ylimääräisen veden meno säiliöön. Prosessiin joutunut ylimääräinen vesi nostaa lietteen lämmityskustannuksia ja vähentää massaa kohden laskettua biokaasuntuotantoa. Esivarastoinnissa tulisi olla sekoitusmahdollisuus lietteen sedimentoitumisen estämiseksi. (Taavitsainen et al. 2002, 39.)

Biokaasuprosessin tärkein osa on anaerobinen reaktori. Mahdollisuus rakentaa luotettava reaktori alhaisella kustannuksella riippuu voimakkaasti systeemin sopivuudesta käsiteltävää materiaalia varten. Anaerobisia systeemejä on rakennettu biojätteiden ja muiden

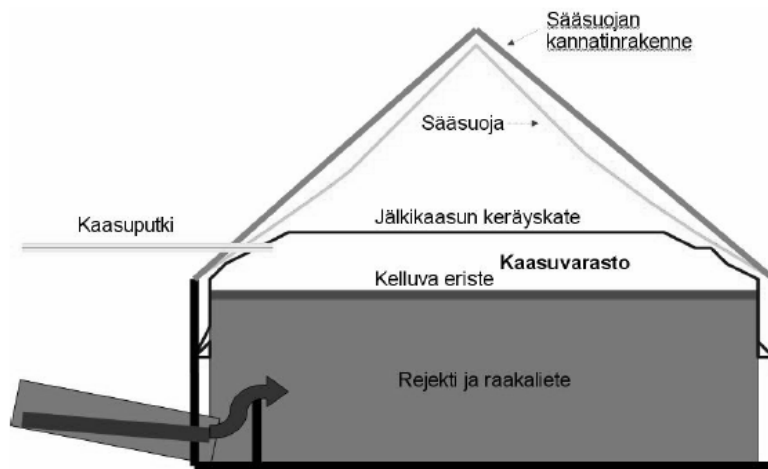
orgaanisten jätteiden käsittelyyn ja niillä jokaisella on omat erikoisuutensa ja rajoituksensa. Ei ole olemassa yhtä tekniikka, jolla pystyttäisiin mädättämään kaikkia orgaanisia materiaaleja optimaalisella tavalla. Suunnittelukriteereistä kaksi tärkeintä ovat materiaalin syöttötapa ja materiaalin ominaisuudet. (Wellinger 1999, 15.)

Reaktori pystytään rakentamaan joko osittain maan alle tai kokonaan maan päälle ja ne voivat olla joko pysty- tai vaakamallisia. Lietelantaa käsitellessä tarvitaan 1000 m<sup>3</sup>/a kohden 70 m<sup>3</sup> reaktoritilavuutta. Reaktorilta vaadittuja olennaisimpia ominaisuuksia ovat vesi- ja kaasutiiveys, eristys sekä korroosionkesto. Mädätyksen aikana reaktoreissa vaikuttavat niin mekaaninen, kuin kemiallinenkin korrosio. Mekaanista korroosiota aiheuttaa kiintoaineet ja kemiallista korroosiota orgaaniset hapot sekä rikkivety. Reaktoreiden rakennusmateriaaleina käytetään yleensä terästä tai betonia. Tavallisen teräksen korroosionkesto voidaan parantaa hiekkapuhalluksella ja epoksimaalikerroksella. Betonireaktoria taas voidaan tiivistää butyylikumin avulla. Korroosiota voidaan vähentää myös biologista prosessia säätelemällä, jotta rasvahappojen pitoisuus on alhainen. Reaktorissa pitäisi myös pitää pieni ylipaine, mikä estää ilman pääsyn reaktoriin. Reaktoriin päässyt ilma reagoi rikkivedyn kanssa muodostaen rikkihappoa. (Taavitsainen et al. 2002, 39 – 40.)

Mädätyksessä käytetyn raaka-aineen varastointi on helpompaa kuin tuotetun biokaasun varastointi. Tavallisin kaasun varastointitapa on kaasukellovarasto, mikä näkyy kuvassa 3. Taloudellisesti on kannattavaa varastoida vain noin yhden päivän kaasuntuotanto. Tämä edellyttää, että kaasu voidaan jatkuvatoimisesti hyödyntää kannattavalla tavalla. (Alakangas 2000, 147 – 148.) Kaasun varastoinnissa voidaan käyttää myös kaasusäkkiä tai katettua lietesäiliötä. Varastoinnissa käytetään yleisesti 50 mbar:in painetta ja varastolla voidaan pitää putkiston paine halutulla tasolla. (Taavitsainen et al. 2002, 42.) Kuvassa 4 on esitetty kaasuvälikamari, joka on rakennettu lietesäiliön päälle.



**Kuva 3.** Kaasukello biokaasun varastoinnissa (Lahti 2004).



**Kuva 4.** Kaasuvarasto lietesäiliön päällä (Vilkkilä 2007, 7).

Anaerobinen mädätys voidaan toteuttaa joko märkä- tai kuivaprosessina. Märkäprosessissa kuiva-ainepitoisuus on noin 6 – 10 % ja kuivaprosessissa noin 25 – 40 %. Märkäprosessia käytettäessä pystytään massan siirrot sekä sekoitukset järjestämään helpommin. Kuivaa materiaalia mädätettäessä on etuna taas pieni reaktoritilavuuden tarve sekä pienemmän massatilavuuden lämmitystarve. Biokaasun tuotto massatilavuutta kohden on myös suurempi, johtuen suuremmasta orgaanisesta kuiva-ainepitoisuudesta. Maailoilta tulevan liotelannan kuiva-ainepitoisuus on yleensä alle 12 %, joten niitä käsitellessä puhutaan märkäprosessista. (Taavitsainen 2002, 21.) Kuivaprosessia käytetään

useimmin yhdyskuntajätteiden tai vihannesjätteiden käsittelyyn, kuin lantojen käsittelyyn (Ward et al. 2008, 7929).

Biokaasuteknologia on perinteisesti suunniteltu alhaisen kuiva-ainepitoisuuden omaaville aineille, jotka on yleisemmin käsitelty jatkuvasekoitteisissa reaktoreissa (continuously stirred tank reactor, CSTR). Syötettävä ja käsitelty materiaali on helposti pumpattavissa ja sekoitettavissa. Sekoittaminen voidaan tehdä mekaanisesti, kaasukuplien tai lietteen kierrätyksen avulla. Märkäprosesseilla on sekin etu, että ne ovat usein kuivaprosesseja helpommin automatisoitavissa ja hallittavissa. Kaasuntuotto reaktoritilavuutta kohden voi tosin runsaasta nestepitoisuudesta johtuen jäädä alhaiseksi. Esimerkiksi pelkkää lantaa käsiteltäessä olisi tuotto hyvin alhainen. Sitä voidaan kuitenkin korottaa lisäämällä perusraaka-aineen lisäksi kuivempia materiaaleja, jotka voidaan sekoittaa syötteeseen erillisessä sekoitussäiliössä. (Lehtomäki et al. 2007, 32.)

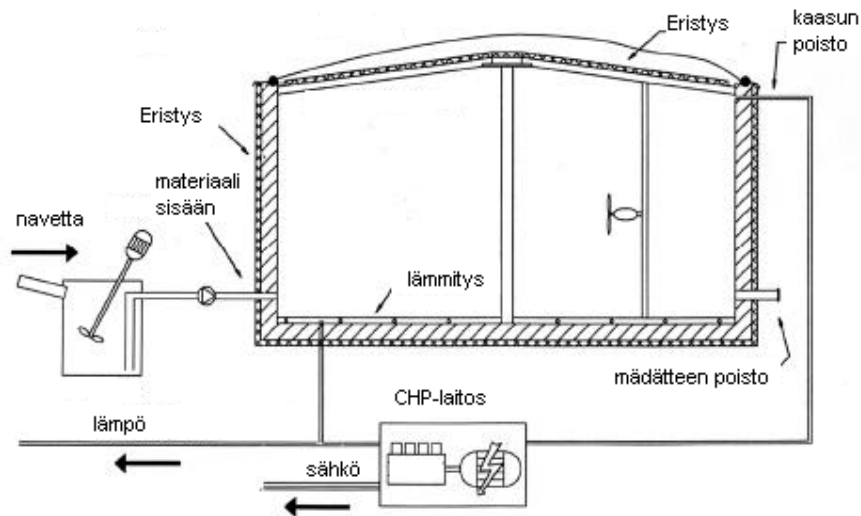
Kuivaprosesseja voidaan operoida joko panosperiaatteella tai jatkuvatoimisesti. Ne voivat olla myös sekoituksella varustettuja tai sekoittamattomia sekä yksi- tai useampivaiheisia. Jatkuvatoimiset kuivaprosessit operoivat useimmiten tulppavirtausperiaatteella. Panosperiaatteella toimivat sen sijaan ovat usein niin kutsuttuja suotopetireaktoreita, joissa suotovesi kierrätetään käsiteltävän materiaalin läpi ja näin edistetään mikrobien, ravinteiden ja hajoamistuotteiden tasaista jakautumista. Jotta kuivaprosessi saataisiin toimimaan vakaasti, täytyy käsiteltyä materiaalia kierrättää riittävästi reaktoriin tasaisen mikrobikannan ylläpitämiseksi. Kierrätettävän materiaalin osuus voi olla jopa yli 50 % reaktoriin syötettävästä materiaalista. (Lehtomäki et al. 2007, 33.)

Reaktoritilavuutta kohden saavutettavan metaanituoton sekä lämmityksen vähäisemmän tarpeen lisäksi kuivaprosessien etuina on myös se että, materiaalin kelluminen ja pintakerroksen muodostuminen ei ole ongelmana. Haittapuolena kuivaprosessissa on kuitenkin usein märkäprosessia alhaisempi puskurikapasiteetti, mikä aiheuttaa suuremman valvonnan ja prosessin ohjauksen tarpeen. Tämän lisäksi materiaalien syötössä reaktoriin tarvitaan myös monimutkaisempia ja kalliimpia laitteita. Kasvibiomassaa hyödynnettäessä on myös huomattu, että materiaalin hajotuksesta muodostunut lämpö on ollut riittävä reaktorin lämpötilan nostamiseen. Tällä on reaktorin lämmitystarvetta vähentävä

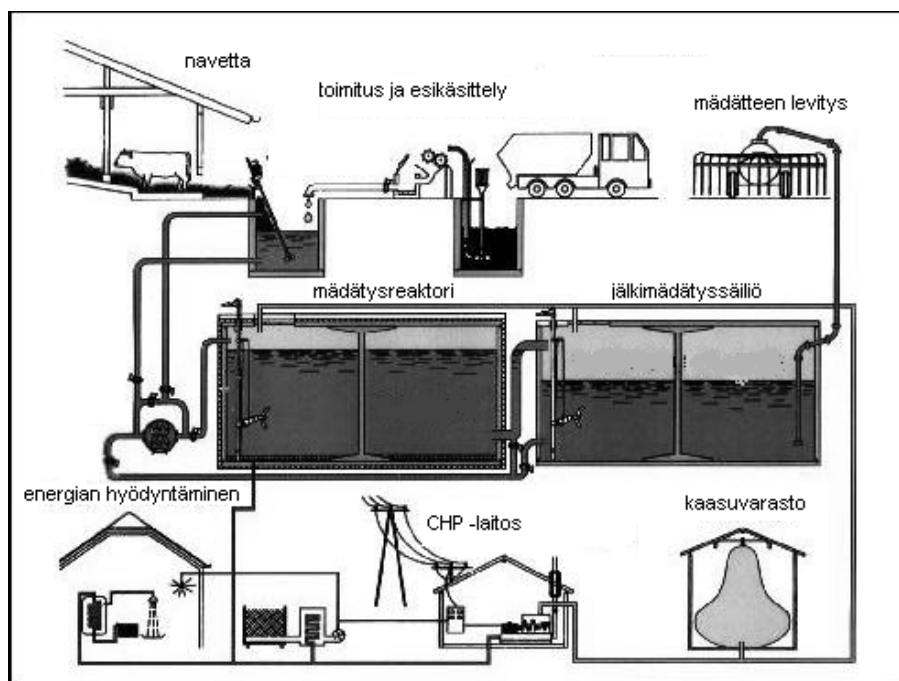
vaikutus, mutta toisaalta reaktori saattaa myös äärimmäisissä tapauksissa lämmitä liikaa ja joudutaan jopa jäädyttämään reaktoria. (Lehtomäki et al. 2007, 33.)

Sekoitusmädätysreaktori (Rührkesselfermenter) saa nimensä siitä, että reaktorissa on sekoituslaite mädätettävän materiaalin jatkuvan sekoituksen takaamiseksi. Maataloudessa on käytetty yleisesti pystyssä olevia sylinterin muotoisia reaktoreita. Munan muotoisia tai alhaalta ja ylhäältä keilamaisen muotoisia sylintereitä on enemmän jätevedenpuhdistamoilla käytetty mädätysreaktoreina. Jatkuvatoimisella sekoituksella ei saavuteta yksittäisten bakteeriryhmien optimaalisia ympäristöolosuhteita, mutta tämä voidaan kompensoida pidemmällä viipymäajoilla. (Puchas ja Resch 2003, 27 – 28.)

Tähän reaktorityyppiin kuuluu muun muassa varastoläpivirtaussysteemi kaasutiivillä reaktorilla (Speichherdurchflusssystem auf Basis gasdichtes Güllelager) ja varastoläpivirtaussysteemi mädätevarastolla (Speicherdurchflusssystem mit Nachgärbehälter). Nämä reaktorityypit on esitetty kuvissa 5 ja 6. Kaasutiiviin reaktorin tapauksessa biokaasu-reaktorina toimii standardin mukainen betonista rakennettu reaktori. Säilytys ja mädätys tapahtuvat yhdessä säiliössä ja prosessi on jatkuvatoiminen. Nykyisin tähän systeemiin on lisäksi integroitu kaasuväkäri. Etuna on suhteellisen pieni laitoskoko. Tämä konstruktio sopii maatalouskokoluokan mädätykseen. Mädätevarastolla varustettu systeemi on käytännössä hyvin yleinen. Mädätysreaktori ja jälkiväkäri muodostavat yhden yksikön, jota voidaan pitää suljettuna systeeminä. Tämän tyyppinen reaktori sopii kaikille pumpattaville materiaaleille. (Puchas ja Resch 2003, 28 – 29.)



**Kuva 5.** Varastolämpivirtaussysteemi kaasutiiviillä reaktorilla (mukaiillen Puchas ja Resch 2003,28).

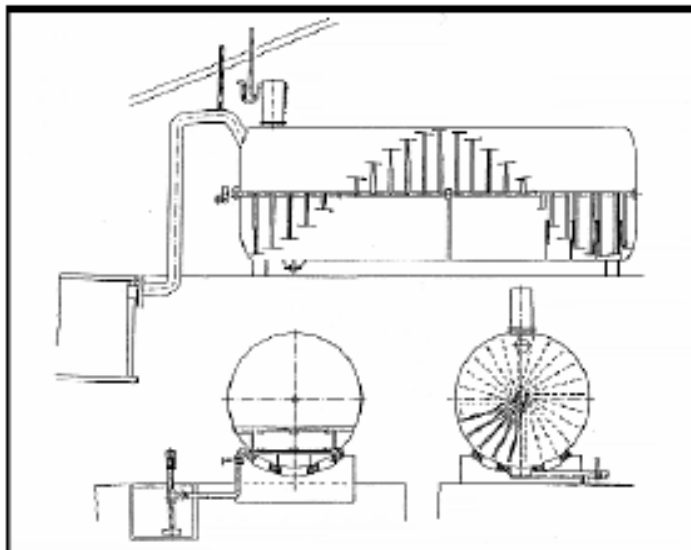


**Kuva 6.** Varastolämpivirtaussysteemi mädätevarastolla (mukaiillen Puchas ja Resch 2003,29).

Putkimädätysreaktori kaasutiiviillä mädätysvarastolla kuuluu myös märkämädätysysteemeihin. Tämän reaktorityypin etuna on karkea rakenne ja pitkäikäisyys. Putkireaktorin tärkeimpänä osana on aksiaalisesti asennettu sekoituslaite. Tämä sekoitin myös liikuttaa materiaalia läpi reaktorin. Käytännössä on eriäviä mielipiteitä sekoittimen pyörimisnopeudesta. Keskimäärin voi kuitenkin lähteä liikkeelle yhdestä neljään kierroksesta

minuutissa. Sekoittimen lapojen pitäisi olla sen pituisia, että sekoitus ylettyy lähes koko reaktorin tilavuuteen. Sekoittimen aikaansaama sekoitusefekti on erityisen tärkeää, jotta saavutettaisiin pieniä turbulenteja virtauksia. Näitä turbulenteja virtauksia tulee tietyin väliajoin vahvistaa, jotta pystytään estämään uppoavien ja kelluvien kerrosten muodostumiset. Lämmitys on joko sekoitinlaitteeseen integroituna tai kaksikerroksisen reaktorin tapauksessa myös kerrosten väliin integroituna. (Puchas ja Resch 2003, 30 – 31.)

Tällä jatkuvatoimisella reaktorilla on paljon eri käyttömahdollisuuksia. Tavallisesti reaktori on rakennettu vaakatasoon, mutta joskus myös vähän kallelleen. Rakennusmateriaaleina on käytetty terästä ja betonia. Teräksestä rakennettuna käytetään taloudellisten syiden takia 50 – 150 m<sup>3</sup> kokoisia reaktoreita. Betonista voidaan rakentaa vielä paljon suurempiakin. Putkireaktorin tapauksessa materiaalin sekoitus heikkenee käsiteltävän materiaalin kiintoainepitoisuuden pienentyessä päinvastoin kuin edellä mainittujen sekoitusreaktoreiden tapauksessa. Tämän takia putkireaktori sopii huonosti hyvin kosteille materiaaleille. (Puchas ja Resch 2003, 31 – 32.) Kuvassa 7 on esitetty putkireaktorin konstruktio.



**Kuva 7.** Putkireaktori (Puchas ja Resch 2003,29).

Itävallassa on kehitetty kahden kammion systeemi, missä sekoittaminen tapahtuu pneumaattisella sekoituksella kaasun paineen avulla ja mekaanista sekoitinlaitetta ei enää tarvita. Reaktorin koko on vaihteleva ja riippuu käsiteltävästä materiaalimäärästä. Reak-

tori on jaettu osiin ja alimpana oleva päämädätyskammio on yhteydessä ylempänä oleviin jälkimädätyskammioihin yhdyskuilujen avulla. Katon läheisyydessä nämä kammiot on yhdistetty kaasujohdoin. (Puchas ja Resch 2003, 32.)

Päämädätyskammion kaasunpoiston sulkeminen tiivistää vapautuvaa kaasua ja painaa mädätettävää massaa alaspäin. Tällä tavoin syrjäytetty mädätettävä massa puristetaan jälkimädätyskammioon. Siellä aktiivinen biomassa voi sedimentoitua ja se kierrätetään seuraavassa sekoitusvaiheessa takaisin päämädätyskammioon. Tällä tavoin saavutetaan biomassan rikastuminen reaktorissa ja sitä myöten korkeampi hajotusteho. Kun on saavutettu toivottu sekoittuminen, päästetään kaasun ylipaine jälkimädätyskammioon ja lyhyen ajan voi ylös pakotettu mädätettävä materiaali virrata takaisin päämädätyskammioon. Jälkimädätyskammioista biokaasu syötetään putkea pitkin kaasuvaraan ja lopulta hyötykäyttöön. (Puchas ja Resch 2003, 33.)

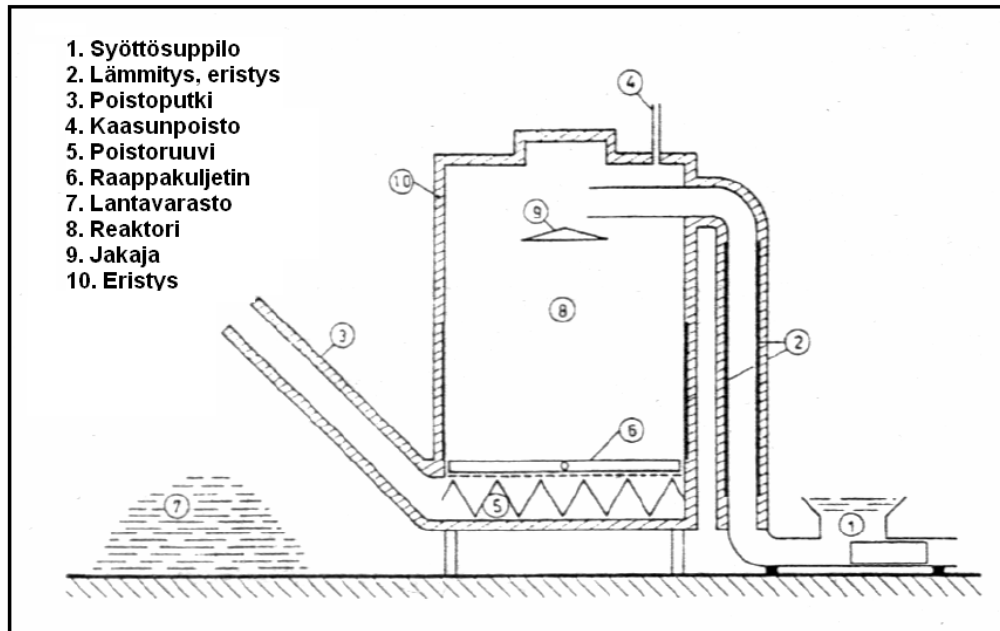
Märkämädätysyhteisöihin kuuluu myös jatkuvasekoitteinen reaktori (CSTR continuously stirred tank reactor). Siinä sisääntuleva materiaali on tasaisesti jaettu koko reaktoriin täydellisellä sekoituksella. (Ward et al. 2008, 7930.) Esikäsitellyn jälkeen mädätettävä massa pumpataan mädätysreaktoriin, jota sekoitetaan hitaasti pyörivällä sekoittimella. Kyseinen menetelmä sopii kaikkien orgaanisten lietteiden ja liettämällä lietteiksi muunnettavien jätteiden käsittelyyn. Sillä voidaan käsitellä puhdistamojätteitä, lantoja, orgaanista kotitalousjätettä, teurastamojätteitä sekä orgaanisia teollisuusjätteitä. (Puchas ja Resch 2003, 33.) Märkämädätykseen soveltuvia laitteita tarjoavat muun muassa Metener, MetaEnergia, ja RMG Pointo Oy (Vilkkilä 2007, 11 – 16).

Tällä hetkellä ei kuivamädätysjärjestelmiä ole rakennettu kovin paljon, mutta yksinkertaisemman rakenteensa takia (ei pumppuja ja sekoituslaitteita) kiinnostavat kuivamädätysyhteisöt tulevaisuudessa enemmän. Tämän järjestelmän haittapuolena ovat kuitenkin reaktorin manuaalisen täytön kustannukset. Tämä voi olla myös yksi syy, miksi kyseinen tekniikka ei ole lyönyt itseään läpi markkinoilla. (Puchas ja Resch 2003, 34.)

ANACOM systeemi on Sveitsiläinen keksintö, joka toimii jatkuvatoimisena kuivamädätyksenä. Mädätettävä massa syötetään syöttösuppiloon ja mäntäpuristin siirtää materiaa-



lin syöttöputkeen. Siellä materiaali lämmitetään haluttuun mädätyslämpötilaan. Lopulta materiaali päätyy reaktoriin jakajan kautta ja materiaali liikkuu ylhäältä alaspäin. Lopuksi mädäte siirretään pois reaktorista raappapohjan ja ruuvikuljettimen avulla. (Puchas ja Resch 2003, 35.) ANACOM prosessi on esitetty kuvassa 8.

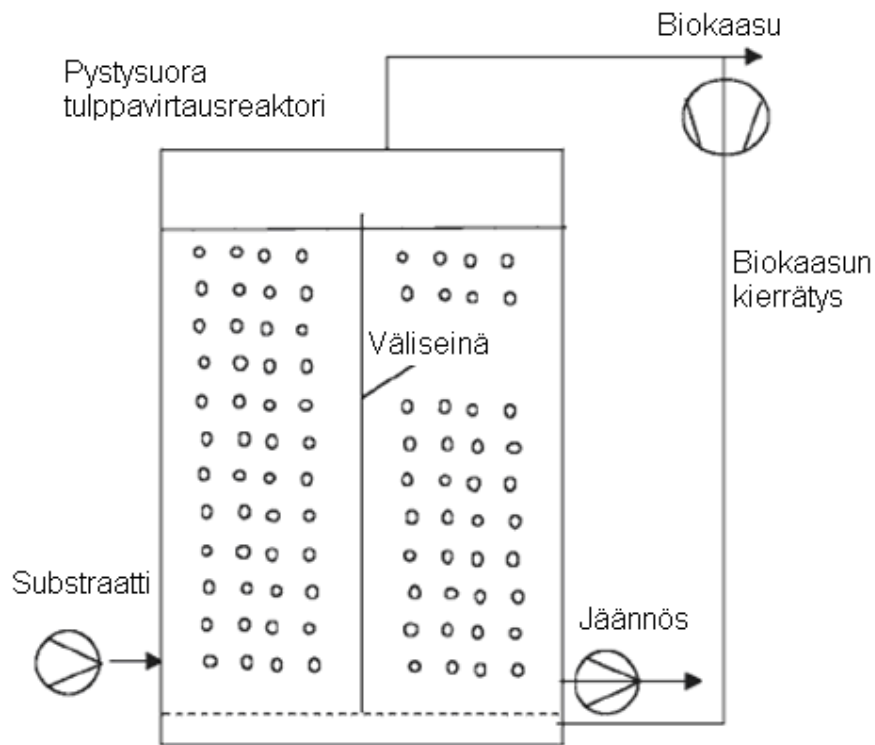


Kuva 8. ANACOM kuivämädätysreaktori (Puchas ja Resch 2003,35).

Autotallisysteemi on panosperiaatteella toimiva kuivämädätyssysteemi, jossa käytetään välillä 70 – 80 °C olevia mädätyslämpötiloja. Biomassaa ei tarvitse muuttavaan muotoon eikä sekoittimia sekä pumppuja tarvita. Kyseisellä systeemillä voidaan täten käsitellä biomassoja, joiden kiintoainepitoisuus on jopa 60 %. Pumppujen ja sekoittamislaitteiden puuttumisen takia tässä systeemissä ei tarvita paljon prosessienergiaa. Rikkipitoisuusakaan ei tarvitse juuri varoa, mikä on hyvä asia kaasumootoreille. Koska kyseessä on yksivaiheinen prosessi, erilaiset hajotusreaktiot tapahtuvat yhdessä reaktorissa mikä vaatii erityistä prosessitekniikkaa. (Puchas ja Resch 2003, 36.)

Lisäksi kuivämädätyksessä käytetään seuraavia tulppavirtaussysteemejä: Dranco-, Kompogas- ja Valorga systeemejä. Dranco ja Kompogas -systeemeissä mädätettä käytetään mikrobipopulaation luomisessa uuteen materiaaliin. Valorga prosessissa kierrätetään kaasua materiaalin sekoittamiseksi. (Lens et al. (toim.) 2006, 131 – 132.) Valorga

prosessin toimintaa on esitetty kuvassa 9. Kiinteän jätteen mädätystä maatilakokoluokassa on myös tutkittu. Kiinteän jätteen mädätyksen todettiin olevan vähemmän kilpailukykyinen kuin lietejärjestelmään perustuva mädätys, kun verrataan pelkästään energian tuotantoa. Kuivamädätyksellä pystyi aikaansaamaan hyvälaatuista mädätettä, mutta kaksivaiheinen prosessi vaatii paljon energiaa ja sen investointikustannukset ovat korkeat. (Schäfer et al. 2006, 52.)



**Kuva 9.** Valorga prosessi (Mukaiellen Deublein ja Steinhäuser (toim.) 2008, 263).

Anaerobinen prosessi on mahdollista tehdä yksi- tai monivaiheiseksi. Anaerobinen hajoaminen on luonnostaan monivaiheinen prosessi, jonka eri vaiheisiin osallistuvilla mikrobeilla on erilaiset optimiolosuhteet. Erottamalla prosessi eri vaiheisiin eri reaktoreihin, pystytään kuhunkin vaiheeseen säätämään optimaaliset olosuhteet, jolloin voidaan tehostaa hajotusta sekä kaasuntuottoa. Tämä voidaan tehdä käytännössä siten, että kaksivaiheisessa prosessissa pyritään optimoimaan ensimmäisen reaktorin olosuhteet hydrolyysin sekä happokäymisen kannalta ja toinen vaihe metaanin muodostumisen kannalta otolliseksi. Monivaiheisella prosessilla voidaan myös pidentää kokonaisviipymäaika ilman, että pyritään hajotuksen eri vaiheiden erotukseen. Näin pystytään vähentämään

sitä riskiä, että osa syötettävästä materiaalista virtaisi suoraan tai hyvin nopeasti reaktorin läpi. Tämä aiheuttaisi nimittäin kaasuntuotannon vähenemistä, lisäisi metaanipäästöjä jälkivarastoinnissa sekä heikentäisi hygieenistä laatua. (Lehtomäki et al. 2007, 34 – 35.)

Monivaiheiset systeemit pyrkivät erottamaan hydrolyysin ja happokäymisen asetogneesistä sekä metanogeesistä, sillä näillä prosesseilla ei ole samanlaiset optimaaliset ympäristöolosuhteet. Yleensä monivaiheiset reaktorit toimivat vain kahdessa vaiheessa. Monivaiheisilla prosesseilla pystytään parantamaan prosessin tasapainoisuutta yksivaiheiseen prosessiin verrattuna erityisesti helposti hydrolysoituvia materiaaleja hyödynnettäessä. Monivaiheisilla systeemeillä saadaan suojaa vaihtelevaa orgaanista kuormitusta vastaan, sillä herkemmat metanogeeniset bakteerit suojataan ensimmäisellä vaiheella. Ensimmäisestä vaiheesta tuleva materiaali on homogenisoitunut ja on tämän takia stabiilimpaa. Monivaiheinen prosessi on kalliimpi rakentaa ja ylläpitää, mutta niiden suorituskyky on kuitenkin parempi kuin yksivaiheisten reaktoreiden. (Ward et al. 2008, 7929.) Esimerkiksi lehmän lannan anaerobisessa mädätyksessä vertailtaessa kaksivaiheista termofiilistä reaktoria yksivaiheiseen termofiiliseen reaktoriin huomattiin, että kaksivaiheisella reaktorilla saatiin 6 – 8 % parempi metaanin tuotto ja 9 % parempi haihtuvan kiintoaineen erotus kuin yksivaiheisellä prosessilla. (Nielsen et al. 2004, 291.)

Orgaaninen yhdyskuntajäte kannattaa käsitellä kaksivaiheisessa mädätyksessä. Saman biokaasumäärän saamiseksi yksivaiheisen mädätyksen hydraulinen viipymäaika on 28 päivää ja kaksivaiheisen mädätyksen molemmat vaiheet kestää 7 päivää eli yhteensä 14 päivää. Ensimmäinen vaihe kannattaa toteuttaa mesofiilisena, sillä tällöin haihtuvien rasvahappojen (VFA) aiheuttama inhibitio metanogeesille on pienempi kuin termofiilissä olosuhteissa. Tämä johtuu siitä, että haihtuvien rasvahappojen muodostus on nopeampaa termofiilissä olosuhteissa kuin mesofiilissä olosuhteissa. Toiseen vaiheeseen sen sijaan kannattaa järjestää termofiiliset olosuhteet hajoamisen ja kaasuntuotannon maksimoimiseksi. (Schober et al. 1998, 857 – 859.) Syötettäessä pelkästään orgaanista yhdyskuntajätettä, hedelmä- tai kasvisjätettä tai muuta nopeasti hajoavaa jätettä kannattaa käyttää kaksivaiheista anaerobista mädätystä, koska se sallii suuremman reaktorin kuormituksen (Mata-Alvarez et al. 2000, 5).

Lehmän lantaa käsitellessä saavutetaan myös hyviä tuloksia vaiheistamalla mädätys. Jaettaessa reaktori termofiiliseen ensimmäiseen vaiheeseen sekä mesofiiliseen toiseen vaiheeseen, voidaan hyötyä molemmista olosuhteista. Tällaista prosessia kutsutaan lyhenteellä TPAD (temperature-phased anaerobic digestion). Termofiilisessa reaktorissa viipymäaika on lyhyempi kuin mesofiilisessa reaktorissa. Ensimmäisen vaiheen termofiiliset olosuhteet voimistavat lannan heikosti hajoavien yhdisteiden hydrolyysiä ja saavat ne asidogeenisten ja metanogeenisten bakteerien käytettäväksi mesofiilisessa vaiheessa. Ensimmäinen termofiilinen vaihe, joka toimii korkeammalla lämpötilalla ja haihtuvan kiintoaineen kuormituksella, saavuttaa korkeamman hajoamisasteen. Mesofiilinen vaihe saattaa mädätysprosessin loppuun muuttamalla osittain hajonneet orgaaniset yhdisteet metaaniksi ja hiilidioksidiksi. (Sung ja Santha 2003, 1635.)

Käytetyin reaktorityyppi on jatkuvatoiminen ja – sekoitteinen reaktori (CSTR). Tällöin materiaalia pumpataan reaktoriin ja mädätettä pois reaktorista säännöllisesti pitäen tilavuus samana reaktorissa. (Wellinger 1999, 18.) Jatkuvatoimisissa prosesseissa on etuina tasainen kaasuntuotto sekä syötön automatisoitavuus. Panosperiaatteella toimivat reaktorit sen sijaan tyhjenetään ja täytetään uudella materiaalilla kerralla ja tietyin väliajoin esimerkiksi neljän – kuuden viikon välein. Tällaisissa prosesseissa on täyttö ja tyhjentäminen usein työntensiivisin vaihe, mutta muuten prosessi pystyy toimimaan vähäisellä hoidolla. Uuden syötetyn materiaalin mukaan sekoitetaan yleensä käsiteltyä materiaalia, jotta voidaan ylläpitää tasainen mikrobikanta. Uuden panoksen kaasun tuoton käynnistyminen vie yleensä useita päiviä, joten tasaisen kaasuntuotannon aikaansaamiseksi pitää operoida useaa panosreaktoria rinnakkain. (Lehtomäki et al. 2007, 34.)

Kuiva- ja märkämädätyskappaleessa mainittu autotallisysteemi on panosperiaatteella toimiva, erityisesti energiakasvien käsittelyssä käytetty reaktori. Siinä tyhjentäminen ja täyttäminen hoidetaan etukuormaimella. Näitä reaktoreita kannattaa operoida vähintään kolme rinnakkain, jotta mahdollistetaan tasainen kaasuvirta ja suotoveden kierrättäminen reaktoreiden välillä tasaisen mikrobikannan ylläpitämiseksi. Mikrobitasapainon ylläpitämiseksi pitää tuoreeseen materiaaliin sekoittaa käsiteltyä materiaalia tyhjennyksen ja täytön yhteydessä. (Lehtomäki et al. 2007, 34.) Jatkuvatoimisia prosesseja ovat

muun muassa märkä- ja kuivamädätys kappaleessa mainitut sekoitusmädätysreaktori, putkireaktori sekä ANACOM reaktori.

### 4.3 Kompostointi

Kompostointi on yksinkertaisempi tapa käsitellä orgaanisia jätteitä kuin mädätys. Kompostointi tuottaa lämpöä, mutta kuluttaa usein energiaa pakotetussa ilmansyötössä. Kaikkia komposteja ei ilmasteta, vaan kuten aumakompostoinnissa hapen saanti turvataan kääntämällä kompostia ajoittain. Kompostoinnissa mikrobit hajottavat materiaalia kosteissa, aerobisissa sekä riittävän lämpöeristetyissä olosuhteissa. Tuotteena kompostoinnissa muodostuu hiilidioksidia, vettä, kompostia sekä jonkin verran lämpöä. Kompostoitavan massan määrä pienenee noin kolmanneksella kiinteässä kompostoinnissa. Massa muuttuu myös stabiilimmaksi ja hajuttomaksi sekä hygienia paranee. Kompostoitaviksi materiaaliksi soveltuvat kiinteät orgaaniset aineet sekä lietteet. Kompostiin voidaan lisäksi lisätä seosaineita, jotka parantavat materiaalien kompostoitumista säättämällä vesi- ja ravinnepitoisuutta. Soveltuvia tukiaineita ovat esimerkiksi hake, kuori, sahanpuru tai turve. (Taavitsainen et al. 2002, 97.)

Kompostoinnin tavoitteena on muuttaa biohajoava orgaaninen materiaali tasaisempaan muotoon, vähentää alkuperäisen massan tilavuutta, tuhota patogeeneja ja hyönteisten munat sekä muut epätoivotut organismit ja rikkaruohojen siemenet. Lisäksi kompostoinnissa pyritään säilyttämään käytetyn materiaalin sisältämät ravinteet (typpi, fosfori ja kalium) ja tuottamaan tuote, jota voidaan käyttää kasvien kasvun tukena ja maanparannusaineena. Yleisesti ottaen kompostin kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet vaihtelevat lähtömateriaalin, kompostointiolosuhteiden ja kompostoitumisasteen mukaan. Muista orgaanisista aineksestä kompostin erottaa muun muassa ruskeasta hyvin tummaan vaihteleva väri, alhainen C:N- suhde, jatkuvasti muuttuva olemus mikro-organismien toiminnan seurauksena ja korkea kationinvaihtokapasiteetti sekä veden absorptio. Maahan lisättäessä komposti keventää raskaita maa-aineksia, parantaa kevyiden hiekkaisen materiaalien koostumusta ja lisää useimpien maa-ainesten vedenpidätyskykyä. (Thobanoglous et al. 1993, 302 - 303.)

### 4.3.1 Kompostointiprosessin kuvaus

Kompostointikäsitteilyn vaiheita nykyaikaisessa kompostoinnissa on kompostoitavan materiaalin esikäsitteily, varsinainen kompostointi ja kompostituotteen valmistelu sekä markkinointi. Kompostoitavan materiaalin esikäsitteilyyn kuuluu syntypaikkalajittelu, kompostoitavan materiaalin vastaanotto, mahdollisten kierrätettävien materiaalien talteenotto, mahdollinen partikkelikoon pienentäminen ja tarvittaessa veden ja tukiaineiden lisäys. Esikäsitteilyn jälkeen seuraa varsinainen kompostointi. Kompostin valmistelu ja markkinointi tapahtuu sen jälkeen, kun komposti on stabiloitunut. Tähän vaiheeseen voi kuulua hienojauhatusta, seulontaa, ilma-erottelua, mahdollisten lisäaineiden sekoittamista, granulointia, pussitusta ja varastointia, kuljetusta sekä joissain tapauksissa suoramarkkinointia. (Thobanoglous et al. 1993, 303 - 306.)

Kompostointiprosessissa liikkuu monenlaisia materiaalivirtoja. Kompostointiprosessiin sisään meneviä materiaalivirtoja ovat raaka-aineet kosteuspitoisuuksineen, mahdolliset lisä- ja tukiaineet sekä sisään johdettava ilmavirta. Prosessista poistuvia materiaalivirtoja taasen ovat kompostointituotteet ja ilmavirta, joka on rikastunut poistokaasuilla ja köyhtynyt hapen osalta. Tukiaine sekä kompostointituote voivat olla kierrätettäviä materiaaleja. Kompostoinnin optimiolosuhteisiin vaikutetaan sisään menevillä ja ulos tulevilla materiaali- ja energiavirroilla. (Hänninen 1992, 16.)

Kompostiprosessin suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä ovat biomassojen ominaisuuksien lisäksi lämpötila, patogeenien kontrollointi, sekoittaminen tai kääntely, ilmavaatimukset, pH:n kontrollointi, maatumisaste ja hajujen kontrollointi ja maa-alueen vaatimukset. Parhaimpien tulosten saamiseksi lämpötila pitäisi pitää välillä 50 – 55 °C:a ensimmäiset päivät ja välillä 55 – 60 °C:a aktiivisen kompostoinnin loppuajan. Jos lämpötila kohoaa yli 66 °C:n, biologinen aktiivisuus vähenee huomattavasti. Kääntely tai sekoittamista pitäisi tehdä säännöllisesti tai tarvittaessa, jotta voidaan estää kuivumista, paakkuuntumista tai ilman kanavoitumista. Sekoitusten tiheys riippuu kompostointitekniikasta. Ainakin 50 %:a alkuperäisen ilman happipitoisuudesta omaavaa ilmaa pitäisi saada koko kompostoitavan materiaalin kaikkiin osiin optimaalisten tulosten saamiseksi. (Thobanoglous et al. 1993, 687.) Kompostointiprosessin etenemistä ja kompostin kypsyttä il-

maisevia muuttujia ovat muun muassa kompostin lämpötila, haju, väri, hapen kulutus, hiilidioksidin tuotto, hydrolyyttisten entsyymien aktiivisuus, hajoavien aineiden pitoisuudet, humuspitoisuus, C:N- suhde, pH, kationinvaihtokapasiteetti, ammonium-, rikki- vety-, nitriitti ja nitraattipitoisuus sekä kompostissa idätettyjen siementen itämisindeksi. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto, 1999, 16 – 17.)

Aerobinen kompostointiprosessi voidaan operoida joko mesofiilisella (30 – 38 °C) tai termofiilisella (55 – 60 °C) lämpötila-alueella. Kompostointitoiminnan aikana lämpötila kohoaa johtuen eksotermisistä aineenvaihdunnan reaktioista. Aumakompostoinnissa lämpötilaa voidaan kontrolloida kääntelemällä aumaa lämpötilamittausten perusteella. Ilmastetussa aumassa ja reaktorikompostoinnissa lämpötilaa voidaan kontrolloida lämpötilaa mittaamalla ja ilmavirtaa säätelemällä. (Thobanoglous et al. 1993, 691.) Lämpötilasta saadaan hyvin tietoa kompostoinnin vaiheista ja sitä käytetäänkin usein kompostointiprosessin seuraamiseksi. Jotta lämpötila nousisi kompostointiprosessin aikana, edellyttää se riittävän suurta kompostoitavaa massaa, joka toimii myös lämpöeristeenä. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 18.)

Kompostointiprosessi voidaan jakaa neljään vaiheeseen: mesofiilinen, termofiilinen, jäähtymis- ja kypsymisvaihe. Mesofiilisessa vaiheessa hajoavat helposti hajoavat yhdisteet, kuten sokeri, ja se tapahtuu ensimmäisten 1- 2 vuorokauden kuluessa. Tässä vaiheessa lämpötila kohoaa vähitellen 40 °C:een. Termofiilisessa vaiheessa vaikeammin hajoavat selluloosayhdisteet hajoavat ja kasvipatogeenit sekä siemenet tuhoutuvat. (Taavitsainen et al. 2002, 97 – 98.) Kompostoituminen on nopeinta lämpötilan ollessa välillä 35 – 50 °C, mutta lämpötila pitäisi saada kohoamaan yli 60 °C hygieenisyyden varmistamiseksi. Kääntämällä komposti riittävän usein varmistetaan, että koko komposti yltää termofiiliseen lämpötilaan ja patogeenit ja siemenet tuhoutuvat koko massasta. (Tontti, Mäkelä-Kurtto 1999, 18.) Jäähtymisvaiheessa lämmöntuotanto vähenee ja hajoamisnopeus hidastuu, koska biohajoavien yhdisteiden pitoisuus pienenee. Lämpötilan lasku on hyvässä kompostissa loivaa. Kypsymisvaiheessa komposti on ympäristön lämpötilassa ja vaihe kestää useita kuukausia. (Taavitsainen et al. 2002, 97 – 98.) Kompostoitumisen kolme ensimmäistä vaihetta tapahtuvat kuitenkin nopeasti, aumakompos-

toinnissa muutaman viikon aikana ja koneellisessa kompostoinnissa ne voivat olla ohi jo muutamassa päivässä. (Tontti, Mäkelä-Kurtto 1999, 16.)

Kompostoinnissa tapahtuu lämpötilan nousua mikrobitoiminnan takia (Tontti ja Mäkelä Kurtto 1999, 16). Lämpöenergiaa taas poistuu säteilemällä, johtumalla, vettä haihduttamalla tai poistokaasun mukana. Panoskompostoinnissa on edellä esitetyt neljä päävaihetta, mutta jatkuvatoimisessa prosessissa siirrytään suoraan termofiilivaiheeseen. Viilenemis- ja kypsymisvaiheet tapahtuvat erillään varsinaisen prosessin jälkeen. Lämpötilan ohjaaminen on tarpeellista niin panos- kuin jatkuvatoimisessa prosessissa. Lämmön hävikkiä silmällä pitäen tulee kompostin ravinnesuhteiden olla tasapainossa, kosteuspi-toisuus saa olla vain juuri niin kostea, ettei mikrobitoiminta hidastu kuivuuden takia ja yli-ilmastusta sekä liiallista sekoitusta tulisi välttää. Lämpömäärän poistumiseen voidaan myös vaikuttaa eristämällä komposti riittävästi ja pienentämällä ulkopinta-alaa verrattuna tilavuuteen. Kompostointiin voidaan myös tuoda lämpöä lämmittämällä syötettävää kompostoitavaa materiaalia tai ilmaa tai lämmittämällä kompostia sisällä kulkevien lämpöputkien tai vaipan avulla. (Hänninen 1992, 19.)

Lämpötilan kohotessa liian korkeaksi, hajotustoiminta ja kompostoituminen hidastuvat. Lämpötilan nostaminen hyvin korkealle ei ole edes patogeeneja sisältävää materiaalia käsiteltäessä järkevää, koska tällöin myös hajotustoimintaa tekevät mikrobit kuolevat. Kompostoinnin lämpötilaa saadaan laskettua poistamalla lämpöenergiaa. Suurissa prosesseissa koneellisessa ilmastuksessa lämpö poistuu pääasiallisesti veden haihtumisen yhteydessä. Myös poistokaasun mukana poistuu jonkin verran lämpöä, sillä sen lämpötila on kohonnut jonkin verran sisään tulevan ilman lämpötilaan verrattuna. (Hänninen 1992, 19.)

Patogeenien kontrollointi kompostoinnin aikana on tärkeää, sillä se vaikuttaa lämpötilaprofiiliin ja ilmastusprosessiin. Patogeenien tuhoutuminen on ajan ja lämpötilan funktio. Esimerkiksi Salmonella bakteerit voidaan tuhota 15 – 20 minuutissa 60 °C lämpötilassa tai yhdessä tunnissa 55 °C lämpötilassa. Hygienisoitumista voidaan varmistaa sekoittamalla pintakerros keskelle (Dredge et al. 2006, 160).



Orgaanisen materiaalin sekoittaminen kompostointiprosessin alussa on tärkeää kosteus-  
pitoisuuden laskemiseksi tai nostamiseksi oikealle tasolle. Sekoituksella voidaan myös  
saavuttaa homogeenisempi ravinteiden ja mikro-organismien jakautuminen. Orgaanisen  
materiaalin kääntelyllä kompostointiprosessin aikana on erittäin tärkeätä aerobisen ak-  
tiivisuuden ylläpitämiseksi. Kääntelyä voidaan säätää kosteuspitoisuuden, orgaanisen  
materiaalin ominaisuuksien tai ilmavaatimusten mukaisesti ja täten onkin mahdollista  
määrittellä yleisesti sekoittamisen minimiväli. Orgaaniselle jätteelle, jonka kosteuspi-  
toisuus on välillä 55 – 60 %:a ja kompostoitumisaika on 15 päivää, ensimmäisen kääntä-  
misen neuvotaan tekemään kolmantena päivänä. Tämän jälkeen kääntäminen pitäisi  
tehdä joka toinen päivä ja yhteensä neljä tai viisi kertaa. (Thobanoglous et al. 1993,  
691.)

Tarvittavan ilmaston yleispätevä määrittäminen kullekin kompostointiprosessille on  
hankalaa. Tarvittavan hapen määrään vaikuttavat muun muassa kosteuspitoisuus, kom-  
postin lämpötila, mikrobipopulaation koko ja ravinteiden saatavuus. Nopea hajotustoi-  
minta, hajunmuodostuksen minimointi sekä lämpötilan pitäminen sopivana mikrobeilla  
vaativat kuitenkin sopivaa ilmastusta. Määritettäessä laskennallisen hapen määrää, voi-  
daan hapetettavan hiilen määrää käyttää lähtökohtana. Liian vähäisellä ilmastuksella on  
mikrobien toimintaa hidastava vaikutus ja se edistää myös anaerobisista olosuhteista  
johtuvien pahojen hajujen muodostumista. Liian runsas ilmasto taas jäädyttää kom-  
postia. Hapen tarve myös vaihtelee panoskompostoinnin aikana. Lämpenemisvaiheesta  
termofiilivaiheeseen siirryttäessä hapen vaatimukset lisääntyvät ja viilenemisvaiheen  
sekä kypsymisvaiheen aikana taas pienenevät. Mikrobien aktiivisuuden lisäksi tähän  
vaikuttaa se, että happi on vähemmän liukoista korkeammassa lämpötiloissa. (Hänninen  
1992, 18 – 19.)

Kompostoinnin ilmastaminen voidaan tehdä sekoittamalla, jauhamalla sekä nostamalla  
ja pudottamalla materiaalia, jolloin materiaali johdetaan ilman läpi. Kasojen uudelleen-  
pakkaamisella saadaan aumoja tai kasoja ilmastettua. Materiaalin läpi voidaan myös  
johtaa ilmaa käyttämällä puhallinta tai imuria. Puhallin on tehokkuudeltaan 1,5-  
kertainen, mutta imurilla voidaan hajujen ehkäisemiseksi imeä poistuva ilma kaasun-

pesulaitteen läpi. Laitteiden mitoittaminen täytyy tehdä huippukulutusta varten sekä jäädytykseen tarvittavaa ilmaylimäärää silmällä pitäen. (Hänninen 1992, 19.)

Mikrobiympäristön ja jätteen stabiloinnin kannalta on myös pH:n kontrollointi tärkeää. Lämpötilan tavoin myös pH vaihtelee kompostointiprosessin kuluessa. Yhdyskuntajätteen orgaanisen osuuden pH on yleensä alussa 5 – 7. Ensimmäisten päivien aikana pH tippuu arvoon 5 tai alle. (Thobanoglous et al. 1993, 695.) Tämä johtuu siitä, että mikroorganismit käyttävät kompostoitumisen alussa hyväksi liukoiset tai muuten helposti hajotettavat yhdisteet kuten sokerit, tärkkelykset ja rasvat. Hajoamistuotteena muodostuu orgaanisia happoja ja tämän takia pH laskee. Tämän jälkeen hajoavat proteiinit ja ammoniumtyyppiä vapautuu runsaasti, mikä ilmenee jyrkkänä pH:n nousuna. Myös orgaanisten happojen hajoaminen aiheuttaa pH:n nousua. Kompostointiprosessin jatkuessa pH asettuu välille 7-8. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 18.) Mikäli kompostointiprosessiin ei tuoda tarpeeksi ilmaa, voi ilmaantua anaerobisia olosuhteita, mikä aiheuttaa pH:n tippumisen noin 4,5:een ja kompostoitumisprosessi hidastuu. (Thobanoglous et al. 1993, 695.)

Kompostoinnissa voi myös muodostua hajuja, jotka johtuvat useimmiten anaerobisten olosuhteiden muodostumisesta kompostikerrokseen. Näin voi tapahtua, jos esimerkiksi isossa kompostointilaitoksessa aikakauslehtien palasia tai elintarvikemuovia löytyy orgaanisen materiaalin joukosta. Nämä materiaalit eivät pysty hajoamaan lyhyessä kompostointiajassa. Lisäksi happea ei välttämättä ole saatavilla tällaisten materiaalien keskellä, joten anaerobisia olosuhteita voi muodostua. Hajun muodostuksen estämiseksi partikkelikokoa tulisi pienentää sekä muovit ja muut biologisesti hajoamattomat materiaalit tulisi poistaa. (Thobanoglous et al. 1993, 695.) Kompostoinnissa muodostuvaa hajua aiheuttaa yleensä hajoamisen välituotteina muodostuneet lyhytketjuiset rasvahapot, mutta ne häviävät kompostoinnin edetessä. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 19.)

Kompostoinnin aikana pitää myös seurata kompostin maatumisastetta. Kompostin maatumisasteen mittauksessa on monenlaisia metodeja esimerkiksi: loppulämpötilan lasku, kompostin itsestään lämpiämisen määrä ja hajoavan ja pysyvien orgaanisten aineiden määrä. Laboratorioanalyysi kemiallisen hapenkulutuksesta (COD) ja ligniinipitoisuu-

desta kertoo nopeasti maatumisasteen. Alhainen COD arvo ja korkea ligniinipitoisuus ovat merkkejä hyvästä kompostista. Näiden kompostointioperaatioihin liittyvien seikkojen lisäksi pitää ottaa huomioon kompostiprosessien vaatima maa-alueen tarve. (Thobanoglous et al. 1993, 695.)

Biologisia menetelmiä pystytään myös käyttämään kompostoitumisen seuraamisessa. Siementen itämistestiä voidaan pitää kompostin kypsyyden testinä, koska raaka komposti voi estää siementen itämisen tai huonontaa juuriston kasvua. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 19 – 20.) Kompostoitumisen seuraamisessa tärkeitä tekijöitä ovat myös lämmöntuotto, hiilidioksidin tuotto ja hapen kulutus. Hapen kulutus on hiilidioksidin tuottoa luotettavampi parametri, sillä happea kuluu pelkästään aerobisen hengityksen yhteydessä, mutta hiilidioksidia muodostuu sekä aerobisessa hengityksessä, että mädätyksessä. (Hänninen et al. 1994, 21 – 22.)

Kompostoitumista ilmaisevia kemiallisia parametreja ovat muun muassa C:N- suhde sekä kompostissa olevat yhdisteet. Hiili-typisuhdetta (C:N- suhde) voidaan myös käyttää, mutta kypsälle kompostille on vaikea antaa jotain tiettyä arvoa. Kompostin C:N- suhde vakiintuu tietylle tasolle kompostin kypsyttyä, joten voidaan määrittää lopputilanteen ja alkutilanteen C:N- suhteiden suhde. Kypsällä kompostilla tämä olisi 0,6. Kompostoinnin edistymisestä saadaan tietoa myös siinä olevien yhdisteiden määrittelyllä. Mikäli kompostissa on pelkistäviä yhdisteitä, kuten ammoniakkia tai rikkivetyä, on kompostointi vielä kesken tai kompostissa voi olla jopa anaerobisia olosuhteita. Nitriitit ja erityisesti nitraatit taas merkitsevät sitä, että kompostoituminen on jo melko pitkällä. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 19 – 20.)

Kompostointiprosessissa kompostoitavan massan tuhkapitoisuus suurenee eli hehkusuhäviö pienenee. Prosessin lähestyessä loppuaan tuhkapitoisuus asettuu tietylle tasolle. Kompostoinnissa kasvaa myös humuspitoisuus. Humus muodostuu kuolleesta orgaanisesta aineesta, jota muodostuu eloperäisen aineksen hajoamisen rinnalla. Voimakkainta humustumista on yleensä kompostoinnin loppuvaiheessa, jolloin humusaineita, humus- ja fulvohappoja sekä humiinia muodostuu. Kompostoitumisessa tapahtuu myös kompostin värin tummenemista ja kypsän kompostin väri on tumman ruskea tai melkein

musta. Tummuminen johtuu siitä, että konjugoituneiden kaksoissidosten määrä lisääntyy. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 19.)

Kompostoinnissa tapahtuvan orgaanisen aineen hajotuksen tekevät lähinnä bakteerit, sädesienet, sienet sekä erilaiset hyönteiset, punkit ja tuhatjalkaiset sekä lierot. Ravinteiden saatavuus ja lämpötila ovat ne tekijät, jotka pääasiallisesti vaikuttavat näiden lajien aktiivisuuteen. Kompostointiprosessissa orgaanista materiaalia hajottavat mikrobit tulevat kompostoitavan materiaalin mukana ja niitä siirtyy myös ympäristöstä. Kompostointiprosessin aikainen lämpeneminen edesauttaa hajoamista. Kompostoinnin aikana materiaali stabiloituu ja humuspitoisuus kohoaa. Lämpimässä alkuvaiheessa suurin osa biologisesti käyttökelpoisesta energiasta on hyödynnetty, mutta hajoaminen jatkuu kypsymissivaiheessa. Kompostin valmiuden mittareina käytetään stabiilisuutta ja kypsytyä. Ympäristön lämpötilaan jäädyttyään kompostia voidaan pitää stabiilina, mutta täysin kypsäksi tullakseen komposti vaatii pitkähkön maatumisvaiheen. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 15 – 16.)

Kompostoinnin toteuttamisessa valitaan siis ensin sopivat raaka-aineet ja niiden suhteet. Ainekset on tämän jälkeen sekoitettava huolellisesti ja märkään sekä tiiviiseen ainekseen on sekoitettava kuohkeuden lisäämiseksi olkia, kuorta, haketta tai karkeaa turvetta. Hapen saamiseksi on järjestettävä riittävä ilmanvaihto, sillä kiivaimmillaan ilman tarve on vähintään  $1 \text{ m}^3/\text{h/t}$ . Kompostin kosteus on myös määriteltävä sopivaksi eikä se saa päästä liian kosteaksi tai kuivua. Valmis kompostikasa peitetään multa, turve tai olkikerroksella. Peittämiseen valmistetaan myös erityisiä kompostihuopia. Kompostointikassaa on sen valmistuttua syytä tarkkailla parin päivän välein. Lämpötilaa kannattaa mitata ja kosteutta sekä maatumista tarkkailla aistivaraaisesti. Huolella valmisteltu ja sekoitettu maatilakomposti kompostoituu yleensä 2 – 6 kuukauden kuluessa. Mikäli kompostia käännellään, tulisi se tehdä termofiilisen vaiheen (lämpövaiheen) ollessa ohi, jolloin lämpö on alle  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . (Dredge et al. 2006, 161 – 167.)

#### **4.3.2 Kompostointitekniikoita**

Kompostointitekniikat voidaan jakaa aumakompostitekniikkaan ja reaktorikompostitekniikkaan. Aumakompostoinnin ilmastus voidaan tehdä kääntelemällä tai asentamalla ilmastusputkisto auman pohjalle. Reaktorikompostointitekniikoita ovat tunneli-, rumpu-, torni-, kaukalo- ja siilokompostointi. Yleisin ja vanhin kompostointitekniikka on ulkoilmassa aumassa tai kasassa suoritettava auma- tai kasakompostointi. Reaktorikompostoreilla pyritään säästämään tilaa ja nopeuttamaan kompostoitumisprosessia. (Tontti ja Mäkelä-Kurto, 1999,20.) Kompostoinnissa käsiteltävien ainemäärien perusteella kompostointi voidaan jakaa pienkompostointiin ja suuressa mitassa suoritettavaan kompostointiin (Hänninen et al. 1992, 26).

Jätteiden kompostoimista voidaan tehdä pienissä erissä aumassa, pienkompostoreissa, keskitetyissä kompostointilaitoksissa tai kompostointikentillä suurissa aumoissa. Kompostointitekniikan valinta riippuu lähinnä hajupäästöihin ja laitoksen kapasiteettiin liittyvistä vaatimuksista, käytettävissä olevasta tilasta sekä menetelmien kustannuksista. Tiheään asutulla seudulla, jossa hajuhaitat ja tilan puute aiheuttavat ongelmia, kannattaa rakentaa reaktorikompostointilaitos, kuten tunnelikompostointilaitos. Mikäli tilaa on riittävästi, voi suljetussa tilassa tapahtuva ilmastettu aumakompostointi olla hyvä vaihtoehto. Pienemmillä kapasiteeteilla (10 000 t/a) voidaan harkita myös konttikompostointia. Kompostointi voidaan hoitaa joko panos- tai jatkuvatoimisena prosessina. Jatkuvatomisessa prosessissa on tarkoituksena ylläpitää vakaat olosuhteet materiaali- ja energiamääriä säätelemällä. Panosprosessissa taas olosuhteet muuttuvat jatkuvasti mikrobien hajottaessa lähtöaineita. (Tontti ja Mäkelä-Kurto, 1999,20.)

Aumakompostointi voi olla yksinkertaisimmassa muodossaan sitä, että rakennetaan kasa tai auma, joka on 2,4 – 3,0 m korkea ja 6,1 – 7,6 m leveä pohjastaan. Tätä aumaa voidaan sitten kääntää kerran vuodessa. Tällainenkin yksinkertainen systeemi toimii, mutta täydelliseen hajoamiseen voi mennä kolmesta viiteen vuotta. Tällainen systeemi päästäisi luultavasti myös hajuja, sillä osa aumasta olisi luultavasti anaerobisessa tilassa. Kehittyneimmässä aumakompostoinnissa käytetään leikkauspinta-alaltaan pienempiä aumoja, joissa korkeus on yleensä 1,8 – 2,1 m ja pohjan leveys 4,3 – 4,9 m. Käytännössä auman todelliset mitat riippuvat auman kääntämiseen käytettävistä koneista. Aumat voidaan kääntää jopa kaksi kertaa viikossa ja lämpötila pidetään 55 °C tai hieman kor-

keammalla. Auman kääntäminen aiheuttaa yleensä hajuja. Aumakompostointi kestää yleensä kolmesta neljään viikkoa, jonka jälkeen kompostin annetaan vielä jälkikypsyä lisää kolmesta neljään viikkoa ilman kääntelyä. (Tchobanoglous 1993, 306.)

Koneellisesti ilmastetun auman tekniikka kehiteltiin alun perin jätevesilietteen kompostointiin, mutta sitä voidaan käyttää useille orgaanisille jätteille, kuten puutarhajätteille tai yhdyskuntajätteestä erotetulle orgaaniselle jätteelle. Ilmastettu auma koostuu ilmastusputkien verkosta, jonka päälle kompostoitava materiaali pistetään. Tyypilliset kasojen korkeudet ovat 2 – 2,5 m ja kerros seulottua kompostia pistetään yleensä vastamuodostetun kasan päälle lämpöeristeeksi ja hajujen kontrolloimiseksi. Jokaiselle aumalle laitetaan yleensä oma puhallin, jotta pystytään paremmin säätämään ilmastusta. Puhaltimia ohjataan yleensä ajastimella tai joissain tapauksissa myös mikrotietokoneella, jotta pystytään paremmin saavuttamaan tietty lämpötilaprofiili. Kompostoitumisaika on kolmesta neljään viikkoa, jonka jälkeen jälkikypsytyksessä kestää vielä neljä viikkoa tai pidempään. (Tchobanoglous 1993, 306.)

Reaktorikompostoinnissa kompostoituminen tapahtuu suljetussa kontissa tai säiliössä. Reaktorikompostoinnissa on hyödynnetty monenlaisia eri säiliöitä, kuten pystysuoria torneja, vaakatasossa olevia suorakaiteen muotoisia ja pyöreitä tankkeja sekä pyöriviä pyöreitä tankkeja. Reaktorikompostointisysteemit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan, joita ovat tulppavirtaus ja dynaaminen virtaus systeemeihin. Tulppavirtaus systeemeissä partikkelien väliset suhteet pysyvät samana läpi prosessin ja systeemi toimii ensimmäisenä sisään ensimmäisenä ulos periaatteella. Dynaamisissa systeemeissä sen sijaan kompostoitavaa materiaalia sekoitetaan mekaanisesti prosessoinnin aikana. Tällaiset reaktorikompostorit on suunniteltu hajujen ja käsittelyajan minimoimiseksi hallitsemalla ympäristötekijöitä, kuten ilman virtausta, lämpötilaa ja hapen konsentraatiota. Reaktorikompostoreiden hyvinä puolina on prosessi- ja hajukontrollointi, nopeampi läpivirtaus, alhaiset työkustannukset sekä vähäinen pinta-alan tarve. Viipymisaika vaihtelee reaktorikompostoreilla yhdestä kahteen viikkoon, mutta käytännössä kaikilla systeemeillä on neljästä kahteentoista viikkoon kestävä jälkikypsytyisaika. (Tchobanoglous 1993, 308.)

Tunnelikompostoinnilla tarkoitetaan suljettua tilaa, jossa säädetyissä olosuhteissa toteutetaan panoskompostointia. Kompostoitavan materiaalin tarvitsema hapen tarve täytetään koneellisesti, joko puhaltamalla ilmaa tai imemällä ilmaa massan läpi. Kompostoituminen on tasaisempaa ja nopeampaa kuin aumakompostointi, johtuen siitä, että olosuhteet voidaan säätää halutunkaltaisiksi. (Mikkola et al. 2002, 88.) Saksalainen BAV yhtiö on valmistanut tunnelireaktoreita. Tunnelireaktori asennetaan betonialustalle ja sen maksimikoko on 500 m<sup>3</sup>. Kompostoitava seos syötetään kuljetushihnalla syöttökammioon ja kolakuljettimella seos voidaan jakaa useampaan rinnakkaiseen tunnelireaktoriin. Syöttökammioista seos siirtyy hydraulisella puskulevyllä reaktoriin. Tunnelin poikkileikkaus on neliskulmainen ja sisäpinnat on sileät sekä maalattu korroosionesto-maalilla. Reaktoriin puhalletaan ilmaa tunnelin pohjalla olevista teräskansista ja reaktorin alkupäästä sekä imetään reaktorin loppupäästä. Ilmastus siis toimii reaktorin alkupäässä puhaltamalla ja loppupäässä imulla. (Hänninen et al. 1992, 50.)

Rumpureaktoreiden läpimitat vaihtelevat runsaasta metristä kolmeen metriin ja pituus runsaasta kahdesta metristä kahteentoista metriin kunnallisessa kiinteiden jätteiden käsittelylaitoksissa. Kallistuskulma on 0 – 16 astetta. Rummun pyörimisen vetomekanismina on hammasratas, ketju tai hihna. Rummut valmistetaan teräslevyistä, jotka asetetaan hieman kaltevaksi ja niitä pyöritetään hammasrattaasta. DANO yrityksen rumpuja on rakennettu jopa 40 m:n pituisiksi, mutta yleisin pituus on kuitenkin 27 m ja läpimitta 3,5 m. Kompostoitavien kiinteet jätteet ja lietteet syötetään rummun päästä sisään ja kosteus säädetään sopivaksi jäteliitteellä tai vedellä. Rumpuun voidaan puhaltaa ilmaa rummun manttelissa sijaitsevista suuttimista. Tällä ilmastuksella voidaan säädellä rummun eri osien lahotuslämpötilaa, joita mitataan alkuun, keskelle ja loppuun asennetuilla valvontasensoreilla. Rummun pyörimisellä aikaansaadaan kitkan avulla tapahtuva jätteiden hienontaminen sekä mahdollisimman tasainen ilmastus. Karkeat, ei kompostoituvat osat, erotetaan lahotettavasta aineksesta rummun päässä sijaitsevalla seulalla. Rumpureaktori voidaan myös eritsää lämpöhäviöiden estämiseksi. (Hänninen et al. 1992, 44 – 46.)

Tornireaktoreita on valmistanut englantilainen Peabody-Holmes, jonka valmistama kompostointitorni on 17 metriä korkea ja se on jaettu kuuteen kerrokseen, joista ylim-

pään syötetään kompostoitava jäte. Kompostoitava materiaali on ensimmäisessä kerroksessa päivän ja siirtyy tämän jälkeen seuraavaan kerrokseen. Viimeisestä kerroksesta voidaan kuudentena päivänä ottaa pois kompostoitunutta materiaalia. Kerroksissa on omat hitaasti pyörivät käsivarret, jotka ilmastavat sekä levittävät materiaalin. Tornin ylemmissä kerroksissa voidaan myös lisätä vettä tai jäteliettä. Tämän tapaisen käsittelyn etu on, että jokaisen kerroksen toimintaedellytyksiä voidaan vaihdella erikseen. (Hänninen et al. 1992, 51.)

Kaukaloreaktoreissa yhdistyvät aumakompostointi ja reaktorikompostointi. Kaukaloreaktoreihin kuuluu Royer Industries yhtiön kehittämä niin kutsuttu suljettu dynaaminen kompostointisysteemi, jonka voi suunnitella esimerkiksi vanhaan latoon tai vastaavaan paikkaan. Kompostoituminen tapahtuu noin kolme metriä leveissä kaukaloissa ja kääntö tapahtuu automaattisesti kaukalon reunoilla kiskoja pitkin kulkevalla kääntäjäkoneella. Ilmastus hoidetaan puhaltimilla, jotka pakottavat ilman kompostiin kaukaloiden pohjalla olevien ilmastusritilöiden läpi. Puhaltimen toimintaa ohjataan lämpötila-antureiden ja ajastimien avulla automaattisesti, siten että kompostointilämpötila pysyy sopivana. Kompostoinnissa muodostuneet kaasut nousevat kattoon ja ne johdetaan ulkoilmaan joko sellaisenaan tai suodattimen läpi. Minimiaika kypsän kompostin tuottamiseen tällä systeemillä on 21 päivää. Ebera- yhtiön kompostointisysteemi taas koostuu eräänlaisesta altaasta, jossa kompostoituminen tapahtuu. Sekoittaminen hoidetaan Eberan sekoitus-systeemillä (RPF), joka kykenee kulkemaan kompostointitankin päällä ristiin rastiin ja samalla sekoittaa sekä siirtää kompostia. Tällaisessa systeemissä kapasiteetti reaktoria kohden kasvaa ja tarvitaan vain yksi sekoitusyksikkö. (Hänninen et al. 1992, 42.)

Siiloreaktoriin syötettävä kompostoitava massa tulee kompostointireaktorin yläpäästä, josta se sitten vähitellen valuu omalla painollaan alas ja reaktorin pohjalta voidaan sitten lopulta poistaa kompostoitu tuote suoraan hyödynnettäväksi tai jälkikompostointiin. (Paatero et al. 1984, 97.) Muun muassa Fairfield niminen yhdysvaltalainen yhtiö on toimittanut siiloreaktoreita. Heidän siiloreaktorinsa yläosassa on pyörivä silta, johon on kiinnitetty ilmastuskairat. Syöttö tapahtuu varastosiilosta tornin yläpäähän, ilmastuskairat möyhentävät kompostoitavan materiaalin ja ilma pakotetaan puhaltimella torniin. (Hänninen et al. 1992, 48.)



Kompostointi reaktorissa mahdollistaa aumakompostointia paremmin optimiolosuhteiden käytön. Ilmastusta pystytään säätämään hyvin ja sekoittuminen on tehokasta sekä kompostointilaitos voidaan myös automatisoida. Kompostointiprosessi on nopeampi, kun sääolosuhteet eivät vaikuta oleellisesti kompostoitumisen tehokkuuteen sekä tuote on tasalaatuisempaa kuin aumakompostoinnista saatava. Haittapuolena reaktorikompostoinnissa ovat korkeat investointikustannukset sekä jälkikompostoinnin vaatima lisätilan tarve. Hyvänä puolena ovat aumakompostointia pienemmät työvoimakustannukset, sekä parempi tukiaineen vähentämisen mahdollisuus. (Mikkola et al. 2002, 88 – 89.) Reaktoreilla on lyhyen lahotusajan takia pienempi tilantarve kuin aumakompostoinnissa, murskatun jätteen stabiloituminen ja hygienisoituminen on yleensä luotettavampaa sekä pahosta hajuista ja suodosvesistä johtuva ympäristökuormitus on helpommin ratkaistavissa. Aumakompostoinnin hyvänä puolena ovat aloitusvaiheen pienet pääomakustannukset. (Hänninen et al. 1992, 28 – 29.) Aumakompostoinnin etuina ovat myös yksinkertainen tekniikka sekä joustavuus. Aumakompostoinnin haittapuolia ovat prosessin vaikeahko säädeltävyys, peittämisen vaatiman työn tarve, kuiviketarpeen suuruus ja ulkokompostoinnin sääriippuvuus. (Dredge et al. 2006, 168.)

Kompostointia käytetään myös maataloudessa muodostuvien lantojen käsittelyssä. Lantojen kompostoinnissa voidaan erottaa kuivalannan ja lietelannan kompostointi. Kuivalannan kompostoinnissa voidaan käyttää aumakompostointia tai erilaisia kompostointireaktoreita. Lietelantaa taas voidaan kompostoida ilmastamalla tai sekoittamalla siihen tarpeeksi kuivikkeita, jolloin saadaan kuivalantaa. Kompostoinnilla saadaan orgaaniseen ainekseen sitoutuneita ravinteita vapautettua ja lisäksi vähennetään lannan määrää. (Mikkola et al. 2002, 88 - 89.)

Kuivalantaa kompostoidessa käytetään kasoja tai aumoja, joiden korkeus on 1,5 – 2,5 m ja leveys 3,7 m. Kokoa rajoittavat käytettävissä olevat koneet sekä aerobisten olosuhteiden säilyminen. Kompostointi aiheuttaa ravinteiden, kuten typen, fosforin ja kaliumin häviöitä. Typestä pääosa haihtuu ammoniakkinä ilmaan ja häviöt kompostoinnissa ovat keskimäärin 34 – 36 %. Kaliumia poistuu ainoastaan valumavesien mukana ja kompostoinnin aikana liukoisen kaliumin häviöt ovat noin puolet kokonaismäärästä. Kattamalla

komposti voidaan estää sadevesien pääsy, mutta se ei estä kompostissa muodostunutta vettä menemästä maahan. Fosforipäästöt ovat pieniä riippumatta katteesta. Lantaa voidaan käsitellä myös tunnelikompostoinnilla tai rumpukompostoinnilla, joita käsiteltiin aiemmissa kappaleissa. Kompostoitu lanta viedään yleensä tunnelikompostointikäsitteilyn jälkeen vielä jälkikypsytykseen aumaan. Lämpimenoaika lannan rumpukompostoinnissa on määrästä ja pyörimissyklistä riippuen 7 – 12 vuorokautta. Rumpukompostoinnista ulos tuleva massa ei myöskään ole vielä valmista kompostia, vaan sitä täytyy vielä jälkikypsyttää aumassa. (Mikkola et al. 2002, 88.)

Lietelannan kompostoinnissa voidaan käyttää ilmastusta (nestekompostointi) tai lietteen seen voidaan sekoittaa tarpeeksi paljon tukiainetta, että siitä muodostuu kuivalantaa. Ilmastuksessa lietteen ominaisuuksia pyritään parantamaan kiintoainepitoisuutta lisäämättä. Ilmastuksessa hyödynnettävän lietteen kiintoainepitoisuuden yläraja on 8 – 10 %, johtuen ilmastin pumpun vaatimasta tehosta. (Joki-Tokola 1998, 9.) Ilmastamalla lietettä saadaan aikaan lämpöä tuottava hapellinen prosessi ja happea aineenvaihdunnassaan hyväksikäyttävät bakteerit ja sienet lisääntyvät. Näiden eliöiden toiminnan päätuotteena muodostuu hiilidioksidia, vettä ja lämpöä. (Mikkola et al. 2002, 89.) Ravinteiden osalta ilmastus aiheuttaa kokonaistypen häviöitä keskimäärin 35 %. Liukoisen typen pitoisuus vähenee kuitenkin samaan aikaan vain 2 %, mikä johtunee lietteen orgaanisesta aineksesta vapautuneista typpiyhdisteistä. (Joki-Tokola 1998, 10.)

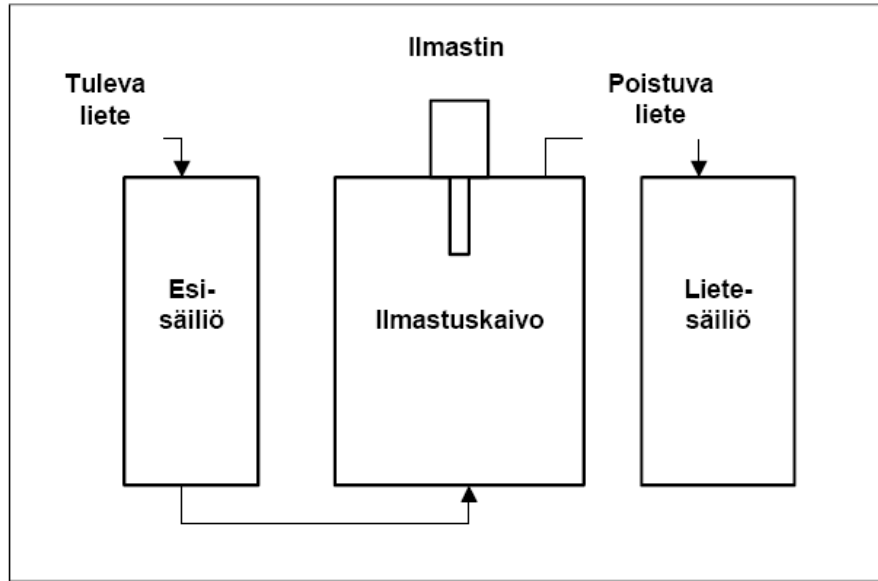
Ilmastuksen vaikutuksesta liete muuttuu juoksevammaksi, jolloin se imeytyy paremmin maahan. Ilmastuksella saadaan myös poistettua lietteen aiheuttamia hajuhaittoja, sillä ilmastettu liete on lähes hajutonta. Käytettäessä ilmastettua lietelantaa rikkakasvien siemenet ja useat patogeenit tuhoutuvat ja myös rehujen maittavuusongelmat vähenevät. (Dredge et al. 2006, 171.) Ilmastuksessa taudinaiheuttajien hävittämiseen riittää yleensä 30 – 50 °C lämpötila 3 – 5 viikon ajan (Dredge et al. 2006, 160). Ilmastuksen haittapuolina ovat hankinta- ja käyttökulut, vaahdonmuodostus sekä typen häviöt, jos ei käytetä biosuodatinta (Dredge et al. 2006, 171).

Lietelannan ilmastaminen onnistuu jatkuvatoimisesti sekä panosperiaatteella. Panosperiaatteella pienissä erissä ilmastettaessa tarvitaan erillinen säiliö tai liete on ilmastettava

yhtenä eränä varsinaisessa lietelantasäiliössä muutama viikko ennen lietteen levitystä. Etuna pienissä erissä ilmastuksessa on tuoreen lietteen lämmön hyödyntämismahdollisuus. Tällöin saavutetaan nopeammin haluttu lämpötila ja varmistetaan hygienisoituminen. (Mikkola et al. 2002, 90.) Eräilmastuksen huonona puolena on kuitenkin prosessin hidas käynnistyminen, joka on ongelmana etenkin keväällä lietteen ja ympäröivän ilman ollessa kylmää. Lisäksi käynnistäminen vaatisi tehokkaan sekoituksen, koska liete on osittain anaerobisessa tilassa. (Taavitsainen et al. 2002, 98.)

Jatkuvatoimisessa ilmastuksessa käytetään pienempää säiliötä kuin eräilmastuksessa. Tilavuudeltaan säiliö vastaa noin 5 – 10 vuorokauden lietetuotantoa ja liete johdetaan siihen tuoreeltaan tai päivittäin pienen keräilyaltaan kautta. Tuore liete tulisi johtaa säiliöön alakautta ja lietevirran pitäisi olla mahdollisimman tasainen. Ilmastettu lämpimämpi liete on kevyempää ja nousee säiliön pinnalle, josta se voidaan johtaa varastosäiliöön. (Taavitsainen et al. 2002, 98.) Kuvassa 10 on esitetty lietteen ilmastuksen toimintaperiaate.

Ilmastuksen tapa valitaan halutun tavoitteen mukaisesti. Hyvää hygieniaa haluttaessa on lämpötila nostettava riittävän korkeaksi tarpeeksi pitkäksi aikaa. Pahanhajuisten ja myrkyllisten yhdisteiden poistossa riittää alhaisemmat lämpötilat ja lyhyemmät käsittelyajat. Eri ilmastusvaihtoehtoja ovat kylmä- eli viileäilmastus, lämminilmastus säiliössä tai kuumailmastus erillisessä umpinaisessa säiliössä. Kylmäilmastuksessa ilmastus tapahtuu päivittäin rajoitettuna aikana, esimerkiksi kaksi tuntia jatkuen 5 – 10 vuorokautta. Lämpötilan nousu on vähäistä 0,5 – 5 °C. Lämminilmastuksessa käsitellään 3 – 6 viikkoa ja pidetään lämpötila noin 3 viikon ajan 25 – 30 °C:ssa. Kuumailmastuksessa lämpötila pidetään 45 °C:ssa ja viipymä on jatkuvatoimisena noin 7 vuorokautta. Ilmastintyyppinä ovat erilaiset ejektorij- ja potkuri-ilmastimet sekä keskipakoperiaatteella toimivat ilmastimet. Parhaiten toimiviksi ovat osoittautuneet muun muassa potkuri-ilmastimet, uppopumppu ja Skjelhaugen-ilmastin. (Dredge et al. 2006, 173 – 175.)



**Kuva 10.** Lietteen ilmastuksen periaatekuva (Taavitsainen et al. 2002, 98).

## 4.4 Poltto

Poltto on termistä käsittelyä, jossa materiaalia hyödynnetään energiana suoraan kemiallisessa palamisreaktiossa. Polttoa tarkastellaan lähinnä maatalouden lietteiden ja lantojen, peltobiomassan, järviruo'on sekä metsäbiomassan kannalta. Tässä kappaleessa pyritään käsittelemään polttotekniikkaa juuri kyseisten materiaalien kannalta ja samalla tuodaan esiin niiden polttoon liittyviä erityispiirteitä.

### 4.4.1 Lietteiden ja lantojen poltto

Jätevesiliete on suhteellisen homogeenista pumpattavaa massaa, jolla on suuri vesipitoisuus. Liete koostuu pääasiallisesti hiilestä, vedystä ja hapesta, mutta siinä on myös huomattavia osuuksia fosforia ja typpeä. Lietteiden kiintoainepitoisuus voi vaihdella välillä 1 – 8 % ja ennen kuin niiden polttoa pystytään harkitsemaan, tulisi ne kuivata vähintään 20 % kiintoainepitoisuuteen tai kuivemmaksi. Veden jäähdyttävä vaikutus, mikä hidastaa palamisprosessia huomattavasti, on tärkein suunnitteluparametri näiden kosteiden materiaalien poltossa. Lietteen ulkopinta kuivuu ja hiiltyy kuumuudessa muo-

dostaen eristävän kerroksen, joka vähentää lämmön siirtymistä lietteen sisälle. Lietteeseen sisältämä suuren vesimäärän haihduttamisen vaatima energiamäärä lisää kuivumiseen ja palamiseen vaadittavaa aikaa. Näiden ilmiöiden takia lietteen polttamisessa käytettävien laitteiden pitää kuluttaa eristävä kerros, häiritä sen muodostumista tai taata riittävä viivymäaika. (Niessen 2002, 375 – 376.)

Lietteeseen polton etuina ovat hajuongelmien välttäminen, myrkyllisten orgaanisten yhdisteiden tuhoutuminen, lietteen tilavuuden pieneneminen ja lietteen energiasisällön hyödyntäminen. Lietteeseen tilavuus on polton jälkeen suuruusluokkaa 10 % siitä, mikä se oli lietteeseen kuivauksen jälkeen. Lietteeseen lämpöarvo on lisäksi lähellä ruskohiiltä, joten poltettaessa pystytään tämä energia hyödyntämään. Lietteeseen poltto ei kuitenkaan poista kokonaan kaatopaikkasijoituksen tarvetta, sillä noin 30 % kiintoaineesta jää tuhkana jäljelle. Tämä tuhka viedään yleensä kaatopaikalle ja joissakin tapauksissa se on myrkyllistä metallipitoisuutensa takia. Lietteeseen polttamisen pääongelmina ovat apupolttoaineen tarve, korkeat investointikustannukset ja suuret kaasumaisten päästöjen puhdistuslaitteet. (Fytili ja Zabaniotou 2008, 124 – 126.)

Yleisimmin käytetyt lietteenpolttotekniikat ovat leijupetikattilat ja tässä työssä nimellä monikerrosuuni (multiple heart furnace, MHF) esitetty tekniikka. Joskus jätevesilietteeseen poltossa käytetään myös pyörivää rumpu-uunia. Monet kiinteiden jätteiden poltossa esiintyvät varastointiin ja syöttöön liittyvät ongelmat yksinkertaistuvat lietettä poltettaessa, koska lietettä voidaan pumpata. Lietteeseen virtausominaisuudet ja tuhkapartikkeleiden pieni koko aiheuttavat sen, että arinatyyppisiä kattiloita ei voida käyttää. Tämän takia liete poltetaan yleensä kerrospoltossa tai leijutuksessa. (Niessen 2002, 376.) Monikerrosuuni ja leijupetikattila eroavat siinä, että leijupetikattilalla voidaan käsitellä mekaanisesti kuitattua ja kuivempaa lietettä, kun monikerrosuunilla voidaan käsitellä vain mekaanisesti kuivattua lietettä. (Fytili ja Zabaniotou 2008, 126.)

Monikerrosuunit ovat yhdysvalloissa käytetyin tekniikka lietteeseen poltossa. Monikerrosuuni on yleensä 8 metriä korkea ja siinä on 14 kerrosta (hearth). (Werther ja Ogada 1999, 67.) Keskellä uunia sijaitsee ontto valurauta tai teräs akseli, joka pyörii 0,5 – 1,5 kierrosta minuutissa. Akseliin on kiinnitetty kahdesta neljään haaraa jokaisessa kerrok-

sessä. Lieke tulee uuniin ylimpään kerrokseen ja kun akseli pyörii, lieke kulkeutuu keskustaa tai ulkoseinää kohden, josta se tippuu alemmalle kerrokselle aukkojen kautta. Haarat on päällystetty kuumuutta kestäväällä materiaalilla ja lisäksi niissä on ilmajäähdytys. Haarojen hämmentävän vaikutuksen tarkoitus ei ole vain siirtää lietettä, vaan se myös leikata ja rikkoa pintakerros, kun lieke kulkee kuivumis-, palamis- ja jäähtymisosastojen läpi. Useissa keskivaiheen kerroksissa on polttimet, joissa poltetaan maakaasua tai öljyä. Näiden poltinten mukana tuleva ilmaylimäärä yleensä takaa lietteen polttamiseen tarvittavan ilmamäärän. (Niessen 2002, 377 – 380.)

Monikerrosuunien etuna on se, että kuumat savukaasut joutuvat suoraan kosketuksiin lietteen kanssa (Werther ja Ogada 1999, 67). Monikerrosuunit ovat suuria, joten niillä on huomattava terminen inertia, mikä auttaa syöttövirran vaihteluiden kestävyudessa. Tämän järjestelmän ongelmana ovat kuitenkin ympäristöongelmat ja kuonan muodostuminen sekä monimutkaisuus ja rakennelman herkkyys. Kuonaa alkaa muodostua, mikäli lämpötila ylittää tuhkan pehmenemispisteen lämpötilan. Ongelma alkaa muodostua, mikäli lämpötila kohoaa yli 1000 °C. (Niessen 2002, 385 - 386.) Lisäksi monikerrosuunien haittapuolena ovat tarvittavan lisäpolttoaineen kustannukset (Werther ja Ogada 1999, 67).

Ylimääräisen ilman pääseminen alipaineiseen kattilaan jäähdyttävät uunia, lisäävät polttoainekulutusta sekä lisäävät savukaasupuhaltimen kuormitusta. Korkeapaineisia mäntäpumppuja käyttämällä on saavutettu tasainen syöttöaste, ilman että ylimääräistä ilmaa pääsisi uuniin. Tällä pystytään saamaan palamista tasapainoisemmaksi ja parannetaan ympäristöpäästöjä sekä polttoainetaloutta. (Niessen 2002, 385 - 386.)

Lietteen poltossakin käytetyissä leijupolttokattiloissa korkeapaineista ilmaa pakotetaan hiekkapedin läpi ja hiekkapartikkelit alkavat leijua ja hiekkapedin ominaisuudet muistuttavat turbulენტtista nestettä. Hiekkakerroksella on havaittavissa selvä raja ja pedin läpi tuleva ilma muodostaa havaittavia kaasukuplia. Pedin yläpuolella on vapaa tila, joka antaa 3 – 4 sekunnin viipymäajan palavien materiaalien loppuun palamiselle. Tiettyllä hetkellä vain pieni osa pedin materiaalista on palavaa materiaali. Pedin suuri massa edesauttaa lämmön säilymisessä ja tämän takia kattila kestää syöttövirran vaihteluita.

Petihiekka hioo petimateriaalin sekaan syötettävää lietettä. Lietepartikkelit kuivuvat ja palavat nopeasti vapauttaen suurimman osan polttoaineen sisältämästä energiastaan petimateriaalin sisällä. Lietteiden poltossa ei yleensä käytetä kiertoleijupetikattiloita. (Niessen 2002, 387 - 389.)

Perinteinen leijupetikattila on pystysuorassa oleva sylinterinmuotoinen tulenkestävällä materiaalilla varustettu kattila, jossa on alhaalla arina kannattamassa petihiekkaa. Paikallaan olevan hiekkapedin korkeus on yleensä välillä 1,9 – 1,2 m:ä. Käytetyt kaasun nopeudet vaihtelevat välillä 0,5 – 1,0 m/s:a, mutta uudemmista laitteistoista on käytetty myös nopeutta 1,3 m/s:a. Yksi käyttökelpoisimmista leijupetikattilan ominaisuuksista johtuu sen yksinkertaisesta geometriasta. Tulenkestävän materiaalin konstruktio voidaan tehdä hyvin yksinkertaiseksi. Kattila voidaan siis sulkea lyhyiksi tai pitkiksi ajoiksi ja lämmön siirtyminen ympäristöön on hidasta. Uudelleen käynnistäminen voidaan siis tehdä vähäisellä apupolttoainemäärällä. Lietteiden polton apupolttoaineena käytetään kevytöljyä ja hiiltä. Lietteiden poltto voidaan suorittaa suoraan hiekkapetiin tai se voidaan syöttää katossa tai seinässä olevista syöttölaitteista. (Niessen 2002, 391 – 401.)

Lantaa voidaan myös hyödyntää energiana pellolle levityksen ohella. Eläinten lantaa voidaan hyödyntää energiana kaasutuksessa, leijupetipoltossa ja kiertoleijupoltossa. Osa näistä tekniikoista on onnistunut teknisesti vain osittain. Osittainen onnistuminen johtuu pääasiassa siitä, että on käytetty biomassaa ainoana polttoaineena, vaikka niiden ominaisuudet vaihtelevat paljon. Biomassan korkea kosteus- ja tuhkapitoisuus voi aiheuttaa syttymis- ja palamisongelmia. Tuhkan sulamislämpötila voi myös olla alhainen ja tällöin aiheutuu likaantumista ja kuonaantumista. Alhaisen lämpöarvon ja polttoliekin epästabiilisuuden takia yhteispoltto onkin tullut houkuttelevammaksi. (Sami et al. 2001, 191; Annamalai et al 2003, 3.) Lehmien lantaa voitaisiin jauhaa, sekoittaa se hiilen kanssa ja polttaa se hiilen mukana olemassa olevissa hiilipölykattiloissa (Sweeten et al. 2003, 1167). Hiilen ja lehmänlannan sekoitussuhteena voidaan käyttää esimerkiksi 90:10 (Annamalai et al 2003,11).

Hiilen sekoittaminen biomassaan vähentää liekin stabiilisuuden ongelmia ja vähentää korroosivaikutusta. Yhteispoltolla on myös suuri mahdollisuus kaupallistumiseen. Hii-

len ja biomassan sekoituksen synergiaedut voivat myös johtaa muiden päästöjen vähenemiseen. Esimerkiksi hiilivety (HC) reagoi typpioksidien ( $\text{NO}_x$ ) kanssa ja tuottaa molekylääristä typpeä ( $\text{N}_2$ ). Tämän takia biomassa on potentiaalinen jälkipolttoaine. Toinen mahdollinen etu lannan poltosta hiilen kanssa on ammoniakkin aiheuttama typen oksidien katalyyttinen pelkistys. (Sami 2001, 191.) Jälkipoltolla tarkoitetaan sitä, että kattilaan lisätään polttoainetta varsinaisen palamiskammion jälkeen polttoainerikkaan vyöhykkeen luomiseksi. Typen oksidit vähenevät reagoidessaan hiilivetyjen kanssa. Jälkipolttoalueen jälkeen lisätään ilmaa täydellisen palamisen aikaansaamiseksi. (Annamalai et al 2003, 5.)

Jätteen hävittämisen lisäksi lannan poltosta hiilen kanssa on etuina muun muassa energian muuntaminen hyödylliseen muotoon, fossiilisista polttoaineista peräisin olevan hiilidioksidin väheneminen, typenoksidipäästöjen väheneminen, polttoainekustannusten väheneminen, mahdollinen käyttö jälkipolttoaineena sekä hygieenisyyden paraneminen (Annamalai et al 2003, 4).

Yhteispoltto vaatii korkean tuhkapitoisuuden ja kosteuden omaavan kuitumaisen biomassan jauhamista lähes samaan hienousasteeseen kuin hiili. Kaasutuksessa ei tarvita jauhamista ja saavutettu kaasu voidaan käyttää joko kattilassa tai kaasuturbiinissa. Hiilen ja biomassan kaasutusta on tutkittu paljon, mutta karjan ja kanan lannan kaasutuksesta kiinteäpetikaasuttimessa on vähän kirjallisuutta. (Annamalai et al 2003, 5 – 6.)

Siipikarjan lannan poltossa on englantilainen Fibrowatt käyttänyt liikkuvalla arinalla varustettua kattilaa. Tämä tekniikka on osoittautunut luotettavaksi tekniikaksi muuttaa siipikarjan lantaa energiaksi. Leijupetiteknikalla voidaan siipikarjan lantaa hyödyntää lähellä missä se on tuotettu käyttämällä sitä yksinään tai muiden teollisuusjätteiden kanssa lämmön ja sähkön tuottamiseen. Siipikarjan lannan käytön etuina ovat typen ja rikin kaltaisten yhdisteiden pienet pitoisuudet palamiskaasuissa, mikä johtaa vähäisiin typpioksidien ja rikkidioksidin päästöihin. Leijupetiteknikan etuna on lisäksi kyky hyödyntää korkean tuhka- ja kosteuspitoisuuden omaavia polttoaineita, vähäiset polttoaineen valmistelun kustannukset ja tuhkan keräämisen joustavuus. (Kelleher et al. 2002, 35.)



Süipikarjan lannalla on alhainen tuhkan sulamislämpötila, mikä voi aiheuttaa ongelmia perinteisiä arinakattiloita käytettäessä. Parametrit kuten palamislämpötila, ilman määrä ja kosteuspitoisuus täytyy pitää optimaalisten rajojen sisällä, jotta palaminen toimisi tehokkaasti. Prosessista jää jäljelle tuhka, jossa on suurin osa fosforista ja kali. Polttoaineen sisältämä typpi häviää poltossa savukaasujen mukana. Tuhka on tasapainoista, steriiliä, helpommin käsiteltävää, kuljeteltavaa ja markkinoitavampaa orgaanisena lannoitteena kuin perinteinen kanan lanta. (Kelleher et al. 2002, 32.)

Hevosen lantaa voidaan periaatteessa polttaa joko kiinteän polttoaineen kattilassa tai käyttää sitä kaasuttimen polttoaineena. Hevostalleilta muodostuvaa purulantaseosta on poltettu muun muassa hakkeen kanssa ja kokemusten perusteella ei ole havaittu suurempia ongelmia. Lannan polttoa on myös tutkittu Suomessa, mutta Suomessa sen poltto vaatisi jätteenpoltoasetuksen mukaisen polttolaitoksen. Tällaisissa polttolaitoksissa pitää olla jatkuvatoiminen savukaasujen puhdistus sekä päästömittaukset, joten kustannukset ovat liikaa talliyrittäjälle. (Biohalo 2007, 37 – 38.)

Hevosenlantaa pitäisi kuitenkin pyrkiä muiden lantojen tavoin jätelain hengen mukaisesti hyödyntämään ensisijaisesti materiaalina ja vasta toissijaisesti energiana. Lannoite tai maanparannuskäyttöä tulisi täten suosia. Hevosenlanta sisältää kuitenkin paljon pölyä ja sen kuiva-ainepitoisuus on suuri, kuivalannalla noin 30 – 40 %. Sitä ei ole täten helppo saada hyötykäyttöön maanviljelyyn. Polton kannalta taas hevosenlanta on esimerkiksi yhdyskuntajätteeseen verrattuna tasalaatuinen tuote, joka ei sisällä ympäristölle haitallisia kemikaaleja. Lannan polttoa kritisoidaan myös sillä että osa ravinteista eli typpi- ja rikkiyhdisteet häviävät poltossa. Tuhkaa pystyttäisiin kuitenkin käyttämään lannoitteena, mutta typpi pitäisi korvata typpilannoitteilla. Polttoa harkitessa pitää myös miettiä, kuinka ekologista ja taloudellista on kuljettaa lantaa pitkiä matkoja polttolaitokselle. Paikan päällä hyödyntäminen on varmasti ekologisempi vaihtoehto kuin lähialueella polttaminen. Mikäli lantaa syntyy paljon ja sitä joudutaan kuljettamaan jo ennestään muualle voisi paikan päällä tai polttolaitoksella tapahtuva poltto olla järkevä vaihtoehto. (Biohalo 2007, 39.)

#### 4.4.2 Metsäbiomassojen poltto

Metsäbiomassojen poltossa rajoitetaan lähinnä metsähakkeen hyödyntämiseen. Metsähaketta pystytään korjaamaan nuorten metsien ja varttuneiden taimikoiden kunnostuskohteilta sekä uudistushakkuualoilta. Nuorten metsien ja varttuneiden taimikoiden tapauksessa puhutaan myös pienpuuhakkeesta. Uudistusaloilta kerättävästä hakkuutähteestä käytetään myös nimitystä latvusmassa ja käytännössä myös irtorisu. Harvennuksesta ei kannata hankkia hakkuutähteitä eikä hakettaa suuressa mittakaavassa, koska kertymä on vähäinen. (Lauhanen ja Laurila 2007, 14.)

Kannot ja juurakot sopivat myös metsäenergian lähteiksi. Juurakko käsittää rungon kaatoileikkauksen alapuolelle jäävän kannon, sen maanalaisen jatkeen sekä sivujuuret. Juurakoita ei kivien, hiekan ja muiden epäpuhtauksien takia voi hakettaa, vaan ne murskaataan kantomurskeeksi. Hehtaarilta voidaan saada jopa 200 MWh kanto- ja juurakkoenergiaa, mutta käytännössä se jää noin 120 – 140 MWh hehtaaria kohden. Kannot voidaan nostaa kaivinkoneeseen kytketyllä muokkaimella. Suuret kannot paloitellaan osiin ja siirretään kuivumaan kasaan. Kantojen korjuulla on metsähygieenisia etuja, sillä se auttaa maanousemasiemen ja tukkimiehintäin torjunnassa. Kantojen korjuun aiheuttama maanmuokkaus myös vähentää uudistamiskustannuksia. Kantojen metsäkuljetus hoituu metsätraktorilla ja kaukokuljetus umpiautolla tai junalla. (Lauhanen ja Laurila 2007, 20.)

Metsähakkeen korjuumenetelmiä on haketuspaikan mukaan keskitetty ja hajautettu haketus. Käyttöpaikalle tai terminaaliin keskitetyllä haketuksella mahdollistetaan suuret vuosituotokset, korkeat koneiden käyttöasteet ja alemmat haketuskustannukset. Ongelmana tässä haketustavassa on se, että käsittelemättömän latvusmassan, kokopuun sekä kanto- ja juuripuun kuormakoot jäävät pieniksi, mikä aiheuttaa kuljetuskustannusten kasvua pitkillä matkoilla. Kustannuksia voidaan vähentää tiivistämällä latvusmassaa risutukeiksi. Hajautettu hakkeen tuotanto tarkoittaa välivarastolla tai palstalla tapahtuvaa haketusta. Välivarastohaketuksessa haketus tapahtuu suoraan hakeauton. Hakkurin ja hakeauton toiminnan ovat linkittyneinä toisiinsa ja odotusaikoja tulee kuljetusmatkoista riippuen jommallekummalle. Välivarastohaketuksessa auton kantavuus ja kuor-

makoko pystytään hyödyntämään paremmin ja menetelmä sopii myös pidemmille kaukokuljetusmatkoille. Välivarastohaketus on hakkeen tuotannon perusratkaisu. Palstahaketuksessa haketuksen ja metsäkuljetuksen tekee sama kone. Hakkeen tuotantomäärä on tällöin pieni ja palstahaketuksella on merkitystä korkeintaan metsähakkeen paikallisessa tuotannossa. (Kuusinen ja Ilvesniemi (toim.) 2008, 10 – 11.)

Metsäenergian varastointitavoista polttohakkeen pitkäaikainen varastointi aiheuttaa merkittäviä kuiva-ainetappioita, energiasisällön alenemista ja jopa terveyshaittoja. Tuoreen metsäbiomassan haketus ja murskaus varastoon luo suotuisat olosuhteet puusolukkoa hajottavalle mikrobitoiminnalle. Kokopuun, hakkuutähteen tai kantojen varastointi on tämän takia polttohakkeen pitkäaikaiseen varastointiin verrattuna järkevämpää. Hakkuutähteen varastoinnissa on järkevää palstalla kesän yli varastointi ja korjuu ennen syysateita. Tällöin neulasista varisee 75 % pois ja ne jäävät kasvupaikalle metsän ravinnekierron osaksi eivätkä neulasten sisältämät kloridi ja alkalimetallit aiheuta korroosio-ongelmia polttokattiloissa. Energiapuun kannattaa varastoida korkeisiin peitettyihin kasoihin, jolloin kosteuskin saadaan alenemaan. Yhden kesän varastointi riittää, eikä toisen ja kolmannen kesän välillä enää tapahdu juurikaan kosteuden vähenemistä. Varastopaikat kannattaa olla tienvarressa, jotta pystytään varmistamaan haketuskaluston, murskainten ja kaukokuljetusten toimivuus. Energiapuun kaukokuljetuksesta suurin osa tapahtuu autokalustolla maanteitse ja autokuljetusta tarvitaan myös rautatie- ja vesikuljetuksen alku- ja loppupäässä. Energiapuukuljetuksissa ongelmana on, että kuljetettava materiaali vaatii paljon tilaa painoonsa nähden. (Lauhanen ja Laurila 2007, 22 – 23.)

Metsähakkeen energiakäyttö on lisääntynyt 2000- luvulla ja vuonna 2005 metsähaketta käytettiin 3 miljoonaa kuutiometriä. Eniten on lisääntynyt hakkuutähdehakkeen käyttö. Suurin osa (lähes 90 %) metsähakkeesta käytetään kaupallisessa energiantuotannossa ja suurimpana käyttökohteena on käyttö sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa. Päästökauppatilanteessa metsähakkeella korvataan ensisijaisesti turvetta, vaikka ne ovat myös toisiaan täydentäviä polttoaineita. Pelkkää puuta polttavasta voimalaitoksesta ei voida rakentaa kovin suurta, sillä taloudellinen kuljetusmatka on lyhyt. Pelkkää puuta polttamalla myös kattilan korroosio-ongelmat ovat merkittäviä. Turpeen taloudellinen kuljetusmatka on pidempi, joten yhteispolttolaitoksen koko voi olla suurempi. Turpeen käy-

töllä voidaan vähentää myös korroosio-ongelmia. Rikki- ja hiilidioksidipäästötkin ovat pienempiä, kuin jos poltettaisiin pelkkää turvetta. (Vasara 2006, 9 – 17.)

Hakkuutähte soveltuu kosteana suurten monipolttoainelaitosten käyttöön, mikäli laitos on suunniteltu märälle puupolttoaineelle. Polttoturpeelle mitoitettussa laitoksessa ei voida polttaa pelkästään puuta, koska puulla ei voida saavuttaa kattilassa riittäviä tehoja. Pienemmillä laitoksilla hakkuutähteen käyttö onnistuu yleensä vain kesäaikana, jolloin ei ole jäätymisvaaraa ja laitosta käytetään vain osateholla. (Alakangas 2000, 57.)

Tuhkan koostumuksella ja ominaisuuksilla on vaikutusta metsähakkeen poltto-ominaisuuksiin. Koostumus riippuu hakkeen sisältämistä puulajeista ja puun eri osista. Ominaisuudet vaihtelevat sen mukaan onko mukana puun ylimmät hienot osat sekä onko kyseessä neulaset sisältävä viherhake vai ruskea hake, josta neulaset sekä osa hienoimmista oksista on karissut. Ylimmät osat ja kuori nimittäin sisältävät runsaammin tuhkaa ja niihin on konsentroitunut ravinteita ja hivenaineita runsaammin kuin runkopuuhun. (Orjala ja Ingalsuo 2001.) Ravinnepitoisuudella on tuhkan sulamislämpötilaa alentava vaikutus. Tuhkan sulamiskäyttäytymisellä on erityisesti silloin vaikutusta, mikäli tuhkan sulaminen voi estää esimerkiksi palamisilman kulkeutumisen. (Alakangas 2000, 57.)

Puun poltossa tuhkan käyttäytymisestä aiheutuvat ajonaikaiset ongelmat ja lisääntynyt huollon tarve voivat lisätä energian tuotannon kustannuksia merkittävästi. Lisäksi nuohous- ja puhdistuskerrat lisääntyvät ja pahimmassa tapauksessa tulistimet joudutaan uusimaan sekä kattilan hyötysuhde huononee eristävien tuhkerrostumien muodostuessa lämpöpinnoille. Omakäyttötehon tarve kasvaa ja puupolttoaineet lisäävät varastointitarvetta. Leijupoltossa myös petihiekan vaihtotiheys lisääntyy. (Alakangas ja Holviala (toim.) 2004, 140.)

Poltto-ominaisuuksien kannalta on merkitystä poltetaanko puuta yksin vai käytetäänkö seospoltoa rikki- ja klooripitoisten polttoaineiden kanssa. Metsähakkeen pienikin klooripitoisuus nimittäin aiheuttaa haitallisia alkalikloridikerrostumia. Poltettaessa esimerkiksi rikki- ja klooripitoisen turpeen kanssa ei vastaavaa kerrostumaa synny, koska kloori vapautuu savukaa-

sun mukana kloorivetynä. Myös päästöjen hallinnassa saavutetaan taloudellisia etuja. Esimerkiksi typen oksidien ja rikkidioksidin ominaispäästöt voivat vähetä ja tällöin rikinsidontaan tarvittava kalkkimäärä vähenee, puun alkalisen tuhkan rikinsidontaa tehostavan vaikutuksen takia. (Alakangas ja Holviala (toim.) 2004, 140.) Lämpölaitoksissa sekä metsäteollisuuden ja yhdyskuntien voimalaitoksissa metsähake poltetaan yleensä tyypillisesti seoksena muiden polttoaineiden kuten turpeen, metsäteollisuuden puu- ja kuorijätteen, lietteiden sekä hiilen kanssa (Orjala ja Ingalsuo 2001).

VTT on selvittänyt leijupetikattiloiden puun polton käyttökokemuksia ja ongelmia lämpöteholtaan 100 – 300 MW:n kokoisilta puuta polttoaineena käytäviltä laitoksilta. Puunpolto on voimalaitoksilla aiheuttanut polttoaineen käsittelylaitteiden tukkeutumista, tulipesän lämpötilan laskua, tuhkan ominaisuuksien muuttumista, lämpöpintojen kerrostumien lisääntymistä, savukaasupuhaltimen kapasiteetin vajaavaisuutta ja petiin liittyviä ongelmia, kuten sintraantumista. Lisäksi kattilaseisokkien työmäärä on lisääntynyt, huipputehon saavuttaminen on vaikeutunut ja polttoaineen tasaisen jakautumisen on saavuttanut vain harvat toimijat. Toisaalta on myös huomattu edellä mainitut puun polton edut. (Alakangas ja Holviala (toim.) 2004, 142.)

VTT on myös tutkimuksessaan selvittänyt puupolttoaineiden kriittisiä ominaisuuksia voimalaitoksen käytettävyyden kannalta muun muassa pilotti-kokeilla. Tällaisia ominaisuuksia huomattiin olevan tuhkapitoisuus, tuhkan sulamislämpötila ja koostumus. Tuhkan koostumuksella, esimerkiksi alkali-, fosfori-, kloori-, pii ja kalsiumpitoisuudella sekä yhdistekoostumuksella, on vaikutusta sulamiskäyttäytymiseen, sulanmuodostukseen reaktioiden kautta ja sitä kautta kattilan lämpöpintojen likaantumiseen sekä materiaalien kestoon. Leijupedin agglomeroimista aiheuttavana aineena löytyy petipartikkeleista kalsium-, kalium- ja piiyhdisteitä eli yhteenkiinnittävänä aineena toimi silikaatiseos. Polttoaineseoksista johtuvia lämmönsiirtopintojen likaantumisongelmia voidaan välttää pääasiallisesti polttoaineseoksen hallinnalla ja kattilaprosessin ohjauksella. (Alakangas ja Holviala (toim.) 2004, 151 – 152.)

Leijupedin palamislämpötilat ovat alhaisia, mutta tuhkan epätoivottu käyttäytyminen aiheuttaa silti monia ongelmia biopolttoaineita käytettäessä. Tyypillisimpiä näistä on

alkalimetallien taipumus muodostaa matalassa lämpötilassa pehmeneviä ja sulavia yhdisteitä, jotka kriittisinä pitoisuuksina aiheuttavat pedin agglomeroitumista ja kerrostumien muodostumista lämpöpinnoille. Puupolttoaineiden seassa olisikin hyvä polttaa 10 – 30 % turvetta tai vastaavassa suhteessa muuta rikkiä sisältävää polttoainetta, jotta pedin agglomeroitumisongelmia ja alkalikloridien muodostumista tulistinpinnoille saadaan vähennettyä. Metsähakkeen poltossa turpeen osuuden pitäisi olla vielä korkeampi eli 30 – 40 %. (Orjala ja Ingalsuo 2001.)

#### **4.4.3 Peltobiomassojen ja järviruo'on poltto**

Poltoon menevillä peltobiomassoilla tarkoitetaan ruokohelpeä, viljojen olkia, öljykasveja sekä energiapajua. Ruokohelpiviljelmiä oli Suomessa kesän 2004 lopussa hieman alle 5 000 hehtaaria. (Itä-Suomen Energiatoimisto 2004, 11). Vuonna 2008 ruokohelven viljelypinta-ala oli jo n. 20 000 ha (Lötjönen 2007, 9). Kiinnostuksen lisääntyminen ruokohelpeä kohtaan selittyy osittain sillä, että se on uusiutuva ja on täten edullista päästökaupan kannalta, koska sen päästökerroin lasketaan nollassa. (Paappanen et al. 2008, 14.)

Pisimpään ruokohelpeä on vienyt käytäntöön Vapo Oy, joka on viljellyt vuodesta 1994 lähtien ruokohelpeä turvetuotantoalueillaan jälkihoitona. Voimayhtiöistä Pohjolan Voima on lisännyt ruokohelven käyttöä laitoksillaan ja on täten edistänyt peltoviljelmien perustamista Pohjanmaalla. Korjuu-, toimitus- ja käyttöketjussa on kuitenkin vielä puutteita lyhyestä kokemuksesta johtuen. Tästä aiheutuu suuria korjuutappioita, pieniä kuormakokoja, paalien murskauksen ongelmia pitkien silppujen, paalinarujen ja pölyämisen takia. Voimalaitoksella tapahtuva murskaus on myös kallista. Myös helven kattiloita likaavasta ja syövyttävästä vaikutuksesta on oltu huolissaan. Nämä tekijät rajoittavat helven käyttöä sekä teknisessä että taloudellisessa mielessä. Nämä ongelmat voidaan kuitenkin ratkaista korjuu- ja toimitusketjua tai voimalaitoksen tekniikkaa kehittämällä. (Paappanen et al. 2008, 14.)

Korjuutappioita on mahdollista alentaa 20 – 30 %:iin käyttämällä lautasniittokoneita tai niittomurskainta, jonka murskainosa on säädetty väljäksi ja kierrosnopeutta alennettu.

Lisäksi riittävän pieni leikkuukorkeus ja teräkulman säätäminen mahdollisimman jyrkäksi ovat tärkeitä, mutta rikkoontumisriski pitää muistaa huomioida. Swather- niitto-koneella pystytään saavuttamaan pienet korjuutappiot, mutta kyseisiä koneita ei juuri ole Suomessa. Ruokohelvi voidaan korjata pellolta irtokorjuuna tai paalauksen avulla. Kokonaistyöaika näillä menetelmillä hehtaaria kohden on likimäärin sama, kun otetaan huomioon kaikki työvaiheet niitosta helven siirtoon pellonreunalle varastoon. (Paappanen et al. 2008, 3.)

Kaukokuljetuksessa käytettyjen pyöröpaalien kuormakoot ovat 13 – 15 tonnia ja suurkanttipaalien 20 – 21 tonnia. Kaukokuljetuskustannusten alentaminen onnistuu helpoiten vähentämällä pyöröpaalierien välisiä tiheyseroja, jotka voivat olla kymmeniä prosentteja ja maksimissaan jopa kaksinkertaisia. Konemerkki- tai malli ei näytä vaikuttavan tiheyseroihin, joten urakoitsijan ohjeistus ja palkitseminen tiiviiden paalien teosta on tärkeää. Kuljetuksessa tulisi käyttää suuria rekka-autoja. Näillä keinoilla voidaan kuljetuskustannuksia alentaa merkittävästi. Helpeä voidaan myös kuljettaa seoskuljetuksena esimerkiksi turpeeseen sekoitettuna. Helven kuljetuskustannus turpeen kanssa seoskuljetuksena on tyypilliselle turverekalle hieman kalliimpaa kuin paalikuljetus. Helven osuuden pienentämisellä voidaan alentaa kustannuksia. Suurimpia turverekkoja käyttämällä voidaan myös seoskustannusten kustannuksia vähentää merkittävästi. Kehittämällä kuljetustekniikoita, voidaan paalien sekä seoskuljetuksen kustannuksia alentaa. Paalien kuljetukseen perustuva systeemi on kuitenkin kokonaistaloudellisesti tarkasteltuna hieman edullisempi, joten tulevaisuudessa kannattaakin ehkä kehittää voimaitosten tekniikkaa siten, että se mahdollistaa paalien kuljetuksen. (Paappanen et al. 2008, 3.)

Helven murskaukseen teknisesti hyvin soveltuvia murskaimia ovat järeät kaukalo- ja vasaramurskaimet. Näille laitteille eivät paalinarut muodosta ongelmaa ja silpusta tulee hyvin lyhyttä, mutta haittapuolena ovat pölyäminen sekä korkeahkot kustannukset. Jotkut mallit soveltuvat puun ja helven samanaikaiseen murskaamiseen, jolloin saadaan samalla aikaan valmis seos. Maatalouden kokoluokan paalisilppurien soveltuvuus on riippuvainen koneen rakenteesta. Joillain maatalouden laitteilla paalinarut voivat muodostaa ongelman ja silpuista tulee pitkiä, mutta toisilla nämä ongelmat ovat siedettävällä

tasolla. Järeimpien murskainten sekä maatalouskokoluokan murskainten kustannukset ovat samaa suuruusluokkaa. Murskaamiseen voidaan myös käyttää laitoksella olevaa kiinteää murskainta ja tällöin murskauksen kustannus on pienempi kuin mobiilimurskainten. Murskan kapasiteetti on helvellä pienempi kuin puulla, joten tulisi olla ylimääräistä kapasiteettia tai käyttöaika tulisi jatkaa. Toinen mahdollisuus on myös rakentaa yksinkertainen ja kevyempirakenteinen helvelle suunniteltu murskain, jonka kustannukset voisivat myös olla alhaisemmat kuin mobiilimurskaimen, mikäli saadaan riittävä vuotuinen käyttöaika. (Paappanen et al. 2008, 4 – 5.)

Ruokohelpeä käyttää polttoaineenaan 25 laitosta ja kokonaiskäyttö oli vuonna 2007 60 GWh, mikä on kaksinkertainen edellisvuoteen verrattuna. Helpeä käytetään eniten suurissa CHP-laitoksissa, joissa on leijukerroskattila. Laitoksista kolmasosalla kattilateho oli yli 200 MW<sub>th</sub> ja pienimpien kattiloiden koko oli alle 5 MW. Helven käyttö ei ole sujunut täysin ongelmitta. Ongelmia aiheuttavat helven erilainen mekaaninen rakenne turpeeseen ja hakkeeseen verrattuna. Helpi on rakenteeltaan kevyttä ja se aiheuttaa tukkeutumista ja holvaantumista polttoaineen käsittelyjärjestelmiin. Kriittisimpiä kohtia ovat vastaanottoasemien ritilät, kiekko-seula, niiden jälkeiset ylitemurskaimet ja välivarastojen ruuvipurkaimet. Jotta mahdolliset ongelmat vältettäisiin, tulisi helpeä syöttää riittävän pienellä nopeudella ja tasaisesti, jotta puhtaan helven patjojen joutumien käsittelyjärjestelmään vältettäisiin. (Paappanen et al. 2008, 3.)

Suurilla voimalaitoksilla ruokohelven käytettävyyttä lisää helven erillinen syöttö kattilaan käsittelylaitteiden ohii. Tämä mahdollistaisi nykyistä suurempien ruokohelpimäärien hyödyntämisen kerralla. Tällaista tekniikkaa on muun muassa helven pneumaattinen syöttö kattilaan, jota on hyödynnetty Tanskassa. Voimalaitokset myös epäilevät, että helven piin ja alkalien pitoisuudet aiheuttavat likaantumista ja kuumakorrosiota. Helven osuuden ollessa 1,2 % kokonaisenergiasta, ei helven käyttö lisää likakerrostumien tai korroosion määrää. Osuuksien ja käyttöjaksojen pituuksien kasvaessa voi riskit muodostua ongelmiksi. (Paappanen et al. 2008 5, 15.)

Ruokohelven poltto-ominaisuudet ovat paremmat keväällä korjattuna, kuin syyskorjattuna. Syyskorjattu ruokohelvi soveltuu huonosti energiakäyttöön osaksi kosteuden ja osaksi haitallisten alkuaineiden vuoksi. Kevätkorjattu ruokohelven seospoltto onnistuu



silloin kun kattilaa ei kuormiteta täydellä teholla. Silpun tulisi olla tasalaatuista ja pituudeltaan alle 4 cm. Ainoana polttoaineena ruokohelpi palaa nopeasti kehittämällä korkean lämpötilan. Muihin kiinteisiin polttoaineisiin verrattuna helpisilppu on myös hyvin kevyttä 60 – 70 kg/m<sup>3</sup>. Poikkeavien ominaisuuksien takia ruokohelpi on sekoitettava pääpolttoaineeseen huolella, koska seoksen tasaisuudella on suuri vaikutus polttoaineen käytettävyyteen. Ruokohelven osuus voi seospoltossa olla noin 10 %:a polttoaineseoksen energiasta. Polttoaineen varasto- ja käsittelyjärjestelmien laiteratkaisut vaikuttavat olennaisesti mahdollisiin ruokohelven energiaosuuteen. Ruokohelpeä voidaan myös jalostaa pelleteiksi, briketeiksi ja sen polttoa on myös kokeiltu jauhemaisena. (Pahkala, Katri et al. 2005 18 – 19.)

Kiinteitä polttoaineita poltetaan Suomessa yleisimmin arinapolttona tai leijupolttona. Arinapolttota on pienissä alle 5 MW:n voimalaitoksissa ja sahojen lämpökeskuksissa (teho alle 15 MW). Leijupolttota käytetään suurissa voimalaitoksissa, jolloin lämpötehot ovat välillä 3 – 550 MW. Arinapolttossa käytetään yleisesti liikkuvaa mekaanista arinaa. Leijupoltto jaetaan kahteen ryhmään kiertoleijupetipolttoon ja leijupetipolttoon, joista leijupetipoltto on Suomessa yleisempi. Leijupoltolla saavutetaan parempi polton hallinta, mutta polttoaineen pitää olla hienompaa kuin arinapolttossa. (Flyktman ja Paappanen 2005, 11.) Tapani Sauranen (2007) on koepolttanut ruokohelpeä Kinnulan kunnan lämpökeskuksessa hakkeen seassa ja tulokset osoittivat, että poltossa ei ole mitään ongelmia vaikka ruokohelven energiasisällön osuus oli 17,4 %:a.

Ruokohelven poltto tapahtuu seospolttona turpeen tai hakkeen kanssa, koska yksin poltettuna kosteammalle polttoaineelle suunnitellussa kattilassa palamislämpötila nousee hyvin korkeaksi. Tämä johtuu siitä, että ruokohelven käyttökosteus on alhainen 10 – 20 %. (Flyktman ja Paappanen 2005, 11.) Lisäksi silpun keveys aiheuttaa sen, että kattilasta saatava teho alenee. Ruokohelpisilppu on parasta polttaa silloin kun kattilaa ei ajeta täydellä teholla, sillä silppu sisältää vain noin kolmasosan jyrshinturpeen energiasta tilavuusyksikköä kohden. Ruokohelvellä saadaan alennettua turpeenpolton hiilidioksidipäästöjä ja lisäksi se parantaa kostean puun poltto-ominaisuuksia, sillä se toimii kattilassa imupaperin tavoin. Korsibiomassan sisältämä kloori voi aiheuttaa korroosiota höyry-

kattilassa, mutta tätä voidaan pienentää polttamalla seassa myös rikkiä sisältävää turvetta tai kivihiiltä. (Tuomisto 2005, 15.)

Ruokohelpeä pystytään myös käyttämään pellettien valmistuksen raaka-aineena ja ruokohelven pelletointia on tutkittu jonkin verran. Kokemukset ovat kuitenkin osoittaneet, että ruokohelvestä ei yksinään saada tehtyä riittävän lujaa pellettiä. Kestäviä pellettejä saadaan kuitenkin aikaiseksi sekoittamalla ruokohelppi esimerkiksi turpeen kanssa. Jotta ruokohelpeä pystyttäisiin käyttämään pelletöinnissä, pitää kosteus saada tasolle 10 % ja ruokohelppi olisi myös jauhettava lyhyeksi. (Flyktman ja Paappanen 2005, 18.)

Ruokohelpeä voidaan myös käyttää briketöinnissä. Briketöinnissä jauhettu, murskattu ja silputtu materiaali tiivistetään sylinterin muotoisiksi kappeleiksi, joiden halkaisija vaihtelee välillä 20 – 60 mm. Jotta briketti saataisiin pysymään kasassa, on materiaalin oltava riittävän kuivaa. (Laurila 2007,8.) Ruokohelven briketöinti on teknisesti ja taloudellisesti mahdollista tietyissä tapauksissa. Brikettien etuina ovat helppo käsiteltävyys ja helpisilppua tai paaleja pienemmät kuljetuskustannukset. Pienemmät kustannukset aiheutuvat siitä, että brikettien kiintotiheys on jopa yli kuusinkertainen verrattuna ruokohelpipaaleihin. Briketöinnin haittapuolena ovat kuitenkin huomattavat lisäkustannukset ja tämän takia pienien pinta-alojen briketöintiin ei kannata hankkia kalliita laitteita. Pienimuotoinen briketöinti voi tosin olla kannattavaa, mikäli briketöintiin pystytään käyttämään alun perin muuhun käyttöön hankittuja laitteita. (Laurila ja Lauhanen 2008, 6.)

Viljan viljelyä tapahtuu Suomessa melko keskittyneesti tietyillä alueilla Etelä- ja Länsi-Suomessa. Oljen polttoaineominaisuuksiin vaikuttavat viljalaji ja käytön kannalta merkittävin ominaisuus on tuhkan sulamiskäyttäytyminen. Oljen tuhkan sulamiskäyttäytymisestä on kerrottu tarkemmin biomassojen ominaisuudet kappaleessa, mutta polton kannalta vaikein on kauran olki ja paras on vehnä. Tuhkan sulamiskäyttäytymisen lisäksi myös polttoaineen käsittelytekniset ominaisuudet ovat tärkeitä. Olkea poltettaessa ei sen energiasisältöosuutta seospoltossa voida kohottaa yhtä suureksi kuin ruokohelven tapauksessa ja lähtökohtana pidetään 5 %:a energiaosuutta polttoaineseoksessa. (Flyktman ja Paappanen 2005, 10.)

Oljen kohdalla suuri tilavuus ( $30 - 40 \text{ kg/m}^3$ ) vaikeuttaa varastointia ja tekee kuljetukset kalliiksi. Olkea hyödynnetään polttamisessa suurpaaleina, kovapaaleina, silppuna, jauhattuna ja puristeina. Briketöinnillä ja pelletöinnillä saavutetaan suurempi oljen tiheys ja helpotetaan polttoaineen käsittelyä. Brikettien tiheys on  $450 - 1\,100 \text{ kg/m}^3$  ja pellettien  $800 - 1\,400 \text{ kg/m}^3$ . Oljen alkuainesisisältö ja tehollinen lämpöarvo on hyvin lähellä puun vastaavia arvoja ja ne molemmat palavat pitkällä valaisevalla liekillä ja vaativat tämän takia palotilaksi laajan tulipesän. Pieni energiatiheys ja suuri tuhkapitoisuus aiheuttavat kuitenkin sen, että olki on muita kiinteitä polttoaineita ongelmallisempi. (Tuomisto 2005, 17.)

Oljella on myös korkea alkali- ja klooripitoisuus, mikä voi aiheuttaa korroosioriskiä kattilassa, joissa on yli  $480 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ :n tulistinlämpötila. Turpeeseen tai puuhun sekoittamalla tätä pystytään kuitenkin ehkäisemään sekoittamalla, kunhan pidetään oljen osuus polttoaineesta tarpeeksi pienenä. Oljen koostumukseen vaikuttaa myös korjuuajankohta, sillä kloori- ja alkalipitoisuudet laskevat, jos oljen annetaan olla pellolla saateen huuhdottavana. Mikäli olki korjataan aikaisin, on sen klooripitoisuus lähes nelinkertainen myöhään korjattuun olkeen verrattuna. Oljen tuhka sisältää myös paljon kalsiumia, magnesiumia ja kaliumia, mikä auttaa sitomaan esimerkiksi turpeen kanssa poltettaessa syntyvää rikkiä tuhkaan. (Tuomisto 2005, 17.)

Ruokohelven ja oljen tavoin myös järviruoko kelpaa polttoaineeksi. Etelä-Suomen rannikkoalueen ruovikko on kooltaan  $30\,000 \text{ ha}$  ja sieltä voitaisiin saada laskennallisesti energiaa  $630 \text{ GWh}$ . Järviruoko on energiasisällöltään puuhakkeen veroista. Polttoaineen soveltuvuuteen vaikuttaa lisäksi irtotiheys, joka järviruoko'olla on alhaisempi kuin  $32 \text{ kg/i-m}^3$ . Tämän takia ruokohelpeäkään ei voida polttaa yksinään kosteampaa ja painavampaa polttoainetta varten suunnitellussa kattilassa, vaan se sekoitetaan turpeeseen tai hakkeeseen. Tämä johtuu siitä, että lämpötila kohoaisi liian korkeaksi ja syöttölaitteet eivät välttämättä pysty syöttämään silppua riittäväällä teholla. Energiatiheys on alhaisesta irtotiheydestä johtuen  $0,13 \text{ MWh/ i-m}^3$ , kun se ruokohelvelläkin on  $0,3 - 0,4 \text{ MWh/ i-m}^3$ . (Komulainen et al. 2008, 21.)

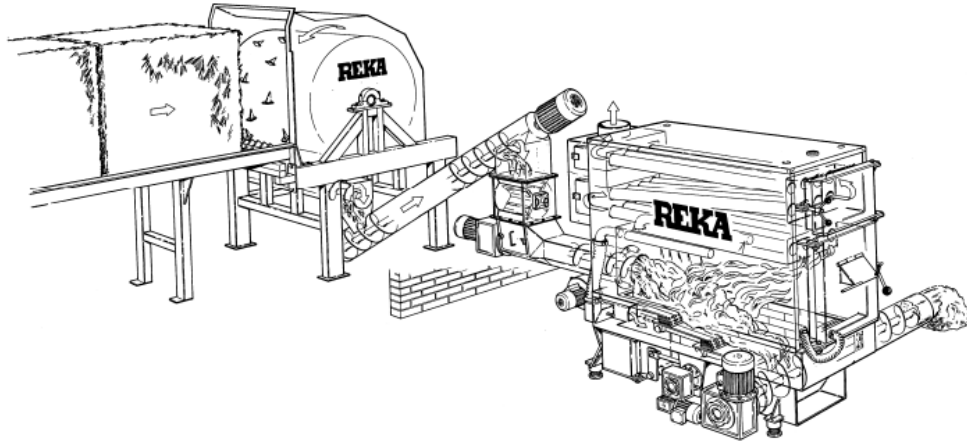
Ruokomassa ei sisällä paljon rikkiä, mutta jonkin verran korroosiota aiheuttavaa klooria. Kloorin määrä on suurempi kesällä korjatussa massassa. Polttoon korsimassaa kerätään talvella, jolloin sen ominaisuudetkin ovat paremmat. Ruoko sisältää paljon tuhkaa, noin 4 %, mutta tuhkalla on kuitenkin korkea sulamislämpötila, mikä ehkäisee kiinteän kuonan muodostumista. Suuri tuhkamäärä asettaa kuitenkin omat vaatimuksensa kattilalle. Ruokohelven niittoon voidaan talvella käyttää lautasniittokonetta ja korjuuseen noukintavaunua tai paalainta. Järviruokoa voidaan myös pelletöidä oljen ja ruokohelven tapaan. Järviruoko on ominaisuuksiltaan ruokohelven tapainen. Pelletöinti ei kuitenkaan onnistu ilman sidosaineita esimerkiksi rypsijauhetta tai jauhopölyä. Briketöinnissä taas liian suuri kosteuspitoisuus voi aiheuttaa ongelmia. (Komulainen et al. 2008, 23 – 26.)

Järviruon polttaminen voidaan tehdä arinakattilassa tai leijupolttokattilassa. Arinatekniikkaa käytetään pienemmissä kattiloissa. Parhaiten korsimaisen materiaalin polttoon soveltuu liikkuvilla arinoilla varustettu kattila, jossa voidaan varmistua tasalaatuisesta palamisesta. Polton keskeisimpinä kysymyksinä ovat silpun pituus ja syntyvän tuhkan käsittely. Pienkattiloilla silpun pituus olla alle 30 – 40 mm, sillä pidemmät korret aiheuttavat ongelmia polttoaineen kuljettimissa. (Komulainen et al. 2008, 38.)

Olkea ja helpeä voidaan käyttää myös ainoana polttoaineena energian tuotannossa niille suunnitelluissa kattiloissa. Olki- tai ruokohelpikattiloille asetettavat vaatimukset ovat riittävä polttoaineen syöttöteho, tulipintojen ja savupiipun kloorin ja alkalien syövyttävän vaikutuksen kestävyys, liikkuva arina sekä automaattinen tuhkanpoisto.

Oljen polttoa voidaan tehdä maatilakokoluokan polttolaitoksissa niin, että lämpöä tuotetaan vain yhden tilan tarpeisiin. Polttaminen voidaan tehdä eräpolttona tai automaattisella polttimella. Eräpoltossa voidaan käyttää systeemejä, joissa traktorilla ladataan iso paali kerralla poltettavaksi kattilaan. Traktorilla hoidetaan myös muodostuneen tuhkan poisto. Eräpolttoon on aina kytketty varaaja, joka pystyy varastoimaan yhdessä poltossa muodostuneen energian, eli 1 – 4 paalin sisältämän energian. Automaattisesti syötettyjen polttimien tapauksessa polttoaineen syöttö tapahtuu automaattisella kuljettimella, johon paalien lastaus tapahtuu esimerkiksi kerran vuorokaudessa. Ennen polttoa paalit murskataan hitaasti pyörivällä murskaimella. Kuvassa 11 on esitetty tällainen automaat-

tisesti toimiva oljen polttojärjestelmä. Maatilakokoluokan polttoa voidaan myös tehdä niin, että samassa laitoksessa tuotetaan lämpöä muutamalle ympärillä olevalle naapurille. (Nikolaisen (toim.) 1998, 19 22.) Eräkäyttöisten paalikattiloiden tehot ovat välillä 50 – 1000 kW ja hyötysuhde noin 60 – 80 %. Automaattisyyttöisten järjestelmien tehot ovat välillä 100 kW – 10 MW ja hyötysuhde noin 70 – 90 %. (Lötjönen 2007, 4 – 5.)



**Kuva 11.** Jatkuvatoiminen oljen polttojärjestelmä (Nikolaisen (toim.) 1998, 20.)

Olkea voidaan käyttää myös kaukolämpölaitoksissa. Kaukolämpölaitoksen tuottama lämpömäärä määräytyy verkkoon kuuluvien talojen kulutuksesta sekä putkihäviöistä kaukolämpöverkossa. Yleensä olkipolttimen lisäksi asennetaan öljypolttimet, jotka kattavat koko tarvittavan energiamäärän. Öljypolttimia voidaan käyttää huipputehona sekä olkikattilan korjausten aikana. Tanskassa on vuonna 1998 ollut 58 kaukolämpölaitosta, jossa poltetaan olkea ja niiden kokoluokka on välillä 0,6 – 9 MW ja keskiarvo 3,7 MW. (Nikolaisen (toim.) 1998, 26.)

Lämpölaitoksissa voidaan polttaa olkea silppuna, kaistaleina, katkaistuna paaleina ja kokonaisina paaleina. Laitoksen pääkomponentit ovat oljen varasto, oljen nosturi ja kuljetin, oljen silppuri-, repimis- tai katkaisemiskone, polttolaite ja kattila, polttoilmapuhaltimet, palamiskaasujen puhdistin, tuhkan kuljetin, savupiippu ja savukaasupuhallin sekä hallintalaitteet. Katkaistujen paalien poltossa paalit katkaistaan hydraulisella veitsellä ja pala työnnetään kattilaan mäntäkuljettimella. Kokonaisten paalien poltossa paalit nostetaan nosturilla syöttölaatikkoon, josta hydraulinen mäntä työntää paalit kattilaan johta-

vaan tunneliin. Kokonaisia paaleja polttavasta kattila on esitetty kuvassa 11. Silputun tai kaistaleisen oljen polttamisessa paalit murskataan ja polttoaine kuljetetaan kattilaan ruuvikuljettimella. (Nikolaisen (toim. 1998, 27 – 29.)



**Kuva 12.** Oljen polttamista kokonaisina paaleina (Nikolaisen (toim.) 1998, 28).

Olkikattilaan olki tulee kattilan alapuolelta ja palaminen tapahtuu raskaalla valuteräksestä rakennetulla arinalla. Arina on yleensä jaettu useisiin palamisalueisiin, mikä sallii primääri-ilman tulemisen arinan läpi sekä kunkin alueen palamisen säätämisen. Oljen energiamäärästä suuri osa koostuu haihtuvista kaasuista, jotka kuumennuksen aikana poistuvat palamistilaan arinan yläpuolelle. Jotta näiden kaasujen palaminen varmistettaisiin, sekundaari-ilmaa johdetaan kattilan seinässä olevien suuttimien kautta. Tämän jälkeen palamiskaasut kulkevat putkista koostuvan konvektiolämmönsiirtimen ja ekonomaiserin läpi. (Nikolaisen (toim.) 1998, 28.)

Tanskassa on rakennettu myös CHP laitoksia, jotka käyttävät polttoaineenaan pelkäävät olkea. Neljässä laitoksessa käytetään arinatekniikkaa oljen polttamisessa ja niiden sähkötehot vaihtelevat välillä 2,3 – 8,3 MW. Näissä laitoksissa olki poltetaan silppuna. Tanskassa on myös olkea ja hiiltä polttava CHP laitos, joka käyttää kierto-leijupetikattilaa. Leijupetikattiloissa ilmavirta leijuttaa petimateriaalia esimerkiksi hiekkaa. (Nikolaisen (toim.) 1998, 35 – 38.)

## **5 LOPPUTUOTTEET JA NIIDEN HYÖDYNTÄMINEN**

Mädätyksessä muodostuu biokaasua ja mädätettä, kompostoinnista muodostuu kompostia ja poltosta jää jäljelle tuhkaa. Biokaasu on näistä materiaaleista arvokkainta hyötykäytön kannalta ja sitä voidaan hyödyntää energian tuotannossa tai liikennepolttoaineena. Komposti ja mädäte ovat myös helposti hyötykäytettävissä olevia materiaaleja esimerkiksi lannoitteena tai maanparannusaineena.. Tuhkan hyötykäyttö sen sijaan voi olla rajoittunut sen sisältävien haitallisten aineiden tai raskasmetallipitoisuuksien takia.

### **5.1 Mädätyksen lopputuotteiden hyödyntäminen**

Mädätteen lopputuotteista biokaasulle on helppo löytää käyttökohde energian tuotannossa. Mädätyslaitoksen yhtenä taloudellisuuden perustana onkin biokaasun mahdollinen hyötykäyttö joko suoraan energiana tai polttoaineena liikenteessä. Koska mädätteen määrä on melkein sama kuin mädätettävien materiaalien, pitää sillekin löytää hyötykäyttökohde. Mädäte käy hyvin maatalouteen lannoitteeksi. Siitä voidaan myös erotella kiinteä ja nestemäinen jae, jolloin voidaan paremmin satuttaa lannoitustarpeet. Typpi jää suurimmaksi osaksi erotettuun veteen, kun taas fosforia on enemmän kiinteässä jakeessa.

#### **5.1.1 Biokaasun hyödyntäminen**

Biokaasua voidaan hyödyntää sähkön- tai lämmön erillistuotannossa, pelkässä sähkön- tai lämmöntuotannossa tai siitä voidaan jalostaa liikennepolttoainetta. Sähköntuotantoon käytetyimpiä tekniikoita ovat kaasumootorit ja mikroturbiinit. Lämmöntuotannossa voidaan käyttää lämpökattilaa. Pienemmillä laitoksilla lämpö voidaan hyödyntää yhdessä tai useammassa laitosta lähellä olevassa yksittäisessä lämmönkulutuskohteessa. Maatilakokoluokan laitoksista lämpöä hyödynnetään yleensä tilan omien rakennusten lämmitykseen. Biokaasu voidaan myös hyödyntää lähellä olevassa voimalaitoksessa sähkön- ja lämmön tuotantoon. (Aalto et al. 2007, 13.) Biokaasua voidaan myös hyödyntää

polttokennoissa ja Stirling moottoreissa (Lehtomäki et al. 2007, 40), puhdistettuna liikenteen polttoaineena tai syöttämällä se maakaasuverkkoon (Held et al. 2008).

Lämmön tuotannossa ei juuri ole kaasun puhtaus vaatimuksia. Ainoastaan veden poisto on suositeltavaa. Veden poistolla saadaan erotettua myös suurin osa mahdollisesta rikivedystä, jonka pitoisuus pitäisi olla alle 1000 ppm korroosioriskin takia. (Lehtomäki et al. 2007, 40.) Helpoin tapa lämmön tuotantoon biokaasusta on poltto lämpökattiloissa. Kaasun hyödyntämiseen tarvitaan vain lähellä oleva riittävän suuri lämmön kulutuskohte. Vanhan lämpökattilan hyödyntäminen voi myös olla mahdollista vaihtamalla sopiva poltin. Lämmön tuotannossa biokaasusta polton hyötysuhde voi olla jopa yli 90 %. (Latvala 2005, 11.) Lämpökattiloita on useissa biokaasua tuottavissa kohteissa, joissa lämpö hyödynnetään läheisissä rakennuksissa. Ylimäärä lämpö tai biokaasu voidaan kuljettaa muualle, joko suoraan kaasuputkien kautta tai hyödyntämällä kaukolämpöverkkoa. Pienimmissä biokaasulaitoksissa on kuitenkin yleistä, että osa biokaasusta poltetaan soihdussa varsinkin kesällä, kun kysyntä on alhaisempaa. (Held et al. 2008.)

Sähköntuotannossa biokaasua on jo pidemmän aikaa hyödynnetty polttomoottoreiden polttoaineena. Sähkötehoiltaan polttomoottorit vaihtelevat noin 45 kW:sta useampiin MW:hin. Pienillä polttomoottoreilla (sähköteho alle 200 kW) voidaan päästä sähköntuotannossa 25 – 30 %:n hyötysuhteeseen ja isoimmilla moottoreilla 30 – 40 %:n hyötysuhteeseen. (Lehtomäki et al. 2007, 40.)

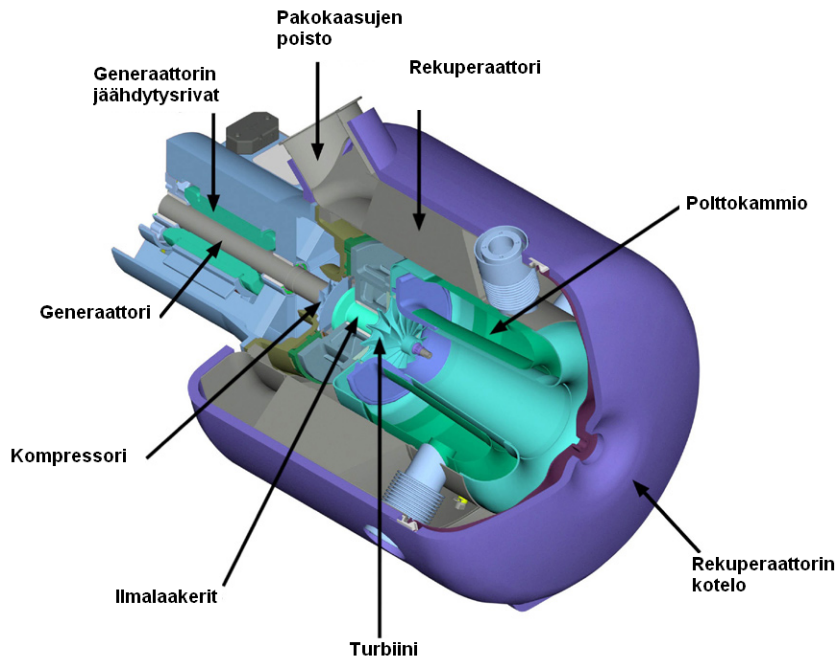
Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on kannattavaa, sillä sähköä tuotettaessa muodostuu lämpöä ja hyödyntämällä tätä lämpöä saadaan hyötysuhdetta kasvatettua. Tämä voidaan tehdä perinteisellä otto-moottorilla, joka pyörittää generaattoria. Lämpöä saadaan talteen jäähdytysvedestä ja savukaasuista. Tätä lämpöä voidaan hyödyntää omissa prosesseissa tai tilojen lämmityksessä. Yhteistuotannossa voidaan päästä 70 – 90 %:n hyötysuhteeseen riippuen kokoluokasta ja pelkälle sähkölle hyötysuhde on 25 – 30 %:a. (Latvala 2005, 11.) Biokaasusta pitää samalla tavalla kuin pelkkää lämpöä tuotettaessa erottaa vesi. Lisäksi pitää poistaa kiintoainepartikkelit ja mikäli on tarpeellista korroosiota aiheuttavat aineet. Diesel- ja kaasumoottoreita voidaan käyttää pienissä kokoluokissa yhteistuotannossa. Dieselmoottoreista on myös kehitetty sellaisia moottoreita,



jotka pystyvät hyödyntämään sekä biokaasua että dieseliä. Kaasuturbiineja voidaan hyödyntää suuremmissa voimalaitoksissa. (Held et al. 2008, 19.)

Biokaasua voidaan hyödyntää hajautetussa sähkön ja lämmön tuotannossa. Eli kun tuotanto tapahtuu pienimuotoisissa alle 10 tai 20 MW:n tai jopa alle 500 tai 100 kW:n laitoksissa. Tällainen pieni voimalaitos ei tarvitse laajaa kaukolämpöverkkoa tai suurta määrää asiakkaita. Tällaisella voimalalla voidaan toimittaa yksittäiseen kiinteistöön, teollisuushalliin tai asuntoalueen lämpökeskukseen. Pienet voimalat rakennetaan etäkäyttöisiksi eli miehittämättömiksi. (Gustafson ja Stoor 2008, 22.)

Yhdistetyssä sähkön- ja lämmön tuotannossa voidaan hyödyntää myös mikroturbiineja. Mikroturbiinit ovat kaasuturbiineja ja teholtaan 25 – 500 kW. Mikrokaasuturbiinit ovat yksinkertaisia rakenteeltaan. Ne koostuvat yleensä yksivaiheisesta kompressorista ja yksivaiheisesta turbiinista sekä useimmat mikroturbiinit ovat yksiakselisia eli kompressorin, turbiinin ja generaattorin ovat samalla akselilla. Koska mikroturbiineissa on yksi pyörivä osa, huoltovälit ovat pitkiä jopa 8 000 tuntia. Mikroturbiineissa on yksinkertaisemman rakenteensa takia alhaisemmat sisääntulolämpötilat (noin 1 000 °C) verrattuna isoihin kaasuturbiineihin (1 450 °C asti). Tämä huonontaa mikroturbiinien hyötysuhdetta. Yleinen käytössä oleva turbiini on Capstonen C30, jossa on ilmalaakerit, minkä takia voiteluun ei tarvita ollenkaan öljyä. (Schmid et al. 2005, 2.) C30 Mikroturbiini näkyy kuvassa 13. Mikroturbiinit sietävät hyvin epäpuhtauksia pois lukien siloksaanit. Niiden investointikustannukset ovat suuremmat kuin kaasumootorin, mutta käyttökulut ovat huomattavasti alhaisemmat. Mikroturbiinia pystytään ajamaan minimissään noin 30 % metaania sisältävällä biokaasulla. Sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa mikroturbiinilaitokseen asennetaan lämmön talteenotto (jätelämpökattila). Tällöin kaasun sisältämästä energiasta saadaan 30 % sähköä ja 60 % lämpöä. (Lammi 2008, 5.)



**Kuva 13.** Capstonen CR30 mikroturbiini. (Mukaiillen Capstone 2008).

Polttokennoja pystytään myös käyttämään yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa. Polttokenno pystyy muuntamaan polttoaineen sisältämän kemiallisen energian suoraan sähkö- ja lämpöenergiaksi. Polttokenno muodostuu kahdesta elektrodista, anodista ja katodista, jotka on erotettu elektrolyytillä. Anodilla tapahtuu polttoaineen hapettuminen ja elektronin vapautuminen. Elektroni kulkee ulkoisen virtapiirin kautta katodille, jossa elektroni ja hapetin reagoivat. Elektrolyytin tehtävänä on reaktioissa syntyneiden ionien kuljettaminen elektrodilta toiselle. Kennojen hyviä puolia ovat hyvä hyötysuhde myös pienemmillä tehoilla ja osakuormalla. Kennoissa ei ole liikkuvia osia, joten niillä on potentiaalia pitkään käyttöikään ja ne ovat toimiessaan hiljaisia. (Halinen 2007.)

Polttokennoja voidaan käyttää yhteistuotannossa hyödyntämällä kennoreaktioissa syntyvä lämpöenergia esimerkiksi käyttöveden tai kiinteistön lämmitykseen. Voimalaitossovelluksena on muun muassa polttokenno – kaasuturbiini hybridi, jossa kennoreaktoreissa käyttämättä jäänyt polttoaine hyödynnetään kaasuturbiinissa. (Halinen 2007.) Wärtsilä on toimittanut yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon tarkoitettua polttokennon Vaasan asuntomessualueelle. Kyseisellä laitteella on tarkoitus hyödyntää kaatopaikkakaasua. Lisäksi asuntomessualueella on mikroturbiini. (Kivisaari 2008.)

Biokaasun käyttö ajoneuvoissa onnistuu sen jälkeen kun kosteus, hiilidioksidi ja epäpuhtaudet on poistettu ja kaasun painetta on nostettu kompressoinnilla. Epäpuhtauksina biokaasussa on muun muassa partikkelimateriaalia sekä rikkivety. Paineistuksessa biokaasun paine täytyy nostaa 200 bar:n paineeseen. (Held et al. 2008, 20.) Puhdistuksen jälkeen biokaasu on maakaasua vastaava polttoaine, sillä erotuksella, että maakaasu on fossiilista polttoainetta, kun taas biokaasu on uusiutuvaa energiaa. (Lehtomäki et al. 2007, 41.) Biokaasun jalostaminen on nykyään teknisesti mahdollista, mutta tekniikka on vielä nykyisin melko kallista. Hinta tosin riippuu vahvasti käsiteltävän biokaasun määrästä. Pienillä laitoksilla (biokaasua 100 m<sup>3</sup>/h) puhdistuskustannukset ovat noin 25 €/MWh ja laitokseen kasvaessa (1 000 m<sup>3</sup>/h) ne alenevat noin 10 – 15 €/MWh. (Pöyry Environment Oy 2007, 25.)

Biokaasun puhdistuksessa käytetään useita menetelmiä, mutta yleisimmät ovat vesipesu ja aktiivihiihiadsorptio (Lehtomäki et al. 2007, 41). Vesipesu perustuu siihen, että hiilidioksidi on liukoisempaa veteen kuin metaani. Tätä menetelmää voidaan myös parantaa käyttämällä liuotinta, joka absorboi hiilidioksidia paremmin kuin vesi. Hiilidioksidi voidaan erottaa myös kylmentämällä biokaasua nestemäiseen muotoon. Tämä tekniikka perustuu siihen, että hiilidioksidilla ja metaanilla on eri kiehumispiste. Nestemäinen hiilidioksidi voidaan tämän jälkeen hyödyntää jäähdyttimenä ruokateollisuudessa tai pakastekuljetuksissa. (Held et al. 2008, 20.)

Biokaasua käyttävät henkilöautot ovat yleensä bi-fuel autoja, eli ne voivat hyödyntää sekä bensiiniä, että biokaasua. Tämä pidentää autojen toimintasädettä, sillä maakaasun tankkausasemia ei ole kaikkialla saatavilla. Bi-fuel autoissa on tankit molemmille polttoaineille ja polttoaineen vaihto tapahtuu tarvittaessa nappia painamalla. Polttoaine myös vaihtuu, kun toinen polttoaineista loppuu. Pelkästään metaanille tarkoitettut autot ovat yleensä raskaampia ajoneuvoja, kuten linja-autot ja rekat. (Lehtomäki et al. 2007, 42.)

### 5.1.2 Mädätteen hyödyntäminen

Mädäte voidaan hyödyntää lannoitteena tai maanparannusaineena. Mädätyksellä käsitellyn lannan lannoittavat ominaisuudet ovat yleensä paremmat kuin käsittelemättömän lannan. Orgaanisen aineksen hajoaminen mädätyksessä laskee C:N- suhdetta sekä kuiva-ainepitoisuutta ja tekee siitä homogeenisempää. Lannan käsittely helpottuu, sillä sen juoksevuus paranee. Mädäte myös imeytyy maahan nopeammin. Mädätyksessä myös hajua aiheuttavat yhdisteet hajoavat ja patogeenien määrä laskee. (Rintala et al. 2002, 33.) Mädätettä voidaan levittää lietteen levitykseen tarkoitetuilla menetelmillä, joita on tarkemmin kuvattu kappaleessa 4.1.

Anaerobisella käsittelyllä saadaan ravinteiden kierto, kun käsitelty materiaali hyödynnetään lannoitteena. Lannoitevaikutukseltaan tärkeät aineet, kuten kalium, fosfori, kalsium, magnesium ja mikroravinteet saadaan täydellisesti talteen anaerobisessa käsittelyssä, sillä ne eivät muutu käsittelyssä. Fosfori- ja kaliumpitoisuuksien on havaittu vastaavan kaupallisten lannoitteiden sisältämiä pitoisuuksia. (Rintala et al. 2002, 34.)

Mädätyksessä myös osa orgaanisesta typestä muuttuu liukoiseen muotoon, joka on välittömästi kasvien hyödynnettävissä mädätteen levittämisen jälkeen. Tämän takia mädätteen liukoisen typen (ammoniumtyppi  $\text{NH}_4^+$ ) pitoisuus on suurempi kuin käsittelemättömän lannan ja mädäte on tehokkaampaa lannoitetta. Naudan lannalla liukoisen typen pitoisuus on 20 %:a suurempi verrattuna käsittelemättömään lantaan. Sian lannalla tällaista liukoisen typen muuntumista ei tapahdu. (Taavitsainen et al. 2002, 18.) Naudanlietteen ja puhdistamolietteen sekoitusta (suhde 80:20) mädättämällä 35 °C:ssa liukoisen typen lisääntyminen on 20 – 30 %:a ja 55 °C:ssa yli 40 %:a (Paavola 2008). Orgaanisilla lannoitteilla voidaan myös lisätä maan humuspitoisuutta, joten niiden käyttö ei köyhdytä maaperää samalla tavalla kuin mineraalilannoitteet. (Lehtomäki et al. 2007, 44.)

Lannan ja mädätteen käsittely aiheuttaa myös typen häviöitä. Typen häviöitä aiheuttaa ammoniakkin haihtuminen varastoinnin ja peltolevityksen aikana, denitrifikaatio, huuhtoutuminen sekä typen immobilisointi maaperässä. Käsittelemätön liete muodostaa säiliössä kerroksen, joka estää ammoniakkin haihtumista. Mädätetty liete ei tällaista kerrosta

muodosta ja haihtumista tapahtuukin enemmän. Myös mädätteen korkeampi pH lisää ammoniakkin haihtumista verrattuna aktiivilietteeseen (Ørtenblad 2000). Haihtumista voidaan estää jopa 96 %:a kattamalla lietesäiliö. Katteiksi käyvät kelluvat katteet, kuten polystyreeni- ja kevytsorakatteet. (Taavitsainen et al. 2002, 37 – 38.) Kelluva kate (esim. oljen avulla tai edellä mainitut) on halvempi kuin sellainen kate, joka estää sadeveden pääsyn säiliöön. Estämällä sadeveden pääsy säiliöön, mahtuu sinne kuitenkin enemmän lietettä. (Ørtenblad 2000.)

Peltolevityksessä haihtumiseen vaikuttaa lietteen ominaisuuksista pH ja kiintoainepitoisuus. Suurempi pH ja kiintoainepitoisuus lisää haihduntaa. Mädätteellä on raakalietteeseen verrattuna suurempi pH, mutta alhaisempi kiintoainepitoisuus. (Taavitsainen et al. 2002, 19). Mädätetty liete tulisikin pintaan levitettynä mullata saman tien tai käyttää sijoitusta (Taavitsainen et al. 2002, 37). Sian ja naudan lietelannan levitystä on tutkinut mm. Mattila (2006) väitöskirjassaan. Hän on tutkimuksissaan huomannut, että sijoittaminen ja multaaminen äestämällä vähentävät ammoniakkipäästöjä paremmin kuin lannan sijoittaminen nauhalevittimellä tai kiintoainepitoisuuden vähentäminen separoinnilla tai ilmastuksella. (Mattila 2006, 4.)

Mädäte voidaan joko hyödyntää sellaisenaan tai se voidaan jakaa kiinteään ja nestemäiseen jakeeseen. Biovakan laitoksessa veden erotus toteutetaan joko lingolla tai muulla vastaavalla mekaanisella vedenerotuslaitteella. Tällöin mädätteestä saadaan erotettua kaksi ravinnejatetta: fosforipitoinen humus ja rejektivesi. Humus on noin 10 – 15 % lietteen tilavuusvirrasta ja sisältää noin 80 – 90 % lietteen sisältämästä fosforista ja rejektivesi vastaa noin 85 – 90 % lietteen tilavuusvirrasta ja sisältää noin 90 % lietteen ammoniumtypestä ja noin 80 % lietteen kokonaistypestä. Jakamalla lannoitekäyttöä rajoittavat pääravinteet erillisiin jakeisiin helpotetaan lietteen ravinnetaseen hallintaa. Molemmat jakeet pystytään hyödyntämään sellaisenaan lannoitteina ja maanparannusaineina pelloilla tai viherrakentamisessa. (Watrec Oy 2007, 23 – 24.)

## 5.2 Kompostoinnin lopputuotteen hyödyntäminen

Kompostilla tarkoitetaan orgaanista maanparannusainetta, joka on stabiloitunut humuksenkaltaiseksi tuotteeksi eikä sisällä elinkykyisiä ihmis- ja kasvipatogeeniä tai kasvin siemeniä. Komposti ei houkuttele hyönteisiä tai tartunnanlevittäjiä ja sitä pystytään käsittelemään ja varastoimaan ilman haittaa. Komposti myös edesauttaa kasvien kasvua. Kompostituote taas on kompostoinnin lopputuote sellaisenaan tai sitä on jälkikäsitelty esimerkiksi seulomalla, hienontamalla tai lisäämällä muita materiaaleja. Kompostin ominaisuuksia ovat kypsyys, stabiloituminen, hygieeninen laatu sekä ravinteiden ja raskasmetallien pitoisuudet. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 26- 28.)

Kompostin valmiusastetta kuvaamaan käytetään yleensä kypsyyttä ja stabiilisuutta. Stabiloituminen tarkoittaa orgaanisten aineiden hajoamisen hidastumista ja hapellisten olosuhteiden vakiintumista. Kypsyydellä tarkoitetaan kompostin sisältävien fytoksisten aineiden määrän vähenemistä tasolle, jolloin ne eivät haittaa kasvien kasvua. Kompostia voidaan pitää stabiloituneena, kun komposti on jäähtynyt ympäristön lämpötilaan, mutta kypsää kompostista tulee vasta pitkän maatumisvaiheen jälkeen. Kompostin kypsyuden mittaamiseen on monia menetelmiä, jotka voidaan jakaa esimerkiksi kolmeen ryhmään kasvien siementen itävyyttä ja kasvin kasvua mittaavat menetelmät, biomassan mittaukseen perustuvat menetelmät sekä kemialliset analyysit. Suorimpana menetelmänä on kasvien kasvatuskoe, jossa mitataan kompostin vaikutus siementen itävyyteen ja kasvien kasvuun. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 30.)

Komposti on stabiloitunutta kompostia kun sitä voidaan varastoida suurissa kasoissa ilman anaerobisuudesta johtuvia haittoja. Tällaista kompostia voidaan jo käyttää vaatimattomiin viherrakentamiskohteisiin ja syyslevityksessä. Kypsyntä kompostia pystytään hyödyntämään muun muassa peltoviljelyssä. Komposti on hyvin kypsennetty, kun fytoksiset aineet ovat hävinneet jo niin hyvin, että ne eivät aiheuta ongelmia edes herkkien kasvien juurille. Tällaista kompostia tarvitaan vaativassa viherrakentamisessa kasvualustakäytössä. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 30.)

Kompostin typpipitoisuuden tulee olla oikeassa suhteessa kompostin orgaanisen aineksen pitoisuuteen sekä laatuun. Mikäli kompostin C:N- suhde on liian suuri, kompostin typpi ei riitä orgaanisen aineksen hajottajien tarpeeseen ja ne sitovat maaperän typpeä, jolloin typpi immobilisoituu ja kasvit kärsivät liukoisen typen puutteesta. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 34.)

Raskasmetallipitoisuudet rajoittavat usein kompostituotteiden käyttöä. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 35.) Maa- ja metsätalousministeriön asetuksen 12/07 liitteessä 4 on määritetty eri raskasmetallipitoisuuksien raja-arvot (MMM 12/07). Lannoitevalmiste ei myöskään saa sisältää sellaisia määriä haitallisia aineita, että sen käyttöohjeiden mukaisesta käytöstä voi aiheutua vaaraa ihmisten tai eläinten terveydelle tai turvallisuudelle, kasvien terveydelle taikka ympäristölle (Lannoitevalmistelaki 539/2006).

Kompostia pystytään hyödyntämään maataloudessa, puutarhaviljelyssä, luonnonmukaisessa viljelyssä, viherrakentamisessa, maisemoinnissa sekä metsätaloudessa. Puutarhaviljelykäyttö edellyttää kompostilta huolellista hygienisointia sekä riittävän pitkää jälkikypsytyä. Peltoviljelyssä komposti on tarpeellista kasveille, joiden viljely kuluttaa maan humusta suuren maanmuokkaustarpeen ja vähäisen lahoamaan jäävän biomassan määrän vuoksi. Tällaisia kasveja ovat muun muassa juurikasvit ja peruna. Luomutuotannossa tulee välttää epäsuotuisia aineita, kuten raskasmetalleja, lääkkeitä tai torjunta-ainejäämiä. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 42- 43.)

Maataloudessa kompostia hyödynnetään pääasiallisesti maanparannusaineena. Maanparannusvaikutukseen lukeutuu kaikki muu vaikutus paitsi suora kasvinravitsemuksellinen vaikutus. Kompostin lisäyksellä pystytään parantamaan maan mururakennetta, vedenpidätyskykyä sekä tehostamaan mikrobitoimintaa. Kompostin sisältämistä ravinteista suurin osa on hitaasti vapautuvassa muodossa, joten kompostin ravinnevaikutus kestää pitkään. Kompostin sisältämien ravinteiden käyttökelpoisuus on varsin pieni, esimerkiksi lannan kompostin tyypestä on liukoisena vain 3 – 15 %:a. Typen vapautuminen kasveille käyttökelpoiseen muotoon riippuu kompostin laadusta, maan lämpötilasta sekä kosteudesta. Kompostilla pystytään myös vähentämään kasvitauteja. Tämä perustuu kilpai-

luun, antibioottisiin aineisiin, loisten loisintaan ja isäntäkasvien puolustusmekanismien heräämiseen. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 37- 39.)

Viherrakentamiskohteisiin soveltuvat melkein kaikenlaiset kompostit, sillä ei ole vaaraa että mahdolliset myrkyt joutuisivat elintarvikkeisiin tai rehuihin. Taajamissa ja tieluis-killä kompostin käyttö on kannattavaa, koska näiden alueiden maapohja on usein humuksetonta ainesta jolla kasvu ilman maanparannusaineita on lähes mahdotonta. (Tontti ja Mäkelä-Kurtto 1999, 44.)

### **5.3 Poltosta saatavan tuhkan hyödyntäminen**

Energian tuotannossa syntyy tuhkaa kivihiilen, turpeen, puun ja näiden sekapolton palamistuotteena. Polttoaineen koostumus ja karheus, voimalaitoksen polttolaitteiden tyyppi ja polttolämpötila vaikuttavat tuhkan laatuun ja tyyppiin. Leijupoltosta jää myös tuhkan sekaan polttoprosessissa käytettyä hienoa hiekkaa. (Laine-Ylijoki et al. 2002, 11.) Tuhkaa voidaan hyödyntää metsien lannoituksessa, maarakentamisessa tai sitten se voidaan läjittää kaatopaikalle (Makkonen (toim.) 2008; Laine-Ylijoki 2002; Pöyry Environment Oy 2007).

#### **5.3.1 Metsälannoitus**

Vuonna 2004 lannoitteeksi sopivaa puutuhkaa arvioitiin muodostuneen yli 150 000 tonnia ja turvetuhkaa noin 350 000 tonnia. Puhtaalla puuntuhkalla voitaisiin lannoittaa ainakin 35 000 hehtaaria suometsiä. Yksityismailla tuhkan lannoitusala on noin 300 hehtaaria vuodessa ja teollisuuden ja metsähallituksen omissa metsissä 1400 hehtaaria. Nykyisin lannoitukseen sopivasta puutuhkasta suurin osa joutuu kaatopaikoille tai on läjitettyinä voimalaitoksen tonteilla jatkokäsittelyä odottamassa. Puutuhka olisi kuitenkin hyvä turvemaiden kasvuhäiriöiden torjuja ja puuston kasvun lisääjä. Puun sekä turpeen tuhkan lannoitekäyttöä rajoittavat rinnakkaispoltto, jolloin metsälannoitteeksi sopivia tuhkia on hankala erottaa muista tuhkalajeista, kannattavan liiketoiminnan kehittämättömyys ja levitysyrittäjien puute. (Makkonen (toim.) 2008, 4.)



Metsien lannoituksessa voidaan hyödyntää puun, turpeen tai peltobiomassojen poltossa muodostunutta tuhkaa. Lannoitevalmistusasetuksen liitteessä IA6 näiden tuhkien tyyppinimeksi on annettu metsätuhka. Tuhkan valmistusta, käyttö ja kuljetusta on säädetty lannoitevalmistelaisissa (539/2006) ja sen perusteella annetuissa asetuksissa lannoitevalmisteista (asetukset nro 12/07, 13/07 ja nro 09/08). Näihin säädöksiin sisältyy määritelmät lannoitukseen käytettävien tuhkien laatuvaatimuksista, tuoteselosteesta ja tuotannon omavalvonnasta, joita valvoo Elintarviketurvallisuusvirasto Evira. (Makkonen (toim.) 2008, 6.)

Jotta tuhka kelpaisi metsätuhkaksi, pitää fosforin ja kaliumin yhteispitoisuuden olla vähintään 1 %:a, kalsiumin vähintään 8 %:a ja klooria saa olla enintään 2 %:a kuiva-aineesta. Haitallisten metallien enimmäispitoisuudet on myös määrätty lannoitevalmistelainsäädännössä. Esimerkiksi kadmiumille enimmäispitoisuus on 17,5 mg/kg kuiva-ainetta. Kadmiumannos ei myöskään saa ylittää 60 g/ha 40 vuoden aikana annettuna. (Makkonen (toim.) 2008, 6.)

Puutuhkalla on mahdollista saada aikaan pitkäaikainen ja voimakas kasvureaktio erityisesti soilla, joiden turpeessa on runsaasti orgaaniseen ainekseen sitoutunutta tyyppiä. Lisäksi tuhkalannoituksella voidaan vähentää tai parantaa ravinneperäisiä kasvuhäiriöitä soilla ja pellonmetsitysalueilla. Kangasmetsissä tuhka toimii lähinnä happamoitumisen torjunnassa, sillä erityisesti puutuhkalla on voimakas kalkitusvaikutus. (Hytönen 1999, 533.) Turpeessa on nimittäin yleensä vähemmän kivennäisravinteita, fosforia, kaliumia, kalsiumia, booria, sinkkiä ja kuparia kuin kangasmaassa. Tuhkalla ei pystytä myöskään korvaamaan kasvupaikoilta energiakäyttöön vietyä orgaanista ainesta. (Makkonen (toim.) 2008, 11.)

Irtotuhkan käsittely ja levittely on hankalaa. Suurimpana ongelmana on irtotuhkan pölyäminen, sillä hengityselimistöön ja iholle joutuva pöly saattaa koitua vaaraksi työnteekijöiden terveydelle sekä levityskoneissa tuhka voi aiheuttaa ennen aikaista kulumista ja syöpymistä. Tasaisen levitysjäljen aikaansaaminenkin voi olla vaikeaa. (Hytönen 1999,

534.) Ennen käyttöä metsätuhka pitääkin kovettaa tai rakeistaa (Makkonen (toim.) 2008, 6).

Itsekovetuksessa tuhka kostutetaan ilman rakeistusta noin kolmanneksella veden ja tuhkan yhteenlasketusta massasta. Itsekovetus on eksotermisen reaktion ja tämän takia kostutukseen käytetty vesi alkaa heti haihtua. Kostutuksessa on käytössä tavanomaisia ruuvikostuttimia. Itsekovetuksen lisäksi tuhkaa voidaan rakeistaa muun muassa lautasrakeistuksella, rumpurakeistuksella tai valssauksella. Lautasrakeistuksessa kostea tuhka syötetään kaltevassa asennossa olevaan halkaisijaltaan noin 3 metriseen pyörivään lautaseen. Lautasessa on myös vastakkaiseen suuntaan pyörivä lapa. Tuhka vierii tasoa pitkin ja muovautuu palloiksi. Rumpurakeistuksessa kostutettu tuhka rakeistuu, kun se valuu hieman kaltevassa asennossa olevan sylinterin pyöriessä seinämältä pohjalle. Valssauksessa käytetään puristusvoimaa tuhkan rakeistukseen. Valssauksessa tuhkan kosteus voi olla vain 3 – 5 %:a. (Korpilahti 2003, 9 – 15.)

### 5.3.2 Maarakentaminen

Maarakennuskäyttökelpoisuus edellyttää että hyötykäytettävän materiaalin tekniset – ja ympäristöominaisuudet tunnetaan ja ne sopivat sovelluskohteeseen. Ympäristökelpoisuuden arvioinnin yleisinä periaatteina ovat polttoprosessiin ja polttoaineiden riittävät tiedot mahdollisten haitta-aineiden esiintymisten arvioimiseksi, haitta-aineiden ominaisuuksien arviointi sekä massojen tasalaatuisuus ja koostumuksen sekä laatuvaihtelujen muutosten tunteminen. (Laine-Ylijoki et al. 2002, 16.)

Yleisesti ottaen hiilituhkat ovat seospolton tuhkia helpommin hyödynnettävissä, koska ne ovat tasalaatuisempia ja sisältävät vähemmän palamatonta hiiltä ja/tai haitallisia epäpuhtauksia. Hiilen poltosta muodostunut lentotuhka vastaa rakeisuudeltaan silttiä. Lentotuhka saadaan lujittumaan sopivassa vesipitoisuudessa tiivistämällä. Pohjatuhka vastaa rakeisuudeltaan hiekkaa ja pohjakuona soraa. Turvetta ja puuta poltettaessa muodostuva sekotuhka on kivihiihen lentotuhkaa karkeampaa ja rakeisuudeltaan silttiä tai siltistä hiekkaa vastaavaa. Seospolton lentotuhka on kuivana myös lujittuvaa, mutta kosteana varastoiminen heikentää lujittumiskykyä. (Laine-Ylijoki et al. 2002, 11.)

Karkeampia tuhkia käytetään sellaisenaan korvaamaan rakeisuudeltaan vastaavia maa- materiaaleja. Lentotuhkia hyödynnettäessä pyritään käyttämään hyväksi sen lujittumisominaisuudet. Lujittaminen edellyttää hyvää tiivistämistä, mikä onnistuu vain oikeassa vesipitoisuudessa. Löyhien lentotuhkakerroksien kantavuus jää alhaiseksi ja niissä voi myös tapahtua routimista. (Eskola et al. 1999, 33.)

Hyötykäytön lisäämisen vaikeutena maarakennuksessa on se, että neitseellisen materiaalin, kuten hiekan, korvaaminen muilla materiaaleilla ei ole usein kannattavaa neitseellisen materiaalin alhaisen hinnan takia. Lietteenpolton tuhkaa voisi myös olla mahdollista hyödyntää sementtiteollisuuden raaka-aineena. Erityisesti Japanissa on suurista jätteenpolton tuhkamääristä johtuen käytetty lietetuhkaa betoniteollisuudessa kevyiden runkoaineiden, kuonien ja tiilien valmistuksessa. (Anttila et al. 2008, 50 – 51.)

Yhdyskuntalietteen poltosta muodostuvaa tuhkaa voidaan periaatteessa käyttää maarakennuskohteissa esimerkiksi kaatopaikkojen ja tierakenteiden tiivistyskerroksissa tai pintamateriaaleissa sekoitettuna muihin materiaaleihin. Suomessa tuhkan hyödyntämiseen maarakentamisessa on periaatteessa haettava jokaiselle kohteelle erikseen lupa, mikäli kyseistä materiaalia ei ole tuotteistettu ja luvitettu laajemmin sovellettavaksi. (Anttila et al. 2008, 50 – 51.) Valtioneuvoston asetuksella eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa on myös pyritty helpottamaan eräiden jätteiden hyötykäyttöä. Tämä asetus sallii tiettyjen edellytysten täytyessä jätteiden käytön maarakentamisessa ilmoitusmenettelyllä aiemman ympäristölupaprosessin sijaan. Tätä asetusta sovelletaan kivihiihlen, puun ja turpeen lentotuhkiin ja pohjatuhkiin sekä betonimurskeeseen. Asetuksessa on säädetty haitallisten aineiden pitoisuuksien ja liukoisuuksien raja-arvot perustutkimuksessa sekä laadunvalvonnassa. (Ojanen et al. 2006, 19.)

### **5.3.3 Kaatopaikkasijoitus**

Suomessa kaatopaikat on lajiteltu kolmeen ryhmään, jotka ovat pysyvien jätteiden kaatopaikka, tavanomaisten jätteiden kaatopaikka sekä ongelmajätteiden kaatopaikka. Kun arvioidaan jätteen kelpoisuus tiettyyn kaatopaikkaluokkaan, on otettava huomioon ym-

päristön sekä jätteen ominaisuudet. Kaatopaikkakelpoisuus arvioidaan jätteen koostumuksen, jätteen orgaanisen aineksen määrän ja hajoavuuden, jätteen haitallisten aineiden pitoisuuden ja niiden liukoisuuden sekä jätteen ja muodostuvan kaatopaikkaveden ekotoksikologisten ominaisuuksien mukaan. (Laine-Ylijoki et al. 2002, 18.)

Pääpaino kelpoisuustutkimuksissa on metallien liukoisuusominaisuuksien määrittelyssä. Erityisesti pysyvien jätteiden ja ongelmajätteen sijoituskelpoisuuden arvioinnissa tarvitaan myös lisätietoja, kuten pysyvien jätteiden kaatopaikalle sijoitettaessa tiedot materiaalin pysyvyydestä. (Laine-Ylijoki et al. 2002, 18.) Pysyvän jätteen kaatopaikalle voidaan sijoittaa vain ympäristövaikutukseltaan vähäisiä jätteitä. Teollisuudesta tulevat sivutuotteet luokitellaan pysyviksi, jos niiden hyötykäyttö maarakentamisessa on lähes vapaata. Tällainen materiaali on esimerkiksi betonimurske. Tavanomaiselle jätteelle tarkoitettulle kaatopaikalle voidaan viedä jonkin verran päästöjä aiheuttavia jätteitä. Ympäristövaikutuksia voidaan pitää pieninä jos jätteen ominaisuudet ovat lähellä hyötykäyttökelpoisuuden raja-arvoja. Tällaisena jätteenä voidaan pitää esimerkiksi kivihien lentotuhkaa. (Wahlström et al. 2001, 58 – 59.) Lietettä poltettaessa sen sisältämät haitta-aineet (PAH ja muut orgaaniset yhdisteet), raskasmetallit, kloori, rikki, fosfori ja typpi voivat aiheuttaa ympäristöongelmia, mikäli niistä muodostuu toksisia yhdisteitä savukaasuihin tai ne rikastuvat tuhkiin. Mikäli tuhka sisältää raskasmetalleja ja muita mahdollisia haitta-aineita, määritellään tuhka ongelmajätteeksi. (Pöyry Environment Oy 2007, 31.)

## **6 PARIKKALAN BIOMASSAT JA HYÖDYNTÄMISEN NYKYTILANNE**

Tämän kappaleen tarkoituksena on esittää Parikkalan alueella tarkasteltavat biomassat tarkemmin, sekä kertoa näiden biomassojen hyödyntämisestä nykyään. Parikkalan alueen biomassoista saatiin tietoa Parikkalan kunnan maaseututoimesta, ympäristöluvista, Etelä-Karjalan jätehuoltoyhtiön vuosiraportista, ympäristöluvista sekä kyselyistä alueella sijaitsevilta tiloilta. Nykyistä hyötykäyttöä selvitettiin ympäristöluvista sekä yhteydenotoilla kuntaan.

## 6.1 Eläntilojen lietteet ja lannat

Parikkalassa on tällä hetkellä seitsemän ympäristöluvan omaavaa tilaa. Näihin kuuluu yksi suuri sikala ja isoja lypsylehmätiloja. Lisäksi on yksi maatila, joka on ympäristöluvan kokoinen, mutta on perustettu aikaisemman ilmoitusperiaatteen aikana. Alueelle on myös tulossa suuri nautakasvattamo, mutta toiminta ei ole vielä saanut ympäristölupaa (Kaakkois-Suomen ympäristökeskus 2008). Eläntilojen lantojen kokonaismäärä perustuu Parikkalan kunnan maaseututoimesta saatuihin eläinten kokonaismääriin.

Alueella on maatiloja 336 kappaletta ja nautaeläimiä on 143 tilalla yhteensä 6 617 kappaletta, sikoja 14 tilalla yhteensä 8 210 kappaletta, lampaita 6 tilalla 277 kappaletta ja siipikarjaa 13 tilalla 7 954 kappaletta sekä lisäksi hevosia 29 tilalla 99 kappaletta. Maatalousmaata on 334 tilalla 336 maatilasta. Viljeltyä alaa on yhteensä 327 tilalla 9 150 ha. Viljakasveja viljellään 291 tilalla yhteensä 4 628 ha. (Matilda; Sairanen 2008.) Tällä hetkellä suuri osa maatiloilla muodostuneista lietteistä ja lannoista levitetään pelloille. Kyseessä voi olla oma pelto, sopimuspelto tai vuokrapelto.

## 6.2 Biojätteet ja yhdyskuntalietteet

Biojätteillä tarkoitetaan tässä selvityksessä Parikkalan alueelta erilliskerättyä biojätettä, jota muodostui Etelä-Karjalan jätehuolto Oy:n mukaan vuonna 2007 229 tonnia. Erilliskerätty biojäte pitää sisällään myös puutarhajätteet. Yhdyskuntalietteellä tarkoitetaan Särkisalmen jätevedenpuhdistamolla muodostunutta lietettä. Vuonna 2007 muodostui 494 tonnia lietettä, jonka kiintoainepitoisuus on suotonauhapuristimen jälkeen 15 % sekä 10 tonnia välppäjätettä, joka viedään Etelä-Karjalan jätehuoltoyhdistykselle. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2007, 14; Vahti 2008.)

Biojätteen erilliskeräyksestä huolehtii Etelä-Karjalan jätehuoltoyhtiö ja biojäte käsitellään Kukkuroinmäen kaatopaikalla sijaitsevalla Vapon kompostointilaitoksella (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2007, 16). Särkisalmen puhdistamolla muodostuva jätevesi liete viirakuivataan ja kompostoidaan puhdistamon yhteydessä aumakompostissa. Kompos-

toitumisen jälkeen liete kuljetetaan kerran vuodessa hyötykäyttöön, nykyisin Parikkalan käytöstä poistetun kaatopaikan maisemointiin. (Kaikkonen et al. 2007, 7.) Maatiloilla muodostuva jätevesiliete levitetään pelloille, mikäli on levityspinta-alaa. Biojäte voidaan käsitellä kuivalannan yhteydessä lantalassa, jos tilalla muodostuu kuivalantaa. (Neuvonen 2008.)

### **6.3 Vesistöjen kunnostuksessa syntyvät biomassat**

Vesistökuunnostuksen biomassalla tarkoitetaan tässä selvityksessä Siikalahden vesistöalueelta saatavaa ruoppausmassaa sekä järviruokoa. Siikalahti on Parikkalan kunnassa sijaitseva lintukosteikko, jonka pinta-ala on noin 400 ha. Järviruokoalueen pinta-ala on 93 ha (Metsähallitus 2006, 36). Järviruo' on kohdalla biokaasun saanti edellyttää sitä, että kasvimassa kerättäisiin vihreänä eli kesällä. Talvella kerättävä järviruoko soveltuu mädätyksen sijaan poltettavaksi.

Siikalahden tapauksessa järviruokoa voi ottaa siikalahdelta vain syyskuun lopusta maaliskuun loppuun ja ruoppausmassaa syksyllä ennen jäiden tuloa. Kesällä ruoppaaminen tai järviruo' on otto ei tule kysymykseen eläinarvojen takia. Tämän takia sieltä saatava järviruoko soveltuisi vain polttoon. Metsähallitus on tehnyt yleisen hoito- ja käyttösuunnitelman 2006 ja toimenpidesuunnitelmat ovat erikseen. Siikalahti life hanke loppui vuonna 2003 ja bird life hanke vuonna 2007. Näiden hankkeiden tarkoituksena oli Siikalahden umpeenkasvun hidastaminen ja alueen monimuotoisuuden lisääminen. Siikalahden pohjoisosan suunnitelmaluonnos on kesken ja odottaa rahoitusta. Etelä-osaa on ruopattu jonkin verran ja ruoppausjäte on levitetty pellolle. Mikäli rahoitusta löytyisi, ruoppausta voisi tapahtua esimerkiksi pari vuotta Siikalahden pohjoisosassa. (Niiranen 2008.) Aikaisemmissa Siikalahden kunnostushankkeissa ruoppausmassaa on levitetty lähialueen pelloille lannoitteeksi (Ritola-Grahn 2008).

## 6.4 Peltobiomassat

Peltobiomassoihin on tässä työssä huomioitu viljakasvien (ruis, ohra, vehnä ja kaura) olki, rypsin ja rapsin olki, sekä ruokohelppi. Peltopinta-alojen kokonaismäärät on saatu Parikkalan kunnan maaseututoimesta. Tässä selvityksessä oletetaan, että viljakasvien oljesta saadaan mädätykseen tai polttoon 20 %.

Maatiloilla, joissa muodostuu kuivalantaa, olkea käytetään kuivikkeena. Suurimmilla tiloilla lanta käsitellään kuitenkin lietteenä, jolloin kuiviketarvetta ei ole. Joillakin tiloilla käytetään myös molempia menetelmiä, jolloin suurin osa lannasta käsitellään lietelantana ja osa lannasta kuivalantana. Mikäli olkea ei käytetä kuivikkeena tai sitä ei luovuteta muille tiloille käytettäväksi, se yleensä silputaan ja kynnetään peltoon. (Neuvonen 2008.)

## 6.5 Metsäbiomassa

Metsäbiomassoilla tarkoitetaan tässä työssä metsänhoidollisista toimenpiteistä saatavien metsähakkeen määrää. Laskennassa käytetyt tiedot perustuvat Metsäkeskuksesta saatuun selvitykseen Energiapuun saatavuudesta Parikkalan alueella vuonna 2000. Käytännössä tämä tarkoittaa päätehakkuista, taimikonhoidosta ja ensiharvennuksista sekä myöhästyneistä hakkuista saatavaa biomassaa.

Metsähaketta käytetään Parikkalassa nykyään lämpökeskuksissa. Parikkalassa on kolme lämpölaitosta Parikkalan keskustaajaman lämpölaitos ja Saaren ja Uukuniemen taajamien lämpölaitokset. Parikkalan keskustassa on 8,5 MW:n suuruinen lämpökeskus, johon kuuluu 3,5 MW:n hakekattila ja kaksi kappaletta vanhoja raskasöljykattiloita yhteisholtaan 2 MW:a sekä uudempi raskasöljykattila 3 MW:a. Lämpökeskukselle on hankittu uusi hakekattila ja raskasöljykattila vuonna 2004. Lämpökeskuksella tuotetusta energiasta 90 % saadaan tuotettua hakkeella ja loput raskasöljyllä. Kaukolämpöverkkoa on Parikkalan keskustassa noin 7 kilometriä ja siihen on liittynyt 78 kuluttajaa. (Parikkala; Asikainen 2008.)

Saaren (600 kW) ja Uukuniemen (240 kW) lämpökeskuksissa käytetään myös pääasiallisesti haketta ja varapolttoaineena kevytöljyä. Uukuniemen lämpökeskus on hyvin pieni ja sillä tuotetaan lämpöä vain yhteen kiinteistöön. Saaren lämpökeskuksella poltetaan normaalisti kesällä kevytöljyä ja myös joskus joudutaan polttamaan talvellakin, koska hakkeella ajo on epävarmaa. (Parikkala; Asikainen 2008.) Lämpökeskuksien lisäksi metsähaketta käytetään jonkin verran maatilojen hakekattiloissa.

## **7 BIOMASSOJEN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET PARIKKALASSA**

Parikkalan alueen biomassojen käsittelytavat rajattiin mädätykseen ja polttoon. Kaikkien edellisessä luvussa lueteltujen biomassojen, paitsi metsäbiomassojen, on oletettu soveltuvan mädätykseen. Polttoa tarkastellaan käsittelytapana kaikille biomassoille paitsi ruoppausmassalle sekä biojätteelle. Lannan ja jätevesilietteen poltossa tämä edellyttää mekaanista kuivausta. Ruoppausmassan sekä biojätteen polttamista ei tarkasteltu, vaan niiden ajateltiin polttoa tarkasteltaessa menevän mädätykseen.

### **7.1 Menetelmät ja lähtöarvot**

Nautojen lantamäärä ja siitä saatavan biokaasun energiaa laskettaessa on oletettu, että lypsylehmät ja emolehvät laiduntavat kesällä ja vain 70 % niiden lannasta saadaan talteen. Lannoista saatavan biokaasun määrien laskeminen perustuu tässä työssä lantojen sisältämien haihtuvien kiintoaineiden määriin ja niistä saataviin biokaasumääriin. Haihtuvan kiintoaineen määrä eläintä kohden ja haihtuvasta kiintoaineksestä saatavan biokaasun määrä perustuu Gaia Group Oy:n tekemään biokaasun maatilatuotannon kannattavuusselvitykseen. Haihtuvan kiintoaineen määriä laskettaessa on käytetty seuraavia lukuja: lypsylehmä 1 700 kg/a, emolehmä 1 400 kg/a, sonni 800 kg/a, hieho tai nuori sonni 450 kg/a, nuori hieho 250 kg/a, vasikka 150 kg/a, emakko 300 kg/a, karju 200 kg/a, lihasika 75 kg/a, nuori lihasika 50 kg/a ja porsas 10 kg/a sekä muniva kana 6 kg/a. Samasta lähteestä laskettu haihtuvan kiintoaineen pitoisuus kiintoaineesta (VS TS:stä)



on nautojen lannalle noin 76,4 %. Lietteiden kuiva-ainepitoisuus vaihtelee yleensä välillä 5 – 10 % muilla kuin kanoilla. (Hagström et al. 2005, 13.) Tässä työssä on käytetty nautojen ja sikojen lietteiden kuiva-ainepitoisuutena 6 % ja kanojen lannan kuiva-ainepitoisuutena 20 %.

Ruoppausmassan määrän laskemiseksi on oletettu, että ruoppausta olisi tarkoitus tehdä 5 ha vuosittain ja, että mädätyksessä hyödynnettävää materiaalia on järven pohjassa 75 cm paksuudelta. Ruoppausmassan ominaisuudet on saatu Metenerin tekemästä Siikalahden kasvimassan biokaasutuskokeet loppuraportista (Luostarinen ja Kalmari 2008). Raportissa mainitaan, että ruoppausmassan tilavuuspaino oli analyysissä  $1100 \text{ kg/m}^3$ , ruoppausmassan kuiva-ainepitoisuus on 10,9 %, haihtuvan kiintoaineen määrä kokonaiskiintoaineesta (VS % TS:stä) on 64,2 % ja metaanintuottopotentiali on  $66 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{VS}}$ . (Luostarinen ja Kalmari 2008.) Ruoppausmassasta saatavan biokaasun kohdalla on kuitenkin paljon epäselvyyksiä, sillä ei voida tietää minkä kokoiselta alueelta ruoppausmassaa mahdollisesti otettaisiin. Järviruokoalueen pinta-alana laskuissa on käytetty 93 ha (Metsähallitus 2006, 36).

Biojätteen, jätevesilietteen ja vesistöjen biomassoista Siikalahden ruoppausmassan haihtuvien kiintoaineiden määrien laskennassa on hyödynnetty kiintoainepitoisuuksia ja haihtuvan kiintoaineen pitoisuuksia kiintoaineesta (VS TS:stä). Jätevesilietteen kiintoainepitoisuus on Parikkalan jäteveden puhdistamolla viirakuivauksen jälkeen 15 % (Vahti 2008) ja haihtuvan kiintoaineen pitoisuutena on käytetty 62 %:a kuiva-aineesta (Bougrier et al. 2006, 283). Erilliskerätyn biojätteen kosteuspitoisuudeksi on arvioitu 30 % (Tchobanoglous et al. 1993, 678; Davidsson et al. 2007, 409) ja haihtuvan kiintoaineen pitoisuudeksi 85 %. Siikalahden ruoppausmassan kiintoainepitoisuus 10,9 % haihtuvan kiintoaineen pitoisuus 64,2 % (Luostarinen & Kalmari, 2008).

Siikalahdella muodostuvan järviruo'on sekä peltobiomassojen (viljakasvien olki, rypsin ja rapsin olki sekä ruokohelpi) kohdalla on haihtuvan kiintoaineen määrien sijaan laskettu kiintoaineen muodostus hehtaaria ja vuotta kohden. Järviruo'olla sato on  $8,5 \text{ t}_{\text{TS}}/\text{ha},\text{a}$  (Alakangas 2000,108), ohralla ja kauralla  $1,8 \text{ t}_{\text{TS}}/\text{ha},\text{a}$ , vehnällä ja rukiilla (Kara et al. 2004, 124 – 125). Kevättrypsin oljen sato on  $2 \text{ t}_{\text{TS}}/\text{ha},\text{a}$  (Lehtomäki et al. 2003, 35)

ja kevätrapsin oljen sato  $2 t_{TS}/ha$ ,a (Alakangas 2000, 102). Oljen puintikosteus on välillä 30 – 60 % (Alakangas 2000, 98). Tässä työssä kosteuksina peltobiomassoille on käytetty 30 %. Samaa kosteutta on käytetty järviruo'olla. Tämä ei vaikuta biokaasumääriin, sillä laskelmat on tehty kiintoaineista.

Tässä selvityksessä on biokaasun määriä laskettaessa käytetty seuraavia lukuja: lehmän lanta  $400 m^3/t_{VS}$ , sianlanta  $600 m^3/t_{VS}$  ja kanan lanta  $400 m^3/t_{VS}$ . Biokaasun energiasisälön laskemisessa on oletettu, että biokaasu sisältää 60 % metaania ja että metaanin tehollinen lämpöarvo normikuutiota kohden on  $36 MJ/kg$  ( $10 kWh/m^3n$ ) (Maakaasuyhdistys ry 2008).

Jätevesilietteellä, erilliskerätyllä biojätteellä sekä siikalahden ruoppausmassalla on metaanintuottopotentiali myös ilmoitettu haihtuvaa kiintoainetta kohden. Jätevesilietteellä on metaanintuottopotentialina käytetty  $128 m^3/t_{VS}$  (Bougrier et al. 2006, 283), erilliskerätyllä biojätteellä  $275 m^3/t_{VS}$  (Davidsson et al. 2007, 412), Siikalahden ruoppausmassalla  $66 m^3/t_{VS}$  (Luostarinen & Kalmari, 2008) ja järviruo'olla  $340 m^3/t_{VS}$  (Gustafson ja Stoor 2008, 6).

Siikalahdella muodostuvan järviruo'on, viljakasvien oljen, rypsin ja rapsin oljen sekä ruokohelven biokaasupotentiaalina on tässä työssä käytetty kiintoainetta (TS) kohden ilmoitettuja lukuja. Järviruo'on metaanintuottopotentiali on  $340 m^3/t_{TS}$ . Kauran oljelle on metaanintuottopotentialiksi mainittu  $300 - 340 m^3/t_{TS}$  (Lehtomäki 2006, 39),  $290 m^3/t_{TS}$  (Uusi-Penttilä 2004, 32) ja  $240 m^3/t_{TS}$  (Gustafson ja Stoor 2008, 6). Tässä työssä on käytetty oljelle metaanintuottona  $300 m^3/t_{TS}$ . Kevättrapsin oljen metaanintuottopotentiali on  $220 m^3/t_{TS}$  (Lehtomäki et al. 2003; Lehtomäki 2006) ja kevätrapsin oljen  $240 m^3/t_{TS}$  (Gustafson ja Stoor 2008, 6). Ruokohelven metaanintuottopotentiali vaihtelee välillä  $330 - 420 m^3/t_{TS}$  (Lehtomäki 2006, 39) ja tässä työssä on käytetty arvoa  $376 m^3/t_{TS}$ . Taulukkoon 1 on koottu biomassoista saatavan biokaasun laskennassa käytettyjä alkuarvoja. Kosteudet ovat sellaisia, mitkä käsiteltävillä materiaaleilla on luonnostaan, joko lietesäiliöistä tullessa, niitettäessä tai jätteen muodostuessa. Jätevesilietteen kosteutenä on 85 %, viirakuivauksen jälkeen, sillä tätä käsittelyä käytetään Parikkalassa.

**Taulukko 1.** Mädätyksen laskennassa käytettyjä arvoja

Biomassa	Kosteus [%]	VS TS:stä [%]	Metaania [m <sup>3</sup> n/t <sub>VS</sub> ]	[m <sup>3</sup> n/t <sub>TS</sub> ]
Lanta				
Naudat	94	76,4	240	
Siat	94	75	360	
Kanat	80	75	240	
Jätevesi liete	85	62	128	
Erilliskerätty biojäte	30	85	275	
Viljan olki	30			300
Ruokohelvi	30			376
Rypsi & Rapsi olki	30			230
Ruoppausmassa	89	64,2	66	
Järviruoko	30			340

Polton kannalta on tärkeää tietää käytetyn materiaalin kosteus ja lämpöarvo. Erityisesti tässä työssä tarkasteltavat lietelannat sisältävät paljon kosteutta (94 %) ja ne täytyykin kuivata ennen kuin niiden polttoa kannattaa harkita. Parikkalan jätevedenpuhdistamolla viirakuivatun jätevesilietteen kosteus on 85 % ja sen poltto onnistuu vain polttamalla sitä jonkun muun polttoaineen kanssa (Vahti 2008). Polttokosteutena on tässä työssä käytetty oljella 20 % (Alakangas 2000, 98) ja ruokohelvellä 15 % (Vapo 2006, 22). Järviruoko kannattaa korjata polttoa varten talvella, jolloin sen kosteus on 20 % (Alakangas 2000, 108).

Metsäbiomassan kosteus vaihtelee paljon, mutta tässä työssä on käytetty keskiarvona 39 %. (Alakangas 2000, 41). Metsäbiomassan sisältämän energiamäärän laskenta perustuu saatuihin vuoden 2000 kiintokuutiomääriin vuodessa (Rousku 2008). Kuusikoiden päätehakkuista tulee biomassaa 1 700 m<sup>3</sup>/a (neulasitta hakkuutähdettä 1 240 m<sup>3</sup>/a), taimikonhoidosta 3 300 m<sup>3</sup>/a ja ensiharvennuksesta sekä myöhästyneistä hakkuista 4 500 m<sup>3</sup>/a.

Alempana lämpöarvona kuiva-aineesta käytettiin lehmän lannalle arvoa 16 MJ/kg (Sweeten et al. 1983, 4), sian lannalle 17 MJ/kg (Bullock et al. 2008, 37) ja kanan lannalle 17 MJ/kg (Phyllis 2008). Lietteen alempana lämpöarvona kuiva-aineesta käytettiin 18 MJ/kg (Tchobanoglous et al. 2003, 1588). Alempina lämpöarvoina kuiva-aineesta käytettiin viljan oljista ohralle 17,4 MJ/kg, kauralle 16,7 MJ/kg, vehnälle 17,8 MJ/kg ja rukiille 17 MJ/kg (Alakangas 2000, 98). Ruokohelven alempi lämpöarvo kuiva-aineesta on 16,2 (Lauhanen ja Laurila 2007, 37 – 38). Alempi lämpöarvo kuiva-aineesta on ryp-

sin oljelle 18,5 MJ/kg, rapsin oljelle 17 MJ/kg (Alakangas 2000, 103) ja ruokohelvelle 17,5 MJ/kg (Alakangas 2000, 108). Metsäbiomassoille on alempana lämpöarvona kuiva-aineesta käytetty kuusikoiden hakkuutähteelle neulasitta 19,7 MJ/kg (Alakangas 2000, 44) sekä taimikonhoidosta ja ensiharvennuksesta saatavalle massalle 19,6 MJ/kg (Alakangas 2000, 63). Taulukossa 2 on ilmoitettu polton laskennassa käytettyjä lähtöarvoja. Kuiva-aineen alemmasta lämpöarvosta on laskettu poltettavien materiaalien lämpöarvot käyttötilassa. Laskennassa on käytetty yhtälöä (1).

$$q_{u,w} = q_{u,d} (1 - x_{vesi}) - l_{25} x_{vesi} \quad (1)$$

$q_{u,w}$  = polttoaineen alempi lämpöarvo käyttökosteudessa

$q_{u,d}$  = kuivan polttoaineen alempi lämpöarvo

$x_{vesi}$  = polttoaineen vesipitoisuus

$l_{25}$  = veden höyrystymislämpö (2443 kJ/kg kun  $t = 25$  °C)

**Taulukko 2.** Poltosta saatavan energian laskennassa käytettyjä lähtöarvoja.

<b>Biomassa</b>	<b>Kosteus saapumistilassa</b>	<b>Kuiva-aineen lämpöarvo</b>	<b>Kuiva-aineen lämpöarvo saapumistilassa</b>
	<b>[%]</b>	<b>[MJ/kg]</b>	<b>[MJ/kg]</b>
Lanta ( <i>mek. kuivaus</i> )			
Naudat	80	16,4	1,3
Siat	80	17,0	1,5
Kanat	80	17,0	1,5
Jätevesi liete	85	18,0	0,6
Erilliskerätty biojäte	30	ei tarkasteltu	ei tarkasteltu
Viljan olki	20	17,2	13,3
Ruokohelppi	15	16,2	13,4
Rypsi & Rapsi olki	20	17,7	13,7
Ruoppausmassa	89	ei määritetty	ei määritetty
Järviruoko	20	17,5	13,5
Metsäbiomassa	39	19,7	10,8

## 7.2 Skenaariot

Tässä luvussa käsitellään muodostetut eri skenaariot ja esitetään niille lasketut tulokset. Ensiksi käsitellään mädätyksen ja polton enimmäispotentiaalit eli selvitetään käsittelypotentiaalien ääripäät, joiden välillä realistisemmat vaihtoehdot ovat. Näiden lisäksi on

tarkasteltu lähemmin kolmessa skenaariossa yhdeksän ympäristöluvan kokoisen tilan lantoja. Parikkalan pihvi saanee ympäristöluvan nautakasvattamoa varten vasta vuoden 2009 aikana, mutta on silti otettu laskelmissa huomioon. Myös Parikkalan alueen suurinta lypsylehmätilaa tarkasteltiin erikseen omana skenaarionaan. Tarkasteltavia skenaarioita olivat

- skenaario 1: mädätyksen enimmäispotentiaali
- skenaario 2: polton enimmäispotentiaali
- skenaario 3: keskitetty mädätys
- skenaario 4: keskitetty mädätys ja kasviperäisen materiaalin poltto
- skenaario 5: hajautettu mädätys
- skenaario 6: suurimman lypsykarjatilän tarkastelu

### **7.2.1 Skenaario 1: Mädätyksen enimmäispotentiaali**

Maksimimädätystapauksessa kaikki tarkasteltavat biomassat paitsi metsäbiomassa ohjataan mädätykseen. Näitä jakeita ovat lannat, peltobiomassa, vesistöjen biomassa, yhdyskuntaliete ja erilliskerätty biojäte. Taulukkoon 3 on koottu maksimimädätyksessä saatavan biokaasun ja poltettavan metsäbiomassan sisältämät energiat.

Taulukkoon 3 on myös laskettu biokaasun ja metsäbiomassan polttamisessa saatavan energian määrä lämpökattilassa tai yhdistetyssä sähkön- ja lämmön tuotannossa (CHP). Mädätyslaitoksen omakäyttötehon määräksi on oletettu 40 % tuotetun biokaasun sisältämästä energiasta. Lämpökattilan hyötysuhteeksi on oletettu 90 % ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa on laskuissa käytetty lämmön osuutena 60 % ja sähkön osuutena 30 %. Samoja oletuksia käytetään myös muissa tapauksissa.

**Taulukko 3.** Biokaasun ja poltettavien jakeiden sisältämä energiamäärä sekä energiantuotanto skenaariossa 1.

Biomassa	Määrä [kpl]	Pinta-ala [ha]	Massa [t/a]	Kosteus [p-%]	Biokaasu [MWh/a]	Kiinteä pa [MWh/a]
Lanta						
Naudat	6 710		85 700	94	9 480	
Siat	6 240		10 500	94	1 700	
Kanat	7 960		318	80	115	
Yht.	20 900		96 500		11 300	
Jätevesiliete			494	85	59	
Erilliskerätty biojäte			229	70	96	
Yht.			723		155	
Viljan olki		950	2 490	30	5 220	
Ruokohelpi		137	1 860	30	4 890	
Rypsin ja rapsin olki		169	483	30	745	
Yht.		1 260	4 830		10 900	
Ruoppausmassa		5	41 300	89	1 910	
Järviruoko		93	791	20	2 150	
Yht.		98	42 000		4 060	
Metsäbiomassa		780	5 750	39		17 700
<b>Yhteensä</b>	<b>20 900</b>	<b>1 350</b>	<b>144 100</b>		<b>26 400</b>	<b>17 700</b>
<b>Energian tuotanto</b>						
<b>Lämpökattila</b>	<b>Lämpö [MWh/a]</b>				<b>14 200</b>	<b>15 900</b>
<b>CHP</b>	<b>Lämpö [MWh/a]</b>				<b>9 490</b>	<b>10 600</b>
	<b>Sähkö [MWh/a]</b>				<b>4 740</b>	<b>5 310</b>

### 7.2.2 Skenaario 2: Polton enimmäispotentiaali

Skenaariossa 2 kaikki jakeet pois lukien erilliskerätty biojäte sekä ruoppausjäte ohjataan polttoon. Erilliskerättyä biojätettä ei oteta huomioon maksimipolttotapauksessa, koska todennäköisesti se kuitenkin tullaan jatkossa viemään Kukkuroinmäelle käsiteltäväksi. Maksimipolttotapauksessa ei myöskään huomioida ruoppausjätteen polttoa korkean vesi- ja mineraalipitoisuuden takia. Ruoppausjätteen mädätyksessä muodostuva biokaasu otetaan kuitenkin edelleen huomioon. Lantojen tapauksessa on bruttoenergiamäärästä vähennetty massan mekaaniseen kuivaukseen 6 %:n kiintoainepitoisuudesta 20 %:n kiintoainepitoisuuteen kuluva polttoaine-energian määrä. Kuivaukseen tarvitaan sähköä 400 MWh/a ja 30 %:n sähköntuotannon kokonaishyötysuhteen avulla saadaan polttoaine-energiaksi määräksi 1 330 MWh/a. Yhdyskuntalietteen kiintoainepitoisuuden oletetaan olevan sama kuin mädätyksessä eli 15 %:a suotonahapuristimen jälkeen. Käytännössä nämä jakeet ovat niin märkiä, että tarvitsevat syttyäkseen tukipolttoaineen. Muiden jakeiden ajatellaan olevan korjuuhetkellä tarpeeksi kuivia polttoon. Taulukkoon 4

on koottu maksimipolttotapauksessa jakeista saatavan poltettavan materiaalin sisältämät energiamäärät ja eri tuotantotavoilla tuotetun energian määrät.

**Taulukko 4.** Biokaasun ja poltettavien jakeiden sisältämä energiamäärä sekä energiantuotanto skenaariossa 2.

Biomassa	Määrä [kpl]	Pinta- ala [ha]	Kosteus [p-%]	Massa [t/a]	Kiinteä polttoaine		Biokaasu [MWh/a]
					(brutto) [MWh/a]	(netto) [MWh/a]	
Lanta							
Naudat	6 710		80	25 700	8 410		
Siat	6 240		80	3 140	1 260		
Kanat	7 960		80	318	128		
Yht.	20 900			29 200	9 800	8 470	
Jätevesiliete			85	494	86	86	
Viljan olki		950	20	2 170	7 990		
Ruokohelppi		137	15	1 530	5 700		
Rypsin ja rapsin olki		169	20	422	1 670		
Yht.		1 260		4 130	15 400	15 400	
Ruoppausmassa		5	89	41 300			1 910
Järviruoko		93	20	632	2 970	2 970	
Metsäbiomassa		780	20	5 750	17 700	17 700	
<b>Yhteensä</b>	<b>20 900</b>	<b>2 130</b>		<b>81 500</b>	<b>45 900</b>	<b>44 600</b>	<b>1 910</b>
<b>Energian tuotanto</b>							
Lämpökattila	Lämpö [MWh/a]					<b>40 100</b>	<b>1 030</b>
CHP	Lämpö [MWh/a]					<b>26 800</b>	<b>686</b>
	Sähkö [MWh/a]					<b>13 400</b>	<b>343</b>

### 7.2.3 Skenaario 3: Keskitetty mädätys

Skenaariossa 3 käsitellään keskitetyssä mädätyksessä 9 suurimman tilan lannat, yhdyskuntaliete, vesistöjen biomassat sekä osittain peltobiomassa. Alueen peltobiomassan maksimikapasiteetista on laskettu peltobiomassojen määrä huomioitujen 9 tilan lantamäärän ja maksimilantamäärän suhteella, joka on 0,372. Erilliskerätty biomassa menee edelleen Etelä-Karjalan jätehuolto Oy:lle. Sikojen lantojen määrä tarkoittaa tässä skenaariossa ja skenaarioissa 4 ja 5 Sikacon sikojen tuottamaa lantamäärää, kun sinne hankittaisiin 3000 lihasian lihasikala emakkosikalan lisäksi. Taulukkoon 5 on koottu mädätyksessä syntyvän biokaasun ja metsäbiomassan sisältämä energia ja niiden hyödyntämisestä lämpökattilassa tai yhdistetyllä sähkön- ja lämmöntuotannossa saatava energia.

**Taulukko 5.** Biokaasun ja poltettavien jakeiden sisältämä energiamäärä sekä energiantuotanto skenaariossa 3

Biomassa	Määrä [kpl]	Pinta-ala [ha]	Massa [t/a]	Kosteus [p-%]	Biokaasu [MWh/a]	Kiinteä pa [MWh/a]
Lanta						
Naudat	1 610		23 600	93	2 810	
Siat	8 910		12 900	95	1 970	
Yht.	10 500		36 400		4 780	
Jätevesiliete			494	85	59	
Viljan olki		354	925	30	1 940	
Ruokohelppi		51	692	30	1 820	
Rypsin ja rapsin olki		63	180	30	277	
Yht.		467	1 800		3 070	
Ruoppausmassa		5	41 300	89	1 910	
Järviruoko		93	791	20	2 150	
Yht.		98	42 000		4 060	
Metsäbiomassa		191	5 750	39		17 700
<b>Yhteensä</b>	<b>10 500</b>	<b>565</b>	<b>86 500</b>		<b>12 900</b>	<b>17 700</b>
<b>Energian tuotanto</b>						
Lämpökattila	Lämpö [MWh/a]				6 980	15 900
CHP	Lämpö [MWh/a]				4 660	10 600
	Sähkö [MWh/a]				2 330	5 310

#### 7.2.4 Skenaario 4: Keskitetty mädätys ja kasviperäisen materiaalin poltto

Tämä skenaario on paljolti samanlainen kuin skenaario 3, mutta tässä tapauksessa kasviperäiset materiaalit (peltobiomassat sekä järviruoko) viedään polttoon. Käsiteltävän kiintoaineen määrä pysyy muuten samana kuin skenaariossa 3, mutta käsiteltävän massan määrä on pienempi, johtuen polttoon menevien jakeiden pienemmästä kosteuspitoisuudesta, mihin päästään korjuuajankohdan optimoinnilla. Välttämällä lannan ja lietteiden poltto vältetään jätteenpolttolaitosstatukselta, joka aiheuttaisi lisää kustannuksia sekä hankalan lupaprosessin. Taulukkoon 6 on koottu biomassoista saatavien biokaasun ja kiinteän polttoaineen määrät sekä niiden hyödyntämisestä muodostuvat energiat.



**Taulukko 6.** Biokaasun ja poltettavien jakeiden sisältämä energiamäärä sekä energiantuotanto skenaariossa 4.

Biomassa	Määrä [kpl]	Pinta-ala [ha]	Massa [t/a]	Kosteus [p-%]	Biokaasu [MWh/a]	Poltto [MWh/a]
Lanta						
Naudat	1 610		23 600	93	2 810	
Siat	8 91		12 900	95	1 970	
Yht.	10 500		36 400		4 780	
Jätevesiliete			494	85	59	
Viljan olki		354	809	20		2 970
Ruokohelppi		51	570	15		2 120
Rypsin ja rapsin olki		63	157	20		622
Yht.		467	1 540			5 720
Ruoppausmassa		5	41 300	89	1 910	
Järviruoko		93	791	20		2 970
Yht.		98	42 000		1 910	2 970
Metsäbiomassa		780	5 750	39		17 700
<b>Yhteensä</b>	<b>10 500</b>	<b>1 350</b>	<b>5 750</b>		<b>6 740</b>	<b>26 400</b>
<b>Energian tuotanto</b>						
Lämpökattila	Lämpö [MWh/a]				3 640	23 800
CHP	Lämpö [MWh/a]				2 430	15 800
	Sähkö [MWh/a]				1 210	7 920

### 7.2.5 Skenaario 5: Hajautettu mädätys

Skenaariossa 5 lähtökohtana on kaksi mädätyslaitosta, joista toinen sijaitsee etelässä (mädätyslaitos 1) esim. Sikacon tai Parikkalan jätevedenpuhdistamon luona ja toinen sijaitsee Parikkalan pohjoisosassa (mädätyslaitos 2). Mädätettävät ja poltettavat määrät ovat samat, kuin skenaariossa 4. Pohjoisen laitoksessa mädätettäisiin neljän ympäristöluvan saaneen tilan lannat sekä Parikkalan pihviltä muodostuneet lannat. Eteläiseen laitokseen menee käsittelyyn neljän ympäristöluvan omaavan tilan lannat, puhdistamon liete sekä ruoppausmassa. Polttoon menevät kaikki samat jakeet, kuin skenaariossa 4 (peltobiomassa, metsäbiomassa sekä järviruoko), sillä vertaamalla skenaarioita 3 ja 4 huomataan, että näistä materiaaleista saadaan enemmän energiaa polttamalla. Taulukkoon 7 ja 8 on koottu mädätyslaitos 1:ssä ja 2:ssa käsiteltävät materiaalit ja muodostuvan biokaasun energiat ja taulukkoon 9 on koottu poltettavat materiaalit ja niiden sisältämät energiat sekä taulukossa 10 on näitä polttoaineita hyödyntämällä saatavat energiamäärät.

**Taulukko 7.** Mädätyslaitos 1:ssä käsiteltävät biomassat ja biokaasun sisältämä energia.

Biomassa	Määrä [kpl]	Pinta-ala [ha]	Massa [t/a]	Kosteus [p-%]	Biokaasu 1 [MWh/a]
Lanta					
Naudat	517		9 340	94	1 120
Siat	8 910		12 900	95	1 970
<b>Yht.</b>	<b>9 420</b>		<b>22 200</b>		<b>3 090</b>
Jätvesiliete			494	85	59
Ruoppausmassa		5	41 300	85	1 910
<b>Yhteensä</b>	<b>9 420</b>	<b>5</b>	<b>64 000</b>		<b>5 050</b>

**Taulukko 8.** Mädätyslaitos 2:ssa käsiteltävät biomassat ja biokaasun sisältämä energia.

Biomassa	Määrä [kpl]	Massa [t/a]	Kosteus [p-%]	Biokaasu 2 [MWh/a]
Lanta				
Naudat	1 090	14 200	94	1 690
<b>Yht.</b>	<b>1 090</b>	<b>14 200</b>		<b>1 690</b>

**Taulukko 9.** Polttoon menevät biomassat ja niiden sisältämä energia.

Biomassa	Pinta-ala [ha]	Massa [t/a]	Kosteus [p-%]	Kiinteä pa [MWh/a]
Viljan olki	354	809	20	2 970
Ruokohelppi	51	570	15	2 120
Rypsin ja rapsin olki	63	157	20	622
<b>Yht.</b>	<b>467</b>	<b>1 540</b>		<b>5 720</b>
Järviruoko	93	791	20	2 970
Metsäbiomassa	780	5 750	39	17 700
<b>Yhteensä</b>	<b>1 340</b>	<b>8 080</b>		<b>26 400</b>

**Taulukko 10.** Biokaasun ja poltettavien jakeiden hyödyntämisestä saatavat energiamäärät.

Käsittelytapa	Energia [MWh/a]	Energia (hyöd.) [MWh/a]	Lämpökattila Lämpö [MWh/a]	CHP	
				Lämpö [MWh/a]	Sähkö [MWh/a]
Mädätys 1	5 050	3 030	2 730	1 820	910
Mädätys 2	1 690	1 010	912	608	304
Poltto	26 400		23 800	15 800	7 920
<b>Yhteensä</b>	<b>33 100</b>		<b>27 400</b>	<b>18 300</b>	<b>9 130</b>

## 7.2.6 Skenaario 6: Parikkalan alueen suurin lypsykarjatila

Tässä skenaariossa tarkastellaan biokaasun tuotantoa Parikkalan alueen suurimmalta lypsykarjatilalta (tila A) muodostuvasta lannasta. Taulukkoon 11 on koottu eläin- ja lantamäärät sekä saatavan biokaasun energia sekä biokaasun polttamisessa lämpökatti-

lassa tai yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa saatavat energiamäärät. Sähköä kyseisellä tilalla kuluu noin 210 MWh/a. Tilalla kuluu viljan kuivaukseen kevytöljyä 7 000 l/a (68,9 MWh/a) ja kuumaa vettä 1 000 l/d (19 MWh/a). Yhteensä lämmön tarvetta olisi noin 88 MWh/a. Taulukossa 11 ilmoitettuja yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotantoja ja edellä mainittuja energiankulutuksia vertaamalla huomataan, että tuotettu sähkö voitaisiin kokonaan käyttää tilalla, mutta tuotetusta lämmöstä voitaisiin hyödyntää vain osa. Lämmön kulutusta voitaisiin lisätä rakentamalla vesikierto asuintaloon.

**Taulukko 11.** Eläin- ja lantamäärät, biokaasun sisältämä energia sekä hyötykäytössä saatavat energiat. skenaariossa 6.

Eläimet	Määrä	Massa	Kosteus	Biokaasu	Lämpökattila	CHP	
	[kpl]	[t/a]	[%]	[MWh/a]	Lämpö [MWh/a]	Lämpö [MWh/a]	Sähkö [MWh/a]
Lypsylehmät	175	5 940	94	714			
Hiehot	100	899	94	108			
Vasikat	75	225	94	27			
<b>Yht</b>	<b>350</b>	<b>7070</b>		<b>849</b>	<b>458</b>	<b>306</b>	<b>153</b>

### 7.3 Biomassojen energian hyödyntäminen

Mädätyslaitoksen sijaintia mietittäessä pitää lietteen tuotantopaikkojen lisäksi ottaa huomioon myös energian hyödyntäjä. Sähkön osalta ei ole niin kriittistä, sillä sähkö voidaan syöttää verkkoon, mutta tuotetulle lämmölle pitäisi löytää lämmönkuluttaja läheltä. Karjatilojen energiakulutuksia selvitettiin puhelinkyselyn avulla. Suurimpien tilojen energiakulutukset on koottu taulukkoon 12. Liitteessä 1 olevassa taulukossa 1 on eritelty tarkemmin tarkastelussa huomioon otetut tilat ja niiden lannoista saatavan biokaasun energia sekä kyselyistä saadut sähkönkulutukset sekä haastattelujen perusteella lasketut sähköenergiasta riippumattomat lämpöenergian tarpeet.

Tilan A lämmön tarpeen määrittely on selvitetty skenaario 6 - kappaleessa. Tilan B lämmön kulutus tarkoittaa hakekattilassa (460 kW) ja pellettikattilassa (50 kW) käytettyjä polttoaineita. Tiloilla C ja F ei ole korvattavaa lämmön kulutusta, sillä kummallakaan tilalla ei ole hakekattilaa. Tilalla F ei ole viljan kasvatusta ja tilalla C käytetään biodieseliä viljan kuivaukseen. Tiloilla G ja E on hakekattilat: tilalla G 35 kW ja tilalla E 50 kW, mutta tiloilla ei kulu viljan kuivaukseen öljyä, sillä tilalla G viljaa ei juuri ole ja

tilalla E kuivaus on ulkoistettu. Tiloilla D ja H käytettiin viljan kuivaukseen öljyä: tilalla D 1000 l/a ja tilalla H 6500 l/a. Tilalla D on myös hakekattila (50 kW).

Tiloilla, joilla ei ole hakekattilaa käytetään osin taloissa sähkölämmitystä sekä puutakkoja ja uuneja. Parikkalan alueelle tulevan nautakasvattamon I (Parikkalan pihvi) lämmön- ja sähkönkulutusta ei ole taulukossa 12, sillä kyseinen tila on vielä rakentamatta ja odottaa ympäristölupaa. Vertaamalla näitä lämmön ja sähkön kulutuksia skenaarioissa 3 – 5 laskettuihin määriin huomataan, että tämän kokoluokan biokaasulaitoksen rakentaminen tilan energiantarpeeseen ei ole järkevää. Ainoastaan tilalla B (Sikaco) voisi olla mahdollista hyödyntää esim. skenaariossa 5 mädätyslaitos 1:n tuottama lämpö sähkön ja lämmön yhteistuotannossa.

Maatilojen lisäksi biokaasun ja biomassojen hyödyntämiskohteita voisivat olla esimerkiksi lämpökeskus, kasvihuoneet tai jäteveden puhdistamo. Parikkalassa on ainakin kaksi puutarhaa, Koirniemen ja Revon puutarhat. Koirniemen puutarhalla kuluu polttoöljyä 60 t/a (712 MWh/a) ja sähköä 28,2 MWh/a (Kettunen 2008). Revon puutarhalla kuluu öljyä 15 m<sup>3</sup>/a (155 MWh/a) ja puutarha on vain osan vuodesta toiminnassa (Repo 2008). Parikkalassa sijaitsevan Särkisalmen jätevedenpuhdistamon vuotuinen sähkönkulutus on ollut noin 345 MWh (Kaikkonen et al. 2007, 8). Puhdistamon viereen ei kuitenkaan mahdu rakentamaan mädätyslaitosta. Yksi vaihtoehto voisi myös olla hajautetussa käsittelyssä olevan mädätyslaitos 2 kokoisen biokaasulaitoksen Koirniemen puutarhan lähelle ja hyödyntäisi lämmön puutarhalla ja sähkön Särkisalmen jätevedenpuhdistamolla. Mädätteestä voisi myös mahdollisesti kuivata osan ja käyttää sitä puutarhalla lannoitteena.

Lämpökeskus myy lämpöä keskimäärin 11 500 MWh/a (Asikainen 2008). Vuonna 2002 kaukolämmön myynti on ollut 10 090 MWh/a ja energiantuotanto 12 084 MWh/a, eli kaukolämmön jakelun hyötysuhde on 83,5 %:a. Käyttämällä samaa hyötysuhdetta nykyisin tuotettu energiamäärä olisi 13 773 MWh/a. Kattiloiden hyötysuhde on noin 89 % (Monto 2004, 5), joten polttoaine-energian määrä on 15 500 MWh/a. Polttoaine-energiasta suurin osa tulee kokopuu- ja rankahakkeesta (Monto 2004, 3) ja lisäksi käytetään 220 t/a (noin 2 510 MWh/a) raskasöljyä (Asikainen 2008). Hakekattilan osalta voi-

taisiin ajatella peltobiomassojen (ruokohelvi sekä oljet) ja järviruo'on käyttöä. Pohjoisessa Keski-Suomessa sijaitsevan Kinnulan kunnan lämpölaitoksessa (6 MW hakekattila) on tehty koepolttoja ruokohelven ja hakkeen seospoltolla ja sen on todettu toimivan hyvin (Sauranen 2007). Ruokohelven osuus polttoainetehosta ei voi kuitenkaan olla ilman käsittelylaitteistojen muutoksia yli 10 % eli tässä tapauksessa 1 550 MWh/a (Alakangas 2000, 107). Ruokohelven käyttöpotentiaali olisi kuitenkin noin 2 120 MWh/a (esim. skenaario 4) ja peltobiomassojen yhteensä 5 720 MWh/a. Raskasta polttoöljyä voitaisiin korvata biokaasulla, sillä poltto onnistuisi raskaspolttoöljykattiloissa polttimen vaihdon avulla. Korvattava polttoöljyllä tuotettu lämpö määrä on 2 330 MWh/a ja hajautetussa tuotannossa (skenaario 5) syntyy mädätyslaitoksessa 1 lannasta ja lietteestä noin 1 700 MWh/a lämpöä ja yhdessä ruoppausmassan kanssa 2 730 MWh/a lämpöä.

Parikkalassa sijaitsee myös Saaren (600 kW) ja Uukuniemen lämpökeskus (240 kW). Molemmat käyttävät haketta. Uukuniemen lämpökeskus on hyvin pieni ja lämpöä menee vain yhteen kiinteistöön. Saaren lämpökeskuksella käytetään haketta, mutta hakkeen palaminen on usein ongelmallista. Tämä johtuu kosteudesta ja siitä, että pienemmät laitokset vaativat korkeampilaatuisen polttoaineen. Lämpökeskuksella käytetään kesällä kevytöljyä, mutta usein joudutaan myös talvella turvautumaan kevytöljyyn. (Asikainen 2008). Saaren laitoksella poltetaan haketta 4 500 – 5 000 m<sup>3</sup>/a (2 990 – 3 320 MWh/a) ja vuonna 2007 myyty energia oli 3 200 MWh, mikä tarkoittaa 90 % hyötysuhteella 3 560 MWh/a polttoaine-energiaa (Saukkonen 2008). Saaren laitoksen läheisyys voisi olla optimaalinen sijoituspaikka biokaasulaitokselle.

**Taulukko 12.** Lämmön- ja sähkön kulutuksia.

Tila	Energian kulutus		Hakekattila kyllä/ei
	Lämpö [MWh/a]	Sähkö [MWh/a]	
A	88	209	ei
B	1970	200	kyllä
C	0	125	ei
D	89	40	kyllä
E	115	80	kyllä
F	0	135	ei
G	66	137	kyllä
H	67	80	ei
Koirniemen puutarha	712	28	
Revon puutarha	155		
Parikkalan lämpökeskus	13 800		
Saaren lämpökeskus	3 560		
Särkisalmen puhdistamo		345	

## 7.4 Ravinteiden määrät

Tässä työssä tarkastellaan myös käsittelyn vaikutuksia lopputuotteen ravinnepitoisuuksiin. Typeä voi hävitä mädätysprosessissa vain nitraattien pelkistyessä typpikaasuksi tai ammoniakkin haihtuessa biokaasuun. Koska lannassa on hyvin vähän nitraatteja, pelkistymisen aiheuttamat häviöt ovat merkityksettömiä. (Marchaim 1992). Taulukkoon 13 on kerätty käsittelemättömän lannan ja mädätteen sisältämien ravinteiden määrä. Laskennassa on oletettu, että itse mädätysprosessissa ei tapahdu häviöitä. Käsittelemättömän lannan typpi- ja fosforipitoisuudet on saatu viljavuuspalvelu Oy:n vuosina 2000 – 2004 tekemistä karjanlanta-analyyseistä (Viljavuuspalvelu Oy 2008). Mädätteessä olevan liukoisen pitoisuuden on oletettu olevan 20 % enemmän kuin nautojen käsittelemättömän lannan. Sikojen lannassa ei tapahdu muutosta. (Taavitsainen et al. 2002, 18) Mädätys lisää siis liukoisen typen määrää noin 7 600 kg/a.

**Taulukko 13.** Aktiivilannan ja mädätteen sisältämien ravinteiden määrä ja liukoisen typen osuuden kasvu.

Tila	Lanta	Määrä m <sup>3</sup> /a	Aktiivilanta				Mädäte	
			kok. N kg/a	liuk. N kg/a	fosfori kg/a	liuk N / kok N %	liuk N kg/a	liuk. N /kok. N %
A	liete	5 600	16 800	10 100	2 800	60	12 100	72
	kuiva	100	300	180	50	60	216	72
B	liete	12 000	45 600	30 000	9 600	66	30 000	66
C	liete	1 500	4 500	2 700	750	60	3 240	72
	kuiva	400	1 200	720	200	60	864	72
D	liete	850	2 550	1 530	425	60	1 840	72
E	liete	2 500	7 500	4 500	1 250	60	5 400	72
	kuiva	500	1 500	900	250	60	1 080	72
F	liete	2 500	7 500	4 500	1 250	60	5 400	72
G	liete	2 000	2 550	1 530	425	60	1 840	72
H	liete	3 700	11 100	6 660	1 850	60	7 990	72
I	kuiva	6 000	18 000	10 800	3 000	60	13 000	72
<b>YHT</b>			<b>119 000</b>	<b>74 100</b>	<b>21 900</b>		<b>82 900</b>	

Skenaariossa 3 tulee mädätteeseen tyyppiä lisäksi peltobiomassojen ja järviruo'on mädätyksestä. Tämän takia pitääkin laskea myös näiden materiaalien mukana tuleva typpi sekä liukoisen typen osuus mädätetyssä materiaalissa. Oljen kokonaistypin määrä on 0,5 % kiinto-aineesta, ruokohelven 1,8 % kiintoaineesta ja rypsin sekä rapsin oljen 1,6 % kiintoaineesta (Lehtomäki 2006, 27). Järviruo'on kokonaistypin määrälle on käytetty samaa arvoa kuin ruokohelvelle. Mädetyn materiaalin liukoisen typen osuuden on havaittu olevan sokerijuurikkaan naateille 88 %, nurmiapilalle 29 % ja pajulle 18 % (Lehtomäki 2006, 62). Tässä työssä on peltobiomassojen ja järviruo'on liukoisen typen osuutena mädätteessä käytetty 30 %:a. Taulukossa 14 on ilmoitettu peltobiomassojen ja järviruo'on kiintoaineiden määrät sekä kokonaistypen ja liukoisen typen määrä mädätteessä. Skenaariossa 4 ja 5 kyseiset materiaalit poltetaan ja taulukossa 14 ilmoitettu typpi menetetään. Tällöin menetetään se hyöty, mikä tyypestä olisi lannoitekäytössä ja joudutaan korvaamaan se lannoitteilla.

**Taulukko 14.** Peltobiomassojen kiintoainemäärä ja mädätteen kokonaistypen ja liukoisen typen määrä

Peltobiomassa	Massa [t <sub>TS</sub> /a]	Kokonaistyyppi (TN)		Liukoinen typpi	
		[% TS:stä]	[kg/a]	[% TN:stä]	[kg/a]
Olki	647	0,5	3 240	30	971
Ruokohelpi	484	1,8	8 720	30	2 610
Järviruoko	791	1,8	14 200	30	4 270
Rypsi, Rapsi olki	126	1,6	2 010	30	603
<b>Yhteensä</b>	<b>2 050</b>		<b>28 200</b>		<b>8 460</b>

## 7.5 Kuljetuksen kustannukset

Keskitetyssä mädätyksessä laitoksen sijainti on tärkeä, sillä lannan kuljetuksen muodostavat suuren osan kustannuksista. (Taavitsainen et al. 2002 liite 2, 2). Kuljetukset tilojen ja laitosten välillä hoidetaan yleensä menopaluu kuljetuksina, jolloin haettaessa uutta mädätettävää lantaa viedään tilalle mädätettä. Tällöin tilalla täytyy olla säiliöt mädätteelle ja käsittelemättömälle lannalle. Mädate voi olla järkevää viedä myös suoraan peltojen läheisyydessä oleviin etäsäiliöihin. Kuljetukset kannattaa tehdä yli 5 km:n matkoilla kuorma-autoilla ja muuten traktorilla. (Taavitsainen et al. 2002, 36).

Mädätteen hyötykäytössä on vaihtoehtoina mädätteen hyötykäyttäminen sellaisenaan tai mädätteen kuivaaminen ja jäteveden käsittely. Mädätteen hyödyntäminen sellaisenaan kannattaa lyhyillä välimatkoilla, esimerkiksi alle 20 km. Mikäli etäisyydet ovat pidemmät, kannattaisi käyttää säiliöautoa tai poistaa osa vedestä ja käyttää kuorma-autoa. (Bioste Oy 2007,10). Mädate voidaan myös kuivata, jolloin säästettäisiin mädätteen kuljetuskustannuksista. Kuitenkin useilla tiloilla on jo valmiiksi kalusto lietemäisen aineksen levitykseen, jolloin jouduttaisiin hankkimaan laitteet tai urakoitsija kuivan materiaalin levitykseen. Ongelmana olisi myös kuivauksesta muodostuva rejektivesi. Yksi ratkaisu olisi mädätyslaitoksen sijoittaminen jätevedenpuhdistamon läheisyyteen, mutta tällainen ei onnistu Parikkalassa, sillä puhdistamon läheisyydessä ei ole tarpeeksi tilaa, eivätkä puhdistamokapasiteetti ja tekniikka ole soveltuvia erotetun rejektiveden käsittelyyn. Ravinteista erityisesti vesiliukoinen tyyppi jäisi jäteveteen, vaikka sitä tarvittaisiin pelloille. (Bioste Oy 2007,12). Rejektivesi voitaisiin myös ajaa sellaisenaan lähipelloille lannoitteeksi siinä määrin kuin ravinnerajoitukset sallivat. Lietteen tyyppi on levitettävissä pienemmälle peltopinta-alalle kuin sen sisältämä fosfori.

Taulukkoon 15 on laskettu kuljetuksen aiheuttamia polttoaineen kustannuksia keskitetyssä ja hajautetussa mädätyksessä, kun mädätettä ei kuivata ja mädätteen kuljetus tapahtuu haettaessa tuoretta lantaa mädätyslaitokselle. Keskitetyssä mädätyksessä on laskettu kuljetuskustannukset kolmelle eri sijaintikohteelle. Hajautetussa mädätyksessä kuljetetaan sama määrä lantaa ja mädätettä, mutta kuljetukset tapahtuvat kahteen eri laitokseen. Pohjoisen laitoksen on ajateltu sijaitsevan Saaren lämpökeskuksen luona ja



eteläisen laitoksen kohdalla on pohdittu kolmea eri vaihtoehtoa. Kuljetuksia laskettaessa on oletettu, että kuljetuskoko on  $15 \text{ m}^3$ , polttoaineen kulutus on  $30 \text{ l}/100\text{km}$  (Mäkelä et al. 2008; Uimonen 2008), dieselin tiheys  $0,824 \text{ kg/l}$  ja lämpöarvo  $43 \text{ MJ/kg}$  (Motiva). Dieselin hinnan on oletettu olevan  $1,0 \text{ €/l}$ . Kuljetusmatkat on saatu osoitteiden perusteella internetissä olevien karttojen avulla. Hajautetussa mädätyksessä on laskettu yhteen molempien laitosten kuljetuskustannukset. Polttoainekustannusten lisäksi kuljetuskustannuksiin kuuluvat kalustokustannukset, ajajien palkkakustannukset ja muut kustannukset, joita tässä työssä ei ole selvitetty.

**Taulukko 15.** Polttoainekustannukset lannan ja mädätteen kuljetuksessa.

Polttoainekustannukset €/a						
Massa	Keskitetty mädätys			Hajautettu mädätys		
t/a	Parikkalan lämpökeskus	Tila B	Saaren lämpökeskus	Parikkalan & Saaren lämpökeskus	Tila B & Saaren lämpökeskus	Tila A & Saaren lämpökeskus
36 400	25 800	23 000	25 600	14 900	11 500	17 800

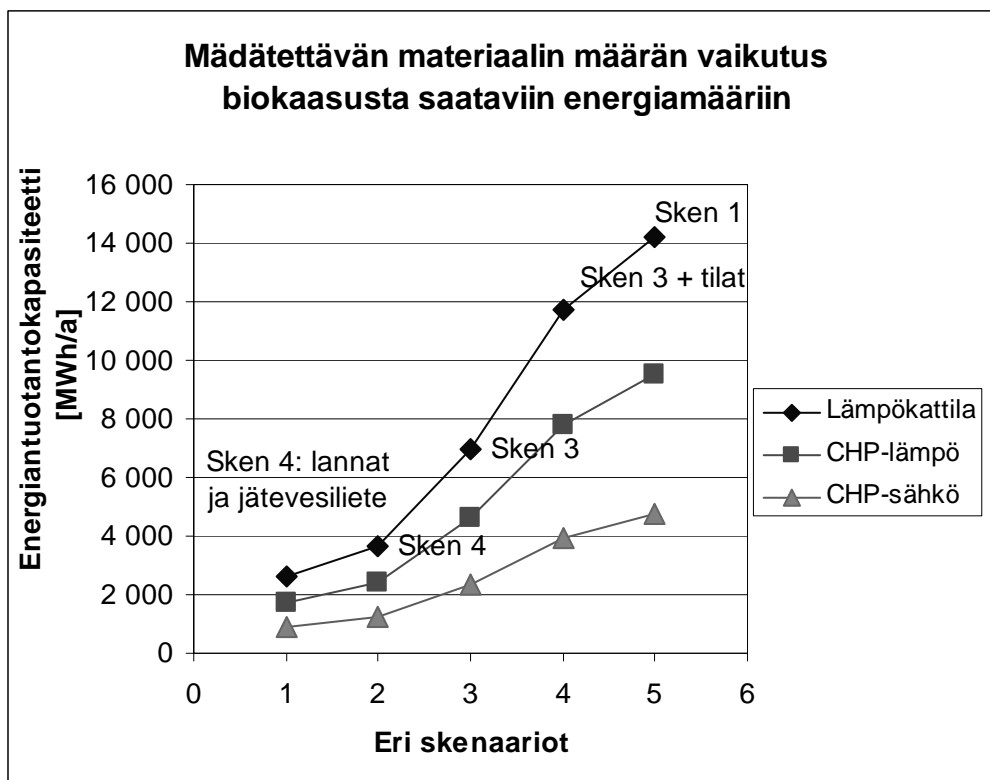
## 7.6 Herkkyystarkastelu

Tässä kappaleessa tarkastellaan energiamäärien laskuihin epävarmojen suureiden vaikuttavuutta saatuihin tuloksiin. Tarkasteltavia suureita ovat mädätettävän massan määrä, omakäyttöenergian osuus sekä viljan oljen määrä.

Mädätettävän materiaalin määrää on tarkasteltu eri skenaarioiden massojen avulla. Alimpana massamääränä (kuva 14, x-akselilla luku 1) on skenaariossa 4 mädätettävät materiaalit ilman ruoppausmassaa ( $36\,900 \text{ t/a}$ ) ja seuraavaksi suurempana massana on skenaariossa 4 mädätettävät materiaalit ( $78\,900 \text{ t/a}$ ) (kuva 14, x-akselilla luku 2). Tämän jälkeen on skenaariossa 3 mädätettävät materiaalit ( $80\,800 \text{ t/a}$ ) (kuva 14, x-akselilla luku 3) ja skenaariossa 3 mädätettävät materiaalit sekä suurimpien tilojen läheisyydessä olevista tiloista saatavat mädätettävät lannat sekä peltobiomassat ( $122\,000 \text{ t/a}$ ) (kuva 14, x-akselilla luku 4) sekä skenaariossa 1 (maksimimädätys) mädätettävät materiaalit ( $138\,000 \text{ t/a}$ ) (kuva 14, x-akselilla luku 5). Tiloilta saatavat peltobiomassat saadaan laskettua vertaamalla lantojen määrää koko lantojen määrään ja kertomalla tällä koko pel-

tobiomassojen määrä, samalla tavalla kuin skenaariossa 3 ja 4 on laskettu. Kuvassa 14 on esitetty mädätettävän materiaalin määrän vaikutus saataviin energiamääriin.

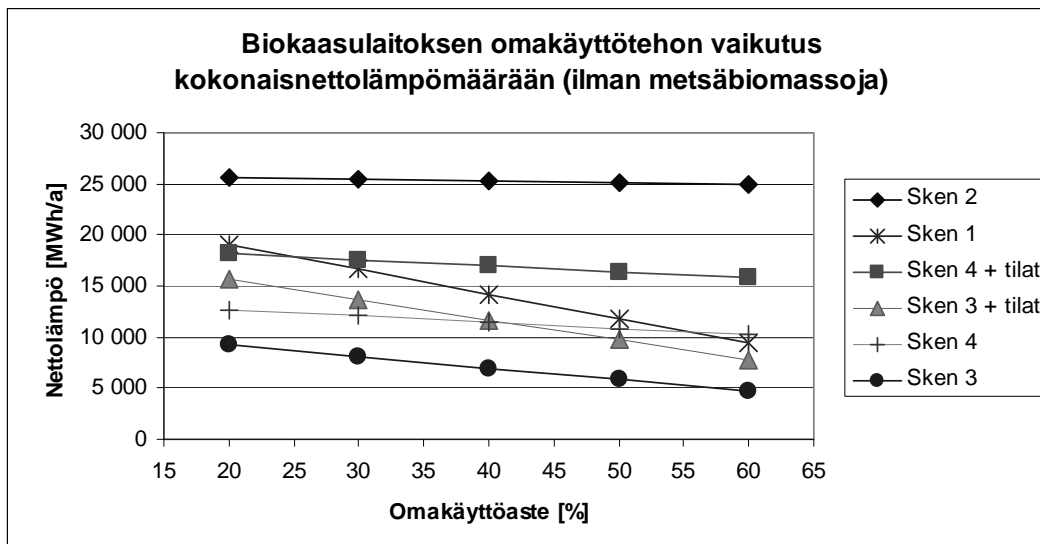
Kuvasta huomataan, että keräämällä mädätettävää materiaalia tarkemmin suurempien tilojen läheisyydestä päästään skenaariossa 3 olevasta energiamäärästä 7 000 MWh/a 12 000 MWh:iin. Tällöin joudutaan tietysti kuljettamaan myös materiaaleja paljon enemmän.



**Kuva 14.** Mädätettävän materiaalin määrän vaikutus biokaasusta saataviin energiamääriin.

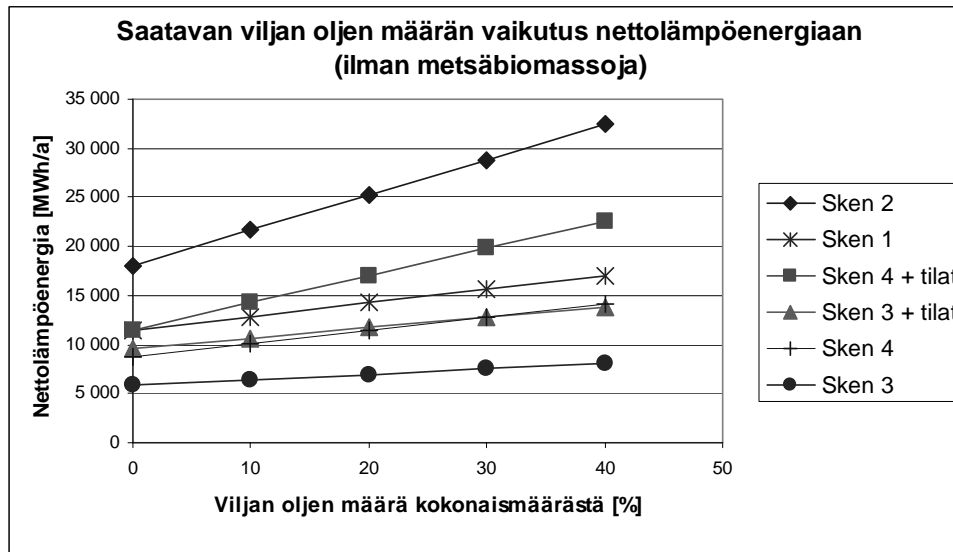
Herkkyystarkastelussa on tarkasteltu myös biokaasulaitoksen omakäyttöenergian osuuden vaikutusta eri skenaariosta saataviin nettolämpömääriin ilman metsäbiomassoja. Tämä tarkastelu on esitetty kuvassa 15. Sellaisissa skenaarioissa, missä hyödynnetään enemmän mädätystä, on luonnollisesti omakäyttötöehon vaihtelulla enemmän vaikutusta. Suurin vaikutus onkin skenaariossa 1, missä kaikki mahdolliset jakeet mädätetään. Kuvassa on myös esitetty skenaario 4, johon on lisätty 9 tilan lannoista saatavan biokaasun energiamäärä sekä peltobiomassojen poltosta saatava energiamäärä. Kuvasta 15 huoma-

taan, että omakäyttöasteen kasvaessa yli 25 %:n, saadaan skenaariossa 4 sekä ympäröivien tilojen biomassoilla enemmän energiaa kuin skenaariossa 1.



**Kuva 15.** Määtettävän materiaalin määrän vaikutus biokaasusta saataviin energiamääriin.

Hyötykäyttöön saatavan viljan oljen määrä oli myös kohtuullisen epävarma ja saatavan viljan oljen määrää on myös vaihdeltu herkkyytarkastelussa. Kuvassa 16 on esitetty oljen määrän vaikutusta eri skenaarioista saataviin nettolämpöenergiamääriin. Viljan oljen määrällä on suurempi vaikutus sellaisissa skenaarioissa, jossa se poltetaan, koska poltosta saatava energiamäärä on suurempi kuin mädätyksessä saatava. Mikäli viljan olkea ei saataisi yhtään hyötykäyttöön, olisi skenaariosta 1 ja skenaariosta 4, johon ohjattaisiin myös ympärillä olevien suurempien tilojen lannat ja peltobiomassat, saatava energiamäärä yhtä suuri.



Kuva 16. Määtettävän materiaalin määrän vaikutus biokaasusta saataviin energiamääriin.

## 8 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä on tarkasteltu biomassojen käsittelyä mädätyksen, kompostoinnin ja polton kannalta sekä selvitetty biomassojen hyödyntämismahdollisuuksia Parikkalassa. Diplomityössä on selvitetty biomassojen ominaisuuksia kyseisten tekniikoiden kannalta, biomassojen käsittelyä ja lopputuotteiden hyödyntämistä. Parikkalan alueelta on selvitetty biomassojen nykyinen hyötykäyttö sekä poltto- ja mädätystekniikan käyttömahdollisuudet tulevaisuudessa.

Mädätyksen kannalta tärkeimpiä biomassojen ominaisuuksia ovat kiintoainepitoisuus, orgaanisen aineen pitoisuus, ravinnepitoisuus ja orgaanisen aineksen biohajoavan materiaalin osuus. Nämä tekijät vaikuttavat biomassasta saatavaan metaanintuottopotentiaaliin. Raaka-aineiden käyttöominaisuudet kompostointiprosessin kannalta määräytyvät kosteuden, ravinnepitoisuuden, lahoamistaipumuksen ja rakenteen pysyvyyden sekä epäsuotuisien aineiden pitoisuuden mukaan. Kosteuspitoisuuden tulisi kompostointiprosessissa olla välillä 50 – 60 %. Polton kannalta tärkeitä ovat kosteus, kuiva-aineen lämpöarvo, koostumus, tuhkan määrä ja sen ominaisuudet.

Lanta voidaan levittää pelloille sellaisenaan. Lannan levitysmääriä rajoittavat ravinteiden määrät. Fosforia saa levittää kasvista ja viljavuusluokasta riippuen keskimäärin 15 – 30 kg/ha ja typpeä saa levittää nitraattiasetuksen (VNa 931/2000) mukaisesti sellaisen määrän, joka vastaa enintään 170 kg/ha/vuosi typpeä.

Mädätykseen mahdollisesti saatavista massoista huomattavasti suurin Parikkalassa on maatiloilla muodostuvat lannat. Muodostuvan biokaasun määrät vaihtelevat lähteissä hyvinkin paljon. Lehmän lannalle biokaasumäärät vaihtelevat välillä 200 – 600 m<sup>3</sup>/t<sub>VS</sub>, sian lannalle 250 – 900 m<sup>3</sup>/t<sub>VS</sub> kanan lannalle 300 – 800 m<sup>3</sup>/t<sub>VS</sub>. Mädätyksessä saavutetaan parempi biokaasun tuotto mädättämällä lantaa yhdessä maataloudessa muodostuvien peltobiomassojen, kuten oljen kanssa. Ruoppausmassan mädätyksestä muodostuu vain vähän biokaasua ja massan saatavuus on myös ajoittaista. Biojäte ja yhdyskuntaliete pystytään myös hyvin hyödyntämään mädättämällä, mutta näiden massojen määrät ovat lantoihin nähden vähäisiä Parikkalassa. Mädätettävän materiaalin sekoituksella ei ole juuri vaikutusta alhaisen kiintoainepitoisuuden lietelannan käsittelyssä, mutta saakeammalla lietteellä (10 – 15 %) voidaan sekoittamisella tuottaa 10 – 30 % biokaasua. Lantojen käsittelyssä saadaan kaksivaiheisella mädätyksellä myös enemmän biokaasua. Esimerkiksi lehmän lannan mädätyksessä on saatu 6 – 8 % enemmän biokaasua kaksivaiheisella termofiilisella mädätyksellä verrattuna yksivaiheiseen.

Puun poltossa tuhkan käyttäytymisestä aiheutuvat ajonaikaiset ongelmat ja lisääntynyt huollon tarve voivat lisätä energian tuotannon kustannuksia merkittävästi. Polttoominaisuuksien kannalta on merkitystä poltetaanko puuta yksin vai käytetäänkö seospolttoa rikkiä sisältävien polttoaineiden kanssa. Metsähakkeen pienikin klooripitoisuus nimittäin aiheuttaa haitallisia alkalikloridikerrostumia. Poltettaessa esimerkiksi rikkiä sisältävän turpeen kanssa ei vastaavaa kerrostumaa synny ja puun alkalisen tuhka tehostaa myös rikinsidontaa.

Poltolla pystytään saavuttamaan peltobiomassoista sekä järviruo'osta enemmän energiaa kuin mädättämällä. Peltobiomassojen ja järviruo'on poltto tapahtuu tavallisille kiinteille polttoaineille suunnitelluissa kattiloissa seospolttona turpeen tai hakkeen kanssa, koska yksin poltettuna palamislämpötila nousee hyvin korkeaksi ja kevyttä silppua ei

pystytä syöttämään riittävällä teholla. Poltto-ominaisuudet ovat paremmat keväällä korjattuna, kuin syyskorjattuna, koska kosteus ja klooripitoisuus ovat aikaisemmin korjattussa suurempi. Jätevesilietteen ja lietelantojen lantojen poltto ei ole järkevää, sillä nämä massat ovat hyvinkin kosteita ja vaatisivat mekaanista kuivausta ja tukipolttoainetta. Lisäksi näiden materiaalien poltto vaatisi jätteenpolttolaitoksen.

Biokaasua voidaan hyödyntää sähkön- tai lämmön yhteistuotannossa, pelkässä sähkön- tai lämmöntuotannossa tai siitä voidaan jalostaa liikennepolttoainetta. Sähköntuotantoon käytetyimpiä tekniikoita ovat kaasumootorit ja mikroturbiinit. Lämmöntuotannossa voidaan käyttää lämpökattilaa. Mädate voidaan hyödyntää lannoitteena tai maanparannusaineena. Mädätyksellä käsitellyn lannan lannoittavat ominaisuudet ovat yleensä paremmat kuin käsittelemättömän lannan. Mädate on homogeenisempaa ja helpommin käsiteltävää. Mädätyksessä myös osa orgaanisesta tuestä muuttuu liukoiseen muotoon, joka välittömästi kasvien hyödynnettävissä mädätteen levittämisen jälkeen.

Kompostia pystytään hyödyntämään maataloudessa, puutarhaviljelyssä, luonnonmukaisessa viljelyssä, viherrakentamisessa, maisemoinnissa sekä metsätaloudessa. Tuhkaa pystytään hyödyntämään metsälannoitteena, rakentamisessa. Metsälannoitukseen kelpaa puun ja turpeen tuhka. Jos haitallisten aineiden pitoisuudet ovat suuret tai tuhka ei muuten sovi hyötykäyttöön, se sijoitetaan kaatopaikalle.

Parikkalassa Maatilojen lietteet ja lannat levitetään nykyisin pelloille. Erilliskerätty biojäte kuljetetaan käsiteltäväksi Etelä-Karjalan jätehuolto-yhtiön toimesta Kukkuroinmäen jätekeskukselle Joutsenoon ja yhdyskuntaliete kompostoidaan aumassa. Vesistöjen kunnostuksen biomassoja on aikaisemmista kunnostustoimista levitetty lähialueen pelloille lannoitteeksi. Peltobiomassoista on viljakasvien olkia käytetty kuivikkeena tiloilla ja olkea on myös aurattu maahan. Puubiomassoja käytetään Parikkalan keskustan, Uukuniemen kirkonkylän ja Saaren kirkonkylän lämpökeskuksissa.

Alueella on paljon biokaasulaitoksessa hyödynnettävää biomassapotentiaalia. Materiaaleista huomattavin on karjatilojen lannat, joiden kaasuntuottopotentiaali on noin 48 % koko alueen enimmäispotentiaalista. Myös jätevesiliete voidaan hyvin ohjata mädätyk-

seen ja vaikka erilliskerätty biojäte nykyään meneekin Etelä-Karjalan jätehuoltoyhtiölle, myös sen voisi tulevaisuudessa ohjata biokaasulaitokselle. Ruoppausmassasta saataisiin jonkin verran biokaasua, mutta Siikalahdelta sitä tulee vain jos siellä tehdään kunnostustoimenpiteitä. Tällaiset satunnaiset erät olisikin ehkä perustellumpaa ohjata pellon lannoitukseen. Järviruokoa ei voida eläinrvojen takia ainakaan Siikalahdelta korjattua vihreänä, joten ainoastaan talvikorjaus on mahdollinen ja tällöin sen voisi ohjata polttoon. Myös peltobiomassat tuottavat energiaa enemmän polttamalla. Järviruo'on sekä peltobiomassojen poltosta kannattaisi ehkä testata nykyisillä lämpökeskuksilla, miten paljon pystytään polttamaan ja miten syöttölaitteet toimivat kyseisillä materiaaleilla. Parikkalan alueella on myös paljon metsäbiomassapotentiaalia.

Ongelmana niin keskitetyssä, kuin hajautetussa mädätyksessä on sopivan lämmönkulutuskohteen löytäminen. Sähkön hyödyntämisessä ei sinänsä ole ongelmaa, sillä ylimääräsähkö voidaan myydä verkkoon. Kuljetuskustannukset ovat myös merkittävässä osassa hyödyntämisvaihtoehtoja mietittäessä. Kuljetuskustannukset ovat huomattavasti pienemmät hajautetussa mädätyksessä verrattuna keskitettyyn mädätykseen. Hajautetussa mädätyksessä taas investointikustannukset ovat suuremmat kuin keskitetyssä mädätyksessä.

Parikkalan kunnan lämpölaitos voisi luultavasti hyödyntää keskitetyssä mädätyksessä muodostuvan biokaasun määrän, mutta kuljetusmatkat ovat pitkiä. Hajautetussa mädätyksessä eteläisen laitoksen voisi perustaa Sikacon luokse, varsinkin jos tulevaisuudessa rakennetaan lisäksi lihasikala (3 000 tai 6 000 lihasikaa). Parikkalan keskustan lämpölaitoksella raskaan polttoöljyn kattilassa voidaan polttaa biokaasua tarvittavien poltin muutosten jälkeen. Saaren lämpökeskuksella voitaisiin käyttää pohjoisen mädätyslaitoksen biokaasua kevyttä polttoöljyä korvaamassa. Koirniemen puutarhalle sijoitetulla sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksella voitaisiin lämmöllä korvata polttoöljyä ja sähköllä korvata esim. puhdistamon sähkönkulutusta.

Lannan hyötykäytön kannalta mädätyksen etuna on, että naudan käsittelemättömään lantaan verrattuna lannan liukoisen typen osuus kasvaa. Tällöin voidaan osa väkilan-

noitteesta jättää pois ja näin säästetään lannoitekustannuksissa, varsinkin kun lannoitteiden hinnat ovat nykyisin korkeita.



## LÄHTEET

- Aalto, Aimo et al. 2007. Biokaasulla tuotettavan sähkön syöttötariffi Suomessa – perusteita järjestelmän toteuttamiselle. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: [http://www.tem.fi/files/18256/Biokaasutariffi\\_tr\\_raportti\\_191207.pdf](http://www.tem.fi/files/18256/Biokaasutariffi_tr_raportti_191207.pdf)
- Alakangas, Eija. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. Otamedia Oy, Espoo 2000. ISBN 951-38-5699-2. 172 s.
- Alakangas, Eija ja Holviala, Niina (toim.) 2004. Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.1.2009]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2004/S231.pdf>
- Annamalai, Kalyan et al. 2003. Co-firing coal, feedlot and litter biomass (CFB and CLB) fuels in pulverized fuel and fixed bed burners. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.1.2009]. Saatavissa: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/822025-otOX2Z/native/822025.pdf>
- Anttila et al. 2008. Hajautetun energiantuotannon modulaarinen yhdyskunnan sivuainevirtoja hyödyntävä CHP-laitos. 117 s. ISBN 978-952-214-695-3.
- Biohalo. 2007. Yhteenveto Valkealan, Imatran ja Ruokolahden hevosenlannan käsittelyä koskevasta kyselystä, lannankäsittelyn ja – hyödyntämisen tehostaminen. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.1.2008]. Saatavissa: <http://www.biohalo.net/39>
- Bioste Oy. 2007. Toteutettavuusesiselvitys biokaasuttamisesta Nurmes Ylikylä. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2008]. 32 s. Saatavissa: <http://www.maaseutukeskus.fi/pk/Esiselvitys.pdf>
- Bougrier, C. et al. 2006. Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. *Process Safety and Environmental Protection*, 2006: 84 (B4). 280 – 284. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- Bullock, Daniel B.; Weingarden, Sarah ja Lami, Lianne. 2008. Combined heat and power potential using Texas agricultural wastes. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.1.2008]. Saatavissa: [http://www.seco.cpa.state.tx.us/zzz\\_re/re\\_biomass\\_chp-report2008.pdf](http://www.seco.cpa.state.tx.us/zzz_re/re_biomass_chp-report2008.pdf)
- Capstone. [Capstone:n www-sivu]. [viitattu 8.2.2009]. Saatavissa: <http://www.capstoneturbine.com/prodsol/solutions/rrbiogas.asp>
- Davidsson, Åsa et al. Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management* 2007: 27. 406 - 414. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- Deublein, Dieter ja Steinhauser, Angelika (toim.) 2008. *Biogas from Waste and Renewable resources*. Weinheim: Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. 472 s. ISBN 978-3-527-31841-4.

Dredge, Kristiina et al. 2006. Luonnonmukainen maatalous. 2. korjattu painos. 494 s. Helsingin yliopisto, Maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus Mikkeli: Julkaisuja 80. ISBN: 952 – 10 – 0396 – 0. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: <http://www.luomu.fi/alkutuotanto/pdf/luku1.pdf>

Eskola, Paula ja Mroueh, Ulla-Maija. 1999. Maarakentamisen elinkaariarviointi. 111 s. VTT tiedotteita 1962. ISBN 951-38-5446-9. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1999/T1962.pdf>

Etelä-Karjalan jätehuolto Oy. 2007. Vuosikertomus 2007. [Etelä-Karjalan jätehuolto Oy:n www-sivut]. [viitattu: 5.8.2008]. Saatavissa: <http://www.ekjh.fi/yleista.html>. 27

Flyktman, Martti ja Paappanen, Teuvo. 2005. Ruokohelven käyttökapasiteetti selvitys. 28 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.10.2008]. Saatavissa: [http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmamuistiot/2006/siirto/trm2006\\_1\\_ruokohelven%20k%C3%A4ytt%C3%B6kapasiteettiselvitys%20lopullinen%20\(2\).pdf](http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmamuistiot/2006/siirto/trm2006_1_ruokohelven%20k%C3%A4ytt%C3%B6kapasiteettiselvitys%20lopullinen%20(2).pdf)

Fytli, D. ja Zabaniotou A. 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods- a review. Renewable and sustainable energy reviews 2008:12. 116 - 140. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Gustafson, Magnus ja Stoor, Robert. 2008. Biokaasun käsikirja. 2. painos. 38 s. ISBN 978-952-99076-5-6. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.10.2008]. Saatavissa: [http://www.pbi-institute.com/pdf/BiokaasunKasikirja\\_web.pdf](http://www.pbi-institute.com/pdf/BiokaasunKasikirja_web.pdf).

Hagström, Markku; Vartiainen, Eero. ja Vanhanen, Juha. 2005. Biokaasun maatilatuotannon kannattavuusselvitys. Helsinki: Gaia Group Oy. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.9.2008]. Saatavissa: [http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmamuistiot/2006/siirto/trm2006\\_1\\_Biokaasun%20maatilatuotannon%20kannattavuusselvitys\\_julkinen.pdf](http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmamuistiot/2006/siirto/trm2006_1_Biokaasun%20maatilatuotannon%20kannattavuusselvitys_julkinen.pdf)

Halinen, Matias. 2007. Polttokennot. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: <http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/halinen107.pdf>

Halonen, Petri et al. 2003. Bioenergian tuotanto- ja käyttöketjut sekä niiden suorat työllisyysvaikutukset. Espoo: Otamedia Oy. 51 s. VTT tiedotteita 2219. ISBN 951-38-6194-5. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.9.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2219.pdf>

Hansen, K.H; Angelidaki, I. ja Ahring, B.K. 1998. Anaerobic digestion of swine manure, inhibition by ammonia. Water Research 1998: 32. 5 – 12. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Heikkilä, K ja Salo, R (toim.) 2002. Suurenevien tilojen haasteet Ylistaro 7. - 8.2002. 103 s. Jokioinen: MTT. ISBN 951-729-675-4. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/met/pdf/met7.pdf>

Held, Jörgen; Mathiasson, Andres ja Nylande, Andres. 2008. Biogas from manure and waste products - Swedish case studies. 117 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: <http://www.gasforeningen.se/upload/files/publikationer/rapporter/biogasinfo%20eng%202008%20sammansatt.pdf>

Huhtinen, Markku et al. 2004. 6. muuttumaton painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 379 s. ISBN 951-37-3360-2.

Hytönen, Jyrki. 1999. Tuhkapellettien hajoaminen maastossa. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff99/ff993533.pdf>

Hänninen, Kari; Huotari, Hanna ja Malinen, Heikki. 1992. Kompostoinnin biotekniikka ja laitteet. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuslaitos. 81 s. VTT tiedotteita 1371. ISBN 951-38-4184-7.

Institut für Energetik und Umwelt gGmbH. 2006 Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung. 232 s. ISBN 3-00-014333-5. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.12.2008]. Saatavissa: [http://big-east.eu/downloads/FNR\\_HR\\_Biogas.pdf](http://big-east.eu/downloads/FNR_HR_Biogas.pdf)

Itä-Suomen Energiatoimisto. 2004. Itä-Suomen peltoenergiaohjelma vuoteen 2010. ISBN 952-5093-42-5. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.1.2009]. Saatavissa: <http://www.puuvoima.fi/pdf/Peltoenergiaohjelma%20PDF.pdf>.

Joki-Tokola, Erkki. 1998. Lietelannan levitysjän ja tavan sekä ilmaston vaikutus säiliörehusadon määrään ja laatuun. 20 s. MTT Julkaisuja sarja A 44. ISBN 951-729-526-X. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.11.2008]. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/asarja/pdf/asarja44.pdf>

Kaakkois-Suomen ympäristökeskus. 2009. [Ympäristökeskuksen internet sivut]. [viitattu 7.1.2009]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=7697&lan=fi>

Kaikkonen, Marjo; Mikkonen, Viljo ja Vaskinen, Esko. Parikkalan keskuspuhdistamon ympäristölupa 31.5.2007. Nro 54/07/02. Dnro ISY-2006-Y-147. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.1.2009]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=68369>

Kara, Mikko et al. 2004. Energia Suomessa: Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. Helsinki: Edita Prima Oy. 396 s. ISBN 951-37-4256-3.

Karim, Khursheed et al. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. *Water Research* 2005: 39. 3597–3606. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Kelleher, B.P et al. 2002. Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology* 2002: 83. 27 – 36. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Kivisaari, Timo. 2008. Paikallinen energiantuotanto kaatopaikkakaasusta polttokennolla. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: [http://www2.et.lut.fi/jatepaivat/luentoaineisto/timo\\_kivisaari.pdf](http://www2.et.lut.fi/jatepaivat/luentoaineisto/timo_kivisaari.pdf)

Komulainen, Martti et al. Ruokoenergiaa - järviruo'on energiakäyttömahdollisuudet Etelä-Suomessa. 77 s. Turun ammattikorkeakoulun raportteja 66. ISBN 978-952-216-028-7. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.1.2009]. Saatavissa: <http://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522160300.pdf>

Korpilahti, Antti. 2003. Tuhkan esikäsittely metsäkäyttöä varten. 19 s. Metsätehon raportti 143. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.1.2009]. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/uploads/k6659xrxflp258.pdf>

Kuusinen, Martti ja Ilvesniemi, Hannu (toim.) 2008. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.12.2008]. Saatavissa: [www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti](http://www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti)

Lahti, Martti. 2004. Kesantomaan viljely energiakasvilla ja sen tuotto euroissa, kun maatila jalostaa sen itse biokaasuksi. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.12.2008]. Saatavissa: <http://www.idea-animaatiomlahti.fi/biovoimaa/bioenergiaa2005.pdf>

Laine-Ylijoki, Jutta et al. 2002. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. 51 s. VTT tiedotteita 2141. Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. ISBN 951-38-5891.

Lammi, Kari. 2008. Mikroturbiinit biokaasukäytössä. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2008]. Saatavissa: <http://www.maakaasu.fi/pdf/Kari%20Lammi.pdf>

Lankoski, Jussi ja Ollikainen, Markku. 2006. Bioenergy crop production and climate policies: A von Thunen model and case of reed canary grass in Finland. Helsinki: Helsingin yliopisto. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.9.2008]. Saatavissa: [http://www.mmm.fi/attachments/5eWDKveQh/5Avn9lWTG/Files/CurrentFile/Lankoski\\_ruokohelpi\\_ja\\_ilmasto.pdf](http://www.mmm.fi/attachments/5eWDKveQh/5Avn9lWTG/Files/CurrentFile/Lankoski_ruokohelpi_ja_ilmasto.pdf)

Lannoitevalmistelaki 539/2006. Annettu 29.6.2006.

Latvala, Markus. 2005. Jätevesilietteen anaerobinen käsittely ja biokaasun hyötykäyttö. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.9.2008]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/attachment/f16d4d543f99d7a59f54560a69063a0e/36f29f6f38d27b340ffe68c3eabf947d/jatevesilietteen\\_anaerobinen\\_kasittely\\_ja\\_biokaasun\\_hyotykyaytto.pdf](http://www.motiva.fi/attachment/f16d4d543f99d7a59f54560a69063a0e/36f29f6f38d27b340ffe68c3eabf947d/jatevesilietteen_anaerobinen_kasittely_ja_biokaasun_hyotykyaytto.pdf)

Laurila, Jussi ja Lauhanen, Risto. 2008. Ruokohelven briketöinti. [verkkodokumentti]. [viitattu 21.1.2009]. Saatavissa: [http://www.smts.fi/mpol2008/index\\_tiedostot/Esitelmat/es042.pdf](http://www.smts.fi/mpol2008/index_tiedostot/Esitelmat/es042.pdf)

Lauhanen, Risto ja Laurila, Jussi. 2007. Bioenergian tuotannon haasteet ja tukimustarpeet. Metlan työraportteja 42. ISBN 978-951-40-2028-5 (pdf). [verkkodokumentti]. [viitattu 15.10.2008]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp042.pdf>.

Lens, P.; Westerman, P. ja Haberbauer, A. (toim.) 2006. Biofuels for fuel cells. 544 s. Lontoo: IWA Publishing. ISBN 9781843390923.

Lehtomäki, Annimari et al. 2003. Viljelijät voisivat korjata myös energiasatoa, Pelto-biomassoista puhdasta kotimaista kaasua. *Kemia-Kemi*, 8/2003: 34 – 36 s.

Lehtomäki, Annimari. 2006. Biogas Production from Energy Crops and Crop Residues. Academic dissertation. University of Jyväskylä, department of biological and environmental science. Jyväskylä. 91 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.12.2008]. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf?sequence=1>

Lehtomäki, Annimari et al. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen - Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. 64 s. Jyväskylän yliopiston Bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2008]. Saatavissa: [http://www.biokaasufoorumi.fi/\\_ACC/\\_Components/ACC-DigiStore/Download.asp?basketID=670&fileID=127950](http://www.biokaasufoorumi.fi/_ACC/_Components/ACC-DigiStore/Download.asp?basketID=670&fileID=127950)

Luostarinen, Juha ja Kalmari, Erkki. 2008. Siikalahden kasvimassan biokaasutuskokeet Loppuraportti 10.4.2008.

Lötjönen, Timo. 2007. Oljen ja ruokohelven energiakäytön mahdollisuudet. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.1.2009]. Saatavissa: <http://www.oamk.fi/tapahtumia/bioenergia/docs/lotjonen.pdf>

Maa- ja metsätalousministeriö. 2007. Lannan käytön tehostaminen. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.1.2009]. Saatavissa: <http://lomake.mmm.fi/ShowFile?ID=20458&LUOKKA=547>

Maa- ja metsätalousministeriö. 2008. Bioenergia maa- ja metsätaloudessa. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.10.2008]. Saatavissa: [http://www.mmm.fi/attachments/5fDbyYiFr/5xAvQdC75/Files/CurrentFile/bioenergia\\_muistio.pdf](http://www.mmm.fi/attachments/5fDbyYiFr/5xAvQdC75/Files/CurrentFile/bioenergia_muistio.pdf)

Maakaasuyhdistys ry. 2008. Maakaasutekniikan nettikäsikirja. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.10.2008]. Saatavissa: [http://www.maakaasu.fi/7\\_kasikirja/7.1\\_koostum\\_ominais/7.1\\_leipa.html](http://www.maakaasu.fi/7_kasikirja/7.1_koostum_ominais/7.1_leipa.html)

Makkonen, Timo (toim.) 2008. Tuhkalannoitus. ISBN 978-95-5694-6-9. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.10.2008]. Saatavissa: [http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Metsatietostandardi/tuhkalannoitusopas\\_fin.pdf](http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Metsatietostandardi/tuhkalannoitusopas_fin.pdf)

Marchaim, Uri. 1992. Biogas processes for sustainable development. FAO Agricultural Services Bulletin No. 95. Rome: FAO. 232 s. ISBN 92-5-103126-6. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.10.2008]. Saatavissa: [http://www.wcasfmra.org/biogas\\_docs/www.fao.org\\_docrep.pdf](http://www.wcasfmra.org/biogas_docs/www.fao.org_docrep.pdf)

Mata-Alvarez; Macé, S. ja Llabrés. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 2000: 74. 3 – 16. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Matilda. Maatilarekisteri. [Verkkosivu]. [viitattu 10.11.2008]. Saatavissa: [http://www.matilda.fi/servlet/page?\\_pageid=568,570,193&\\_dad=portal30&\\_schema=P ORTAL30](http://www.matilda.fi/servlet/page?_pageid=568,570,193&_dad=portal30&_schema=P ORTAL30)

Mattila, Pasi K. 2006. Ammonia emissions from pig and cattle slurry in the field and utilization of slurry nitrogen in crop production. Academic dissertation. Faculty of Agriculture and Forestry of the University of Helsinki. 63 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.9.2008]. Saatavissa: <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/3271/ammoniae.pdf?sequence=1>

Metsähallitus. 2006. Parikkalan Siikalahden hoito- ja käyttösuunnitelma. Metsähallituksen luonnonuojelujulkaisuja, sarja C3. Kurikka: Painotalo Casper Oy. s. 118. ISBN 952-446-476-4.

Mikkola, Hannu et al. 2002. Paras käytettävissä oleva tekniikka kotieläintaloudessa. 166 s. Suomen ympäristö 564. ISBN 952-11-1178-X. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=4582&lan=fi>

MMM 12/2007. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. Annettu 13.2.2007.

Monto, Erja. 2004. Parikkalan kunnan lämpölaitoksen ympäristölupa. Annettu 24.6.2004. 17 s. Dnro KAS-2003-Y-650-111.

Motiva. Dieselöljy. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.10.2008]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/fi/yjay/kuljetusala/polttoainevaihtoehdot/dieseloljy.html>

Mäkelä, Kari; Laurikko, Juhani ja Kanner, Heikki. 2008. Suomen tieliikenteen päästöt Liisa 2007 laskentajärjestelmä. 47 s. VTT tutkimusraportti VTT-R-05084-08. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.12.2008]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/liisa/liisa2007raportti.pdf>

Møller, H.B.; Sommer, S.G. ja Ahring, B.K., 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass & Bioenergy* 2004: 26. 485 – 495. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Nielsen, H. B. et.al. 2004. Comparison of Two-Stage Thermophilic (68\_C/55\_C) Anaerobic Digestion With One-Stage Thermophilic (55\_C) Digestion of Cattle Manure. *Biotechnology and bioengineering*, 2003: 86. 291 – 300. Saatavissa: [www.interscience.wiley.com/](http://www.interscience.wiley.com/)

Niessen, Walter R. 2002. *Combustion and Incineration Processes*. 3 painos. 715 s. New York: Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-0629-3.

Nikolaisen, Lars (toim.) 1998. Straw for energy production. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.1.2009]. Saatavissa: <http://www.videncenter.dk/uk/engstraw.htm>

Ojala, Pekka; Kilpeläinen, Jarmo ja Reinikainen, Satu-Pia. 2006. 48 s. Suomen ympäristö 41. ISBN 952-11-2386-9. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.1.2009]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=60025>

Orjala, Markku ja Ingalsuo Riikka. 2001. Erilaisten korjuuketjujen tuottaman metsähakkeen käyttö suurten voimaloiden leijukerroskattiloissa. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.1.2009]. Saatavissa: [http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Puuenergia/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta\\_ja\\_aktivointi/Julkaisut/PROJEKTIT/puut08.pdf](http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Puuenergia/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Julkaisut/PROJEKTIT/puut08.pdf)

Paappanen, Teuvo et al. 2008. Ruokohelven polttoaineketjun kehittäminen liiketoimintamahdollisuuksien parantamiseksi. 158 s. VTT tiedotteita 2452. ISBN 978-951-38-7242-7. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.1.2009]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2452.pdf>

Paatero, Jaakko; Lehtokari, Markku ja Kempainen Erkki. 1984. *Kompostointi*. Juva: WSOY. 269 s. ISBN 951-0-12502-4.

Paavola, Teija. 2008. Biokaasuprosessissa käsiteltyjen materiaalien hyödyntäminen. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: [https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/Artturi/Artturikirjasto/Artturikoulutus/Lantaseminaari\\_2008/Teija\\_Paavola.pdf](https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/Artturi/Artturikirjasto/Artturikoulutus/Lantaseminaari_2008/Teija_Paavola.pdf)

Pahkala, Katri et al. 2005. Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotantoa varten. 2. korjattu painos. 31 s. ISBN 951-729-942-7. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.1.2009]. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/met/pdf/met1b.pdf>

Parikkala. [verkkosivu]. [viitattu 27.1.2009]. Saatavissa: <http://www.parikkala.fi/>

Pauliina Uusi-Penttilä. 2004. Biokaasun liikennekäyttö Jyväskylän seudulla Esiselvitys. Jyväskylä: Jyväskylä Science Park. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.12.2008]. Saatavissa: [http://www.kaapeli.fi/~tep/projektit/liikenteen\\_biopolttoaineet/JKL\\_esiselvitys2004.pdf](http://www.kaapeli.fi/~tep/projektit/liikenteen_biopolttoaineet/JKL_esiselvitys2004.pdf)

Phyllis. The composition of biomass and waste. Saatavissa: <http://www.ecn.nl/phyllis/single.html>

Puchas, Karl ja Resch, Birgit. 2003. Biogasstrategiekonzept Steirische Gas-Wärme GmbH, Endbericht Teil 1. 102 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2008]. Saatavissa: [http://www.noest.or.at/intern/dokumente/068\\_EB\\_Biogas\\_Strategiekonzept.pdf](http://www.noest.or.at/intern/dokumente/068_EB_Biogas_Strategiekonzept.pdf)

Puumala ja Grönroos (toim.) 2004. Kotieläintalouden ympäristökuormituksen vähentäminen. 153 s. Suomen ympäristö 708. ISBN 952-11-1753-2. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=20915>

Pöyry Environment Oy. 2007. Lietteenkäsittelyn nykytila. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: <http://www.sitra.fi/NR/rdonlyres/BFCEC181-4AD7-4B1A-B7B6-27045F8280FC/0/Lietteenk%C3%A4sittely.pdf>

Raiko, Risto et al. (toim.) 2002. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 750 s. ISBN 951-666-604-3.

Rintala, Jukka et al. 2002. Biokaasusta uusiutuvaa energiaa maataloilla. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.1.2009]. Saatavissa: [http://www.biokaasufoorumi.fi/\\_ACC/\\_Components/ACC-DigiStore/Download.asp?fileID=116667&basketID=254&openmode=open1](http://www.biokaasufoorumi.fi/_ACC/_Components/ACC-DigiStore/Download.asp?fileID=116667&basketID=254&openmode=open1)

Sami, M., Annamalai, K. ja Wooldridge, M. Co-firing of coal and biomass fuel blends. Progress in Energy and Combustion Science, 2001: 27. 171 – 214. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Sauranen, Tapani. 2007. Ruokohelven koepoltto Kinnulan lämpölaitoksella. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja nro 29. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.10.2008]. 10 s. Saatavissa: [https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/37626/ruokohelvenkoepoltto\\_raportti29\\_2.pdf?sequence=4](https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/37626/ruokohelvenkoepoltto_raportti29_2.pdf?sequence=4)

Schmid, J. ; Krautkemer, B. ja Müller, J. 2005. Biogas-powered Micro-Gas-Turbine First Results. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2009]. Saatavissa: <http://www.mikrogasturbine.de/diplomarbeiten/BGPMGTJapan2005.pdf>

Schober, Gabriele et al. 1998. One and two- stage digestion of solid organic waste. Water Research 1998: 33. 854 – 860. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Schäfer, Winfried; Lehto, Marja ja Teye, Frederik. 2006. Dry anaerobic digestion of organic residues on farm - a feasibility study. 98 s. Agrifood Research reports 77. ISBN 952-487-006-1. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.10.2008]. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/met/pdf/met77.pdf>

Steffen, R.; Szolar, O. and Braun, R. 1998. Feedstock for anaerobic digestion. Institute for Agrobiotechnology Tulln, University of Agricultural Sciences Vienna. 29 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.11.2008]. Saatavissa: [http://www.adnett.org/dl\\_feedstocks.pdf](http://www.adnett.org/dl_feedstocks.pdf)



Sung ,Shihwu & Santha, Harikishan. 2003. Performance of temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) system treating dairy cattle wastes. *Water Research*, 2003: 37. 1628 – 1636. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Sweeten, John M. et al. 1983. Thermal conversion of cattle feedlot manure for energy production. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.1.2008]. Saatavissa: <http://www.tcfa.org/Research/Report%2025%20Thermal%20Conversion%20of%20Cattle%20Feedlot%20Manure.pdf>

Sweeten, John M. et al. 2003. Co-firing of coal and cattle feedlot biomass (FB) fuels Part I Feedlot biomass (cattle manure) fuel quality and characteristics. *Fuel*, 2003: 82. 1167 – 1182. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Taavitsainen, Toni; Kapuinen, Petri ja Survo, Kyösti. 2002. MaLLa-hankeen loppuraportti: Maatalouden lietteiden ja lantojen keskitetyn käsittelyn mallinnus. 133 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.10.2008]. Saatavissa: <http://kokoeko.savonia-amk.fi/MaLLa%20-hankkeen%20loppuraportti.pdf>

Tchobanoglous, George; Theisen, H. ja Vigil, S. A. 1993. *Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill International Editions. Civil Engineering Series. 978 s. ISBN 0-07-112865-4.

Tchobanoglous, George; Burton, Franklin L ja Stensel, David H. 2003. *Waste water engineering Treatment and reuse*. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Companies. Metcalf & Eddy, Inc. 1819 p. ISBN 0-07-041878-0.

Tontti, Tiina ja Mäkelä-Kurto, Ritva. 1999. Biojätekompostit kasvintuotannossa. Kirjallisuuskatsaus. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 64. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 57 s. ISBN 951-729-553-7. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.9.2008]. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/asarja/pdf/asarja64.pdf>

Tuomisto, Hanna. 2006. Peltobiokaasu liikenteen biopolttoainevaihtoehtona energia-, kasvihuonekaasu- ja ravinnetaseiden kannalta. Pro gradu – tutkielma. Helsingin yliopisto, Soveltavan biologian laitos. Helsinki. 77 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.9.2008]. Saatavissa: [http://www.mmm.fi/attachments/5eWDKveQh/5Avn4qOA1/Files/CurrentFile/Biokaasu progradu\\_Hanna\\_Tuomisto\\_2006.pdf](http://www.mmm.fi/attachments/5eWDKveQh/5Avn4qOA1/Files/CurrentFile/Biokaasu%20progradu_Hanna_Tuomisto_2006.pdf)

Tuovinen, Henriikka. 2002. Biohajoavan jätteen hallintastrategian lähtökohdat. Helsinki: Edita Prima Oy. 117 s. SYKE julkaisuja 254. ISBN 952-11-1184-4 (nid). [verkkodokumentti]. [viitattu 20.9.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=12585&lan=fi>

Vahti. 2008. Ympäristöhallinnon VAHTI – tietojärjestelmä.

Vapo. 2006. Paikalliset polttoaineet, tietoa käytöstä, ominaisuuksista, luokituksista ja ympäristövaikutuksista. 23 s. [Verkkojulkaisu]. [viitattu 12.10.2008]. Saatavissa: [http://www.vapo.fi/filebank/2657-paikalliset\\_polttoaineet\\_esite06.pdf](http://www.vapo.fi/filebank/2657-paikalliset_polttoaineet_esite06.pdf)

Vasara, Petri. 2006. Metsäenergian tuotannon, korjuun ja käytön kustannustehokkuus sekä tukijärjestelmien vaikuttavuus päästökaupan olosuhteissa. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.1.2009]. Saatavissa: [http://www.mmm.fi/attachments/5eWDKveQh/5iOShijmp/Files/CurrentFile/52A07161\\_Loppuraportti\\_090806.pdf](http://www.mmm.fi/attachments/5eWDKveQh/5iOShijmp/Files/CurrentFile/52A07161_Loppuraportti_090806.pdf)

Vesanto, Taina et al. 2007. Peltobiomassa, liikenteen biopoltonesteet ja biokaasu- jaosto loppuraportti. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.9.2008]. Saatavissa: [http://www.mmm.fi/attachments/5IW4u4FIL/5IYTgDdW9/Files/CurrentFile/trm2007\\_2.pdf](http://www.mmm.fi/attachments/5IW4u4FIL/5IYTgDdW9/Files/CurrentFile/trm2007_2.pdf)

VNa 931/200. Valtioneuvoston asetus maataloudesta peräisin olevien nitraattien vesiin pääsyn rajoittamiseksi. Annettu Helsingissä 9.11.2000.

Viljavuuspalvelu. 1998. Viljavuustutkimuksen tulkinta peltoviljelyksessä. 27 s. ISBN 951-97434-1-3.

Vilkkilä, Tuomo. 2007. Biokaasulaitos esimerkkimaatilalla. 31 s. Jyväskylän Ammattikorkeakoulun Bioenergiakeskuksen julkaisuja 29. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2008]. Saatavissa [https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/37628/Biokaasulaitos\\_esiselvitys28.pdf?sequence=1](https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/37628/Biokaasulaitos_esiselvitys28.pdf?sequence=1)

Wahlström, Margareta et al. 2001. Teollisuusjätteiden kaatopaikkakelpoisuus. 69 s. VTT tiedotteita 2086. ISBN 953-38-5805-7. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2086.pdf>

Ward, Alastair J. et al. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology* 2008: 99. 7928 – 7940. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Watrec Oy. 2007. Biokaasulaitoksen rakennushanke Biovakka Suomi Oy Ympäristövaikutusten arviointiohjelma. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=271956&lan=fi&clan=fi>

Weiland, Peter. 2003. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied biochemistry and biotechnology* 2003: 109. 263 – 274. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Wellinger, Arthur. 1999. Process design of agricultural digesters. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa: <http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d14prdgn.pdf>

Werther, J. ja Ogada, T. Sewage Sludge Combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 1999: 25. 55 – 116. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Ørtenblad, Henrik. 2000. The use of digested slurry within agriculture. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.11.2008]. Saatavissa: <http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d9manu.pdf>

### **Suulliset lähteet ja sähköpostiviestit**

Asikainen, Antti. 2008. Tekninen johtaja, Parikkalan kunta. Puhelinkeskustelu 14.11.2008.

Kettunen, Heikki. 2008. Elinkeinon harjoittaja; Koirniemen puutarha. Puhelinkeskustelu 20.11.2008.

Neuvonen, Timo. 2008. Maanviljelijä Parikkalassa. Puhelinkeskustelu 27.1.2009.

Niiranen, Mervi. 2008. Suojelubiologi, Metsähallitus. Puhelinkeskustelu 2.12.2008

Repo, Pekka. Revon puutarha. Puhelinkeskustelu 21.11.2008.

Ritola-Grahn, Aune. 2008. Elinkeinojohtaja, Parikkalan kunta. Puhelinkeskustelu 1.12.2008.

Rousku, Petri. 2008. Di; Projektipäällikkö, Metsäkeskus. Sähköposti. 29.9.2008.

Saukkonen, Pekka. 2008. Vesilaitoksen hoitaja, Parikkalan kunta. Puhelinkeskustelu 25.11.2008.

Sairanen, Maija. Maaseututoimen päällikkö, Parikkalan kunta. Sähköpostit 1.10.2008 & 2.10.2008.

Uimonen, Hannu. 2008. Toimitusjohtaja, Sikaco. Puhelinkeskustelu 21.11.2008.

**Liite 1.** Energian kulutus sekä tiloilla ja skenaarioissa tuotettavan energian potentiaalit.

**Taulukko 1.** Energian kulutus sekä tiloilla ja skenaarioissa tuotettavan energian potentiaalit.

Kohde / Skenaario	Energia [MWh/a]	Lämpökattila	CHP		Energian kulutus	
		Lämpö [MWh/a]	Lämpö [MWh/a]	Sähkö [MWh/a]	Lämpö [MWh/a]	Sähkö [MWh/a]
Tilat						
A	849	458	306	153	83	209
B	1 970	1 060	708	354	1 770	200
C	168	91	61	30	0	125
D	105	57	38	19	81	40
E	369	199	133	66	104	80
F	161	87	58	29	0	135
G	279	151	101	50	59	137
H	231	125	83	42	62	80
I	648	350	233	117	0	0
<b>Skenaario 1</b>						
Biokaasu	23 700	14 200	9 490	4 740		
Kiinteä pa	17 700	15 900	10 600	5 310		
<b>Skenaario 2</b>						
Biokaasu	1 910	1 030	686	343		
Kiinteä pa	44 600	40 100	26 800	13 400		
<b>Skenaario 3</b>						
Biokaasu	12 000	6 980	4 660	2 330		
Kiinteä pa	17 700	15 900	10 600	5 310		
<b>Skenaario 4</b>						
Biokaasu	6 740	3 640	2 430	1 210		
Kiinteä pa	26 400	23 800	15 800	7 920		
<b>Skenaario 5</b>						
Biokaasu 1	5 050	2 730	1 820	910		
Biokaasu 2	1 690	912	608	304		
Kiinteä pa	26 400	23 800	15 800	7 920		
Koirniemen puutarha					662	28
Revon puutarha					144	
Parikkalan lämpökeskus polttoaineteho					13 800	
Saaren lämpökeskus polttoaineteho					3 370	
Särkisalmen puhdistamo						345