

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**BIOKAASU PIENEN KOKOLUOKAN SÄHKÖN JA  
LÄMMÖN YHTEISTUOTANNOSSA**

**BIOGAS IN SMALL SCALE COMBINED HEAT AND  
POWER GENERATION**

Lappeenrannassa 28.1.2010

0295076

Kari Anttonen

Ente 4

# SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO.....	1
1 JOHDANTO .....	2
2 BIOKAASU .....	2
2.1 Biokaasu yleisesti .....	3
2.2 Biokaasun tuotanto .....	5
2.2.1 Anaerobinen käsittely.....	5
2.2.2 Anaerobinen hajoamisprosessi .....	7
2.3 Biokaasun käsittely ja varastointi.....	8
2.3.1 Maatilalaitokset.....	9
2.3.2 Jätevedenpuhdistamot .....	9
2.3.3 Yhteiskäsittelylaitokset .....	10
2.4 Biokaasun puhdistus ja jalostus.....	10
2.4.1 Biokaasun puhdistusmenetelmät.....	12
2.4.2 Biokaasun konsentroidintimenetelmät .....	13
2.4 Potentiaali.....	14
2.5 Jakeluverkostot biokaasulle .....	18
3 SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTOTEKNIIKAT BIOKAASULLE.....	19
3.1 Kaasumoottorit .....	20
3.2 Mikroturbiinit .....	23
3.3 Käyttökokemukset.....	25
4 KUSTANNUKSET JA KANNATTAVUUS .....	26
4.1 Biokaasureaktori.....	26
4.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotantoyksikkö .....	27
4.3 Esimerkkilaitos .....	29
5 MARKKINATILANNE .....	34
5.1 Biokaasulaitos .....	34
5.1.1 Metaenergia Oy.....	35
5.1.2 NHK-Keskus Oy .....	36
5.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotantoyksikkö .....	37
5.2.1 Höyrytys Oy .....	37
5.2.2 Greenenvironment plc.....	38
5.2.3 Turbec.....	38
6 KEHITYSNÄKYMÄT.....	39
7 YHTEENVETO .....	41
LÄHTEET .....	43

**SYMBOLILUETTELO**

$A$	vuotuinen pääomakustannus	[€]
$a_{ni}$	jaksollisten suoritusten nykyarvo	[-]
$c_{ni}$	annuiteettitekijä	[-]
$I$	investointi	[€]
$NA$	investoinnin nykyarvo	[€]
$S$	nettotulot vuodessa	[€]

## 1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö on tehty Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle osana kurssia BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari. Tässä työssä tarkastellaan mädättämällä saadun biokaasun käyttöä pienen kokoluokan alle 100 kW<sub>e</sub> sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Työssä esitellään biokaasun tuotanto biokaasureaktorissa anaerobisella käsittelyllä eli mädättämällä sekä nykypäivänä käytössä olevat biokaasua käyttävät pienen kokoluokan energiantuotantotekniikat alle 100 kW<sub>e</sub> kokoluokassa. Lisäksi tutkitaan maatilakokoluokan biokaasulaitoksen kannattavuutta, sekä esitellään eri toimittajia biokaasulaitokseen liittyen. Työn loppuosassa käsitellään myös tulevaisuudennäkymiä biokaasusektorilla.

Hajautettu energiantuotanto on nouseva teknologia-alue ja monet toimenpiteet Euroopan unionin alueella kannustavat hajautettuun sekä kestävään energiantuotantoon. Suomen uusiutuvan energian velvoitepaketissa on tavoitteena lisätä biokaasulla tuotetun kokonaisenergian määrä vuodessa 1 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä, kun se vuonna 2009 oli 0,44 TWh. Kiinnostus biokaasuteknologiaa ja biokaasua käyttävien pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantoratkaisuja kohtaan onkin lisääntynyt viime vuosien aikana.

Sähkön ja lämmön yhteistuotannolla (combined heat and power generation, CHP) päästään huomattavasti parempaan lämmön- ja sähköntuotannon kokonaishyötysuhteeseen, kuin tuotettaessa sähkö ja lämpö erikseen. Tämä johtuu siitä, että usein sähkön tuotantoprosessissa syntyy paljon hukkalämpöä, jonka talteenotolla saadaan kokonaishyötysuhdetta parannettua.

## 2 BIOKAASU

Työn tässä luvussa esitellään energiantuotantoon soveltuva biokaasu sekä sen tuotanto. Lisäksi luvussa esitellään biokaasun tuotantopotentiaali.

## 2.1 Biokaasu yleisesti

Biokaasuksi kutsutaan kaasuseosta, jota syntyy eloperäisen aineksen hajotessa hapettomissa olosuhteissa. Hajoaminen tapahtuu hapen puutteen takia mädäntymällä anaerobisten bakteerien vaikutuksesta. Hajotuksen tuloksena syntyy lannoitekäyttöön sopivaa orgaanista mädätysjäännöstä sekä runsaasti metaania sisältävää biokaasua. Hajoamisprosessia voidaan kutsua anaerobiseksi käsittelyksi, mädätykseksi tai biokaasutukseksi. (Biokaasuyhdistys 2010.)

Biokaasu on koostumukseltaan pääasiassa metaania (CH<sub>4</sub>) ja hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>). Metaanin osuus biokaasussa vaihtelee 40 ja 70 prosentin välillä ja hiilidioksidin osuus 30 ja 60 prosentin välillä. Lisäksi biokaasutusreaktoreissa tuotettu kaasu sisältää pieniä pitoisuuksia typpeä ja rikkivetyä, sekä kaatopaikkakaasut sisältävät näiden lisäksi myös pieniä pitoisuuksia kloori- ja fluoriyhdisteitä. (Motiva 2010.) Taulukossa 1 on esitetty biokaasun keskimääräisiä ominaisuuksia.

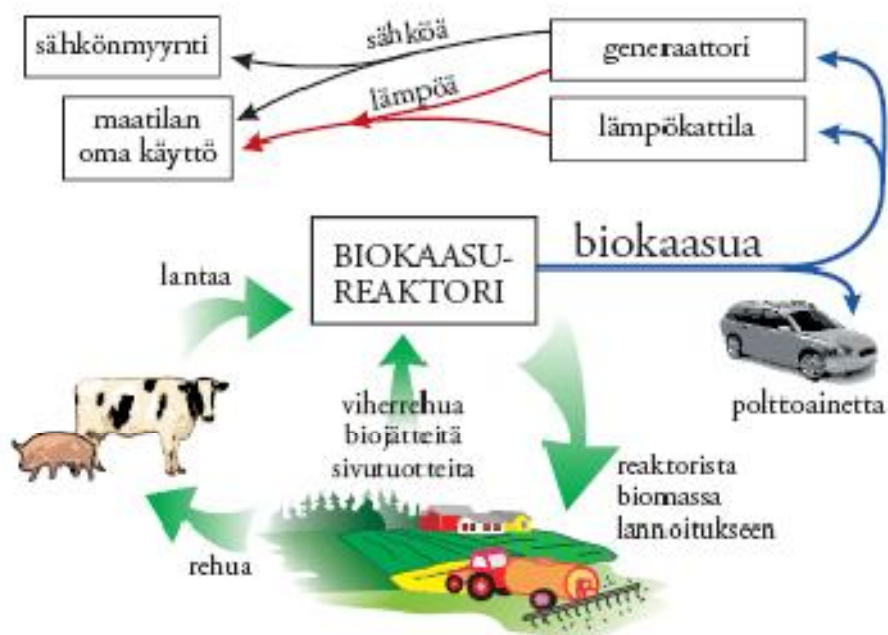
**Taulukko 1.** Biokaasun keskimääräisiä ominaisuuksia. (Vilkkilä 2007, 4.)

Kosteus (m-%)	1-10
Alempi lämpöarvo (kWh/m <sup>3</sup> )	5 (metaanipitoisuus 50 %) 7,5 (metaanipitoisuus 75 %)
Metaanipitoisuus (til-%)	40-75
Hiilidioksidipitoisuus (til-%)	24-50
Ammoniakkipitoisuus (til-%)	0-1
Rikkivetypitoisuus (til-%)	0-1
Kaasuntuottopotentiali (m <sup>3</sup> biokaasua/m <sup>3</sup> biomassaa)	Lanta: n. 25 Peruna: n. 90 Esikuivattu säiliörehu: n. 120

Biokaasu on hyvä uusiutuva biopolttoaine ja energianlähde, jonka ympäristöedut ovat huomattavat. Biokaasua voidaan hyödyntää lämmön ja sähkön tuotannossa ja siitä voidaan jalostaa myös ajoneuvojen polttoainetta käytettäväksi maakaasun rinnalla. (Biokaasuyhdistys 2010.)

Biokaasua muodostuu jatkuvasti vesistöjen pohjakerroksissa, kosteikoissa ja eläinten suolistossa. Kontrolloituun biokaasun tuottamiseen on useita erilaisia teknisiä vaihtoehtoja, kuten biokaasureaktorit tai biokaasun keräys kaatopaikoilta pumppaamalla. Tässä työssä keskitytään kuitenkin ainoastaan biokaasun tuottamiseen biokaasurektoreilla. Biokaasureaktoria voidaan käyttää maatilalaitoksilla biokaasun tuotantoon karjan lannasta ja erilaisista biomassoista, kuten rehusta. Myös jätevedenpuhdistamoilla voidaan käyttää biokaasureaktoria biokaasun tuotantoon yhdyskunnan jätevesistä. Biokaasun sisältämä metaani on ilmakehään päästessään noin 20 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu, joten muodostuvan biokaasun talteenotolla ja hyötykäytöllä voidaan vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä. (Biokaasuyhdistys 2010.)

Kuvassa 1 on esitetty maatalan biokaasun pelkistetty synty- ja käyttöketju.



**Kuva 1.** Maatalan biokaasun pelkistetty synty- ja käyttöketju. (Kuittinen et al 2010, 12.)

## 2.2 Biokaasun tuotanto

Biokaasu on hapettomassa tilassa eli anaerobisesti tapahtuvan biokemiallisen ja mikrobiologisen hajoamisen kaasumainen lopputuote. Suomessa biokaasua tuotetaan nykyään kaupunkien ja teollisuuden jätevedenpuhdistamojen biokaasulaitoksilla, kiinteän yhdyskuntajätteen biokaasulaitoksilla sekä maatilojen biokaasulaitoksilla.

### 2.2.1 Anaerobinen käsittely

Mädätysprosesseja voidaan jaotella prosessin lämpötilan, mädätettävän materiaalin, mädättämön sijainnin, prosessin vesipitoisuuden, reaktorin tyypin ja syötteen syötön jatkuvuuden mukaan. Lämpötilan mukaan prosessi voidaan jakaa mesofiilisiin ja termofiilisiin prosesseihin. Mädätettävän materiaalin ja mädättämön sijainnin mukaan biokaasulaitoksia voidaan jakaa jätevedenpuhdistamoiden biokaasulaitoksiin, maatilakokoluokan laitoksiin, jotka ovat suhteellisen pieniä, sekä yhteiskäsittelylaitoksiin, joissa käsitellään monia erilaisia raaka-aineita ja jätteitä, kuten esimerkiksi yhdyskuntien biojätettä, maatalouden lietteitä ja energiakasveja. Prosessin vesipitoisuuden mukaan mädätysprosessi taas voidaan jakaa märkäprosessiin ja kuivaproessiin.

Anaerobinen käsittely tapahtuu yleensä mesofiilisellä (30-38 °C) tai termofiilisellä (50-60 °C) lämpötila-alueella, mutta prosessi on mahdollista toteuttaa myös psykoofiilisesti, jolloin prosessin lämpötila on alle 20 °C. Lietteen viipymäaika eli läpimenoaika reaktorissa termofiilisessä mädätyksessä on lyhyempi kuin mesofiilisessä mädätyksessä. Termofiilisen prosessin viipymäaika on noin kaksi viikkoa, kun se mesofiilisessä prosessissa on noin kolme viikkoa. Suomessa yleisimmin käytössä on mesofiilinen mädätys, mutta termofiilistä mädätystä käytetään ainakin Vaasan Stormossenin laitoksella. Korkeamman käsittelylämpötilan etu on siinä, että se vähentää tehokkaammin lietteen taudinaiheuttajia. Termofiilinen prosessi kuluttaa kuitenkin enemmän energiaa verrattuna mesofiiliseen prosessiin, johtuen sen korkeammasta käsittelylämpötilasta. Termofiilisen prosessin kaasuntuotanto on yleensä suurempi, kuin mesofiilisen prosessin, mutta se on termofiilisten bakteereiden herkkyyden vuoksi herkempi esimerkiksi lämpötilan ja pH:n vaihteluille. (Latvala 2005, 6; Lehtomäki et al 2007, 31.)

Biokaasulaitoksessa reaktori on yleensä pystysäiliö, joka on rakennettu betonista tai teräksestä. Reaktorin tilavuus mitoitetaan noin 20 – 30 % käsiteltävää syötemäärää suuremmaksi, jotta vaihteluille jää varaa ja jotta reaktorissa on tilaa mahdolliselle vaahtoamiselle sekä kaasun kerääntymiselle lietemassan yläpuolelle. Reaktorin lämmitykseen käytetään tyypillisesti biokaasusta saatavaa energiaa sekä jo käsitellystä lietteestä talteenotettua lämpöä. Reaktorisäiliöön kuuluu lietteen syöttö, sekoitus ja kierrätys sekä poistojärjestelmä. (Latvala 2009, 30.)

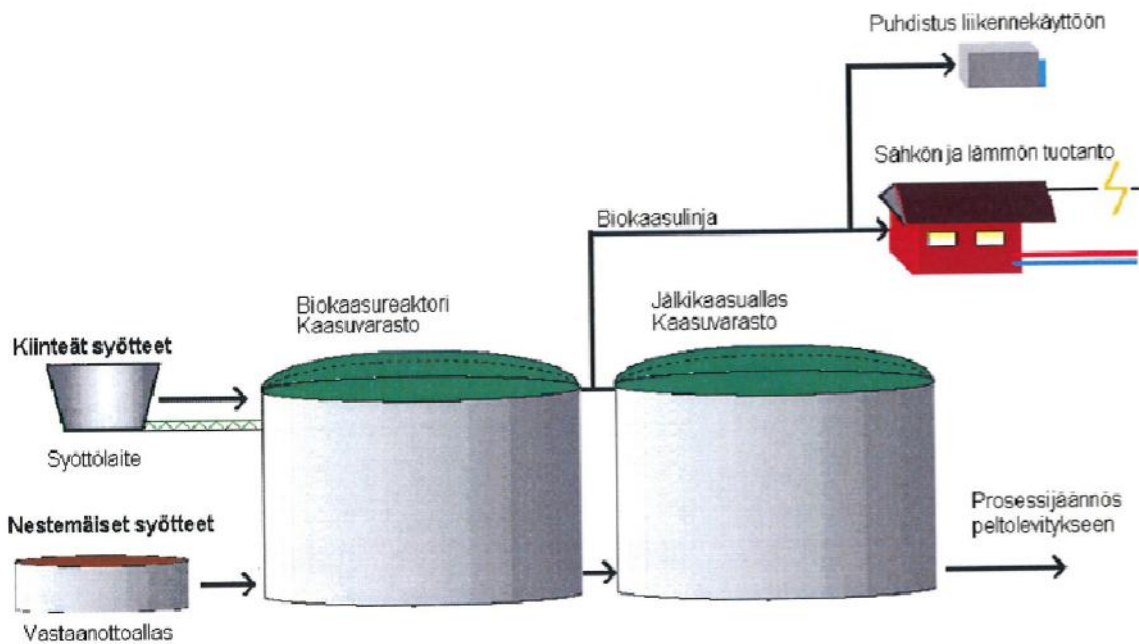
Yleisin prosessityyppi on märkäprosessi, jossa kuiva-ainepitoisuus on maksimissaan 13 m-%. Pienestä kuiva-ainepitoisuudesta johtuen raaka-ainetta on helppo pumpata ja sekoittaa. Märkäprosessit ovat yleensä jatkuvatoimisia ja jatkuvasekoitteisia. Sekoittaminen tapahtuu mekaanisesti, lietteen kierrätyksen avulla tai kierrätettävän kaasun avulla. Sekoitus on tärkeä osa biokaasureaktorin toimintaa, jolla varmistetaan hyvä kontakti syöttömateriaalin ja mikrobien välillä sekä lämmön tasainen jakaantuminen. Sekoittamalla estetään myös inhibitiota, joka biokaasuprosessissa tarkoittaa jonkin kemiallisen tai fysikaalisen tekijän aiheuttamaa haittavaikutusta, joka häiritsee biologisen prosessin toimintaa ja voi jopa tappaa laitoksen toimivat organismit. Sekoituksella estetään myös pintakerroksen kovettumista sekä edesautetaan biokaasun talteenottoa. (Lehtomäki et al 2007, 31.)

Kuivaprosessin kuiva-ainepitoisuus on noin 20-40 %. Kuivaprosessin etuna on sen korkeampi kaasuntuotto reaktoritilavuutta kohti verrattuna märkäprosessiin. Kuivaprosessit voivat olla sekoituksella varustettuja tai sekoittamattomia ja panostoimisia tai jatkuvatoimisia. Panostoimisissa reaktoreissa mädätettävä materiaali lisätään reaktoriin ja poistetaan sieltä kerralla noin 4-6 viikon välein. Jatkuvatoiminen reaktori toimii usein tulppavirtausperiaatteella, jossa syöte syötetään reaktorin toisesta päästä ja poistetaan toisesta päästä ja näin syöte ei sekoitu jo osittain mädäntyneen biomassan kanssa. Kuivaprosessin sekoitus voi olla hankalaa, eikä sille voida luonnollisesti käyttää täysin samoja sekoittimia, kuin märkäprosessille ja näin sen sekoituksen kustannukset voivat olla korkeat. (Lehtomäki et al 2007, 33-34; Hilkiä Igoni et al 2007, 436.)



Suomeen on toistaiseksi rakennettu vain yksi pienikokoinen kuivaprosessia käyttävä koelaitos MTT:n Sotkamon toimipisteeseen. Euroopassa kuitenkin toimii kymmeniä kuivaprosessia käyttäviä biokaasulaitoksia. Nämä laitokset käyttävät syötteenä pääasiassa biojätettä. (Latvala 2009, 32.)

Kuvassa 2 on esitetty biokaasulaitoksen toimintaperiaate.



**Kuva 2.** Biokaasulaitoksen toimintaperiaate. (Kalmari ja Luostarinen 2010, 6.)

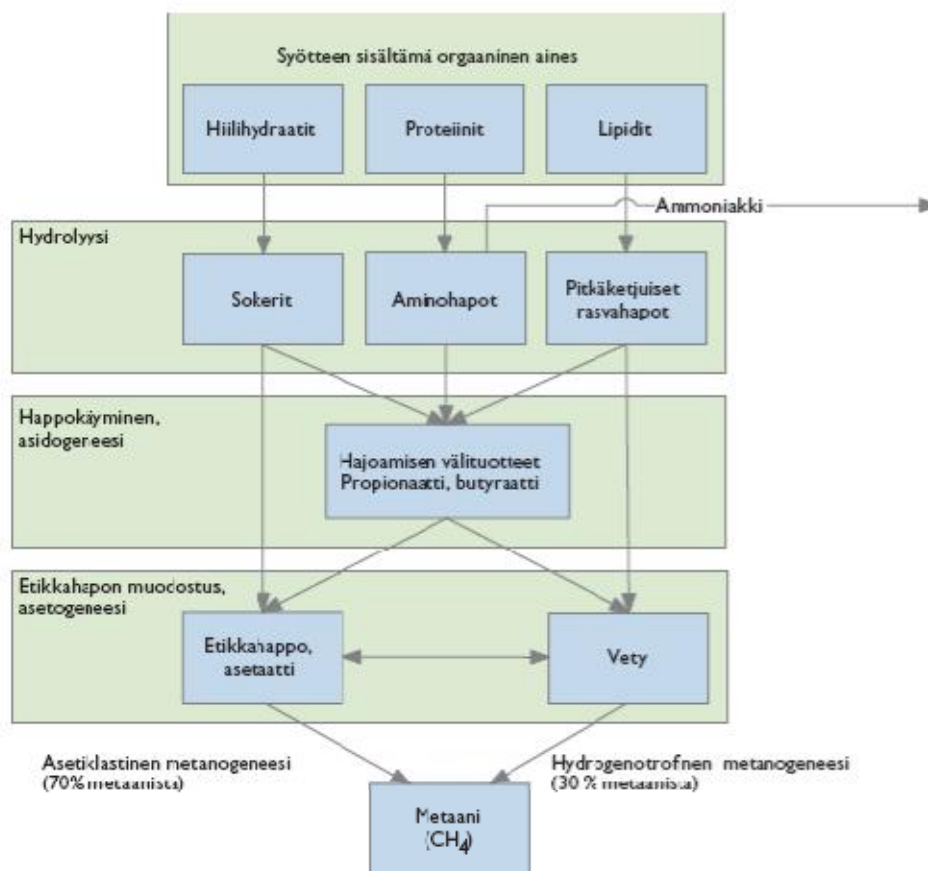
Kuvan 2 prosessissa näkyy myös jälkikaasuuntumissäiliö. Jälkikaasuuntumissäiliöt eivät ole kuitenkaan pakollisia ja niitä käytetään yleensä vain maatilalaitoksilla. Lyhytkin viipymä kaasunkeräykseen liitettyssä säiliössä on edullista, sillä reaktion käsittelyjäännös sisältää vielä hajoavaa ainesta ja tuottaa biokaasua. (Latvala 2009, 31.)

### 2.2.2 Anaerobinen hajoamisprosessi

Biokaasulaitoksen syöteseoksen, joka voi olla esimerkiksi lantaa ja nurmirehua, orgaaninen aine sisältää mm. hiilihydraatteja, proteiineja sekä lipidejä. Anaerobisen prosessin ensimmäisessä vaiheessa, eli hydrolyysivaiheessa, haponmuodostajabakteerien erittämät entsyymit hajottavat käsiteltävän materiaalin sisältämät yhdisteet, eli

hiilihydraatit, rasvat ja proteiinit, yksinkertaisiksi liukoiksi yhdisteiksi, kuten esimerkiksi sokereiksi, ammoniakiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi. Nämä yhdisteet hajoavat edelleen happokäymisvaiheessa haihtuviksi rasvahapoiksi. Vetyä tuottavat bakteerit hajottavat muodostuneet rasvahapot edelleen hiilidioksidiksi, asetaatiksi ja vedyksi. Viimeisessä vaiheessa metaaninmuodostajabakteerit (metanogeenit) tuottavat metaania asetaatista tai vedystä ja hiilidioksidista. (Lehtomäki et al 2007, 22.)

Kuvassa 3 on esitetty syötteen anaerobinen hajoamisprosessi.



Kuva 3. Syötteen anaerobinen hajoamisprosessi. (Latvala 2009, 30.)

### 2.3 Biokaasun käsittely ja varastointi

Biokaasun sisältämän metaanin ja hiilidioksidin lisäksi se sisältää pieninä määrinä esimerkiksi happea, typpeä sekä kosteutta, orgaanisia piiyhdisteitä (siloksaaneja) ja

partikkeleita. Biokaasu sisältää myös hajuhaittoja aiheuttavia kaasuja, joista yksi esimerkiksi on rikkivety. Biokaasun sisältämä metaani on hiilidioksidiakin pahempi kasvihuoneilmiötä aiheuttava kaasu, joten sen käsittely ja varastointi on järjestettävä siten, ettei sitä pääse purkautumaan ilmaan. Biokaasun laatu on suuresti riippuvainen käytetyistä syötteistä, joten näin ollen uuden syötteen lisääminen saattaa muuttaa biokaasun koostumusta. Seuraavissa kappaleissa on esitetty biokaasun koostumukseen ja laatuun vaikuttavia tekijöitä erityyppisillä laitoksilla. (Latvala 2009, 40.)

### **2.3.1 Maatilalaitokset**

Maatilalaitoksilla syötteenä käytetty aines on pääasiassa karjan lantaa, jolloin syötteen laatu pysyy lähestulkoon samana, joten syöttestä johtuva kaasun komponenttien vaihtelu on pientä. Maatilalaitoksilla tuotetussa kaasussa esiintyy kuitenkin rikkivetyä ( $H_2S$ ), jolla voi olla korrodoivia vaikutuksia hyödyntämislaitteistoissa. Rikkivedyn pitoisuus vaihtelee tyypillisesti välillä 1000 – 3000 ppm. (Latvala 2009, 40.)

Kaasun varastointi maatilalaitoksilla on tyypillisesti melko lyhytaikaista ja tapahtuu joko varsinaisen reaktorin yläosassa tai katetun jälkikaasuuntumissäiliön yläosassa, jossa on kaasunkeräystilaa noin viidennes reaktorin kokonaistilavuudesta. Puskurivaraston koko on yleensä verraten pieni ja sillä pystytään kompensoimaan vain hetkittäisiä vajeita kaasuntuotannossa. Biokaasureaktorin prosessin keskeytyessä kokonaan, ei tällainen varasto riitä hyödyntämislaitteiston normaalilla teholla ajamiseen. (Latvala 2009, 40.)

### **2.3.2 Jätevedenpuhdistamot**

Jätevedenpuhdistamoiden biokaasulaitoksien tuottaman biokaasun komponenteissa ei juurikaan esiinny paikallisia vaihteluita, koska käsiteltävä syötteen suuri määrä toimii puskurina muutoksille. Käsiteltävän syötteen suuren määrän ansiosta pienet poikkeamat syötteissä eivät myöskään aiheuta huomattavia muutoksia prosessissa. Sen sijaan eri jätevedenpuhdistamoiden tuottamat biokaasut saattavat poiketa toisistaan käsitellystä jätevedestä ja puhdistamon prosessista riippuen. Jätevedenpuhdistamoilla tuotettu biokaasu

sisältää kuitenkin yleisesti siloksaaneja, jotka ovat peräisin lähinnä hius- ja kosmetiikkatuotteista. Siloksaanit eli orgaaniset pii-yhdisteet voivat aiheuttaa ongelmia lähinnä kaasun moottorikäytössä ja niiden poistaminen biokaasusta on hankalaa. (Latvala 2009, 40.)

Jätevedenpuhdistamoiden biokaasulaitoksilla tuotettua biokaasua varastoidaan tyypillisesti erillisessä kaasukellossa tai membraanisäiliössä. Varasto mitoitetaan yleensä niin, että siitä riittää kaasua reaktorin kaasuntuotannon keskeytyessä noin 1 – 24 tunniksi. Membraanisäiliöt ovat yleensä tilavuudeltaan kaasukelloja suurempia. (Latvala 2009, 40.)

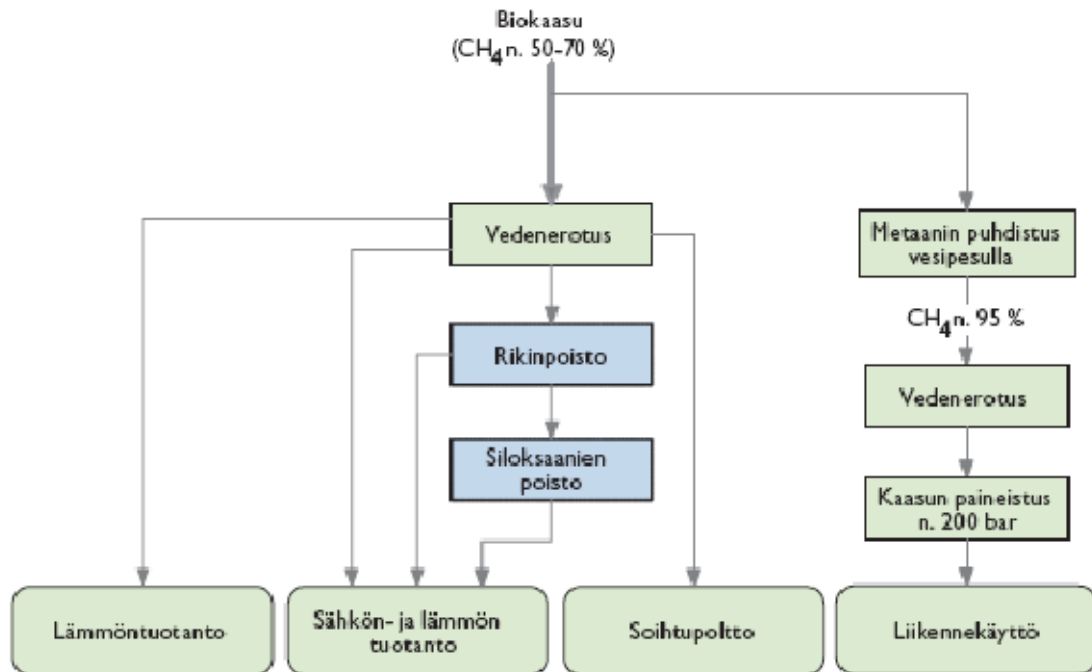
### **2.3.3 Yhteiskäsittelylaitokset**

Johtuen monipuolisesta syötevalikoimasta yhteiskäsittelylaitoksen tuottamassa biokaasussa esiintyy jonkin verran vaihteluita. Yhteiskäsittelylaitoksessa voikin esiintyä sekä maatilalaitoksen ongelmia että jätevedenpuhdistamon ongelmia eli biokaasussa voi esiintyä haitallista rikkivetyä sekä siloksaaneja. Biokaasun varastoinnissa käytetään yhteiskäsittelylaitoksilla yleensä samaa tekniikkaa kuin jätevedenpuhdistamojen laitoksilla. (Latvala 2009, 41.)

## **2.4 Biokaasun puhdistus ja jalostus**

Biokaasureaktorissa tuotettu biokaasu sisältää aina kaasumaisten komponenttien lisäksi toimintaa ja kunnossapitoa haittaavaa kosteutta. Tämä kosteus poistetaan yleensä kaikilla laitoksilla vedenerottimilla ennen kaasun hyötykäyttöä. Lisäksi kaasu voi sisältää suuria määriä rikkivetyä, joka voi aiheuttaa ongelmia lämmöntuotannossa sekä yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa aiheuttamalla esimerkiksi korroosiota hyödyntämislaitteistossa. Mahdolliset siloksaanit biokaasussa voivat myös aiheuttaa ongelmia sähkön ja lämmön yhteistuotannossa aiheuttamalla myös mahdollisesti korroosiota ja likaantumista hyödyntämislaitteistossa. On myös mahdollista että biokaasu sisältää pieniä määriä muita komponentteja ( $<10 \text{ mg/m}^3$ ) kuten fluoria ja ammoniakkia. Nämä eivät kuitenkaan aiheuta haittaa biokaasun hyödyntämiselle tai muulle toiminnalle. (Latvala 2009, 41; Deuplein ja Steinhauser 2008, 55-56.)

Kuvassa 4 on esitetty tarpeelliset toimenpiteet biokaasulle riippuen sen lopullisesta käytöstä.



**Kuva 4.** Biokaasun yleiset käyttötavat ja tarpeelliset käsittelytavat. (Latvala 2009, 42.)

Kuvasta 4 näemme, että käytettäessä biokaasua lämmöntuotantoon tai poltettaessa sitä soihdussa, on siitä poistettava vain kosteus. Soih tupoltt ota käytetään vain kun kaasun hyödyntäminen ei ole mahdollista eli sen hyödyntämislaitteisto on rikkoontunut tai huollossa eikä biokaasulle ole riittäviä varastointimahdollisuuksia. Lähes kaikilla biokaasun tuottajilla on varalla soih tu biokaasun poltto varten, jottei metaania sisältävää biokaasua tarvitsisi poistaa suoraan ilmaan, sillä metaani on hiilidioksidiakin vaarallisempi kasvihuonekaasu. Ainoastaan pienemmillä biokaasuntuottajilla ei yleensä ole soih tua investointikustannusten vuoksi. (Latvala 2009, 48.)

Kuvasta 4 näemme myös että tuottaessa biokaasusta lämpöä ja sähköä yhteistuotannolla on siitä suositeltavaa poistaa rikki ja siloksaanit. Käytettäessä biokaasua liikennekäytössä on siitä poistettava edellisten lisäksi myös hiilidioksidi ja tämä tapahtuu esimerkiksi vesipesurin avulla. Hiilidioksidin poistoa biokaasusta kutsutaan konsentroinniksi.

### 2.4.1 Biokaasun puhdistusmenetelmät

Jos biokaasua ei aiota käyttää ajoneuvojen polttoaineena tai syöttää maakaasuverkostoon on siitä poistettava ainoastaan rikkivety ja tarvittaessa siloksaanit niiden pitoisuuden ollessa suuri. Rikkivety  $H_2S$  on myrkyllinen ja voimakkaasti korrodoiva yhdiste, joka lyhentää biokaasua käyttävien tuotantolaitteistojen elinikää niihin joutuessaan. Rikkivetyä sisältävää biokaasua poltettaessa syntyy rikinoksiedeita, jotka aiheuttavat mm. korroosiota polttolaitteissa ja happamoittavat moottoriöljyn. Tämän takia rikkivety on poistettava biokaasusta tai sen määrä on ainakin vähennettävä. Esimerkiksi CHP-laitokselle menevän biokaasun rikkivety-pitoisuus saisi olla korkeintaan noin 100 – 500 mg/Nm<sup>3</sup>. Mahdollisimman pieni rikkivedyn pitoisuus CHP-laitoksessa poltettavassa biokaasussa pidentää luonnollisesti biokaasuvoimalan elinikää. Rikkivedyn poistamiseksi onkin olemassa useita erilaisia biologisia, kemiallisia ja fysikaalisia menetelmiä. (Deuplein ja Steinhauser 2008, 335.)

Rikinpoistomenetelmistä biologinen rikinpoisto on yleisin. Biologisessa rikinpoistossa rikkivety absorboidaan ensin veteen ja sen jälkeen se hajotetaan mikrobien avulla. Hajottamiseen tarvittavat bakteerit ovat kaikkialla läsnä, joten niitä ei tarvitse kasvattaa erikseen. Biologisen rikinpoistoprosessin jälkeen biokaasussa on vielä hieman jäljellä rikkivetyä, mutta se silti sopii hyvin poltettavaksi esimerkiksi kaasumoottoreissa. Biokaasulaitoksissa, joissa mädätetään vain biojätteitä, saadaan poistettua vain noin 50 % rikkivedystä biologisella rikinpoistolla. (Deuplein ja Steinhauser 2008, 335.)

Yksinkertaisin tapa rikinpoistoon on kuitenkin pienen alle 4 % ilmamäärän lisääminen reaktorin kaasutilaan. Tällöin reaktorimassassa elävät bakteerit muuttavat biokaasun rikkivedyn alkuainerikiksi. Maatilakokoluokan biokaasulaitoksissa tämä menetelmä voi pelkästään poistaa rikin biokaasusta kokonaan. Liian ilmamäärän syöttäminen reaktoriin voi kuitenkin heikentää prosessia ja pahimmassa tapauksessa jopa pysäyttää sen. (Latvala 2009, 42.)

Rikkivedyn poistaminen on myös mahdollista lisäämällä prosessiin rautaa. Rautaa tulisi lisätä noin 0,1 - 5 kg tuhatta kiloa syötettä kohti. Tällä tekniikalla saadaan esimerkiksi

maatilakokoluokan biokaasulaitoksen biokaasun rikkivetytitoisuus laskemaan noin tasolle 100 ppm. Prosessiin syötetty rauta poistuu jäännöksen mukana. Tätä menetelmää voidaan käyttää myös yhdessä ilman lisäämisen kanssa ja näin saadaan tehostettua rikinpoistoa. (Latvala 2009, 43.)

Muita rikkivedyn poistamistapoja ovat rautaoksidipeti tai rikinpoistoon tarkoitetut kolonnit, jotka voivat olla täytetty esimerkiksi alumiiniteollisuudesta sivutuotteena saatavalla metalleja sisältävällä savella, rautaoksidilla käsitellyillä puulastuilla tai jodipitoisella aktiivihieillä. Suurin ongelma rikkivety on maatioilla, mutta jätevedenpuhdistamoilla rikkivety ei yleensä ole ongelma, sillä se reagoi puhdistamolietteessä olevan, fosforin poistoon käytetyn rautasulfaatin kanssa. (Latvala 2009, 43.)

Siloksaanien poistoon biokaasusta voidaan käyttää absorptiota. Siloksaanit voidaan absorpoida aktiivihieleen tai aktivoituun alumiinioksidiin. Yksinkertaisempi siloksaanien poistomenetelmä on jäähditys, mutta se ei ole niin tehokas menetelmä kuin absorptio. Siloksaanien poisto kannattaa tehdä viimeiseksi, rikkidioksidin ja mahdollisen hiilidioksidin poiston jälkeen. (Deuplein ja Stenhauser 2008, 355.)

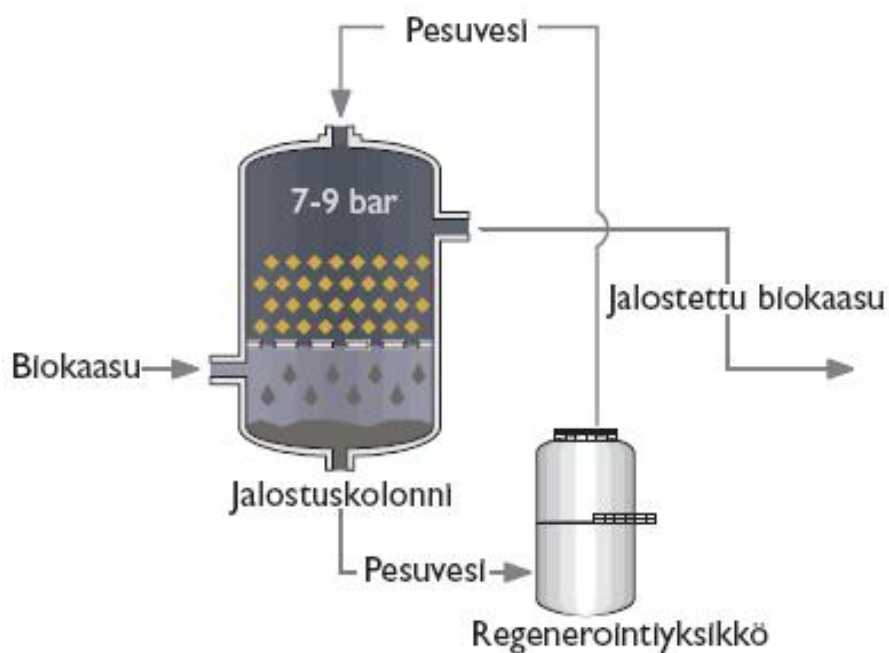
#### **2.4.2 Biokaasun konsentroidintimenetelmät**

Käytettäessä biokaasua liikenteen polttoaineena tai syötettäessä sitä maakaasuverkkoon on se konsentroitava eli siitä on poistettava hiilidioksidi. Yleisin biokaasun konsentroidintimenetelmä on vesipesu. Päättarkoituksena vesipesussa on kaasun hiilidioksidin poisto, mutta sen avulla saadaan poistettua myös muita kaasussa olevia epäpuhtauksia, kuten esimerkiksi rikkivetyä ja siloksaaneja. (Latvala 2009, 42, 47.)

Epäpuhtauksista ainoastaan typpeä ja happea ei saa poistettua vesipesun avulla. Vesipesu on kuitenkin huomattavasti kalliimpi menetelmä kuin muut biokaasun puhdistusmenetelmät, joten sitä kannattaa käyttää ainoastaan silloin kun hiilidioksidi on välttämätöntä poistaa, eli lähinnä vain silloin kun sitä tarkoitus käyttää ajoneuvojen polttoaineena tai sitä aiotaan syöttää maakaasuverkostoon. Vesipesumenetelmän toiminta

perustuu siihen, että hiilidioksidi on muita biokaasun komponentteja helpommin liukenevaa. Vesipesu toimii käytännössä siten, että 7 – 9 bar:n paineeseen paineistettu pesuvesi johdetaan jalostuskolonnein sen yläpuolelta ja biokaasu vastaavasti syötetään kolonnein sen alapuoliselta sivulta, josta se virtaa ylöspäin vesivirtaa vastaan. Vesi ja sen sitoma hiilidioksidi poistetaan kolonnin alaosasta ja puhdistettu biokaasu toiselta sivulta kolonnin yläosasta. Kolonnissa voidaan käyttää myös veden sijasta erilaisia kemikaaliliuoksia, jotka sitovat hiilidioksidia vettä tehokkaammin. Kolonnissa käytetty vesi ja kemikaaliliuokset on yleensä mahdollista käyttää uudelleen regeneroinnin jälkeen. (Deuplein ja Steinhauser 2008, 345; Latvala 2009, 47.)

Kuvassa 5 on esitetty biokaasun jalostukseen käytetyn kolonnin toimintaperiaate.



**Kuva 5.** Biokaasun jalostukseen käytettävän kolonnin toimintaperiaate. (Latvala 2009, 47.)

## 2.4 Potentiaali

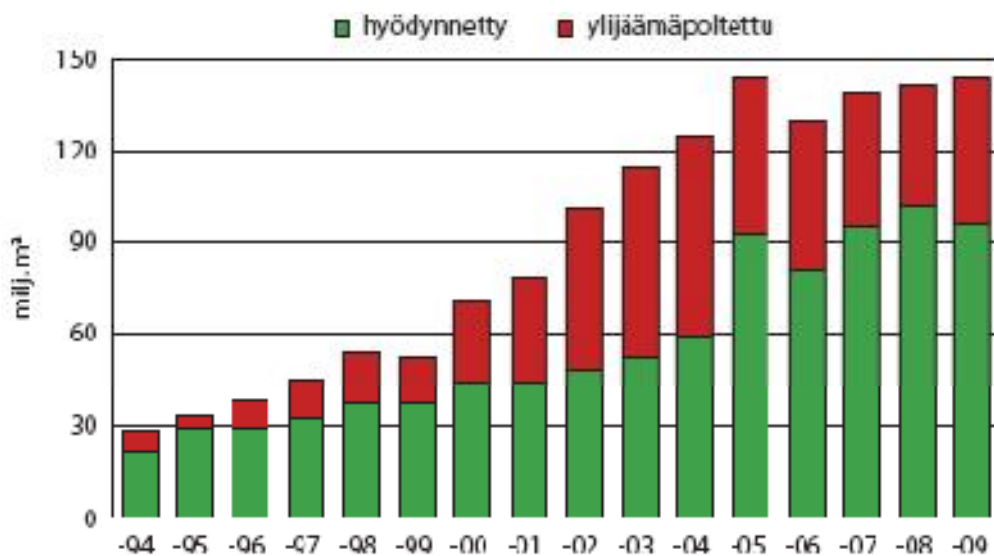
EU-maista suurin biokaasun tuottaja on Saksa, jonka rakennettu biokaasun tuotantokapasiteetti vuoteen 2007 mennessä oli 1280 MW ja yhteensä biokaasua tuottavia laitoksia oli 3 750 kappaletta. Tuotetun biokaasun energiamäärä oli 22 000 GWh. Lisäksi



Saksassa Konnernissa sijaitseva maailman toiseksi suurin biokaasulaitos alkoi syöttää vuoden 2009 alusta 15 miljoonaa kuutiometriä biokaasua vuodessa valtakunnalliseen maakaasuverkkoon. Saksan tavoitteena onkin korvata vuoteen 2020 mennessä 20 % maakaasun tarpeesta biokaasulla. (Burgermeister 2008.)

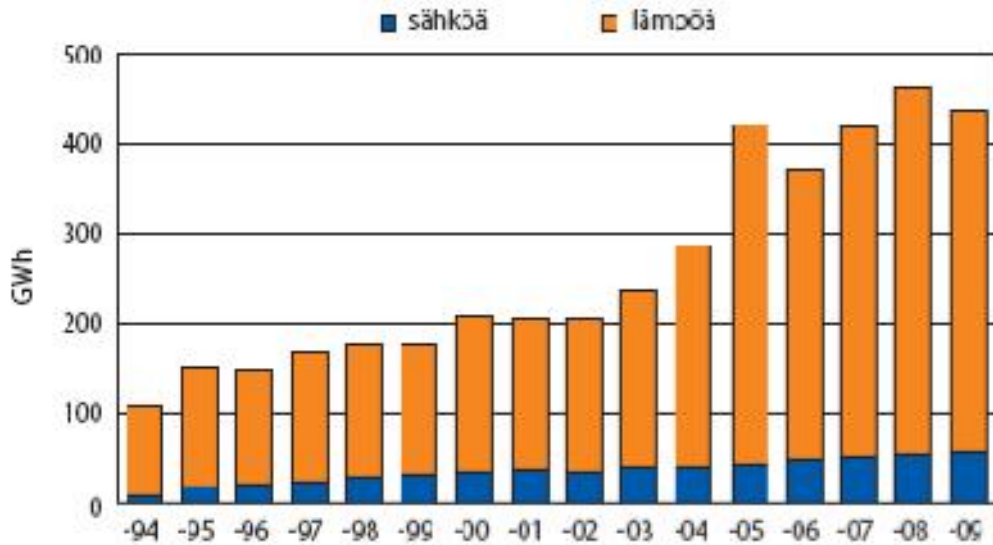
Vuonna 2009 Suomessa tuotettiin biokaasua yhteensä 144,49 miljoonaa m<sup>3</sup>. Vuoteen 2008 verrattuna biokaasun tuotannon määrä nousi noin 2 %. Kuitenkin hyödynnetyn biokaasun määrä laski biokaasun hyödyntämistason laskiessa 72 %:sta noin 67 %:iin. Suurin syy tähän laskuun oli väliaikainen vähentymä Espoon Ämmänsuon kaatopaikan biokaasun hyödyntämisessä. Biokaasusta tuotettiin vuonna 2009 sähköä 58,1 GWh ja lämpöä 378,4 GWh eli tuotettu energiamäärä oli yhteensä 436,4 GWh, joka on alle 1 % Suomessa tuotetusta uusiutuvan energian tuotannosta. (Kuittinen et al 2010, 13.)

Kuvassa 6 on esitetty vuosina 1994-2009 Suomessa tuotettu biokaasun määrä ja sen hyödyntäminen.



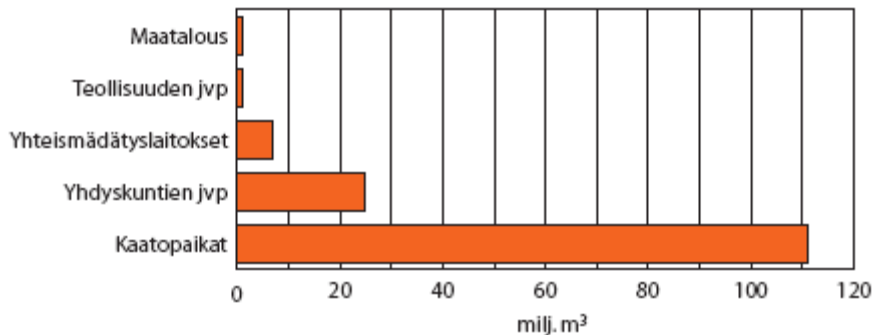
**Kuva 6.** Suomessa vuosina 1994-2009 tuotettu ja hyödynnetty biokaasu. (Kuittinen et al 2010, 14.)

Kuvassa 7 on taas esitetty biokaasulla tuotettu energiamäärä vuosina 1994-2009.



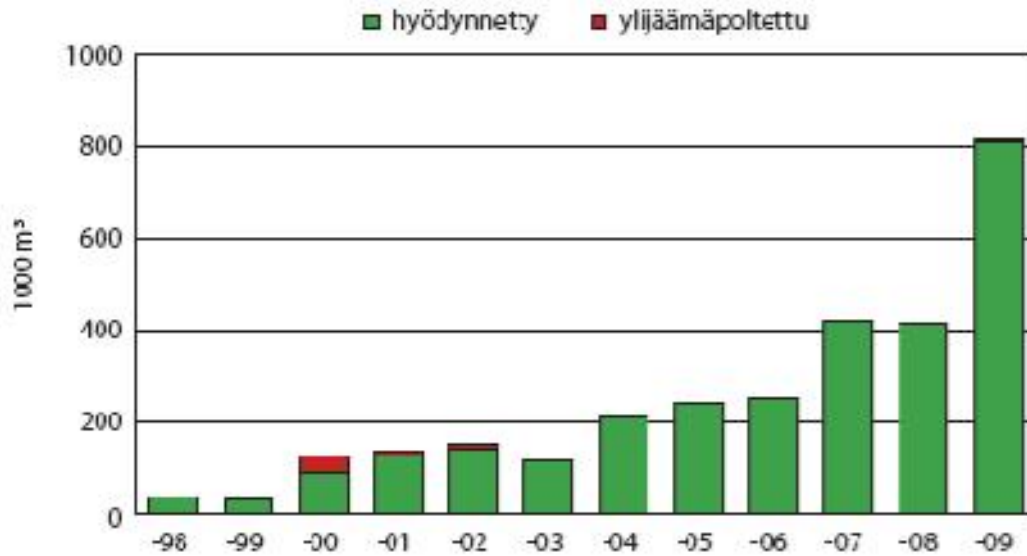
**Kuva 7.** Biokaasulla tuotettu energiamäärä vuosina 1994-2009. (Kuittinen et al 2010, 14.)

Suurin osa Suomessa tuotetusta biokaasusta tuotetaan kaatopaikoilla, mutta tässä työssä keskitytään kuitenkin biokaasureaktoreilla tuotettuun biokaasuun. Biokaasureaktoreilla tuotetun biokaasun määrä on noussut vain hieman viimeisen kymmenen vuoden aikana. Tuotetun biokaasun määrä on ollut keskimäärin 28 milj. m<sup>3</sup>. Kuvassa 8 on esitetty biokaasun tuotanto laitostyypeittäin vuonna 2009. (Kuittinen et al 2010, 15.)



**Kuva 8.** Biokaasun tuotanto laitostyypeittäin vuonna 2009. (Kuittinen et al 2010, 14.)

Reaktorilaitoksilla tuotetusta biokaasusta suurimman osan tuottaa jätevedenpuhdistamoilla sijaitsevat biokaasureaktorit. Kuvassa 9 on esitetty maatalojen tuottama biokaasun määrä vuosina 1994-2009, joka on vain murto-osa Suomen biokaasun kokonaistuotannosta.



**Kuva 9.** Maatiloilla tuotettu ja hyödynnetty biokaasu Suomessa vuosina 1994-2009. (Kuittinen et al 2010, 21.)

Vuonna 2009 tuotetun biokaasun määrän suuren nousun syynä on MTT:n tutkimuslaitoksille Sotkamoon kesällä 2008 ja Maaningalle kesällä 2009 valmistuneet biokaasulaitokset.

Taulukossa 2 esitetty maatilalaitosten tuotantotietoja Suomessa vuodelta 2009.

**Taulukko 2.** Maatilalaitosten tuotantotietoja Suomessa vuodelta 2009. (Kuittinen et al 2010, 21.)

Biokaasua tuotettu	0,815	milj. m <sup>3</sup>
Biokaasua hyödynnetty	0,810	milj. m <sup>3</sup>
Sähköä tuotettu	1019	MWh
Lämpöä tuotettu	3087	MWh
Mekaanista energiaa tuotettu	47	MWh
Metaanipitoisuus	55-67	%

Reaktorilaitoksilla tuotetun biokaasun määrä on pysynyt lähes muuttumattomana viimeisen reilun 10 vuoden aikana. Biokaasun tuotantopotentiaalia olisi kuitenkin reilusti, mutta teknistaloudelliset näkökohdat asettavat rajoitteita biokaasun tuotannolle. Taulukossa 3 on

esitetty biokaasun tuotannon maksimipotentiaali sekä teknistaloudellinen maksimipotentiaali ja arvioitu tuotantomahdollisuus Suomessa vuonna 2015.

**Taulukko 3.** Biokaasun tuotantopotentiaalit Suomessa vuonna 2015. (Asplund et al 2005, 20-21.)

	<b>Maksimituotanto- potentiaali [TWh]</b>	<b>Teknis- taloudellinen potentiaali [TWh]</b>	<b>Arvioitu tuotantomahdollisuus [TWh]</b>
Yhdyskuntajäte	0,9-1,3	0,5-0,8	0,1-0,2
Elintarviketeollisuus	0,4-0,6	0,2-0,3	0,04-0,064
Jätevedenpuhdistamoiden liete	0,9	0,2	0,2
Lanta ja olki	30-140	3,0-14	0,2-0,7
Peltobiomassat (Kesantopelto)	6,8	2,1	1,1
Kaatopaikkakaasu	0,7	0,7	0,7
Yhteensä	40-150	6,7-18	2,3-3,0

Taulukon 3 näemme, että vuonna 2009 biokaasulla tuotettu kokonaisenergia on vielä kaukana arvioidusta tuotantomahdollisuudesta, kun se vuonna 2009 oli 0,44 TWh. Onkin hyvin todennäköistä, ettei arvioitua tuotantomahdollisuutta saavuteta vielä vuonna 2015, sillä Suomen uusiutuvan energian velvoitepaketissa tavoitteena on tuottaa biokaasulla vuonna 2020 1 TWh energiaa. Tulevat sähkön syöttötariffijärjestelmät tulevat kuitenkin lisäämään investointeja lämmön ja sähkön yhteistuotantoon biokaasulla.

## **2.5 Jakeluverkostot biokaasulle**

Biokaasun siirtoon ja jakeluun voidaan käyttää samoja järjestelmiä kuin maakaasulle. Biokaasu on kuitenkin puhdistettava esimerkiksi vesipesun avulla ennen sen syöttöä maakaasuverkostoon.

Gasum ja energiayhtiö KSS Energia rakentavat Kouvolan Mäkikylän jätevedenpuhdistamon yhteyteen laitoksen, joka mahdollistaa biokaasun tuotannon jalostuksen ja ensimmäisen laajan biokaasun syöttämisen maakaasuverkkoon Suomessa. Biokaasun tuotanto laitoksella aloitetaan alkuvuodesta 2011, ja verkkoon sitä aletaan syöttää syksyllä 2011. Gasumin mukaan tavoitteena laitoksella on tuottaa biokaasua maakaasuverkkoon noin 7 GWh vuodessa, joka esimerkiksi riittäisi pääkaupunkiseudulla reilun kymmenen kaasubussin polttoaineeksi (Gasum 2010). Myös Biovakka ja Gasum suunnittelevat yhteistä laitosta Nastolaan, josta syötetään biokaasua maakaasuverkkoon. Laitoksen tuottaman biokaasun energiamäärä on vuodessa 50 GWh (Biovakka 2010).

Biokaasua voidaankin jatkossa tankata Gasumin maakaasun tankkausasemilta. Gasumilla on tällä hetkellä 14 omaa tankkauspistettä, mutta tavoitteena on lisätä tankkauspisteitä tulevaisuudessa. Gasumin tavoitteena onkin kattaa tulevaisuudessa valtaosa liikennekäyttöön tarvitsemasta kaasumäärästä biokaasulla. (Seppälä 2009.)

Biokaasun siirtoa varten on mahdollista rakentaa myös oma putki, jonka avulla se voidaan siirtää tuotantolaitokselta käyttökohteeseen. Oman siirtoputken rakentaminen on kuitenkin kallista ja se ei yleensä ole kannattavaa kuin lyhyillä matkoilla. Esimerkiksi Joensuun voimalaitokselle on rakennettu biokaasun siirtoputki läheiseltä Kontiosuon kaatopaikalta. Voimalaitos käyttää noin 8 GWh biokaasua vuodessa (Partanen 2009, 6).

### **3 SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTOTEKNIIKAT BIOKAASULLE**

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto CHP on erittäin yleistä nykypäivän biokaasulaitoksilla sen hyvän kokonaishyötysuhteen ansiosta. Nykypäivän tekniikalla voidaan päästä lämmön ja sähkön yhteistuotannossa jopa noin 85 – 90 % kokonaishyötysuhteeseen ja näin ainoastaan 10 – 15 % biokaasun sisältämästä energiasta menee hukkaan.

Kokonaishyötysuhde on kuitenkin yleisesti pienen kokoluokan laitteistoilla pienempi kuin suuren kokoluokan tekniikalla. Myös sähkön tuotantohyötysuhde vaihtelee tuotantotavasta riippuen, mutta sekin on maksimissaan 40 %. (Deuplein ja Steinhäuser 2008, 367.)

Arviolta puolet nykypäivän biokaasulla toimivista lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksista käyttää ottomoottoritekniikka hyödyntävää kaasumoottoria ja puolet diesel-moottorin tekniikka hyödyntäviä kaksoispolttoainemoottoreita (dual-fuel-moottori). Myös mikroturbiinit ovat alkaneet yleistyä pienen kokoluokan lämmön ja sähkön yhteistuotannossa. Pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotannossa olisi myös mahdollista käyttää Stirling-moottoria tai polttokennoa, mutta nämä ovat vielä nykypäivän erittäin harvinaisia ja näin niitä ei käsitellä tässä työssä. Stirling-moottori ja polttokenno voivat kuitenkin kasvattaa suosiotaan tulevaisuudessa tekniikan kehittyessä. (Deuplein ja Steinhäuser 2008, 367.)

### **3.1 Kaasumoottorit**

Kaasumoottorissa normaalin polttomoottorin tekemä mekaaninen työ muutetaan generaattorin avulla sähköksi. Sähköntuottohyötysuhde kaasumoottoreissa on yleensä noin 35 – 40 %. Lisäksi lämmön ja sähkön yhteistuotannossa voidaan pakokaasujen sisältämästä lämmöstä ottaa talteen jopa 70 % ja näin voidaan saavuttaa kokonaishyötysuhde 75 – 85 %. Kaasumoottoreiden sähköntuottokapasiteetti on 15 kW:sta ylöspäin suunnittelusta riippuen. (OPET Network 2002, 1, 8.)

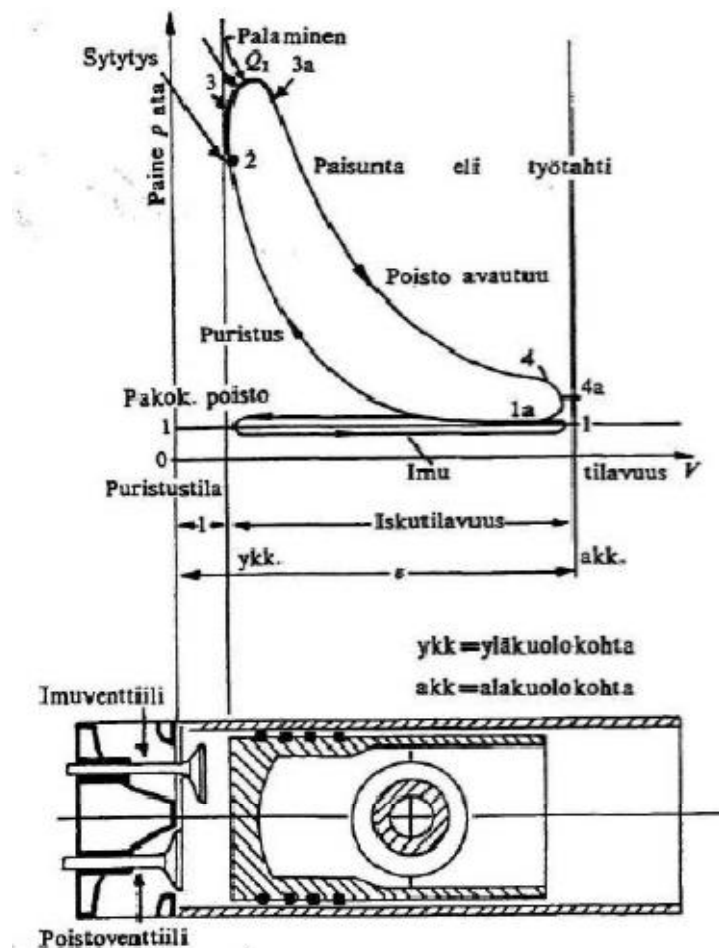
Kaasumoottorina voidaan käyttää nelitahtista otto-moottoria. Puristussuhde moottorissa biokaasua käytettäessä voi olla 11 – 12,5, joka on hieman suurempi kuin normaalin bensiinikäyttöisen otto-moottorin puristussuhde. Puristussuhteen korkeamman arvon ansiosta voidaan saavuttaa hieman korkeampi moottorin hyötysuhde.

Otto-moottoritekniikkaa käyttävän kaasumoottorin sylinterissä biokaasu sytytetään kipinän avulla. Reaktorissa tuotetun biokaasun metaanipitoisuuden vaihtelun takia on biokaasua käyttävät otto-moottorit yleensä varustettu automaattisella sytytyksen säädöllä. Tällä saadaan sytytyksen ajoitus säädettyä kaasun koostumukselle sopivaksi moottoriin syötetyn

biokaasun metaanipitoisuusmittauksen ja nakutustunnistimen perusteella. (Deuplein ja Stenhauser 2008, 370.)

Nelitahti-ottomoottoria käytettäessä on moottoriin menevä biokaasun ja ilman seos hyvä ahtaa turboahtimen avulla. Käyttämällä turboahdinta ja välijäähdytintä, jossa ahdettu ilman jäähdytetään, voidaan moottorin suorituskyky nostaa jopa 1,5-kertaiseksi. (Deuplein ja Stenhauser 2008, 370.)

Kuvassa 10 on esitetty nelitahtisen ottomoottorin toimintaperiaate.

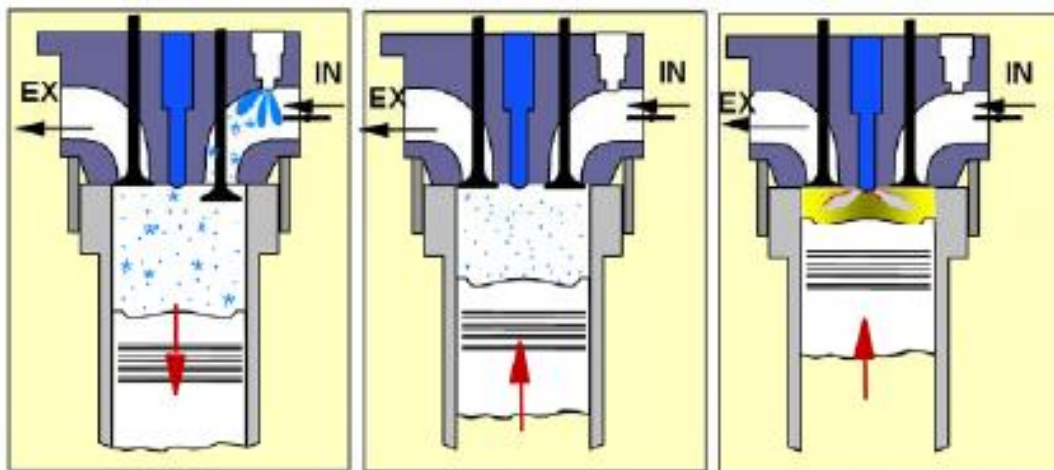


**Kuva 10.** Nelitahtisen otto-moottorin toimintakaavio indikaattoriirroksessa. (Larjola 2008, 9.)

Biokaasua voidaan käyttää polttoaineena myös diesel-moottorissa. Metaanin korkean syttymislämpötilan takia dieselmoottorilla ei voida kuitenkaan saavuttaa tarpeeksi suurta puristussuhdetta, jotta biokaasu syttyisi. Tästä johtuen biokaasun ja ilman seokseen

ruiskutetaan sytytyshetkellä diesel-öljyä, jotta puristus sytytys olisi mahdollista. Tätä tekniikkaa hyödyntävää moottoria kutsutaan kaksoispolttoainemoottoriksi. Biokaasun metaanipitoisuudesta riippuen on ruiskutettavan dieselöljyn määrä oltava polttoaineessa noin 10 %. (Deuplein ja Stenhauser 2008, 370.)

Kuvassa 11 on esitetty dieselöljyä sytytykseen käyttävän kaksoispolttoainemoottorin toimintaperiaate. Ensimmäisessä vaiheessa sylinteriin imetään biokaasun ja ilman seos. Toisessa vaiheessa biokaasun ja ilman seosta puristetaan männän liikkumalla kohti yläkuolokohdansa. Yläkuolokohdassa sylinteriin ruiskutetaan dieselöljyä, jolloin polttoaineseos syttyy ja muodostuneen paineen ansiosta mäntä lähtee liikkumaan jälleen alaspäin.



**Kuva 11.** Dieselöljyä sytytykseen käyttävän kaasumoottorin toimintaperiaate. (Larjola 2008, 20.)

Pienen kokoluokan kaasumoottoreissa Dieselmootorin tekniikkaa käyttävä kaksoispolttoainemoottori on taloudellisesti kannattavampi sekä sillä saavutetaan pienessä kokoluokassa suurempi hyötysuhde kuin otto-moottorissa. Tästä johtuen se onkin yleisempi ratkaisu pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantoon käytettäessä kaasumoottoria. (Deuplein ja Stenhauser 2008, 370.)

Kaasumoottoreiden perushuoltoväli, jossa tehdään esimerkiksi öljynvaihto, on 2000-5000 tuntia. Suuremman peruskorjauksen väli on noin 20000 tuntia. Kaasumoottoreiden tekniikka perustuu normaaliin polttomoottoritekologiaan, joten yksinkertaisimmat huollot on helppo tehdä myös omaa työpanosta käyttäen. (Vartiainen et al 2002, 17.)



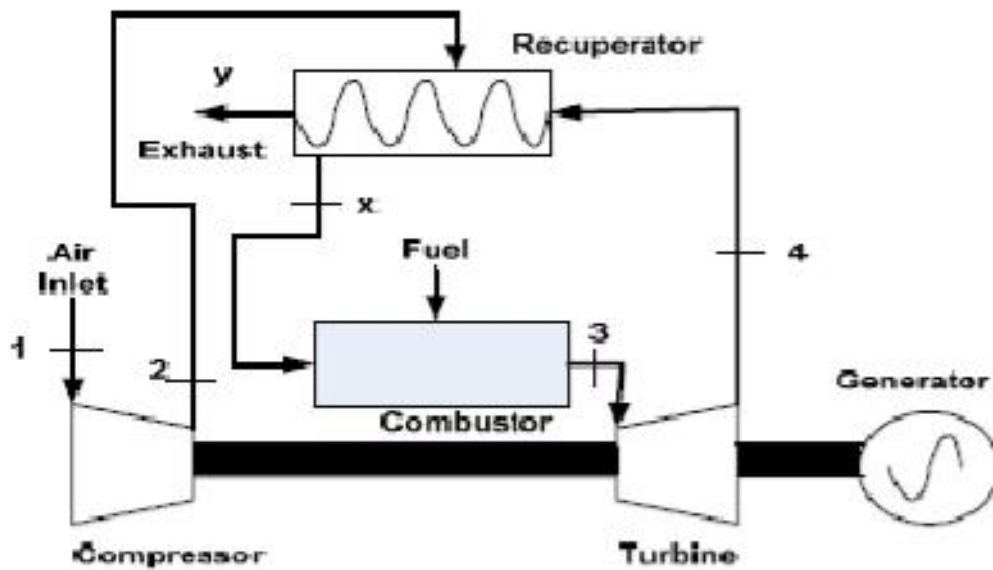
Lämpöä saadaan otettua talteen moottorin jälkeisistä savukaasuista, johtamalla kuumat savukaasut lämmönsiirtimen läpi. Lämmönsiirtimen toisena kiertoaineena on vesi, joka lämpenee savukaasujen vaikutuksesta.

### **3.2 Mikroturbiinit**

Mikroturbiinit ovat pienen kokoluokan kaasuturbiineita. Valtaosa mikroturbiineista on yksiakselisia eli kompressori, turbiini sekä generaattori on usein kytketty samalle akselille. Kompressori ja turbiini ovat rakenteeltaan tavallisesti radiaalisia. Sähköteholtaan mikroturbiinit ovat yleisesti 25-350 kW<sub>e</sub>, joten ne soveltuvat hyvin pienen kokoluokan energiantuotantoon. Mikroturbiineiden pyörimisnopeus on 90 000-120 000 rpm. Generaattorin pyöriessä turbokoneiden edellyttämällä suurella pyörimisnopeudella, tuottaa se suurtaajuuksista sähköä. Tämä suurtaajuuksinen sähkö saadaan muunnettua taajuusmuuntajan avulla verkon taajuuteen. Lämpöä prosessista saadaan ottamalla turbiinin jälkeisistä savukaasuista hukkalämpö talteen. (m-CHP instructional module 2005, 4-22.)

Mikroturbiinissa voidaan laakeroinnissa käyttää ilmalaakerointi, joka on voiteluvapaa ja näin kunnossapito on helppoa. Mikroturbiinien suurena etuna on pitkä huolto- ja kuluvien osien vaihtoväli, 40 000 h, ja ensimmäinen huolto vaaditaan vasta 8000 tunnin, eli käytännössä aikaisintaan yhden vuoden jälkeen. (m-CHP instructional module 2005, 4-22.)

Mikroturbiinit ovat toimintaperiaatteeltaan samanlaisia kuin isomman kokoluokan kaasuturbiinit. Biokaasua käytettäessä kaasu poltetaan ulkoisessa polttokammiossa, johon syötetään paineistettua ilmaa kompressorilta. Syntyvä savukaasu johdetaan turbiiniin joka pyörittää sekä kompressoria, että generaattoria. Savukaasuihin jäävällä lämmöllä lämmitetään yleensä palamisilmaa, sillä ilman rekuperaattoria mikroturbiinin hyötysuhde jäisi alhaiseksi. Rekuperaattorin jälkeen savukaasuissa on vielä lämpöä, joka voidaan ottaa talteen. Kuvassa 12 on esitetty mikroturbiinin kiertoprosessi.



**Kuva 12.** Mikroturbiinin kiertoprosessi varustettuna rekuperaattorilla. (m-CHP instructional module 2005, 4-22.)

Kuvassa 13 on esitetty mikroturbiinin akseli, jossa on radiaalinen kompressori ja turbiini.



**Kuva 13.** Ilmalaakeroidun mikroturbiinin akseli. (Capstone 2010.)

Ilman rekuperaattoria jää mikroturbiinin sähköntuottohyötysuhde noin 15 %:iin ja rekuperaattorilla varustetun mikroturbiinin sähköntuottohyötysuhde vaihtelee välillä 20-30 %. Suuri ero hyötysuhteissa johtuu siitä, että palamisilman esilämmitys vähentää polttoaineen tarvetta. Kokonaishyötysuhteeksi voidaan saada sähkön ja lämmön yhteistuotannossa jopa 85 % otettaessa savukaasuista hukkalämpöä hyötykäyttöön. (m-CHP instructional module, 4-22.)

Etuina kaasumoottoriin verrattuna mikroturbiinilla on sen alhaisemmat päästöt. Esimerkiksi typen oksidipäästöt ovat vain noin 20 ppm kun ne vastaavasti ovat pienen kokoluokan kaasumoottorilla noin 1100 ppm. Lisäksi käyttökustannukset ovat mikroturbiinilla edullisemmat kuin kaasumoottoreilla sen helpon huollettavuuden ansiosta. Myös käyntiääni on mikroturbiinilla huomattavasti hiljaisempi kuin kaasumoottorilla. (Hintikka 2004, 5, 8.)

### 3.3 Käyttökokemukset

Käyttökokemukset biokaasusta pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotannossa ovat olleet hyviä. Esimerkiksi Turbecilla on hyviä kokemuksia biokaasusta mikroturbiinin polttoaineena toteutuneista projekteista. Biokaasu onkin puhdas polttoaine ja poistettaessa siitä rikkivedyt soveltuu se lähes maakaasun lailla polttoaineeksi.

Turbec epäili tuotekehityksensä alussa, että puhdistamattoman biokaasun käyttöön mikroturbiineissa saattaisi liittyä monia ongelmia. Ongelmaksi epäiltiin, ettei biokaasua voida puristaa normaalissa öljyvoidellussa ruuvikompressorissa. Myös siloksaanien epäiltiin aiheuttavan vahinkoa mikroturbiinin polttokammiossa ja turbiinin siivistöissä. Tuotekehityksen myötä biokaasu ei kuitenkaan aiheuta haitallisia ja korrodoivia vaikutuksia polttokammioon, turbiinin siivistöön tai rekuperaattoriin. Lämmöntalteenoton lämmönvaihtimessa rikkivedyt ja siloksaanit ovat aiheuttaneet jonkin verran likaantumista riippuen niiden pitoisuuksien suuruudesta biokaasussa. Lämmönvaihtimen osat on kuitenkin helposti puhdistettavissa esimerkiksi painepesurilla. Turbecin T100 mikroturbiinia voidaankin ajaa biokaasulla samalla huolto-ohjelmalla kuin käytettäessä maakaasua. Myös samaa tekniikkaa ja huolto-ohjelmaa voidaan käyttää ruuvikompressorissa, kuin maakaasulla. (Bianchi 2008.)

Polttomoottorin säätöjen tulee kokemusten mukaan olla tehty huolella biokaasulle, jotta päästöt pysyisivät alhaisina. Esimerkiksi ajettaessa kaksoispolttoainemoottoria osakuormalla, saattavat CO-päästöt nousta korkeiksi sillä palaminen ei tapahdu tarpeeksi nopeasti ja palamisreaktio ei ehdi toteutumaan sylinterissä täydellisesti. Tästä johtuen kaksoispolttoainemoottoria tulisikin käyttää pääosin täydellä kuormalla.

Kaksoispolttoainemoottorissa sytytykseen käytetyn dieselöljyn määrään kannattaa myös kiinnittää huomiota, sillä liian suuri pitoisuus dieselöljyä aiheuttaa suuria NO<sub>x</sub>-päästöjä. (Deuplein ja Stenhauser 2008, 386-387.)

## **4 KUSTANNUKSET JA KANNATTAVUUS**

Biokaasulla tuotetun sähkön ja lämmön kannattavuuteen vaikuttavat siihen saatavien erilaisten tukien määrä. Rakennusvaiheessa on mahdollista saada valtiolta investointitukea. Maatalouden mikroyritys voi saada biopohjaiseen energiantuotantoon investointitukea, joka on suuruudeltaan 10-35 % hyväksyttävistä kokonaiskustannuksista. Tuen suuruus riippuu yrityksen sijainnista ja yritystyyppistä, mutta useimmiten tuen myöntämisessä noudatetaan enimmäistasoa. (TEM 2009, 33.)

Biokaasulla tuotetun sähkön tuotantotuesta on Työ- ja elinkeinoministeriö valmistellut lakia, joka tulisi voimaan 1.1.2011. Laki määrittäisi syöttötariffijärjestelmän, jonka avulla sähkön tuottajalle maksettaisiin 12 vuoden ajan tukea sähkön tuotantokustannusten ja kyseisen energialähteen markkinahinnan tai vaihtoehtoisen polttoaineen kustannusten välisen erotuksen kattamiseksi. Syöttötariffijärjestelmään hyväksyttävien biokaasuvoimaloiden generaattoreiden yhteenlasketun nimellistehon tulisi olla vähintään 100 kW<sub>e</sub>. Tavoitehinta tukijärjestelmässä olisi 83,5 €/MWh ja jos kyseessä on sähkön ja lämmön yhteistuotanto, jonka kokonaishyötysuhde on vuositasolla yli 50 %, on tuotetulle sähkölle mahdollista saada lämpöpreemio, jonka suuruus on 50 €/MWh. (TEM 2010.)

Syöttötariffijärjestelmän generaattoreiden yhteistehon rajan ollessa 100 kW<sub>e</sub> jäävät pienten maatilojen pienen kokoluokan biokaasulaitokset sen ulkopuolelle. Tämä saattaakin olla merkittävä pienen kokoluokan laitosten investointeja rajoittava tekijä. Syöttötariffijärjestelmällä saatettaisiin kuitenkin saada suuren kokoluokan biokaasulaitokset, kuten esimerkiksi monen sikalan yhteinen biokaasulaitos kannattavaksi.

### **4.1 Biokaasureaktori**

Biokaasureaktorin rakentamiskulut ovat hyvin yksilöllisiä. Biokaasureaktorin koko vaikuttaa luonnollisesti investointikustannuksiin, mutta muut vaikuttavat tekijät ovat tilalla oleva infrastruktuuri, laitoksen sijainti, rakentamisessa käytettävät materiaalit ja laitoksen tekniikka sekä automaatioaste. Myös biokaasureaktorissa käytettävät syötteet vaikuttavat reaktorin investointikustannuksiin, kuten esimerkiksi tilan ulkopuolelta tuotavat hygienisointia vaativat syötteet nostavat investointikustannuksia. (Latvala et al 2007, 44.)

Saksassa biokaasulaitoksen investointikustannus on laitoksen koosta ja toteutustavasta riippuen noin 200-1200 € reaktoritilavuutta (m<sup>3</sup>) kohden. Suomessa rakennetuissa biokaasulaitoksissa investointikustannus on ollut yleisesti yli 1000 € reaktoritilavuutta (m<sup>3</sup>) kohden. Investoinnin kustannuksia voidaan myös kuvata suhteessa laitoksen sähkötehoon. Saksassa tämä on tyypillisesti 2500-3000 €/kW<sub>e</sub>, ja Suomessa vastaavasti yli 4000 €/kW<sub>e</sub>. Näiden investointikustannuksien suuruutta Suomessa selittää se, että Suomessa rakennetut laitokset ovat yleensä pienikokoisia eikä kysyntä laitoksille ole suurta, joten sarjatuotantoa ei voida toteuttaa. (Latvala et al 2007, 44.)

Biokaasulaitoksen omakäyttötehontarve vaihtelee suuresti laitoksesta ja syötteestä riippuen. Käytännön kokemusten perusteella keskimääräinen oma sähkönkäyttö maatilakokoluokan laitoksessa on noin 35 % tuotetusta sähköstä jos sähköntuotannon hyötysuhde on 30 % ja oma lämmönkulutus reaktorilla on noin 37 % tuotetusta lämmöstä lämmöntuoton hyötysuhteen ollessa 42 %. Reaktorin käyttämän lämmön osuus voi olla huomattavasti suurempikin kuin edellä mainittu. (Biokaasu-lehti 2010, 12.)

## **4.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotantoyksikkö**

Tässä työssä käsitellään ainoastaan kaasumottoreiden ja mikroturbiineiden investointi- ja käyttökustannuksia sillä stirling-moottoreiden investointikustannukset ovat huomattavasti korkeammat niihin verrattuna ja polttokennoa ei ole vielä kaupallisesti saatavana. Taulukossa 4 on esitetty kaasumoottoreiden ja mikroturbiineiden investointikustannukset sekä käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Kustannukset on esitetty tuotantovaihtoehdoille, jotka käyttävät polttoaineenaan biokaasua ja joiden kokoluokka on 20-100 kW<sub>e</sub>.

**Taulukko 4.** Kustannuksia eri tuotantotavoille. (Simader et al 2006, 10, 6; Kalmari ja Luostarinen 2010, 11.)

<b>Tekniikka</b>	<b>Investointikustannus [€kW<sub>e</sub>]</b>	<b>Käyttö- ja kunnossapitokustannus [€kWh<sub>e</sub>]</b>
Mikroturbiini	1500-2500	0,006-0,021
Ottomoottori	900-1500	0,0075-0,015
Dual-Fuel moottori	900-1200	0,0075-0,015

Taulukkoon 5 on koottu eri tuotantovaihtoehtojen hyötysuhteet.

**Taulukko 5.** Eri tuotantomuotojen hyötysuhteita. (Kalmari ja Luostarinen 2010, 11.)

<b>Tekniikka</b>	<b>Sähköntuotto- hyötysuhde [%]</b>	<b>Lämmöntuotto- hyötysuhde [%]</b>	<b>Kokonais- hyötysuhde [%]</b>
Mikroturbiini	15-33	50-60	80-85
Ottomoottori	30-38	50-60	80-85
Dual-Fuel moottori	37-40	37-39	75-80

Taulukosta 4 näemme, että mikroturbiinin investointikustannus on huomattavasti suurempi kuin kaasumoottoreilla. Mikroturbiinin vähäisemmästä huollontarpeesta johtuen, verrattuna kaasumoottoriin, on kuitenkin sen käyttö- ja kunnossapitokustannukset kaasumoottoria halvemmat. Kaasumoottoreiden tekniikka perustuu kuitenkin normaaliin polttomoottoritekнологiaan, joten yksinkertaisimmat huollot on helppo tehdä myös omaa työpanosta käyttäen.

Kaasumoottoreiden keskimääräinen kokonais- ja sähköntuottohyötysuhde on korkeampi täydellä kuormalla kuin mikroturbiineilla. Yleisesti sähkön ja lämmön yhteistuotantoon suunnitellut kaasumoottorit ovat vakiokierrosluvulla käyviä, joten

sähköntuotannonhyötysuhde pienenee kuorman pienentyessä. Markkinoilla on jo kuitenkin tietyissä kokoluokissa laajan säätöalueen omaavia moottoreita. Mikroturbiineissa esimerkiksi Capstonen 30 kW<sub>e</sub> mikroturbiini säätty alueella 1-30 kW<sub>e</sub>, sähköntuottohyötysuhteen ollessa 9-25 %. (Kalmari ja Luostarinen 2010, 12.)

Polttomoottorit pystyvät käyttämään biokaasua metaanipitoisuusalueella 48-70 %, mutta mikroturbiinille riittää biokaasu, jonka metaanipitoisuus ylittää 30 %. Tämä onkin mikroturbiinille kilpailuetu, joka näkyy erityisesti kaatopaikkakaasua käytettäessä. (Kalmari ja Luostarinen 2010, 12.)

### 4.3 Esimerkkilaitos

Tässä kappaleessa esitetään suuntaa antavat laskelmat esimerkkilaitoksen investoinnin kannattavuudesta. Esimerkkilaitoksena käytetään 1000 emakon emakkosikalaa, jonka vuotuinen biokaasun tuotanto vastaa energiana 1200 MWh eli jatkuvana polttoainetehona noin 140 kW. Kooltaan tämä laitoksenkonsepti on sellainen, että sille löytyy kaupallista sähkön ja lämmön yhteistuotantotekniikkaa eli biokaasumoottoreita ja mikroturbiineita. Taulukossa 6 on esitetty laitoksen arvioidut kokonaisinvestointikustannukset käytettäessä kaasumoottoritekniikkaa. (Hagström et al 2005, 35.)

**Taulukko 6.** Esimerkkilaitoksen investointikustannukset. (Hagström et al 2005, 35.)

Komponentti	Investointi [€]
Lietelannan vastaanotto ja käsittely	20 000
Biokaasureaktori	100 000
Lietteen jälkikäsittely	30 000
Kaasun käsittely	10 000
Sähkön ja lämmön tuotanto	100 000
Lämmön talteenotto	20 000

Rakennus, asennus ym. kustannukset	100 000
<b>Yhteensä</b>	<b>380 000</b>

Taulukossa 6 esitetyt kustannukset perustuvat sekä toteutuneisiin kustannuksiin toteutuneista kohteista, että tarjouksiin uusista suunnitteilla olevista kohteista. Biokaasureaktori sekä sähkön ja lämmön tuotantoyksikkö ovat suurimpia yksittäisiä kustannuksia, mutta myös muiden kustannusten eli perustöiden, suunnittelun, rakentamisen ja valvonnan sekä sähkö- ja lvi ym. asennustöiden osuus koko investoinnista on merkittävä. Näistä kustannuksista voidaan luonnollisesti säästää iso osa tekemällä osatöistä itse.

Esimerkkilaskelmassa on oletettu kaasumootorin sähköntuotannon hyötysuhteeksi 28 % ja laitoksen lämmöntuotannon hyötysuhteeksi 27 %. Hyötysuhteissa on huomioitu laitoksen omakäyttöteho, jonka on oletettu olevan 25 % tuotetun biokaasun energiamäärästä. Omakäyttösähkön oletetaan kuluttavan noin 10 % ja omakäyttölämmön noin 15 % tuotetun biokaasun energiamäärästä. Sähkötuottohyötysuhteen oletetaan siis olevan melko korkea eli 38 % ja lämmöntuottohyötysuhteen oletetaan olevan 42 %. Hyötysuhteet oletetaan edustavan vuoden keskimääräisiä arvoja biokaasulaitokselle ja sen energiantuotannolle. Vuotuiseksi sähkön tarpeeksi tilalla on oletettu 300 kWh/emakko ja lämmön tarpeeksi myös 300 kWh/emakko. Taulukossa 7 on esitetty energiamäärät peruslaskelmalle. (Hagström et al 2005, 34.)

**Taulukko 7.** Energiamäärät peruslaskelmalle. (Hagström et al 2005, 34.)

	<b>Energiamäärä [MWh/a]</b>
Sähkön nettotuotanto	336
Oma hyötykäyttö	300
Ylijäämä	36
Lämmön nettotuotanto	324



Oma hyötykäyttö	300
Ylijäämä	24

Perustapauksessa oletetaan ylijäämäsähkö jäävän käyttämättä, eli rahallista hyötyä saadaan vain omaan käyttöön tulevasta sähköstä. Myös ylijäämälämmön oletetaan jäävän hyödyntämättä, eikä siitä saada rahallista hyötyä. Sähkön arvoksi tilalla oletetaan 75 €/MWh sekä lämmön hinnaksi tilalla 45 €/MWh. Energiantuotannon käyttökustannuksiksi oletetaan kaasumoottorille 15 €/MWh<sub>e</sub> ja muiksi käyttökustannuksiksi 1000 €/a + 1 €/MWh<sub>e+h</sub>. Käyttökustannusten muuttuvan osan pienuus johtuu siitä, että suurin osa huolto ja kunnossapitotöistä oletetaan itse tehtäviksi, eikä tätä työsaa ole huomioitu kustannuksissa. (Hagström et al 2005, 34.)

Taulukossa 8 on esitetty peruslaskelman tulot ja menot vuotta kohti.

**Taulukko 8.** Peruslaskelman tulot ja menot vuotta kohti.

	Kassavirta [€/a]
Sähkön tuotanto omaan käyttöön	+22 500
Lämmön tuotanto omaan käyttöön	+13500
Laitoksen käyttökulut	-2 200
Sähköntuotannon käyttökulut	-5040
Vuotuinen käyttökate	+28 760

Oletetaan laskelmissa laitoksen käyttöiäksi 15 vuotta ja investoinnin korkokannaksi 5 %. Lisäksi oletetaan laitoksen saavan investointitukea 20 %, joten laitoksen rakentajalle jää maksettavaksi 304 000 €. Vuotuinen pääomakustannus saadaan laskettua seuraavan yhtälön avulla, kun oletetaan investoinnin jäännösarvo nolllaksi.

$$A = c_{ni} \cdot I \quad (1)$$

missä,  $A$  = vuotuinen pääomakustannus [€]  
 $c_{ni}$  = annuiteettitekijä [-]  
 $I$  = investointi [€]

Annuiteettitekijä korkokannalle 5 % ja 15 vuoden takaisinmaksuajalle on 0,0963. Sijoittamalla arvot yhtälöön 1 saadaan laskettua pääomakustannus vuodessa.

$$A = 0,0963 \cdot 304\,000\text{€} = 29\,288\text{€}$$

Tuloksesta näemme että vuotuinen käyttökate on pienempi kuin vuotuinen pääomakustannus, joten investointi ei olisi kannattava. Investoinnin nykyarvo saadaan laskettua seuraavan yhtälön avulla.

$$NA = a_{ni} \cdot S - I \quad (2)$$

missä,  $NA$  = investoinnin nykyarvo [€]  
 $a_{ni}$  = jaksollisten suoritusten nykyarvotekijä [-]  
 $S$  = nettotulot vuodessa [€]

Laskentakorolle 5 % ja 15 vuoden takaisinmaksuajalle jaksollisten suoritusten nykyarvotekijä on 10,380. Sijoittamalla arvot yhtälöön 2. saadaan laskettua investoinnin nykyarvo.

$$NA = 10,380 \cdot 28760\text{€} - 304\,000\text{€} = -5471\text{€}$$

Edellisen tuloksen perusteella voidaan todeta, ettei peruslaskelman investointi ole kannattava. Jotta investoinnista saataisiin kannattava, olisi investoinnin arvoa saatava pienennettyä tai kehitettävä lisätuloja peruslaskelman biokaasulaitokselle.

Selvitetään seuraavaksi investoinnin kannattavuus mikäli peruslaskelmasta poiketen laitos ottaisikin vastaan ulkopuolisena raaka-aineena perunajätettä, sekä laitos liittyisi

sähköverkkoon ja saisi näin myytyä ylijäämäsihköä. Oletetaan että biokaasun tuotanto kasvaa 20 % ulkopuolisen syötteen ansiosta. Taulukossa 9 on kuvattu laitospäkonseptin tuotetut ja käytetyt energiamäärät. (Hagström et al 2005, 45.)

**Taulukko 9.** Uuden laitospäkonseptin energiamäärät. (Hagström et al 2005, 45.)

	<b>Energiamäärä [MWh/a]</b>
Sähkön nettotuotanto	401
Sähkön oma tarve	300
- sähköä myyntiin	101
Lämmön nettotuotanto	386
Lämmön oma tarve	300
- ylijäämälämpö	86

Oletetaan perunajätteen määräksi vuodessa 300 m<sup>3</sup> sekä saatavan porttimaksun suuruudeksi 40 €/m<sup>3</sup>. Sähkön hinnaksi myydessä verkkoon oletetaan 30 €/MWh. Taulukossa 10 on esitetty esimerkkilaitoksen tulot ja menot vuotta kohti. (Hagström et al 2005, 46.)

**Taulukko 10.** Uuden laitospäkonseptin tulot ja menot vuotta kohti.

	<b>Kassavirta [€a]</b>
Sähkön tuotanto omaan käyttöön	+22 500
Sähkön tuotanto myyntiin	+ 3020
Lämmön tuotanto omaan käyttöön	+13500
Porttimaksut	+12 000

Laitoksen käyttökulut	-2431
Sähköntuotannon käyttökulut	-6010
Vuotuinen käyttökate	+42 579

Oletetaan että laitoksen investoinnit ovat 40 000 € suuremmat, johtuen sekä ulkopuolisen raaka-aineen käsittelyn vaatimista laitteista, että sähköverkkoon liittymisestä aiheutuvista kustannuksista. Näin investointituen ollessa 20 % jää laitoksen rakentajalle maksettavaksi 336 000 €. Yhtälön 1 avulla saadaan vuotuisiksi pääomakustannuksiksi 32 357 €/a. Näin kyseinen laitospöytä olisi kannattava ja vuositulokseksi saadaan 10 222 €/a. Yhtälön 2 avulla saadaan laskettua investoinnin nykyarvoksi 105 970 €

Edelliset laskelmat ovat kuitenkin vain suuntaa antavia ja kannattavuudet voivat vaihdella todellisissa laitosinvestoinneissa. Yksi kannattavuuteen heikentävästi vaikuttava seikka, jota ei edellisissä laskelmissa otettu huomioon, on se että käytännössä sähkön ja lämmön kulutus eivät kohtaa ajallisesti, mistä johtuen osa sähköstä joudutaan ostamaan ja osa lämmöstä tuottamaan muilla polttoaineilla. Yksi ratkaisu lämmön tuotannon ja kulutuksen eriaikaisuuteen voisi olla lämpöakku, johon lämpöä voitaisiin varastoida tuotannon ollessa suurempi kuin kulutuksen. Kulutuksen taas ylittäessä tuotannon, voitaisiin lämpöakkuun varastoitunutta lämpöä hyödyntää. Mahdollinen lisätulonlähde biokaasulaitoksille, jota ei otettu huomioon, on reaktorijäännöksen myyminen tilan ulkopuolelle. Lisäksi kannattavuuteen vaikuttaa suuresti mm. tilan kokoluokka, tilatyypin ja elinikä.

## **5 MARKKINATILANNE**

Työn tässä luvussa selvitetään esimerkkejä biokaasulaitosten ja biokaasulle soveltuvien chp-yksiköiden toimittajista ja valmistajista Suomessa.

### **5.1 Biokaasulaitos**

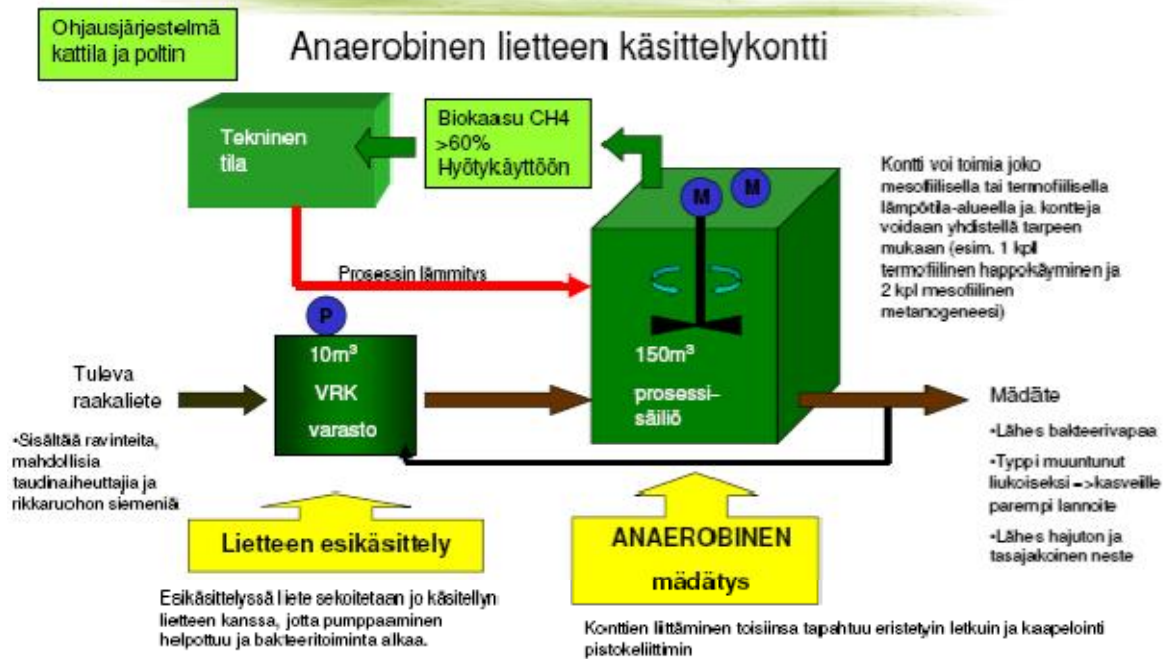
Suomeen biokaasulaitoksia toimittavia ja valmistavia yrityksiä löytyy useita. Johtavia laitostoimittajia ovat Metaenergia Oy, Metener Oy, NHK-Keskus Oy, WELtec BioPower ja Agrok Oy. Luvuissa 5.1.1 ja 5.1.2 tutustutaan kahteen laitostoimittajaan Metaenergia Oy:hyn ja NHK-Keskus Oy:n.

### **5.1.1 Metaenergia Oy**

MetaEnergia Oy on suomalainen Haapavedellä sijaitseva yritys, jonka toiminnan tarkoituksena on kehittää ja valmistaa uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämisen mahdollistavia laitteita ja järjestelmiä. Yritys tekee tuotekehitystä myös kaasun esikäsitteilyyn ja kaasun pesuun liittyen. (MetaEnergia 2010.)

MetaEnergia Oy:n tarjoama toinen biokaasulaitos on MEX PRO - säiliölaitos, joka on teräsbetonista paikanpäällä rakennettu biokaasulaitos. Se pystyy käsittelemään suuria lietemääriä ja muuta biohajoavaa jätettä tai peltobiomassaa. Toinen laitosvaihtoehto on MEX 150C konttilaitos, joka tuodaan tilalle valmiina kokonaisuutena. Konttilaitos pystyy käsittelemään 80 nautayksikön lietteen. Myös konttilaitosten yhteen liittäminen on mahdollista kapasiteetin nostamiseksi. Laitostoimituksiin kuuluvat myös tekninen tila ja ohjausjärjestelmä. Kuvassa 14 on esitetty konttilaitoksen kaaviokuva. (MetaEnergia 2010.)

## MEX Container



**Kuva 14.** MetaEnergia Oy:n tarjoama konttilaitos. (MEX Container 2010.)

### 5.1.2 NHK-Keskus Oy

NHK-Keskus Oy on vuonna 1990 perustettu suomalainen perheyrittys. NHK-Keskus toimittaa tarvittavia tuotteita rehun- ja kotieläintuotantoon, mutta se on laajentanut toimintaansa myös biokaasulaitoksiin. NHK-Keskus tarjoaa Robogas-biokaasuvoimalaa, joka on pakettiratkaisu sika- ja nautatilojen biokaasun hyödyntämiseen. NHK-Keskus tarjoaa biokaasulaitostoimituksessa palveluja aina esiselvityksestä käyttöönottoon. (NHK-Keskus 2010.)

Robogas-biokaasuvoimalan peruskomponentit ovat noin 300-600 m<sup>3</sup>:n reaktori ja turbiinilaitos. Lämmön ja sähkön yhteistuotantoon käytetään turbiinikonttiin sijoitettavaa mikroturbiinia. Mikroturbiinina käytetään yleensä Capstonen valmistamaa C30 mikroturbiinia, jonka sähköteho on 30 kW<sub>e</sub> ja lämpöteho 60 kW<sub>th</sub>. Reaktorista kaasu imetään kontissa sijaitsevalla kompressorilla esikäsitelylaitteistoon, missä kaasu puhdistetaan poltto varten. Suurimmissa yksiköissä, eli 600 m<sup>3</sup>:n reaktoreissa, voidaan

myös Robogas biokaasuvoimalaan kytkeä useampia mikroturbiineja rinnan paremman tehonsäädön saavuttamiseksi. (Robogas 2010.)

## **5.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotantoyksikkö**

Pienen kokoluokan biokaasulla toimivista CHP-yksiköistä valtaosa on kaasumoottorilla toimivia, mutta mikroturbiinit ovat myös yleistymässä. Esimerkkejä Suomessa pienen kokoluokan CHP-yksiköitä toimittavista yrityksistä ovat Höyrytys Oy ja Greenviironment plc. Höyrytys Oy toimittaa CHP-yksiköitä jotka toimivat kaasumoottorilla ja Greenviironment plc on erikoistunut mikroturbiinitoimituksiin. Lisäksi Turbec toimittaa pohjoismaihin biokaasulle sopivia mikroturbiineja.

### **5.2.1 Höyrytys Oy**

Höyrytys Oy on vuonna 1959 perustettu monipuolinen energiapalveluiden tuottaja. Aluksi yritys on toiminut lämpö- ja höyryenergian tuotannon alalla, mutta on laajentanut toimintaansa myös CHP-kaasumoottorilaitoksiin. Höyrytys Oy tarjoaa täydenpalvelun bioenergiaratkaisuja, jotka sisältävät suunnittelun, tavarantoimituksen, asennuksen sekä kunnossapidon koko tuotteen elinkaaren ajan. (Yritys 2010.)

Höyrytys Oy toimittaa GE Jenbacherin ja IET:n kaasumoottoreita, joissa voidaan käyttää polttoaineena myös biokaasua. GE-Jenbacherin mallistoon kuuluu kaasumoottoreita kokoluokassa 250-4117 kW<sub>e</sub>. Kaikki GE-Jenbacherin toimittamat moottorit ovat ottomoottori-tekniikkaan perustuvia kaasumoottoreita. Pienen maatilakokoluokan biokaasulaitokseen sopivimmat kaasumoottorit ovat IET:n kaasumoottorit, joiden kokoluokka on 30-200 kW<sub>e</sub>. IET:n kaasumoottorit ovat ottomoottoreita, minkä vuoksi moottorit ovat kevyitä ja pieniä kooltaan. Moottorin ja generaattorin käynti on tasaista ja lähes värinätöntä joten yhdistelmä ei vaadi kalliita perustuksia ja kiinnitystä asennus-alustaan. (Kaasumoottorit 2010.)

### 5.2.2 Greenenvironment plc

Greenenvironment plc on Suomessa vuonna 2002 perustettu yritys, joka on keskittynyt CHP-tuotantoon. Se toimittaa ja rakentaa biokaasulla tai maakaasulla toimivia lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksia kokoluokassa 30-1000 kW<sub>e</sub>. Yrityksen käyttää toimittamissaan laitoksissa energiantuotantoon Capstone mikro turbiineita. Greenenvironment on toimittanut Suomeen ainakin 28 mikro turbiinia, joista suurin osa käyttää polttoaineenaan biokaasua. (Company 2010.)

Capstone alle 100 kW<sub>e</sub> mikro turbiinivalikoimaan kuuluu kaksi mallia C30 ja C65. C30-mallin sähköteho on 30 kW<sub>e</sub>, sähköntuottohyötysuhteen ollessa 26 %. Lämpöteho C30 mikro turbiinissa on 60 kW<sub>th</sub>. C65-mallin sähköteho on 65 kW<sub>e</sub>, ja sen sähköntuottohyötysuhde on 29 %. Lämpöteho kyseisessä mallissa on 120 kW<sub>th</sub>. Kokonaishyötysuhteeksi Greenenvironment lupaa mikro turbiineille jopa 85-95 %. (Capstone 2010.)

Peruskomponentit Greenenvironmentin toimituksissa on mikro turbiini, kompressori ja kaasun käsittely-yksikkö sekä SCADA-järjestelmä (Supervisory Control and Data Acquisition). SCADA-järjestelmän avulla yritys pystyy kaukokäyttämään ja keräämään tietoja toimittamastaan laitoksesta. Järjestelmän avulla yritys kykenee myös havaitsemaan ajoissa mahdolliset vikaantumiset. (Solutions 2010.)

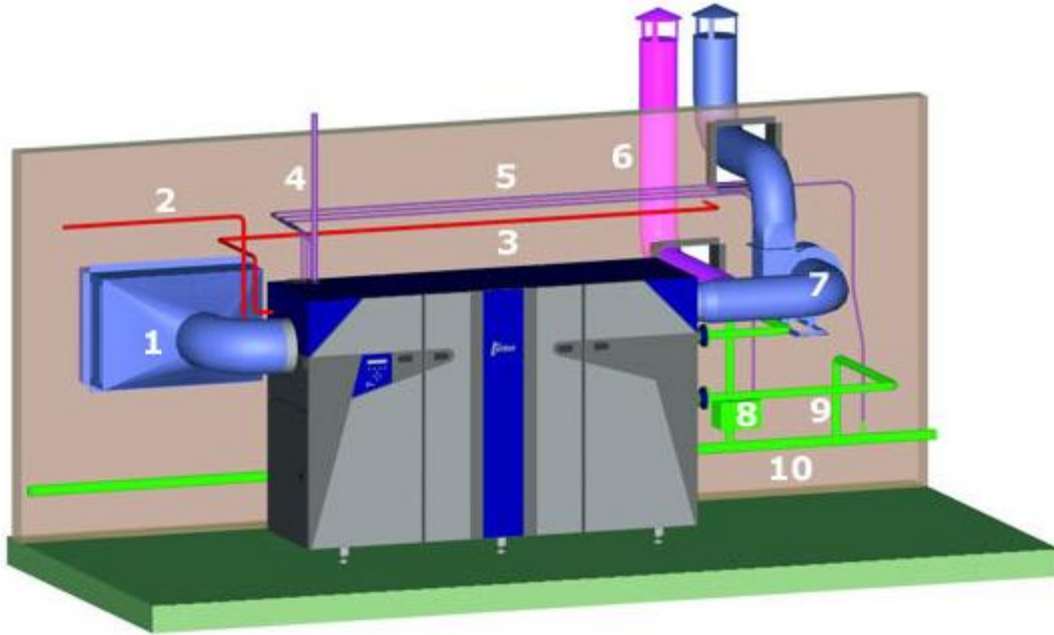
### 5.2.3 Turbec

Turbec on alun perin Volvon ja ABB:n vuonna 1998 perustama yritys. Turbec AB:n ensimmäinen markkinoille tullut tuote oli T100 mikro turbiiniyksikkö, joka julkaistiin vuonna 2000. T100 mallia Turbec onkin myynyt maailmanlaajuisesti ja sillä on vahva markkina-asema mikro turbiinimarkkinoilla. (Turbec 2010.)

Turbecin tarjoama mikro turbiinimalli pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantoon on T100 PH. Sen sähköteho on 100 kW<sub>el</sub> ja sen sähköntuottohyötysuhde on Turbecin mukaan 33 %. T100 PH:n lämpöteho on 155 kW<sub>th</sub> ja kokonaishyötysuhde



77%. (Products 2010.) T100 PH olisikin optimaalinen sähkön ja lämmön yhteistuotantoyksikkö pieneen kokoluokkaan sillä sen generaattoriteho ylittää juuri biokaasulla tuotetun sähkön syöttötariffin vaatimukseen. Kuvassa 15 on esitetty T100 PH:n esimerkkiasennus.



Note - the image reflects a principal installation of a T100 CHP series 2 unit.

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1. Air inlet (pre-filter)     | 6. Exhaust gas piping         |
| 2. Fuel gas inlet piping      | 7. Induced draft fan          |
| 3. Fuel gas evacuation piping | 8. Water pump                 |
| 4. Grid cable                 | 9. Hot water outlet           |
| 5. Electrical cables          | 10. Existing hot water piping |

**Kuva 15.** Turbec T100 PH mallin esimerkkiasennus. (Products 2010.)

## 6 KEHITYSNÄKYMÄT

Kiinnostus biokaasuteknologiaa kohtaan on kasvanut viime aikoina ja sen investointien voidaankin odottaa lisääntyvän merkittävästi tulevaisuudessa. Investointien määrään vaikuttaa suuresti millainen tuotantoa koskeva tukipolitiikka Suomessa tulee olemaan. Mikäli lakiehdotus biokaasulla tuotetun sähkön syöttötariffista hyväksytään ja se tulee voimaan vuoden 2011 alusta, lisää se varmasti investointeja biokaasuteknologiaan. Syöttötariffin piiriin kuuluvat generaattoriteholtaan 100 kW<sub>e</sub> tai sen yli olevat

biokaasulaitokset. Tästä johtuen pienen kokoluokan yksittäisen maatilán biokaasulaitokselle ei ole tulossa helpotuksia kannattavuusongelmiin. Sen sijaan monen tilán suuremmat yhteislaitokset tulevat todennäköisesti yleistymään mikäli ehdotettu syöttötariffijärjestelmä hyväksytään.

Biokaasuntuotannon on todettu olevan yksi puhtaimmista ja energiatehokkaimmista tavoista tuottaa liikenteen polttoainetta. Biokaasun käyttö liikenteen polttoaineena tuleekin todennäköisesti lisääntymään Euroopassa lähivuosina. (Lehtomäki et al 2007, 50.) Biokaasun käytön lisääminen liikennepolttoaineena on mahdollista syöttämällä sitä jo valmiina olevaan maakaasuverkkoon ja näin siirtämään sitä maakaasun tankkausasemille. Ongelmana Suomessa on suppea maakaasun tankkausasemien verkosto, joka on hidastanut maakaasuautojen yleistymistä. Kaasukäyttöisille ajoneuvoille on myös esitetty käyttövoimaveroa, joka tulisi voimaan vaiheittain vuoteen 2015 mennessä. Linja-autot kuuluisivat kuitenkin tämän käyttövoimaveron ulkopuolelle. Tähän asti maakaasua ja biokaasua käyttäneet ajoneuvot ovat olleet vapautettuja käyttövoimaverosta, joten mahdollisesti tuleva käyttövoimavero heikentäisi huomattavasti niiden kilpailukykyä esimerkiksi bensiiniä käyttävään ajoneuvoon verrattuna.

Kiinnostus biokaasun tuotantoon kasvibiomassasta on myös kasvanut monissa EU-maissa. Syynä tähän on uusiutuvan energian tuotannolle asetetut tavoitteet ja kannustimet. Myös peltopinta-alan vapautuminen ruoantuotannosta energiakasvien tuotantoon on lisännyt kiinnostusta. Useiden biokaasuntuotantoon soveltuvien kasvien viljelyn ympäristövaikutukset ovat myös vähäisemmät kuin esimerkiksi ohraetanolin ja rypsibiodieselin tuotantoon soveltuvien kasvien viljelyssä. Ilmaston lämpenemisen takia myös Suomessa on tullut mahdolliseksi runsaasti biomassaa tuottavien kuten esimerkiksi energiamaissin viljely. (Lehtomäki et al 2007, 51.)

Pienen kokoluokan CHP-teknologioille on maailmanlaajuiset suuret markkinapotentiaalit. Mikro-CHP - teknologian kehitys on kuitenkin vielä aloitusasteella. Nykyiset teknologiat eivät usein vastaa mahdollisten asiakkaiden taloudellisia ja teknisiä vaatimuksia. Tästä johtuen myös biokaasulle soveltuvia mikro-CHP-teknologioita pyritään kehittämään koko ajan. Erityisesti kiinnostava tuotantoteknologia on polttokennot ja siksi niiden

kehittämiseen onkin panostettu viime vuosina voimakkaasti. Polttokennojen etuina muihin teknologioihin verrattuna on niiden korkea sähköntuottohyötysuhde. Polttokennot myös mahdollistavat kaasun suoran elektrokemiallisen konversion lämmöksi ja sähköksi lähes päästöttömästi. Polttokenno tuottaa vain pieniä määriä haitallisia hiukkaspäästöjä, eikä rikkioksidien tai typenoksidien päästöjen määrä nouse merkittävästi edes osakuormalla. Polttokennojen hinta on kuitenkin vielä liian korkea niiden laajamittaiselle käytölle. Hinnan odotetaan kuitenkin laskevan teknologian kehittymisen ja yleistymisen myötä. (Lehtomäki et al 2007, 50; Dong et al 2008, 2125.)

## **7 YHTEENVETO**

Tämän työn tavoitteena oli kartoittaa nykypäivän tilanne biokaasun käyttömahdollisuuksista pienen kokoluokan alle 100 kW<sub>e</sub> sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Monet toimenpiteet Euroopan unionin alueella ovatkin kannustaneet hajautettuun sekä kestäväan energiantuotantoon ja biokaasun ollessa yksi varteenotettava vaihtoehto tässä kehityssuunnassa, oli työn tekeminen tästä aiheesta mielenkiintoista ja haastavaa.

Euroopan unionin alueella Saksa on suurin biokaasun tuottajamaa. Suomessa biokaasun tuotanto on ollut tähän päivään mennessä melko vähäistä, sillä vuonna 2009 biokaasulla tuotettu energiamäärä oli alle 1 % Suomessa tuotetusta uusiutuvan energian tuotannosta. Suomessa niin kuin muuallakin maailmassa biokaasun tuotannon potentiaali on erittäin korkea verrattuna nykyiseen tuotantoon. Biokaasun tuotannon voidaankin olettaa nousevan Suomessa tulevan tukipolitiikan myötä, joka takaa biokaasulla yli 100 kW<sub>e</sub> tuotantoyksiköllä tuotetulle sähkölle takuuhinnan. Pienille maatilakokoluokan laitosinvestoinneille uusi syöttötariffi ei tuo kuitenkaan helpotusta. Sähkön syöttötariffin myötä kysyntä biokaasulaitoksia kohtaan tulee lisääntymään, joka taas varmasti tuo uusia yrityksiä alalle. Tämä aiheuttaa kilpailua laitosten tarjoajien välille ja myös investointikustannukset tulevat Suomessa laskemaan, sillä ne ovat olleet tähän mennessä esimerkiksi Saksaa korkeammat.

Tällä hetkellä varteenotettavat energiantuotantoteknologiat biokaasulla ovat kaasumoottori ja mikroturbiini. Näistä kaasumoottori on investointikustannuksiltaan halvempi vaihtoehto, mutta mikroturbiinin etuina on sen halvemmat käyttö- ja kunnossapitokustannukset, sekä alhaisemmat päästöt verrattuna kaasumoottoriin. Tulevaisuudessa pienessä kokoluokassa tulevat kuitenkin näiden kahden teknologian kanssa kilpailemaan ainakin polttokenno ja kenties myös Stirling-moottori. Mielenkiintoisin vaihtoehto näistä kahdesta on polttokenno, jonka sähköntuottohyötysuhde on selvästi muita ratkaisuja korkeampi. Lisäksi polttokennon avulla voidaan tuottaa biokaasusta sähköä ja lämpöä lähes päästöttömästi.

## LÄHTEET

Asplund Dan, Korppi-Tommola Jouko, Helynen Satu. 2005. Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet Suomessa vuoteen 2015, [verkkajulkaisu]. Kauppa- ja teollisuusministeriö. [viitattu 24.9.2010]. 48 s. Saatavissa: [http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm\\_jur/ktmjur.nsf/all/E5063805F1B754D5C22570190028414D/\\$file/34642005.pdf](http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/E5063805F1B754D5C22570190028414D/$file/34642005.pdf)

Bianchi Enrico. 2008. Biogas fuelled microturbine: Turbec experience, [Power-Pointesitys]. [viitattu 26.9.2010]. Saatavissa: [http://www.waterwerx.com.au/images/case\\_studies/micro-turbine\\_Biogas-Presentatione-2008.pdf](http://www.waterwerx.com.au/images/case_studies/micro-turbine_Biogas-Presentatione-2008.pdf)

Biokaasu-lehti. 2010. Suomen Biokaasuyhdistyksen jäsenlehti 2/2010. Suomen Biokaasuyhdistys ry. Helsinki. 19 s. Saatavissa: [http://www.biokaasuyhdistys.net/images/stories/pdf/Biokaasulehti\\_lokakuu2010.pdf](http://www.biokaasuyhdistys.net/images/stories/pdf/Biokaasulehti_lokakuu2010.pdf)

Biokaasuyhdistys. Biokaasu. [Biokaasuyhdistyksen www-sivuilla]. [viitattu 20.9.2010] Saatavissa: [http://www.biokaasuyhdistys.net/index.php?option=com\\_content&view=section&layout=blog&id=6&Itemid=53](http://www.biokaasuyhdistys.net/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=6&Itemid=53)

Biovakka. 2010. Biovakka ja Gasum suunnittelevat biokaasulaitosta Nastolaan, [verkkotiedote]. [viitattu 24.9.2010]. Saatavissa: <http://www.biovakka.fi/Nastola>

Burgermeister Jane. 2008. Biogas Flows Through Germany's Grid Big Time. [verkkajulkaisu]. RenewableEnergyWorld, [viitattu 24.9.2010]. Saatavissa: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/07/biogas-flows-through-germanys-grid-big-time-53075>

Capstone. 2010. 2010 Product Catalog. Tuote-esite, [verkkajulkaisu]. [viitattu 25.9.2010]. Saatavissa: [http://www.capstoneturbine.com/docs/Product%20Catalog\\_lowres.pdf](http://www.capstoneturbine.com/docs/Product%20Catalog_lowres.pdf)

Company. [Greenenvironment plc:n www-sivuilla]. 2010. [viitattu 30.9.2010]. Saatavissa: <http://www.greenenvironment.de/group/english/>

Deublein Dieter, Steinhauser Angelika. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 443 s. ISBN 978-3-527-31841-4.

Dong Leilei, Liu Hao, Riffat Saffa. 2008. Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems – A literature review *Applied Thermal Engineering* 29, s. 2119-2126. Saatavissa: Elsevier ScienceDirect

Gasum. 2010. Biokaasua liikenteen käyttöön Gasumin verkosta, [verkkotiedote]. [viitattu 24.9.2010] Saatavissa: <http://www.gasum.fi/gasumyrityksena/media2/uutiset/Sivut/Biokaasuliikenteenk%C3%A4ytt%C3%B6nGasuminverkosta.aspx>

Hagström Markku, Vartiainen Eero, Vanhanen Juha. 2005. Biokaasun maatilatuotannon kannattavuusselvitys, [verkkojulkaisu]. Gaia Group Oy. [viitattu 27.9.2010]. 77 s. Saatavissa: [http://www.mmm.fi/attachments/ymparisto/5AvoD1wwP/Biokaasun\\_maatilatuotannon\\_kannattavuusselvitys\\_julkinen.pdf](http://www.mmm.fi/attachments/ymparisto/5AvoD1wwP/Biokaasun_maatilatuotannon_kannattavuusselvitys_julkinen.pdf)

Hilkiah Igoni A. et al. 2007. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy* 85. s. 430-438. Saatavissa: Elsevier ScienceDirect

Hintikka Jaakko. 2004. Biomassapohjaiset mikro-chp-tekniikat, [verkkojulkaisu]. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. [viitattu 26.9.2010]. 19 s. Saatavissa: [https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/43141/mikro-chp-raportti\\_nro8.pdf?sequence=1](https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/43141/mikro-chp-raportti_nro8.pdf?sequence=1)

Kaasumoottorit. [Höyrytys Oy:n www-sivuilla]. 2010. [viitattu 29.9.2010]. Saatavissa: <http://www.hoyrytys.fi/palvelut-ja-tuotteet/kaasumoottorit-chp/>

Kalmari Erkki, Luostarinen Juha. 2010. Maatilatason biokaasulaitoksen toteutus selvitys, Koivikon opetustila. [verkkajulkaisu]. Metener Oy. 17 s. Saatavissa: [http://www.oamk.fi/toolbox/fileuploads/muhos\\_toteutus selvitys\\_biog\\_0946\\_001.pdf](http://www.oamk.fi/toolbox/fileuploads/muhos_toteutus selvitys_biog_0946_001.pdf)

Kuittinen Ville, Huttunen Markku, Leinonen Simo. 2010. Suomen biokaasulaitosrekisteri 13. Itä-Suomen Yliopisto, Biologian osasto. 37 s. ISBN 978-952-61-0160-6. Saatavissa: <http://www.biokaasuyhdistys.net/images/stories/pdf/biokaasulaitosrekisteri13.pdf>

Larjola Jaakko. 2008. Energianmuuntoprosessit. Opetusmoniste, syksy 2008. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, LUT Energia. 168 s.

Latvala Markus. 2005. Jätevesilietteen anaerobinen käsittely ja biokaasun hyötykäyttö. Jyväskylän teknologiakeskus Oy, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Teknologiakeskus Hermia ja vesi- ja viemärlaitosyhdistys. Tampere. 20 s. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/492/jatevesilietteen\\_anaerobinen\\_kasittely\\_ja\\_biokaasun\\_hyoty\\_kaytto.pdf](http://www.motiva.fi/files/492/jatevesilietteen_anaerobinen_kasittely_ja_biokaasun_hyoty_kaytto.pdf)

Latvala Markus 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristö 24/2009 Suomen ympäristökeskus Edita Prima Oy, Helsinki. ISBN 978-952-11-3497-5. 114 s. Saatavissa: [http://www.bionova.fi/files/sy\\_24\\_2009.pdf](http://www.bionova.fi/files/sy_24_2009.pdf)

Latvala Terhi et al. 2007. Bioenergian tuotanto ja markkinat vuonna 2007 sekä kehitysnäkymät vuoteen 2015. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen raportteja nro 205. Helsinki. 71 s. ISBN 978-952-5594-71-3. Saatavissa: [http://www.ptt.fi/dokumentit/rap205\\_2506080905.pdf](http://www.ptt.fi/dokumentit/rap205_2506080905.pdf)

Lehtomäki Annimari et al. 2007 Biokaasusta energiaa maatalouteen – Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. Jyväskylä innovation Oy. ISBN 978-951-39-3076-9 64 s. Saatavissa: <http://www.biokaasufoorumi.fi/> (kohdasta julkaisuja)

MetaEnergia. MetaEnergia Oy. [MetaEnergian www-sivuilla]. 2010. [viitattu 27.9.2010]. Saatavissa: <http://www.metaenergia.com/metaenergia.htm>

MEX Container. 2010. Kaaviokuva konttilaitoksesta, [verkkajulkaisu]. MetaEnergia Oy. [viitattu 27.9.2010]. Saatavissa: <http://www.metaenergia.com/materiaalit/MEX%20Container.pdf>

Motiva. Biokaasu. [Motivan www-sivuilla]. [viitattu 20.9.2010] Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/biokaasu](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/biokaasu)

m-CHP instructional module. 2005. micro- Cooling, Heating, and Power (m-CHP) Instructional Module, [verkkajulkaisu]. United States Department of Energy (DOE). Mississippi State, MS 39762. [viitattu 25.9.2010]. Saatavissa: <http://microchp.msstate.edu/pdf/m-CHP%20Instructional%20Module.pdf>

NHK-Keskus. (NHK-Keskuksen www-sivuilla). 2010. [viitattu 28.9.2010]. Saatavissa: <http://www.nhk.fi/nhk-keskus.html>

OPET Network. 2002. Micro- and small scale CHP from biomass (<300kW<sub>e</sub>), [verkkajulkaisu]. TEKES. [viitattu 25.9.2010]. Saatavissa: [http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/DENSY/en/Dokumenttia\\_rkisto/Viestinta\\_ja\\_aktivointi/Julkaisut/OPET-RES/TechnologyPaper2\\_chp\\_70404.pdf](http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/DENSY/en/Dokumenttia_rkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Julkaisut/OPET-RES/TechnologyPaper2_chp_70404.pdf)

Partanen Timo. 2009. Metsäenergia Joensuun voimalaitoksella, [PowerPoint-esitys]. [viitattu 24.9.2010]. Saatavissa: [http://www.biomass.fi/fi/document.cfm?doc=show&doc\\_id=60](http://www.biomass.fi/fi/document.cfm?doc=show&doc_id=60)

Products. [Turbecin www-sivuilla]. 2010. [viitattu 5.10.2010]. Saatavissa: <http://www.turbec.com/products/products.htm#>



Robogas. [NHK-Keskuksen www-sivuilla]. 2010. [viitattu 28.9.2010]. Saatavissa: <http://www.nhk.fi/robogas - biokaasuvoimala464.html>

Seppälä Jarmo. 2009. Gasum: Biokaasua autojen polttoaineeksi vuonna 2011, [verkkojulkaisu]. Tekniikka&Talous 14.5.2009. [viitattu 24.9.2010]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article287180.ece>

Simader Gunther, Krawinkler Robert, Tmka Georg. 2006. Micro CHP systems: state-of-the-art, [verkkojulkaisu]. Austrian Energy Agency. [viitattu 27.9.2010]. 62 s. Saatavissa: [http://www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/energietechnologien/Micor\\_KWK/micro-CHP.pdf](http://www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/energietechnologien/Micor_KWK/micro-CHP.pdf)

Solutions. [Greenenvironment plc:n www-sivuilla]. 2010. [viitattu 30.9.2010]. Saatavissa: <http://www.greenenvironment.de/group/english/>

TEM. 2009. Syöttötariffiryhmän loppuraportti – Ehdotus tuulivoimalla ja biokaasulla tuotetun sähkön syöttötariffiksi, [verkkojulkaisu]. Työ- ja elinkeinoministeriö. [viitattu 26.9.2010]. 100 s. ISBN 978-952-227-303-1. Saatavissa: [http://www.tem.fi/files/25308/TEMjul\\_59\\_2009\\_energia.pdf](http://www.tem.fi/files/25308/TEMjul_59_2009_energia.pdf)

TEM. 2010. Hallitukselta esitys uusiutuvan energian syöttötariffeista, [verkkotiedote]. Työ- ja elinkeinoministeriö. [viitattu 26.9.210]. Saatavissa: [http://www.tem.fi/?s=2471&89519\\_m=100414](http://www.tem.fi/?s=2471&89519_m=100414)

Turbec. Company. [Turbecin www-sivuilla]. 2010. [viitattu 5.10.2010]. Saatavissa: <http://www.turbec.com/company/company.htm>

Vartiainen Eero et al. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO<sub>2</sub>-päästöt. Gaia Group Oy. Helsinki. Oy Edita Ab. ISBN 952-91-4465-2. 90 s. Saatavissa: <http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutki>

mukset/ymp%C3%A4rist%C3%B6pooli/liitekirjasto/hajautettuenergiantuotanto,loppuraportti.pdf?SectionUri=%2Ffi%2Fjulkaisut%2Fymparistopooli%2Ftutkimusaineisto

Vilkkilä Tuomo. 2007. Biokaasulaitos esimerkkimaatilalle [verkkodokumentti]. Esiselvitys. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, luonnonvarainstituutti, [viitattu 20.9.2010]. 31 s. Saatavissa: [https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/37628/Biokaasulaitos\\_esiselvitys28.pdf?sequence=1](https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/37628/Biokaasulaitos_esiselvitys28.pdf?sequence=1)

Yritys. [Höyrytys Oy:n www-sivuilla]. 2010. [viitattu 29.9.2010]. Saatavissa: <http://www.hoyrytys.fi/yritys>