



## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Taija Sinkko

### **Pienen mittakaavan CHP-laitokset osana hiilineutraalia maaseutuyhteiskuntaa**

Diplomityö

2009

94 sivua, 7 kuvaa, 33 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Mika Horttanainen  
Diplomi-insinööri Rabbe Thun

Hakusanat: CHP-laitos, hiilineutraali, maaseutuyhteiskunta, anaerobinen mädätys, polttokenno, biokaasu, metaani, terminen käsittely, ORC-prosessi

Keywords: CHP plant, carbon neutral, rural community, anaerobic digestion, fuel cell, biogas, methane, thermal conversion, ORC process

Maapallon ilmasto lämpenee koko ajan kasvihuonekaasujen määrän lisääntyessä ilmakehässä. Merkittävin ihmisten aiheuttama päästöjen lähde on fossiilisten polttoaineiden käyttö energiantuotannossa ja liikenteessä, jonka vuoksi on tärkeää lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää esimerkkialueena olevan maaseutuyhteiskunnan mahdollisuutta olla energiaomavarainen ja materiaalikierroiltaan suljettu, jos alueen tarvitsema sähkö ja lämpö tuotettaisiin paikallisilla biomassavaroilla kahdella rinnakkaisella pienen mittakaavan CHP-laitoksella. Tarkastellut laitokset olivat anaerobisen mädätyksen ja polttokennojen yhdistelmä sekä termisen käsittelyn ja ORC-prosessin yhdistelmä.

Työssä tehdyt laskelmat osoittivat, että esimerkkialue saisi tuotettua omilla biomassavaroillaan tarvitsemastaan sähköstä 75 % ja lämmöstä 90 % esimerkkilaitosten avulla. Laskelmissa ei kuitenkaan huomioitu kesä- ja talvikuukausien välistä eroa lämmön kulutuksessa, jonka vuoksi molemmat laitokset eivät voisi toimia koko ajan täydellä teholla. Lisäksi tuotetun lämmön hyötykäyttöä rajoittaa riittävän laajan kaukolämpöverkon puuttuminen esimerkkialueelta. Nykyisen kaukolämpöverkon avulla saataisiin hyödynnettyä vain kolmasosa ORC-prosessilla tuotetusta lämpöenergiasta. Laskelmat osoittivat myös, että alueen kasvihuonekaasupäästöt pienenisivät 21 % eli noin 6 000 hiilidioksidiekvivalenttonnia vuodessa, jos suurin osa energiasta tuotettaisiin omista biomassavaroista CHP-laitosten avulla ja mädätyksen seurauksena syntyvä reaktorijäännös korvaisi kemiallisten lannoitteiden käytön.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Degree Programme of Environmental Technology

Taija Sinkko

### **Small-scale CHP plants as a part of carbon neutral rural community**

Master's thesis

2009

94 pages, 7 figures, 33 tables and 4 appendices

Examiners: Professor Mika Horttanainen  
M.Sc. (Tech.) Rabbe Thun

Keywords: CHP plant, carbon neutral, rural community, anaerobic digestion, fuel cell, biogas, methane, thermal conversion, ORC process

Global warming is accelerating as the amount of greenhouse gases in the atmosphere increases. The most significant source of emissions from human activities is the use of fossil fuels in energy production and traffic. Because of this it is important to increase the utilization of renewable energy sources. The aim of this Master's thesis was to find out the potential of an example rural community to achieve energy self-sufficiency and closed material flows by producing the needed electricity and heat in two parallel small-scale CHP plants with local biomass. The two reviewed CHP plants were anaerobic digestion with fuel cells and thermal conversion with ORC process.

The results of the study indicated that the example area could produce 75 % of the electricity and 90 % of the heat needed in the area with their own biomass reserve in the CHP plants. This does not take into account the difference in heat demand between the summer and the winter months. Because of that difference, both plants could not operate at full capacity all the time. In addition, the district heating network of the example area is not extensive enough to fully utilize all the produced heat. Only one third of the heat energy from the ORC process could be utilized using the existing district heating network. Results also indicated that greenhouse gas emissions could decrease by 21 % or about 6 000 tonnes of carbon dioxide equivalents per year in the example area, assuming the largest part of energy would be produced with local biomass in CHP plants and residues from anaerobic digestion would substitute the use of chemical fertilizers.

## SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	3
1 JOHDANTO .....	5
1.1 Tausta .....	5
1.2 Tavoitteet.....	6
1.3 Rakenne ja rajaus .....	7
2 MAASEUTUYHTEISKUNNAN MATERIAALI- JA ENERGIAVIRRAT .....	9
2.1 Yleistä .....	9
2.2 Materiaalivirtoihin vaikuttavat tekijät.....	11
2.2.1 Veden kulutus.....	11
2.2.2 Jättemäärät.....	12
2.2.3 Viljelykasvit ja metsät.....	15
2.2.4 Päästöt .....	16
2.3 Energiavirtoihin vaikuttavat tekijät.....	21
2.3.1 Maatalous .....	22
2.3.2 Asuinrakennukset.....	23
2.3.3 Teollisuus ja palvelut .....	24
2.3.4 Liikenne.....	25
3 BIOMASSAAN PERUSTUVAT PIENEN MITTAKAAVAN CHP-TEKNOLOGIAT.....	26
3.1 Biomassan muuntaminen energiaksi.....	26
3.1.1 Terminen käsittely.....	26
3.1.2 Anaerobinen käsittely.....	28
3.2 CHP-teknologiat.....	31
3.2.1 Diesel- ja kaasumoottorit .....	31
3.2.2 Stirling-moottorit.....	32
3.2.3 ORC-prosessi .....	33
3.2.4 Mikroturbiinit.....	35
3.2.5 Polttokennot .....	35
4 ESIMERKKIALUE .....	41
4.1 Alueen väestö, elinkeinot, liikenne ja veden kulutus.....	41
4.2 Viljelyalat ja biomassavarat .....	44
4.3 Jätteen määrä ja laatu .....	45
4.4 Sähkön ja lämmön kulutus .....	46
4.5 Päästöt .....	48
5 ENERGIANTUOTANTOPOTENTIAALI ESIMERKKIALUEELLA.....	52
5.1 Anaerobinen käsittely ja polttokenno.....	52
5.1.1 Laskennan lähtötiedot .....	53
5.1.2 Tulokset.....	56
5.1.3 Herkkyystarkastelut.....	57
5.1.3.1 Metaanintuottopotentiali.....	58
5.1.3.2 Polttokennojen hyötysuhde.....	59
5.1.3.3 Eläinten määrä.....	59

5.1.3.4 Kasvibiomassan määrä .....	60
5.1.3.5 Kasvihuoneviljely .....	60
5.2 Terminen käsittely ja ORC-prosessi .....	61
5.2.1 Laskennan lähtötiedot .....	62
5.2.2 Tulokset.....	63
5.2.3 Herkkyystarkastelut.....	64
5.2.3.1 ORC-prosessin hyötysuhde .....	64
5.2.3.2 Jätteiden poltto .....	65
5.2.3.3 Hakkuutähteiden määrä .....	65
5.2.3.4 Oljen määrä .....	65
5.2.3.5 Ruokohelven viljely .....	66
5.3 Logistiikka.....	66
5.4 Päästöt .....	67
5.4.1 Biokaasulaitos .....	68
5.4.2 Polttolaitos.....	70
5.4.3 Päästötase .....	75
5.5 Tulosten tarkastelu .....	76
5.6 Epävarmuustekijät.....	78
6 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	80
6.1 Energiaomavaraisuus .....	80
6.2 Materiaalikiertojen sulkeminen.....	81
6.3 Jatkotutkimustarpeet .....	82
7 YHTEENVETO .....	84
LÄHTEET .....	87

## LIITTEET

Liite 1. Biokaasulaitoksen periaatekaavio

Liite 2. Biokaasulaitoksen ja polttokennojen herkkyystarkastelujen tulokset

Liite 3. Polttolaitoksen ja ORC-prosessin herkkyystarkastelujen tulokset

Liite 4. Standardin SFS 5624 mukainen savukaasulasku oljen poltolle

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Symbolit

$B$	sidonta	[t/a]
$c$	pitoisuus	[%]
$E$	energia	[MJ, MWh]
$G$	nettokasvu	[m <sup>3</sup> /a]
$L$	poistuma	[t/a]
$l$	veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä	[MJ/kg]
$M$	moolimassa	[g/mol]
$m$	massa	[kg, t]
$N$	moolimäärä	[mol]
$n$	ainemäärä	[mol]
$OLR$	kuormitus	[kg/m <sup>3</sup> /vrk]
$p$	paine	[Pa]
$Q$	reaktoriin syötettävä määrä	[kg/vrk]
$q$	lämpöarvo	[MJ/kg, MJ/m <sup>3</sup> ]
$S_0$	kiintoainepitoisuus	[%]
$V$	tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$w$	kosteuspitoisuus	[%]
$Y$	metaanintuotto	[m <sup>3</sup> ]
$y$	tuottopotentiaali	[m <sup>3</sup> /t]
$\eta$	hyötysuhde	[%]

### Alaindeksit

ar	saapumistilassa
bio	biokaasu
CO <sub>2</sub> -ekv	hiilidioksidiekvivalentti
da	kuiva ilma
el	sähkö
dw	kuiva-aine
teor.	teoreettinen
th	lämpö
w	vesi
ww	märkäpaino

### Lyhenteet

AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i> , alkalipolttokenno
BEF	<i>Biomass Expansion Factor</i> , biomassan kasvukerroin
CH <sub>4</sub>	metaani

CHP	<i>Combined Heat and Power</i> , yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
DMFC	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i> , suorametanolipolttokenno
EU	Euroopan Unioni
ha	hehtaari
LCFA	<i>Long-Chain Fatty Acids</i> , pitkäketjuiset rasvahapot
m <sup>3</sup> n	normikuutio
MCFC	<i>Molten Carbonite Fuel Cell</i> , sulakarbonaattipolttokenno
MFC	<i>Microbial Fuel Cell</i> , mikrobiologinen polttokenno
mol	mooli
MTT	Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus
N <sub>2</sub> O	dityppioksidi
NO <sub>x</sub>	typen oksidit
ORC	<i>Organic Rankine Cycle</i> , orgaaninen Rankine -prosessi
PEMFC	<i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> , polymeeri-elektrolyyttimembraanipolttokenno
REF III	<i>Recycled Fuel</i> , kierrätyspolttoaine, joka on syntypistelajiteltua kotitalouksien jätettä
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i> , kiinteäoksidipolttokenno
toe	<i>Tonnes of Oil Equivalent</i> , öljykvivalenttitonni
VFA	<i>Volatile Fatty Acids</i> , haihtuvat rasvahapot
VS	<i>Volatile Solid</i> , haihtuva kiintoaine
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

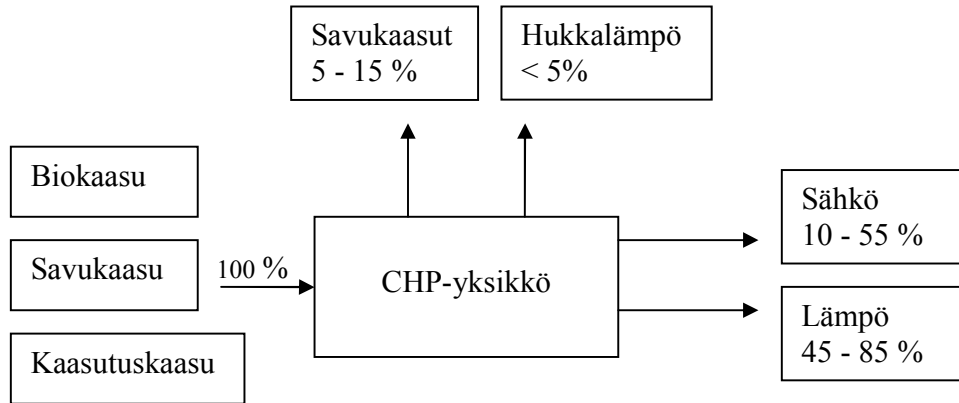
Maapallon keskilämpötila on noussut 0,74 °C sadan viimeisen vuoden aikana ja lämpenemisnopeus on lähes kaksinkertaistunut (Ilmasto.org 2008). Suurin syy ilmaston lämpenemiseen on kasvihuonekaasujen määrän lisääntyminen ilmakehässä. Tärkeimpiä kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidi, metaani ja dityppioksidi. Merkittävin ihmisten aiheuttama päästöjen lähde on fossiilisten polttoaineiden käyttö energiantuotannossa ja liikenteessä. Monet kansainväliset sopimukset ja EU:n direktiivit asettavat tavoitteita kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämiselle.

EU teki tammikuussa 2008 ehdotuksen uudeksi direktiiviksi, jonka mukaan EU:n energiantuotannossa uusiutuvien energiamuotojen osuuden tulisi nousta 20 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Suomen osalta tämä tarkoittaa, että vuonna 2020 tulisi 38,5 % energiasta tuottaa uusiutuvilla energialähteillä, kun uusiutuvan energian osuus vuonna 2005 oli noin 28,5 %. (Heinimö 2008, 12.) Vuonna 2008 ilmestyneessä uudessa pitkänajan ilmasto- ja energiastrategiassa on todettu tavoitteen olevan haastava ja sen saavuttaminen edellyttää energian loppukulutuksen kääntymistä laskuun sekä tuki- ja ohjausjärjestelmien tehostamista. Lisäksi velvoitteen täyttäminen edellyttää puuperäisen energian, jätepolttoaineiden, lämpöpumppujen, biokaasun ja tuulienergian käytön voimakasta lisäämistä.

Energiantuotannon lisäksi maatalous on merkittävä kasvihuonekaasujen päästölähde; esimerkiksi metaania muodostuu suuria määriä maataloudessa lannan hajoamisprosesseissa ja dityppioksidia syntyy lannoitteiden käytöstä. Maataloudessa syntyvää biomassaa, kuten olkea ja lantaa, voitaisiin käyttää energian tuottamiseen esimerkiksi biokaasuteknologian eli anaerobisen käsittelyn tai termisen käsittelyn avulla. Samalla myös energiantuotannon päästöt vähenisivät ja olisi mahdollista saavuttaa alueellinen hiilineutraalius. Maatalouden omista raaka-ainevaroista voidaan tuottaa energiaa CHP-laitoksen (Combined Heat and Power) eli yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon avulla. Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto tarkoittaa, että



käyttökelpoista sähköä ja lämpöä tuotetaan samassa prosessissa. Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettu kaavio CHP-laitoksen materiaalivirroista.



Kuva 1. CHP-laitoksen materiaalivirrat (mukaiillen Hanski & Karttunen 2007, 3).

CHP-yksikön avulla voidaan muuntaa polton savukaasut, anaerobisen mädätyksen biokaasu tai kaasutuskaasu sähköksi ja lämmöksi. CHP-prosessilla voidaan vähentää polttoaineen kulu- tusta 25 - 35 % verrattuna sähkön ja lämmön erilliseen tuotantoon (Sipilä et al. 2005, 11). Sa- malla myös hiilidioksidipäästöt vähenevät tuotettua energiaa kohden ja tehokkuus paranee. CHP-tuotannolla on pitkät perinteet Suomessa ja ensimmäiset laitokset rakennettiin Suo- meen jo 1960-luvulla (Sipilä et al. 2005, 19). Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on merkittävin sähköntuotantomuoto Suomessa; vuonna 2007 tuotettiin 34 % sähköstä yhteistuotannon avul- la. CHP-laitoksilla tuotettiin energiasta 47 % uusiutuvilla energianlähteillä, 37 % fossiilisilla polttoaineilla ja 14 % turpeella. (Tilastokeskus 2008b.)

## 1.2 Tavoitteet

Tämä diplomityö toteutetaan osana MTT:n Matalan hiilen maaseututaajama -hanketta. Hank- keen tarkoituksena on tehdä selvitys kestävän agroekologisen toimintamallin edellytyksistä matalan hiilen maaseututaajamassa, jossa pyrkimyksenä on korvata fossiilisen energian käyt- töä alueellisesti tuotetulla bioenergialla ja aikaansaada mahdollisimman suljettuja materiaali- kiertoja. Agroekologisenä päämääränä on kehittää systeemi, joka olisi mahdollisimman riip- pumaton fossiilisista kemikaaleista ja ulkopuolisesta energiasta. Samaan aikaan tulisi parantaa biologista tehokkuutta, suojella biodiversiteettiä sekä ylläpitää agroekosysteemin tuottavuutta

ja omavaraisuutta (Altieri, 2000). Nämä päämäärät voidaan saavuttaa käyttämällä paikallisia uusiutuvia raaka-ainevaroja energiantuotannossa, käyttämällä energiantuotantoon puhtaampia ja hyötysuhteeltaan parempia teknologioita sekä sulkemalla alueen materiaalikierron.

Edellä mainitut keinot sisältyvät myös teollisen ekologian (Industrial Ecology) -käsitteeseen, joka tarkastelee koko teollisen ekosysteemin materiaali- ja energiavirtoja yksittäisen tuotantoprosessin sijaan. Materiaalivirta-analyysin avulla voidaan selvittää teolliseen ekosysteemin tulevat ja sieltä lähtevät virrat. Tämän tiedon avulla voidaan arvioida materiaalin ja energian käytön sekä niistä aiheutuvien päästöjen vaikutukset ympäristöön. Sulkemalla materiaalikierron mahdollisimman pitkälle voidaan optimoida tuotantoprosessin tehokkuus sekä minimoida syntyvien jätteiden määrä ja koko systeemin ympäristövaikutukset. (Chavalparit 2006, 24, 27.)

Diplomityön tavoitteena on tarkastella kahta pienen mittakaavan CHP-teknologiaa energian tuotannon ja päästöjen osalta. Tarkasteltaviksi CHP-teknologioiksi on valittu termisen käsittelyn ja ORC-prosessin (Organic Rankine Cycle eli orgaaninen Rankine -prosessi) yhdistelmä sekä anaerobisen käsittelyn ja polttokennojen yhdistelmä. Tarkasteltavina muuttujina ovat CHP-laitoksilla potentiaalisesti tuotettavissa olevan sähkön ja lämmön määrät sekä laitosten aiheuttamat päästöt, joita verrataan alueen päästöihin nykytilanteessa ilman laitosten rakentamista. Tavoitteena on tarkastella myös missä määrin tyypillinen suomalainen maaseututaajama tai -kunta esimerkkialueena pystyy olemaan energiaomavarainen ja materiaalikierroltaan suljettu.

### **1.3 Rakenne ja rajaus**

Diplomityö rajataan pienen mittakaavan CHP-laitoksilla tuotettavan sähkö- ja lämpöenergian tarkasteluun, koska maatilat voisivat hyödyntää näitä paikallisesti oman sähkön- ja lämmöntarpeensa tyydyttämiseen omilla biomass- ja maatalousjätevaroillaan. Pienimuotoiselle CHP-tuotannolle on olemassa erilaisia määritelmiä 10 MW:n nimellistehosta alle 500 kW:iin (Hintikka 2004, 2). Tässä työssä pienen mittakaavan CHP-laitos tarkoittaa sähköteholtaan alle 1 MW<sub>el</sub> laitosta. Tarkoituksena on selvittää esimerkkialueella tarvittavan sähkön ja lämmön määrät ja kuinka paljon tästä tarpeesta voitaisiin tuottaa CHP-laitoksella alueen omista raaka-

aineista. Työssä ei tarkastella laitosten rakentamisen ja käytön taloudellista kannattavuutta. Työn ulkopuolelle on rajattu myös nestemäisten biopolttoaineiden valmistus ja käyttö.

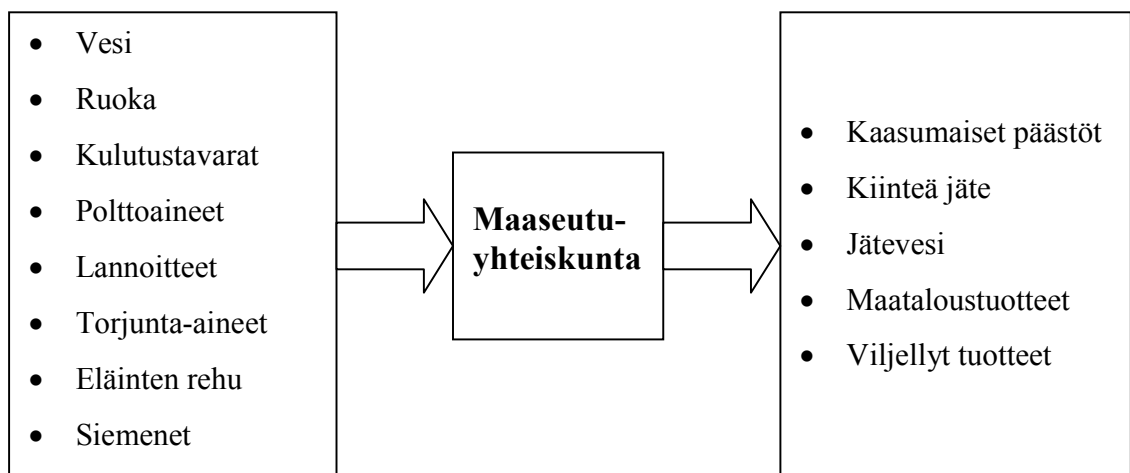
Diplomityön alussa tarkastellaan maaseutuyhteiskunnan materiaali- ja energiavirtoihin vaikuttavia tekijöitä sekä tehdään kirjallisuuskatsaus pienen mittakaavan CHP-tekniikoihin ja niiden soveltuvuuteen paikallisella biomassalla tuotetun sähkö- ja lämpöenergian tuotantoon. Tekniikoiden osalta tarkastellaan niiden etuja ja haittoja, sekä tulevaisuuden kehitysnäkymiä. Tämän jälkeen selvitetään esimerkkialueen suurimmat energiankulutuskohteet sekä alueen läpi kulkevat energia- ja materiaalivirrat sekä käytettävissä olevat biomassavarat. Siltä osin kuin todellisia tietoja ei ole saatavilla, arvioidaan energiankulutusta ja biomassavaroja Suomen keskimäärien arvojen pohjalta.

Työssä tarkastellaan alueella potentiaalisesti tuotettavissa olevia sähkö- ja lämpöenergian määriä kahdella rinnakkaisella CHP-laitoksella, jonka perusteella arvioidaan alueen mahdollisuutta energiaomavaraisuuteen. Potentiaalisesti tuotettavissa oleviin energiamääriin vaikuttavia tekijöitä selvitetään herkkyystarkastelun avulla, jossa muuttujina ovat esimerkiksi CHP-laitosten hyötysuhteet, energiakasvien viljely ja muutokset biomassan määrissä. Lisäksi työssä tarkastellaan alueen suurimpia päästölähteitä ja arvioidaan missä määrin näitä voitaisiin pienentää hyödyntämällä omia biomassavaroja CHP-tekniikoiden avulla. Lopuksi arvioidaan vielä alueen energiaomavaraisuutta, materiaalikiertojen sulkemista ja tulevia jatkotutkimustarpeita.

## 2 MAASEUTUYHTEISKUNNAN MATERIAALI- JA ENERGIIVIRRRAT

### 2.1 Yleistä

Maaseutuyhteiskunta on hallinnollinen alue, johon kuuluu maaseutualueita sekä keskustaajama, jossa yleensä on kauppoja ja muita palveluja sekä teollisuutta. Maaseudulla tarkoitetaan taajamien ulkopuolisia alueita ja maatilat ovat maataloutta harjoittavia yksiköitä maaseudulla. Materiaalivirroilla puolestaan tarkoitetaan kaikkea alueelle tulevaa, siellä syntyvää ja sieltä poistuvaa materiaalia. Maaseudulle tulevia materiaaleja ovat vesi, lannoitteet, torjunta-aineet, siemenet, polttoaineet, eläinten rehu, ihmisten ruoka ja muut kulutustavarat sekä erilaiset pakkaukset. Maaseutualueelta poistuu kaasumaisia, nestemäisiä ja kiinteitä päästöjä. Kaasumaiset päästöt ovat esimerkiksi hiilidioksidia ja metaania, nestemäiset päästöt ovat jätevetä tai lietettä ja niiden mukana ravinteita, ja kiinteät päästöt jätteitä, esimerkiksi sekajätettä ja biojätettä. Lisäksi maaseudulla syntyy viljelykasveja ja niiden sivutuotteita, kuten olkea, sekä maataloustuotannon tuotteita eli maitoa ja lihaa. Kuvassa 2 on esitetty maaseutuyhteiskunnan pääasialliset materiaalivirrat.



**Kuva 2.** Maaseutuyhteiskunnan pääasialliset materiaalivirrat.

Maaseudulla energiaa tarvitaan asuin-, kotieläin- ja muiden tuotantorakennusten lämmittämiseen ja ylläpitoon, viljan ja rehun kuivaamiseen, peltotyöhön sekä muuhun tuotantoa tukevaan toimintaan, kuten valaistukseen, kasteluun, lypsykoneisiin, veden lämmittämiseen, ilmanvaihtoon, jäähdytyslaitteisiin, ruokintalaitteisiin sekä lannanpoistojärjestelmiin (Aho et al. 2006, 10). Myös teollisuus ja palvelut tarvitsevat energiaa lämmitykseen, valaistukseen ja laitteiden käyttöön.

Yksittäisen maatilan ja teollisuuslaitoksen materiaali- ja energiavirtoihin vaikuttavat koko ja tuotantosuunta. Maatalouden tuotantosuuntia ovat esimerkiksi lypsykarjatalous, sikatalous, siipikarjatalous, hevostalous ja viljanviljely (Hagström et al. 2005, 11). Teollisuuden tuotantosuuntia ovat puolestaan mm. massa- ja paperiteollisuus, metalliteollisuus, kemianteollisuus ja elintarviketeollisuus. Koko maaseutuyhteiskunnan mittakaavassa materiaali- ja energiavirtoihin vaikuttavat alueen koko, väestön määrä, elinkeinot sekä mautilojen ja teollisuuslaitosten tuotantosuunnat, lukumäärät ja kokoluokat.

Materiaalikierrot voidaan sulkea käyttämällä alueen omia raaka-ainevaroja sekä kierrättämällä ja käyttämällä materiaalit uudelleen aineena tai energiana. Energiaa voidaan tuottaa paikallisista raaka-ainevaroista, esimerkiksi puusta ja energiakasveista. Tämän lisäksi energiantuotannossa voidaan käyttää erilaisia jätteitä ja sivutuotteita, esimerkiksi teollisuuden puuperäisiä jätteitä sekä biojätteitä, maataloudessa syntyvää lantaa ja polttokelpoisia yhdyskuntajätteitä. Kun energian tuotannossa käytetään jätteitä ja sivutuotteita, voidaan saavuttaa myös alueellinen tai paikallinen energiaomavaraisuus. Jos energiantuotantolaitoksen läheisyydessä on kasvihuoneita, voidaan syntyvä hiilidioksidi johtaa kasvihuoneisiin kiihdyttämään kasvien kasvua (Bioste Oy 2006, 42). Hiilidioksidia ja ravinteita voidaan ainakin teoriassa käyttää myös akvaattisen biomassan tuotantoon, jota puolestaan voidaan käyttää energiantuotannossa.

Kiertojen sulkemista helpottaa myös materiaalien ja energian käytön vähentäminen, jolloin materiaali- ja energiavirrat ovat pienemmät. Esimerkiksi veden kulutusta ja hukkaveden määrää voidaan vähentää asianmukaisilla laitteilla. Vettä voidaan myös kierrättää, esimerkiksi lypsykoneen pesu- ja huuhteluvesiä voidaan käyttää usealla pesukerralla. Myös pesuautomaateista voidaan ottaa vettä talteen ja käyttää uudelleen. (Sorvala et al. 2006, 15.)

Energiaa voidaan säästää lähes kaikilla yhteiskunnan aloilla, niin teollisuudessa kuin palveluissa ja kotitalouksissakin. Esimerkiksi rakennusten lämmitykseen kuluu energiaa noin 20 % Suomessa käytetystä energiasta, jota voitaisiin pienentää esimerkiksi siirtymällä pois sähkölämmityksestä, koska sähkölämmitys on tehoton tapa tuottaa lämpöä, sillä koko tuotantoketjun aikana suuri osa menee hukkaan. Kotitalouksissa energiaa voidaan säästää valitsemalla vähiten energiaa kuluttavia laitteita ja välttämällä sähkölaitteiden ja valojen turhaa päällä pitämistä. (Ilmasto.org 2008.)

## **2.2 Materiaalivirtoihin vaikuttavat tekijät**

Seuraavassa tarkastellaan maaseutuyhteiskunnan suurimpiin materiaalivirtoihin vaikuttavia tekijöitä maatalouden, kotitalouksien, teollisuuden ja palveluiden osalta.

### **2.2.1 Veden kulutus**

Veden ominaiskulutus, jolla tarkoitetaan vesilaitoksen verkkoon pumppaamaa vesimäärää jaettuna verkostoon liittyneiden asukkaiden määrällä, on vakiintunut Suomessa 2000-luvun vaihteessa ja on ollut noin 240 litraa asukasta kohden vuorokaudessa. Ominaiskulutus pitää sisällään kotitalouksien, julkisten palveluiden ja palosammutuksen veden sekä vuotoveden. Kotitalouksien osuuden arvellaan olevan noin 60 % ominaiskulutuksesta. (Ympäristöhallinto 2003.) Teollisuuslaitokset ottavat yleensä vain osan tai ei yhtään tarvitsemastaan vedestä vesilaitoksilta, koska esimerkiksi prosessivedet otetaan usein suoraan joesta tai merestä. Myös maatilojen käyttämä vesi tulee usein tilan omasta kaivosta, jolloin nämä eivät ole mukana veden ominaiskulutuksessa.

Kotitalouksien veden kulutukseen vaikuttaa asumismuoto. Veden kulutus kerrostalossa on Suomessa keskimäärin 155 litraa vuorokaudessa asukasta kohden. Vaihteluväli on kuitenkin suuri, 60 - 270 l/vrk. Omakotitalossa asuva kuluttaa yleensä noin 20 litraa vähemmän kuin kerrostalossa asuva. Veden kulutuksesta 39 % kuluu peseytymiseen, 26 % vessan käyttöön, 22 % keittiössä ruuanlaittoon ja tiskaamiseen ja 13 % pyykin pesemiseen. (Motiva 2008.)

Maatiloilla vettä käytetään eläinten juomavetenä, tuotantotilojen ja välineiden pesuvedenä sekä kasteluun. Eri eläinten juomaveden tarpeita on esitetty taulukossa 1. Lisäksi vettä käytetään lypsykarjatiloiilla mm. utareiden, lypsykoneen, tilasäiliön, vasikoiden juottoastioiden ja maito-huoneen lattioiden pesuun. Veden kulutukseen vaikuttavat pestävien tilojen koon lisäksi pesu-tekniikka. (Sorvala et al. 2006, 14.) Taulukossa 2 on esitetty lypsykarja- ja sikatiloille tyypillisiä pesuveden käyttömääriä.

**Taulukko 1.** Veden tarve eri eläimillä (Sorvala et al. 2006, 13).

<b>Eläin</b>	<b>Veden tarve [l/eläin/vrk]</b>
Lypsylehmä	100 - 120
Ummessa oleva lehmä	10 - 20
Lihanauta	22 - 60
Emakko	12 - 27
Karju	10
Porsas	1 - 2,5
Lihasika	4 - 7
Broileri (35 - 70 vrk)	0,2 - 0,35

**Taulukko 2.** Pesuveden käyttömääriä lypsykarja- ja sikatiloilla (Sorvala et al. 2006, 14).

<b>Tilatyppi</b>	<b>Veden tarve [l/eläin/vrk]</b>
Maitotila	30 - 45
Porsaskasvatus	0,2 - 3
Lihasikala	0,4

Teollisuuden vedenkulutus vaihtelee teollisuusaloittain. Esimerkiksi metsäteollisuus käytti prosessivettä 34,8 m<sup>3</sup>/tuotantotoni vuonna 2007 (Metsäteollisuus ry 2008, 11), kun taas elintarviketeollisuuden keskimääräinen vedenkulutus oli noin 3 m<sup>3</sup>/tuotantotoni vuonna 2005 (Elintarviketeollisuusliitto ry 2006, 15).

### 2.2.2 Jättemäärät

Suomessa syntyi vuonna 2006 yhdyskuntajätettä 2 566 000 tonnia eli 487 kg/henkilö. Yhdyskuntajätteet pitävät sisällään kotitalouksien jätteet sekä palveluista ja muusta tuotannosta syntyneet kotitalousjätteisiin verrattavat jätteet. Teollisuuden jätteet poikkeavat usein kotitalouksien jätteistä ja niissä syntyvää jätettä kutsutaan tuotantojätteeksi. Palvelujen tuotannossa syntyy sekä yhdyskunta- että tuotantojätettä, mutta painopiste on kotitalousjätteisiin verrattavissa

yhdyskuntajätteissä. (Tilastokeskus 2007a.) Tuotantojätteiden määrään ja laatuun vaikuttavat laitoksen tuotantosuunta ja koko. Massa- ja paperiteollisuuden jätteet ovat pääasiassa kuori- ja puujätettä sekä erilaisia lietteitä, joista teollisuus itse pystyy hyödyntämään energiakäytössä noin 90 %. Metalliteollisuuden jätteet puolestaan ovat pääasiassa metalliromua ja kemianteollisuuden jätteet ongelmajätettä. Energiantuotannossa syntyvät jätteet ovat suurimmaksi osaksi tuhkaa, savukaasujen puhdistuksessa muodostuvia jätteitä sekä petihiekkaa. (Uudenmaan ympäristökeskus 2008.)

Taulukkoon 3 on eritelty vuonna 2006 syntyneet yhdyskuntajätteet jätelajittain sekä keskimääräinen jätteen määrä asukasta kohden. Määrät kuitenkin vaihtelevat alueellisesti riippuen alueen elinkeinorakenteesta, koska eri toimialojen jätelajit ja jätekertymät eroavat toisistaan. (Tilastokeskus 2007a.)

**Taulukko 3.** Yhdyskuntajätteiden määrät vuonna 2006 (Tilastokeskus 2007a).

<b>Jätejae</b>	<b>Määrä [1000 t]</b>	<b>Osuus [%]</b>	<b>Määrä [kg/henkilö]</b>
<b>Sekajäte yhteensä</b>	<b>1 585</b>	<b>62</b>	<b>301</b>
Erilliskerätyt:			
- paperi ja kartonki	422	16	80
- biojäte	197	8	37
- lasi	136	5	26
- metalli	32	1	6
- puu	31	1	6
- muovi	28	1	5
- sähkö- ja elektro- niikkaromu	39	2	7
- muut	95	4	18
<b>Erilliskerätyt yhteensä</b>	<b>981</b>	<b>38</b>	<b>186</b>
<b>Kaikki yhteensä</b>	<b>2 566</b>	<b>100</b>	<b>487</b>

Yhdyskuntajätteiden lisäksi yhdyskunnissa syntyy jätevetä noin 500 miljoonaa m<sup>3</sup>/a eli 320 litraa henkilöä kohden vuorokaudessa. Jätevesi muodostuu jätevesilietteistä ja sadevesistä. Vuonna 2003 jätevedenpuhdistamoilla muodostui jätevesilietettä noin miljoona kuutiometriä, jossa oli noin 150 000 tonnia kuiva-ainetta. (Suomen ympäristökeskus 2007.) Kun Suomen ympäristökeskuksen mukaan 80 % suomalaisista asuu keskitetyn viemäroinnin ja jätevedenkä-



sittelyn piirissä, saadaan syntyvän jäteveden määräksi 120 m<sup>3</sup>/henkilö/a, jätevesilietteen määräksi 240 l/henkilö/a ja kuiva-aineen määräksi 36 kg/henkilö/a.

Maatalouden jätteet ovat pääasiassa kotitalousjätteiden kaltaisia, lukuun ottamatta eläinten lantaa, jota on pääosa maaseudulla syntyvästä jätteestä. Lannan tuotanto riippuu tilatyypistä. Taulukkoon 4 on koottu eri eläinten tuottamia lantamääriä vuodessa haihtuvana kiintoaineena (Volatile Solids, VS). Lanta on usein lietteenä, jolloin mukana saattaa olla myös pesu- ja sadevesiä. Kaikkea lantaa ei aina voida kerätä talteen, koska esimerkiksi lypsy- ja emolehmät laiduntavat pelloilla yleensä noin 3 - 4 kuukautta vuodessa, jolloin lannasta saadaan talteen noin 70 %. (Hagström et al. 2005, 13.)

**Taulukko 4.** Lantamäärät vuodessa eläinryhmittäin (Hagström et al. 2005, 13).

<b>Eläinryhmä</b>	<b>Lantamäärä [kg<sub>VS</sub>/a]</b>
Lypsylehmät	1700
Emolehmät	1400
Sonnit	800
Hiehot ja nuoret sonnit	450
Nuoret hiehot	250
Vasikat	150
Emakot	300
Karjut	200
Lihasiat	100
Nuoret lihasiat	50
Porsaot	10
Munivat kanat	6
Broilerit	3

Maataloudessa syntyy huomattavia määriä kasvintuotannon sivutuotteita ja muita kasvijätteitä sekä muovijätteitä, joita syntyy vuodessa noin 12 000 tonnia koko Suomen tasolla (Puumala & Grönroos 2004, 72). Tästä voidaan laskea, kun tiedetään Suomessa olevan lähes 67 000 maatilaa, että muovijätteitä syntyy vuodessa keskimäärin 180 kg/tila. Muovijätteitä ovat kiriste- ja aumakalvot, lannoitesäkit, siemensäkit, paalinarut, marjanviljelymuovit ja erilaiset kanisterit. Tilalla syntyvän muovijätteen määrään vaikuttavat tilan tuotantosuunta ja koko; esimerkiksi viljatilaille tulee suuria määriä viljan siemeniä muovisissa suursäkeissä.

### 2.2.3 Viljelykasvit ja metsät

Maatiloilla viljeltävien kasvien ja niiden sivutuotteena syntyvien jätteiden, kuten oljen, määrä riippuu viljelypinta-alasta sekä viljeltävästä kasvista. Myös kasvupaikka eli maaperän ominaisuudet ja leveysaste vaikuttavat kasvien hehtaarisatoihin. Taulukossa 5 on eri kasvien ja niiden sivutuotteiden keskimääräisiä tuottoja hehtaaria kohden Suomen oloissa. Etelä-Suomessa tuotot ovat yleensä hieman suuremmat kuin Pohjois-Suomessa. Oljen osalta on myös huomioitu, että kaikkea olkipotentiaalia ei ole mahdollista saada kerättyä pelloilta, esimerkiksi osa oljesta jää sänkenä pellolle. Taulukossa 5 esitetty ruokohelven tuotanto on hyvin optimistinen. MTT:n tekemän kyselytutkimuksen mukaiset tuotot ovat olleet 3,5 - 7 tonnia hehtaarilta (Kauppinen 2009).

**Taulukko 5.** Kasvien keskimääräiset tuotannot kuiva-aineena hehtaaria kohden.

<b>Kasvi</b>	<b>Keskimääräinen tuotanto [t<sub>dw</sub>/ha]</b>	<b>Lähde</b>
Kuivaheinä	3,6	Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008
Tuorerehu	11	Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008
Säilörehu	17,6	Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008
Timotei-apila-nurmi	8 - 11	Lehtomäki et al. 2007
Viljan jyvä	3,2	Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008
Viljan olki	2	Lehtomäki et al. 2007
Rypsin ja rapsin siemen	1,3 - 1,7	Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008
Rypsin ja rapsin olki	1,9	Alakangas 2000
Ruokohelpi	9 - 10	Lehtomäki et al. 2007

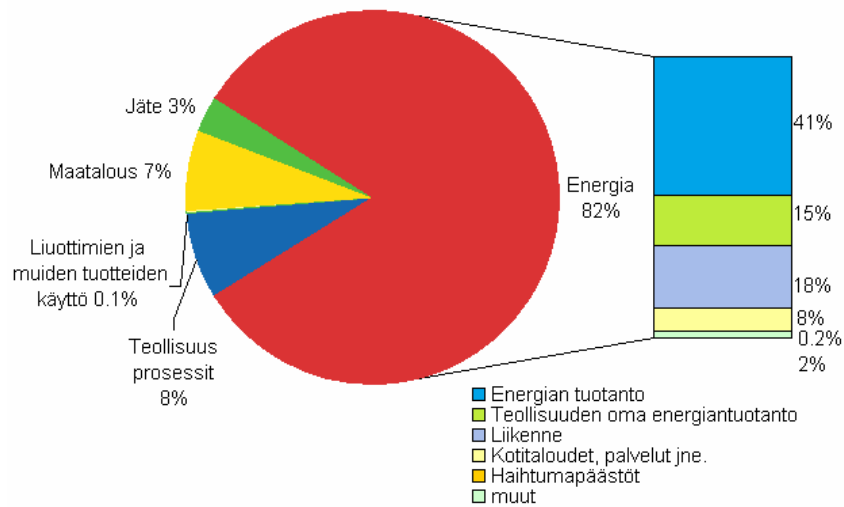
Kasvihuoneissa viljeltävien vihannesten satoon vaikuttaa viljelymuoto, joka voi olla perinteistä tai kausiviljelyä ilman tekovaalaistusta, tai ympärivuotista viljelyä, jolloin käytetään tekovaalaistusta. Kasvihuonekurkun keskimääräinen tuotanto on 40 kg/m<sup>2</sup>/a ja kasvihuonetomaatin 33 kg/m<sup>2</sup>/a (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008). Puutarhayritysrekisterin tietojen mukaan kurkun kausiviljelyn keskimääräinen kokonaissato on 23 kg/m<sup>2</sup>/a, perinteisen viljelyn 34 kg/m<sup>2</sup>/a ja ympärivuotisen viljelyn 84 kg/m<sup>2</sup>/a. Sadon lisäksi kurkun viljelystä syntyy kasvijätettä 27 kg/m<sup>2</sup>/a tuoresatona. Kuiva-aineena kasvijätettä syntyy 2,2 kg/m<sup>2</sup>/a. (Mik-

kola 2006, 18, 25, 29.) Tomaatin luonnonvaloviljelystä syntyy maanpäällistä kasvijätettä  $9 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  tuoresatona. Tämä pitää sisällään tomaatin varret, lehdet ja varkaat sekä raa'at hedelmät. Tomaatin juuristot eivät ole mukana, koska niitä käytetään yleensä maanparannusaineena viljelmillä. (Näkkilä 2008.)

Metsistä saadaan biomassaa uudishakkuiden ja harvennushakkuiden yhteydessä. Biomassa jakautuu metsästä korjattavaan runkopuuhun, joka menee teollisuuden käyttöön sekä hakkuutähteisiin. Hakkuutähdettä jää metsään noin puolet varsinaisen ainespuun määrästä. Hakkuutähteen määrään vaikuttavat puulaji, puumäärä, puuston järeys ja oksaisuus sekä lahon määrä. Kuusikoilla hakkuutähteen määrä on yli kaksinkertainen männiköihin ja koiviköihin verrattuna. Kuusivaltaisilta alueilta saadaan hakkuutähdettä noin  $100 \text{ m}^3/\text{ha}$ , josta saadaan tuoreena talteen yleensä 70 % ja kuivana noin 50 %. Ainespuuta saadaan tällöin noin  $200 - 250 \text{ m}^3/\text{ha}$ . (Alakangas 2000, 51.)

#### **2.2.4 Päästöt**

Suomen kasvihuonekaasupäästöjen määrä vastasi 80,3 miljoonaa hiilidioksiditonnia vuonna 2006 (Tilastokeskus 2008c). Kuvassa 3 on esitetty päästöjen jakautuminen eri sektoreille, josta nähdään, että energian tuotanto aiheuttaa suurimman osan kaasumaisista päästöistä. Energiantuotannon päästöihin vaikuttavat käytettävä polttoaine sekä energiantuotantotapa. Taulukossa 6 on esitetty eri polttoaineiden päästökertoimia, joiden avulla voidaan arvioida energiantuotannon aiheuttamia päästöjä. Puuperäisille polttoaineille ja biokaasulle on taulukossa annettu hiilidioksidipäästökerroin, vaikka laskennallisesti näiden hiilidioksidipäästöt ovat nolla, koska biomassan kasvu sitoo yhtä paljon hiiltä kuin sen poltosta vapautuu. Päästöjen määrään voidaan vaikuttaa polttoaineen valinnalla, polttotekniikalla sekä käyttämällä erilaisia savukaasujen puhdistusmenetelmiä. Sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt voidaan yleensä laskea sähköntuottajan ilmoittaman päästökertoimen avulla.



Kuva 3. Suomen kasvihuonekaasupäästöjen jakautuminen sektoreittain v. 2006 (Tilastokeskus 2008c).

Taulukko 6. Energiantuotannon aiheuttamia päästökertoimia (Suomen ympäristökeskus 2008b; Tilastokeskus 2006).

Polttoaine	CO <sub>2</sub> -päästökerroin [g/MJ]	N <sub>2</sub> O-päästökerroin [mg/MJ]	CH <sub>4</sub> -päästökerroin [mg/MJ]	NO <sub>x</sub> -päästökerroin [mg/MJ]
Raskas polttoöljy	78,8	1	1	180
Kevyt polttoöljy	74,1	1	1	100
Maakaasu	55	2	1	70
Turve:				
- Leijukerros poltto	102	2 - 15	3 - 5	120 - 160
- Arinapoltto	102	2	2	200
Kivihiili:				
- Leijukerros poltto	94,6	70	1	170
- Arinapoltto	94,6	4	4	170
Puuperäiset polttoaineet	109,6	2 - 10	50	100 - 140
Biokaasu	56,1	-	-	-

Autojen pakokaasuissa on useita satoja yhdistettä. Yhdestä litrasta bensiiniä muodostuu sen palaessa noin 16 kg pakokaasuja, joista suurin osa on tyyppä ja 2,4 kg hiilidioksidia. Yksittäisiä vaarallisia yhdistettä tulee bensiinilitraa kohden joitakin satoja grammoja. Liikenteen aiheuttamiin päästöihin vaikuttavat ajoneuvojen määrä, tyyppi ja ikä. Lisäksi vaikutusta on ajoneuvolla ajettulla matkalla, ajonopeudella, käynnistysten lukumäärällä ja käynnistyslämpötilal-

la. (Mäkelä et al. 2008, 27.) Taulukossa 7 on esitetty päästökertoimia erityyppisille ajoneuvoille pääkaduilla ajettaessa. Arvot ovat uusien autojen päästöjä.

**Taulukko 7.** Ajoneuvojen päästökertoimia pääkaduilla ajettaessa (Mäkelä et al. 2008, liite C).

<b>Ajoneuvo</b>	<b>Hiilimonoksidi<sup>1)</sup> [g/km]</b>	<b>Typen oksidit [g/km]</b>	<b>Metaani [g/km]</b>	<b>Dityppioksidi [g/km]</b>
Henkilöauto, benssiini	1,2	0,32	0,02	0,05
Henkilöauto, diesel	0,65	0,52	0,005	0,01
Pakettiauto, benssiini	1,28	0,36	0,08	0,006
Pakettiauto, diesel	1,12	1,1	0,005	0,017
Kuorma-auto perävaunulla, diesel	2,88	17	0,06	0,03

<sup>1)</sup> Hiilimonoksidi muuttuu ilmassa nopeasti hiilidioksidiksi

Maataloudessa kaasumaisia päästöjä syntyy maatalouden tarvitseman energian tuotannosta, työkoneiden käytöstä, lannoitteiden ja torjunta-aineiden valmistuksesta ja käytöstä sekä luonnon omista prosesseista, joita maanviljely voi kiihdyttää. Lisäksi päästöjä syntyy märehitöiden ruuansulatuksessa ja kotieläinten lannasta, joista syntyvien metaanipäästöjen muodostumiseen vaikuttavat eläintyyppi, eläimen ikä, kunto, paino ja energiankulutus sekä ruokinnan laatu ja määrä (Pipatti 1997, 15). Taulukossa 8 on esitetty päästökertoimia kotieläinten ruuansulatuksen sekä lannan käsittelyn ja varastoinnin aiheuttamille metaanipäästöille. Lannan metaanipäästöihin vaikuttaa onko kyseessä lietelanta vai kuivalanta sekä käsittelymenetelmä. Taulukon 8 arvot ovat eri menetelmien keskimääräisiä arvoja. Myös maatalouskoneista ja muusta energian käytöstä aiheutuu metaanipäästöjä polttoprosessien yhteydessä. Viljellyillä turvemaidilla metaanipäästöt ovat noin 2 kg/ha. (Tuomisto 2005, 10.)

**Taulukko 8.** Kotieläinten aiheuttamien metaanipäästöjen arviointiin käytettäviä päästökertoimia (Pipatti 1997, 18, 20).

Kotieläin	Ruuansulatuksen päästökerroin [ $\text{kg}_{\text{CH}_4}/\text{eläin}/\text{vuosi}$ ]	Lannan päästökerroin [ $\text{kg}_{\text{CH}_4}/\text{eläin}/\text{vuosi}$ ]
Lypsylehmät	100	14
Muut nautaeläimet	48	6
Siat	1,5	4
Lampaat	8	0,19
Hevoset	18	1,39
Siipikarja	-	0,078

Maatalousmaasta syntyy hiilidioksidipäästöjä kasvijätteen hajotessa pellolla ja maan orgaanisen aineen mineralisoituessa aerobisessa ympäristössä. Hiilidioksidipäästöjen määrään vaikuttavat lämpötila, kosteus, ilmavuus, happamuus, muokkaus, maan rakenne ja koostumus, kasvijätteen kemialliset ominaisuudet ja rakenne sekä maan ravinteisuus. Soiden raivaaminen viljelyyn sekä maan muokkaus tehostavat orgaanisen aineksen hajoamista ja lisäävät siten hiilidioksidin virtaa ilmakehään. (Tuomisto 2005, 8.) Toisaalta biomassan ja metsien kasvu sitoo hiilidioksidia ilmasta. Puuston nettokasvuun sitoutuvan hiilidioksidin määrä voidaan laskea yhtälöllä (Koski 2008, 15):

$$B_{\text{CO}_2, \text{puusto, netto}} = (B_{\text{C, kasvu}} - L_{\text{C, hakkuu}}) \cdot \frac{44}{12}, \quad (1)$$

missä  $B_{\text{CO}_2, \text{puusto, netto}}$  on puuston nettokasvun sitoman hiilidioksidin määrä (t/a)

$B_{\text{C, kasvu}}$  on puuston kasvun sitoman hiilen määrä (t/a)

$L_{\text{C, hakkuu}}$  on hiilen poistuma hakkuissa (t/a)

44/12 on hiilen muuntokerroin hiilidioksidiksi.

Kun puu kasvaa yhden kuutiometrin, se sitoo hiiltä 215 kg ja saman verran myös poistuu hakkuissa. Puuston nettokasvun lisäksi hiilidioksidia sitoutuu myös oksiiin, juuriin, neulasiin ja muuhun puun biomassaan. Biomassaan sitoutuvan hiilen laskentaan on kehitetty biomassan kasvukerroin (BEF eli Biomass Expansion Factor), johon vaikuttavat puulaji ja ikä. 21 - 40 vuotiaiden männyn, kuusen ja koivun keskimääräinen kerroin on 0,704. Puiden biomassaan sitoutuvan hiilidioksidin määrä voidaan laskea yhtälöllä (Koski 2008, 15):

$$B_{\text{CO}_2, \text{biomassa}} = G_{\text{puusto, netto}} \cdot BEF \cdot 0,514 \cdot \frac{44}{12}, \quad (2)$$

missä  $B_{\text{CO}_2, \text{biomassa}}$  on puiden biomassan sitoman hiilidioksidin määrä (t/a)

$G_{\text{puusto, netto}}$  on puuston nettokasvu ( $\text{m}^3/\text{a}$ )

$BEF$  on biomassan kasvukerroin

0,514 on keskimääräinen hiilen sidonta ( $\text{t}/\text{m}^3$ ).

Viljeltyjen turvemaiden hiilidioksidipäästöjen on arvioitu Suomen olosuhteissa olevan vuosittain laitumille alle yksi tonni hehtaaria kohden ja viljellyille pelloille alle neljä tonnia hehtaaria kohden. Myös maatalousmaan kalkitseminen aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Päästöjen määrä riippuu maaperän ominaisuuksista ja käytettävästä karbonaattiyhdisteestä. Kalkin karbonaatti reagoi maaperässä, jonka seurauksena vapautuvan hiilidioksidin määrä vaihtelee 440 ja 470 kg/t kalkkia välillä. (Pipatti et al. 2000, 12, 14.)

Dityppioksidipäästöjä syntyy maassa tapahtuvassa nitrifikaatiossa eli ammoniumin hapettumassa nitraatiksi ja denitrifikaatiossa eli nitraatin pelkistyessä typpikaasuksi. Dityppioksidipäästöjen määrään vaikuttavat lisäävästi typpilannoitteiden ja lannan käyttö. Maahan jääneistä kasvijätteistä vapautuu dityppioksidia noin 0,1 - 0,2 kg/ha, väkilannoitteista noin 1,8 kg/ha ja turvemailta 14 kg/ha. (Tuomisto 2005, 9-10.)

Metsäteollisuuden päästöistä merkittävimpiä ovat energiantuotannosta peräisin olevat rikin ja typen oksidit, joiden osuus Suomen rikki- ja typpipäästöistä on 10 %. Päästöjä on saatu vähennettyä paremmilla tekniikoilla ja vähemmän rikkiä sisältävillä polttoaineilla. Rikkipäästöt olivat vuonna 2007 vielä 1,25 kg/tuotantotonna, typen oksidien ja hiukkasten päästöjen jäädessä alle 0,5 kg/tuotantotonna. Metsäteollisuuden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt olivat 306 kg/tuotantotonna vuonna 2007. (Metsäteollisuus ry 2008, 5, 11.)

Liukoinen typpi ja fosfori aiheuttavat vesistöjen rehevöitymistä ja lisäävät kasvibiomassaa. Maatalouden hajakuormituksen arvioidaan olevan suurin yksittäinen ihmisen toiminnan aiheuttama vesistökuormittaja. Syynä tähän on yksipuolinen viljely, runsas väkilannoitteiden käyt-

tö sekä tehokkaat koneet ja muokkausmenetelmät, jotka ovat alentaneet maan humuspitoisuutta sekä tiivistäneet maita ja samalla lisänneet ravinteiden huuhtoutumisriskiä. Sääoloilla, rinteiden kaltevuudella ja pituudella sekä valunnan suuntautumisella on suuri vaikutus eroosioon ja ravinteiden huuhtoutumiseen. Viljeltäessä viljoja savimailla, typpeä on arvioitu huuhtoutuvan vuosittain keskimäärin 6 kg/ha pintavaluntana ja 8 kg/ha salaojavaluntana sekä fosforia 0,8 kg/ha ja 0,5 kg/ha. (Tuomisto 2005, 11.)

Maatalouden lisäksi vesistökuormitusta aiheuttavat teollisuuden ja asutuksen jätevedet. Teollisuuden jätevesien aiheuttama vesistökuormitus on vähentynyt 1990-luvun alusta lähtien tehos-  
tuneen jätevesien puhdistuksen vaikutuksesta. Massa- ja paperiteollisuus aiheuttaa kuitenkin merkittäviä fosfori- ja typpipäästöjä. Massa- ja paperiteollisuuden lisäksi Suomessa aiheutuu merkittävää vesistökuormitusta erityisesti kemianteollisuudesta sekä metallien valmistuksesta ja jalostuksesta. (Suomen ympäristökeskus 2008a.)

### **2.3 Energiavirtoihin vaikuttavat tekijät**

Keskimääräinen vuotuinen energian kulutus Suomessa on noin 79 MWh/asukas ja sähkönkulutus 16,3 MWh/asukas pitäen sisällään kaiken Suomessa kulutetun energian jaettuna Suomen väkiluvulla (Gynther et al. 2005, 11 - 12). Alueen kokonaisenergiankulutukseen vaikuttaa alueella olevan teollisuuden määrä ja laatu, koska Suomen energiankulutus ei ole jakautunut tasaisesti eri sektoreille, eivätkä teollisuus ja palvelut ole jakautuneet tasaisesti koko Suomessa. Suomen energiankulutus jakautui eri sektoreille vuonna 2003 seuraavasti (Gynther et al. 2005, 10):

- Teollisuus 47 %
- Kotitaloudet 19 %
- Liikenne 17 %
- Palvelut 10 %
- Muut 7 %.



### 2.3.1 Maatalous

Maatilojen energiatarpeet ovat hyvin yksilöllisiä, mutta joitakin yleistyksiä voidaan tehdä. Taulukossa 9 on esitetty sähkön- ja lämmöntarpeita maatiloilla eläintä kohti laskettuna. Maito- ja lihakarjatiloiilla lämmityksen tarve on yleensä vähäistä. Jos tilalla on myös nuorta karjaa, tarvitaan lämmitystä talvella. Maitotiloilla sähkön tarve noudattaa vuorokausirytmää, jossa on kaksi selvästi erottuvaa piikkiä, jotka ajoittuvat aamu- ja iltalypsyn jälkeiseen laitteiden pesuun. Muita merkittäviä sähkön kulutuskohteita ovat lypsäminen sekä maidon pumppaus ja jäähdytys, jotka tapahtuvat osittain laitteiden pesun kanssa samaan aikaan. Maitotiloilla sähkön kokonaistarve riippuu kokoluokasta, mutta tilakoon kasvaessa peruskuorman tarve ei kasva vastaavasti kuin huipputehon tarve. Tämän vuoksi sähkön kulutus lypsävää kohti pienenee hieman tilakoon kasvaessa. Lihakarjatiloiilla sähkön tarve on pienempi kuin maitotiloilla. (Hagström et al. 2005, 15.)

Sikatiloilla lämmityksen tarve on huomattava ja se riippuu tilatyypistä ja kokoluokasta. Lämmön tarve on emakkosikalassa suurin, koska porsaiden vieroitusosastolla tarvitaan muuta sikalaa korkeampi lämpötila. Sähkön kuormaprofiili sikaloissa on melko tasainen päivän aikana ja laskee yöllä minimiarvoonsa. Yölläkin sähkökuorma on noin kolmannes maksimiarvosta. (Hagström et al. 2005, 16.)

Broilerin ja muun lihasiipikarjan tuotannossa on lämmitystarvetta ympäri vuoden, koska tuotanto noudattaa kasvatussyklejä, joissa eläinsuojien lämpötila on pienimmillään 20 °C. Sähköä tarvitaan ilmastointiin, valaistukseen ja rehulinjoille. Tilakohtainen vaihtelu sähkön tarpeessa on suurta johtuen muun muassa valaistustekniikasta. Lämmön ja sähkön kulutushuiput osuvat kasvatussyklin vastakkaisiin päihin. (Hagström et al. 2005, 16.)

Viljelytuotantoon liittyvät energiantarpeet ovat pääasiassa liikkuvien ja paikallaan pysyvien koneiden ja laitteiden polttoainetarpeita sekä joidenkin laitteiden sähköenergian tarpeita. Lämpöä tarvitaan lähinnä sadon kuivauksessa, joka hoidetaan usein öljyn avulla. (Hagström et al. 2005, 17.) Viljan kuivaukseen tarvittava energiamäärä riippuu viljan kosteudesta ja määrästä

sekä kuivauslämpötilasta, mutta keskimäärin viljan kuivaus vaatii energiaa yhdellä tilalla 120 MWh/a, josta 9 % on sähköenergiaa ja loput lämpöenergiaa (Aho et al. 2006, 11).

Pääosa kasvihuoneiden energian kulutuksesta aiheutuu lämmityksestä ja valaistuksesta. Lämmityksen tarve ajoittuu lähinnä talvikuukausille, mutta myös kesällä täytyy kasvihuoneita lämmittää kylmien jaksojen aikana ja aamuisin ylimääräisen kosteuden poistamiseksi. Valaistuksen avulla voidaan pidentää kasvukautta sekä parantaa tuotteiden laatua. Valaistuksen lisäksi sähköä kuluu kylmiöissä, kastelussa ja muissa oheislaitteissa. Kasvihuoneiden energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat kasvihuoneen koko, rakennusmateriaalit, ympäristöolosuhteet ja viljelyparametrit. (Aho et al. 2006, 14 - 15.) Kasvihuoneiden keskimääräinen sähkön kulutus vuonna 2006 oli 0,17 MWh/m<sup>2</sup> ja kaukolämmöllä sekä eri polttoaineilla tuotettu lämpö oli 0,51 MWh/m<sup>2</sup> (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008).

**Taulukko 9.** Sähkön ja lämmön kulutukset eri maatilatyypeillä (Hagström et al. 2005, 15 - 17).

<b>Tilatyyppe</b>	<b>Sähkön kulutus [MWh/eläin]</b>	<b>Lämmön kulutus [MWh/eläin]</b>
Maitotila (n. 47 lypsävää)	2,5	1,25
Maitotila (n. 120 lypsävää)	1,6	1,25
Lihakarjatila	0,375	1,25
Sikatila (500 emakon yhdistelmä-sikala, puolet emakkoja)	0,3	0,25
Sikatila (850 emakon emakkosikala)	0,29	0,35
Sikatila (5 500 lihasikaa)	0,06	0,09
Siipikarjatila (15 000 linnun halli)	0,003	0,014

### 2.3.2 Asuinrakennukset

Asuinrakennusten lämmön kulutukseen vaikuttavat rakennuksen koko, sää, eristys ja lämmitystottumukset. Lämpöenergian kulutus jakautuu tilojen ja käyttöveden lämmitykseen sekä näistä aiheutuviin häviöihin. Käyttövettä, jonka lämmittämiseen kuluu 30 - 40 % rakennuksen vuotuisesta lämpöenergian kulutuksesta, täytyy lämmittää tasaisesti läpi vuoden, mutta tilojen lämmitykseen kuluu talvella huomattavasti enemmän energiaa kuin kesällä. Asuinrakennuksen kesäajan lämpöenergian kulutus on noin 37 % pienempi kuin koko vuoden keskimääräinen

kulutus. Sähköä tarvitaan valaistukseen, ilmanvaihtoon, ruuan säilytykseen ja valmistukseen sekä viihde-elektroniikkaan ja muihin laitteisiin. Sähkön kulutus pysyy asuinrakennuksessa melko tasaisena läpi vuoden. (Ympäristöministeriö 2008, 7, 11.)

Pinta-alaltaan 163 m<sup>2</sup> olevassa asunnossa lämpöenergiaa kuluu noin 26 600 kWh/a ja sähköenergiaa 7 900 kWh/a (Ympäristöministeriö 2008, 7). Tästä saadaan lämpöenergian kulutukseksi 163 kWh/m<sup>2</sup>/a ja sähköenergialle 49 kWh/m<sup>2</sup>/a. Ahon et al. (2006, 11) mukaan maatalojen asuinrakennusten lämmitykseen kuluu kuitenkin 160 - 300 kWh/m<sup>2</sup>/a, josta keskiarvoksi saadaan 245 kWh/m<sup>2</sup>/a. Tämän voidaan olettaa soveltuvan omakoti- ja rivitalojen lämmitystarpeen laskentaan, koska niissä lämpöenergian tarve on suurempi kuin kerrostaloissa.

### 2.3.3 Teollisuus ja palvelut

Teollisuuden energiankulutus oli 47 % Suomen energiankulutuksesta vuonna 2003. Teollisuuden ja rakentamisen osuus Suomen sähkönkulutuksesta oli puolestaan 53 % vuonna 2006 ja jakautui seuraavasti (Tilastokeskus 2007b):

- Puu- ja paperiteollisuus        59 %
- Metalliteollisuus                17 %
- Kemianteollisuus                14 %
- Muut                                 11 %.

Paperintuotannon ominaisenergiankulutus on ollut hieman laskusuunnassa ja vuonna 2003 se oli 0,58 toe/tuotetonni. Yksi toe on noin 42 GJ, joka puolestaan on 11,67 MWh, jolloin energian kulutukseksi saadaan noin 6,7 MWh/tuotetonni. Teräksentuotannon ominaisenergiankulutus oli puolestaan 0,3 toe/tuotetonni vuonna 2003 eli noin 3,3 MWh/tuotetonni. (Gynther et al. 2005, 21.) Elintarviketeollisuuden ominaisenergiankulutus vuonna 2005 oli 0,56 MWh/tuotetonni jakautuen siten, että sähkön kulutus oli 0,2 MWh/tuotetonni ja lämmön kulutus 0,37 MWh/tuotetonni (Elintarviketeollisuusliitto ry 2006, 12).

Palvelusektorin osuus Suomen energiankulutuksesta oli 10 % vuonna 2003, pitäen sisällään sekä yksityisen että julkisen sektorin. Sähkön kulutuksen osuus puolestaan oli 19 % vuonna

2006 (Tilastokeskus 2007b). Sähkön ominaiskulutukseksi palvelusektorilla voidaan arvioida 8,5 MWh/työntekijä tai 0,16 MWh/m<sup>2</sup> (Gynther et al. 2005, 41, 59).

### 2.3.4 Liikenne

Liikenteen polttoaineen kulutukseen vaikuttaa ajoneuvojen määrä, tyyppi ja ikä. Lisäksi vaikutusta on ajoneuvolla ajettulla matkalla ja ajonopeudella. Taulukossa 10 on vuoden 2007 autokannan keskimääräiset polttoaineen kulutukset sadalla kilometrillä eriteltynä maantie- ja kaupunkiajoon sekä erityyppisille ajoneuvoille.

**Taulukko 10.** Ajoneuvojen keskimääräiset polttoaineiden kulutukset vuonna 2007  
(Mäkelä et al. 2008, liite F).

Ajoneuvotyyppi	Katuliikenne [litraa/100 km]	Maantieliikenne [litraa/100 km]
Henkilöauto, bensiini	7,7	5,2
Henkilöauto, diesel	8,7	6,6
Pakettiauto, bensiini	10,7	8,5
Pakettiauto, diesel	11,6	10,0
Kuorma-auto, ei perävaunua	38,8	27,3
Kuorma-auto, perävaunulla	47,7	37,1

Maatalouskoneissa ja -traktoreissa polttoaineen kulutukseen vaikuttavat käyttötapa ja -aste. Peltotyössä polttoainetta kuluu peltojen muokkauksessa, kylvössä, lannoituksessa, kalkitsemisessä, kasvinsuojelussa, leikkuupuinnissa, paalauksessa, kuormauksessa ja kuljetuksessa. Arvioitu polttoöljyn kulutus hehtaaria kohden on 45 - 110 litraa, joka pitää sisällään kaikki toiminnot kyntämisestä paalaukseen. Nurmirehun korjuuseen on arvioitu kuluvan 35 - 50 litraa polttoöljyä hehtaarilla. (Aho et al. 2006, 11.)

## **3 BIOMASSAAN PERUSTUVAT PIENEN MITTAKAAVAN CHP-TEKNOLOGIAT**

### **3.1 Biomassan muuntaminen energiaksi**

Biomassan muuntaminen energian tuotantoon soveltuvaan muotoon voi tapahtua biologisesti, kemiallisesti tai termokemiallisesti. Termokemiallinen tapa tarkoittaa termistä käsittelyä, biologinen tapa anaerobista käsittelyä eli mikrobiologisia keinoja ja kemiallisessa käsittelyssä käytetään uuttamista ja transesteröintiä. (Lensu & Alakangas 2004, 27.) Seuraavassa tarkastellaan termistä ja anaerobista käsittelyä lähemmin. Kemiallinen käsittely on jätetty pois tarkasteluista, koska sen avulla tuotetaan biodieseliä eivätkä nestemäiset biopolttoaineet sisälly tähän työhön.

#### **3.1.1 Terminen käsittely**

Teromisellä käsittelyllä tarkoitetaan biomassan polttamista, jonka seurauksena syntyy valoa, lämpöä, hiilidioksidia ja vettä (Klass 1998, 192). Polttoainepartikkelin palaminen jakautuu eri vaiheisiin, jotka ovat lämpeneminen kuivumislämpötilaan, kuivuminen, pyrolyysi ja jäänhöhiilen palaminen tai kaasutus. Kiinteän polttoaineen palamisnopeus riippuu sen kemiallisista ominaisuuksista (reaktiivisuus, lämpöarvo), rakenteellisista ominaisuuksista (partikkelikoko, tiheys) ja fysikaalisista ominaisuuksista (ominaislämpö, lämmönjohtavuus). Jotta palamista voitaisiin ylläpitää, täytyy samanaikaisesti olla läsnä polttoainetta, riittävä lämpötila ja happea. (Raiko et al. 1995, 139.)

Palamisen aikana kemiallisesti sitoutuneet hiili ja vety hapettuvat. Epätäydellisen palamisen seurauksena voi syntyä suuria määriä partikkeleita ja osittain hapettuneita johdannaisia, joista osa voi olla myrkyllisiä. Kemiallisesti sitoutuneet rikki ja typpi, joita voi olla biomassassa, hapettuvat rikki- ja typpioksideiksi. Palamislämpötila vaikuttaa typen oksidien syntyyn siten, että korkeammassa lämpötilassa niitä syntyy enemmän. Myös poltettavan biomassan kemiallinen koostumus vaikuttaa syntyvien päästöjen ja tuhkan määrään. (Klass 1998, 194 - 195.)

Erilaisia polttotekniikoita ovat arinapoltto, joka edustaa perinteisintä polttotekniikkaa, ja leijukerrospoltto, joka soveltuu ainoastaan suuren mittakaavan laitoksille. Arinapolttajärjestelmän osat ovat arina sekä polttoaineen ja palamisilman syöttö. Polttoaineen syöttöjärjestelmän tehtävänä on syöttää polttoainetta koko arinan leveydeltä tasaisena kerroksena. Syöttöjärjestelmän toimivuus on tärkeää, koska polttoaineen sekoittuvuus arinalla, etenkin leveys suunnassa, on usein huonoa, josta seuraa primääri-ilman hallitsematonta karkaamista. Palamisilma syötetään yleensä kahdessa vaiheessa, mutta joissakin tapauksissa kolmessa vaiheessa. Primääri-ilma syötetään arinan alta ja sekundääri- ja mahdollisella tertiäri-ilmalla poltetaan polttoainekerroksesta haihtuneet palamiskelpoiset kaasut. (Helynen et al. 2002, 39 - 40.)

Arinoilla poltetaan pääasiassa kiinteitä polttoaineita, kuten biopolttoaineita, hiiltä ja turvetta. Näiden lisäksi voidaan polttaa erilaisia jätepolttoaineita, kuten puun kuorta, yhdyskuntajätettä ja lietettä, joko yhdessä pääpolttoaineen kanssa tai erikseen. (Raiko et al. 1995, 395 - 396.) Arinapolton etuna on pieni omakäyttöteho. Lisäksi polttoaineen palakoko voi olla suurempi kuin muilla polttotekniikoilla, savukaasun puhdistimena voidaan käyttää multisyklonia, koska suurin osa tuhkasta poistuu tuhka-arinan kautta, ja arinapoltto on yksinkertaisen rakenteensa vuoksi helppokäyttöinen sekä edullinen. Arinapolton heikkouksiin kuuluu leijukerrospoltoa suuremmat tuhkahäviöt, hidas tehon säätö ja vaikea automaation toteutus. Lisäksi polttoainetta on tulipesässä aina monessa palamisvyöhykkeessä, jolloin polttoaineen ominaisuuksien muutokset vaikuttavat palamisprosessiin helposti eli palamisprosessi on vaikeammin hallittava. (Helynen et al. 2002, 46.) Eri palamisvyöhykkeiden ja tätä kautta lämpötilaerojen seurauksena on usein epätäydellinen palaminen, joka puolestaan lisää hiilimonoksidi- ja hiilivety-päästöjä (Raiko et al. 1995, 407).

Polton lisäksi termiseen käsittelyyn kuuluu kaasutus. Kaasutus toteutetaan ali-ilmalla ja korkealla lämpötilalla, joilla optimoidaan kaasun tuotto. Pyrolyysin jälkeen jäljelle jäänyt kiinteä hiili eli jäännöshiili voidaan muuttaa kaasuksi käyttämällä ilmaa, hiilidioksidia tai vesihöyryä. Tuotekaasun polttokelpoiset osat ovat suurimmaksi osaksi hiilimonoksidia, vetyä ja metaania, joita voi olla 40 % kaasun tilavuudesta. Loppuosa on esimerkiksi typpeä ja hiilidioksidia. (Alakangas & Flyktman 2001, 17 - 18.)

Pienessä kokoluokassa (alle 15 MW<sub>th</sub>) kilpailukykyisimmät kaasutusprosessit perustuvat kiinteäkerroskaasutukseen. Markkinoilla olevat pienimmät kaasutuspolttolaitokset toimivat vastavirtakaasutusperiaatteella, jossa polttoaine syötetään reaktorin yläosaan ja kaasutusilma tai -happi alaosaan. Polttoaine valuu reaktorissa hitaasti kuivumis-, pyrolyysi-, kaasutus- ja polttoyöhykkeiden läpi. Kaasutusreaktiossa ei ylitetä 1 000 °C lämpötilaa, joten tuhkan sulaminen ei muodosta ongelmaa. Tuhka poistetaan reaktorin pohjalta. Polttoaineeksi soveltuu vain suhteellisen tasalaatuinen ja palamainen polttoaine, jonka partikkelikoko on muutamia senttimetrejä, koska kaasujen täytyy päästä virtaamaan polttoainekerroksen läpi. (Helynen et al. 2002, 43 - 44.)

Condens Oy ja VTT Energia ovat kehittäneet uudentyyppisen Novel-kiinteäkerroskaasuttimen, joka soveltuu myös hienoainesta sisältäville keveille polttoaineille, kuten sahanpurulle, metsätähdemurskeelle ja kierrätyspolttoaineelle. Novel-kaasutin perustuu pakkotoimiseen polttoaineen syöttöön, vastavirtaperiaatteella toimivaan kaasuttimen alaosaan ja sen yläpuolisessa tilassa tapahtuvaan kaasun krakkaukseen. (Helynen et al. 2002, 47.)

### **3.1.2 Anaerobinen käsittely**

Anaerobinen käsittely perustuu orgaanisen aineksen hajoamiseen hapettomissa eli anaerobisissa oloissa. Anaerobinen hajoaminen on biologinen prosessi, jossa useat eri mikrobit osallistuvat hajotusketjun eri vaiheisiin, jotka ovat (Lehtomäki et al. 2007, 22):

1. Hydrolyysi: haponmuodostajabakteerien erittämät entsyymit hajottavat käsiteltävän materiaalin sisältämät yhdisteet yksinkertaisiksi liukoiksi yhdisteiksi.
2. Asidogeneesi: hydrolyysituotteet hajoavat edelleen happokäymisessä haihtuviksi rasvahapoiksi.
3. Asetogeneesi: vetyä tuottavat bakteerit hajottavat rasvahapot edelleen asetaatiksi, hiilidioksidiksi ja vedyksi.
4. Metanogeneesi: metaanintuottajabakteerit tuottavat metaania asetaatista tai hiilidioksidista ja vedystä.

Anaerobisen hajoamisen optimaalisena pH-alueena pidetään 6,5 - 7,5. Tyypillisimmin biokaasuprosessit ovat joko mesofiilisiä (lämpötila 35 - 38 °C) tai termofiilisiä (lämpötila noin 55 °C). Termofiilisen käsittelyn etuna on käsiteltävän jätteen nopeampi hajoaminen, jolloin tarvittava reaktoritilavuus on pienempi ja rakentamiskustannukset samalla alhaisemmat. Termofiiliset prosessit tuottavat usein myös enemmän biokaasua kuin matalamman lämpötilan prosessit, jolloin myös energiasaanto on suurempi. Suuremmassa lämpötilassa myös käsiteltävien materiaalien hygienisoituminen on tehokkaampaa, joka on tärkeää erityisesti hajoamisjäännöksen peltokäytön kannalta. Mesofiilisen prosessin etuna on sen vakaampi toiminta, koska termofiilinen prosessi on herkempi lämpötilan ja pH:n muutoksille sekä inhibiittorien vaikutuksille. (Taavitsainen et al. 2002, 20; Lehtomäki et al. 2007, 31 - 32.)

Biokaasuprosessia inhiboivia eli normaalia toimintaa häiritseviä tekijöitä voivat olla normaalin hajotustoiminnan välituotteiden kertyminen tai prosessissa käsiteltävien aineiden sisältämät orgaaniset tai epäorgaaniset yhdisteet. Yksi tärkeimmistä inhibiittori aiheuttavista tekijöistä maatalouden jätteitä käsiteltäessä on ammoniakki eli ammoniumtyypen ionisoitumaton muoto. Metaanintuottoa inhiboivan ammoniakkin määrä kasvaa pH:n ja lämpötilan noustessa, jolloin suurempi osa ammoniumtyypestä on ammoniakkinä. Tällöin asetaatista metaania tuottavien mikrobien kasvu häiriintyy. Tämä aiheuttaa enemmän ongelmia typpipitoisten sian- ja kananlannan käsittelyssä sekä termofiilisessä prosessissa. Lisäksi pitkäketjuiset (LCFA) ja haihtuvat (VFA) rasvahapot voivat inhiboida biokaasuprosessia. LCFA:t voivat inhiboida metaanin tuotannon lisäksi hydrolyysia, jolloin anaerobinen hajoaminen ei etene lainkaan. Liuennut happi voi inhiboida anaerobista hajoamista, mutta se ei yleensä pääse vaikuttamaan merkittävästi, sillä mikrobit kuluttavat nopeasti prosessiin kulkeutuneen hapen. Myös hiilidioksidin vähäinen määrä voi häiritä metaanintuottoa alentamalla prosessin puskurointikykyä. Muita mahdollisia inhibiittoreita ovat esimerkiksi suuret pitoisuudet desinfiointi- ja puhdistusaineita, antibiootteja, raskasmetalleja ja ligniiniä. (Rintala et al. 2002, 22 - 25.)

Biokaasuprosessit voidaan jakaa märkä- ja kuivaprosesseihin. Märkäprosessissa materiaalit käsitellään yleisimmin jatkuvasekoitteisissa reaktoreissa ja kuiva-ainepitoisuus on enimmillään 10 - 13 %, jolloin syöte ja käsitelty materiaali ovat helposti pumpattavissa ja mekaanisesti sekoitettavissa. Sekoituksen tarkoituksena on levittää mikrobeja tasaisesti käsiteltävään mate-



riaaliin, tasoittaa lämpötilaeroja, estää laskeutumista ja pintalietteen muodostumista sekä vapauttaa biokaasukuplat käsiteltävästä materiaalista. Märkäprosessi on kuivaprosessia helpommin automatisoitavissa ja hallittavissa, mutta kaasuntuotto jää usein alhaisemmaksi reaktoritilavuutta kohti korkean nestepitoisuuden vuoksi. Kuivaprosessissa käsiteltävän materiaalin kuiva-ainepitoisuus on yleensä noin 20 - 40 %. Kuivaprosessit voivat olla joko panosperiaatteella toimivia tai jatkuvatoimisia, sekoituksella varustettuja tai sekoittamattomia, ja yksi- tai useampivaiheisia. Kuivaprosessin etuina on korkeampi metaanintuotto reaktoritilavuutta kohti ja vähäisempi lämmitystarve alhaisen nestepitoisuuden vuoksi. Lisäksi materiaalin kelluminen ja pintakerroksen muodostuminen ei yleensä ole ongelma. Haittapuolena on usein märkäprosessia alhaisempi puskurikapasiteetti ja siitä aiheutuva suurempi valvonnan ja prosessin ohjauksen tarve, sekä monimutkaisempien ja kalliimpien laitteiden tarve materiaalien syötössä reaktoriin. (Lehtomäki et al. 2007, 32 - 33.)

Eläinten lanta sopii hyvin biokaasuprosessin perusmateriaaliksi, koska se sisältää useimmat mikrobin tarvitsemat ravinteet, sillä on hyvä puskurikapasiteetti ja sitä on saatavilla ympäri vuoden melko tasaisesti. Lannan metaanintuottopotentiaali on keskimäärin  $300 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{t}_{\text{VS}}$ . Lannan kuiva-ainepitoisuus on alhainen, jonka vuoksi reaktoritilavuuden metaanin tuottokin on alhainen pelkkää lantaa käsitellessä. Tämän vuoksi reaktorissa kannattaa käsitellä muitakin orgaanisia materiaaleja. Yhteiskäsittely voi myös tasapainottaa käsiteltävän materiaalin ravinne- ja kosteuspuiteita, jolloin orgaaninen aines hajoaa nopeammin sekä laimentaa inhiboivia aineita haitattomiin pitoisuuksiin. Potentiaalisia lisämateriaaleja ovat yhdyskuntien ja teollisuuden biojätteet, puhdistamo- ja sakokaivolietteen, peltobiomassat sekä kasvintuotannon sivutuotteet ja jätteet. Parhaan metaanintuoton saamiseksi on optimoitava yhteiskäsittelyyn otettavien materiaalien laatu, määrä ja sekoitussuhde. (Rintala et al. 2002, 29 - 30.)

Biokaasutuksen hyödyntäminen suomalaisilla maatiloilla on ollut toistaiseksi vähäistä. Vuonna 2006 oli Suomessa toiminnassa kuusi maatilakohtaista biokaasulaitosta, ja lisäksi valmistumassa viisi, jotka tuottivat yhteensä noin 156 MWh/a sähköä ja 1 176 MWh/a lämpöä (Kuitinen et al. 2007, 31). Kiinnostus biokaasutuksen käyttöön energian tuotannossa on selvästi lisääntynyt suomalaisilla maatiloilla. CHP-tuotannon lisäksi biokaasun käyttö liikennepolttoaineena sekä injektointi maakaasuverkkoon tulevat lisääntymään, koska maakaasuverkko tar-

joaa tehokkaan ja edullisen keinon jaella kaasua kuluttajille ja saavuttaa uusia käyttäjiä. (Lehtomäki et al. 2007, 50.)

### 3.2 CHP-teknologiat

Pienen mittakaavan CHP-teknologiat voidaan jakaa seuraaviin tyyppeihin (OPET Network 2004a, 1):

- mäntämootorit sisäisellä lämmityksellä eli diesel- ja kaasumootorit,
- lämpövoimakoneet ulkoisella lämmityksellä, esimerkiksi Stirling-mootorit, Organic Rankine Cycle -turbiinit tai -mootorit ja mikroturbiinit, sekä
- polttokennot.

Taulukossa 11 on vertailtu näiden eri tekniikoiden kapasiteetteja ja hyötysuhteita. Taulukosta nähdään, että polttokennoilla on paras sähkön tuotannon hyötysuhde. Kokonaishyötysuhde on paras ORC-prosessilla ja polttokennoilla, joilla molemmilla voidaan saavuttaa jopa 95 %:n hyötysuhde.

**Taulukko 11.** CHP-teknologioiden vertailu (OPET Network 2004a, 8; Lensu & Alakangas 2004, 126; Vartiainen et al. 2002, 23).

	<b>Kapasiteetti</b> [kW <sub>el</sub> /yksikkö]	<b>Sähkö- hyötysuhde</b> [%]	<b>Lämpö- hyötysuhde</b> [%]	<b>Kokonais- hyötysuhde</b> [%]
Diesel- /kaasumootorit	15 - 10 000	30 - 38	45 - 50	75 - 85
Stirling- mootorit	10 - 150	15 - 35	60 - 80	80 - 90
ORC-prosessi	200 - 1 500	10 - 20	70 - 85	85 - 95
Mikroturbiinit	25 - 250	15 - 35	50 - 60	75 - 85
Höyrymootorit	20 - 1 000	10 - 20	40 - 70	75 - 85
Polttokennot	0,5 - 2 000	38 - 55	40 - 70	70 - 95

#### 3.2.1 Diesel- ja kaasumootorit

Diesel- ja kaasumootorisysteemissä moottorin mekaaninen työ muutetaan sähköksi. Pakokaasujen lämmöstä 70 % voidaan hyödyntää lämmitystarkoitukseen. Biomassaan perustuvia polttoaineita, joita voidaan käyttää diesel- ja kaasumootoreissa, ovat biokaasu, biomassan kaasuu-

tuskaasu ja bioöljy. Tehokkain tapa tuottaa energiaa biomassasta on kaasutus ja tämän käyttäminen kaasumootorissa. Biomassan kaasutus edustaa uutta kehityssuuntaa ja sen käyttö on vasta kehitysasteella. Anaerobisen hajotuksen seurauksena saatava biokaasu puolestaan on puhdistettava, joka tarkoittaa mm. rikin- ja vedenpoistoa, ennen kuin sitä voi käyttää diesel- tai kaasumootorissa. Biokaasun käyttö on energiatehokas tapa tuottaa sähköä ja lämpöä, mutta se vaatii vielä kehitystyötä. (OPET Network 2004a, 1 - 2, 10.)

Polttomootoreita käytetään paljon CHP-laitoksissa, koska niiden investointikustannukset ovat pienet ja rakennusaika lyhyt. Lisäksi toimintaparametrit ovat joustavat, esimerkiksi käynnistys ja sammutus onnistuvat nopeasti, ne toimivat tehokkaasti myös vajaalla kuormalla, niiden ylläpito on helppoa ja useamman polttoaineen käyttö on yleensä mahdollista. (Kirjavainen et al. 2004, 10.)

### **3.2.2 Stirling-moottorit**

Stirling-moottori on lupaava vaihtoehto pienen mittakaavan sähkön ja lämmön tuotantoon, erityisesti laitoksille, joiden sähköntuotanto on alle 150 kW. Systemi perustuu suljettuun kiertoon, jossa työtä tekevä kaasu vuorotellen puristetaan kylmän sylinterin tilavuuteen ja laajennetaan kuumen sylinterin tilavuuteen. Stirling-moottorin etuna sisäiseen polttomoottoriin verrattuna on, että kiertoon tuleva lämpö ei tule polttoaineen poltosta sylinterissä vaan siirretään ulkopuolelta lämmönvaihtimen kautta. Lisäksi poltto voi perustua jo olemassa olevaan biomassan polttotekniikkaan. Polttoaineen poltosta syntyvä lämpö siirretään työkaasuun korkeassa lämpötilassa lämmönvaihtimen kautta ja lämpö, jota ei muuteta työksi, siirretään jäähdytysveteen. Suljettu kierto mahdollistaa ilmaa paremmin soveltuvan kaasun käytön lämmön siirtoon. Sopivia kaasuja ovat helium, vety ja typpi, joista helium on yleisimmin käytetty. (OPET Network 2004a, 3, 8.)

Ulkoisen polton vuoksi monia biomassoja voidaan käyttää polttoaineena Stirling-moottorissa. Muita etuja ovat pitkät huoltovälit ja äänettömyys (Helynen et al. 2002, 56). Stirling-teknologiaa pidetäänkin yhtenä lupaavimmista teknologioista hajautettuun biomassaan pohjautuvaan CHP-tuotantoon. Stirling-moottoreiden kehitystyö on pilottivaiheessa ja niiden arvelaan pian saavuttavan kaupallisen kypsyyden. Stirling-moottoreiden ongelmana biomassan

hyötykäytössä voidaan nähdä lämmön siirto savukaasuista työkaasuun. Lämpötilan tulee olla korkea, jotta saavutetaan riittävä sähkön tuotannon hyötysuhde. Tämä voi kuitenkin aiheuttaa likaantumisongelmia lämmönvaihtimessa, jonka vuoksi se pitäisi varustaa automaattisella puhdistussysteemillä. (OPET Network 2004a, 8, 10.) Lämmönsiirtopintojen likaantuminen voidaan välttää käyttämällä biopolttoaineilla epäsuoraa lämmöntuontia (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2008).

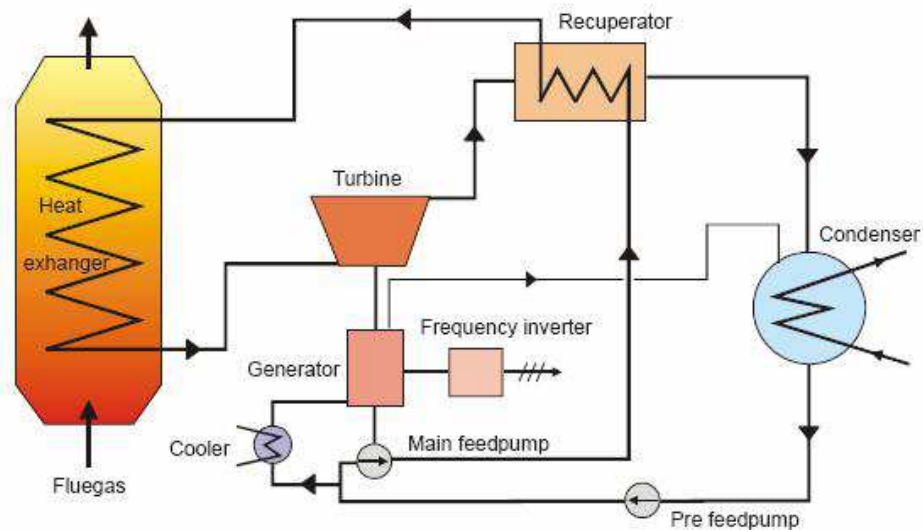
Stirling-moottoriin perustuvaa kehitystä tehdään myös Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla, jossa on käynnissä Bio-Stirling tutkimus, jonka tavoitteena on rakentaa hajautettuun pienimuotoiseen sähkön- ja lämmöntuotantoon soveltuva Stirling-moottoriin perustuva laitteisto. Kehitystyössä keskitytään järjestelmän tehokkuuden ja luotettavuuden parantamiseen sekä haitallisten päästöjen vähentämiseen. Lisäksi tavoitteena on kaukokäytön ja automaation toteuttaminen siten, että laitos ei vaadi jatkuvaa valvontaa. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2008.)

### 3.2.3 ORC-prosessi

ORC-prosessi perustuu perinteiseen Rankine-prosessiin sillä erotuksella, että siinä käytetään veden sijasta orgaanista ainesta, esimerkiksi tolueenia, isobuteenia tai isopentaania. Orgaanisen aineksen höyrystymislämpö on pienempi, eli samalla lämpömäärällä saadaan höyrystettyä suurempi massa orgaanista ainesta kuin vettä. Tämän vuoksi ORC-prosessilla voidaan saavuttaa perinteistä Rankine-prosessia parempi hyötysuhde. (Sipilä et al. 2005, 18.)

Kuvassa 4 on kuvattu ORC-prosessin toimintaperiaate. ORC-prosessissa lämmön lähde höyrystää orgaanisen nesteen höyrystimessä, joka sijoitetaan tulipesän jälkeiseen savukaasukonvektioon. Höyry paisuu turbiinissa, jolloin osa sen lämpöenergiasta muuntuu turbiinin mekaaniseksi pyörimisenergiaksi. Turbiinissa paisunut höyry tiivistyy lauhduttimessa ja pumpataan takaisin paineistettuun höyrystimeen. Varsinainen sähköntuotantoyksikkö voidaan sijoittaa erilliseksi ORC-kontiksi lämpökeskuksen ulkopuolelle. Kontti sisältää suurnopeusgeneraattorin, joka tuottaa mekaanisesta energiasta sähköä, lauhduttimen ja sähkön muuntoon normaali-  
taajuiseksi tarvittavan tehoelektroniikan. Prosessi ei ole sidottu mihinkään tiettyyn polttotek-

niikkaan, vaan se voidaan asentaa mm. arina- ja leijukattilaan, kaasutuslaitokseen tai dieselmoottorivoimalaan. (OPET Network 2004a, 5; Helynen et al. 2002, 55.)



**Kuva 4.** ORC-prosessin toimintaperiaate (Kirjavainen et al. 2004, 12).

ORC-prosessin etuna on, että prosessi on täysin suljettu, jolloin siinä ei tapahdu häviöitä orgaanisen nesteen osalta. Tämä puolestaan johtaa halpoihin käyttökustannuksiin, joita syntyy ainoastaan pieniä määriä voiteluaineista ja ylläpidosta. ORC-prosessi on myös melko hiljainen. Itävallassa sijaitsevalla Lienzin laitoksella tehtyjen mittaustulosten perusteella on myös havaittu, että ORC-prosessi pystyy toimimaan nimellistehoonsa verrattuna jopa 120 %:n kuormalla, joka on suuri etu etenkin kylminä talvikuukausina. (Oberberger et al. 2002, 5.)

ORC-prosessin kehitystyö keskittyy uusien nesteiden hyötykäyttöön prosessissa ja toimintalämpötilan nostamiseen, jolloin voidaan saavuttaa parempi sähkön tuotannon hyötysuhde. Lisäksi tulevaisuudessa on tarkoitus kehittää standardiyksiköitä, jolloin voitaisiin harjoittaa pienimuotoista sarjatuotantoa ja samalla saataisiin laskettua tuotantokustannuksia. (OPET Network 2004a, 10.)

### 3.2.4 Mikroturbiinit

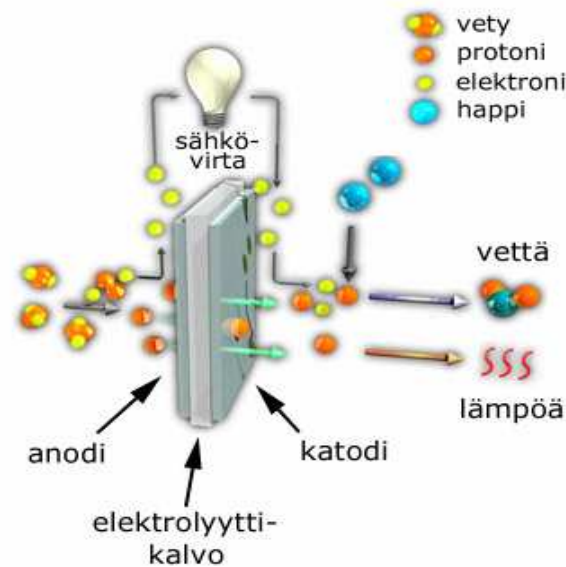
Mikroturbiinit ovat kaasuturbiineja, joiden sähköntuottokyky on 25 - 250 kW. Kaasu poltetaan ulkoisessa polttokammiossa, johon syötetään paineistettua ilmaa kompressorista. Syntyvä savukaasu johdetaan turbiiniin, jossa energia muunnetaan osittain mekaaniseksi energiaksi, joka pyörittää vaihtovirtageneraattoria. Savukaasuihin jäävä lämpö voidaan hyödyntää lämmityksessä. Polttoilman lämmittämiseen käytetään usein rekuperaattoria, jotta saavutettaisiin korkea sähköteho. (OPET Network 2004a, 3.)

Mikroturbiineissa voidaan käyttää sekä kaasumaisia että nestemäisiä polttoaineita. Tällä hetkellä yleisimmin käytetty polttoaine on maakaasu. Biomassaan perustuvista polttoainesta biokaasun käyttö mikroturbiineissa on eniten tutkimuksen ja tuotekehityksen alla. Mikroturbiinin huonona puolena on, että niiden sähkön tuotannon hyötysuhde on alhaisempi kuin moottoreilla saavutettava hyötysuhde. Toisaalta mikroturbiinien päästöt ovat alhaisemmat kuin moottoreiden. (OPET Network 2004a, 3 - 4.)

### 3.2.5 Polttokennot

Polttokenno on elektrokemiallinen laite, joka tuottaa sähköä, lämpöä ja vettä polttoaineesta ja ilman hapesta. Jos polttoaineena käytetään vetyä, vesi on ainoa päästö. Periaatteessa polttokenno toimii kuten paristo eli se muuttaa kemiallista energiaa sähköenergiaksi vedyn ja hapen elektrokemiallisen reaktion kautta. Toisin kuin paristo, polttokennoa ei tarvitse ladata, vaan se tuottaa energiaa niin pitkään kuin polttoainetta on saatavilla. Polttokenno toimii siten, että puhdas vetykaasu syötetään anodille, jolloin vetyatomeista tulee positiivisesti varautuneita vetyioneita elektronien irtautuessa niistä. Positiivisesti varautuneet ionit liikkuvat elektrolyytin läpi katodille. Samaan aikaan negatiivisesti varautuneet elektronit siirtyvät katodille ulkoista reittiä pitkin, jolloin syntyy sähkövirta. Katodilla elektronit yhtyvät takaisin ioneihin ja tuottavat vettä yhdistyessään ilman hapen kanssa. Toisena sivutuotteena syntyy lämpöä. (OPET Network 2004b, 1.) Kuvassa 5 on esitetty edellä kuvattu polttokennon toimintaperiaate. Yksittäiset polttokennot tuottavat tasavirtaa vajaan voltin jännitteellä, jolloin teho on joitakin kymmeniä tai satoja watteja. Suurempia tehoja saadaan aikaiseksi kokoamalla kennoja sarjassa ja

rinnan toimiviksi moduuleiksi, jotka voivat käsittää tuhansia yksittäisiä kennoja. (Hepola & Kurkela 2002, 40.)



**Kuva 5.** Polttokennon toimintaperiaate (Helsinki University of Technology 2002).

Polttokennot voidaan luokitella esimerkiksi käytetyn elektrolyyttimateriaalin ja siitä riippuvan lämpötilan mukaan. Taulukossa 12 on esitetty yhteenveto yleisimpien polttokennotyyppien eroista, hyötysuhteista ja sovellusmahdollisuuksista. Matalassa lämpötilassa toimivat polttokennot voivat käyttää vain vetyä polttoaineena, kun korkeammassa lämpötilassa toimivat voivat käyttää hiilimonoksidia ja jopa metaania. Polttokennojen etuna on, että niiden avulla on mahdollista saavuttaa korkeampi sähköntuotannon hyötysuhde ja huomattavasti pienemmät ympäristöpäästöt kuin muilla energiantuotantoteknologioilla. Lisäksi kennojen toiminta on lähes äänetöntä ja niiden moduulirakenteen avulla voidaan kokoa säädellä helposti. (Hepola & Kurkela 2002, 41.)

Polttokennojen huonona puolena on, että biokaasun sisältämät haitta-aineet, kuten rikkivety, halogenoidut hiilivedyt, siloksaanit ja merkaptaanit, muodostavat ongelman polttokennojen käytölle, jonka vuoksi biokaasu täytyy puhdistaa ennen polttokennoon johtamista. Rikkivetyä on aina biokaasussa, mutta sen pitoisuus riippuu mädätettävistä materiaaleista. Kaksi yleisintä tapaa rikkivedyn poistolle ovat ilman tai hapen lisääminen suoraan reaktorissa syntyvään kaa-

suun ja rautakloridin lisäys reaktorilietteeseen. Muita keinoja ovat mm. rautaoksidin tai rautaoksidipellettien lisääminen reaktoriin, adsorbointi aktiivihiilen tai natriumhydroksidin avulla sekä fysikaalinen absorbointi märkämenetelmän avulla. Myös orgaanisia piiyhdisteitä eli siloksaaneja esiintyy ajoittain biokaasussa ja niitä voidaan poistaa absorboimalla ne nestemäiseen mediaan. (Wellinger & Lindberg, 13 - 17.)

**Taulukko 12.** Erilaisten polttokennotyyppien vertailu (OPET Network 2004b, 4; Hepola & Kurkela 2002, 42).

	<b>PEMFC</b>	<b>AFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
Elektrolyytti	Ioninvaihtomembraani	Kaliumhydroksidi	Alkalikarbonaattien seos	Kiinteä keraamioksid
Polttoaine	Vety	Vety	Vety, hiilimonoksidi, metaani, ammoniakki	Vety, hiilimonoksidi, metaani, ammoniakki
Toimintalämpötila [°C]	60 - 90	50 - 200	630 - 650	600 - 1 000
Sovellukset	Liikenne, kannettavat laitteet, sähköntuotanto, CHP	Liikenne, avaruussovellukset	Keskitetty ja hajautettu sähköntuotanto, CHP	Keskitetty ja hajautettu sähköntuotanto, CHP
Sähköhyötysuhde [%]	30 - 35	50	45 - 55	42 - 47
Edut	Matala lämpötila, nopea käynnistys	Katodireaktio nopeampi alkali-elektrolyytillä, korkea toiminta-aste	Korkean lämpötilan tuomat edut (mm. tehokkuus, monenlaiset polttoaineet soveltuvat)	Korkean lämpötilan tuomat edut (ks. MCFC)
Haitat	Vaatii kalliin katalyytin, herkkä polttoaineen epäpuhtauksille	Tarvitsee kalliit CO <sub>2</sub> -poistolaitteet polttoaineelle ja ilmalle	Korroosio, kennokomponenttien hajoaminen	Kennokomponenttien hajoaminen

**Polymeeri-elektrolyttimembraanipolttokenno** (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell PEMFC) on yleisin polttokennotyyppi, yli 70 % polttokennoista käyttää tätä teknologiaa. PEMFC on kooltaan pienempi ja kevyempi kuin muut polttokennotyyppit, mutta tuottaa korkean energiatihyden. Se käyttää kiinteää polymeeriä elektrolyyttinä ja huokoisia hiilielektrodeja, joissa on platinakatalyytit. PEMFC tarvitsee toimiakseen ainoastaan vetyä, ilman happea ja vettä kalvojen kostuttamiseen. Jos polttoaineena toimii metaani tai metanoli, tarvitaan reformintilaitteistot vedyn tuottamiseksi. (OPET Network 2004b, 2.)



**Suorametanolipolttokenno** (Direct Methanol Fuel Cell DMFC) kuuluu samaan perheeseen PEMFC:n kanssa. Se toimii puhtaalla metanolilla, joka on sekoitettu höyryyn ja syötetään suoraan anodille. Metanolipolttokennolla ei ole polttoaineen varastointiongelmia, kuten joillakin polttokennoilla, koska metanolin energiatiheys on korkeampi kuin vedyn. Metanolia on myös helpompi kuljettaa ja toimittaa yleiseen käyttöön, koska se on nestemäistä. DMFC-teknologia on uutta verrattuna muihin polttokennoihin ja sen kehitystyö on useita vuosia muiden perässä. (OPET Network 2004b, 2.)

**Alkalipolttokenno** (Alkaline Fuel Cell AFC) käyttää vedessä olevaa kaliumhydroksidia elektrolyytinä. Anodilla ja katodilla voidaan käyttää katalyytteinä useita ei-jalometalleja, joilla on korkea toiminta-aste ja jotka ovat hyvin tehokkaita. AFC:n pääasiallinen haittapuoli on, että hiilimonoksidi ja hiilidioksidi myrkyttävät niiden toiminnan helposti. Jopa pieni määrä hiilidioksidia voi vaikuttaa kennon toimintaan, jolloin on pakko puhdistaa kennossa toimivat vety ja happi. (OPET Network 2004b, 2.)

**Sulakarbonaattipolttokenno** (Molten Carbonate Fuel Cell MCFC) toimii 600 - 700 °C lämpötilassa, jonka ansiosta se ei tarvitse kalliita jalometallikatalyyttejä, vaan nikkeli ja nikkelioksidi ovat riittävän aktiivisia elektrodimateriaaleja. Muita korkean lämpötilan mukanaan tuomia etuja ovat, että reformointi voidaan tehdä itse kennossa, jos reformointikatalyytti on läsnä. Tällöin teho on parempi kuin ulkoisen reformoinnin tapauksessa, mutta toisaalta kennorakenne mutkistuu ja huoltokustannukset nousevat. Vedyn ohella voidaan polttoaineena käyttää suoraan myös hiilimonoksidia. MCFC pystyy toimimaan tehokkaasti myös hiilidioksidia sisältävän kaasun, kuten hiilestä ja biopolttoaineista peräisin olevan kaasutuskaasun, kanssa. MCFC:n ongelmana on, että elektrolyytti on liikkuva ja erittäin syövyttävä, reformointikatalyytin rikinsietokyky on heikko ja korkean lämpötilan vuoksi kennon mekaaninen stabiilisuus heikkenee ja elinikä laskee. (Hepola & Kurkela 2002, 43 - 44.) MCFC tarvitsee paljon aikaa saavuttaakseen toimintalämpötilan, jonka vuoksi niitä kannattaa käyttää jatkuvatoimisissa sovelluksissa (OPET Network 2004b, 3).

**Kiinteäoksidipolttokennon** (Solid Oxide Fuel Cell SOFC) elektrolyytti on kiinteä metallioksidi ja sen toimintalämpötila on 900 - 1 000 °C. Sen kiinteä keraaminen rakenne helpottaa kor-

roosio- ja käsittelyongelmia, joita sulaa elektrolyyttiä käyttävällä MCFC:llä on. Kennossa tapahtuvat reaktiot ovat nopeita ja hiilimonoksidia voidaan käyttää suoraan polttoaineena. Korkean toimintalämpötilan takia polttoaine voidaan reformoida kennossa sisäisesti ja kehittyvä jätelämpö hyödyntää kuten MCFC:llä. Kennon haittoina ovat korkeasta lämpötilasta aiheutuvat materiaalien valinta-, valmistus- ja lämpölaajenemisiongelmat. Myös elektrolyytin korkea ominaisvastus heikentää kennon toimintaa. Perinteisten zirkoniumiin perustuvien kiinteäoksidikemien lisäksi kehitellään uusia elektrolyyttimateriaaleja, kuten cerium-gadolinium-elektrolyyttejä, jotka voivat toimia alhaisemmassa lämpötilassa kuin perinteinen kenno. Tällöin voitaisiin käyttää keraamirakenteita edullisempia teräsrakenteita, mutta haittana on kenno-reaktioiden hidastuminen. Ongelmaa yritetään ratkaista kehittämällä uusia materiaaleja ja ohuempia elektrolyyttejä. (Hepola & Kurkela 2002, 46 - 47.)

**Mikrobiologinen polttokenno** (Microbial Fuel Cell MFC) edustaa vasta kehitysasteella olevaa uutta polttokennotekniikkaa. Monet tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että siitä voi tulla tärkeä bioenergian tuotantomuoto, koska sen avulla voidaan tuottaa sähköä monista orgaanisista jätteistä ja biomassasta. Mikrobiologisen polttokennon toiminta perustuu orgaanisten ja epäorgaanisten aineiden hapettamiseen bakteerien avulla. Bakteerit tuottavat elektroneja, joita ne normaalisti käyttävät omaan aineenvaihduntaansa, mutta hapettomissa oloissa bakteerit voidaan saada luovuttamaan elektronit anodiin, josta ne johdetaan hapekkaassa ympäristössä olevaan katodiin. Anodista katodiin kulkevat elektronit luovat sähkövirran. Lopuksi elektronit, protonit ja happi yhdistyvät vedeksi. Mikrobiologisten polttokennojen laajan hyötykäytön ongelmana on, että niiden energiatiheys on vielä liian alhainen. Tällä hetkellä ainoa kannattava käyttömuoto on polttokenno, joka tuottaa elektroneja sedimentin orgaanisesta aineksestä. (Lovley 2008, 1 - 2.)

Polttokennoalan markkinapotentiaali on erittäin laaja ja se tarjoaa suomalaiselle teollisuudelle hyvät liiketoimintamahdollisuudet. Suomalaisen teollisuuden kiinnostus polttokennoteknologian hyödyntämiseen yrityksen omissa tuotteissa onkin lisääntynyt viime vuosina huomattavasti. Vuoden 2006 alussa Teknologiateollisuus ry perusti polttokennoalan toimialaryhmän, jonka tarkoituksena on lisätä alan yhteistyötä sekä edistää polttokennoalan yritystoimintaa. (Mateve Oy 2008, 4.) Tulevaisuudessa tavoitteena on kehittää toimivia polttokennohybridejä,

joissa korkealämpötilapolttokenno on yhdistetty esimerkiksi kaasuturbiiniin, polttomoottoriin tai toiseen polttokennoon. Tällaisilla voimalaitoksilla voitaisiin saavuttaa yli 70 % sähköntuotannon hyötysuhde. Polttokennon ja turbiinin muodostamassa hybridivoimalassa yhdistetään tavanomainen sulakarbonaattipolttokenno tai kiinteäoksidipolttokenno matalassa paineessa toimivaan kaasuturbiiniin, kompressoriin, polttokammioon tai lämmönvaihtimeen. Kaasuturbiinin pääasiallisena tehtävänä on laitoksen tasapainottaminen. Joissakin hajautetun sähköntuotannon sovelluksissa myös matalalämpötilakennoa voidaan käyttää laitoksen tasapainottamiseen yhdistämällä se kiinteäoksidipolttokennoon. (Hepola & Kurkela 2002, 49 - 50.)

Tällä hetkellä polttokennojen kehitystyö on keskittynyt enimmäkseen 1 - 5 kW:n systeemien kehittämiseen, mutta VTT:n koordinoimassa eurooppalaisessa tutkimusprojektissa on tarkoituksena kehittää suuremman kokoluokan, eli megawattiluokan SOFC-laitoksia, joiden avulla voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä suuremmissa mittakaavassa. Laitokset tulevat koostumaan 50 - 250 kW:n suuruisista moduuleista, joita yhdistämällä saadaan suurempia laitoksia. Projektissa kehitystyön kohteena on paineistamaton sähkö- ja lämmön tuotantoon soveltuva laitos, sekä paineistettu ainoastaan sähköä tuottava laitos, joka voidaan yhdistää mikroturbiinin ja muodostaa näin polttokennohybridi. (VTT 2008.)

Polttokennotutkimusta tehdään paljon myös maailmalla ja erityisesti kiinnostuksen kohteena on biokaasun hyötykäyttö polttokennojen avulla. Esimerkiksi EU:n AMONCO -projektissa on tarkoituksena kehittää biokaasun puhdistuskeinoja. Lisäksi projektissa pyritään kehittämään biokaasuprosessia siten, että kyseisiä haitta-aineita muodostuisi mahdollisimman vähän, mutta metaanintuotto pysyisi kuitenkin korkeana. (Austrian Energy Agency 2005.)

## 4 ESIMERKKIALUE

Esimerkkialueen pohjana on Humppilan kunta, joka sijaitsee Etelä-Suomen läänissä, lounaisessa Hämeessä. Sen naapurikaupunkeja ovat Forssa ja Loimaa. Humppilasta on noin 85 km Turkuun, 90 km Tampereelle ja 130 km Helsinkiin. Humppilan pinta-ala on 148,24 km<sup>2</sup>, josta 0,63 km<sup>2</sup> on vettä. Kunnan suurin pituus luoteesta kaakkoon on 19 km ja leveys koillisesta lounaaseen on 14 km. (Humppilan kunta 2008.)

### 4.1 Alueen väestö, elinkeinot, liikenne ja veden kulutus

Humppilan asukasluku oli vuoden 2007 lopussa 2 566 henkeä, joista noin 80 % asuu keskustaajamassa ja muissa pienemmissä taajaman kaltaisissa keskittymissä ja loput haja-asutusalueella. Ikärakenne vuonna 2006 oli seuraava (Humppilan kunta 2008):

- 0 - 14 v.      17 %
- 15 - 64 v.    63 %
- 65 - v.        20 %.

Pääasiallinen asumismuoto Humppilassa on omakotiasuminen, mutta kunnassa on myös rivija kerrostaloja. Humppilassa oli 1 179 asutokuntaa vuonna 2007, joista 69 % oli erillisiä pientaloja, 16 % kerrostaloasuntoja, 10 % rivitaloasuntoja ja 5 % muita rakennuksia. Koko maan vastaavat luvut ovat pientaloja 40 %, rivitaloasuntoja 14 % ja kerrostaloasuntoja 44 % eli Humppilassa asutaan enemmän pientaloissa kuin Suomessa keskimäärin. Asutokuntien keskikoko Suomessa on 2,1 henkilöä. Humppilan asutokunnissa asuu keskimäärin 2,18 henkilöä. Asutokuntien keskimääräinen asuinpinta-ala Suomessa on 80,5 m<sup>2</sup> ja henkilöä kohden 38,3 m<sup>2</sup>. Henkilöä kohden laskettu asuinpinta-ala pienenee yleensä asutokunnan koon kasvaessa. (Tilastokeskus 2008a.)

Humppilan työpaikkarakenne elinkeinoittain vuonna 2005 oli seuraavanlainen (Humppilan kunta 2008):

- maatalous      17 %
- teollisuus      25 %
- palvelut        58 %.

Kunnan suurimpia työnantajia ovat Humppilan kunta, Kenkämaailma, Humppilan Osuuspankki sekä Oy Hackman Designor Humppilan Lasi (Humppilan kunta 2008). Humppilassa oli 144 maatilaa vuonna 2007, joista 42:lla oli kotieläimiä ja loput olivat pelkkiä viljajaloja (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008). Osalla eläintiloista on myös viljanviljelyä. Taulukossa 13 on esitetty eläintilojen ja kotieläinten lukumäärät vuonna 2007.

**Taulukko 13.** Eläintilojen ja kotieläinten lukumäärät vuonna 2007 (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008).

<b>Kotieläin</b>	<b>Tiloja [kpl]</b>	<b>Eläimiä [kpl]</b>	<b>Keskimäärin eläimiä/tila [kpl]</b>
<b>Nautaeläimet</b>	14	558	40
- Lypsylehmät	9	161	18
- Hiehot > 2v.	9	27	3
- Hiehot 1 - 2 v.	11	60	5
- Sonnit 1 - 2 v.	4	86	21
- Vasikat < 1 v.	14	214	15
<b>Siat</b>	10	6 311	631
- Karjut > 50 kg	6	11	2
- Emakot > 50 kg	6	329	55
- Lihasiat > 50 kg	9	4 152	461
- Muut siat 20 - 50 kg	8	902	113
- Porsaasat < 20 kg	7	917	131
<b>Siipikarja</b>	15	125 438	8 362
- Munivat kanat	13	86 828	6 679
- Broileriemot		18 000 <sup>1</sup>	
- Kananpoikaset		14 300 <sup>1</sup>	
<b>Hevoset</b>	3	58	19

<sup>1</sup> Lähde: Mäkelä 2008.

Hagström et al. (2005, 12) on jakanut maatilat niin sanottuihin tyyppitiloihin jakamalla Suomessa olevat kotieläinmäärät maatilojen lukumäärällä, jolloin saadaan keskimääräiset eläinmäärät tilaa kohden. Mukailleen näitä tyyppitiloja, saadaan Humppilan tilajakaumaksi seuraavanlainen:

- 9 kpl maitotiloja, joilla on 18 lypsylehmää, 2 yli 2 vuotiasta hiehoa, 7 nuorta hiehoa, 2 sonnia ja 15 vasikkaa,
- 4 kpl sonnitiloja, joilla on 17 sonnia ja 15 vasikkaa,
- 3 kpl emakkosikaloita, joissa on 2 karjua, 55 emakkoa ja 153 porsasta,

- 3 kpl yhdistelmäsikaloita, joissa on 2 karjua, 55 emakkoa, 593 lihasikaa, 129 muuta sikaa ja 153 porsasta,
- 4 kpl lihasikaloita, joissa on 593 lihasikaa ja 129 muuta sikaa,
- 13 kpl munakanaloita, joissa on 6 679 munivaa kanaa,
- 1 kpl broilerikanaloita, jossa on 18 000 broileria, sekä
- 3 kpl hevostiloja, joilla on 19 hevosta.

Humppilassa olevia palveluita ovat 2 ruokakauppaa, muita kauppvoja, kampaamoja, siivouspalveluita, huoltoasemia, autokorjaamoja, kahviloita, ravintoloita ja majoituspalveluita. Lisäksi Humppilassa on rakennusalan yrityksiä. Humppilassa ei ole yhtään suurta teollisuuslaitosta, vain joitakin pienehköjä metalli- ja peltisepänliikkeitä. (Humppilan kunta 2008.)

Humppilassa oli vuoden 2008 syyskuussa 1 800 autoa, joista 1 451 oli henkilöautoja. Muiden ajoneuvojen lukumäärät olivat seuraavat: 141 moottoripyörää, 114 mopoa, 28 moottorikelkkaa, 558 traktoria ja 94 moottorityökonetta. (AKE 2008.) Humppilan ajoneuvojen polttoaineiden kulutus on VTT:n LIISA 2007 laskentajärjestelmän mukaan 4 559 t/a. Kulutuksen arviointi on tehty Öljy- ja Kaasualan Keskusliiton ilmoittaman Suomessa myytyjen polttonesteiden määrän perusteella.

Veden kulutuksen voidaan olettaa taajama-alueilla vastaavan Suomen keskimääräistä omnisvedenkulutusta, jonka on luvussa 2 sanottu olevan 240 litraa vuorokaudessa asukasta kohden. Kun taajama-alueilla asuu hieman yli 2 000 asukasta, saadaan taajamien vedenkulutukseksi 179 800 m<sup>3</sup>/a. Haja-asutusalueella asuvien vedenkulutuksen voidaan olettaa vastaavan omakotitalojen vedenkulutusta ja olevan 135 litraa vuorokaudessa asukasta kohden. Talouskäytön lisäksi vettä kuluu eläinten juomiseen ja eläinsuojien pesuun. Eri eläinten juomaveden tarpeita on esitetty luvun 2 taulukossa 1 ja eri tilatyypin pesuvesien tarpeita taulukossa 2. Näiden perusteella laskettuna saadaan haja-asutusalueen veden kulutukseksi 25 300 m<sup>3</sup>/a, jolloin koko Humppilan veden kulutus on 205 100 m<sup>3</sup>/a.

## 4.2 Viljelyalat ja biomassavarat

Humppilassa oli vuonna 2007 maatalousmaata yhteensä 5 909 hehtaaria, josta 730 hehtaaria oli viljelemätöntä. Suurimmat viljelypinta-alat olivat viljoilla, erityisesti ohralla ja kauralla. Myös nurmen sekä rypsin ja rapsin viljelyalat olivat melko suuret. Muita viljelykasveja alueella olivat herne, peruna ja puutarhakasvit. (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008.) Luvussa 2 olevassa taulukossa 5 on esitetty eri kasvien keskimääräisiä hehtaarisatoja, jonka perusteella taulukkoon 14 on laskettu Humppilan vuotuiset biomassavarat viljelyalueilta. Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskuksen (2008) peltokasvitilaston mukaan maatalouden nurmiala jakautuu siten, että noin puolet on säilörehua, neljäsosa kuivaheinää ja neljäsosa tuoreheinää sekä laidunta varten, joten tässä noudatetaan vastaavaa jakoa. Hoidetulla viljelemättömällä pellolla voidaan olettaa kasvavan timotei-apila-nurmea.

**Taulukko 14.** Humppilan viljelyalat v. 2007 (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008) ja niiltä saatavat sadot kuiva-aineena.

Viljelykasvi	Viljelyala [ha]	Sato [ $t_{dw}/a$ ]
Viljan jyvät	4 105	13 100
Viljan olki	4 105	8 200
Nurmi, josta	557	
- tuore heinä ja laidun	139	1 500
- kuivaheinä	139	500
- säilörehu	279	4 900
Rypsin ja rapsin siemen	447	700
Rypsin ja rapsin olki	447	900
Hoidettu viljelemätön pelto (timotei-apila-nurmi)	269	2 500

Humppilan kunnan metsäala on noin 6 700 hehtaaria, josta noin 70 % on kuusikoita, 20 % männiköitä ja 10 % lehtipuumetsiä (Viertola 2008). Hämeen alueella tehdyn energiapuuselvi-tyksen mukaan Humppilan kunnan hakkuutähdepotentiaali olisi 4 467 kiinto- $m^3$  vuodessa, kun avohakkuiden pinta-ala olisi 77 hehtaaria vuodessa, joista kuusivaltaisia, eli korjuun kannalta potentiaalisia, hakkuualueita olisi 56 hehtaaria. Lisäksi avohakkuualoilta olisi mahdollista saada kantobiomassaa 1 250 kiinto- $m^3$  vuodessa. Nuorten metsien hoitohakkuista olisi mahdollista saada pieniläpimittaista energiapuuta 2 358 kiinto- $m^3$  vuodessa. (Rantala et al. liite 2.)

Luvussa 2 on sanottu ainespuun määräksi 200 - 250 m<sup>3</sup>/ha, jolloin varsinaista ainespuuta saataisiin 77 hehtaarin avohakkuualueelta 15 000 - 19 250 m<sup>3</sup>.

### 4.3 Jätteen määrä ja laatu

Luvussa 2 olevassa taulukossa 3 on esitetty yhdyskuntajätteiden jakautuminen jätejakeittain henkeä kohden Suomessa. Tämän perusteella saadaan Humppilassa syntyvien yhdyskuntajätteiden määräksi seuraavat:

- sekajätettä 770 t/a
- paperi- ja kartonkijätettä 210 t/a
- biojätettä 100 t/a
- lasijätettä 70 t/a
- metallijätettä 20 t/a
- puujätettä 20 t/a
- muovijätettä 10 t/a
- sähkö- ja elektroniikkaromua 20 t/a
- muuta jätettä 50 t/a.

Yhdyskuntajätteiden määrät pitävät sisällään myös teollisuuden, palveluiden sekä maatalouden kotitalousjätteisiin verrattavat jätteet. Koska Humppilassa ei ole merkittävää teollisuutta, ei siellä myöskään synny merkittäviä määriä teollisuudelle tyypillisiä jätteitä, jotka poikkeavat kotitalousjätteistä. Kotitalousjätteistä poikkeavaa jätettä syntyy maataloudessa, jossa syntyy lantaa ja kasvijätteitä. Maatalouden kasviperäisten jätteiden määrät on arvioitu edellä taulukossa 12. Luvussa 2 olevassa taulukossa 4 on esitetty eri eläinryhmien tuottamia lantamääriä haihtuvana kiintoaineena, jonka perusteella saadaan Humppilassa syntyviksi lantamääräksi seuraavat:

- nautaeläinten lantaa 400 t<sub>VS</sub>/a
- sian lantaa 570 t<sub>VS</sub>/a
- siipikarjan lantaa 580 t<sub>VS</sub>/a.



Humppilan jätevedenpuhdistamolle myönnetyn ympäristöluvan mukaan vuonna 2003 jätevedenpuhdistamon piirissä asui 1 600 henkilöä ja arvioitiin, että vuonna 2010 jätevedenpuhdistamon piirissä olisi noin 1 700 henkilöä, joiden jätevedet tulisivat puhdistamolle (Hämeen ympäristökeskus 2003, 6). Jätevedenpuhdistamon virtaama vaihtelee esimerkiksi sateiden vaikutuksesta ollen 12 000 - 19 000 m<sup>3</sup>/kk ja vuodessa hieman alle 200 000 m<sup>3</sup> (Humppilan jätevedenpuhdistamo 2008). Tästä voidaan laskea Humppilassa syntyvän jäteveden määräksi vuodessa noin 120 m<sup>3</sup>/henkilö, joka vastaa Suomen keskiarvoa. Tällöin voidaan arvioida myös jätevesilietteen ja kuiva-aineen määrien vastaavan Suomen keskiarvoa ja jätevesilietettä syntyvän vuodessa 240 l/henkilö eli yhteensä 620 m<sup>3</sup>/a ja kuiva-ainetta 36 kg/henkilö eli yhteensä 90 t/a koko Humppilan alueella.

#### 4.4 Sähkön ja lämmön kulutus

Humppilan sähköenergiasta 95 % tulee Vattenfall Oy:n jakeluverkkoa pitkin. Vattenfall Verko Oy:llä on Humppilassa 1 808 asiakasta, joille toimitettiin 21 443 MWh sähköä vuonna 2007, josta voidaan päätellä Humppilan sähkön kulutukseksi noin 22 600 MWh vuodessa. Sähkön kulutus jakautuu Humppilassa seuraavasti (Järvenpää 2008b):

- koti- ja maatalous                      13 651 MWh/a (64 %)
- palvelut                                      4 798 MWh/a (22 %)
- teollisuus ja rakentaminen      2 994 MWh/a (14 %).

Luvussa 2 olevassa taulukossa 9 on esitetty erityyppisten maatilojen sähkö- ja lämpöenergiankulutuksia eläintä kohden. Näitä tietoja mukaillen voidaan laskea Humppilan tyyppitilojen energiankulutukset, jotka on esitetty taulukossa 15. Energiatarpeiden laskennassa on käytetty lähintä sopivaa arvoa. Viljatilojen osalta on laskettu viljan kuivaamisen aiheuttamat energiankulutukset ainoastaan viljaa viljeleville tiloille. Hevostiloille ei energiankulutuksenarvoja ole laskettu, koska lämmitystarve on hyvin pieni tai sitä ei ole ollenkaan ja sähköä kuluu vain talin valaistukseen.

Taulukko 15. Humppilan maatilojen sähkön ja lämmön kulutukset.

Tilatyyppe	Sähkön kulutus [MWh/tila]	Lämmön kulutus [MWh/tila]	Sähkön kulutus yht. [MWh/a]	Lämmön kulutus yht. [MWh/a]
Maitotila (9 kpl)	68	34	610	300
Sonnitila (4 kpl)	6	21	30	90
Emakkosikala (3 kpl)	63	74	190	220
Yhdistelmäsikala (3 kpl)	270	315	810	950
Lihasukala (4 kpl)	210	175	840	700
Munakanala (13 kpl)	20	94	260	1 220
Broilerikanala (1 kpl)	54	252	50	250
Viljatila (102 kpl)	10	110	1 020	11 220
<b>Yhteensä</b>			<b>3 810</b>	<b>14 950</b>

Maatalousrakennusten lisäksi energiaa kuluu asuinrakennuksissa. Asuinrakennusten keskimääräiset sähkö- ja lämpöenergian kulutukset on esitetty luvussa 2. Maaseudun ja taajamien omakoti- ja rivitalojen lämmitysenergian kulutukselle käytetään arvoa 245 kWh/m<sup>2</sup>/a, jolloin lämmönkulutukseksi saadaan 20 300 MWh/a, kun asuntojen keskimääräinen pinta-ala on 83,5 m<sup>2</sup> ja lukumäärä on 990 kpl.

Humppilan Kaukolämpö Oy toimittaa lämpöä virastoille, liikkeille, teollisuudelle ja kerrostaloille 12 000 - 14 000 MWh/a (Humppilan Kaukolämpö Oy 2008). Koko Humppilan lämpöenergian tarpeeksi voidaan arvioida kaukolämmön tuotannon sekä maatalouden ja asuinrakennusten keskimääräisten lämmönkulutusten perusteella 45 700 MWh/a, josta osa tuotetaan tällä hetkellä sähkön avulla. Humppilassa omakotitalojen yleisin lämmitysmuoto on sähkölämmitys, jonka rinnalla voi olla puulämmitystä sekä muutamissa taloissa ilmalämpöpumppuja. Myös öljylämmitys on melko yleinen. (Kallonen 2008.) Jos oletetaan, että taajamassa omakoti- ja rivitalojen lämmityksestä 45 % tuotetaan sähköllä, kuluu tähän sähköä 7 020 MWh/a. Ahon et al. (2006, 11) mukaan maatilojen yleisin lämmitysmuoto on puulämmitys (68 %), toiseksi yleisin öljylämmitys (17 %) ja kolmanneksi yleisin sähkölämmitys (13 %). Tämän jakauman voidaan olettaa pätevän myös Humppilaan taajamien ulkopuolisille talouksille, jolloin

taajamien ulkopuolella kuluu sähköä noin 1 100 MWh/a lämmitykseen. Tällöin Humppilan sähkönkulutukseksi, ilman lämmitykseen kuluva sähköä, jää noin 14 500 MWh/a.

Luvussa 2 on Suomen keskimääräiseksi energian kulutukseksi sanottu 79 MWh asukasta kohden vuodessa, josta 16,3 MWh on sähkön kulutusta. Näiden arvojen perusteella laskettuna Humppilan sähkön kulutus olisi 41 800 MWh/a ja lämmön kulutus 161 000 MWh/a. Vattenfall Oy:n tietojen mukaan Humppilassa kulutetaan kuitenkin huomattavasti vähemmän sähköä kuin Suomessa keskimäärin. Myös arvioitu lämmön kulutus jää todella paljon pienemmäksi. Syynä tähän voi olla, että Humppilassa ei ole energiaintensiivistä teollisuutta, joka lisäisi merkittävästi energian kulutusta asukasta kohden.

#### **4.5 Päästöt**

Humppilan alueella syntyvät kaasumaiset päästöt ovat peräisin sähkön- ja lämmöntuotannosta, liikenteestä ja maataloudesta. Myös osa maatalouden päästöistä syntyy liikenteestä eli työkojen käytöstä peltojen muokkaukseen ja sadon korjaukseen.

Humppilan Kaukolämpö Oy tuottaa noin 12 000 - 14 000 MWh/a lämpöä polttamalla kierrätyspuuta, puun kuorta ja metsätähdehaketta lämpökattilassa (Humppilan Kaukolämpö Oy 2008). Tämän voidaan olettaa olevan hiilineutraalia lämpöä, koska puun kasvaminen sitoo hiilidioksidia saman verran kuin sen polttamisesta syntyy. Muut polton aiheuttamat päästöt voidaan arvioida luvussa 2 olevassa taulukossa 6 esitettyjen päästökertoimien avulla. Kaukolämmön päästöjen laskennassa käytetään puuperäisten polttoaineiden päästökertoimien keskiarvoja.

Eri lämmitysmuotojen aiheuttamat päästöt on esitetty taulukossa 16. Laskennassa on oletettu, että taajamien omakoti- ja rivitalojen lämmönkulutus on 15 600 MWh/a ja siitä 45 % tuotetaan sähköllä, 30 % öljyllä, 20 % puulla ja 5 % ilmalämpöpumpuilla. Maaseudun lämmön kulutus on 8 400 MWh/a, josta 68 % tuotetaan puulla, 17 % öljyllä ja 13 % sähköllä (Aho et al. 2006, 11). Tämän lisäksi viljatilojen viljan kuivaukseen käyttämä lämpöenergia, joka on esitetty taulukossa 15, tuotetaan öljyllä. Vattenfallin Pohjoismaisen sähköntuotannon ominaishiilidioksi-

dipäästöt olivat 98 g/kWh vuonna 2007, jolloin Humppilassa kulutetun sähkön vuotuiset hiilidioksidipäästöt ovat noin 2 200 tonnia (Vattenfall 2008). Muita ominaispäästökertoimia ei Vattenfallin sähköntuotannolle ole saatavissa, joten sähköntuotannon muita päästöjä ei tässä arvioida.

**Taulukko 16.** Eri lämmitysmuotojen aiheuttamat kaasumaiset päästöt Humppilassa.

Energiantuotantomuoto	CO <sub>2</sub> -päästöt [t/a]	NO <sub>x</sub> -päästöt [t/a]	N <sub>2</sub> O-päästöt [t/a]	CH <sub>4</sub> -päästöt [t/a]
Kaukolämpö	-	6	0,3	2,3
Sähkölämmitys	795	-	-	-
Öljylämmitys	5	6	0,1	0,1
Puulämmitys	-	4	0,2	1,6
<b>Yhteensä</b>	<b>800</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>4</b>

Maatalouden muut kaasumaiset päästöt, lukuun ottamatta energiantuotannon päästöjä, jotka ovat mukana sähkön- ja lämmöntuotannon päästöissä, on esitetty taulukossa 17. Kotieläinten aiheuttamat päästöt on arvioitu luvussa 2 olevassa taulukossa 8 esitettyjen päästökertoimien avulla. Myös viljelymaiden ja lannoituksen päästökertoimet on esitetty luvussa 2. Viljelymaiden aiheuttamia päästöjä arvioitaessa on turvemaiden osuuden viljelymaista oletettu olevan 13 %. Kalkituksesta aiheutuvat päästöt jätetään tässä huomioimatta, koska peltoja kalkitaan yleensä 5 - 10 vuoden välein, joten kalkituksen aiheuttamat päästöt eivät ole merkittäviä. Työkoneiden osalta arvioidaan vain hiilidioksidipäästöt, koska muiden osalta ei ole riittävästi tietoa. Arvioinnin perustana on, että viljeltyä maata on noin 5 000 hehtaaria. Luvussa 2 on pelto-työn polttoaineen kulutukseksi sanottu 45 - 110 l/ha, joten tässä kulutukseksi on valittu 60 l/ha. Päästökertoimeksi on valittu dieselin päästökerroin 2,7 kg/l (AKE 2001).

**Taulukko 17.** Maatalouden aiheuttamat kaasumaiset päästöt Humppilassa.

Lähde	CO <sub>2</sub> -päästöt [t/a]	N <sub>2</sub> O-päästöt [t/a]	CH <sub>4</sub> -päästöt [t/a]
Kotieläinten ruuansulatus	-	-	45
Kotieläinten lanta	-	-	40
Viljelymaat	2 100	10	1
Lannoitus	-	9	-
Työkoneet	800	-	-
<b>Yhteensä</b>	<b>2 900</b>	<b>19</b>	<b>86</b>

Tieliikenteen aiheuttamat päästöt VTT:n LIISA 2007 laskentajärjestelmän mukaan on esitetty taulukossa 18.

**Taulukko 18.** Humppilan tieliikenteen kaasumaiset päästöt vuonna 2007 (LIISA 2007).

	<b>CO<sub>2</sub>-päästöt [t/a]</b>	<b>NO<sub>x</sub>-päästöt [t/a]</b>	<b>N<sub>2</sub>O-päästöt [t/a]</b>	<b>CH<sub>4</sub>-päästöt [t/a]</b>
Tieliikenne	14 300	60	2	2

Taulukkoon 19 on koottu kaikki Humppilan kasvihuonekaasupäästöt ja muutettu ne hiilidioksidiekvivalenteiksi. Hiilidioksidiekvivalenteiksi muuttaessa kertoimet ovat hiilidioksidille 1, dityppioksidille 296 ja metaanille 23 (Koski 2008, 10 - 11).

**Taulukko 19.** Humppilan kasvihuonekaasujen kokonaismäärät ja hiilidioksidiekvivalentit.

	<b>CO<sub>2</sub>-päästöt</b>	<b>N<sub>2</sub>O-päästöt</b>	<b>CH<sub>4</sub>-päästöt</b>
Energiantuotanto [t/a]	2 200	1	4
Maatalous [t/a]	2 900	19	86
Liikenne [t/a]	14 300	2	2
<b>Yhteensä [t/a]</b>	<b>19 400</b>	<b>22</b>	<b>92</b>
<b>Hiilidioksidiekvivalentit [t<sub>co2-ekv</sub>/a]</b>	<b>19 400</b>	<b>6 500</b>	<b>2 100</b>

Hiilidioksidia myös sitoutuu biomassan kasvun myötä. Metsien sitoma hiilidioksidi voidaan laskea luvussa 2 esitettyjen yhtälöiden 1 ja 2 avulla. Kanta- ja Päijät-Hämeen alueella puuston keskikasvu on 6 m<sup>3</sup>/ha vuodessa (Rantala et al. 13) eli Humppilan metsien voidaan olettaa kasvavan 40 200 m<sup>3</sup>/a. Tästä määrästä oletetaan hakkuina poistuvan 20 000 m<sup>3</sup>/a luvussa 4.2 olevan metsäbiomassan arvion perusteella, jolloin puuston nettokasvun sitomaksi hiilidioksidin määräksi saadaan

$$B_{\text{CO}_2, \text{puusto, netto}} = (40\,200 \text{ m}^3/\text{a} \cdot 0,215 \text{ t/m}^3 - 20\,000 \text{ m}^3/\text{a} \cdot 0,215 \text{ t/m}^3) \cdot \frac{44}{12} = 15\,900 \text{ t/a}$$

ja puiden biomassaan sitoutuvaksi hiilidioksidin määräksi saadaan

$$B_{\text{CO}_2, \text{biomassa}} = 20\,200 \text{ m}^3/\text{a} \cdot 0,704 \cdot 0,514 \text{ t/m}^3 \cdot \frac{44}{12} = 26\,800 \text{ t/a} .$$

Yhteensä Humppilan metsien hiilidioksidin sitomispotentiaali on noin 42 700 t/a, joka on yli kaksinkertainen tämän hetkisiin hiilidioksidipäästöihin verrattuna. Humppilassa syntyvät kasvihuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalentteina ilmaistuna jäävät myös alhaisemmiksi kuin metsien hiilidioksidin sitomispotentiaali. Lisäksi peltokasvit ja muut kasvit sitovat hiilidioksidia kasvaessaan, mutta näistä määristä ei ole riittävästi tietoa saatavilla, jotta niitä voitaisiin arvioida.

Rehevöittäviä päästöjä syntyy Humppilassa jätevedenpuhdistamolta ja maataloudesta. Humppilan kunnan käsitellyt jätevedet johdetaan Aronojaan, joka laskee vetensä Koenjoen keskivaiheille. Koenjoesta vedet laskevat Loimijokeen. Humppilan kunnan aiheuttama vesistökuormitus on vähäistä verrattuna Loimaan ja Forssan asukasjätevesikuormitukseen, koska Humppilan asukasluku on pieni. Humppilan osuus Loimijoen fosforikuormituksesta on noin 3 % ja typpikuormituksesta noin 4 %. Humppilan jätevedenpuhdistamolta lähtevä fosforimäärä on ollut 0,49 kg/vrk ja typpimäärä 22 kg/vrk vuonna 2002. Pitoisuudet ovat hieman suurempia kuin aikaisempina vuosina. (Hämeen ympäristökeskus 2003, 8.)

Viljelymailta huuhtoutuvien typen ja fosforin määrät on laskettu luvussa 2 annettujen arvojen perusteella, eli typpeä huuhtoutuu savimaisilta viljanviljelymailta 14 kg/ha/a ja fosforia 1,3 kg/ha/a. Laskennassa on oletettu, että kaikki Humppilan viljanviljelypellot ovat savimaita. Humppilassa syntyvät rehevöittävien päästöjen määrät on esitetty taulukossa 20.

**Taulukko 20.** Rehevöittävät typpi- ja fosforipäästöt Humppilassa.

<b>Päästölähde</b>	<b>Typpi [kg/a]</b>	<b>Fosfori [kg/a]</b>
Jätevedenpuhdistamo	8 000	200
Maanviljely	57 500	5 300
<b>Yhteensä</b>	<b>65 500</b>	<b>5 500</b>

## 5 ENERGIANTUOTANTOPOTENTIALIAALI ESIMERKKIALUEELLA

Seuraavassa tarkastellaan tilannetta, jossa esimerkkialueella olisi kaksi rinnakkaista CHP-laitosta, joista toisessa tuotettaisiin sähköä ja lämpöä anaerobisen käsittelyn ja polttokennojen avulla ja toisessa termisen käsittelyn ja ORC-prosessin avulla. Koska laitosten oletetaan toimivan rinnakkain, joudutaan joidenkin materiaalien osalta tekemään valinta, kummalla laitoksella ne olisi kannattavampaa hyödyntää.

### 5.1 Anaerobinen käsittely ja polttokenno

Esimerkkialueelle suunnitellun biokaasulaitoksen toiminnan periaatekaavio on esitetty liitteessä 1. Biokaasulaitokselle tulevat materiaalit varastoidaan katetuissa säiliöissä, jotta varastoinnin aikana ei pääse vapautumaan metaania ilmakehään. Laitokselle tulevat biojätteet täytyy esikäsitellä murskaamalla, seulomalla ja erottamalla metallit, jonka jälkeen mädätettävät materiaalit voidaan sekoittaa tasaiseksi seokseksi sekoitussäiliössä. Mädätettävät materiaalit pumpataan sekoitussäiliöstä biokaasureaktoriin, josta syntyvä biokaasu johdetaan biokaasun varastosäiliöön. Reaktorijäännös siirretään katettuun varastoon, josta saadaan jälkikaasutuskaasua, joka voi olla 10 - 15 % koko prosessin kaasuntuotosta (Lehtomäki et al. 2007, 35). Jälkikaasutuksen jälkeen jäännös menee hygienisointiin, jonka jälkeen voitaisiin tehdä veden erotus jäännöksestä. Ylimääräinen vesi voitaisiin johtaa sekoitussäiliöön, josta se palaisi takaisin kierto. Tällöin reaktorijäännös olisi kuivempaa ja pienentäisi jäännöksen kuljetuskustannuksia. Veden erotuksessa jäännöksestä häviää kuitenkin noin 85 % liukoisesta typestä, jolloin sen lannoitusominaisuudet heikkenevät (Kapuinen 2009). Koska syntyvä lopputuote eli reaktorijäännös kannattaa levittää pelloille lannoitteeksi, joka mahdollistaa orgaanisen materiaalin ravinteiden kierron ja samalla vähentää kemiallisten lannoitteiden tarvetta, ei veden erotusta kannata tehdä esimerkkilaitoksella.

Sähkön ja lämmön tuottamiseen esimerkkilaitoksella on valittu polttokenno, koska sen avulla voidaan saavuttaa hyvä hyötysuhde. Polttokennojen lämmöntuotannon hyötysuhde on luvun 3 taulukon 11 mukaan 40 - 70 % ja sähköntuotannon hyötysuhde on 38 - 55 %. Polttokennotyypeistä valitaan käytettäväksi kiinteäoksidipolttokenno (SOFC), koska sillä on monia etuja ver-

rattuna muihin polttokennoihin. Esimerkiksi se voi käyttää polttoaineena myös hiilimonoksidia, metaania ja ammoniakkia eikä se ole kovin herkkä epäpuhtauksille. Tällä hetkellä on valmistus- tai demonstraatiovaiheessa SOFC-moduuleja, joiden sähköteho on yhdestä kilowatista yhteen megawattiin, joten se on myös kokoluokaltaan sopiva (Van herle et al. 2004, 305).

### 5.1.1 Laskennan lähtötiedot

Esimerkkialueelle suunnitellulla biokaasulaitoksella voitaisiin käsitellä alueella syntyvä eläinten lanta, biojätteet, jätevedenpuhdistamon liete sekä haja-asutusalueen sako- ja umpikaivolietteet. Lisäksi syntyvästä oljesta voidaan olettaa käytettävän 20 % eläinten kuivikkeena, jolloin tämä määrä päättyy lannan mukana mädätysprosessiin. Lehmien lannasta oletetaan saatavan talteen vain 70 %, koska kesäisin lehmät laiduntavat ulkona. Kananpoikasten tuottama lantamäärä jätettiin huomioimatta, koska määrä olisi pieni ja poikasvaihe kestää vain lyhyen aikaa. Myös hevosten tuottama lantamäärä jätettiin huomioimatta, koska hevoset ovat suurimman osan ajasta ulkona, joten vain pieni osa lannasta voitaisiin hyödyntää. Lisäksi hevosten määrä alueella on pieni verrattuna muihin kotieläimiin. Taulukkoon 21 on koottu alueella syntyvien mädätettävien materiaalien määrät (luvusta 4) ja ominaisuudet.

**Taulukko 21.** Mädätettävien materiaalien määrät ja ominaisuudet (Lehtomäki et al. 2007, 19, 21; Taavitsainen et al. 2002, 24).

Materiaali	Määrä	Kiintoainepitoisuus [%]	Metaanintuottopotentiaali [m <sup>3</sup> /t <sub>VS</sub> ]	Biokaasun tuottopotentiaali [m <sup>3</sup> /t <sub>VS</sub> ]
Biojäte	30 t <sub>dw</sub> /a	74	500 - 600	-
Jätevesiliete	90 t <sub>dw</sub> /a	80	200 - 400	200 - 600
Lehmän lanta	280 t <sub>VS</sub> /a		100 - 250	200 - 600
Sian lanta	570 t <sub>VS</sub> /a		300 - 400	400 - 900
Siipikarjan lanta	580 t <sub>VS</sub> /a		-	300 - 800
Olki	1 640 t <sub>dw</sub> /a	96	240 - 320	-

Metaanin tuotto eri materiaaleille mädätyksen avulla voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä, kun tiedetään metaanintuottopotentiaali kyseiselle materiaalille

$$Y_{CH_4} = m_{VS} \cdot \gamma_{CH_4}, \quad (3)$$



missä  $Y_{CH_4}$  on metaanin tuotto ( $m^3$ )

$m_{VS}$  on haihtuvan kiintoaineen määrä ( $t_{VS}$ )

$y_{CH_4}$  on metaanintuottopotentiaali ( $m^3_{CH_4}/t_{VS}$ ).

Jos metaanintuottopotentiaalia ei tiedetä, voidaan metaanin tuotto laskea biokaasun tuottopotentiaalin kautta yhtälöllä

$$Y_{CH_4} = m_{VS} \cdot y_{bio} \cdot c_{CH_4}, \quad (4)$$

missä  $y_{bio}$  on biokaasun tuottopotentiaali ( $m^3_{biokaasu}/t_{VS}$ )

$c_{CH_4}$  on biokaasun metaanipitoisuus (%).

Biokaasun sisältämä polttoaine-energia voidaan laskea yhtälöllä

$$E_{teor.} = q_{CH_4} \cdot Y_{CH_4}, \quad (5)$$

missä  $E_{teor.}$  on biokaasun teoreettinen polttoaine-energia (MJ, MWh)

$q_{CH_4}$  on metaanin lämpöarvo ( $MJ/m^3$ ,  $MWh/m^3$ ).

Tästä energiamäärästä osa muutetaan polttokennojen avulla sähköksi ja osa lämmöksi. CHP-prosessilla tuotettavan lämmön määrä lasketaan yhtälöllä

$$E_{th} = \eta_{th} \cdot E_{teor.}, \quad (6)$$

missä  $E_{th}$  on lämpöenergian määrä (MJ, MWh)

$\eta_{th}$  on lämmön tuotannon hyötysuhde (%),

ja tuotettavan sähkön määrä lasketaan yhtälöllä

$$E_{el} = \eta_{el} \cdot E_{teor.}, \quad (7)$$

missä  $E_{el}$  on sähköenergian määrä (MJ, MWh)

$\eta_{el}$  on sähkön tuotannon hyötysuhde (%).

Luvun 3 taulukossa 12 on sanottu kiinteäoksidipolttokennon sähköhyötysuhteeksi 42 - 47 %. Van herlen et al. (2004, 312) tutkimuksessa sähköhyötysuhde oli kuitenkin 38,2 %, lämpöhyötysuhde 46 % ja kokonaishyötysuhde 84,2 %, joita käytetään myös tässä työssä.

Osa biokaasulaitoksella tuotetusta lämmöstä kuluu reaktorilämpötilan ylläpitoon ja syötteen lämmitykseen prosessilämpötilaan. Prosessin tarvitseman lämpöenergian määrä riippuu reaktorin koosta sekä prosessin lämpötilasta. Reaktorin ja syötteen lämmitys kuluttavat Luostarisen (2007, 32) tekemien kokeiden mukaan noin 9,1 % tuotetusta energiasta. Taulukossa 22 on vertailu mesofiilisen ja termofiilisen prosessin reaktorin lämmönkulutuksista.

**Taulukko 22.** Reaktorikoon ja prosessilämpötilan vaikutus reaktorin lämmönkulutukseen (Luostarinen 2007, 33).

Reaktorikoko [m <sup>3</sup> ]	Termofiilinen [MWh/a]	Mesofiilinen [MWh/a]
500	250	190
1 000	458	285
2 000	1 033	643
3 000	1 221	761

Biokaasulaitoksen reaktorin tilavuus voidaan laskea yhtälöllä (Luostarinen 2007, 9):

$$V = \frac{Q \cdot S_0}{OLR}, \quad (8)$$

missä  $V$  on tilavuus (m<sup>3</sup>)

$Q$  on reaktoriin syötettävän materiaalin määrä (kg/vrk)

$S_0$  on kiintoainepitoisuus (%)

$OLR$  on kuormitus (kg<sub>VS</sub>/m<sup>3</sup>/vrk).

Termofiilisen prosessin kuormitus on yleensä 10 - 11 kg<sub>VS</sub>/m<sup>3</sup>/vrk ja mesofiilisen prosessin 5 - 6 kg<sub>VS</sub>/m<sup>3</sup>/vrk (Taavitsainen et al. 2002, 21). Esimerkkilaitoksen kuormitus olisi noin 8 500

kg<sub>VS</sub>/vrk, jolloin vaadittavaksi reaktorin tilavuudeksi saadaan termofiiliselle prosessille 770 - 850 m<sup>3</sup>, jolloin reaktorin lämmityksen voidaan arvioida kuluttavan lämpöä noin 380 MWh/a. Mesofiilisen prosessin reaktorin tilavuudeksi saadaan 1 400 - 1 700 m<sup>3</sup>, jolloin reaktorin lämmityksen voidaan arvioida kuluttavan lämpöä noin 470 MWh/a.

Biokaasulaitos kuluttaa sähköä reaktorin sisällön sekoittamiseen, mädätettävän aineksen syöttämiseen, käsitellyn massan pumppaamiseen, veden poistoon sekä kaasuvaraston paineen ylläpitämiseen. Sekoitus on suurin yksittäinen sähköenergian kuluttaja. Biokaasuprosessin sähkönkulutus on 2,6 % prosessin tuottamasta energiasta. Kokoluokaltaan 1 000 m<sup>3</sup> olevan laitoksen sähköenergian kulutukseksi voidaan arvioida 83,5 MWh/a. (Luostarinen 2007, 34.)

Biokaasuprosessin energian kulutuksista on kuitenkin saatavilla hyvin erilaisia tietoja. Esimerkiksi eräällä ruotsalaisella tilalla jäi biokaasulaitokselta tuotetusta energiasta korkeintaan 56 % tilan käyttöön. Laskennallisesti arvioituna biokaasulaitoksella kului lämpöenergiaa 53,3 % lannan ja nestemäisen jakeen lämmitykseen ja lämpöhäviöihin 9,5 % tuotetusta energiasta. (Schäfer et al. 2006, 5.) MTT:n hakemassa Maaningan biokaasulaitoksen ympäristöluvassa puolestaan arvioitiin laitoksen kuluttavan tuotetusta sähköstä 5 % ja tuotetusta lämmöstä 33 % loppuosan jäädessä muuhun käyttöön (Pohjois-Savon ympäristökeskus 2009, 4). Tässä työssä käytetään kuitenkin Luostarisen (2007) tutkimukseen perustuvia arvoja, eli biokaasuprosessin kuluttama lämpö on 9,1 % ja sähkö 2,6 % tuotetusta energiasta, vaikka nämä ovat hyvin optimistisia arvoja.

### 5.1.2 Tulokset

Esimerkkialueelle suunnitellulta biokaasulaitokselta teoreettisesti saatavat energiamäärät sekä polttokennon hyötysuhteen perusteella lasketut sähkö- ja lämpöenergian määrät on esitetty taulukossa 23. Tutkimusten mukaan metaanintuottopotentiali on korkeimmillaan, kun käsiteltävästä materiaalista 30 % on kasvimateriaalia ja 70 % lantaa. Tällöin metaanisaannot vastaavat 85 - 105 % mädätettävien kasvien metaanintuottopotentialeista. (Seppälä et al. 2008, 4.) Esimerkkialueen tapauksessa noin 50 % mädätettävästä materiaalista on olkea ja 50 % muita materiaaleja eli lantaa, biojätettä ja yhdyskuntien jätevesilietteitä. Myös osa biojätteestä on kasvimateriaalia, joten esimerkkialueen tapauksessa yli 50 % mädätettävästä aineksesta olisi

kasvimateriaaleja. Koska mädätettävän materiaalin koostumus ei vastaa optimaalista sekoitus-suhdetta, käytetään metaanintuottopotentialina taulukossa 21 esitettyjen arvojen vaihteluväli-en keskiarvoja. Siipikarjan lannalle ei kirjallisuudesta ollut saatavilla metaanintuottopotentiaalia, joten se laskettiin biokaasun tuoton kautta. Biokaasun metaanipitoisuus on yleensä 55 - 75 %, joten tässä valittiin metaanipitoisuudeksi 65 %. Metaanin alempi lämpöarvo on 0,01 MWh/m<sup>3</sup>. (Hagström et al. 2005, 13.)

**Taulukko 23.** Biokaasulaitokselta teoreettisesti saatava energiamäärä sekä CHP-laitoksella tuotettu sähkö ja lämpö.

<b>Materiaali</b>	<b>Energiaa [MWh/a]</b>	<b>Sähköä [MWh/a]</b>	<b>Lämpöä [MWh/a]</b>
Biojäte	130	50	60
Jätevesiliete	220	80	100
Lehmän lanta	490	190	230
Sian lanta	2 000	760	920
Siipikarjan lanta	2 060	790	950
Olki	4 410	1 680	2 030
<b>Yhteensä</b>	<b>9 300</b>	<b>3 550</b>	<b>4 280</b>

Taulukossa 24 on esitetty biokaasulaitoksen ja polttokennojen avulla tuotetut energiamäärät, kun laitos kuluttaa sähköä 2,6 % ja lämpöä 9,1 % tuottamastaan energiasta.

**Taulukko 24.** Biokaasulaitoksen ja polttokennojen avulla tuotetut todelliset sähkö- ja lämpömäärät.

	<b>Laitos kuluttaa [MWh/a]</b>	<b>Laitos tuottaa, netto [MWh/a]</b>	<b>Kattaa alueen tarpeesta [%]</b>
Sähkö	240	3 310	23
Lämpö	850	3 430	8

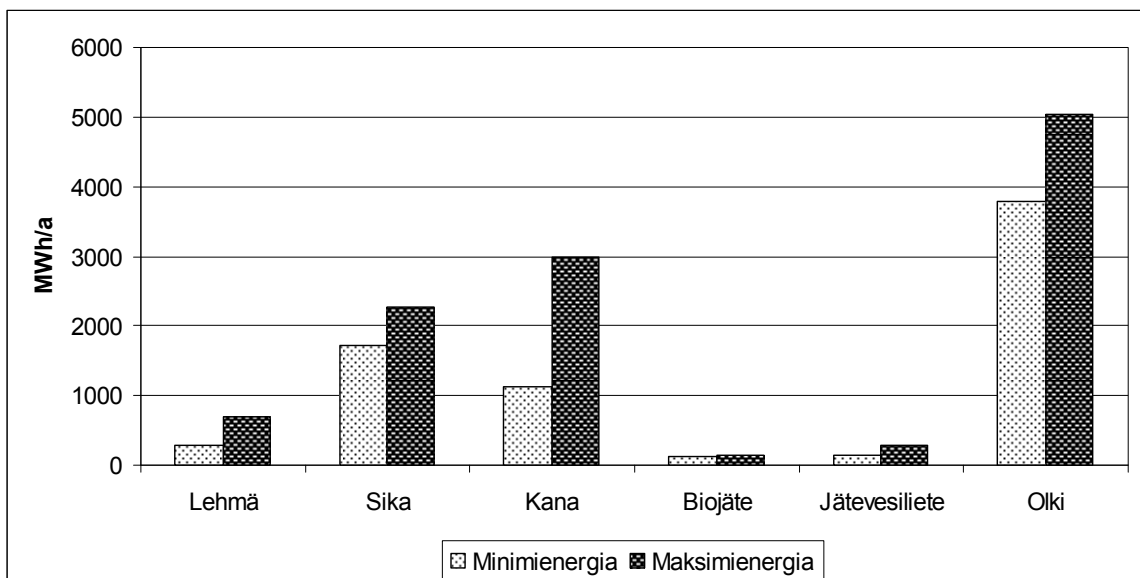
### 5.1.3 Herkkyystarkastelut

Seuraavassa tarkastellaan eri tekijöiden vaikutuksia biokaasuprosessilla ja polttokennoilla potentiaalisesti tuotettaviin energiamääriin. Herkkyystarkasteluissa muutetaan yhtä muuttujaa kerrallaan ja muiden tekijöiden oletetaan pysyvän samoina kuin perustilanteessa. Liitteessä 2 on esitetty yhteenveto herkkyystarkastelujen tuloksista.

### 5.1.3.1 Metaanintuottopotentiaali

Kirjallisuudessa esitetyissä metaanintuottopotentiaaleissa on eroa jopa  $150 \text{ m}^3/t_{\text{VS}}$  pienimmän ja suurimman arvon välillä. Laskettaessa kirjallisuudessa esitetyillä minimipotentialeilla saataisiin biokaasuprosessilla tuotettua energiaa 7 160 MWh/a, josta saataisiin sähköä 2 410 MWh/a. Tämä kattaisi 17 % alueen sähkönkulutuksesta perustapauksen 23 %:n sijasta. Lämpöä saataisiin tuotettua 2 910 MWh/a, joka kattaisi 6 % alueen lämmönkulutuksesta perustapauksen 8 %:n sijasta.

Kirjallisuudessa esitetyillä maksimipotentialeilla laskettaessa saataisiin biokaasuprosessissa tuotettua energiaa 11 450 MWh/a. Maksimi metaanintuottopotentiaaleilla tuotetusta energiasta saataisiin sähköä 3 860 MWh/a, joka kattaisi 27 % alueen sähköenergian tarpeesta perustapauksen 23 %:n sijasta. Lämpöä saataisiin tuotettua 4 650 MWh/a, joka kattaisi noin 10 % alueen lämpöenergian tarpeesta perustapauksen 8 %:n sijasta. Kuvassa 6 on vertailtu minimi- ja maksimituottopotentiaalien vaikutusta tuotetun energian määrään. Kuvasta 6 nähdään, että biojätteellä ja jätevesilietteellä ero on hyvin pieni, joka johtuu siitä, että näiden materiaalien määrät ovat hyvin pienet. Kanan lannasta saatavassa energiamäärässä on suurin ero, koska kirjallisuudessa esitetyissä arvoissa on suurin vaihteluväli.



Kuva 6. Metaanintuottopotentiaalın vaikutus tuotettavissa olevan energian määrään eri materiaaleilla.

### 5.1.3.2 Polttokennojen hyötysuhde

Kirjallisuudessa on esitetty polttokennojen kokonaishyötysuhteen voivan olla enimmillään 95 % (taulukko 11) ja kiinteäoksidipolttokennon sähköhyötysuhteen voivan olla enimmillään 47 % (taulukko 12). Kun lasketaan näillä maksimihyötysuhteilla, eli sähköhyötysuhde 47 % ja lämpöhyötysuhde 48 %, saataisiin biokaasuprosessilla tuotettua sähköä 4 130 MWh/a, joka kattaisi 29 % alueen sähköenergian tarpeesta perustapauksen 23 %:n sijaan. Lämpöä saataisiin tuotettua 3 620 MWh/a, joka kattaisi noin 8 % alueen lämpöenergian tarpeesta samoin kuin perustapauksessa. Perustapauksessa käytetyt hyötysuhteet vastaavat kirjallisuudessa esitettyjä minimihyötysuhteita.

### 5.1.3.3 Eläinten määrä

Humppilan nautaeläinten ja sikojen määrä on melko alhainen verrattuna moneen muuhun maaseutuyhteiskuntaan, esimerkiksi Humppilan naapurikunnassa Jokioisissa on nautaeläimiä neljä kertaa niin paljon kuin Humppilassa ja sikoja lähes kolminkertainen määrä. Jos esimerkiksi alueen biokaasulaitokselle tuotaisiin myös naapurikunnan Jokioisten kotieläinten tuottama lanta, voitaisiin tästä lantamäärästä muodostuvalla metaanilla tuottaa lisää energiaa 6 800 MWh/a. Tästä energiasta saataisiin sähköä 2 600 MWh/a ja lämpöä 3 130 MWh/a. Tämä on yli kaksi kolmasosaa Humppilan kaikista mädätettävistä materiaaleista saatavasta energiasta. Taulukossa 25 on vertailtu Humppilan ja Jokioisten kotieläinten määriä ja niiden lannasta tuotetun sähkön ja lämmön määriä.

**Taulukko 25.** Humppilan ja Jokioisten kotieläinten määrät sekä niiden lannasta tuotettu sähkö ja lämpö biokaasulaitoksella.

	<b>Eläinten määrä [kpl]</b>	<b>Sähköä [MWh/a]</b>	<b>Lämpöä [MWh/a]</b>
<b>Humppila:</b>			
Nautaeläimet	560	190	230
Siat	6 300	760	920
Siipikarja	111 200	790	950
<b>Yhteensä</b>		<b>1 740</b>	<b>2 100</b>
<b>Jokioinen:</b>			
Nautaeläimet	2 100	620	750
Siat	16 700	1 900	2 290
Siipikarja	9 300	80	90
<b>Yhteensä</b>		<b>2 600</b>	<b>3 130</b>

Jos biokaasulaitoksella käsiteltäisiin myös Jokioisten kotieläinten lanta, saataisiin alueen sähkön kulutuksesta katettua 40 % ja lämmön kulutuksesta 13 % anaerobisen mädätyksen ja polttokennojen avulla perustapauksen 23 %:n ja 8 %:n sijasta. Osuudet olisivat mahdollisesti vielä hieman suurempia, koska tällä tavalla saavutettaisiin metaanintuoton kannalta parempi lannan ja kasvimateriaalien suhde (olkea 29 %, optimitilanteessa kasvimateriaalia 30 %), joka tarkoittaa korkeampia metaanisaantoja.

#### *5.1.3.4 Kasvibiomassan määrä*

Seuraavassa tarkastellaan kasvibiomassan määrän vaikutusta tuotettavissa olevan energian määrään. Humppilassa on noin 270 hehtaaria hoidettua viljelemätöntä peltoa ja kesantoa, jossa voidaan olettaa kasvavan timotei-apila-nurmea, joka niitetään säännöllisin väliajoin. Tätä voitaisiin käyttää mädätyksessä lisämateriaalina, jolloin nurmesta saatava energialisä olisi 7 530 MWh/a, josta saataisiin sähköä 2 880 MWh/a ja lämpöä 3 470 MWh/a. Tämä on lähes yhtä paljon kuin muista alueen materiaaleista saatavat energiamäärät.

Kun mädätykseen laitettaisiin myös viljelemättömiltä pelloilta niitettävä nurmi, saataisiin alueen sähkön tarpeesta katettua noin 41 % ja lämmön tarpeesta noin 14 % perustapauksen 23 %:n ja 8 %:n sijaan. Kasvibiomassan lisääminen prosessiin huonontaa kuitenkin entisestään lannan ja kasvimateriaalien suhdetta, jolloin myös metaanintuotto voi kärsiä nurmen lisäämisestä, jolloin metaanintuotto ei välttämättä noudata enää keskimääräisiä arvoja.

#### *5.1.3.5 Kasvihuoneviljely*

Seuraavaksi oletetaan, että esimerkkialueella olisi muun maatalouden lisäksi kasvihuonekurkun ja -tomaatin viljelyä ja näiltä saatavat kasvijätteet käytettäisiin biokaasun tuotantoon. Suomessa viljeltävien kasvihuonekurkkujen keskimääräinen viljelypinta-ala yhdellä kasvihuoneella on noin 1 700 m<sup>2</sup> ja kasvihuonetomaatin noin 1 800 m<sup>2</sup> (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008). Luvussa 2 on sanottu kurkun viljelystä syntyvien kasvijätteiden määräksi 27 kg/m<sup>2</sup>/a ja tomaatin viljelystä 9 kg/m<sup>2</sup>/a märkäpainona. Jos alueella olisi yksi keskikokoinen kasvihuone kurkuille ja yksi tomaateille saataisiin näistä kasvijätettä yhteensä 62 t<sub>ww</sub>/a.

Kasvibiomassan metaanintuottopotentialiaali on 30 - 150 m<sup>3</sup>/t<sub>ww</sub> (Lehtomäki et al. 2007, 19). Jos oletetaan metaanintuottopotentialin olevan 100 m<sup>3</sup>/t<sub>ww</sub>, saataisiin kasvihuoneiden kasvijätteistä tuotettua energiaa hieman yli 60 MWh/a. Sähköä saataisiin noin 25 MWh/a ja lämpöä noin 30 MWh/a. Kasvihuoneiden toiminta kuluttaa kuitenkin myös energiaa. Luvun 2 tietojen mukaan kasvihuoneiden keskimääräinen sähkön kulutus on 0,17 MWh/m<sup>2</sup> ja lämmönkulutus 0,51 MWh/m<sup>2</sup>. Tällöin kasvihuoneet kuluttaisivat sähköä yhteensä 600 MWh/a ja lämpöä 1 800 MWh/a. Kasvihuoneista syntyvästä kasvijätteestä saatava energiamäärä on siis huomattavasti pienempi kuin kasvihuoneissa kuluva energia.

Kun alueen tarvitsemiin sähkö- ja lämpöenergian määriin lisätään kasvihuoneiden energiankulutus, voitaisiin mädätyksen ja polttokennojen avulla kattaa alueen sähkön tarpeesta noin 22 % ja lämmön tarpeesta noin 7 %. Kasvihuoneita voitaisiin käyttää lämpöenergian kuluttajina, jos CHP-laitos rakennettaisiin kasvihuoneiden läheisyyteen, koska lämpöä on vaikea siirtää pitkiä matkoja loppukäyttäjille. Lisäksi poltosta syntyvää hiilidioksidia voitaisiin johtaa kasvihuoneisiin kiihdyttämään kasvua.

## 5.2 Terminen käsittely ja ORC-prosessi

Toisena esimerkkilaitoksena on polttolaitos, koska kaikki alueella syntyvät materiaalit eivät sovellu mädätykseen. Terminen käsittely tapahtuisi arinapolton avulla, joka soveltuu paremmin pienen mittakaavan polttoon. Sähköä ja lämpöä voitaisiin tuottaa ORC-prosessilla, koska sen hyötysuhde on hyvä ja se on kokoluokaltaan sopiva. ORC-prosessin hyötysuhteet ovat luvun 3 taulukon 11 mukaan sähkön tuotannolle 10 - 20 %, lämmön tuotannolle 70 - 85 % ja kokonaishyötysuhde 85 - 95 %.

Itävallassa sijaitsevalla Lienzin biomassapohjaisella CHP-laitoksella, jonka nimellisteho on 1 MW<sub>el</sub>, on saavutettu 18 %:n sähköhyötysuhde ja 80 %:n lämpöhyötysuhde nimellisteholla. Kun laitos toimi 50 %:n kuormalla, saavutettiin 16,5 %:n sähköhyötysuhde, joka osoittaa että ORC-prosessi toimii hyvin myös vajaalla kuormalla. ORC-prosessi vaatii sähköä pumppujen toimintaan noin 60 kW, kun puhutaan kokoluokaltaan 1 MW:n laitoksesta. Laitoksen vaatima sähkö on kuitenkin jo huomioitu hyötysuhteessa. (Oberberger et al. 2002, 5.)



### 5.2.1 Laskennan lähtötiedot

Alueella syntyviä polttokelpoisia materiaaleja ovat hakkuutähteet, kannot ja harvennuspuut, polttokelpoiset jätteet eli sekajäte, paperi- ja kartonkijäte, puujäte sekä muovijäte. Rypsin ja rapsin olki menee kokonaisuudessaan polttoon ja viljan oljesta oletetaan polttoon tulevan 80 %, koska 20 % menisi mädätykseen lannan mukana. Taulukkoon 26 on koottu poltettavien materiaalien määrät esimerkkialueella (luvusta 4), niiden kosteus- ja tuhkapitoisuudet sekä teholliset lämpöarvot kuiva-aineessa.

**Taulukko 26.** Poltettavien materiaalien määrät ja ominaisuudet (Alakangas 2000).

Materiaali	Määrä [ $t_{ww}/a$ ]	Kosteuspitoisuus [%]	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa [%]	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [ $MJ/kg_{dw}$ ]
Sekajäte (REF III)	770	28,5	9,5	21,5
Paperi- ja kartonkijäte	210	6,4	5,8	19,6
Puujäte	20	25	2,2	19,1
Muovijäte	10	-	2	31,8
Hakkuutähde	2 100	40	1,33	19,7
Kannot	550	35	1,33	19,1
Harvennuspuu	950	40	1,33	19,2
Viljan olki	8 200	20	5	17,4
Rypsin ja rapsin olki	1 200	25	2,6	18,5

Poltoista saatava energiamäärä lasketaan saapumistilan tehollisen lämpöarvon avulla, joka ottaa huomioon materiaalin kosteuden höyrystymiseen vaadittavan energian. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa voidaan laskea yhtälöllä

$$q_{ar} = q_{dw} \cdot (1 - w) - l \cdot w \quad (9)$$

missä  $q_{ar}$  on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ( $MJ/kg_{ww}$ )

$q_{dw}$  on tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa ( $MJ/kg_{dw}$ )

$w$  on kosteuspitoisuus (%)

$l$  on veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä (2,441 MJ/kg).

Poltosta teoreettisesti saatava energiamäärä jokaiselle poltettavalle materiaalille voidaan laskea yhtälöllä

$$E_{teor.} = m \cdot q_{ar} . \quad (10)$$

Teoreettisesta energiamäärästä muutetaan osa sähköksi ja osa lämmöksi ORC-prosessin avulla. CHP-laitoksella tuotetun sähkön ja lämmön määrä lasketaan yhtälöiden 6 ja 7 avulla.

### 5.2.2 Tulokset

Poltosta teoreettisesti saatavat energiamäärät sekä niistä CHP-laitoksella tuotetut sähkö- ja lämpöenergian määrät on esitetty taulukossa 27, kun sähkön tuotannonhyötysuhteeksi on oletettu 15 % ja lämmön tuotannon hyötysuhteeksi 75 %.

**Taulukko 27.** Polton teoreettinen energiasaanto sekä CHP-laitoksella tuotettu sähkö ja lämpö.

<b>Materiaali</b>	<b>Energiaa [MWh/a]</b>	<b>Sähköä [MWh/a]</b>	<b>Lämpöä [MWh/a]</b>
Sekajäte (REF III)	3 150	470	2 360
Paperi- ja kartonki-jäte	1 040	150	780
Puujäte	60	10	40
Muovijäte	70	10	50
Hakkuutähde	6 260	940	4 700
Kannot	1 750	260	1 310
Harvennuspuu	2 760	410	2 070
Viljan olki	30 630	4 600	22 970
Rypsin ja rapsin olki	4 420	660	3 320
<b>Yhteensä</b>	<b>50 130</b>	<b>7 520</b>	<b>37 600</b>

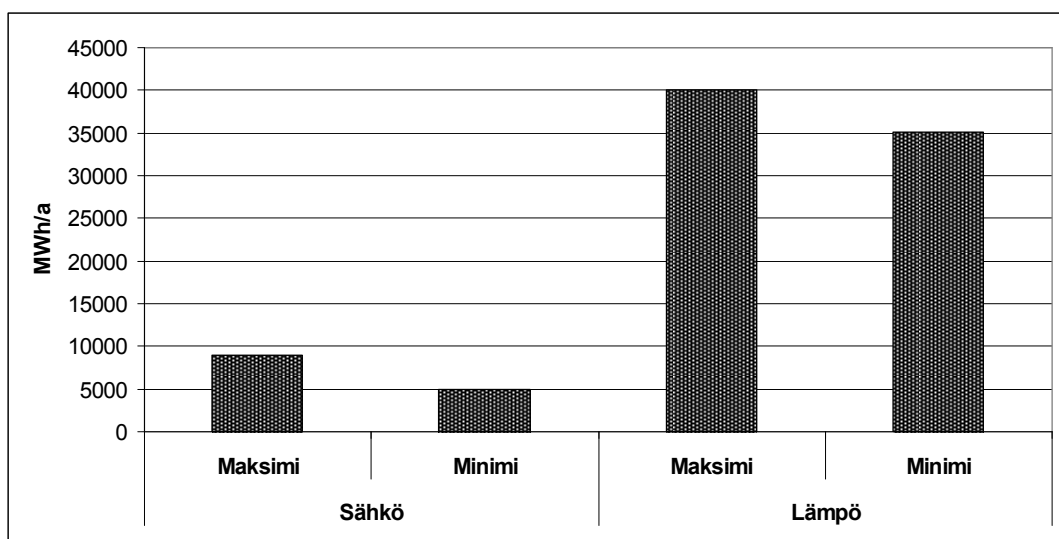
Koska ORC-prosessin hyötysuhteissa on jo huomioitu prosessin itsensä kuluttama energia, ovat taulukossa 26 esitetyt sähkö- ja lämpömäärät laitokselta ulos saatavia määriä. ORC-prosessilla tuotetulla sähköllä voitaisiin kattaa 52 % alueen sähkön tarpeesta, ja lämmöllä 82 % alueen lämmön tarpeesta.

### 5.2.3 Herkkyystarkastelut

Seuraavassa tarkastellaan eri tekijöiden vaikutuksia polttolaitoksella ja ORC-prosessilla potentiaalisesti tuotettaviin energiamääriin. Herkkyystarkasteluissa muutetaan yhtä muuttujaa kerrallaan ja muiden oletetaan pysyvän samoina kuin perustilanteessa. Liitteessä 3 on esitetty yhteenveto herkkyystarkastelujen tuloksista.

#### 5.2.3.1 ORC-prosessin hyötysuhde

Ensin tarkastellaan hyötysuhteen vaikutusta tuotettavissa oleviin energiamääriin. Luvussa 5.2 on sanottu Lienzin CHP-laitoksen sähköhyötysuhteeksi nimellisteholla 18 % ja lämpöhyötysuhteeksi 80 %. Näillä maksimihyötysuhteilla laskettaessa, saataisiin laitoksella tuotettua sähköä 9 000 MWh/a ja lämpöä 40 100 MWh/a, jotka kattaisivat 62 % alueen sähkön tarpeesta ja 88 % alueen lämmön tarpeesta perustapauksen 52 %:n ja 82 %:n sijaan. ORC-prosessin hyötysuhteet ovat luvun 3 taulukon 11 mukaan alhaisimmillaan 10 % (sähkö) ja 70 % (lämpö). Näillä hyötysuhteilla laskettaessa saataisiin tuotettua sähköä 5 010 MWh/a, joka kattaisi 35 % alueen sähkön tarpeesta perustapauksen 52 %:n sijaan. Lämpöä saataisiin tuotettua 35 100 MWh/a, joka kattaisi 77 % alueen lämmön tarpeesta perustapauksen 82 %:n sijaan. Kuvassa 7 on esitetty vertailu tuotetun sähkön ja lämmön määristä ORC-prosessin minimi- ja maksimihyötysuhteilla.



Kuva 7. Hyötysuhteiden vaikutus tuotetun sähkön ja lämmön määrään.

### 5.2.3.2 Jätteiden poltto

Jätteiden polttaminen vaatii ympäristöluvan ja jatkuvaa päästötarkkailua. Lisäksi jätteenpolttoluvan hakeminen ja saaminen on monimutkainen ja aikaa vievä prosessi. Tämän vuoksi jätteiden polttaminen pienessä laitoksessa ei välttämättä ole kovin kannattavaa. Seuraavassa tarkastellaan, kuinka paljon olisi vaikutusta tuotettuihin energiamääriin, jos laitoksella ei poltettaisi jätteenpolttoasetuksen piiriin kuuluvia materiaaleja.

Polttolaitoksella saataisiin tuotettua energiaa noin 47 430 MWh/a ilman alueella syntyvien polttokelpoisten yhdyskuntajätteiden polttamista. Sähköä saataisiin tuotettua 7 120 MWh/ eli ainoastaan 400 MWh/a vähemmän kuin perustapauksessa. Tällä sähkömäärällä saataisiin katettua 49 % alueen sähkön tarpeesta perustapauksen 52 %:n sijasta. Lämpöä saataisiin tuotettua 35 580 MWh/a eli 2 020 MWh/a vähemmän kuin perustapauksessa. Tämä lämpömäärä kattaisi 78 % alueen lämmön tarpeesta perustapauksen 82 %:n sijasta. Alueella syntyvien polttokelpoisten jätteiden määrä on siis sen verran pieni, että niiden jättämisellä pois poltosta ei ole merkittävää vaikutusta tuotettuihin sähkö- ja lämpömääriin.

### 5.2.3.3 Hakkuutähteiden määrä

Seuraavaksi oletetaan, että esimerkkialueella syntyisi hakkuutähteitä, kantoja ja harvennuspuuta 15 % enemmän kuin perustapauksessa. Tällöin polttolaitoksella saataisiin tuotettua energiaa noin 1 610 MWh/a enemmän kuin perustilanteessa. Sähköä saataisiin tuotettua 240 MWh/a ja lämpöä 1 210 MWh/a enemmän verrattuna perustilanteeseen. Metsistä saatavien hakkuutähteiden, kantojen ja harvennuspuiden määrän nousu 15 %:lla nostaisi polttolaitoksella tuotetun energia määrää 3 %. Tämän lisäyksen avulla saataisiin alueen sähköntarpeesta katettua 54 % ja lämmöntarpeesta 85 % perustapauksen 52 %:n ja 82 %:n sijaan.

### 5.2.3.4 Oljen määrä

Oljen korjuu pelloilta ei välttämättä ole kannattavaa pellon ravinne- ja humustasapainon vuoksi. Lisäksi suuri olkimäärä voi aiheuttaa ongelmia polttolaitoksen toiminnalle, koska oljen tuhkapitoisuus on suuri. Nyt oletetaan, että puolet syntyvästä oljesta kynnetään peltoon ja toisesta puolesta 20 % käytetään eläinten kuivikkeena ja menee lannan mukana mädätykseen,

kuten perustapauksessakin. Tällöin polttoon menisi olkea 3 280 tonnia kuiva-aineena vuodessa ja poltosta saatava energiamäärä olisi 13 720 MWh/a pienempi kuin perustapauksessa ollen 36 410 MWh/a. Tästä energiasta saataisiin sähköä 5 460 MWh/a, joka kattaisi 38 % alueen sähköntarpeesta perustapauksen 52 %:n sijaan, ja lämpöä 27 310 MWh/a, joka kattaisi 60 % alueen lämmöntarpeesta perustapauksen 82 %:n sijaan. Oljen määrän pieneneminen 50 %:lla vaikuttaisi selvästi polttolaitoksella tuotettavan energian määrään.

#### 5.2.3.5 Ruokohelven viljely

Seuraavaksi tarkastellaan energiakasvien viljelystä saatavaa energialisää. Alueella olevalla viljelemättömällä peltoalueella, jonka ala on noin 270 hehtaaria, voitaisiin viljellä ruokohelpeä, joka voitaisiin käyttää energiantuotantoon polttolaitoksella. Ruokohelven saantona käytetään 5 t<sub>dw</sub>/ha, jolloin tältä alalta saatava ruokohelven määrä olisi noin 1 350 t<sub>dw</sub>/a ja energiasaanto 6 450 MWh/a, jos kyseessä olisi kevätkorjattu ruokohelvi, jonka lämpöarvo on 17,6 MJ/kg<sub>dw</sub> ja kosteuspitoisuus 14 %. Tällöin ruokohelven poltosta saatava sähköenergia olisi 970 MWh/a ja lämpöenergia 4 840 MWh/a.

Kun polttolaitoksella poltettaisiin myös aikaisemmin viljelemättömällä alueella kasvatettavaa ruokohelpeä 1 350 t<sub>dw</sub>/a, saataisiin alueen sähköntarpeesta katettua 59 % ja lämmöntarpeesta 93 % polttolaitoksen ja ORC-prosessin avulla perustilanteen 52 %:n ja 82 %:n sijasta.

### 5.3 Logistiikka

Esimerkkialueelle suunniteltujen CHP-laitosten sijoituspaikkojen valinnassa tulisi ottaa huomioon laitoksille tulevien materiaalien kuljetukset ja lämmön siirto loppukäyttäjille. Koska esimerkkialue ei ole pinta-alaltaan kovin laaja, sen suurin pituus on vain 19 kilometriä ja leveys 14 kilometriä (Humppilan kunta 2008), on laitosten sijoituspaikkojen valintaa rajoittavana tekijänä lähinnä lämmönhyödyntämismahdollisuus.

Suurin osa biokaasulaitoksen materiaaleista tulee maataloilta (yli 96 %). Myös laitoksella syntyvä reaktorijäännös kuljetetaan takaisin pelloille, joten kuljetusten kannalta biokaasulaitos olisi kannattavaa sijoittaa suurien maatilojen läheisyyteen. Kuljetukset voitaisiin hoitaa meno-

paluu-kuljetuksina eli samalla kun biokaasulaitokselle tuotaisiin lantaa mädätettäväksi, vietäisiin paluumatkalla reaktorijäännöstä tilojen pelloille levitettäväksi. Biokaasulaitos voitaisiin toteuttaa yhden ison laitoksen sijasta myös kahtena erillisenä ja hieman pienempänä laitoksena, koska etenkin mesofiilisen laitoksen vaihtoehdossa reaktori olisi melko suuri (1 400 - 1 700 m<sup>3</sup>). Tällöin laitokset voitaisiin sijoittaa suurimpien eläintilojen läheisyyteen ja kuljetusmatkat jäisivät lyhyiksi suurimpien materiaalien osalta.

Myös polttolaitokselle tulevista materiaaleista suurin osa on peräisin maataloilta oljen muodossa (noin 55 %). Olkea voidaan korjata pelloilta useilla eri tavoilla, mutta yleisimmin olki paalataan pyörö- tai suurkanttipaaleihin. Oljen kuljettaminen pitkiä matkoja on kallista sen vaatiman suuren tilavuuden vuoksi sekä irtotavarana että paalina. Myös oljen varastointi vaatii paljon tilaa. (Alakangas 2000, 98.) Polttolaitoksen sijoituspaikan valinnassa täytyy kuitenkin ottaa huomioon poltosta saatava suuri lämpömäärä, koska tuotetun lämmön hyödyntäminen aiheuttaa suuremman rajoituksen laitoksen sijoituspaikan valinnassa kuin kuljetuskustannukset.

Koska polttolaitos tuottaa huomattavasti enemmän lämpöä kuin biokaasulaitos kannattaisi polttolaitos sijoittaa alueella olevan kaukolämpölaitoksen läheisyyteen, jolloin lämpö voitaisiin siirtää kaukolämpöverkkoa pitkin asiakkaille. Kaukolämpöverkko kattaa tällä hetkellä vain pienen osan esimerkkialueesta, ja polttolaitoksen potentiaalisesti tuottama lämpö olisi lähes kolminkertainen alueen nykyisen kaukolämpölaitoksen tuottamaan lämpöön verrattuna, joten kaukolämpöverkkoa olisi myös syytä laajentaa, jotta mahdollisimman suuri osa lämmöstä saataisiin käytettyä hyödyksi. Toisena vaihtoehtona olisi laitoksen sijoittaminen lämpöä kuluttavien kasvihuoneiden tai teollisuuden läheisyyteen, mutta näitä ei esimerkkialueella ollut.

## 5.4 Päästöt

Seuraavassa tarkastellaan kummallakin CHP-laitoksella teoreettisesti syntyviä päästöjä ja verrataan niitä esimerkkialueen päästöihin nykyisessä tilanteessa ilman CHP-laitosten rakentamista. Päästöjen osalta ei ole huomioitu materiaalien kuljetuksesta laitoksille mahdollisesti aiheutuvia lisäpäästöjä, koska nämä olisi liian vaikea arvioida mahdollisten kuljetusmatkojen ollessa epävarmoja.

#### 5.4.1 Biokaasulaitos

Biokaasulaitoksella voi syntyä päästöjä materiaalien ja biokaasun varastoinnista, reaktorialtaasta sekä biokaasun muuntamisesta energiaksi. Suunnitellussa laitospäätöksessä materiaalien varastosäiliöiden on tarkoitus olla katettuja, joten näistä ei pääse haihtumaan päästöjä ilmaan. Myös reaktorialtaan ja biokaasun varastosäiliön on suunniteltu olevan katettuja, joten biokaasuprosessia voidaan pitää päästöttömänä. Polttokennojenkin päästöt ovat erittäin alhaiset ja savukaasut sisältävät lähinnä vain vesihöyryä ja hiilidioksidia (Mateve Oy 2008). Koska polttokenno toimii biokaasulla, on polttokenno hiilidioksidipäästöjen osalta neutraali. Biokaasun tuotanto vähentää kasvihuonekaasuja sekä korvaamalla fossiilisia polttoaineita että vähentämällä lannan käsittelyn aikaisia metaanipäästöjä. (Tuomisto 2005, 22.)

Lannan anaerobinen käsittely voi myös vähentää vesistöjen ravinnekuormituksia, koska osa lannan typestä muuttuu kasveille käyttökelpoisempaan muotoon, jolloin kasvien typenotto tehostuu. Kun kasvit sitovat enemmän typpeä, sitä kulkeutuu vähemmän rehevöittämään vesistöjä ja saastuttamaan pohjavesiä nitraatilla. Myös torjunta-aineiden kulkeutumista maaperään ja vesistöihin voidaan vähentää mädätyksen avulla, koska orgaaniset aineet voivat hajota anaerobisen käsittelyn aikana. (Tuomisto 2005, 25.)

Anaerobisen käsittelyn seurauksena syntyy reaktorijäännöstä lähes sama määrä kuin reaktorissa käsitellään materiaaleja. Levittämällä reaktorijäännös pelloille voidaan korvata kemiallisia lannoitteita, jolloin ravinteet saadaan palautettua takaisin kiertoon. Samalla kasvihuonekaasut pienenevät, koska kemiallisten lannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat hiilidioksidi- ja dityppioksidipäästöt pienenevät. Myös lannoitteiden käytöstä aiheutuvat dityppioksidipäästöt vähenevät, koska reaktorijäännöksessä oleva typpi on kasveille käyttökelpoisemmassa muodossa. (Tuomisto 2005, 26.) Jos oletetaan, että esimerkkialueella ei tarvitsisi käyttää enää kemiallisia lannoitteita, vähenisivät dityppioksidipäästöt luvussa 4 esitetyn lannoitteiden käytöstä aiheutuvien päästöjen mukaan hieman yli 9 tonnia vuodessa.

Reaktorijäännöksen ravinnemäärät riippuvat mädätettävien materiaalien ravinnemääristä, koska biokaasutuksen yhteydessä raaka-aineiden ravinteet eivät häviä. Jos reaktorijäännökselle

tehdään veden erotus, liukoisen typen määrä vähenee 85 % (Kapuinen 2009). Esimerkkilaitoksella ei tämän vuoksi ole veden erotusta, jolloin ravinteiden määrän voidaan olettaa olevan teoreettisten pitoisuuksien mukaiset. Taulukossa 28 on esitetty kirjallisuudesta saadut ravinnepitoisuudet eri materiaaleille.

**Taulukko 28.** Mädätettävien materiaalien ravinnepitoisuudet haihtuvassa kiintoaineessa (lanta) ja kuiva-aineessa (muut).

<b>Materiaali</b>	<b>Typpipitoisuus [%]</b>	<b>Fosforipitoisuus [%]</b>	<b>Lähde</b>
Nautaeläimen lanta	5,4	0,86	Järvenpää 2008a
Sian lanta	8,0	2,0	Järvenpää 2008a
Kanan lanta	16,7	5,0	Järvenpää 2008a
Biojäte	2,4	0,7	Myllymaa 2008
Jätevesiliete	5,6	3,5	Keskitalo & Kettunen 2007
Viljan olki	0,5	0,07	Alakangas 2000

Taulukossa 29 on esitetty Ympäristötuen sitomusehdoissa esitetyt sallitut lannoitteiden käyttömäärät maanviljelyssä sekä vuotuiset sallitut käyttömäärät esimerkkialueella, kun otetaan huomioon luvussa 4 taulukossa 14 esitetyt viljelypinta-alat. Näiden lisäksi esimerkkialueella viljellään perunaa 20 hehtaarin alalla (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2008). Rehuviljaan on laskettu mukaan ohran ja kauran viljelyalat.

**Taulukko 29.** Peltokasvien lannoituksessa sallitut typpi- ja fosforimäärät (Ympäristötuen sitomusehdot 2006) sekä sallitut käyttömäärät esimerkkialueella.

	<b>Lannoituksessa sallitut määrät</b>		<b>Alueen sallitut käyttömäärät</b>	
	<b>Typpi [kg/ha/a]</b>	<b>Fosfori [kg/ha/a]</b>	<b>Typpi [t/a]</b>	<b>Fosfori [t/a]</b>
Kevätvehnä	100	15	35	4
Syysvehnä	20	15	2	1
Ruis, keväällä	100	-	10	-
Rehuvilja	90	15	320	53
Öljykasvit	100	15	45	7
Peruna	60	40	1	1
Säilörehu	180	30	50	8
Kuiva heinä	90	15	10	2
Laidun	150	20	20	3
<b>Yhteensä</b>			<b>500</b>	<b>80</b>



Taulukosta 29 nähdään, että esimerkkialueen viljellyille peltoalueille saisi käyttää vuosittain typpeä 500 tonnia ja fosforia 80 tonnia. Taulukon 28 tietojen perusteella laskettuna saadaan vuosittain syntyvän reaktorijäännöksen teoreettiseksi typpimääräksi noin 180 tonnia vuodessa ja fosforimääräksi 50 tonnia vuodessa, joten syntyvä reaktorijäännös voidaan käyttää kokonaan peltojen lannoitukseen.

#### 5.4.2 Polttolaitos

Termisen käsittelyn ja ORC-prosessin aiheuttamat päästöt syntyvät ainoastaan polttoprosessista, sillä ORC-prosessista ei synny päästöjä, koska prosessi on täysin suljettu (Oberberger et al. 2002, 8). Arinapoltosta aiheutuvia päästöjä ovat muun muassa hiilimonoksidi- ja hiilivety-päästöt, rikkidioksidipäästöt, typenoksidipäästöt sekä dioksiini- ja furaanipäästöt (Raiko et al. 1995, 407).

Hiilimonoksidi- ja hiilivety-päästöt ovat seurausta epätäydellisestä palamisesta. Päästöjen syntymiseen oleellisesti vaikuttavia tekijöitä ovat lämpötila, kaasujen sekoittuminen ja viipymäaika. Rikkidioksidipäästöt syntyvät polttoaineen sisältämän rikin palamisesta ja päästön määrä on suoraan verrannollinen polttoaineen sisältämän rikin määrään. Myös typenoksidipäästöt syntyvät polttoaineen sisältämästä tpeestä, sekä tämän lisäksi ilman tpeestä. Typenoksidipäästöistä yleensä noin 95 % tai enemmän on typpimonoksidia ja alle 5 % typpidioksidia. Suurin osa typpimonoksidista hapettuu kuitenkin melko nopeasti typpidioksidiksi ilmakehässä. Di-typpioksidia syntyy merkittäviä määriä ainoastaan leijupoltossa sekä NO-vähennysmenetelmien, kuten urean lisäyksen, yhteydessä. (Raiko et al. 1995, 239 - 240, 407 - 408.)

Dioksiini- ja furaanipäästöjä syntyy, jos polttoaineen sisältämät dioksiinit eivät hajoa poltossa, jos polttoaine sisältää orgaanisia klooriyhdisteitä ja polttolämpötila on 300 - 800 °C sekä jos polttoaine sisältää epäorgaanista klooria ja orgaanisia yhdisteitä ja polttolämpötila on 250 - 400 °C. Dioksiini- ja furaanipäästöjä voidaan rajoittaa riittävällä viipymäajalla, riittävän korkealla lämpötilalla (800 - 850 °C) sekä pyrkimällä mahdollisimman täydelliseen palamiseen. (Raiko et al. 1995, 409.)

Hiilidioksidi muodostuu seuraavan reaktioyhtälön kautta:



Kun poltetaan yksi kilogramma jotakin materiaalia, sen poltosta muodostuvat hiilidioksidipäästöt voidaan laskea yhtälöllä

$$m_{\text{CO}_2} = m_c \cdot \frac{n_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2}}{n_c \cdot M_c}, \quad (10)$$

missä  $m_c$  on materiaalin sisältämä hiilimäärä (g/kg)

$n$  on ainemäärä (mol)

$M$  on moolimassa (g/mol).

Rikkidioksidia muodostuu seuraavan reaktioyhtälön kautta:



Poltosta muodostuvat rikkidioksidipäästöt voidaan laskea kuten hiilidioksidipäästöt.

Typhen oksidien päästöjä ei voida arvioida suoraan polttoaineen typpipitoisuuden perusteella, koska polttoainetyphen reagoimista oksideiksi pyritään estämään erilaisilla polttoteknisillä ominaisuuksilla, kuten ilman syötön vaiheistuksella ja savukaasujen kierrätyksellä. Arinapolton  $\text{NO}_x$ -päästöistä ei ole tehty kattavia mittaustuloksia, mutta päästöjen voidaan olettaa olevan hieman korkeammat kuin leijupoltossa, koska arinapoltoissa on korkeampi yli-ilmamäärä ja vaiheistetun ilmansyötön toteuttaminen on arinapoltoilla vaikeampaa (Raiko et al. 1995, 408 - 409). Tämän vuoksi typhen oksidien päästöt arvioidaan luvussa 2 taulukossa 6 olevan puuperäisten polttoaineiden päästökertoimen avulla, joka on 100 - 140 mg/MJ. Tässä valitaan käytettäväksi 120 mg/MJ. REF III:n ja muovien typhen oksidien päästöjä ei tämän perusteella pystytä arvioimaan, joten niitä ei ole arvioitu ollenkaan.

Taulukossa 30 on esitetty erittely poltossa teoreettisesti syntyvistä kaasumaisista päästöistä. Viljan ja rypsin olki, puujäte sekä hakkuutähteet, harvennuspuut ja kannot ovat hiilineutraaleita polttoaineita, koska niiden kasvu sitoo saman määrän hiilidioksidia kuin niiden poltossa vapautuu, joten niille ei ole laskettu hiilidioksidipäästöjä. Myös paperi- ja kartonkijäte ovat hiilineutraaleja, koska paperi ja kartonki valmistetaan biomassasta. Osa REF III:sta voi myös olla biomassapohjaista, joten sen hiilidioksidipäästöjen laskennassa käytetään kierrätyspolttoaineiden CO<sub>2</sub>-päästökeroa, joka on 31,8 t/TJ. Myös muovien CO<sub>2</sub>-päästöt voidaan laskea Tilastokeskuksen antaman kansallisen päästökertoimen avulla, joka on muoville 74,1 t/TJ. (Tilastokeskus 2006.)

**Taulukko 30.** Poltossa teoreettisesti syntyvät kaasumaiset päästöt.

<b>Materiaali</b>	<b>CO<sub>2</sub>-päästöt [t/a]</b>	<b>NO<sub>x</sub>-päästöt [t/a]</b>	<b>SO<sub>2</sub>-päästöt [t/a]</b>
Viljan olki	-	13	10
Rypsin olki	-	2	2
REF III	360	-	1
Muovijäte	20	-	-
Paperi- ja kartonkijäte	-	< 1	< 1
Puujäte	-	< 1	< 1
Hakkuutähteet, harvennuspuut ja kannot	-	5	< 1
<b>Yhteensä</b>	<b>380</b>	<b>20</b>	<b>10</b>

Kaasumaisten päästöjen lisäksi polttoprosessissa syntyy tuhkaa. Tuhkaa muodostavat aineosat vaihtelevat suuresti koostumukseltaan ja määrältään eri polttoaineissa. Lisäksi polttotekniikka vaikuttaa tuhkaa muodostavien aineosien vapautumiseen polton yhteydessä. (Raiko et al. 1995, 211, 213.) Taulukossa 31 on esitetty polttolaitoksessa poltettavien materiaalien tuhkaipitoisuuksia sekä polttolaitoksella syntyvät tuhkamäärät. Suurin osa arinapoltossa syntyvästä tuhkasta poistuu pohjatuhkana ja vain pieni osa savukaasujen mukana. Savukaasujen mukana lentoon lähtevien tuhka- ja polttoainehiukkasten määrä riippuu hiukkasten koosta ja kaasun virtausnopeudesta polttoainekerroksen pinnassa. (Raiko et al. 1995, 403.)

**Taulukko 31.** Poltettavien materiaalien tuhkapitoisuudet (Alakangas 2000) ja polttoprosessissa syntyvän tuhkan määrä.

Materiaali	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa [%]	Poltossa syntyvä tuhka [t/a]	Osuus [%]
Viljan olki	5	330	67
Rypsin olki	2,6	20	5
REF III	9,5	50	13
Paperi- ja kartonkijäte	28,2	60	13
Puujäte	2,2	< 0,5	< 1
Muovijäte	2	< 0,5	< 1
Hakkuutähteet	1,33	30	7
<b>Yhteensä</b>		<b>490</b>	<b>100</b>

Jos 85 % tuhkasta poistuu pohjatuhkana, syntyy polttolaitoksella tuhkaa 420 t/a. Samalla tuhkasta aiheutuvat hiukkaspäästöt olisivat noin 70 t/a. Polttolaitosten ympäristöluvuissa määritellään yleensä raja-arvot laitoksen hiukkaspäästöille. Pienille alle 50 MW:n laitoksille ei Suomessa ole savukaasupäästöjen raja-arvoja, vaan päästörajat määritellään yleensä parhaan käytökelpoisen tekniikan mukaisesti. Suunnitteilla olevassa valtioneuvoston asetuksessa on tarkoituksena määritellä päästöraja-arvot pienille energiantuotantoyksiköille. Työryhmän ehdotuksessa polttoaineteholtaan 1 - 5 MW:n puuta ja muita kiinteitä biopolttoaineita polttavan laitoksen hiukkaspäästöjen tulisi olla alle 250 mg/m<sup>3</sup>n 6 % happipitoisuuteen redusoituna. (Salo-Asikainen 2007, 7.) Esimerkkilaitoksen sähköteho olisi 1 MW ja lämpöteho 4,5 MW, joten tätä voidaan pitää laitoksen raja-arvona.

Hiukkaspäästö normikuutiota kohden ilmaistuna voidaan laskea jakamalla yhdessä kilogrammassa oleva tuhkamäärä yhden kilon poltosta syntyvillä kuivien savukaasujen määrällä. Kuivien savukaasujen määrä voidaan määrittää standardin SFS 5624 avulla, joka on esitetty liitteessä 4 oljen polton osalta. Tällöin oljen polton hiukkaspäästöt olisivat

$$m_{\text{hiukkaset}} = \frac{0,05 \cdot 0,15 \cdot 1\,000 \text{ g/kg}_{\text{olki}}}{3,93 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{olki}}} = 1\,908 \text{ mg/m}^3\text{n}.$$

Poltettavista materiaaleista on viljan olkea 59 % ja hakkuutähteitä, kantoja ja harvennuspuuta 26 %, joiden poltosta syntyy hiukkasia 606 mg/m<sup>3</sup>n. Tämän perusteella laitoksen hiukkaspäästöt olisivat 1 280 mg/m<sup>3</sup>n. Hiukkaspäästöjä tulisi vähentää noin 80 %. Hiukkaskeräimien, esi-

merkiksi letkusuodattimen, syklonin tai sähkösuodattimen avulla kerätyt hiukkaset lisäävät laitoksella syntyvän tuhkan määrän 475 tonniin vuodessa.

Suurinta osaa biomassan poltossa syntyneestä tuhkasta voidaan käyttää kompostoinnin lisämateriaalina tai lannoitteena sekä kalkitusaineena metsissä ja maatalousmailla (Obernberger et al. 2002, 7 - 8). Muita hyötykäyttökohteita ovat maarakennus ja sementtiteollisuus. Tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksiin eri kohteissa vaikuttavat tuhkan fysikaalisten ominaisuuksien soveltuvuus kyseiseen hyötykäyttöön, lainsäädännön asettamat vaatimukset hyötykäytölle sekä tuhalla hyötykäyttökohteessa korvattavien materiaalien saatavuus ja hinta. (Marttila et al. 2008, 48.)

Tuhkat ovat jätelainsäädännön mukaisesti jätettä, joten tuhkien sijoittaminen maaperään edellyttää jätelupaa ja hyödyntäminen ympäristölupaa. Hyvälaatuisia, erikseen säädelyjä tuhkia voidaan kuitenkin käyttää maanrakennusmateriaalina ilmoitusmenettelyyn perustuen. Käytännössä tuhkien sijoituskelpoisuuden osoittaminen tapahtuu yleensä laitoskohtaisesti edustavista tuhkanäytteistä tutkittujen ympäristöominaisuuksien perusteella. Näitä ominaisuuksia ovat liukoisuusominaisuudet ja koostumusvaihtelut. (Vesanto et al. 2007, 48.) Lannoitusaineena käytettävien tuhkien osalta Evira on esittänyt myös lannoiteominaisuusvaatimukset, jotka ovat peltotuhkalle: fosfori + kalium  $\geq 2$  % ja kalsium  $\geq 8$  %, sekä metsätuhkalle: fosfori + kalium  $\geq 1$  % ja kalsium  $\geq 2$  % (Marttila et al. 2008, 52).

Tässä työssä polttolaitoksella syntyvän tuhkan koostumus joudutaan arvioimaan kirjallisuuden perusteella. Taulukosta 30 nähtiin, että suurin osa syntyvästä tuhkasta on peräisin viljan oljesta. Myös paperi- ja kartonkijätteen sekä REF III:n poltosta syntyy huomattavia määriä tuhkaa. Kierrätyspolttoaineiden polton vaikutuksista tuhkan koostumukseen ei ole saatavilla kattavia tietoja, joten tässä joudutaan hyötykäyttöä arvioimaan oljen tuhkan koostumuksen perusteella. Kierrätyspolttoaineista kierrätyspuun on kuitenkin havaittu nostavan tuhkan haitallisten aineiden pitoisuutta mm. kuparin, lyijyn, sinkin, arseenin ja kromin osalta. Sen sijaan paperi-, pahi- ja muovijätteestä valmistettujen kierrätyspolttoaineiden tuhkan koostumuksessa ei juuri ole havaittu eroa normaalin biomassan ja kuorikattilan tuhkiin. (Vesanto et al. 2007, 50.) Taulu-

kossa 32 on esitetty peltotuhkan ja metsätuhkan raja-arvot haitallisille aineille sekä oljen tuhkan vastaavat haitallisten aineiden pitoisuudet.

**Taulukko 32.** Peltotuhkan ja metsätuhkan raja-arvot (Marttila et al. 2008, 52) sekä oljen tuhkan haitallisten aineiden pitoisuudet (Alakangas 2000, 100).

	<b>Peltotuhkan raja-arvo [mg/kg<sub>dw</sub>]</b>	<b>Metsätuhkan raja-arvo [mg/kg<sub>dw</sub>]</b>	<b>Pitoisuus oljen tuhkassa [mg/kg<sub>dw</sub>]</b>
Arseeni	25	30	32
Elohopea	1	1	< 5
Kadmium	1,5	17,5	3
Kromi	300	300	58
Kupari	600	700	85
Lyijy	100	150	45
Nikkeli	100	150	45
Sinkki	1 500	4 500	125

Taulukosta 32 nähdään, että oljen tuhkan haitta-aineista arseeni, kadmium ja mahdollisesti elohopea ylittävät peltotuhkan raja-arvot. Metsätuhkan raja-arvot ylittyvät arseenin ja mahdollisesti elohopean kohdalla. Tämä tarkoittaa, että tuhkaa ei voi käyttää lannoitteena ellei muiden materiaalien polttaminen yhdessä oljen kanssa alenna arseenin, elohopean ja kadmiumin pitoisuuksia. Esimerkkialueella ei ole sementtiteollisuutta, joten ainoaksi vaihtoehdoksi jää tuhkan kaatopaikkasijoitus, jos alueella ei ole tarvetta käyttää tuhkaa hyödyksi maanrakennuksessa.

### 5.4.3 Päästötase

Taulukossa 33 on esitetty esimerkkialueen kaasumaisten päästöjen määrät nykytilanteessa sekä mahdolliset päästöjen määrät CHP-laitosten rakentamisen jälkeen. Rikkidioksidipäästöjä ei ole laskettu alkuperäiselle tilanteelle, joten niitä ei ole otettu mukaan taulukkoon 33 myöskään CHP-laitosten osalta. Laskennassa on oletettu, että CHP-laitoksilla tuotettava sähkö korvaa 76 % alkuperäisestä sähköstä ja loppu tulee edelleen Vattenfallilta. Lämmöstä CHP-laitokset tuottavat 92 %, joka korvaa kaukolämmön sekä öljy- ja sähkölämmityksen kokonaan ja puolet puulämmityksestä. Loppu lämpö tuotetaan edelleen puulla. Lisäksi on oletettu, että lannoituksen aiheuttamat dityppioksidipäästöt loppuvat, samoin lannan metaanipäästöt. Liikenteen, viljelymaan ja eläinten ruuansulatuksen päästöt pysyvät ennallaan. Päästötaseessa ei ole otettu

huomioon metsien biomassan sitomaa hiilidioksidia, vaikka metsät todennäköisesti kasvavat enemmän kuin sieltä hakataan puita. Metsien nettokasvun arviointi ei kuitenkaan ole riittävän luotettavaa, jotta se voitaisiin ottaa mukaan arvioihin.

**Taulukko 33.** Päästötase ennen ja jälkeen CHP-laitosten rakentamista.

	<b>Päästöt alkutilanteessa [t/a]</b>	<b>Päästöt CHP-laitosten rakentamisen jälkeen [t/a]</b>	<b>Muutos [t/a]</b>	<b>Muutos [%]</b>
Hiilidioksidi	19 400	17 900	- 1 500	- 8
Metaani	90	50	- 40	- 44
Dityppioksidi	20	10	- 10	- 50
Typen oksidit	80	80	± 0	± 0
<b>CO<sub>2</sub>-ekvivalentit</b>	<b>28 000</b>	<b>22 000</b>	<b>- 6 000</b>	<b>- 21</b>

Taulukosta 33 nähdään, että esimerkkialueen hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää 8 % ja kaikkia kasvihuonekaasupäästöjä hiilidioksidiekvivalentteina voitaisiin vähentää 21 % CHP-laitosten avulla. Typen oksidien päästöt puolestaan pysyisivät samana, koska biomassan poltosta syntyy yleensä paljon typen oksideja. Päästöt ovat kuitenkin teoreettisia määriä ja niitä voidaan vähentää erilaisilla päästöjä vähennystekniikoilla.

## 5.5 Tulosten tarkastelu

Biokaasulaitoksen avulla saataisiin tuotettua noin 23 % alueen tarvitsemasta sähköstä ja 8 % lämmöstä. Polttolaitoksella puolestaan saataisiin tuotettua noin 52 % alueen tarvitsemasta sähköstä ja 82 % lämmöstä. Yhteensä molempien CHP-laitosten avulla saataisiin tuotettua 75 % alueen tarvitsemasta sähköstä ja 90 % lämmöstä. Sähkön tarpeen arvioinnissa ei ole mukana lämmitykseen käytettävää sähköä, koska oletetaan, että CHP-laitosten rakentamisen jälkeen alueella ei enää käytettäisi sähkölämmitystä.

Laskelmissa on kuitenkin oletettu, että laitokset toimisivat koko ajan täydellä teholla, vaikka todellisuudessa lämmön kulutus vaihtelee talvi- ja kesäkuukausina siten, että kesällä lämmön kulutus on noin kolmasosa talven huippukulutuksista. Tämä tarkoittaa, että esimerkkialueella lämmön kulutus on suurimmillaan noin 5 700 MWh/kk ja pienimmillään noin 1 900 MWh/kk.

Biokaasulaitoksella saadaan tuotettua lämpöä noin 290 MWh/kk, jolloin biokaasulaitos voisi olla toiminnassa koko ajan. Tämä olisi kannattavaa myös sen vuoksi, että mädätettäviä materiaaleja syntyy melko tasaisesti ympäri vuoden ja mädätettäviä materiaaleja on vaikeampi varastoida pitkiä aikoja kuin polttokelpoisia materiaaleja, koska metaanintuottopotentiali voi pienentyä varastoinnin seurauksena. Polttolaitoksen hyötysuhde on hyvä myös vajaalla teholla, joten sen avulla voitaisiin säätää energiantuotantoa.

Laskelmissa ei myöskään ole huomioitu oljen ja hakkuutähteiden korjuun kannattavuutta maaperän ravinnetasapainon kannalta. Oljen jättämistä maahan suositellaan, koska lierot saavat oljista ravintoa ja lahotessaan oljet muodostavat humusta, joka parantaa viljelymaan ominaisuuksia. Jos oljet kerätään pelloilta ja käytetään energiantuotannon raaka-aineena, tulisi huolehtia, että pelloille jää riittävästi orgaanista ainesta maan hiilipitoisuuden ja tuottavuuden ylläpitoon sekä eroosion estämiseen. Tosin tutkimuksissa ei ole pystytty todistamaan maan humuksen muutosta olkien poiston seurauksena kymmenen vuoden jaksolla. (Tuomisto 2005, 18.) Suuren olkimäärän polttaminen voi myös olla ongelmallista oljen suuren tuhkapitoisuuden vuoksi. Lisäksi eri viljalajien tuhkan sulamislämpötilat vaihtelevat huomattavasti, jonka vuoksi arinan pitäisi toimia sekä sulamattomalla että sulalla tuhalla. Toisena ongelmana ovat savukaasuissa olevat kloori ja alkali, jotka muodostavat natrium- ja kaliumkloridia, jotka puolestaan aiheuttavat korroosiota. Jos olkea poltetaan suuria määriä, kannattaisi käyttää oljen polttoon suunniteltua kattilaa. (Alakangas 2000, 98.)

Puuston häiriötön kasvu edellyttää, että tarpeellisia ravinteita on jatkuvasti saatavilla sopivina pitoisuuksina ja määrinä. Kasvuvaiheessa olevan metsän ravinnekierto on hyvin suljettu, koska huuhtoutuminen vesistöihin ja haihtuminen ilmaan on hyvin vähäistä. Ravinteita menetetäänkin yleensä metsäpalon, puunkorjuun ja uudistamisen sekä ojituksen yhteydessä. Hakkuutähteiden korjuu voi vaikuttaa erityisesti typen ja fosforin määriin, koska niitä on paljon neulasissa ja oksissa. Hakkuutähteiden korjuu voi vaikuttaa myös maaperän mikrobien hajotustoimintaan, joka puolestaan voi vaikuttaa kasvupaikan ravinnemääriin. Hakkuutähteiden korjuun pitkänajan vaikutuksista maan typen ja hiilen kierron mikrobiprosesseihin on olemassa vain vähän tutkittua tietoa. Ruotsissa on kuitenkin havaittu maan hiili-typisuhteen kasvaneen (eli



typen määrä on vähentynyt suhteessa hiilen määrään) hakkuutähteiden korjuun seurauksena 15 vuotta toimenpiteen jälkeen. (Kuusinen & Ilvesniemi 2008, 20 - 22.)

Liitteissä 2 ja 3 on esitetty yhteenvedot laitosten herkkyystarkastelujen tuloksista. Liitteestä 2 voidaan nähdä, että mädätettävän materiaalin lisäyksellä (tarkasteltu lannan lisäystä ja kasvi-biomassan lisäystä) voidaan saavuttaa suurimmat energialisät, mutta näissä tapauksissa myös lisättävien materiaalien määrät ovat suuret. Materiaalien lisäys voi vaikuttaa myös metaanintuottopotentiaaleihin, jota tarkastelussa ei huomioitu. Tuotetut sähkö- ja lämpömäärät olivat pienimmillään, kun metaanintuottopotentiaalit vastasivat kirjallisuudessa esitettyjä minimiarvoja. Liitteestä 3 voidaan nähdä, että oljen määrällä on suurin vaikutus poltosta saatavaan energiaan, koska perustilanteessa suurin osa poltetusta materiaalista on olkea. Ruokohelven viljelyn ja polton avulla saataisiin tuotettua suurin mahdollinen määrä lämpöä ORC-prosessilla. Suurin sähkömäärä puolestaan saataisiin ORC-prosessin sähköhyötysuhdetta nostamalla.

## 5.6 Epävarmuustekijät

Laskennan lähtötiedot perustuvat osittain esimerkkialueen eli Humppilan kunnan todellisiin tietoihin, mutta osa lähtötiedoista on täytyntä arvioida Suomen keskimääräisten tietojen perusteella. Esimerkiksi alueella kuluviesta lämpöenergian määristä ei ole olemassa tietoa, joten tämän laskemisessa täytyi turvautua karkeaan arvioon, joka perustui erityyppisten maatilojen käyttämiin lämpöenergian määriin ja asuinrakennusten lämmitykseen kuluvaan lämpöön. Myös yhdyskuntajätteen määrän arvioinnissa käytettiin Suomen keskimääräisiä arvoja.

Biokaasulaitoksen ja polttokennojen avulla tuotettavan energiamäärän laskennan tuloksiin vaikuttavia epävarmuustekijöitä ovat esimerkiksi metaanintuottopotentiaalit ja biokaasulaitoksen toimintaan kuluvan energian määrä. Metaanintuottopotentiaalien osalta laskennassa käytettiin keskimääräisiä arvoja, koska tarkkaa tietoa eri materiaalien sekoittamisen vaikutuksesta metaanintuottoon ei ollut saatavilla. Metaanintuottopotentiaalitin tiedetään olevan suurimmillaan, kun mädätykseen menevistä materiaaleista 30 % on kasvimateriaalia ja 70 % lantaa. Tässä työssä kasvimateriaalin määrä nousi yli 50 %:iin, joka voi huonontaa metaanisaantoja. Mädätykseen menevän oljen määrä ei myöskään ole kovin realistinen, koska oljen määrä on huo-

mattavasti suurempi kuin lannan määrä ja olkea oletettiin menevän mädätykseen vain lannan mukana kuivikekäytön seurauksena. Esimerkiksi sikatiloista keskimäärin yli 90 % tuottaa lietelantaa, jolloin olkia ei käytetä lainkaan kuivikkeena (Kapuinen 2009).

Biokaasulaitoksen toimintaan kuluvista energiamääristä on saatavilla hyvin erilaisia tietoja, jotka vaihtelevat kymmenestä prosentista lähes sataan prosenttiin. Tässä työssä käytettiin Jyväskylän yliopiston Pro gradu-työssä (Luostarinen 2007) tehdyn tutkimuksen tuloksia erikoisten biokaasulaitosten energiankulutuksesta, jonka mukaan biokaasulaitos kuluttaa lämpöä 9,1 % ja sähköä 2,6 % tuotetusta energiasta. Näitä arvoja voidaan kuitenkin pitää hyvin optimistisina arvioina.

Epävarmuutta laskennan tuloksiin aiheuttavat myös CHP-laitoksille valitut hyötysuhteet, sillä kirjallisuudessa esitetyt vaihteluvälit eri teknologioille olivat melko suuret. Lisäksi herkkyys-tarkasteluissa havaittiin, että CHP-laitoksen hyötysuhteilla on selvä vaikutus tuotettuihin sähkö- ja lämpöenergian määriin. Hyötysuhteen merkitys korostuu sitä enemmän mitä suuremista energiamääristä on kyse. Biokaasulaitoksella tuotetut energiamäärät olivat sen verran pieniä, että hyötysuhteen valinnan vaikutus ei ollut kovin suuri, mutta polttolaitoksella vaikutus oli jo huomattavasti suurempi.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 6.1 Energiaomavaraisuus

Esimerkkialueelle suunnitelluilla kahdella CHP-laitoksella, jotka olivat anaerobisen mädätyksen ja polttokennojen yhdistelmä sekä termisen käsittelyn ja ORC-prosessin yhdistelmä, saataisiin katettua alueen sähkön tarpeesta 75 % ja lämmön tarpeesta 90 %. Näissä laskelmissa ei kuitenkaan ole huomioitu lämmön tarpeen jakautumista kesä- ja talvikuukausien kesken, joten molemmat laitokset eivät voisi toimia koko ajan täydellä teholla. Myös lämmön jakelu käyttäjille ei välttämättä onnistu kahden keskitetyn laitoksen mallissa, koska lämmön siirto ei ole yhtä helppoa kuin sähkön siirto, joka voidaan toteuttaa sähköverkon kautta. Esimerkkialueella on olemassa kaukolämpöverkko, joka kattaa vain pienen osan alueesta. Esimerkiksi edes koko tajaama-alue ei kuulu kaukolämmön piiriin. Tämä tarkoittaa sitä, että lämmön siirtäminen loppukäyttäjille ei onnistu ilman verkon laajentamista.

ORC-prosessin lämmön tuotannon hyötysuhde on huomattavasti suurempi kuin sähkön tuotannon hyötysuhde, jonka vuoksi olisi aiheellista pohtia kannattaako ORC-prosessia käyttää polttolaitoksen yhteydessä, kun lämmön hyötykäyttö ei tällä hetkellä onnistu esimerkkialueella. Toinen lupaava uusi teknologia olisi Stirling-moottori, jonka sähkön tuotannon hyötysuhde on luvun kolme taulukon 11 mukaan 15 - 35 %. Stirling-moottorin käytön ongelmana olisi kuitenkin sen kapasiteetti, koska se soveltuu ainoastaan hyvin pienille laitoksille (sähkötehoon 10 - 150 kW).

Esimerkkialueella on tällä hetkellä viljelemätöntä peltoaluetta ja kesantoa yhteensä 270 hehtaaria. Tällä alalla olisi mahdollista kasvattaa energiakasveja, esimerkiksi ruokohelpeä, jonka poltosta saatava energiamäärä olisi noin 6 450 MWh/a. Tästä energiamäärästä saataisiin ORC-prosessin avulla tuotettua sähköä 970 MWh/a ja lämpöä 4 840 MWh/a. Toisena vaihtoehtona tarkasteltiin biokaasun tuottamista viljelemättömällä peltoalueella kasvavasta timotei-apilaurmesta, josta saataisiin energiaa 7 530 MWh/a. Tällöin saataisiin tuotettua sähköä polttokennojen avulla 2 880 MWh/a ja lämpöä 3 470 MWh/a. Nurmesta saatava energiamäärä mä-

dätyksellä on suurempi kuin ruokohelven polton. Näin suuren kasvibiomassan lisääminen mädätykseen saattaa kuitenkin alentaa metaanintuottopotentiaalia, jonka vuoksi nurmesta saatava energiamäärä ei välttämättä ole niin suuri kuin laskelmien perusteella arvioitiin. Kun perustilanteen lisäksi alueella viljeltäisiin ruokohelpeä 270 hehtaarin alalla ja poltettaisiin tämä, saataisiin alueen sähkön tarpeesta katettua 81 % ja lämmön tarpeesta 100 %.

Nestemäiset biopolttoaineet oli rajattu työn ulkopuolelle, mutta biokaasulaitoksella syntyvää metaania voitaisiin käyttää myös ajoneuvojen ja työkoneiden polttoaineena sähkön ja lämmön tuotannon sijaan, koska biokaasun tuotanto on todettu yhdeksi puhtaimmista ja energiatehokkaimmista tavoista tuottaa liikenteen biopolttoaineita. Biokaasun ajoneuvokäyttö edellyttää kosteuden, hiilidioksidin ja epäpuhtauksien poistamista sekä kaasun kompressointia. (Lehtomäki et al. 2007, 41.) Luvussa neljä on sanottu esimerkkialueen polttoaineiden kulutuksen olevan noin 4 560 t/a. Jos oletetaan tämän olevan kevyttä polttoöljyä, jonka tiheys on 0,84 kg/l, kuluisi alueella polttoainetta noin 5,4 miljoonaa litraa vuodessa. Kuutio metaania vastaa energiasisällöltään noin yhtä litraa kevyttä polttoöljyä (Lehtomäki et al. 2007, 39). Esimerkkialueelle suunnitellulla biokaasulaitoksella saataisiin tuotettua metaania perustapauksessa hieman alle miljoona kuutiota vuodessa. Suurimmillaankin metaanin tuotanto olisi noin 1,7 miljoonaa kuutiota vuodessa, jos viljelemättömien peltojen nurmi lisättäisiin mädätykseen. Tämä tarkoittaa, että biokaasulaitoksen avulla saataisiin katettua vain pieni osa alueen polttoaineen tarpeesta, vaikka laitoksella ei tuotettaisi yhtään sähköä ja lämpöä.

## **6.2 Materiaalikiertojen sulkeminen**

Esimerkkialueen materiaalikiertojen sulkeminen voitaisiin toteuttaa osittain käyttämällä kaikki alueella syntyvä polttokelpoinen jäte energiantuotannossa. Polttokelpoisen jätteen lisäksi alueella syntyy myös lasi- ja metallijätettä sekä sähkö- ja elektroniikkaromua, joita alueella ei pystytä hyödyntämään. Polttolaitoksella syntyy energiantuotannon sivutuotteena tuhkaa, joka voitaisiin tietyin edellytyksin hyödyntää esimerkiksi lannoitteena, kalkitusaineena, maanrakennuksessa tai sementtiteollisuudessa. Luvussa 5 tehdyssä tarkastelussa kuitenkin todettiin, että tuhkan haitallisten aineiden pitoisuudet todennäköisesti ylittäisivät lannoitekäytön raja-

arvot. Tämä tarkoittaa, että tuhkalle tulisi löytää vaihtoehtoisia käyttökohteita, esimerkiksi maanrakennuksesta, ettei sitä tarvitsisi sijoittaa kaatopaikalle.

Maataloudesta syntyvät sivuainevirrat, kuten eläinten lanta ja osa viljan oljesta, voitaisiin käyttää biokaasulaitoksella energian tuotantoon. Mädätyksen lopputuotteena syntyvää reaktorijäännöstä voitaisiin puolestaan käyttää peltojen lannoitukseen, jolloin ei tarvitsisi enää käyttää kemiallisia lannoitteita. Alueelle tarvitsisi kuitenkin edelleen tuoda torjunta-aineita, erilaisia kulutustavaroita, polttoainetta ja mahdollisesti ruokaa ja eläinten rehua, joiden osalta oma-varaisuutta ei tässä työssä tarkasteltu. Viljelyssä tarvittavat siemenet olisi mahdollista saada omasta pellostä, esimerkiksi omista viljan jyivistä voidaan kasvattaa uutta viljaa.

Biokaasulaitosta voidaan pitää täysin päästöttömänä, jos sen varastosäiliöt ja reaktori ovat ka-tettuja. Myös polttokennojen päästöt ovat erittäin alhaiset ja savukaasut sisältävät lähinnä vain vesihöyryä ja hiilidioksidia. Biokaasun tuotanto vähentää kasvihuonekaasuja sekä korvaamalla fossiilisia polttoaineita että vähentämällä lannan käsittelyn aikaisia metaanipäästöjä. Myös ve-sistöjen ravinnekuorimitukset voivat vähentyä. Polttolaitoksen kaasumaisten päästöjen määrät riippuvat polttotekniikasta, poltettavien materiaalien alkuainekoostumuksesta sekä mahdolli-sista päästöjen vähennystekniikoista. Arinapolton aiheuttamia kaasumaisia päästöjä ovat mm. hiilidioksidi, rikkidioksidi ja typen oksidit.

Esimerkkialueen kasvihuonekaasupäästöt eli hiilidioksidi-, metaani- ja dityppioksidipäästöt vähenisivät työssä esitettyjen CHP-laitoskonseptien rakentamisen jälkeen 21 % eli noin 6 000 hiilidioksidiekvivalenttitonnia vuodessa. Typen oksidien päästöt pysyisivät ennallaan, koska arinapoltoista aiheutuu leijupolttua enemmän typen oksidien päästöjä ja biomassan poltosta syntyy yleensä typen oksideja.

### **6.3 Jatkotutkimustarpeet**

Työn ulkopuolelle rajattiin monta tärkeää asiaa, joiden selvittäminen olisi tarpeellista alueen energiaomavaraisuuden ja materiaalikiertojen sulkemisen kannalta. Esimerkiksi liikenne aihe-uttaa 18 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Tilastokeskus 2008c), jonka vuoksi jatkossa

olisi hyvä tarkastella nestemäisten biopolttoaineiden tuotantomahdollisuuksia esimerkkialueella ja sen vaikutusta tuotettavissa olevan sähkön ja lämmön määrään. Aikaisemmin todettiin, että biokaasulaitokselta saatavalla metaanilla ei pystytä kattamaan alueen polttoaineiden kulu- tusta, jonka vuoksi tulisi tarkastella vaihtoehtoisia tapoja korvata fossiiliset liikennepolttoai- neet. Näitä ovat esimerkiksi bioetanolin tuotanto oljesta tai ruokohelvestä, sekä biomassasta kaasuttamalla saatavasta synteetikaasusta valmistetut synteettiset polttoaineet.

Toinen tärkeä tutkimuskohde olisi laitosten rakentamisen ja käytön taloudellisen kannattavuuden selvittäminen. Kannattavuuden tarkastelu jätettiin tämän työn ulkopuolelle, koska tiedet- tiin, että työssä kuvatut laitoskonseptit eivät tällä hetkellä ole taloudellisesti kovin kannattavia, koska etenkin polttokennojen hinta on vielä korkea. Esimerkkilaitoksia haluttiin kuitenkin tar- kastella tulevaisuuden lupaavina vaihtoehtoina, koska esimerkiksi polttokennojen kehitystyö on hyvin kiivasta ja tulevaisuudessa niiden hinnan voidaan olettaa hieman laskevan kehitys- työn myötä.

Kannattavuuden lisäksi bioenergian tuotannon eri kestävyysnäkökulmia olisi hyvä selvittää tarkemmin. Puun ja hakkuutähteiden sekä peltokasvien energiakäytön kestävyuden arvioinnis- sa olisi hyvä tarkastella esimerkiksi vaikutuksia monimuotoisuuteen, maan ravinne- ja or- gaanisen aineksen taseita, korjuun energiankulutusta ja päästöjä sekä vesistöjen ravinnekuo- ritusta. Lisäksi peltokasvien energiakäytön kestävyudessa tulisi ottaa huomioon kilpailu pel- toalasta ruuantuotannon ja energiakasvien välillä.

Materiaalikiertojen sulkemisen osalta työssä tarkasteltiin pääasiassa energiahyötykäyttöön meneviä materiaaleja sekä päästöjä. Näiden lisäksi olisi hyvä tarkastella myös alueen omava- raisuutta ihmisten ja eläinten kuluttaman ruuan suhteen. Tämä tarkoittaa sitä, että tulisi verrata esimerkkialueella syntyviä ravintomääriä alueen ihmisten ja eläinten tarvitsemiin ravintomää- riin. Jos alueella olisi ylituotantoa ruuasta, voitaisiin peltoalasta suurempaa osaa käyttää ener- giakasvien viljelyyn.

## 7 YHTEENVETO

Tämä diplomityö toteutettiin osana MTT:n Matalan hiilen maaseututaajama -hanketta, jonka tarkoituksena on tehdä selvitys kestävästä agroekologisen toimintamallin edellytyksistä matalan hiilen maaseututaajamassa, jossa pyrkimyksenä on korvata fossiilisen energian käyttöä alueellisesti tuotetulla bioenergialla ja aikaansaada mahdollisimman suljettuja materiaalikiertoja. Työssä tarkasteltiin esimerkkialueen mahdollisuutta energiaomavaraisuuteen käyttämällä energiantuotannossa omia paikallisia biomassavaroja sekä alueella syntyviä jätteitä.

Energian tuotantomuotoina olivat kaksi rinnakkaista pienen mittakaavan CHP-laitosta, jotka olivat anaerobisen mädätyksen ja polttonennojen yhdistelmä sekä termisen käsittelyn ja ORC-prosessin yhdistelmä. Tässä työssä pienen mittakaavan laitoksella tarkoitettiin sähköteholtaan alle 1 MW:n laitosta. Laitosten osalta selvitettiin niiden avulla potentiaalisesti tuotettavissa olevat sähkö- ja lämpöenergian määrät sekä niiden toiminnasta aiheutuvat päästöt. Päästöjä verrattiin myös alueen päästöihin ilman laitosten rakentamista. Lisäksi työssä pyrittiin arvioimaan esimerkkialueen materiaalikiertojen sulkemista.

Esimerkkialueen pohjana oli Humppilan kunta, jonka asukasluku vuoden 2007 lopussa oli 2 566 henkilöä. Esimerkkialue on pieni maaseutuyhteiskunta, jossa ei ole merkittävää teollisuutta. Koska kaikkia tarvittavia lähtötietoja ei ollut Humppilan kunnasta saatavilla, jouduttiin näiden osalta käyttämään Suomen keskimääräisiä arvoja. Esimerkkialueen sähkön kulutukseksi arvioitiin Vattenfallin antamien tietojen perusteella 14 500 MWh/a. Tässä ei ole mukana lämmitykseen kuluva sähkö, koska työssä oletettiin, että lämpö tuotettaisiin CHP-laitosten avulla, jolloin sähkölämmitystä ei enää käytettäisi. Lämmön kulutuksen arvioinnissa käytettiin Humppilan Kaukolämpö Oy:n antamia tietoja sekä keskimääräisiä tietoja eri eläintilojen ja asuinrakennusten lämmönkulutuksesta, jolloin esimerkkialueen lämmönkulutukseksi saatiin 45 700 MWh/a.

Koska alueelle suunniteltiin kahta rinnakkaista CHP-laitosta, täytyi energiantuotannossa hyödynnettävien materiaalien osalta tehdä päätös, kummalla laitoksella ne hyödynnetään. Mädä-

tettäviksi materiaaleiksi valittiin kotieläinten lanta, biojäte, jätevedenpuhdistamon liete, haja-asutusalueen sako- ja umpikaivolietteet sekä 20 % viljan oljesta, koska tämän verran olkea oletettiin käytettävän eläinten kuivikkeena ja menevän lannan mukana mädätykseen. Polttokennoksi valittiin kiinteäoksidipolttokenno, koska se ei ole kovin herkkä epäpuhtauksille. Polttokennon sähkön tuotannon hyötysuhteena käytettiin 38,2 % ja lämmön tuotannon hyötysuhteena 46 %. Tällöin polttokennojen avulla saataisiin tuotettua sähköä 3 310 MWh/a ja lämpöä 3 430 MWh/a. Näillä määrillä voitaisiin kattaa alueen sähkön kulutuksesta 23 % ja lämmön kulutuksesta 8 %.

Poltettavia materiaaleja olivat alueella syntyvät seka-, paperi-, kartonki-, puu- ja muovijätteet, hakkuutähteet, kannot ja harvennuspuut, rypsin olki sekä 80 % viljan oljesta. ORC-prosessin sähkön tuotannon hyötysuhteena käytettiin 15 % ja lämmön tuotannon hyötysuhteena 75 %, jolloin ORC-prosessilla saataisiin tuotettua sähköä 7 520 MWh/a ja lämpöä 37 600 MWh/a. Näillä määrillä voitaisiin kattaa alueen sähkön kulutuksesta 52 % ja lämmön kulutuksesta 82 %. Yhteensä näillä kahdella esimerkkilaitoksella voitaisiin kattaa alueen sähkönkulutuksesta 75 % ja lämmönkulutuksesta 90 %. Laskelmissa on oletettu, että molemmat laitokset toimisivat koko ajan täydellä teholla, vaikka todellisuudessa tämä ei ole mahdollista, koska kesäkuukausina lämmönkulutus on noin kolmasosan talvikuukausien kulutuksesta. Työssä todettiin, että biokaasulaitoksen kannattaisi toimia koko ajan täydellä teholla, koska mädätettävien materiaalien varastointi on vaikeampaa. Polttolaitoksen avulla voitaisiin säätää energiantuotantoa, koska ORC-prosessin todettiin toimivan hyvin myös vajaalla kuormalla. Lämmön siirtämisessä käyttökohteisiin todettiin myös olevan ongelmia, koska alueella oleva kaukolämpöverkko kattaa vain pienen osan alueesta.

Alueen kasvihuonekaasupäästöjen arvioitiin vähenevän 21 % eli noin 6 000 hiilidioksidiekvivalenttonnia vuodessa valittujen CHP-laitosten avulla. Biokaasu-polttokenno -yhdistelmän arvioitiin olevan täysin päästötön ja lisäksi sen avulla voitaisiin välttää lannan varastoinnin metaanipäästöt ja kemiallisten lannoitteiden käytöstä aiheutuvat dityppioksidipäästöt, koska reaktorijäännöstä voidaan käyttää peltojen lannoitteena. Polttolaitos-ORC-prosessi -yhdistelmästä syntyy päästöjä ainoastaan poltosta, jotka arvioitiin teoreettisesti poltettavien materiaalien alkuainekoostumuksen ja päästökertoimien perusteella.



Materiaalikiertojen sulkemisen osalta työssä tarkasteltiin vain jätteiden ja maatalouden sivutuotteiden energiahyötykäyttöä. Lisäksi tarkasteltiin energian tuotannon lopputuotteina syntyvien reaktorijäännöksen ja tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksia. Näiden osalta todettiin, että biokaasulaitoksen reaktorijäännös voidaan käyttää kokonaisuudessaan alueen peltojen lannoitukseen. Samalla voitaisiin lopettaa kemiallisten lannoitteiden käyttö. Tuhkan osalta todettiin haitallisten aineiden pitoisuuksien todennäköisesti ylittävän lannoitekäytön raja-arvot. Tuhkalta tulisi siis keksiä muita hyötykäyttökohteita, esimerkiksi maanrakentaminen, muuten tuhka joudutaan loppusijoittamaan kaatopaikalle. Materiaalikiertojen sulkemisen osalta tarvitaan vielä paljon jatkotarkasteluja, esimerkiksi ihmisten ja eläinten ravinnon sekä autojen ja työkoneiden polttoaineiden osalta.

## LÄHTEET

- Aho, I., Gynther, L., Rautanen, J. & Vikström, K. 2006. Maatilojen energiaohjelman valmistelu. Loppuraportti. [verkkojulkaisu]. Motiva 17.1.2006. [viitattu 11.11.2008]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/midcom-serveattachmentguid-810676a063b50d6c4d0933674174245d/meno-loppuraportti-17\\_1\\_2006.pdf](http://www.motiva.fi/midcom-serveattachmentguid-810676a063b50d6c4d0933674174245d/meno-loppuraportti-17_1_2006.pdf)
- AKE. 2008. Ajoneuvokanta 30.9.2008 - Kanta-Häme. [verkkodokumentti]. Ajoneuvohallintokeskus. [viitattu 9.12.2008]. Saatavissa: <http://www.ake.fi/AKE/Tilastot/Ajoneuvokanta/Ajoneuvokanta+2008/Ajoneuvokanta+Kanta-H%C3%A4me.htm>
- AKE. 2001. Henkilöautojen CO<sub>2</sub>-päästöt vähentyneet. [verkkodokumentti]. Ajoneuvohallintokeskus 29.5.2001. [viitattu 10.2.2009]. Saatavissa: <http://www.ake.fi/Ake/index.aspx?ID=214>
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. Otamedia Oy, Espoo 2000. ISBN 951-38-5699-2. 172 s.
- Alakangas, E. & Flyktman, M. 2001. Biomass CHP technologies. Future Cogen. VTT Energy Reports 7/2001. Jyväskylä, March 2001. ISSN 1457-3350. 54 s.
- Altieri, M. A. 2000. Agroecology: principles and strategies for designing sustainable farming systems. [verkkodokumentti]. University of California, Berkeley. 30.7.2000. [viitattu 6.10.2008]. Saatavissa: [http://www.cnr.berkeley.edu/~agroeco3/principles\\_and\\_strategies.html](http://www.cnr.berkeley.edu/~agroeco3/principles_and_strategies.html)
- Austrian Energy Agency. 2005. AMONCO: Biogas Fuel Cells. [verkkodokumentti]. Päivitetty 15.3.2005. [viitattu 12.12.2008]. Saatavissa: [http://www.energyagency.at/projekte/biogas\\_fuel\\_cell.htm#eva-publ](http://www.energyagency.at/projekte/biogas_fuel_cell.htm#eva-publ)
- Bioste Oy. 2006. Nestemäisten biopolttoaineiden tuottamisen teknisten ja taloudellisten mahdollisuuksien selvitys. Toteutettavuus ja kannattavuusselvitys. Loppuraportti 24.11.2006. Pro Agria Pohjois-Karjala. 61 s.
- Chavalparit, O. 2006. Clean Technology for the Crude Palm Oil Industry in Thailand. PhD Thesis Wageningen University. ISBN 90-8504-446-4. 186 s.
- Elintarviketeollisuusliitto ry. 2006. Elintarviketeollisuuden ympäristövastuun raportti 2005. [verkkojulkaisu]. Helsinki, marraskuu 2006. [viitattu 18.11.2008]. Saatavissa: [http://www.etl.fi/julkaisu/PDF/ETL\\_ympvastuuraportti\\_FINAL\\_070316.pdf](http://www.etl.fi/julkaisu/PDF/ETL_ympvastuuraportti_FINAL_070316.pdf)
- Gynther, L., Elväs, S. & Suomi, U. 2005. Katsaus energian ominaiskulutuksiin ja niitä selittäviin tekijöihin. [verkkojulkaisu]. Motiva Oy, Helsinki, marraskuu 2005. [viitattu 14.11.2008]. Saatavissa:

- <http://www.motiva.fi/attachment/f16d4d543f99d7a59f54560a69063a0e/e3419b2b1cea89f622d2862330a56f68/Katsaus+energian+ominaiskulutuksiin.pdf>
- Hagström, M., Vartiainen, E. & Vanhanen, J. 2005. Biokaasun maatilatuotannon kannattavuusselvitys. Loppuraportti. Gaia. [verkkojulkaisu]. Helsinki 31.8.2005. [viitattu 7.10.2008]. Saatavissa:  
[http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmuistiit/2006/siirto/trm2006\\_1\\_Biokaasun%20maatilatuotannon%20kannattavuusselvitys\\_julkinen.pdf](http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmuistiit/2006/siirto/trm2006_1_Biokaasun%20maatilatuotannon%20kannattavuusselvitys_julkinen.pdf)
- Hanski, S. & Karttunen, A. 2007. Biopolttoainelosteet - Biokaasu. [verkkodokumentti]. Päivitetty 24.7.2007. [viitattu 21.10.2008]. Saatavissa: [www.samiedu.fi/file.php?type=download&id=518](http://www.samiedu.fi/file.php?type=download&id=518)
- Heinimö, J. 2008. IEA BIOENERGY TASK 40. ”Sustainable International Bioenergy Trade: Securing supply and demand”. Country report of Finland 2008. Research report EN A-57. ISBN 978-952-214-613-7. 32 s.
- Helsinki University of Technology. 2002. Polttokennojen toiminta. [verkkodokumentti]. Päivitetty 13.6.2002. [viitattu 22.12.2008]. Saatavissa: [http://www.tkk.fi/Units/AES/projects/renew/fuelcell/vetytulevaisuus/polttokennojen\\_toiminta.html](http://www.tkk.fi/Units/AES/projects/renew/fuelcell/vetytulevaisuus/polttokennojen_toiminta.html)
- Helynen, S., Flyktman, M., Mäkinen, T., Sipilä, K. & Vesterinen, P. 2002. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasujen vähentämisessä. VTT tiedotteita 2145. [verkkojulkaisu]. Edita Prima Oy, Helsinki 2002. [viitattu 13.10.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2145.pdf>
- Hepola, J. & Kurkela, E. 2002. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa. VTT tiedotteita 2155. [verkkojulkaisu]. Otamedia Oy, Espoo 2002. [viitattu 20.10.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2155.pdf>
- Hintikka, J. 2004. Biomassapohjaiset mikro-CHP-tekniikat. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja (BDC Publications) Nro 8. 19 s.
- Humppilan kunta. 2008. [viitattu 30.10.2008]. Saatavissa: <http://www.humppila.fi>
- Hämeen ympäristökeskus. 2003. Ympäristölupapäätös. Dnro0300Y0029-121. [verkkodokumentti]. Annettu julkipanon jälkeen 10.12.2003. [viitattu 24.11.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=11805&lan=fi>
- Ilmasto.org. 2008. Kaikki ilmastonmuutoksesta. [viitattu 30.9.2008]. Saatavissa: <http://www.ilmasto.org/>
- Järvenpää, M. 2008a. Lannan ja biohajoavien jätteiden käytön nykytilasta. Mahdollisuudet lannan käytön kehittämiseksi. [verkkodokumentti]. Päivitetty 12.11.2008. [viitattu 21.1.2009]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=94781&lan=fi>

- Keskitalo, P. & Kettunen, R. 2007. Jätevesilietteiden kierrätyksen strategiasta. [verkkodokumentti]. *Vesitalous* 1/2007. [viitattu 21.1.2009]. Saatavissa: <http://www.mvtt.fi/Vesitalous/arkisto/2007/012007/keskpert.pdf>
- Kirjavainen, M., Sipilä, K., Alakangas, E., Savola, T. & Salomón, M. 2004. Small-scale biomass CHP technologies. Situation in Finland, Denmark and Sweden. OPET Report 12. [verkkojulkaisu]. Espoo, April 2004. [viitattu 15.10.2008]. Saatavissa: <http://www.opet-chp.net>
- Klass, D. L. 1998. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and chemicals. ACADEMIC PRESS, USA 1998. ISBN 0-12-410950-0. 651 s.
- Koski, A. 2008. Maankäytön kasvihuonevaikutukset Seinäjoella. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Luonnonvarainstituutti. [verkkojulkaisu]. Toukokuu 2008. [viitattu 12.12.2008]. Saatavissa: [https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/38741/jamk\\_1212489500\\_3.pdf?sequence=1](https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/38741/jamk_1212489500_3.pdf?sequence=1)
- Kuittinen, V., Huttunen, M. J. & Leinonen, S. 2007. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 10. Tiedot vuodelta 2006. Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutin raportteja n:o 3. [verkkojulkaisu]. Yliopistopaino, Joensuu 2007. [viitattu 30.9.2008]. Saatavissa: <http://www.biokaasuyhdistys.net/docs/Rekisteri10web.pdf>
- Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim.). 2008. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset. Tutkimusraportti. [verkkojulkaisu]. Tapion ja Metlan julkaisuja. [viitattu 28.1.2009]. Saatavissa: <http://www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti>
- Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2008. Bio-Stirling -tutkimus. [verkkodokumentti]. Päivitetty 4.6.2008. [viitattu 9.12.2008]. Saatavissa: <http://www.lut.fi/fi/technology/energy/research/power/biostirling/Sivut/Default.aspx>
- Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonatoja 85. Jyväskylän yliopisto 2007. ISBN 978-951-39-3076-9. 64 s.
- Lensu, T. & Alakangas, E. 2004. Small-scale electricity generation from renewable energy sources. A glance at selected technologies, their market potential and future prospects. OPET Report 13. Jyväskylä, May 2004. 144 s.
- LIISA 2007. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöjen laskentajärjestelmä. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.12.2008]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/liisa/index.htm>
- Lovley, D. R. 2008. The microbe electric: conversion of organic matter to electricity. [verkkojulkaisu]. *Current Opinion of Biotechnology*, 2008, 19:1-8. [viitattu 12.12.2008]. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

- Luostarinen, J. 2007. Energiakasveista tuotetun biokaasun energiatase suomalaisessa maatalokokoluokan biokaasulaitoksessa. Pro gradu-tutkielma. Jyväskylän yliopisto, bio- ja ympäristötieteiden laitos. 52 s.
- Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus. 2008. Matilda-tietopalvelu. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.10.2008]. Saatavissa: [http://www.matilda.fi/servlet/page?\\_pageid=115,193&\\_dad=portal30&\\_schema=PORTAL30](http://www.matilda.fi/servlet/page?_pageid=115,193&_dad=portal30&_schema=PORTAL30)
- Marttila, E., Bergman, R., Lana, A., Manninen, H-M., Nerg, J., Kaikko, J., Pyrhönen, J., Anttila, J., Malinen, J., Kakko, K., Horttanainen, M., Luoranen, M., Pasila-Lehtinen, M. & Lindh, T. 2008. Hajautetun energiantuotannon modulaarinen yhdyskunnan sivuainevirtoja hyödyntävä CHP-laitos. [verkkojulkaisu]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [viitattu 31.12.2008]. Saatavissa: <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/43043/isbn9789522146953.pdf?sequence=1>
- Mateve Oy. 2008. Lähienergiaa. [verkkojulkaisu]. Mateve Oy:n asiakaslehti n:o 1/2008. [viitattu 20.1.2009]. Saatavissa: [http://www.mateve.fi/assets/files/lhienergiaa1\\_2008\\_naytto.pdf](http://www.mateve.fi/assets/files/lhienergiaa1_2008_naytto.pdf)
- Metsäteollisuus ry. 2008. Metsäteollisuuden ympäristötilastot vuodelta 2007. [verkkodokumentti]. Kesäkuu 2008. [viitattu 12.11.2008]. Saatavissa: [http://www.metsateollisuus.fi/Infokortit/ymparistotilastot2006/Documents/41673\\_Metsateollisuus%20ymp.pdf](http://www.metsateollisuus.fi/Infokortit/ymparistotilastot2006/Documents/41673_Metsateollisuus%20ymp.pdf)
- Mikkola, A. 2006. Kasvihuonekurkun tuotantoketjun ympäristövaikutukset ja niiden vähentämismahdollisuudet. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu, ympäristötekniikan koulutusohjelma. 63 s.
- Motiva. 2008. Vedenkulutus. [verkkodokumentti]. Päivitetty 1.8.2008. [viitattu 5.11.2008]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/fi/kuluttajat/asuminen/kodinenergiankulutus/vedenkulutus.html>
- Mäkelä, K., Laurikko, J. & Kanner, H. 2008. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt. LIISA 2007 laskentajärjestelmä. Tutkimusraportti. Nro VTT-R-05607-08. [verkkojulkaisu]. 17.6.2008. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/lipasto/liisa/liisa2007raportti.pdf>
- Myllymaa, T. 2008. Elinkaaritarkastelu kierrätyksen ja polton arvottajana. Tuotannon ja kulutuksen tutkimusohjelma, Suomen ympäristökeskus. [verkkodokumentti]. POLKU-loppuseminaari 9.10.2008. [viitattu 21.1.2009]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=93363>
- Obernberger, I., Thonhofer, P. & Reisenhofer, R. 2002. Description and evaluation of the new 1,000 kW<sub>el</sub> Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria. [verkkojulkaisu]. Euroheat & Power, Volume 10/2002. [viitattu 23.12.2008]. Saatavissa: <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-ORCLienz-Euroheat-2002-10-01.pdf>

- OPET Network. 2004a. Technology paper 2: Micro and small-scale CHP from biomass (< 300 kW<sub>e</sub>). [verkkodokumentti]. April 2004. [viitattu 14.10.2008]. Saatavissa: [http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/DENSY/en/Dokumenttiarkisto/Viestinta\\_ ja\\_aktivointi/Julkaisut/OPET-RES/TechnologyPaper2\\_chp\\_70404.pdf](http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/DENSY/en/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ ja_aktivointi/Julkaisut/OPET-RES/TechnologyPaper2_chp_70404.pdf)
- OPET Network. 2004b. Technology paper 3: Fuel cells using renewable energy sources – a leap to hydrogen economy. [verkkodokumentti]. UK, Wales April 2004. [viitattu 14.10.2008]. Saatavissa: [http://www.esv.or.at/esv/fileadmin/opet\\_res\\_e/TechPaper3\\_fuelcells-fin.pdf](http://www.esv.or.at/esv/fileadmin/opet_res_e/TechPaper3_fuelcells-fin.pdf)
- Pipatti, R. 1997. Suomen metaani- ja dityppioksidipäästöjen rajoittamisen mahdollisuudet ja kustannustehokkuus. VTT Tiedotteita 1835. [verkkojulkaisu]. VTT Offsetpaino, Espoo 1997. [viitattu 18.11.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1997/T1835.pdf>
- Pipatti, R., Tuhkanen, S., Mälkiä, P. & Pietilä, R. 2000. Maatalouden kasvihuonekaasupäästöt sekä päästöjen vähentämisen mahdollisuudet ja kustannustehokkuus. VTT Julkaisuja 841. Otamedia Oy, Espoo 2000. ISBN 951-38-5018-8. 72 s.
- Pohjois-Savon ympäristökeskus. 2009. Ympäristölupapäätös. Dnro PSA-2008-Y-309. [verkkodokumentti]. Annettu julkipanon jälkeen 18.2.2009. [viitattu 4.3.2009]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=98605&lan=fi>
- Puumala, M. & Grönroos, J. 2004. Kotieläintalouden ympäristökuormituksen vähentäminen. Toimenpiteiden kustannukset ja toimivuus. Suomen ympäristö 708. [verkkojulkaisu]. Edita Prima Oy, Helsinki 2004. [viitattu 9.10.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=20915>
- Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 1995. ISBN 951-666-448-2. 629 s.
- Rantala, J., Mäkiäho, M. & Laine, A. Hämeen puuenergiavaraselvitys. Hämeen puuenergiahanke II. [verkkojulkaisu]. Metsäkeskus Häme-Uusimaa. [viitattu 13.11.2008]. Saatavissa: [http://www.metsakeskus.fi/NR/rdonlyres/84B4E5FA-5DE7-4092-80E8-0A6A45350042/5820/puuraportti\\_2.pdf](http://www.metsakeskus.fi/NR/rdonlyres/84B4E5FA-5DE7-4092-80E8-0A6A45350042/5820/puuraportti_2.pdf)
- Rintala, J., Lampinen, A., Luostarinen, S. & Lehtomäki, A. 2002. Biokaasusta uusiutuvaa energiaa maataloilla. Jyväskylän yliopisto, bio- ja ympäristötieteiden laitos. 55 s.
- Salo-Asikainen, S. 2007. Normeilla tehokkaampaan pienten energiantuotantolaitosten sääntelyyn. Ilmansuojeluyhdistys ry:n jäsenlehti 4/2007, s. 4-9. [viitattu 13.2.2009]. Saatavissa: [http://www.isy.fi/islehdet/ISU4\\_2007\\_5.pdf](http://www.isy.fi/islehdet/ISU4_2007_5.pdf)
- Schäfer, W., Evers, L., Lehto, M., Sorvala, S., Teye, F. & Granstedt, A. 2006. Kuivalannan kaksivaiheinen jatkuvatoiminen mädätys maatilalla: Reaktorin rakenne sekä aine-, ravinne- ja energiataseet. [verkkodokumentti]. Maataloustieteen Päivät 2006. [viitattu 4.3.2009]. Saatavissa: <http://www.smts.fi/pos06/0307.pdf>

- Seppälä, M., Paavola, T., Pakarinen, O., Lehtomäki, A. & Rintala, J. 2008. Biokaasun tuotanto energiakasveista. [verkkodokumentti]. Maataloustieteen Päivät 2008. [viitattu 21.1.2009]. Saatavissa: [http://www.smts.fi/mpol2008/index\\_tiedostot/Esitelmat/es046.pdf](http://www.smts.fi/mpol2008/index_tiedostot/Esitelmat/es046.pdf)
- Sipilä, K., Pursiheimo, E., Savola, T., Fogelholm, C-J., Keppo, I. & Ahtila, P. 2005. Small-Scale Biomass CHP Plant and District Heating. VTT Research Notes 2301. Valopaino Oy, Helsinki 2005. ISBN 951-38-6722-6. 129 s.
- Sorvala, S., Puumala, M. & Lehto, M. 2006. Käyttöveden riittävyys ja laatu maatalouden suurissa tuotantoyksiköissä. MTT:n selvityksiä 108. ISBN 952-487-004-5. 34 s.
- Suomen ympäristökeskus. 2008a. Teollisuuden vesistökuormitus. [verkkodokumentti]. Päivitetty 6.11.2008. [viitattu 12.11.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=8571&lan=fi>
- Suomen ympäristökeskus. 2008b. Energiantuotannon aineistoa. [verkkodokumentti]. Päivitetty 19.8.2008. [viitattu 17.11.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=13583&lan=fi>
- Suomen ympäristökeskus. 2007. Lietteen määrä ja laatu. [verkkodokumentti]. Päivitetty 24.1.2007. [viitattu 22.10.2008]. Saatavissa: <http://www.environment.fi/default.asp?contentid=219630&lan=fi>
- Taavitsainen, T., Kapuinen, P. & Survo, K. 2002. Maatalouden lietteiden ja lantojen keskittelyn käsittelyn mallinnus. MaLLa-hankkeen loppuraportti. Pohjois-Savon ammattikorkeakoulu. 139 s.
- Tilastokeskus. 2008a. Asuminen. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.11.2008]. Saatavissa: <http://www.tilastokeskus.fi/til/asu.html>
- Tilastokeskus. 2008b. Sähkön ja lämmön tuotanto 2007. [verkkodokumentti]. Päivitetty 26.9.2008. [viitattu 15.10.2008]. Saatavissa: [http://www.tilastokeskus.fi/til/salatuo/2007/salatuo\\_2007\\_2008-09-26\\_kat\\_001.html](http://www.tilastokeskus.fi/til/salatuo/2007/salatuo_2007_2008-09-26_kat_001.html)
- Tilastokeskus. 2008c. Vuoden 2008 virallinen päästöinventaarior ilmastopimukselle. [verkkodokumentti]. Päivitetty 18.4.2008. [viitattu 17.11.2008]. Saatavissa: [http://www.tilastokeskus.fi/til/khki/2006/khki\\_2006\\_2008-04-18\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.tilastokeskus.fi/til/khki/2006/khki_2006_2008-04-18_tie_001_fi.html)
- Tilastokeskus. 2007a. Yhdyskuntien jätehuolto murroksessa. [verkkodokumentti]. Päivitetty 15.11.2007. [viitattu 21.10.2008]. Saatavissa: [http://www.tilastokeskus.fi/til/jate/2006/jate\\_2006\\_2007-11-15\\_tie\\_001.html](http://www.tilastokeskus.fi/til/jate/2006/jate_2006_2007-11-15_tie_001.html)
- Tilastokeskus. 2007b. Sähkönkulutus sektoreittain 2006. [verkkodokumentti]. Päivitetty 12.12.2007. [viitattu 14.11.2008]. Saatavissa: [http://www.tilastokeskus.fi/til/ekul/2006/ekul\\_2006\\_2007-12-12\\_kuv\\_009.html](http://www.tilastokeskus.fi/til/ekul/2006/ekul_2006_2007-12-12_kuv_009.html)

- Tilastokeskus. 2006. Polttoaineluokitus. [verkkodokumentti]. Päivitetty 25.1.2007. [viitattu 17.11.2008]. Saatavissa: [http://www.tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](http://www.tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html)
- Tuomisto, H. 2005. Biokaasun ja peltoenergian tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset. [verkkojulkaisu]. [viitattu 27.10.2008]. Saatavissa: [http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhma\\_muistiot/2006/siirto/trm2006\\_1\\_biokaasun%20ja%20peltoenergian%20tuotannon%20ja%20k%C3%A4yt%C3%B6n%20ymp%C3%A4rist%C3%B6vaikutukset.pdf](http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhma_muistiot/2006/siirto/trm2006_1_biokaasun%20ja%20peltoenergian%20tuotannon%20ja%20k%C3%A4yt%C3%B6n%20ymp%C3%A4rist%C3%B6vaikutukset.pdf)
- Uudenmaan ympäristökeskus. 2008. Uudenmaan jätteet indikaattorien valossa. [verkkodokumentti]. Päivitetty 11.1.2008. [viitattu 12.11.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=21943&lan=fi>
- Van herle, J., Membrez, Y. & Bucheli, O. 2004. Biogas as a fuel source for SOFC co-generators. [verkkojulkaisu]. Journal of Power Sources 127, 2004. s. 300-312. [viitattu 19.12.2008]. Saatavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- Vartiainen, E., Luoma, P., Hiltunen, J. & Vanhanen, J. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO<sub>2</sub>-päästöt. [verkkojulkaisu]. Oy Edita Ab, Helsinki 2002. [viitattu 16.10.2008]. Saatavissa: [http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus.fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/ymp%C3%A4rist%C3%B6pooli/liitekirjasto/hajautettu\\_energiantuotanto\\_loppuraportti.pdf?SectionUri=%2Ffi%2Fjulkaisut%2Fymparistopooli%2Ftutkimusaineisto](http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus.fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/ymp%C3%A4rist%C3%B6pooli/liitekirjasto/hajautettu_energiantuotanto_loppuraportti.pdf?SectionUri=%2Ffi%2Fjulkaisut%2Fymparistopooli%2Ftutkimusaineisto)
- Vattenfall. 2008. Vattenfall Sähköntuotanto. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.11.2008]. Saatavissa: [http://www.vattenfall.fi/www/vf\\_fi/vf\\_fi/584273tieto/584289vatte/612654vatte/index.jsp](http://www.vattenfall.fi/www/vf_fi/vf_fi/584273tieto/584289vatte/612654vatte/index.jsp)
- Vesanto, P., Hiltunen, M., Moilanen, A., Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J., Sipilä, K. & Wilén, C. 2007. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö. Selvitys kierrätyspolttoaineiden laatuominaisuuksista ja soveltuvuudesta leijupolttoon. VTT Tiedotteita 2416. [verkkojulkaisu]. Edita Prima Oy, Helsinki 2007. [viitattu 31.12.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2416.pdf>
- VTT. 2008. LARGE-SOFC – Towards a Large SOFC Power Plant. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.12.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/proj/largesofc/>
- Wellinger, A. & Lindberg, A. Biogas upgrading and utilisation. IEA Bioenergy. Task 24: Energy from biological conversion of organic waste. 20 s.
- Ympäristöhallinto. 2003. Veden ominaiskulutus 1970 - 2001. [verkkodokumentti]. Julkaistu 8.9.2003. [viitattu 12.11.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=4822&lan=fi>
- Ympäristöministeriö. 2008. Pientalon D5/2007 -energialaskentaopas – rakennuksen energiankulutus ja ostoenergiankulutus sekä ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho, rakennuksen



lämmitysteho ja arvio kesäaikaisesta huonelämpötilasta energiaselvitystä varten. [verkkojulkaisu]. Ympäristöministeriö 17.4.2008. [viitattu 29.10.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=84298&lan=fi>

Ympäristötuen sitomusehdot 2006. [verkkodokumentti]. Päivitetty 20.3.2006. [viitattu 21.1.2009]. Saatavissa: <http://www.mmm.fi/attachments/5gyD3XQMV/5gyEtgIlt/Files/CurrentFile/Sit06.pdf>

### **Henkilökohtaiset tiedonannot:**

Humppilan jätevedenpuhdistamo. 2008. Puhelinkeskustelu 10.11.2008.

Humppilan Kaukolämpö Oy. 2008. Puhelinkeskustelu 10.11.2008.

Järvenpää, J. 2008b. Sähkön tilastotietoa, Humppila. Vattenfall Verkkoy. Sähköpostiviesti 13.11.2008.

Kallonen, A. 2008. Rakennustarkastaja, Humppilan kunta. Puhelinkeskustelu 10.11.2008.

Kapuinen, P. 2009. Liete- ja kuivalannan määrät. MTT. Sähköpostiviesti 10.2.2009.

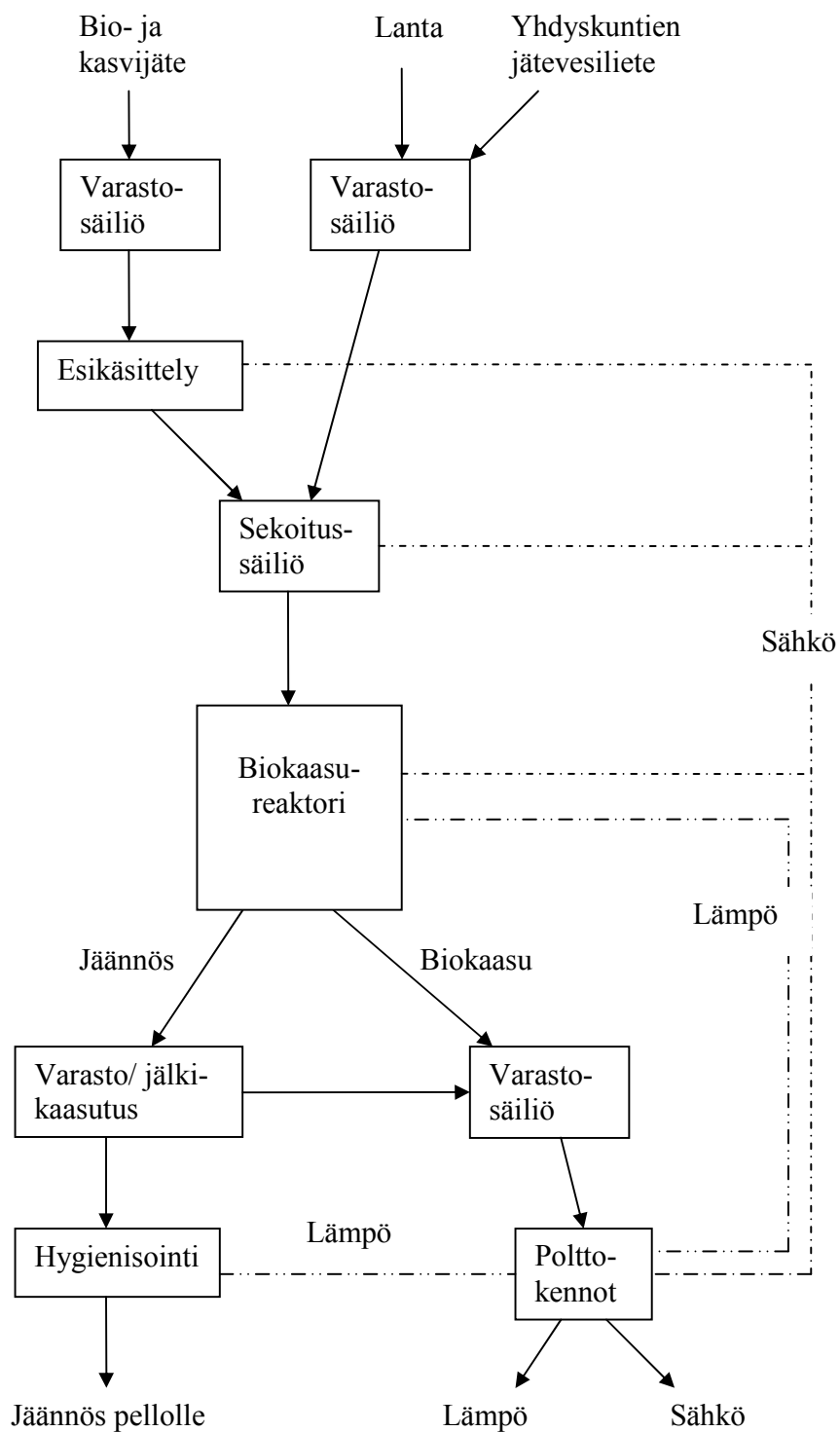
Kauppinen, T. 2009. Tutkija, MTT. Suullinen tiedonanto 11.2.2009.

Mäkelä, J. 2008. Tiedot Humppilan maataloudesta. Humppilan kunta. Sähköpostiviesti 30.10.2008.

Näkkilä, J. 2009. Tomaatin tuoremassa luonnonvaloviljelyssä. MTT. Sähköpostiviesti 12.1.2009.

Viertola, R. 2008. Humppilan metsät. Metsänhoitoyhdistys Jokilääni. Sähköpostiviesti 13.11.2008.

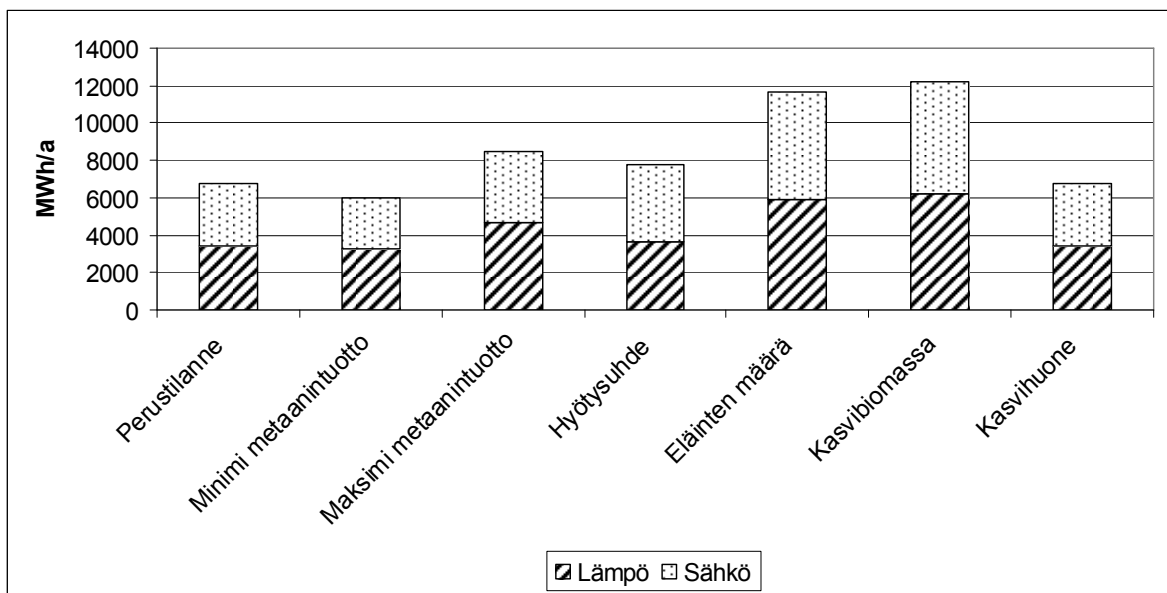
### Liite 1. Biokaasuprosessin periaatekaavio



## Liite 2. Biokaasulaitoksen ja polttokennojen herkkyystarkastelujen tulokset

Taulukko 1. Herkkyystarkastelujen vertailu perustilanteeseen.

	Energiaa [MWh/a]	Sähköä, netto [MWh/a]	Sähkön osuus alueen tar- peesta [%]	Lämpöä, netto [MWh/a]	Lämmön osuus alueen tar- peesta [%]
Perustapaus	9 300	3 310	23	3 430	8
Minimi metaanin- tuottopotentiali	7 160	2 410	17	2 910	6
Maksimi metaanin- tuottopotentiali	11 450	3 860	27	4 650	10
Polttokennojen maksimihiötysuhde	9 300	4 130	29	3 620	8
Jokioisten eläinten lanta	16 120	5 740	40	5 950	13
Nurmi viljelemät- tömiltä pelloilta	16 830	5 990	41	6 210	14
Kasvihuoneviljely	9360	3 340	22	3 460	7

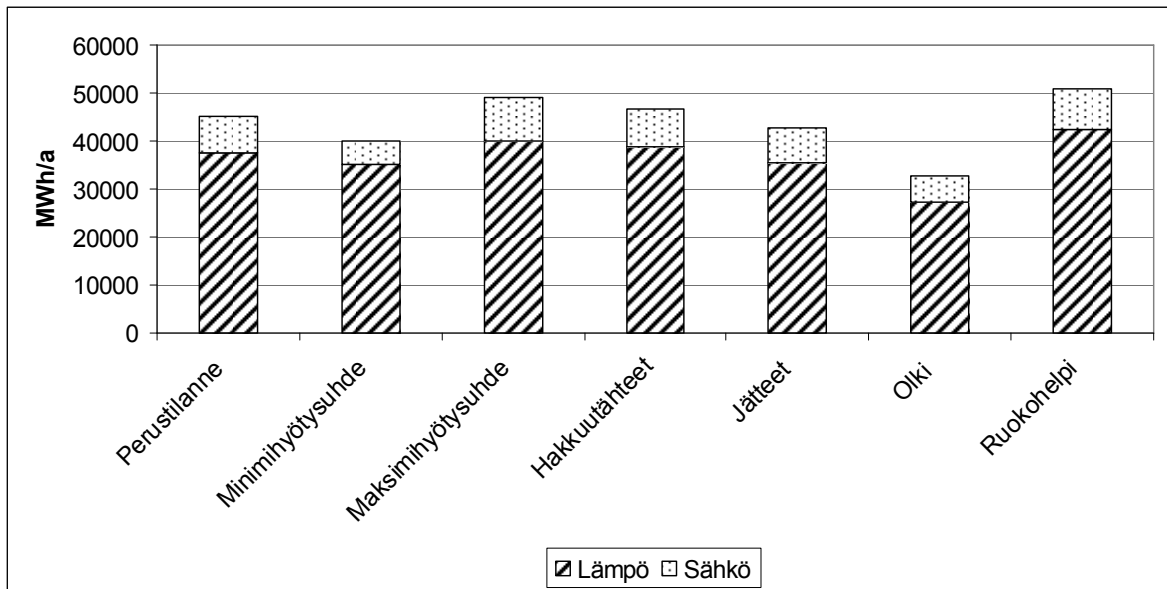


Kuva 1. Eri tekijöiden vaikutus biokaasulaitoksella ja polttokennoilla tuotettavissa olevan sähkön ja lämmön määrään.

### Liite 3. Polttolaitoksen ja ORC-prosessin herkkystarkastelujen tulokset

Taulukko 2. Herkkystarkastelujen vertailu perustilanteeseen.

	Energiaa [MWh/a]	Sähköä, netto [MWh/a]	Sähkön osuus alueen tarpeesta [%]	Lämpöä, netto [MWh/a]	Lämmön osuus alueen tar- peesta [%]
Perustapaus	50 130	7 520	52	37 600	82
ORC-prosessin mi- nimihyötysuhde	50 130	5 010	35	35 090	77
ORC-prosessin maksimihyötysuhde	50 130	9 020	62	40 110	88
Ei jätteiden polttoa	47 430	7 120	49	35 580	78
Hakkuutähteiden määrä 15 % suu- rempi	51 750	7 760	54	38 810	85
Oljen määrä 50 % pienempi	36 410	5 460	38	27 310	60
Ruokohelven viljely	56 580	8 490	59	42 440	93



Kuva 2. Eri tekijöiden vaikutus polttolaitoksella ja ORC-prosessilla tuotettavissa olevan sähkön ja lämmön määrään.

#### Liite 4. Standardin SFS 5624 mukainen savukaasulasku oljen poltolle

Oletukset:

- polttoainetta poltetaan ilmakertoimella 1,15
- palamisilman lämpötila on 20 °C
- paine on 101,325 kPa
- suhteellinen kosteus on 70 %

Taulukko 3. Savukaasumäärät polttoainekiloa kohti.

Alkuaine- koostumus	Osuus [%]	Massa [g]	Mooli- massa [g/mol]	Aine- määrä [mol]	Hapen tarve [mol]	Savukaasut [mol]				
						CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Hiihi	46	368	12,01	30,64	30,64	30,64				
Vety	5,9	47	2,02	23,41	11,71		23,41			
Typpi	0,41	3	28,01	0,12					0,12	
Happi	40	320	31,99	10,00	-10,00					
Rikki	0,08	1	32,06	0,02	0,02					0,02
Vesi	20	200	18,02	11,10			11,10			
<b>Yhteensä</b>		<b>939</b>			<b>32,34</b>	<b>30,64</b>	<b>34,51</b>		<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
N <sub>2</sub> ilmasta	3,77 * 32,34								121,94	
H <sub>2</sub> O ilmasta							2,36			
<b>Yhteensä</b>						<b>30,64</b>	<b>36,87</b>		<b>122,06</b>	<b>0,02</b>
Teoreettinen savukaasumäärä										
- kuiva	153 mol									
- kostea	190 mol									
Ilmaylimäärän										
O <sub>2</sub>	0,15 * 32,34							4,85		
N <sub>2</sub>	3,77 * 18,29								18,29	
H <sub>2</sub> O	0,15 * 2,36						0,35			
<b>Yhteensä</b>						<b>30,64</b>	<b>37,23</b>	<b>4,85</b>	<b>140,35</b>	<b>0,02</b>
Todellinen savukaasumäärä										
- kuiva	176 mol									
- kostea	213 mol									

Veden moolimäärä ilmassa lasketaan yhtälöllä

$$N'_w = \frac{p_w}{p - p_w} \cdot N'_{da} \quad (1)$$

missä  $N'_w$  on veden moolimäärä ilmassa (mol)  
 $p$  on ilman kokonaispaine (101,325 kPa)  
 $p_w$  on vesihöyryyn osapaine ilmassa (1,636 kPa)  
 $N'_{da}$  on kuivan ilman moolimäärä (mol).

(jatkuu)

(liite 4 jatkoa)

Kuivan ilman moolimäärä lasketaan yhtälöllä

$$N'_{da} = 4,77 \cdot O_2 - tarve.$$

(2)

**Taulukko 4.** Savukaasun osakaasupitoisuudet.

Osakaasu	Ainemäärä [kmol]	Moolimassa [kg/kmol]	Moolitilavuus [m <sup>3</sup> /kmol]	Massa [kg]	Tilavuus [m <sup>3</sup> ]	Pitoisuudet	
						Tilavuus, kuiva [%]	Tilavuus, kostea [%]
CO <sub>2</sub>	0,03064	44,01	22,26	1,35	0,68	17	14
O <sub>2</sub>	0,00485	32,00	22,39	0,16	0,11	3	2
N <sub>2</sub>	0,14035	28,02	22,40	3,93	3,14	80	66
SO <sub>2</sub>	0,00002	64,07	21,98	0,00	0,00	0	0
H <sub>2</sub> O	0,03723	18,02	22,40	0,67	0,83		17
Kuivaa kaasua				5,44	3,93	100	
Kostea kaasua				6,11	4,77		100