

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Matti Karjalainen

**BIOKAASULAITOSTEN LÄMMÖNTALTEENOTON
KEHITTÄMINEN**

Työn tarkastaja: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Työn ohjaajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
 Ins, tj Mika Juvonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Matti Karjalainen

Biokaasulaitosten lämmöntalteenoton kehittäminen

Diplomityö

2017

73 sivua, 26 kuvaa, 19 taulukkoa

Työn tarkastaja: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Työn ohjaajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
 Ins, tj Mika Juvonen

Hakusanat: biokaasulaitos, lämmöntalteenotto, CHP-moottori, mädätysjäännös

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia lämmöntalteenoton mahdollisia kehityskohteita Bio10 biokaasulaitoksella Kiteellä. Biokaasulaitoksella voi olla useita varteenotettavia lämmöntalteenoton kehityskohteita. Biokaasun tuottaminen vaatii lämpöenergiaa, jota tuotetaan laitoksella biokaasusta joko polttamalla sitä perinteisessä kaasukattilassa tai polttomoottorin pakokaasulämpöenergiasta. Usein laitoksella on ainakin yksi polttomoottori laitoksen omakäyttösähkön tuotantoa varten.

CHP-moottoreiden pakokaasuista otetaan harvoin kaikki talteenotettava lämpöenergia talteen joko kustannus- tai materiaaliteknisistä syistä johtuen. Opinnäytetyössä tutkittiin erilaisten lämmönsiirritekniikoiden kustannuksia ja soveltuvuutta lämmöntalteenottoon pakokaasuista. Erilaisten lämmönsiirtimien investointien takaisinmaksuajaksi saatiin kolmesta neljään vuotta, jolloin investointi olisi hyvin toteutuskelpoinen.

Biokaasureaktorin lopputuote voidaan myydä lannoitteena, mutta silloin se täytyy hygienisoida, joka vaatii suuren määrän energiaa. Hygienisoinnin jälkeen mädätysjäännösestä lämpöä otetaan talteen vain rajattu määrä. Perinteiset lämmönsiirrinratkaisut ovat isoja ja kalliita. Välivarastointisäiliöissä olevat lämmönkeruuputkistot mahdollistaisivat lämpöpumppukytken, jossa lämpöä kerättäisiin nykyisillä putkistoilla tehokkaammin. Lämpöpumppu mahdollistaisi myös prosessitilojen viilennyksen melko helposti. Mädätysjäännöksen lämmöntalteenotto on investointina pakokaasupuolta huonompi. Perinteisen lämmönsiirtimen takaisinmaksuaika olisi 7,8 ja lämpöpumppuvaihtoehdon 6,1 vuotta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
Energy technology

Matti Karjalainen

Improvement of heat recovery in biogas plants

Master's Thesis

2017

73 pages, 26 figures, 19 tables

Examiners: Professor, Ph.D (Tech) Esa Vakkilainen

Instructors Professor, Ph.D (Tech) Esa Vakkilainen
B.Eng., Managing Director Mika Juvonen

Keywords: biogas plant, heat recovery, CHP-engine, digestate

Object of this master's thesis was to study possible heat recovery options in Bio10 biogas plant at Kitee. Biogas plant can have multiple good heat recovery improvement targets. Producing of biogas requires heat energy which is produced from biogas at the plant site either by burning it in conventional gas boiler or in recovering heat of exhaust gases from combustion engine. Plant often has at least one combustion engine to produce plant electricity.

Rarely all recoverable heat from CHP-engine's exhaust gases is obtained because profitability or material reasons. Cost and suitability of different heat exchanger technologies for exhaust gases were studied in this master's thesis. Calculated payback time for suitable heat exchanger were from three to four years which means that heat recovery improvement could be profitable enough to invest.

End product of the biogas digester can be sold as a fertilizer. Then digestate must be handled to destroy possible pathogens by heating it to 70 degrees celsius, which requires a lot of energy. Only small portion of recoverable heat is recovered after digestate heated. Conventional heat exchangers are big and expensive. Heat recovery pipes in intermediate storage tanks make it possible to use heat pump to recover heat more efficiently. Heat pump could make possible to cool process rooms quite easily. Heat recovery of digestate is as an investment worse than CHP-engine's exhaust gases. Payback time of conventional heat exchanger would be 7,8 and for the heat pump 6,1 years.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Bio10 Oy:tä mielenkiintoisesta opinnäytetyöstä. Erityisesti haluan kiittää ohjaajiani Mika Juvosta ja Esa Vakkilaista kannustavasta ja asiantuntevasta opastuksesta, joka on auttanut työn edistymistä. Myös Bio10:n muu laitosporukka oli valmiina auttamaan tarpeen tullen.

Lappeenrannassa viettämäni opiskeluvuodet toivat mukanaan paljon uusia ystäviä ja mahdollisia hetkiä niin koulussa kuin vapaa-aikana.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja lähimpiä ystäviäni saamastani kannustuksesta koko opiskeluideni ajan.

Espoossa 1.11.2017

Matti Karjalainen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	3
1 JOHDANTO	5
2 BIOKAASU YLEISESTI	6
3 BIOKAASUN TUOTTAMINEN	7
3.1 Raaka-aineiden valinta ja hallinta	7
3.2 Erilaiset biokaasuprosessit	9
3.3 Jätteen vastaanotto ja esikäsittely	10
3.3.1 Kiinteät aineet	11
3.3.2 Nestemäiset lietteet ja liuokset	12
3.4 Biokaasun tuotanto reaktorissa	13
3.4.1 Termofiilisen ja mesofiilisen prosessin vertailua	14
3.5 Prosessin toimintaedellytykset ja hallinta	15
3.6 Biokaasun jatkokäsittely ja hyödyntäminen	15
3.7 Mädätysjäännöksen hygienisointi ja loppukäyttö	21
3.8 Kaatopaikkakaasun kerääminen	22
4 BIOKAASUTUOTANNON MERKITYS	25
4.1 Biokaasu maanviljelijöiden näkökulmasta	27
5 BIOKAASU SUOMESSA JA EUROOPASSA	28
5.1 Biokaasun liikennekäyttö	31
6 BIO10-LAITOKSEN TOIMINTAPERIAATE	33
6.1 Vastaanotto ja esikäsittely	33
6.2 Biokaasun tuotanto	36
6.3 Biokaasun kuivaus ja siirto	37
6.4 Hygienisointi ja lannoitteiden valmistus	37

7	LÄMMÖNTUOTANNON JA KÄYTÖN NYKYTILA	39
7.1	Laitoksen lämmöntuotanto	39
7.2	Lämmönkäyttö	42
7.2.1	Hygienisoinnin lämmönkäyttö.....	42
7.2.2	Reaktori- ja bufferisäiliöiden lämmitys	42
7.2.3	Kiinteistön lämmönkäyttö.....	45
8	LÄMMÖNTALTEENOTON KEHITTÄMINEN JA ONGELMAT BIO10:LLÄ	46
8.1	CHP-laitos	46
8.1.1	Korroosio	46
8.1.2	Rikkiyhdisteiden muodostuminen pakokaasuissa	47
8.1.3	Happokastepiste	49
8.1.4	Lämmönsiirtimen materiaalivalinnat	50
8.2	Hygienisoitu mädätysjäännös.....	51
8.2.1	Putki- ja levylämmönsiirrin	52
8.2.2	Lämpöpumpputeknologia	52
9	LAITTEIDEN MITOITUS JA KYTKENTÄ PROSESSIIN	54
9.1	CHP-laitos	55
9.1.1	Vahterus	55
9.1.2	Polarsol	56
9.1.3	Condens Heat Recovery Oy - savukaasupesuri	57
9.1.4	LVI-urakointi	58
9.1.5	Sähkö/Automaatio	59
9.2	Hygienisoitu mädäte.....	59
9.2.1	Putkilämmönsiirrin	59
9.2.2	Lämpöpumppu	61
9.2.3	Automaatio.....	62
10	TALOUDELLINEN NÄKÖKULMA	63

10.1	CHP-laitos	64
10.2	Mädätysjäännös	67
11	TULOSTEN TARKASTELU JA ANALYSOINTI.....	68
12	YHTEENVETO.....	70

SYMBOLILUETTELO

Latinalaiset

$a_{n,i}$	diskonttaustekijä	[-]
A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
ADT	happokastepiste (acid dew temperature)	[K, °C]
dx_w	seinämän paksuus	[m]
h	konvektiolämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
k	materiaalin lämmönjohtumiskerroin	[W/mK]
NA	nykyarvo	[€]
p	komponentin osapaine	[Pa, mmHg]
Q	lämpöenergia	[J]
S	vuosittainen säästö/tuotto	[€]
ΔT	lämpötilaero	[K, °C]
U	lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
W	työ	[J]

Kreikkalaiset

Φ	lämpöteho	[kW]
--------	-----------	------

Alaindeksit

c,cool	kylmä
h,hot	kuuma
i	korkokanta
in	sisäänmeno/tuleva
log	logaritminen
n	mones vuosi
out	ulostulo/poistuva

Lyhenteet

CBG	paineistettu biokaasu (compressed biogas)
CHP	sähkön ja lämmön yhteistuotanto (combined heat and power)
COD	kemiallinen hapenkulutus (chemical oxygen demand)
COP	lämpöpumpun tehokkuus (coefficient of power)
LBG	nesteytetty biokaasu (liquid biogas)
TS	kuiva-aine (total solids)

VS orgaaninen kuiva-aine (volatile solids)

1 JOHDANTO

Biokaasulaitosten määrä kasvaa Suomessa ja erilaisten hukkalämpöjen talteenotto on nopeasti kehittyvä ja kasvava ala. Yhä tiukemmassa kilpailutilanteessa pienilläkin säästöillä parannetaan biokaasulaitosten kannattavuutta.

Tässä työssä tarkastellaan yhden esimerkkilaitoksen mahdollisia lämmöntalteenottovaihtoehtoja. CHP-moottorien (combined heat and power) pakokaasuista talteentotettava lämpö on toinen vaihtoehtoista ja mädätysjäännöksen lämmön hyödyntäminen toinen tarkasteltava vaihtoehto. Näille kahdelle vaihtoehdolle mietitään soveltuvia lämmönsiirtotapoja. Lämmönsiirrinvaihtoehtoja tarkastellaan kustannus ja käytännöllisyysmielessä.

Aluksi keskitytään itse biokaasun tuotantoon ja esimerkkilaitoksen kuvaukseen. Tämän jälkeen pohditaan erilaisia vaihtoehtoja ja mahdollisia ongelmia. Kustannuslaskelmien jälkeen analysoidaan tuloksia ja tehdään tulosten perusteella jatkoehdotus.

2 BIOKAASU YLEISESTI

Biokaasuksi luokitellaan kaasu, jota syntyy kun biomassaa hajoaa hapettomissa olosuhteissa. Hajoaminen tapahtuu hapen puutteen takia mädäntymällä anaerobisten bakteerien vaikutuksesta. Anaerobinen prosessi toimii ilman happea. Luonnossa hapettomia olosuhteita esiintyy järvien pohjissa ja soiden pohjasedimenteissä, joissa syntyy biokaasua. Jotta mädätyksen lopputuloksena saataisiin poltettavaa kaasua on hapettomuus elinehto. Kaasuseos sisältää pääasiassa metaania CH₄ ja hiilidioksidia CO₂. Biokaasu sisältää myös pieniä määriä typpeä ja rikkivetyä sekä kaatopaikkakaasut näiden lisäksi pieniä pitoisuuksia kloori ja fluoriyhdisteitä. (Motiva Oy, 2013) Taulukossa 1 on esitetty biokaasun ominaisuuksia. Metaani on käytännössä kaasuista se, joka antaa biokaasulle sen lämpöarvon.

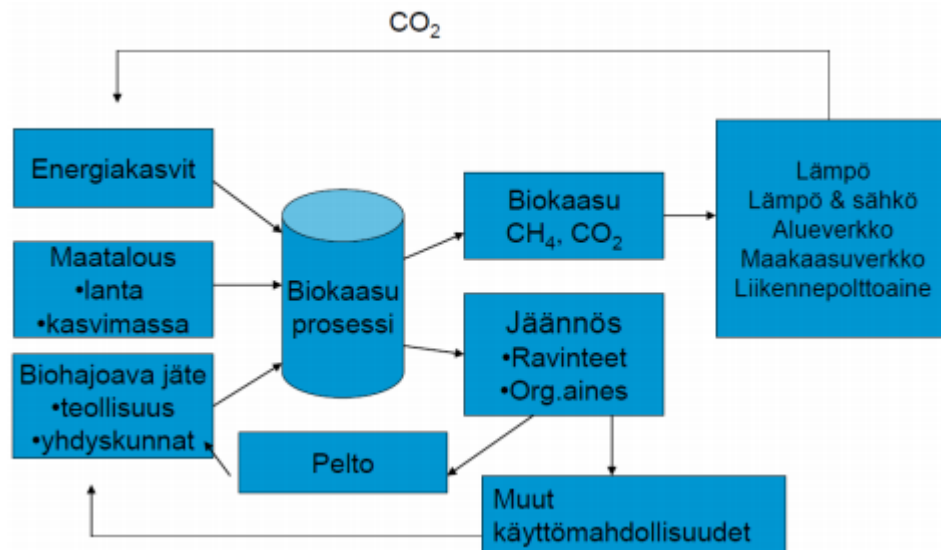
Taulukko 1. Biokaasun ominaisuuksia. (Motiva Oy, 2013)

Koostumus	
Metaani	55-75 %
Hiilidioksidi, CO₂	25-45 %
Hiilimonoksidi, CO	0-0,3 %
Typpi, N₂	1-5 %
Vety, H₂	0-3 %
Rikkivety, H₂S	0,1-0,5 %
Alempi lämpöarvo	5 kWh/m ³ (metaanipitoisuus 50 %)
	7,5 kWh/m ³ (metaanipitoisuus 75 %)

Helpoiten biokaasua voidaan hyödyntää kaasukattiloissa, jossa sillä voidaan lämmittää esim kaukolämpövettä. Usein biokaasutuotantolaitoksissa on CHP-laitos, jossa tuotetaan sekä sähköä että lämpöä. Kaasua voidaan myös jatkojalostaa liikennepolttoainekäyttöön soveltuvaksi. Biokaasu palaa puhtaasti metaanin ansiosta. Jatkojalostettu biokaasu vastaa käytännössä poltto-ominaisuuksiltaan maakaasua, joten sitä voidaan käyttää samoissa laitteissa.

3 BIOKAASUN TUOTTAMINEN

Biokaasun tuotanto on biologinen prosessi, joka käyttää pääraaka-aineenaan orgaanista ainetta. Biokaasun raaka-aineena voidaan käyttää teollisuuden sivutuotteita ja jätteitä, yhdyskuntien biojätettä, jätevedenpuhdistamon lietettä, rasvaliemiä, maatalouden sivutuotteita kuten lantaa, hävikkirehuja ja kasvijätteitä. Lisäksi myös energiakasveja voidaan tuottaa biokaasutuotantoon. Tyypillisesti raaka-aine sisältää paljon helposti hajoavaa orgaanista ainesta: hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja. Käytännössä kaikki orgaaninen aines poisluokien muovit ja puun ligniinit soveltuvat biokaasun tuotantoon.



Kuva 1. Biokaasuprosessi yksinkertaistettuna. (Kaavio: Sari Luostarinen)

Biokaasulaitoksista löytyy mittakaavasta riippumatta pääprosessivaiheet: raaka-aineen vastaanotto ja käsittely, kaasun tuottaminen, kaasun puhdistus tai jalostus, kaasun hyödyntäminen ja mädätysjäännöksen käsittely. Seuraavissa kappaleissa käsitellään näitä pääprosesseja tarkemmin.

3.1 Raaka-aineiden valinta ja hallinta

Biokaasulaitoksen raaka-aineet valikoituvat pitkälti raaka-aineen saatavuuden ja sopivuuden perusteella. Sopivuutta tarkasteltaessa tulee ymmärtää anaerobisen hajoamisprosessin vaatimuksia. Saatavuudesta on kiinni pystytäänkö laitosta ajamaan koko vuoden ympäri ja

voiko laitos toimia kannattavasti. Raaka-aine valintaan vaikuttaa myös mädätysjäännöksen laatuvaatimukset hyötykäytön kannalta. Lisäksi raaka-aineiden taloudelliset tekijät (metaanintuottopotentiali, porttimaksut) vaikuttavat niiden valintaan.

Raaka-aineen soveltuvuutta voidaan arvioida sen orgaanisesti hajoavan aineen määrällä, metaanintuottopotentialin, kuiva-ainepitoisuuden, hiili/typpi-suhteen ja ravinne- ja hivenainekoostumuksen perusteella. Näiden lisäksi tulee huomioida raaka-aineen mahdolliset toksiset ja inhiboivat aineet. Yhtä syötettä käytettäessä ei normaalisti päästä optimaalisiin olosuhteisiin biokaasutuotannon suhteen. Sen johdosta useampia eri raaka-aineita käytetään, jotta saavutettaisiin helpommin optimaaliset olosuhteet. Tällöin myös mahdollisten lisäravinteiden syöttö reaktoriin pienenee. Tällaisia biokaasulaitoksia kutsutaan yhteiskäsitteilylaitoksiksi. Sopivuutta arvioidaan laboratorioanalysein ja niistä yleisimpiä ovat: pH, kuiva-aine (TS, total solids), orgaaninen kuiva-aine (VS, volatile solids), COD (kemiallinen hapenkulutus, chemical oxygen demand), kokonaistyyppi, -hiili, ja metaanintuottotesti. Materiaalin kokonaismassasta käytetään nimitystä märkäpaino. Kuiva-aine koostuu epäorgaanisesta (tuhka) ja orgaanisesta aineksesta. (Kymäläinen & Pakarinen. 2015)



Kuva 2. Näytteen TS- ja VS- ja tuhkamääritelmät.

Reaktorisyötteen kuiva-ainepitoisuuden ja samalla myös VS-pitoisuuden hallinta auttaa vakaassa hajoamisprosessissa. Mitä suurempi VS/TS-suhde ja mitä helpommin hajoavaa orgaaninen materiaali on sitä paremmin syöte sopii biokaasuprosessiin. Eri syötteet tuottavat eri määrän metaania riippuen edellä olevista tekijöistä. Taulukossa 2 on esitelty yleisimpien syötelajien metaanintuottopotentialiaaleja.

Taulukko 2. Yleisimpien syötelajien metaanintuottopotentiaaleja orgaanista ainetta kohti

Materiaali	Litraa CH₄/kgVS⁻¹
Lanta	250
Keittiöbiojäte	400
Yhdyskuntabiojäte	350 - 500
Olki	240 - 320
Ruokohelppi	253 - 351
Puhdistamolietteet	160 - 400
Teurasjäte (sika, nauta)	430 - 630
Sellu- ja paperiteollisuuden primääriliete	210 - 230
Sellu- ja paperiteollisuuden sekundääriliete	50 - 100

3.2 Erilaiset biokaasuprosessit

Biokaasuprosesseja voidaan luokitella useamman tekijän mukaan erilaisiin prosesseihin. Biokaasulaitosta suunniteltaessa syötteiden ominaisuudet ajavat suunnittelua tiettyihin tekniikoihin. Prosessia valittaessa on syytä ottaa huomioon myös laitoksen energiantuottotavoitteet sekä mädätysjäännöksen halutut ominaisuudet. (Kymäläinen & Pakarinen. 2015)

Biokaasulaitokset toimivat joko märkinä tai kuivina prosesseina. Nimensä mukaisesti näiden kahden prosessin erona on kuiva-ainepitoisuus (TS, total solids), märällä maksimi 15 % ja kuivalla 20 – 40 %. Märkäprosessit käyttävät lietemäisiä syötteitä ja kuivaproessit kuivia.

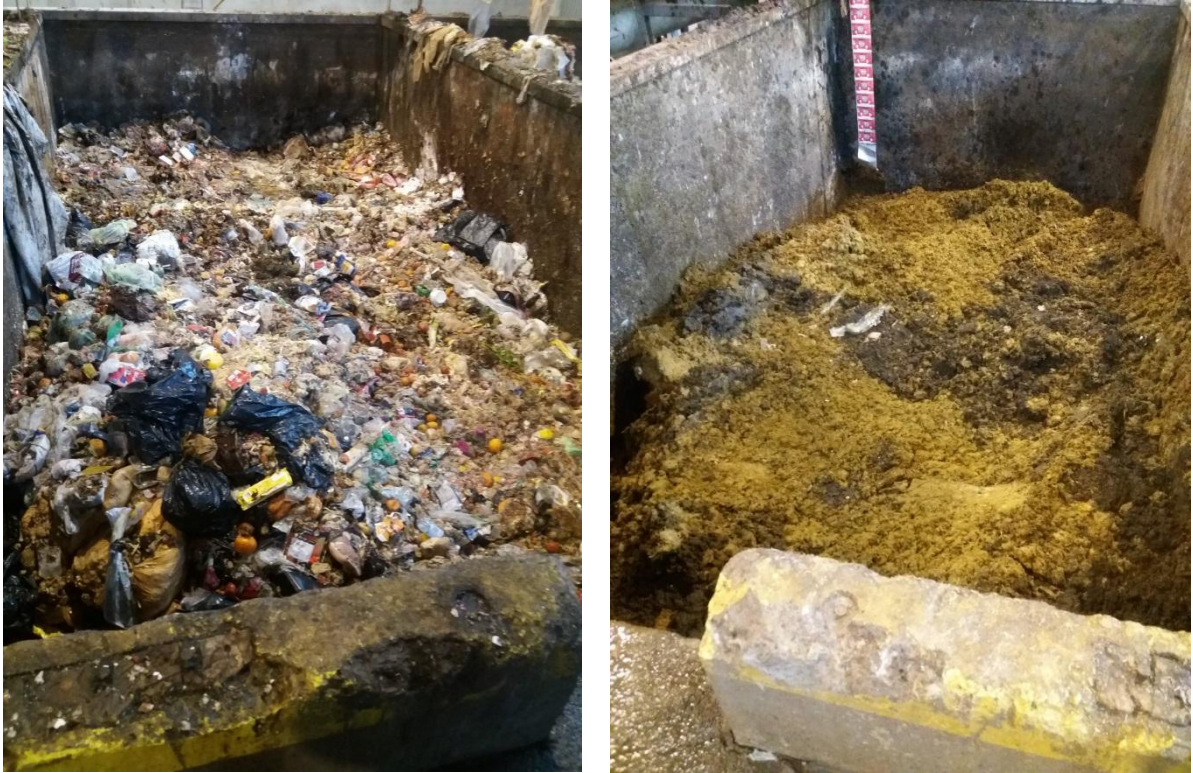
Yleisin märkäprosessi on jatkuvatoiminen, täyssekoitteinen reaktori. Syöttömateriaalien kuiva-ainepitoisuus on alle 15 %, mikä mahdollistaa niiden pumppaamisen reaktorin sisään ja sieltä pois sekä reaktorimassan sekoittamisen. Yleensä kuivia syötteitä laimennetaan joko reaktorista pumpattavalla nesteellä tai puhdistetulla prosessivedellä. Kuivaprosesseja on sekä jatkuva- että panostoimisia. Kuivaprosessien etuna on pienempi reaktoritilavuus syötetonnia kohti. Massan sekoittaminen ja täten prosessiolosuhteiden varmistaminen on hankalaa, jonka vuoksi kuivaproessin tekninen hallinta on haastavampaa kuin märkäprosessin.

Biokaasulaitokset voidaan jakaa myös jatkuva- ja panostoimisiin prosesseihin. Märkäprosessit ovat yleensä jatkuvatoimisia. Jatkuvatoimisuus tarkoittaa syötteen jatkuvatoimista syöttöä ja poistoa tietyin väliajoin. Tällä saadaan mahdollisimman tasainen biokaasuntuotanto. Jatkuvatoiminen reaktori on yleensä lieriönmuotoinen lämpöhäviöiden minimoimiseksi ja sen sisältöä sekoitetaan mekaanisesti lapasekoittimilla tms. Sekoituksen tehtävä on varmistaa hyvät olosuhteet metaanin muodostukselle ja ehkäistä mädätteen loppukäymistä varastoinnin aikana.

Panostoimisessa prosessissa reaktori täytetään, suljetaan ja tyhjenetään. Silloin kaasua muodostuminen hiljalleen lisääntyy, kunnes muodostuminen alkaa hiljalleen tippumaan. Myös panostoimisessa reaktorissa syötteen sekaan lisätään aikaisempaa mädätysjäännöstä, jonka mukana tulee mikrobeja tuottamaan kaasua. (Kymäläinen & Pakarinen. 2015)

3.3 Jätteen vastaanotto ja esikäsittely

Biokaasun tuotanto alkaa raaka-aineen vastaanotosta. Jätteen vastaanotossa on lajiteltu erikseen nestemäiset ja kiinteät jätteet, sillä ne vaativat erilaisia esikäsittelytoimenpiteitä. Biokaasuprosessin lopputuotteena on mahdollista tuottaa lisäksi luomukelpoista lannoitetta, jolloin luomu ja ei luomu raaka-aine tulee käsitellä erikseen. Kuvassa 3 on esitelty jätteen vastaanottosiiloja.



Kuva 3. Vasemmalla kotitalouksien biojätettä ja oikealla eläimien lantaa ja peltobiomassaa vastaanottosiloissa.

3.3.1 Kiinteät aineet

Vastaanottosiloista biojäte nostetaan siltanosturilla esimurskaimen murskattavaksi. Mä-däntyminen reaktorissa tehostuu kun ainekoko on pienempi. Esimurskaimen jälkeen murskatusta syötteestä kerätään biojätteen sekaan eksyneet metallit pois magneettierottimella.. Tämän jälkeen murskatussa syötteessä on vielä esim. elintarvikkeiden pakkausmateriaaleja, jotka soveltuvat paremmin suoraan perinteisillä lämpölaitoksilla poltettaviksi. Turboseparaattorilla erotellaan biomassasta pakkausmateriaalit ja murskatun syöte laimennetaan pumpattavaan muotoon joko reaktorinesteeellä, hygienisoinnin jälkeisellä rejektivedellä, vesijohtovedellä tai läheisestä suosta pumpattavalla lähdevedellä. Kuvassa 4 separaattori.



Kuva 4. Separattori, joka erottelee pakkausmateriaalit mädätettävästä aineesta.

Laimennuksen jälkeen esimurskattua syötettä hiennonetaan vielä maseraattorilla. Hienonuksen jälkeen esikäsitelty syöte pumpataan bufferisäiliöön, jossa sitä esilämmitetään ennen reaktoriin syöttöä.

3.3.2 Nestemäiset lietteet ja liuokset

Puhdistamoiden liete, rasvaliuokset soveltuvat myös biokaasun tuotantoon. Monilla isomilla kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla onkin jo oma biokaasulaitoksensa laitoksen yhteydessä. Lietteet ja liuokset varastoidaan altaisiin vastaanottokentällä. Siellä niitä sekoitellaan ja lämmitellään, jonka jälkeen ne pumpataan bufferisäiliöön odottamaan reaktoriin syöttöä. Luomuksi kelpaamattomalle ainekselle on usein eri reaktori, jotta lopputuotteista voidaan tehdä luomulannoitetta.

3.4 Biokaasun tuotanto reaktorissa

Lämmitetty aines syötetään reaktoriin, jossa varsinainen bioaineksen hajoaminen tapahtuu. Hajoamisen aiheuttavat bakteerit, jotka käyttävät bioainesta ravintonaan. Eri lämpötila-alueilla on omat bakteerinsa, jotka toimivat parhaiten siinä lämpötilassa. Nämä kolme bakteerilajia ovat psykrofiilinen, mesofiilinen ja termofiilinen. Psykrofiilisen lämpötila-alue on 0 – 15 °C, mesofiilisen 30 – 40 °C ja termofiilisen 50 – 60 C.

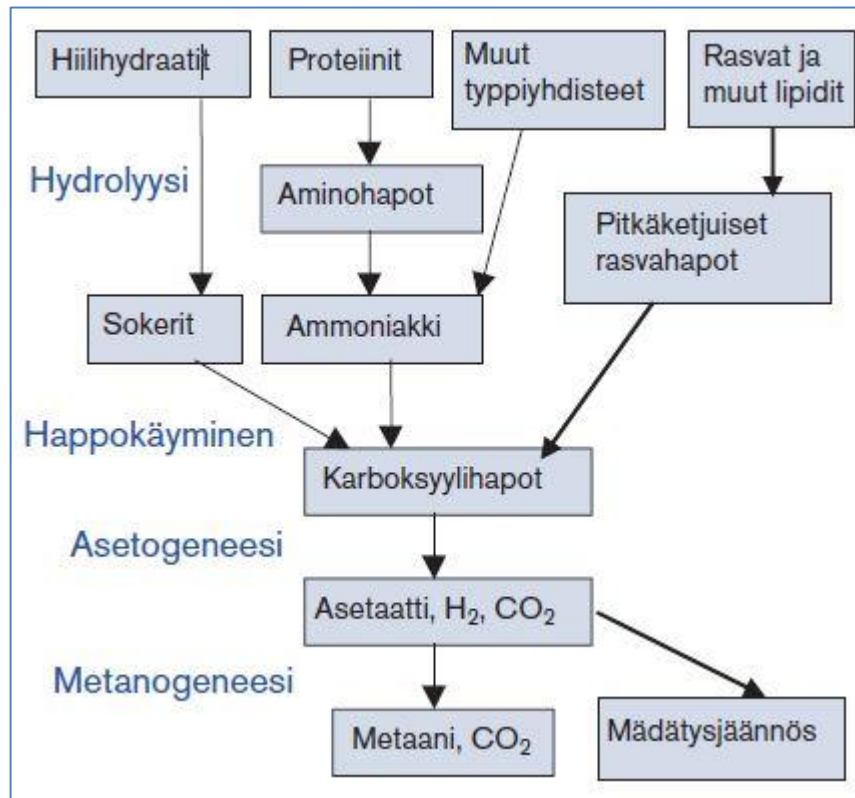
Anaerobisen hajoamisen pääreaktiot ovat hydrolyysi, happokäyminen, asetogeneesi ja metanogeneesi. Jokaisessa vaiheessa toimivat kuhunkin vaiheeseen erikoistuneet bakteerit. Prosessi alkavat yleisimmistä orgaanista raaka-aineista: hiilihydraateista, proteiineista, tyyppyhdisteistä ja rasvoista. Hydrolyysissä yhdisteistä muodostuu sokereita, ammoniakkia ja pitkäketjuisia rasvahappoja. Hydrolyysi edellyttää, että vesipitoisuus syöttömateriaalissa on oltava yli 50 % ja se täyttyy lähes poikkeuksetta. Suomessa on suurimmalti käytössä märkäprosessi, jossa vesipitoisuus on hyvin korkea. Kuivaprosesseja ei Suomessa tällä hetkellä ole. Reaktio etenee seuraavaksi happokäymiseen, jossa nimenmukaisesti syntyy happoja. Happokäymisessä molekyyleistä muodostuu pieniä molekyyllisiä karboksyylihap-poja. Seuravaassa vaiheessa asetogeneettista asetaattia muodostavat bakteerit hajottavat hapot asetaatti-ioneiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. Viimeisessä vaiheessa metaaninmuodostajabakteerit (metanogeenit) muodostuvat metaania 70 % asetaatti-ioneista ja 30 % vedystä seuraavien reaktioyhtälöiden 1 ja 2 mukaisesti.



Metaania muodostavat bakteerit ovat herkkiä molekyyllisen hapen olemassaololle. Käytännössä metaanin tuotanto loppuu mikäli reaktorissa on O₂ molekyyliä. Reaktorit tehdään kaasutiiviiksi ja reaktorissa pidetään pieni ylipaine (5 – 8 mbar), jotta ympäristön ilma ei pääsisi reaktoriin ja sotkemaan hapettomissa oloissa tapahtuvaa biokaasun muodostusta.

Myös rikkivetyä muodostuu sulfaatinpelkistäjäbakteerien toimesta mikäli mädätettävässä materiaalissa on sulfaatteja. Rikkivetyä voidaan poistaa syöttämällä ilmaa reaktoriin, jossa

bakteerit pelkistävät rikkivedyn rikiksi. Liikaa ilmaa ei pidä syöttää, koska silloin metaania tuottavien bakteerien toiminta lakkaa.



Kuva 5. Mädätettävän aineksen hajoamisreaktio, jonka lopputuotteena metaania, hiilidioksidia ja mädätysjäännöstä. (Rintala ym. 2002)

3.4.1 Termofiilisen ja mesofiilisen prosessin vertailua

Termofiilinen prosessi toimii termofiilisten bakteerien toiminta-alueella (50 – 55 °C) kun taas mesofiilinen mesofiilisten bakteerien alueella (35 – 43 °C). Termofiilisen prosessin etuna voidaan pitää suurempaa kaasuntuottoa, pienempää viipymää reaktorissa, suurempaa kiintoaineen hajoamisastetta ja biokaasun hajuhaittojen vähyyttä (Zábranska et al. 2000). Termofiilisessä prosessissa reaktorin lämmittäminen vaatii kuitenkin enemmän energiaa mesofiiliseen verrattuna, joten kasvaneen kaasuntuoton tulisi peittää lämmittämisestä koi-tuvat lisäkustannukset ollakseen kilpailukykyinen. Mesofiilinen prosessi on vakaampi prosessi pääparametrien muuttuessa (pääasiassa lämpötila ja pH-arvo), joten sitä on helpompi hallita. Suomessa biokaasulaitoksilla on käytössä pääasiassa mesofiilinen prosessi. (Latvala 2005; Lehtomäki et al 2007.). Taulukossa 3 on esitelty meso- ja termofiilisen eroja.

Taulukko 3. Meso- ja termofiilisen prosessin eroja

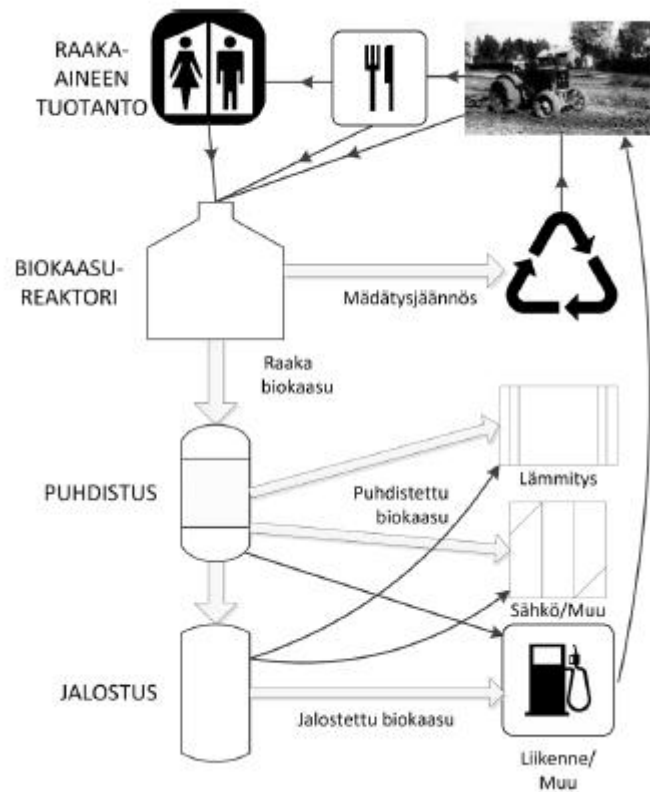
	Mesofiilinen prosessi	Termofiilinen prosessi
Lämpötila-alue [°C]	30 – 40	50 - 60
Viipymäaika [d]	21 – 28	14 - 21
Prosessin hallittavuus	Vakaa	Huonompi
Kaasuntuotto	Pienempi	Suurempi

3.5 Prosessin toimintaedellytykset ja hallinta

Tasapainoinen hajoamisprosessi vaatii tietyt toimintaolosuhteet, joihin kuuluvat hapettomuus, lämpötila ja pH. Syötteiden koostumuksen ja hajoamisen mukaan valitaan sopivat ravitsemukselliset olosuhteet. Tässä vaiheessa on tärkeää tietää syötteen laatu ja määrää, jotta reaktori voidaan mitoittaa sopivankokoiseksi. Lämpötila on biokaasuntuotannossa merkittävin parametri. Optimaaliseen lämpötilaan vaikuttaa valittu prosessi (mesofiilinen vs termofiilinen). Metaania tuottavat metanogeeni-mikrobit ovat herkkiä lämpötilanvaihteille, jonka johdosta lämpötilan tasaisuus on absoluuttista lämpötilaa tärkeämpi.

3.6 Biokaasun jatkokäsittely ja hyödyntäminen

Biokaasua tulee jatkokäsitellä vielä ennen sen hyödyntämistä. Reaktorista kaasu johdetaan kaasun puhdistukseen. Riippuu loppukäyttökohteesta mitä toimenpiteitä biokaasulle on tehtävä sekä raan biokaasun koostumuksesta. Jatkokäsittelystä käytetään nimitystä puhdistus tai jalostus toimenpiteen mukaan. Puhdistuksessa biokaasusta poistetaan kosteus jäädyttämällä kaasua niin, että kosteus lauhtuu vedeksi ja se pystytään poistamaan. Myös rikkivedyn pitoisuutta vähennetään, jotta käyttökohteessa rikkivedyn aiheuttama korrosio pienenee. Puhdistuksessa erotetaan epäpuhtauksia alle 1 % kuivan raakakaasun tilavuudesta. Puhdistusprosessi koostuu yleensä useammasta erillisestä yksiköstä. (Kymäläinen & Pakarinen, 2015)



Kuva 6. Biokaasun käsittely eri käyttökohteita varten. (Kymäläinen & Pakarinen. 2015)

Eläinperäisistä jätteistä (lähinnä lanta) syntyy rikkiyhdisteitä reaktorissa. Helpoin tapa rikkivetypitoisuuden vähentämiseen biokaasussa on lisätä pieni määrä (<4 %) ilmaa biokaasu-reaktorin kaasutilaan. Mädätteessä elää bakteereja, jotka käyttävät hapen reaktorimassan pinnalla ja pelkistävät rikkivedyn alkuainerikiksi. Toinen keino rikkivedyn vähentämiseen on raudan lisäys prosessiin. Pitoisuuksien ollessa 1000 – 3000 ppm saadaan raudan lisäyksellä pitoisuudet tippumaan 100 ppm tasolle. Rautaoksidia kuluu tällöin 0,1 – 0,5 kg/t syötettä. (Latvala. 2005)

Biokaasun lämpöarvo tulee pääasiassa metaanista. Yksihiiliatomisena molekyylinä metaani palaa erittäin puhtaasti ja tehokkaasti esim. paljon puhtaammin kuin liikennebenssiini. Biokaasu on puhdistuksen jälkeen valmis käytettäväksi lämmön tuotantoon tai yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon (CHP, combined heat and power).

Jalostuksessa kaasusta poistetaan hiilidioksidi, rikkivety, typpi ja muut hyödyntämisen kannalta tarpeettomat aineet. Inerttejä kaasuja ei yritetä poistaa kokonaan, koska ne eivät

haittaa moottoreiden toimintaa. Hiilidioksidi parantaa polttoaineen moottoritekniistä laatua kasvattamalla polttoaineen oktaanilukua. Jalostaminen siis nostaa biokaasun energiatiheyttä, jolloin esim sen kuljetus ja varastointi on kannattavampaa.

Jalostustekniikoita ovat: fysikaalinen absorptio, kemiallinen absorptio, fysikaalinen adsorptio, kryojalostus ja kalvojalostus. Yleisin näistä on fysikaaliseen absorptioon perustuva vesipesu. Fysikaalinen absorptio perustuu hiilidioksidin parempaan liukoisuuteen veteen kuin metaanin. Hiilidioksidi liukenee veteen noin 25 kertaa tehokkaammin kuin metaani. Rikkivedyn liukoisuus veteen on vielä hiilidioksidiakin parempi, jolloin biokaasusta saadaan sekin poistettua. Vesipesun yleisyys, johtuu sen kohtuullisen yksinkertaisesta ja tehokkaasta menetelmästä. Prosessissa ei tarvitse käsitellä kemikaaleja, raakaa biokaasua ei tarvitse esikäsitellä, käyttökulut ovat alhaiset ja menetelmän skaalautuvuus on hyvä. Huonona puolena vesipesussa on huono typen erottelukyky.

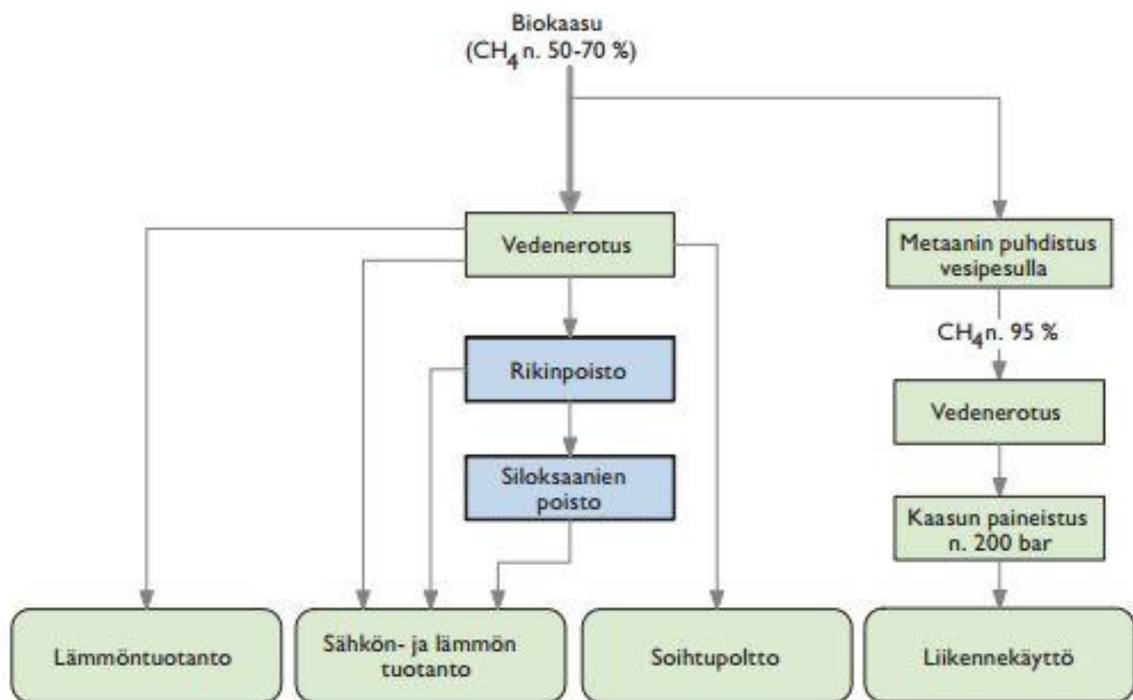
Kemikaalipesu perustuu myös fysikaaliseen absorptioon ja on prosessiltaan samanlainen kuin vesipesu, vain väliaine on erilainen. Kemiallinen absorptio perustuu nimensä mukaisesti hiilidioksidin vähentämiseen kemiallisin reaktioin. Kaikki kaupalliset ratkaisut käyttävät reaktioissa amiineja. Fysikaalisessa adsorptiossa kaasukomponentteja poistetaan kiinteän huokoisen väliaineen avulla. Yleisin adsorptentti on aktiivihiili, muita vaihtoehtoja ovat zeoliitit, silikonigeelit, MOFit (Metal-organic framework) ja molekyyliseulat. Kryojalostus on ensimmäinen metaanipolttoaineiden jalostukseen käytetty menetelmä. Se on jalostusmenetelmistä paras hiilidioksidin erottamiseen yhdessä kemikaalipesun kanssa. Menetelmä perustuu kaasujen, nesteiden ja kiinteiden aineiden erilaisiin kiehumispisteisiin ja sulamislämpötiloihin. Hiilidioksidin poistamiseksi tulee kaasu paineistaa esim 6 baarin paineeseen, jotta hiilidioksidi voi muuttua nesteeksi jäädytyksen aikana. Tämän jälkeen typpi ja metaani erotellaan kaasusta jäädyttämällä kaasu alle metaanin kiehumispisteen (-161,6 °C). Lopputuloksena saadaan nesteytettyä biokaasua (LBG – liquid biogas). Kryojalostus tuottaa puhtaampia sivutuotteita, mutta vaatii kuitenkin puhdistukselta enemmän kuin muut menetelmät. Kalvojalostus perustuu kaasujen erotteluun niiden molekyylien koon perusteella. Hiilidioksidi ja metaani ovat miltei samankokoisia, jolloin joudutaan käyttämään useampaa kalvoa peräkkäin.

Taulukko 4. Jalotusteknologioiden vertailua. Muokattu lähteistä: (Petersson & Wellinger. 2009 ja Bauer et al. 2013.)

	Vesipesu	Kemikaalipesu	Amiinipesu	Adsorptio	Kryo	Kalvo
Metaanihävikki [%]	< 8	< 4	< 0,1	< 23	< 0,5	< 25
Metaanivuoto tyypillinen [%]	< 1	< 1	< 0,1	< 1	< 0,1	< 0,5
Sähkönkulutus [kWh/Nm³]	0,21 - 0,30	0,10 – 0,28	0,10 – 0,15	0,20 – 0,30	0,25	0,2 – 0,3
Lämmönkulutus [kWh/Nm³]			0,13			
Lämpötilavaatimus [°C]	1 - 20	55 - 80	120 - 160		< -80	
CH₄-pitoisuus, jos ei N₂	> 97 %	> 96 %	> 99 %	> 96 %	> 99 %	> 96 %
CH₄-pitoisuus, jos N₂ 20 %	78 %	78 %	80 %	< 94 %	99 %	< 94 %
Esipuhdistustarve	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
N₂ erotusmahdollisuus	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kapasiteetti [Nm³/h]	> 5	> 100	> 100	> 5	> 100	> 5

3.5.1 Lämmöntuotanto

Raakabiokaasua voidaan käyttää vedenerotuksen jälkeen lämmöntuotantoon. Lämmöntuotantoon voidaan käyttää normaaleita maakaasulla ja öljyllä toimivia kattiloita polttimien vaihdolla tai säädöllä. Useimmin pelkästään lämmöntuotantoon keskitytään pienillä bio-kaasulaitoksilla, kuten maatiloilla. Lämmöntuotannossa päästään yleensä korkeaan noin 90 % hyötysuhteeseen.



Kuva 7. Kaavio biokaasun puhdistuksesta käyttötarkoituksesta riippuen. Vesipesu on yksi mahdollisista jalostusmenetelmistä. (Latvala, 2005)

3.5.2 Sähkö/CHP-laitokset

Kun biokaasun tuotanto kasvaa on kannattavaa hankkia sähköä tuottava voimalaitos. Biokaasun tulee puhdistaa vedestä ja rikkivedystä CHP-käytössä. Biokaasulaitosten mittakaavassa voimalaitoksena toimii joko polttomoottori tai mikroturbiini. Polttomoottorit ovat pääasiassa kipinäsytytteisiä ottomoottoreita ja suuremmilla tehoilla turboahdettuja. Korkeasta palamislämpötilasta johtuen pakokaasut sisältävät paljon typen oksideja. Moottorivalmistajat pyrkivät eri tavoin pienentämään typen päästöjä. Isomman ilmakertoimen ja katalysaattorin käyttö vähentävät typpioksidien päästöjä.

Mikroturbiini tuottaa energiaa Brayton-prosessia hyödyntäen. Brayton-prosessissa ahdin puristaa ilman korkeaan paineeseen. Puristettu ilma johdetaan polttokammioon, jossa polttoaine palaa korkeassa paineessa. Korkealämpöinen ja –paineinen savukaasu pyörittää turbiinia, joka on samalla akselilla ahtimen kanssa. Noin puolet turbiinin tuottamasta energiasta menee ahtimen pyörittämiseen, jolloin sähkötuotantohyötysuhde jää alhaiseksi. Polttomoottori on sähköntuotantohyötysuhteeltaan parempi kuin mikroturbiini, mutta vaatii

enemmän huoltoa monimutkaisemman rakenteensa vuoksi. Tästä johtuen kaatopaikoilta kerättyä biokaasua hyödynnetään usein mikroturbiineissa niiden vähäisen huollon tarpeen takia. Sähköntuotannon rinnalla syntyy myös lämpöä, jota voidaan hyödyntää laitoksen omiin tarpeisiin esim reaktorien lämmittämiseksi. Sähköä käytetään laitoksen omaan käyttöön ja usein sähköä jää myös verkkoon myytäväksi.

3.5.3 Biometaani

Biometaani tarkoittaa raakabiokaasusta jalostettua kaasua, jonka ominaisuudet vastaavat pitkälti maakaasun ominaisuuksia. Biometaani sisältää maakaasun veroisesti metaania vähintään 95 %. Biometaani on siis energiasisällöltään maakaasun veroinen. Biometaania voidaan hyödyntää ajoneuvojen ja muiden koneiden polttoaineena. Biometaanin tuotanto ja käyttökohteet eivät kuitenkaan ole lähellä toisiaan. Biometaanin jakeluun on olemassa muutamia vaihtoehtoja. Helpoin tapa on syöttää biometaani suoraan Gasumin omistamaan maakaasuverkkoon. Tällöin biometaani tulee paineistaa maakaasuverkon vaatimaan paineeseen, jolloin biometaanista käytetään nimeä CBG (compressed biogas – paineistettu biokaasu). Verkosta voidaan nimellisesti ostaa biokaasua vaikkei biokaasua ja maakaasua ole fyysisesti eroteltu toisistaan. Toinen tapa siirtää biometaania on jäähdyttää kaasu noin -160 °C, jolloin se muuttuu nestemäiseksi LBG (liquid biogas – nesteytetty biokaasu. LBG energiasisältö tilavuutta kohti on 2,4 kertaa suurempi kuin CBG. Tällöin LBG on taloudellista kuljettaa pitkiä matkoja, missä kaasuverkkoja ei ole.

Taulukko 5. Biokaasun käyttömuotojen resurssitehokkuuden yhteenveto

Käyttö	Kokonaishyötysuhde	Energiatehokkuus	Exergiatehokkuus	Jalostusarvo
Lämpö	70 – 95 %	Korkea	Nolla	Alhainen
Sähkö	20 – 40 %	Keskinkertainen	Korkea	Keskinkertainen
Liikenne	80 – 95 %	Korkea	Korkea	Korkea

3.7 Määtysjäännöksen hygienisointi ja loppukäyttö

Reaktorista ulostulevasta määtysjäännöksestä voidaan tehdä lannoitetta pelloille. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen 1774/2002 mukaan hygienisointi tarvitaan aina kun käsitellään luokan 3 eläinperäisiä sivutuotteita. Hygienisoinnissa määtysjäännöstä pidetään vähintään tunti 70 °C lämpötilassa. Lämpötilavaatimuksen lisäksi palakoko saa olla maksimissaan 12 mm. Hygienisoinnin tarkoituksena on poistaa jäännöksestä taudinaiheuttajat, jotta sitä voidaan jatkokäyttää. Termofiilinen prosessi täyttää hygienisointivaatimuksen tulppavirtauksessa eli kuivaprosessilaitoksessa sellaisenaan kun käsitellään ainoastaan ruokajätettä, puhdistamolietettä tai lantaa taikka näiden seosta korkeamman reaktori-lämpötilansa vuoksi. Hygienisoituminen tulee kuitenkin tällöin osoittaa lopputuotteesta mikrobiologisin analyysein. (Latvala. 2005)

Hygienisoidusta määtteestä voidaan käyttää sellaisenaan, mutta laitokseen kasvaessa sen jatkokäsittely on massa- ja ravinnevirtojen hallitsemiseksi tarpeellista. Menetelmien valintaan vaikuttaa lopputuotteiden hyödyntämiskohde sekä menetelmien tehokkuus käyttökohteen ominaisuuksiin pääsemiseksi. Nesteen ja kiinteän aineen erotusmenetelmät voidaan jakaa toimintaperiaatteen mukaan kolmeen luokkaan: ominaispainoeroihin perustuvat (laskeutus,linko), partikkelikokoon perustuvat (seula, suotonauha, ruuvikuivain, kalvotekniikat) ja termisiin menetelmiin perustuvat (haihdutus, kuivaus). Menetelmien tavoitteena on jakaa määtysjäännöksen ravinteita eri jakeisiin: tyypeä nestejakeisiin ja fosforia kiinteisiin jakeisiin. Ravinnesuhteiden muutoksiin vaikuttaa käytetty raaka-ainepohja sekä erotusmenetelmä.

Yleisesti käytössä olevat menetelmät ovat ruvipuristin, suotonauhakuivain sekä linko. Linkoamisessa hiukkasiin kohdistetaan pyörivän rummun avulla keskipakoisvoima. Keskipakoisvoiman johdosta ominaispainoltaan painavimmat aineet kulkeutuvat linkon ulko-reunalle. Reunalla on linkoon nähden eri nopeudella pyörivä ruuvi, joka kuljettaa kiinteän aineen linkoon toiseen päätyyn poistettavaksi. Nestemäinen aines kulkeutuu linkon vastakkaiseen reunaan poistettavaksi.

Määtysjäännöksestä erotettu nestejake voi olla käytettävissä sellaisenaan lannoitevalmisteenä. Suomen pohjoiset olosuhteet aiheuttavat tarvetta jatkokäsittelylle maatilamittakaa-

vaa isommissa laitoksissa. Mahdollisia jatkokäsittelymenetelmiä ovat: strippaus, haihdutus, kiteytys ja biologinen sekä kemiallinen käsittely. Mekaanisesti eroteltu kuivajae varastoidaan yleensä aumoissa. Kuivajajetta voidaan hyödyntää peltokäytössä sellaisenaan tai siihen voidaan lisätä hiekkaa, turvetta tms stabiloidakseen sen ominaisuuksia. Stabiloinnin seurauksena jae muuttuu hajuttomaampaan suuntaan, jolloin sen hyödyntäminen mullan raaka-aineena tai viherrakentamisessa on mahdollista. Lannoite kompostoidaan ja varastoidaan peltokäyttöä tms varten.

3.8 Kaatopaikkakaasun kerääminen

Jätteen hajoaminen tapahtuu kaatopaikalla kemiallisesti tai biologisten prosessien kautta. Orgaanisen aineksen biologinen aerobinen hajoaminen vaatii runsaasti happea. Jätteiden ollessa pakattu tiiviisti ja korkeisiin kasoihin ei aerobiselle hajoamiselle virtaa riittävästi ilmaa, joten hajoaminen tapahtuu pääasiassa anaerobisesti. Anaerobisen hajoamisen seurauksena orgaaninen aineksesta syntyy metaania. Kaatopaikkakaasu tulisi hyödyntää, sillä metaani on voimakas kasvihuonekaasu. (Väisänen & Salmenoja. 2002).

Vuoden 2016 tuli Suomessa voimaan asetus, että kaatopaikalle ei saa enää viedä orgaanista ainetta. Kaatopaikkojen orgaaninen jäte siis ei enää kasva. Tutkimuksissa on todettu kaatopaikkojen metaanin tuoton olevan voimakkaimmillaan 5 – 10 vuotta vanhoilla täyttöalueilla. 20 vuotta vanhoilla alueilla kaasun tuotanto tippuu. Täydellisen hajoamisen mukaan 100 kg normaalikosteudessa olevasta yhdyskuntajätteestä syntyy 46,6 Nm³ kaatopaikkakaasua. Todellisuudessa hajoaminen ei kuitenkaan ole täydellistä. Kaasua voidaan likimääräisesti arvioida syntyvän 100 – 250 m³n. (Väisänen & Salmenoja. 2002). Orgaaninen jäte voidaan luokitella nopeasti hajoaviin (3 kk – 5 a) ja hitaasti hajoaviin (jopa yli 50 a). Taulukossa 6 on luokiteltu erilaiset yhteiskuntajätteet kahteen hajoamisluokkaan.

Taulukko 6. Orgaanisen jätteen jaottelu nopeasti ja hitaasti biohajoaviin luokkiin

<i>Orgaaninen jätEFRaktio</i>	<i>Nopeasti biohajoava</i>	<i>Hitaasti biohajoava</i>
<i>Ruokajäte</i>	x	
<i>Sanomalehtipaperi</i>	x	
<i>Toimistopaperi</i>	x	
<i>Pahvi</i>	x	
<i>Muovi^(a)</i>		
<i>Tekstiilit</i>		x
<i>Kumi</i>		x
<i>Nahka</i>		x
<i>Puutarhajäte</i>	x ^(b)	x ^(c)
<i>Puu</i>		x

^(a) Muoveja pidetään yleensä biohajoamattomina

^(b) Lehdet ja ruoho. Yleisesti 60 % puutarhajätteestä pidetään nopeasti biohajoavana

^(c) Puumaiset osat puutarhajätteestä

Jätteen kosteus vaikuttaa eksponentiaalisesti kaasun tuotantomäärään 25 – 80 kosteusprosentin alueella. Kaatopaikkajätteen anaerobinen hajoaminen metaaniksi ja hiilidioksidiksi kuluttaa runsaasti vettä, jopa 170 l jätetonna kohti.

Kaasun hallintaan on sekä passiivisia että aktiivisia keinoja. Pienemmille kaatopaikoille voidaan soveltaa passiivisia keinoja. Raja-arvona passiivisille keinoille pidetään kaasuntuotossa pidetään alle 10 m³/ha,h, mikä on varsin vähän. Aktiiviset keinot vaativat kaasun talteenottoa ja hyödyntämisen tai soihtupolton. Passiivisissa käsittelyssä kaatopaikan pintaan rakennetaan kerros tai biosuotimet, jossa mikro-organismit hapettavat metaania ja haisevia kaasuyhdisteitä (rikki, kloori). Aktiivisessa käsittelyssä kaasu pumpataan kaatopaikasta imukaivojen tai salaojien avulla. Imuojia käytetään vanhoilla ja korkeilla, salaojia uusilla ja matalilla kaatopaikoilla. Pumppuilla pidetään imujärjestelmässä riittävä alipaine, ettei metaanivuotoja ympäristöön tapahdu. Keräyksen jälkeen kaasu poltetaan hallitusti soihdussa tai käytetään hyväksi energiantuotannossa. Kaatopaikkakaasun tyypillinen koostumus on esitetty taulukossa 7. Kaatopaikkakaasun lämpöarvo muodostuu metaanista ja se on 4 – 5 kWh.

Taulukko 7. Kaatopaikkakaasun tyypilliset pitoisuudet

<i>Komponentti</i>	<i>Osuus til.-%</i>
<i>Metaani</i>	55 - 65
<i>Hiilidioksidi</i>	35 - 45
<i>Happi</i>	0 - 2

4 BIOKAASUTUOTANNON MERKITYS

Nykyinen maailman energiatuotanto on suuresti riippuvainen fossiilisista polttoaineista. Puolet primäärienergiasta tulee öljystä ja hiilestä. Tämän lisäksi vielä noin 20 % tulee maakaasusta. Maailmalla on yleisesti tiedossa, että öljyä ei tule riittämään ikuisiksi ajoiksi. Institute of Mechanical Engineers mukaan maailman öljyvarat tulevat riittämään nykyisellä kulutusmäärällä 40 vuotta. Maailmalla kehitellään kokoajan myös uusia tekniikoita, joilla päästäisiin keräämään öljyä myös paikoista, mistä se ei ollut aikaisemmin mahdollista tai kannattavaa. Tavoitteena on kehitellä uusia energiateknologioita ja panostaa energiatehokkuuteen.

Yksi näistä tutkittavista energiateknologioista on biokaasu. Mädättämällä tuotettu biokaasu on pysyvästi uusiutuva energialähde, sillä se on tuotettu biomassasta, johon on varautunut aurinkoenergiaa fotosynteesin välityksellä. Biokaasun käyttö parantaa maan energiatasetta, mutta myös säästää luonnonvaroja ja luontoa.

Biokaasua pidetään uusiutuvana energialähteenä, mikä tarkoittaa sitä ettei kasvihuonepäästöt lisäänty siitä poltettaessa. Biokaasua voidaan puhdistaa, jolloin siitä poistetaan hiilidioksidi ja muut epäpuhtaudet. Puhdistettua kaasua nimitetään biometaaniksi. Biometaanina poltettaessa hiilidioksidia vapautuu suunnilleen sama määrä kuin maakaasua, koostuvathan ne käytännössä samasta ainesta metaanista. Uusiutuvaksi biokaasun tekee se, että sen poltto ei lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, sillä sen poltosta vapautuva hiilidioksidi on sitoutunut lyhyen aikajakson sisällä ilmakehästä siihen biomassaan, josta biometaanin on tuotettu. Metaanin pääsy ilmakehään sellaisenaan tulisi välttää kaikin keinoin, sillä metaanin on yli 20 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi. Kaatopaikoilla syntyvä metaanin on siis hyvä kerätä talteen ja tuottaa siitä sekä sähköä että lämpöä. Eläinlannan käsittelyllä vähennetään dityppioksidipäästöjä (N_2O), mikä on liki 300 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi.

Biokaasulla korvataan usein fossiilisia polttoaineita, joten biokaasun tuotanto alentaa huomattavasti päästöjä. Myös riippuvaisuus fossiilisista polttoaineista pienenee, kun käytetään biokaasua. Yleensä fossiiliset polttoaineet ovat tuontituotteita ja biokaasu lähellä paikallisista raaka-aineista tuotettua polttoainetta, jolloin riippuvaisuus isoista öljyntuottomaista

(Venäjä, Lähi-Itä) pienenee. Yksi suurimmista kasvihuonepäästöjen aiheuttaja on liikenne. Biokaasulla ajettaessa auton pakokaasut sisältävät 20 – 25 % vähemmän hiilidioksidia kuin bensiinillä ajettaessa. Auton hiukkaspäästöt vähenevät melkein kokonaan ja useimpien päästökomponenttien määrä vähenee yli 90 %. Päästöjen väheneminen johtuu osittain siitä, että biokaasu palaa puhtaasti eikä palamattomia aineita jää. (Al Saedi, T et al. 2008)

Taistelu ilmaston lämpenemistä vastaan on yksi Euroopan energia- ja ympäristölinjauksien keskeisistä tavoitteista. Uusiutuvan energian lisääminen, kasvihuonekaasujen vähentäminen ja kestävä jätteenkäsittely perustuvat EU-maiden lupaukseen päästä yhteisesti päätettyihin tavoitteisiin. Biokaasun tuotannolla voidaan vaikuttaa kaikkiin kolmeen kohtaan samanaikaisesti.

Biokaasun tuotanto pohjautuu useissa maissa jätteiden hyväksikäyttöön. Yhä suureneva määrä orgaanista jätettä syntyy teollisuudessa, maataloudessa ja kotitalouksissa. Tämä jäte on erittäin käyttökelpoista raaka-ainetta biokaasulaitoksille. Jätteestä saadaan prosessin avulla arvokasta resurssia. Jätteiden hyväksikäytöllä jätettä ei tarvitse viedä kaatopaikalle (Suomessa ei saa enää viedä orgaanista jätettä kaatopaikalle), vaan se voidaan hyödyntää tehokkaasti. Anaerobisen mädätyksen seurauksena mädätysjäännöksestä saadaan myös hyvää lannoitetta pelloille. Biokaasulaitos vähentää jätteen käsittelyn kustannuksia ja on siten taloudellisestikin kannattava. (Al Saedi, T et al. 2008)

Biokaasun tuotanto anaerobisesti vaatii työvoimaa useammassa vaiheessa. Näitä vaiheita ovat tuotanto, raaka-aineen keräys ja kuljetus, teknisten laitteiden valmistus sekä biokaasulaitoksen käyttö ja kunnossapito. Tästä johtuen biokaasulaitoksen työllisyysvaikutus on huomattava ja suurin osa työpaikoista syntyy lähelle biokaasulaitosta. Biokaasu on joustava energiamuoto, jonka johdosta se sopii moniin eri käyttötarkoituksiin niin lämmityskäyttöön kuin yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon. Myös liikennekäyttö on mahdollista biokaasun jalostuksen jälkeen. Anaerobinen prosessi ei vaadi suuria määriä prosessivettä, jolloin biokaasulla on etu muihin biopolttoaineisiin nähden.

4.1 Biokaasu maanviljelijöiden näkökulmasta

Maatilalla toimivien biokaasulaitosten ansiosta maanviljelijät saavat lisätuloa ja turvaavat myös omaa sähkön ja lämmönsaantia. Biokaasutuotannossa syntyvä mädätysjäännös on erittäin hyvä lannoite. Se sisältää suuria määriä typpeä, fosforia, kaliumia ja hivenaineita. Normaaliin eläimen lantaan verrattuna mädätysjäännös on parempi tehokkuudeltaan paremmin homogoidun lannoitteen, ravinteiden saannin, paremman hiili/typpi suhteen ja pienempien hajuhaittojen vuoksi. Mädätysjäännöksen käsittely biokaasutuotannon jälkeen Biokaasutuotannossa ravinteet kiertävät suljetussa järjestelmässä. Syntynyt metaani käytetään energiantuotannossa tuottaen hiilidioksidia. Hiilidioksidi sitoutuu ilmakehästä takaisin kasvistoon fotosynteesin avulla. Biokaasulaitoksen yksi tärkein valttikortti on mahdollisuus käyttää märkiä biomassoja, joilla kosteusprosentti on yli 60 – 70 %.

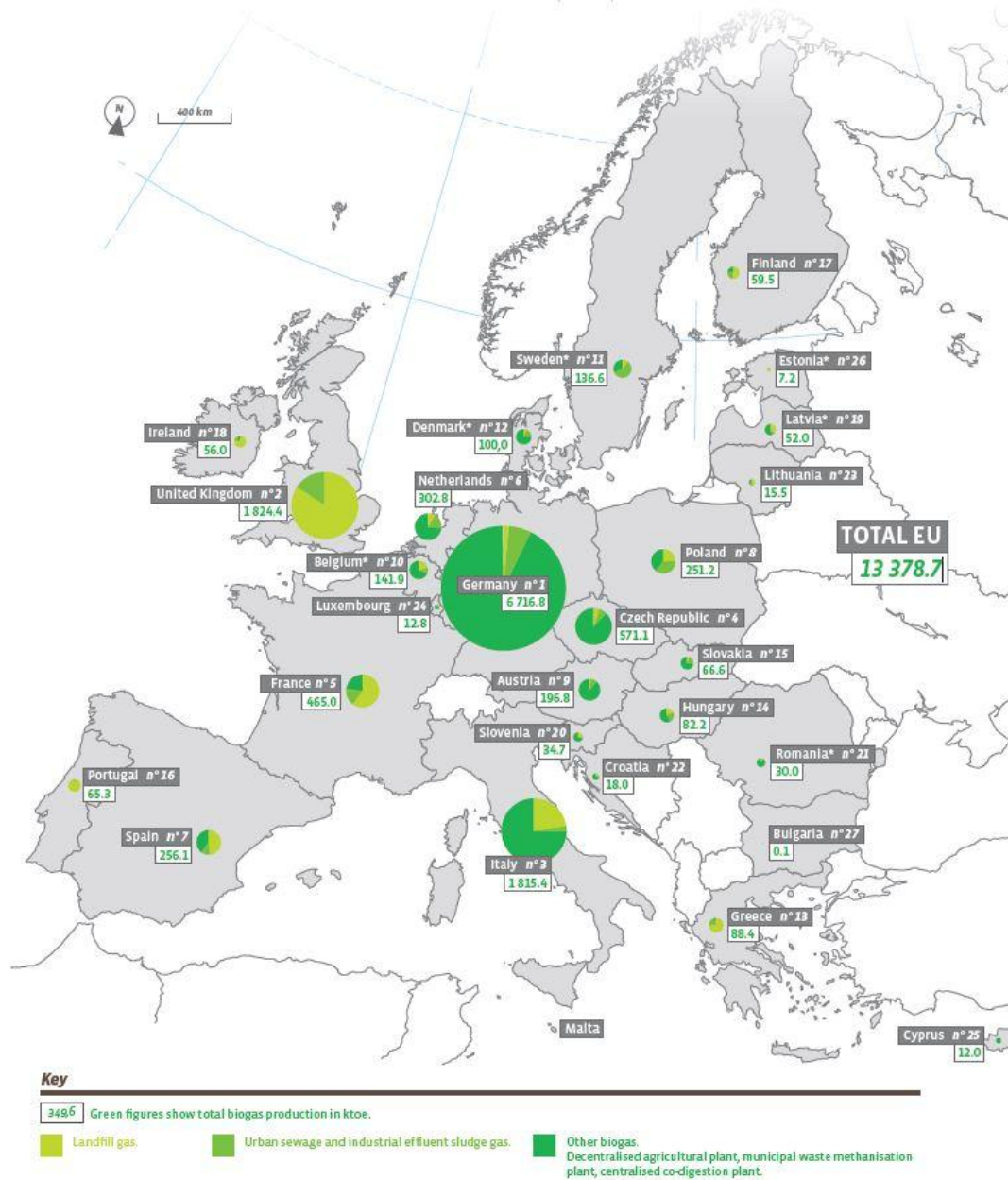
5 BIOKAASU SUOMESSA JA EUROOPASSA

Biokaasua tuotettiin vuonna 2013 Euroopassa 13,4 (Mtoe) miljoonaa öljykvivalenttitonnia. Sähköä biokaasusta tuotettiin vuonna 2013 52,3 TWh, mikä vastaa noin 60 prosenttia Suomen vuotuisesta sähkön kulutuksesta. Suurimpia biokaasun tuottajia ovat Saksa, Englanti ja Italia, jotka yhdessä tuottavat 75 % koko Euroopan biokaasusta.

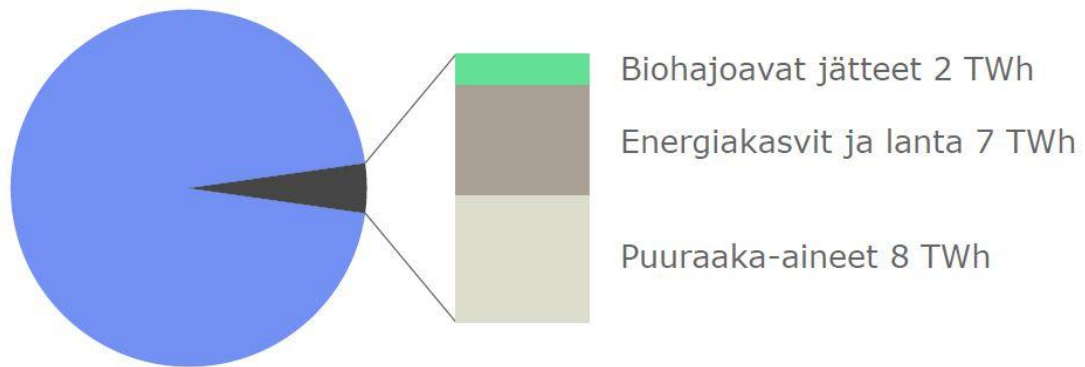
Saksa

Saksassa, joka tuottaa tällä hetkellä eniten biokaasua Euroopassa (50 %) on nyt havaittavissa käännekohta biokaasun tuotannossa ja uusien laitosten käyttöönotossa. Elokuussa vuonna 2014 voimaan astunut uusi uusiutuvan energian laki vähentää reilusti yhteiskunnan tukia biokaasulle. Laissa poistettiin tuki energiakasvin käyttämisestä biokaasun tuotantoon. Tällä koitetaan kehoittaa käyttämään orgaanista- ja maatalousjätettä. Lisäksi yli 100 kW tehoisten laitosten investointitukia on leikattu 50 %. 20 vuoden syöttötariffijakso säilyy ennallaan, mutta vuodesta 2016 alkaen alkaa vuotuinen 0,5 % alennus syöttötariffiin. Syöttötarffia maksetaan biokaasutuotannon raaka-aineen mukaan. Kuvassa nähdään 8 Euroopan maiden biokaasun tuotantomääriä. Kuvasta 8 huomataan että Suomessa tuotettiin biokaasua 59,5 (ktoe) tuhatta öljykvivalenttitonnia. Naapurimaa Ruotsissa biokaasua tuotettiin tuplamäärä Suomeen verrattuna. (EuroObserv ER. 2014)

Biokaasun raaka-aineet ovat kotimaisia, joten biokaasun myötä Suomen energiaomavaraisuus kasvaa. Gasum on arvioinut Suomen biokaasun tuotantopotentilaaliksi 17 TWh. 2 TWh voitisiin tuottaa biohajoavista jätteistä, 7 TWh energiakasveista ja lannasta sekä 8 TWh puuraaka-aineista. Tällä hetkellä biokaasua tuotetaan noin puolet siitä.



Kuva 8. Biokaasun tuotanto Euroopan maissa. Yksikkönä tuotetussa biokaasussa käytetään tuhansia öljykvivalenttitonnejä. Kuva: (EuroObserv'ER, 2014)

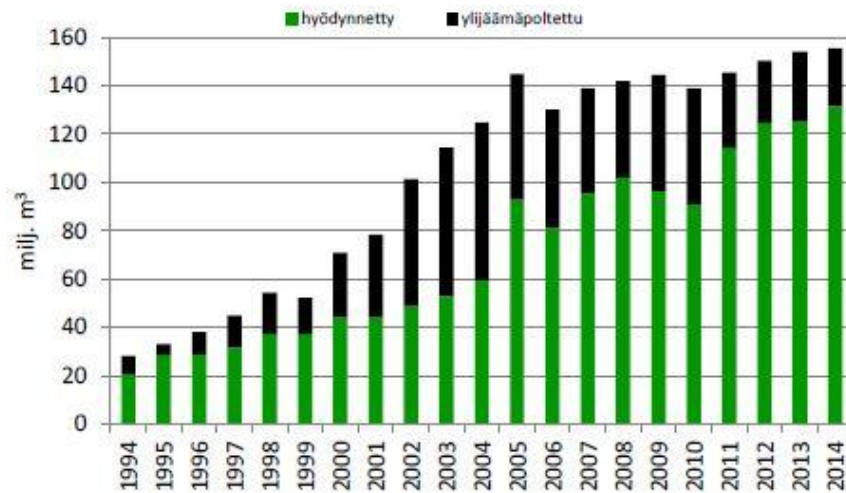


Kuva 9. Biokaasun tuotantopotentiaali Suomessa. (Torri. 2014)

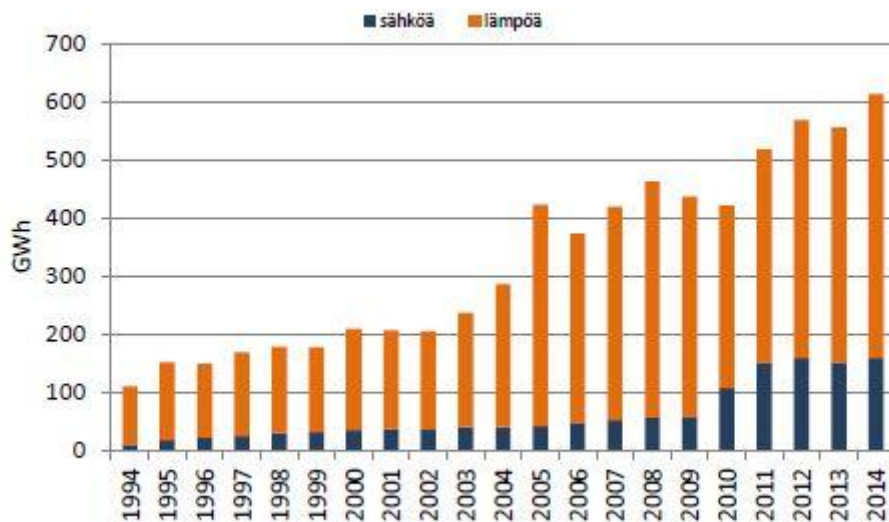
Suomessa tuotettiin vuonna 2014 biokaasua yhteensä 155,5 milj. m³. Edellisvuodesta määrä nousi 1 %. Hyödynnetyn kaasun osuus nousi 81 %:sta 84,5 %:iin. Biokaasusta tuotettiin vuonna 2014 lämpöä 454,7 GWh ja sähköä 158,6 GWh. Kokonaisenergiamäärä on tällöin 613,3 GWh, joka on 0,5 % Suomen uusiutuvan energian tuotannosta. Vieläkin kaasun hyödyntämisessä on parantamisen varaa, sillä biokaasua poltetaan yhä ylijäämäpoltona 101,0 GWh verran.

Reaktorilaitoksissa kaasua tuotettiin 61,5 milj. m³. Reaktorilaitosten kaasuntuotto on ollut nousussa viime vuosina. Vuonna 2014 reaktorilaitoksilla tuotettiin 309,6 GWh energiaa, mikä on 16 % enemmän edellisvuoteen verrattuna. Kaatopaikkojen tuotanto pysyi lähes samana 94,0 milj. m³. Kaasun hyödyntämisprosentti kuitenkin kasvoi 6 %.

Vuoteen 2005 asti biokaasuntuotanto kasvoi huomattavasti Suomessa. Sen jälkeen on tapahtunut käänne, jossa tuotettua kaasua hyödynnetään tehokkaamin, lähinnä kaatopaikka-kaasun osalta. Kuvassa 10 esitellään Suomen kaasuntuoton kehitystä vuodesta 1994. Vuosien saatossa biokaasusta on pääosin tuotettu lämpöä erilaisiin käyttökohteisiin. Viime vuosina sähköntuotanto on kasvanut uusien biokaasulaitosten myötä. Kuvassa 11. esitellään biokaasusta tuotetun sähkön ja lämmön kehitystä vuodesta 1994 alkaen.



Kuva 10. Suomessa tuotettu ja hyödynnetty biokaasu vuodesta 1994 vuoteen 2014. Kuva: (Huttunen & Kuitinen. 2015)



Kuva 11. Biokaasusta tuotettu sähkö- ja lämpöenergia Suomessa vuodesta 1994 vuoteen 2014. Kuva: (Huttunen & Kuitinen. 2015)

5.1 Biokaasun liikennekäyttö

Biokaasua jalostetaan myös liikennekäyttöön ja sen kulutus on kasvussa. Tällä hetkellä biokaasua voidaan tankata kaikilta kaasun tankkausasemilta, joita on Suomessa 24. Biokaasuasemia voidaan rakentaa huomattavasti maakaasuasemia vapaammin, sillä ne eivät

ole sidoksissa maakaasuverkkoon. Biokaasutuotantolaitokset sijaitsevat kuitenkin kaukana liikenteen solmukohdista, jolloin kaasua on kuljetettava pitkiäkin matkoja.

6 BIO10-LAITOKSEN TOIMINTAPERIAATE

Biokymppi Oy on Kiteellä mesofiilisella lämpötila-alueella toimiva yhteiskäsittelylaitos. Biohajoavan materiaalin käsittelyn lisäksi laitos tuottaa sähköä valtakunnan verkkoon sekä kaukolämpöä Kiteen kaukolämpöverkkoon. Osan tuottamastaan lämmöstä ja sähköstä laitos käyttää biokaasutuotantoprosessin toimintaan. Läheiseltä Kiteen kaupungin kaatopaikalta kerätään lisäksi biokaasua CHP-tuotantoon. Biohajoavan materiaalin mädättämisen ja hygienisoinnin johdosta syntyy luomukelpoista lannoitetta maataloille. Taulukossa 8 on esitelty tuotantolukuja vuodelta 2015.

Taulukko 8. Bio10 tuotantolukuja vuodelta 2015.

Vastaanotettu jäte	19300 t/a
CHP-moottorien sähköteho	3 x 160 kW _{el}
CHP-moottorien lämpöteho	2 x 167 kW _{th} + 206 kW _{th}
Kaasukattiloiden teho	800 kW & 1 MW
Sähkön myynti valtakunnan verkkoon	1570 MWh
Lämmön myynti kaukolämpöverkkoon	4150 MWh
Lannoitteiden tuotto:	
Luomukymppi A (neste)	9200 m ³
Luomukymppi B (kiinteä)	235 t/a
Peltokymppi A (neste)	14200 m ³

6.1 Vastaanotto ja esikäsittely

Biokymppi Oy ottaa vastaan erillispakattua biojätettä, kotitalouksien biojätettä elintarviketeollisuuden sivuvirtoja, rasvanerotuskaivojen lietteitä, jäteveden puhdistamoiden lietteitä, roskakalaa, sekä karjanlantaa. Laitoksella on kaksi linjaa luomuksi kelpaavalle materiaalille. Laitokselle tuotava materiaali vastaanotetaan kolmeen vastaanottosiiloon: yhteen 100m³ ja kahteen 70 m³. Siiloista materiaali nostetaan siltanosturilla (kuva 12) esikäsittelylinjastolle. Esikäsittelylinjaston on suunnitellut ja toimittanut saksalainen WELtech, jo-

hon on lisätty Vimelcon esimurskaus. Laitoksen oma henkilökunta on muokkailut ja parannellut linjastoa laitoksen käsittelemän materiaalin vaatimuksien mukaan sekä huollettavuuden parantamiseksi.



Kuva 12. Siltanosturilla biojätettä nostetaan taustalla näkyvään vihreään esimurskaimeen. Kuva: Keikko K, Heiskanen H)

Esimurskaimessa materiaali murskataan pienemmäksi 40mm palakokoon. Esimurskaimessa pyöriä teriä vastakkaiseen suuntaan ja tarvittaessa hydrauliset painimet pakottavat murskattavan materiaalin terille. Esimurskauksen jälkeen syötteestä erotellaan magneetilla metallinpalaset. Metallin kerätään ja kierrätetään asianmukaisesti. Metallin erottelun jälkeen biohajoava materiaali siirretään ruuvikuljettimella (kuva 13) separaattorille.



Kuva 13. Ruuvikuljettimella murskattua materiaalia siirretään separaattorille

Separattorissa materiaalisyötteestä erotellaan pakkausmateriaali, joka soveltuu energian tuotantoon polttolaitoksissa. Separattorissa esimurskattu biojäte ”pestään” rummussa pyörivien lapojen avulla (kuva 14). Lajojen päällä on seula, jonka läpi painava ja silmäkokoaa pienempi materiaali menee keskipakovoiman seurauksena. Kevyt (pakkausmateriaali) ja seulan silmäkokoaa isompi materiaali siirretään ruuvikuljettimella ylitelavalle odottamaan kuljetusta polttolaitokselle. Separattorin jälkeen seos pumpataan hienontimelle (maserator), jossa sitä edelleen jauhetaan pienemmäksi, jotta palakoko on maksimissaan 12 mm. Hienonnuksen jälkeen seos pumpataan bufferisäiliöön BV100 odottamaan syöttöreaktoriin.



Kuva 14. Turbosepaattorin pyörivät lavat.

Karjan mahalanta ja peltobiomassa murskataan toisessa linjassa, jonka jälkeen se sekoitetaan reaktorista pumpattavaan seokseen säiliössä BZ100. Säiliön jälkeen seos hienonnetaan ja siitä erotellaan magneetilla metallit. Magneettierotuksen jälkeen seos pumpataan bufferisäiliöön BV100. Bufferisäiliötä lämmitetään, jotta seos ei jäädy talvella ja hydrolyysi prosessi käynnistyy.

Nestemäiset lietteet vastaanotetaan säilöihin BV400 ja BV600. Niitä sekoitellaan keskenään, jonka jälkeen ne pumpataan BV200 bufferisäiliöön.

6.2 Biokaasun tuotanto

Biokympillä on kaksi WELtech:in toimittamaa reaktoria kooltaan 2700 m³ ja 1000 m³, isompi luomumateriaalia ja pienempi jäteveden puhdistamolietteitä ja muita eläinperäisiä jätteitä varten, jotka eivät sovellu luomulannoiteraaka-aineeksi. Reaktoreita syötetään jaksottaisesti uudella biohajoavalla materiaalilla. Luomureaktoria syötetään 12 krt päivässä ja ei luomu 5 krt päivässä. Reaktoriin syötettävän materiaalin kuiva-ainepitoisuus on noin 8 - 10 %. Reaktorissa biohajoava materiaali hajoaa metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Jotta hajoa-

minen olisi mahdollisimman tehokasta tulee reaktorissa olevaa materiaalia sekoittaa. Isommassa reaktorissa on yksi vinosekoitin ja kolme upposekoitinta. Upposekoittimia ajetaan 50 min sykleissä, joissa 20 min on ajoaikaa ja 30 min lepoaikaa. Vinosekoitin on käytössä tarpeen mukaan. Pienemmässä reaktorissa on vain yksi sekoitin, jota käytetään koko ajan. Reaktorissa muodostuva kaasu kokoontuu reaktorin ylätilassa olevaan kaasutilaan. Syntyneessä kaasussa esiintyy rikkivetyä lähinnä eläinperäisten materiaalin (lanta) hajoamisen johdosta. Rikkivedyn poistamiseksi kaasutilaan syötetään n. 4 - 5 m³/h ilmaa, jolloin rikin pelkistäjäbakteerit muuttavat rikkivedyn alkuainerikiksi.

Taulukko 9. Tuotettu biokaasu vuonna 2015.

	Tuotettu biokaasumäärä [m ³ n]	Metaanipitoisuus [%]
Luomureaktori (2700 m³)	1 373 500	56,5
Ei luomureaktori (1000 m³)		60,7
Kaatopaikkakaasu	389 250	52
Yhteensä	1 762 750	56,4 (painotettu keskiarvo)

6.3 Biokaasun kuivaus ja siirto

Reaktoreista biokaasu imetään kaasupumppaamoon, jossa sitä puhdistetaan CHP-käyttöä ajatellen. Kaasusta poistetaan kosteus jäädyttämällä sitä alle vesikastepisteen, jolloin biokaasussa oleva vesihöyry lauhtuu vedeksi. Myös kaatopaikalta syntyvä kaasu pumpataan kaasupumppaamolle ja edelleen CHP-käyttöön. Kaasupumppaamolta lähtee tuplaputket Kiteen kaupungin aluelämpökeskukselle Arppentielle n. 1,5 km päähän. Arppentiellä sijaitsee yksi sähköteholtaan 160 kW CHP-yksikkö ja 1 MW_{th} kaasukattila. CHP-yksikön ja kaasukattilan tuottama lämpö ajetaan Kiteen kaukolämpöverkkoon. Tuplaputkituksella voidaan kaatopaikalta ja reaktoreista tuleva kaasu pumpata erikseen. Laitoksen suunnitteluvaiheessa on otettu huomioon mahdollinen biokaasun jalostaminen liikennepolttoaineeksi myöhemmässä vaiheessa. Laitoksen lämmöntuotantoa ja -käyttöä kuvataan tarkemmin kappaleessa 7.

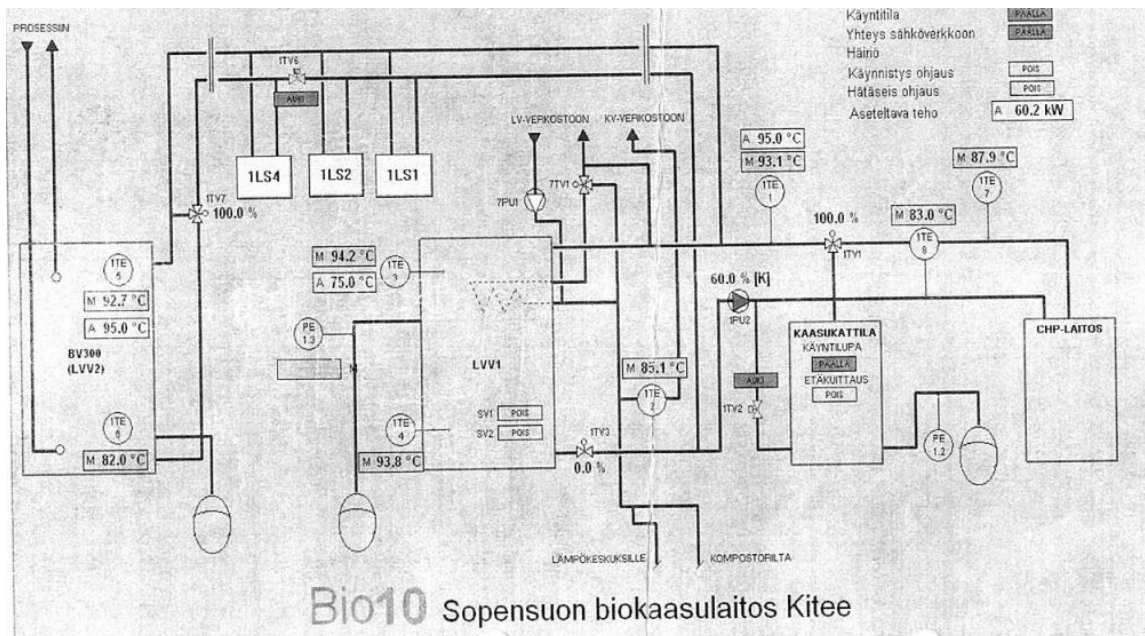
6.4 Hygienisointi ja lannoitteiden valmistus

Mesofiilisessä prosessissa vaaditaan hygienisointi mädätyksen jälkeen mikäli käytetään sivueläintuoteluokan 3 jätteitä. Hygienisoinnin tarkoituksena on tappaa mädätteestä patogeenit. Hygienisoinnissa reaktorista pumpataan kerrallaan aina 8500 kg erä mädätettä jota kierrätetään lämmönvaihtimessa, kunnes sen lämpötila on 73 astetta. Tässä lämpötilassa sitä pidetään tunnin ajan. Lämmönvaihtimen toiminnasta on havaittu, että on tärkeää pitää kierto koko ajan päällä lämmitysvaiheessa, jottei lämmönvaihdin pääse tukkeutumaan ja likaantumaan. Luomumädätteelle ja ei luomulle on oma lämmönvaihdin, mutta 10 m³ hygienisointisäiliöt ovat vapaasti kummankin mädätteen käytettävissä.

Tunnin pidon jälkeen luomuliete pumpataan ruuvikuivaimelle kiinto-aineen erotusta varten. Neste kerätään prosessivesisäiliöön BV700. Ei luomu tavara pumpataan betoniseen säiliöön BV 500. Ennen nestemäisen lannoitteen siirtoa pelloille, se pumpataan sellaiseen välivarastosäiliöihin BE100/200/300, joista kukin on tilavuudeltaan 2500 m³.

7 LÄMMÖNTUOTANNON JA KÄYTÖN NYKYTILA

Lämmöntuotanto koostuu kahdesta 167 kW_{th} CHP-laitoksesta ja 800 kW_{th} kaasupolttimesta. Laitoksella lämpöä käytetään mädätteen hygienisointiin, reaktorien ja bufferisäiliöiden lämmittämiseen sekä kiinteistön lämmöntarpeisiin. Laitokselta palaava 60 – 70 C vesi lämmitetään CHP-laitoksella 80 asteiseksi. Kaasukattilalla neste lämmitetään asetettuun lämpötilaan. Tavoitelämpötilaan päässyt neste ohjataan kahteen varaajaan, joita käytetään laitoksen lämmöntarpeisiin. Laitoksen lämmönkäyttö on asennettu sarjaan, jossa ensimmäisenä on korkeinta lämpötilaa vaativa hygienisointi. Hygienisoinnin jälkeen lämpöä ohjataan reaktoreiden ja bufferisäiliöiden lämmitykseen. Viimeisenä lämmönkäytössä on kiinteistön LVI-järjestelmä. Tämän jälkeen neste ohjataan jälleen CHP-laitokselle uutta kiertoa varten. Kuvassa 15 on esitelty laitoksen päälämpöpiiri.



Kuva 15. Laitoksen lämpöpiirikaavio (Lähde: Laitoksen kiinteistövalvontaohjelma)

7.1 Laitoksen lämmöntuotanto

Bio10:n lämmöntuotanto käsittää kaksi 160 kW sähkötehoista CHP-laitosta. Moottorista lämpöä otetaan talteen pakokaasulämmönvaihtimella. CHP-laitoksen lämmöntuotanto ei riitä saavuttamaan asetettua tavoitelämpötilaa, joten kaasukattilaa joudutaan käyttämään

tavoitelämpötilan (95 C) saavuttamiseen. Kolmitieventtiilillä 1TV1 säädetään kaasukattilalta otettavaa lämpö määrää. Tuotettu lämpö varastoidaan kahteen x ja x kokoisiin lämmivesivaraaajiin.

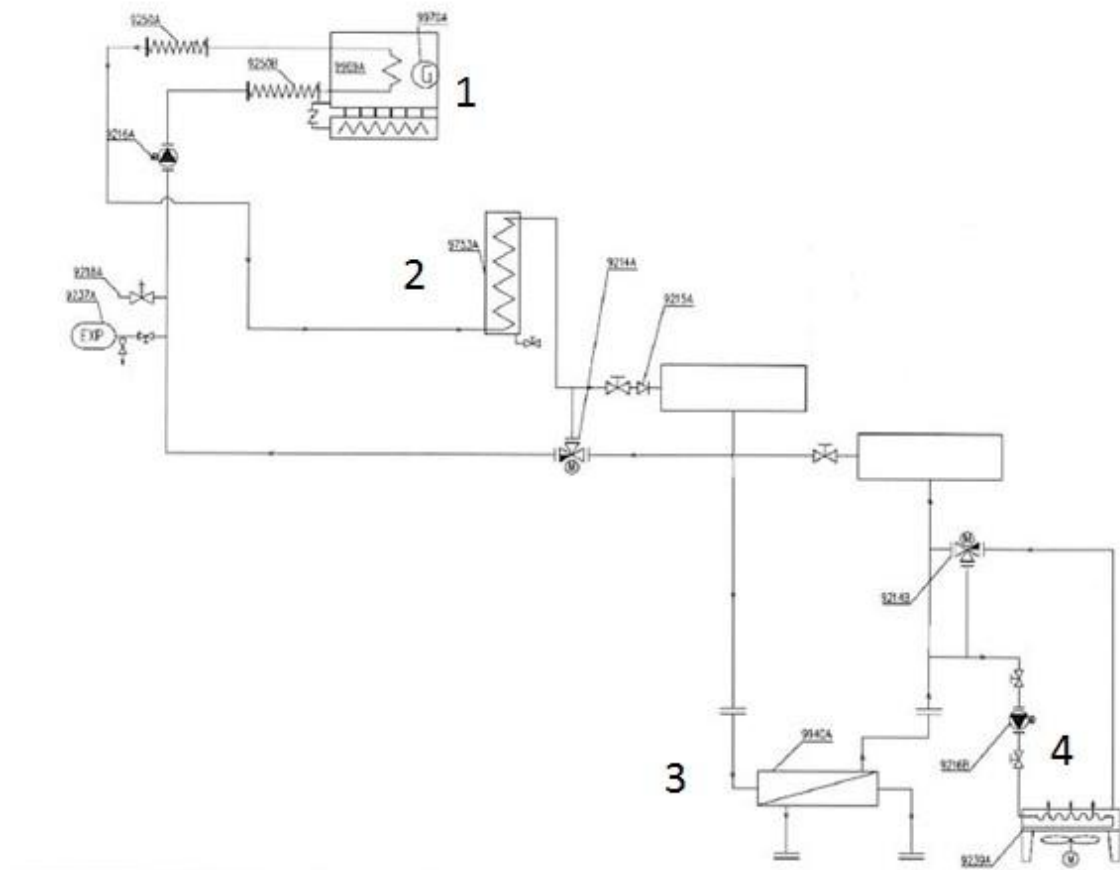
Tsekkiläisen Tedomin valmistamat CHP-laitokset tuottavat biokaasuprosessin tarvitsemää sähköä ja lämpöä. Turboahdettu ja välijäähdytetty polttomoottori tuottaa sähköä 38,1 % hyötysuhteella. Pakokaasuista ja moottorin jäähdytyksestä kerätään lämpöä talteen yhteensä 167 kW/moottori. Taulukossa 10 on esitelty moottorin toiminta-arvoja. Polttoaineena käytetyn biokaasun oktaaniluku on huomattavasti korkeampi (noin 130) kuin bensiinin, joka mahdollistaa korkean puristussuhteen käytön. Korkea puristussuhde kasvattaa volumetristä hyötysuhdettä ja siten tehoa. Halkaisija/iskunpituus suhde on alle 1, jolloin moottori on säädetty tuottamaan paras vääntö alhaisilla kierrosnopeuksilla. Myös männän nopeus on alhainen pienillä kierrosnopeuksilla, joka rasittaa vähemmän moottoria. Sähköntuotantoon tarkoitettut moottorit ovat optimoituja toimimaan tietyllä kierrosalueella usein 1500 tai 1800 rpm sähköverkon taajuudesta (50 tai 60 Hz) johtuen.

Taulukko 10. Tedom-moottorin ominaisuuksia

Moottorin malli	TB 168 GV TW 86
Sylinterimäärä ja järjestestys	6, suora
Männän halkaisija ja iskunpituus	130 x 150 mm
Puristussuhde	11 : 1
Iskutilavuus	11940 cm ³
Kierrosnopeus	1500 min ⁻¹
Teho	169,3 kW
Polttoainetehto	420 kW
Sähköteho ja -hyötysuhde	160 kW, 38,1 %
Lämpöteho ja -hyötysuhde	167 kW, 39,8 %

Jäähdytysnesteen kierto on hoidettu siten, että neste kiertää ensin moottorin nestetilassa jäähdyttäen moottoria ja moottoriöljyä. Sieltä vesiglykoliseos johdetaan pakokaasulämmönvaihtimeen, jossa turbolta noin 600 asteisena tulevia pakokaasuja jäähdytetään edelleen 200 asteeseen. Lämmönvaihtimen jälkeen lämpöenergia siirretään sekundäärilämmönvaihtimen avulla laitoksen lämpöpiiriin. Mikäli lämpöä ei tarvita laitoksen tarpeisiin,

kontin katolla on varajähdytysjärjestelmä jähdytystä varten. Kuvassa 16 on esitelty CHP-laitoksen lämpöpiirikaavio.



Kuva 16. Moottorin lämpöpiirikaavio. 1.Moottori. 2. Pakokaasulämmönvaihdin. 3. Toisiopiirin neste/nestelämmönvaihdin. 4. Varajähdytyslämmönsiirrin.

Hygienisointiin tarvitaan yli 73 °C lämmönlähde. Moottoreista ei yleensä saada riittävästi lämpötehoa koko laitoksen lämmöntarpeisiin, joten lämpöpiiriin on kytketty sarjaan 800 kW kaasukattila kattamaan lämmöntarve kokonaisuudessaan.

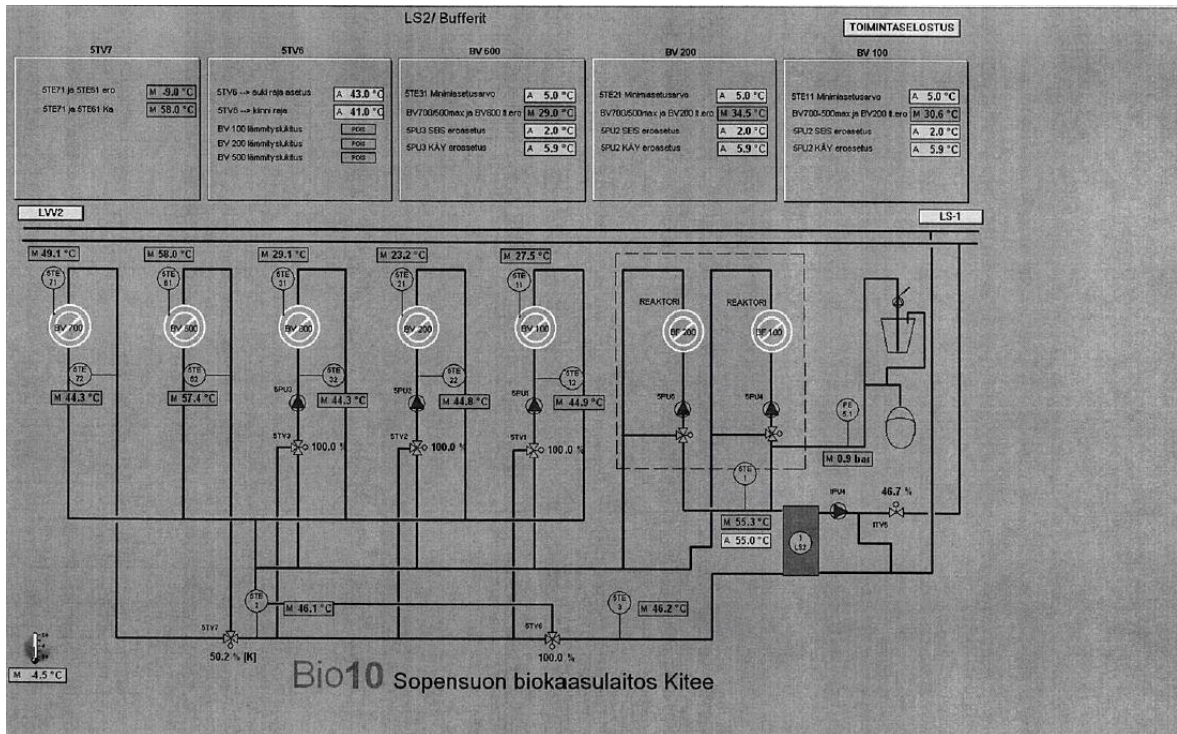
7.2 Lämmönkäyttö

7.2.1 Hygienisoinnin lämmönkäyttö

Hygienisointi vaatii mädätysjäännöksen pitämistä 73 asteen lämpötilassa tunnin ajan. Reaktorilta tulevaa noin 38 asteen lämpötilassa olevaa mädätysjäännöstä tulee lämmittää vähintään 73 asteeseen saakka. Vesivaraajaa 2 (LVV2) hyödynnetään hygienisoinnin lämmönsiirtimissä. Varaajan lämpöenergialla lämmitetään mädätettä kahdessa erillisessä lämmönsiirtimessä. Luomulle ja ei luomulle on oma lämmönsiirtimensä, mutta säiliöitä voidaan käyttää sekä luomulle että ei luomulle. Lämmitys tapahtuu siten, että ensiksi reaktorilta pumpataan lämmönsiirtimen kautta mädätettä säiliö täyteen. Säiliön täytyttyä mädätettä kierrätetään lämmönsiirtimen kautta kunnes aineksen lämpötila säiliössä on 73 °C. Tämän jälkeen mädätysjäännöstä pidetään tunti säiliössä, kunnes hygienisoitu mädätysjäännös voidaan pumpata ruuvikuivaimen kautta varastosäiliöihin BV500 ja BV700.

7.2.2 Reaktori- ja bufferisäiliöiden lämmitys

Metaanin muodostukselle otollisimmat olosuhteet ovat noin 37 asteen lämpötilassa, kun käytetään mesofiilistä prosessia. Itse metaanin syntymisprosessi on endoterminen, joten reaktoreita tulee lämmittää. Laitoksen päälämpöpiirikaaviossa näkyvä (kuva x) 1LS2-piiri sisältää reaktoreiden sekä varastosäiliöiden lämmityksen. Lämmönsiirtimen 1LS2 jälkeen vesiglykoliseos kiertää kummassakin reaktorissa. Venttiilillä 1TV5 säädetään reaktoreille menevän nesteen lämpötilaa ollen tällä hetkellä 55 °C Lämmitettyään reaktoreita neste lämmittää bufferisäiliöitä (BV100 ja BV200) sekä puhdistamolietteen vastaanottosäiliötä BV600. Näiden jälkeen lämpöä otetaan talteen säiliöistä BV500 ja BV700. Näissä kahdessa säiliössä säilytetään hygienisoituja nestemäisiä lannoitteita ennen niiden pumppaamista välivarastointialtasiin BE100/200/300. Mikäli kiertävän nesteen lämpötila nousee riittävän korkealle BV500 ja BV700 jälkeen, lämpöä ohjataan vastaanotto- ja buffeisäiliöiden lämmitykseen kolmitieventtiileillä 5TV1/2/3 ennen kiertoa takaisin 1LS1 lämmönsiirtimelle. Kuvassa 17 esitellään 1LS2- piirin toimintaa prosessikaavion avulla.



Kuva 17. Valvomokuva 1LS2 piiristä, joka käsittää reaktorien-, bufferi- ja vastaanottosäiliöiden lämmityksen sekä lämmöntalteenoton mädätysjännöksestä hygienisoinnin jälkeen.

Lämmitysputkina säiliöissä käytetään NIROFLEX-tuotenimellä saatavia DN 50 aallotettuja teräsputkia. Aallotetun putken ansiosta putken lämmönsiirtoteho sekä lämmönsiirtopinta-ala metriä kohti kasvaa. Aallotetussa putkessa virtaus on turbulenttista normaalin RST-putken laminaarin sijaan. Virtauksen turbulenttisuus putken sisällä kuin myös putken ulkopuolella kasvattaa lämmönsiirtokerrointa ja siten lämmönsiirtotehoa. Putken aallotus ohentaa putken seinämää, joka puolestaan auttaa lämmönsiirrossa. Lämmönsiirtoteho normaaliin ruostumattomaan putkeen verrattuna kasvaa jopa 30 %. Kasvaneen lämmönsiirtotehon lisäksi aallotettu putki taipuu helposti, jolloin asennus ympyränmuotoiseen tilaan on helppoa.



Kuva 18. Niroflex-putkea

Reaktoreissa, bufferisäiliöissä ja hygienisoidun mädätysjäännöksen säiliöissä on lämmitys-/lämmöntalteenottoputkia taulukon 11 mukaisesti.

Taulukko 11. NIROFLEX-putkien määrät ja tehot BIO 10:llä

Tunnus	Nimi	Halkaisija [m]	Korkeus [m]	Putkien pituus [m]/kierroksien lukumäärä	Lämpö- teho [kW]	ΔT [°C]
BF100	Luomureaktori	24,8	6,28	391/5	-	10
BF200	Ei luomureaktori	14,7	6,28	232/5	-	10
BV100	Bufferisäiliö 1	6,0	7	50/2	20	10
BV200	Bufferisäiliö 2	6,0	7	50/2	20	10
BV500	Ei luomu varastoin- tisäiliö	7,9	4	147/6	150	10
BV600	Vastaanottosäiliö	7,9	4	98/4	100	10
BV700	Luomu varastoin- tisäiliö	5,7	7	140/8	200	10

7.2.3. Kiinteistön lämmönkäyttö

Kiinteistö käyttää laitoksen tuottamaa lämpöä lämmitykseen, ilmanvaihtoon sekä lämpimään käyttöveteen. Hygienisoinnin ja reaktoriin jälkeen lämmönkulutuspiiriin on kytketty sarjaan lämmönsiirrin joka luovuttaa kiinteistön LVI-järjestelmään lämpöä. Ensiöpuolella siirtimessä on vesi ja toisiopuolella vesiglykoliseos. Piirin menolämpötilaa säädelään ulkolämpötilan mukaan menevällä käyrällä.

8 LÄMMÖNTALTEENOTON KEHITTÄMINEN JA ONGELMAT BIO10:LLÄ

Kasvava kiinnostus lämmöntalteenottoon, energiatehokkuusvaatimukset sekä huoli ilmastomuutoksesta lisäävät mielenkiintoa energiantuotto-prosessien hyötysuhteen parantamiseen. Hyötysuhteen parantamisen myötä myös prosessin kannattavuus paranee ja primäärienergiälähteiden käyttö pienenee.

8.1 CHP-laitos

Laitoksen CHP-tuotannossa polttomoottorien savukaasuista otetaan lämpöä tällä hetkellä talteen 200 °C asti. Pakokaasuista lämpö siirretään moottorin toisiopiiriin putkilämmönvaihtimilla, jonka jälkeen pakokaasut johdetaan äänenvaimentimen kautta ulkoilmaan.

Pakokaasuissa on vielä paljon hyödynnettävissä olevaa lämpöenergiaa. Opinnäytetyössä tutkitaan, olisiko hukkalämmön hyödyntäminen kannattavaa. Hukkalämpö otettaisiin talteen lämmönvaihtimella, joka sijoitettaisiin nykyisen pakokaasulämmönvaihtimen jälkeen ennen äänenvaimenninta. Talteenotettu lämpö ohjataan laitoksen lämpöpiiriin CHP-laitoksen rinnalle sijoitettavasta lämmönsiirtimestä.

Lämmön hyödyntämisen suurin ongelma on rikkihapon muodostuminen savukaasun jäähtyessä. Polttomoottorin savukaasuissa oleva rikkihappo voi tiivistyä lämmönvaihtimen tai savupiipun pinnoille, jos savukaasun lämpötila on liian alhainen ja aiheuttaa näin suurempaa korroosiota lämmönsiirtimeen ja pakokaasun virtaussuunnassa siitä edesspäin oleville metallipinnoille.

8.1.1 Korroosio

Biokaasu sisältää pieniä pitoisuuksia rikkivetyä eläinperäisten raaka-aineiden (lähinnä lanan) seurauksena. Biokaasussa rikki on sitoutunut vetyyn muodostaen rikkivetyä (H₂S). Matalan lämpötilan lämmöntalteenotossa happokastepisteen merkitys kasvaa. Rikkihappo on metallipinnoille tiivistyessään voimakkaasti syövyttävä aine. Syövyttävän rikkihapon

estämiseen helpoin tapa on toimia happokastepisteen yläpuolelle, jolloin rikkihappo ei pääse lauhtumaan lämmönsiirrinmateriaalin pinnalle. Toimittaessa näin, moottorin pakokaasujen lämpötila on vielä suhteellisen korkea ja näin ollen se vähentää lämmöntalteenotto-mahdollisuuksia. Helpoin keino rikkihappopitoisuuden vähentämiseksi biokaasulaitoksessa on vaikuttaa olosuhteisiin reaktorissa kaasun syntymisvaiheessa. CHP-käyttöön tarkoitetun kaasun puhdistamiseksi riittää yleensä hapen syöttö reaktoriin, jolloin rikinpelkistäjäbakteerit pelkistävät rikkivedyn alkuainerikiksi, joka on olomuodoltaan kiinteä. Myös muita keinoja on kehitetty pakokaasujen rikkipitoisuuden vähentämiseksi. Polttoteknisillä ratkaisuilla voidaan vähentää rikkitrioksidin muodostusta pakokaasuissa. Lämmönsiirrinmateriaalin valinnalla voidaan vaikuttaa rikkihapon syövyttävyyteen, jolloin pakokaasuja voidaan jäähdyttää happokastepisteen alapuolelle. Liikennebiokaasun jalostuksessa käytetään biokaasun puhdistuksessa yleensä vesipesua, josta kerrottiin kappaleessa 3.6.

8.1.2 Rikkiyhdisteiden muodostuminen pakokaasuissa

Polttoaineen sisältämä rikki vapautuu poltossa ja reagoi hapen läsnä ollessa muodostaen rikin oksideja. Rikkivedyn on todettu vapautuvan ja hapettuvan nopeasti rikkitrioksidiksi (SO_2). Tätä kuvaa reaktioyhtälö 3.

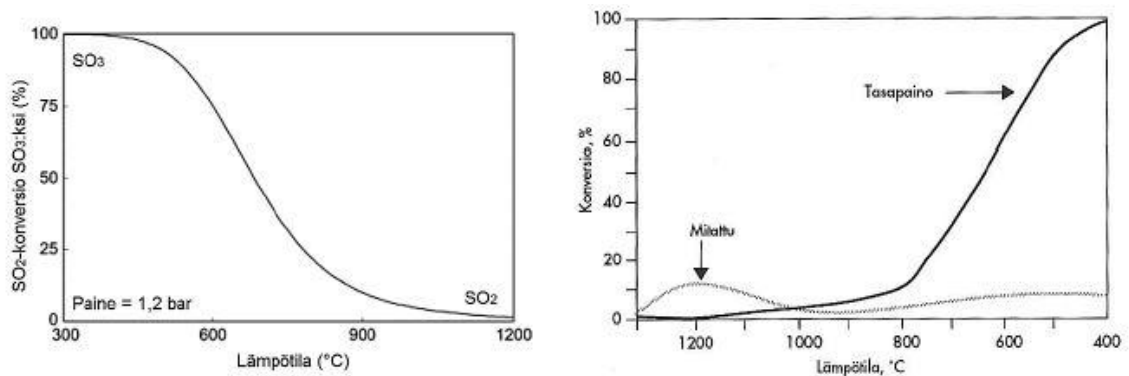


Muodostuneesta rikkidioksidista osa reagoi edelleen hapen kanssa muodostaen rikkitrioksidia yhtälön 4 mukaan.



Vaikka rikkidioksidin ja trioksidin ympäristövaikutukset ovat samat, kattilapintojen kannalta rikkitrioksidin pitoisuus on merkittävä. Rikkitrioksidin reaktioyhtälön tasapainoon vaikuttaa lämpötila ja paine suurimpina tekijöinä. (Iisa. 2002) Reaktioyhtälön tasapainokäyrä on esitetty kuvassa 19. Rikkitrioksidia muodostuu kahdella eri tavalla: termisesti korkeissa lämpötiloissa ja katalyyttisesti matalammissa lämpötiloissa. Terminen muodostus vaatii yli 1100 °C lämpötiloja, joihin ei normaalisti polttomoottoreissa päästä. Niinpä

valtaosa rikkiatrioksidista muodostuu katalyyttisesti alemmissa noin 500 – 800 °C lämpötiloissa. Katalyyttien olemassaolo on välttämätön reaktiolle, ilman niitä reaktiota ei tapahdu. Katalyytteinä toimivat polttotapahtumassa pintojen likakerrostumat. Tasapainokäyrän mukaisesti rikkiatrioksidia muodostuu eniten alhaisissa lämpötiloissa. Rikkidioksidi tarvitsee kuitenkin pitkän viipymisajan suotuisissa lämpötiloissa (400 – 600 °C), jotta rikkiatrioksidin konversioaste nousisi korkealle. Polttomoottoreissa kuten muissakin polttoprosesseissa viipymäajat ovat lyhyitä eikä katalyyttejä ole tarpeeksi. Näin ollen polttoprosessien yhteydessä mitatut rikkiatrioksidipitoisuudet ovat alemmat kuin tasapainoyhtälöt antavat olettaa (kuva 19b). Polttomoottorien pakokaasuissa noin 1 – 5 % rikkidioksidista konvertoituu rikkiatrioksidiksi. (Iisa. 2002)



Kuva 19. a) Tasapainokäytä rikkidioksidin konversiolle rikkiatrioksidiksi. Muokattu lähteestä (King et al. 2013). b) Tyypilliset savukaasuista mitatut pitoisuudet sekä tasapainoarvot. (Iisa. 2002)

Paine vaikuttaa myös rikkiatrioksidin tasapainokäyrään. Paineen kasvaessa tasapaino suosii kaasua, jota on ainemäärältään vähemmän, jolloin tasapainokäyrä suosii rikkiatrioksidia. Lämpötilalla on kuitenkin huomattavasti suurempi vaikutus kuin paineella rikkiatrioksidin tasapainokäyrään.

Rikkihappoa muodostuu kun rikkiatrioksidi reagoi alhaisessa lämpötilassa nopeasti vesihöyryn kanssa muodostaen rikkihappoa yhtälön 5 mukaisesti.



Myös rikkihapon muodostus noudattaa tasapainokäyrää. Alle 200 C lämpötiloissa yli 95 % rikkiatrioksidista muodostaa rikkihappoa. Näin ollen rikkiatrioksidin määrä pakokaasuissa on oleellinen rikkihapon muodostuksen kannalta. Rikkihappo alkaa tiivistyä lämmönsiirrin-

materiaalien pinnoille, kun sen lämpötila alittaa happokastepisteen. Materiaalien kannalta rikkihappo on haasteellinen vasta kun se tiivistyy materiaalien pinnoille. (Iisa. 2002)

Jäähtyneistä pakokaasuista rikin oksideja voidaan puhdistaa kalsiumpohjaisten yhdisteiden avulla. Puhdistus tapahtuu yleensä pesureissa, joissa kaasuihin syötetään rikkioksideja sitovaa lietettä. Pakokaasuista saadaan poistettua rikkioksideja määrillä menetelmillä yli 95%.

8.1.3 Happokastepiste

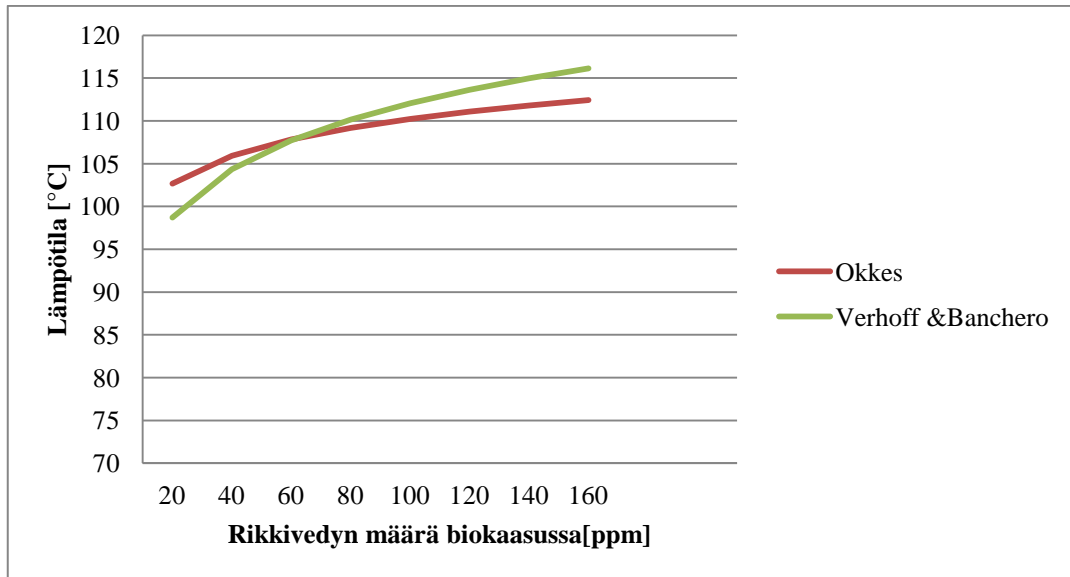
Happokastepiste on lämpötila, jossa lämmönsiirrinpinnoille tiivistyvä happo syövyttävät pintoja voimakkaasti. Happokastepiste vaikuttaa mitoitukseen siten, että sen alle tulisi välttää menemästä. Rikkihapon kastepiste on kastepisteistä korkein, joten se on mitoittava tekijä korroosion ehkäisyssä. Rikkihapon kastepiste riippuu pakokaasujen vesi ja rikkitrioksidipitoisuuksista. Verhoff ja Banchemo (1974) sekä Okkes (1987) tutkivat rikkihappokastepistettä ja kehittivät korrelaatiot rikin happokastepisteelle. Verhoffin ja Banchemon malli on esitetty yhtälössä 6 ja Okkesin malli yhtälössä 7.

$$\frac{1}{ADT} = 0,002276 - 0,00002943 \times \ln(p_{H_2O}) - 0,0000858 \times \ln(p_{SO_3}) + 0,00000620 \times \ln(p_{H_2SO_4}) \times \ln(p_{H_2O}) \quad (6)$$

$$ADT = 365,6905 + 11,9864 \times \ln(p_{H_2O}) + 4,70336 \times \ln(p_{SO_3}) + (0,446 \times \ln(p_{SO_3}) + 5,2572)^{2,19} \quad (7)$$

,jossa ADT happokastepiste (acid dew temperature) [K]
 p komponentin osapaine pakokaasuissa [mmHg]

Kuvassa 20 esitetään laitoksen CHP-moottorien rikkihappokastepiste erilaisilla biokaasun rikkivetypitoisuuksilla. Kuvasta huomataan, että laitoksen toimiessa vakaasti alle 100 ppm pitoisuuksilla happokastepiste on 110 asteen tienoilla.



Kuva 20. Rikkihappokastepiste biokaasun rikkivedyn funktiona.

8.1.4 Lämmönsiirtimen materiaalivalinnat

Erilaiset materiaalit kestävät erilaisia olosuhteita toisia paremmin. Kestävyys riippuu materiaalin koostumuksesta ja olosuhteiden voimakkuudesta. Matalan rikkihappopitoisuuden alueella voidaan käyttää ruostumattoman teräksen laatuja, joka kestää hyvin laimeiden rikkihapon vesiliuoksien korroosiota vastaan ja joka johtaa hyvin lämpöä. Lisäksi ruostumaton teräs on vahva, helposti muokattavissa sekä suhteellisen edullinen materiaali. Chen et al. (2012) mukaan austeniittiset tai ferriittiset kromilla, molybdeenillä ja nikkelillä seostetut teräkset ovat tyypillisiä savukaasulauhduttimien lämmönsiirto-materiaaleja. Materiaalin tärkein ominaisuus on korkea lämmönjohtavuus, mikä tulee korroosionkeston ohella ottaa huomioon materiaalivalinnassa. (Levy et al. 2011; Chen et al 2012)

Taulukko 12. Materiaalien haponkestävyyksiä kiehuvaassa nesteessä. (yksikkönä mil/a= tuuman tuhannesosia vuodessa)

	304L	316L	317L	ZERON 100	2205	AL-6XN	C-276	Alloy 20	625
20% Acetic Acid	0.1	0.12	0.48	0.0	0.01	0.12	0.48	0.0	–
45% Formic Acid	15	23.41	18.3	0.36	0.50	2.40	2.76	8.4	5.0
10% Oxalic Acid	–	44.90	1.14	–	7.80	7.32	11.24	31.2	6.0
20% Phosphoric Acid	–	0.60	0.72	0.36	0.80	0.24	0.36	0.2	0.36
10% Sodium Bisulfate	–	71.57	55.9	–	25.4	4.56	2.64	7.2	3.96
50% Sodium Hydroxide	71	77.7	32.8	–	24	11.4	17.8	7.2	–
10% Sulfamic Acid	50	124.3	94.2	–	22	9.36	2.64	9.6	4.8
10% Sulfuric Acid	662	635.7	298	0.36	206	71.9	13.93	13.2	37
1% Hydrochloric Acid	85	226	54.2	<0.36	–	58.7	10	39.6	1.0
65% Nitric Acid (A262 Practice C)	8.9	22.1	–	10.6	20.06	26.2	900.1	–	21

Taulukosta 12 huomataan, että ZERON 100, C276 ja Alloy 20 kestävät muita paremmin rikkihappoa. Normaalin hapokkaan teräksen 316L korroosionopeus on moninkertainen parempiin materiaaleihin verrattuna.. Molybdeeniä ja nikkeliä sisältävät metalliseokset ovat yleisimpiä savukaasulauhduttimen lämmönsiirrinmateriaaleja.

8.2 Hygienisoitu mädätysjäännös

Hygienisoitu liete on noin 70 asteista, joten siitä voitaisiin helposti saada lämpöenergiaa talteen. Mädätysjäännös pumpataan hygienisoinnin jälkeen ruuvikuivaimelle, joka erottelee mädätysjäännöksestä nesteen ja kiinteän aineksen. Nestemäinen tavara ohjataan säiliöihin (BV500 ja BV700). Kiinteä aine johdetaan kompostilaitokseen aumakuivaukseen yhteen kolmesta tunnelista. Säiliöissä on lämmöntalteenottoputkistoa taulukon 11 (kpl 7.2.2) mukaisesti. Lämmöntalteenottokapasiteetti säiliöissä on pieni verrattuna mahdollisuuksiin. Vuosittain suuri määrä energiaa jää hyödyntämättä korkean lämpötilan vuoksi. Nestemäinen lannoite pumpataan noin 40 - 60 asteen lämpötilassa välivarastointisäiliöihin. Lämpöä voitaisiin hyödyntää reaktori- ja bufferisäiliöiden lämmittämiseen, jolloin ILS02 lämminsiirtimen käyttö jäisi pienemmäksi. Tätä myötä laitoksen lämmöntuotantoa voitaisiin pienentää (lähinnä kaasukattilan käyttöä). Lämmön siirtämiseen voidaan käyttää mädätysjäännös/vesiglykoli-putkilämmönsiirrintä tai lämpöpumppua.

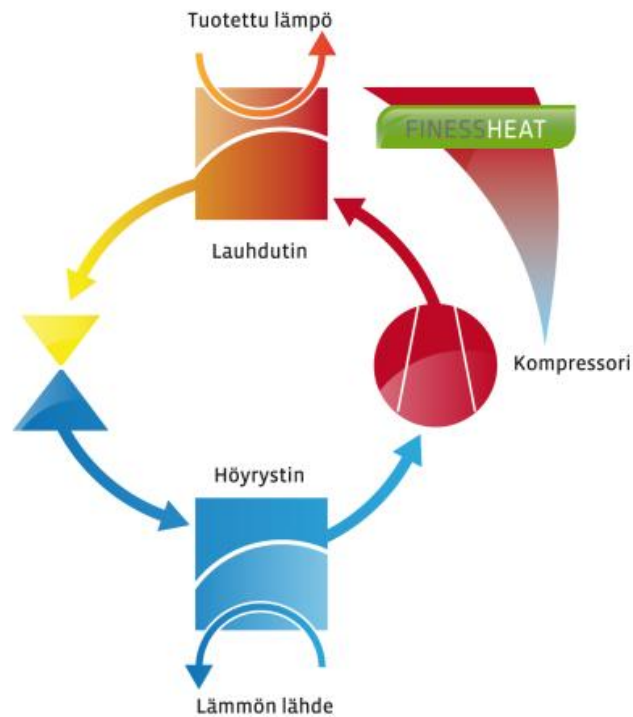
Näissä lämmönvaihtimen tukkeentuminen kiintoaineen vuoksi voi kuitenkin osoittautua hankalaksi ongelmaksi. Puhdistusmenetelmillä tai mitoittamalla lämmönvaihdin riittävän väljäksi voidaan tukkeutumista ehkäistä. Myös jotain muuta tilanteeseen sopivaa lämmönsiirrinteknologiaa tulee myös miettiä vartenotettavana vaihtoehtona.

8.2.1 Putki- ja levylämmönsiirrin

Putkilämmönsiirrin soveltuu levylämmönsiirrintä paremmin mädätysjäännöksen lämmöntalteenottoon, koska se pysyy helpommin puhtaana. Putkilämmönsiirrin rakennetaan usein kaksoisputkimallisena sen helpon valmistamisen takia.

8.2.2 Lämpöpumpputeknologia

Yhä enemmän yleistynyt tekniikka kiinteistöjen lämmityksessä on erilaiset lämpöpumpputekniikat. Isossa mittakaavassa lämpöpumput soveltuvat myös teollisuuden lämmöntalteenottoon. Lämpöpumpun tehtävänä on siirtää alempitasoista lämpöä korkeatasoisempaan ulkoisen työn avulla. Lämpöpumppu koostuu yksinkertaisuudessaan neljästä osasta: kompressorista, lauhduttimesta, paisuntaventtiilistä ja höyrystimestä. Kompressorissa matalapaineinen kylmäaine puristetaan korkeapaineiseksi. Samalla kylmäaineen lämpötila nousee ja se tulistuu hieman. Lauhduttimessa tulistettu kylmäaine jäähtyy painettansa vastaavaan lauhtumislämpötilaan ja lauhtuu nesteeksi luovuttaen lämpöä. Paisuntaventtiilissä korkeapaineinen neste alennetaan matalapaineiseksi nesteeksi ja samalla neste jäähtyy. Höyrystimen tehtävä on ottaa energiaa lämpölähteestä ja höyrystää neste kaasuksi. Höyrystimen jälkeen kaasu siirtyy kompressorille ja kierros alkaa alusta.



Kuva 21. Lämpöpumpun osat ja toimintaperiaate (Kuva: Finess Oy)

Hygienisoidun mädätysjäännöksen lämmöntalteenotossa lämpöpumpulla voitaisiin tehostaa jo olemassa olevaa talteenottoa, jolloin säiliöihin ei tarvitsisi välttämättä lisätä lämmönsiirrinmateriaalia. Säiliöihin BV500 ja BV700 virtaavaa lto- nestettä voitaisiin jäähdyttää lämpöpumpulla, jolloin säiliöistä saadaan enemmän lämpöä siirtymään nesteeseen. Lämpöpumppu siirtäisi keräämänsä lämmön säiliöiden BV500 ja BV 700 jälkeen takaisin nesteeseen. Tällöin voitaisiin käyttää jo olemassa olevia talteenottoputkistoja.

9 LAITTEIDEN MITOITUS JA KYTKENTÄ PROSESSIIN

Lämmöntalteenottojärjestelmät tulee mitoittaa prosessin mukaisesti ja kytkentä prosessiin tulee miettiä, että mahdollisimman vähän joudutaan muuttamaan olemassaolevaa putkitusta, automaatiota. Tässä kappaleessa käymme läpi sekä CHP-laitoksen että hygienisoidun mädätteen LTO-järjestelmän mitoitusta ja kytkentää. Yleisesti lämmönsiirtimen mitoitus lähtee liikkeelle yhtälöstä 8, jolla lasketaan lämmönsiirtimen lämpöteho.

$$\Phi = UA\Delta T_{log} \quad (8)$$

,jossa	Φ	lämpöteho	[kW]
	U	lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	ΔT_{log}	logaritminen lämpötilaero	[°C,K]

Lämmönsiirtokerroin U määritellään lämmönsiirtokertoimien avulla. Lämpöä voi siirtyä johtumalla esim putken seinämän läpi, konvektion avulla ja säteilemällä. Pakokaasulämmönvaihtimessa lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa johtumalla ja konvektion avulla. Yhtälö (x) ottaa huomioon nämä kaksi lämmönsiirtymistapaa. Putkivirtauksessa termi h_1 tarkoittaa lämmönsiirtoa putken sisällä olevasta virtauksesta seinämään ja termi h_2 lämmönsiirtoa putken pinnasta ulospäin. Näihin kertoimiin vaikuttaa lämpöä siirtävien aineiden fyysiset ja kemialliset ominaisuudet sekä virtausnopeudet. Empiiristen kokeiden avulla on konvektion erilaisiin tilanteisiin kehitetty malleja, joita käyttämällä päästään kohtuulliseen tarkkuuteen lämmönsiirtokertoimissa. Erilaisia tilanteita voivat olla, esim vapaa konvektio, pakotettu konvektio, sisäinen ja ulkoinen virtaus, vertikaali ja horisontaali taso.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(h_1 \cdot A_1)} + \frac{dx_w}{(k \cdot A)} + \frac{1}{(h_2 \cdot A_2)} \quad (9)$$

,jossa	h	konvektiolämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
	dx_w	seinämän paksuus	[m]
	k	materiaalin lämmönjohtumiskerroin	[W/mK]
	1,2	pinta 1 & 2	[-]

Logaritminen lämpötilaero tarkoittaa lämmönsiirtimessä olevaa logaritmista keskimääräistä lämpötilaeroa. Kun lämpötilaero on suurempi siirtyvä lämpöteho on myös suurempi. ΔT_{\log} lasketaan yhtälön 10 mukaisesti.

$$\Delta T_{\log} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\log\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\log\left[\frac{(T_{h,in} - T_{c,out})}{(T_{h,out} - T_{c,in})}\right]} \quad (10)$$

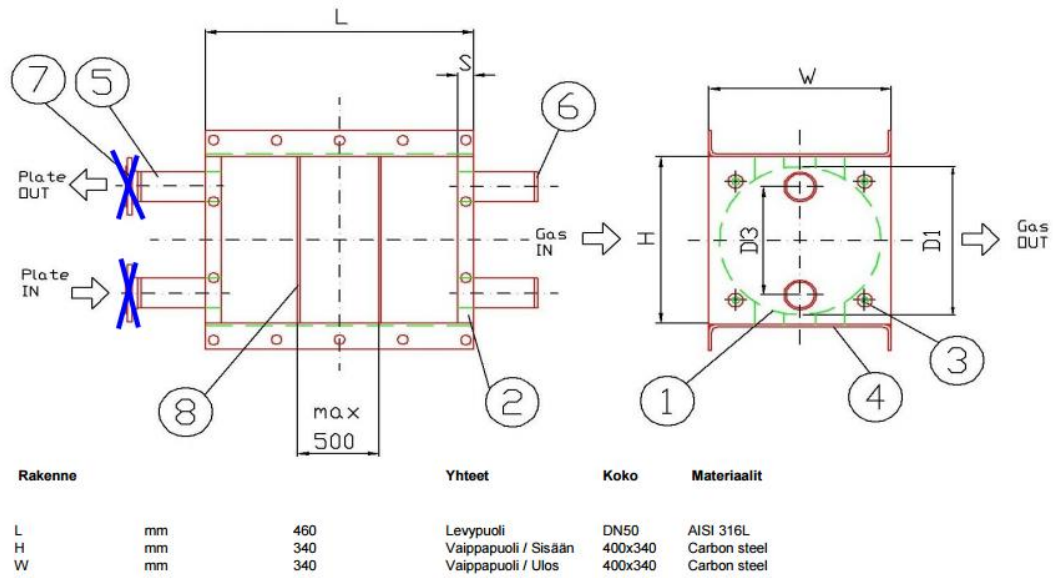
,jossa	$T_{h,in}$	kuuman aineen lämpötila sisääntulossa	[K]
	$T_{h,out}$	kuuman aineen lämpötila uloslähdössä	[K]
	$T_{c,in}$	kylmän aineen lämpötila sisääntulossa	[K]
	$T_{c,out}$	kylmän aineen lämpötila uloslähdössä	[K]

9.1 CHP-laitos

CHP-laitoksen pakokaasut poistuvat tällä hetkellä noin 200 °C lämpötilassa. Savukaasujen määrä on 0,176 m³n/s. Moottorinvalmistaja rajaa turbon jälkeen maksimipainehäviöksi 10 mbar. Turbon jälkeen on Tedomin oma pakokaasulämmönvaihdin, jolloin mahdollisen lisälämmönvaihtimen painehäviö tulee pitää pienenä.

9.1.1 Vahterus

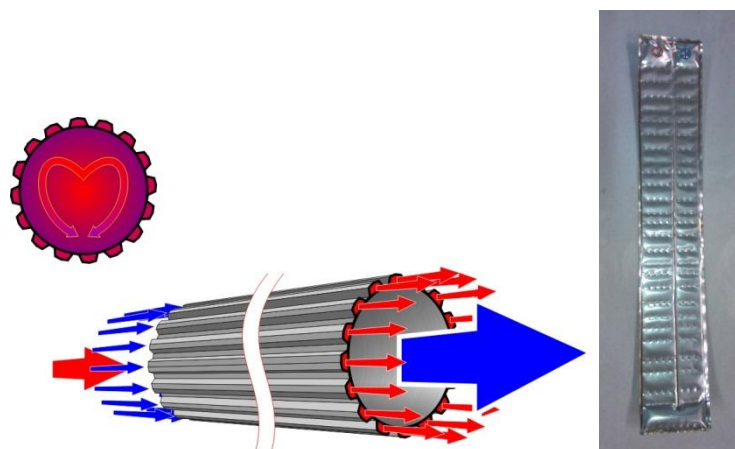
Vahterus Oy tarjoama lämmönvaihdin CHP-laitoksille on rakenteeltaan ristivirta levylämmönsiirrin. Pakokaasuvirta kulkee vesiglykoliseokseen verrattuna kohtisuoraan. Vahterus tarjosi vaihdinta yhdelle moottorille, kahdelle moottorille ja kahdella eri materiaalilla. Kahden moottorin lämmönvaihdin olisi teholtaan 60 kW ja yhden moottorin vaihdin 30 kW. Kahden moottorin ja yhden lämmönvaihtimen sisältämässä järjestelmässä tulisi kuitenkin ongelmia pakokaasun takaisinvirtauksen vuoksi, koska laitos käyttää pääsääntöisesti vain yhtä moottoria kerrallaan. Materiaalivaihtoehtoina lämmönsiirtimeen on 316L ja 904L, jälkimmäisen ollessa rikkihapon kestävyydeltään parempi. 904L materiaallinen lämmönvaihdin ei ole hinnaltaan juurikaan kalliimpi.



Kuva 22. Vahterus Oy:n tarjoama levylämmönsiirrin.

9.1.2 Polarsol

Polarsol tarjoaa pakokaasujen talteenottoon spiraalilämmönvaihdinta. Spiraalilämmönvaihdin koostuu ohuista lämmönsiirrinkennoista, jotka on taitettu spiraalin muotoon kuvan 23 mukaisesti. Aaltoilevalla ja ohuella materiaalilla saadaan hyvä lämmönsiirtoteho pinta-alaa kohti. Lämmönsiirtokennot ovat modulaarisia, joten niitä voidaan asentaa sarjaan savukaasuvirtauksen suuntaisesti kasvattaen lämpötehoa halutun suuruiseksi.



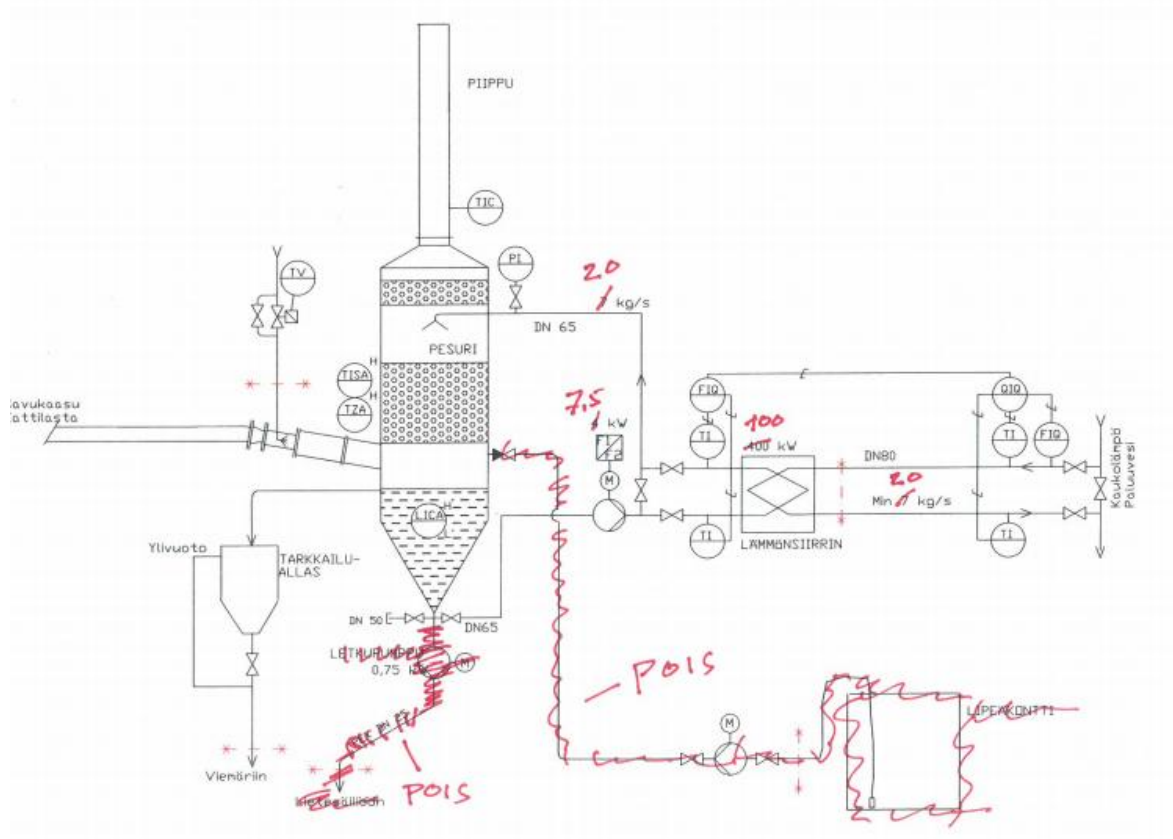
Kuva 23. Polarsol Oy:n spiraalilämmönvaihtimen rakenne. (Polarsol)

9.1.3 Condens Heat Recovery Oy - savukaasupesuri

Condensen tarjoama savukaasupesuri on varsin mielenkiintoinen kokonaisuus. Savukaasupesurissa savukaasut lauhdutetaan, jolloin vesihöyryn sisältämä energia saadaan talteenotettua. Laitoksen paluulämpötila (n.70 °C) on kuitenkin niin korkea, että lauhtumista ei juurikaan tapahdu. Tarjouksen hintaan kuuluu:

1. Pesuri: Pesurin halkaisija n. 700 mm ja korkeus n. 5 metriä; Rakenne haponkestävä teräs. Pesurin kuumat osat on eristetty.
2. Pesurin päällä piippu; Halkaisija n. 200 mm ja korkeus n. 15 metriä; Rakenne haponkestävä teräs.
3. Pesurin putkistot virtauskaavion mukaan; Rakenne haponkestävä.
4. Venttiilit virtauskaavion mukaan.
5. Pesuripumppu; Tuotto n. 20 kg/s, moottori 7,5 kW.
6. Lämmönsiirrin; Teho n. 100 kW; Levymateriaali AISI316L.
7. Tarvittavat kenttäinstrumentit.
8. Laitteiden suunnittelu ja tarvittavat dokumentit.
9. Rahti Kiteelle.

Condens Oy suosittelee pesurin asentamista sisätiloihin, jolloin investointikustannukset olisivat vielä suuremmat.



Kuva 24. Savukaasupesurin PI-kaaviokuva.

9.1.4 LVI-urakointi

Pakokaasujen lämmönsiirtimet kytketään CHP-laitoksen sekundääripiiriin lämmönvaihtimen rinnalle. Kaasukattilakonttiin sijoitetaan neste/neste-lämmönsiirrin LS_SK3, joka siirtää pakokaasusta talteenotetun lämmön laitoksen lämpöpiiriin. LS_SK3 on tarpeellinen sillä, pakokaasulämmönvaihdinpiirissä ja laitoksen lämpöpiirissä kulkee eri neste. Moottoreiden ollessa pysähdyksissä pakokaasulämmönvaihtimet altistuvat pakkaselle, jolloin nesteen tulee olla pakkasta kestävä. Piiriin asennetaan pumppu kierrättämään vesiglykolia savukaasulämmönvaihtimissa. Kummallekin pakokaasulämmönvaihtimelle lähtee pumpun jälkeen oma menoputkensa. Kumpaankin putkeen asennetaan säätöventtiili rajoittamaan nesteen virtausta, kun pakokaasun loppulämpötila laskee 120 °C alle. LS_SK1 ja 2:lta palaavat putket yhdistyvät yhdeksi putkeksi ja se palaa kaasukontissa sijaitsevalle LS_SK3. Järjestelmään asennetaan lisäksi vielä paisuntasäiliö, varoventtiili ja järjestelmän täyttölaitteet kaasukattilakonttiin.

9.1.5 Sähkö/Automaatio

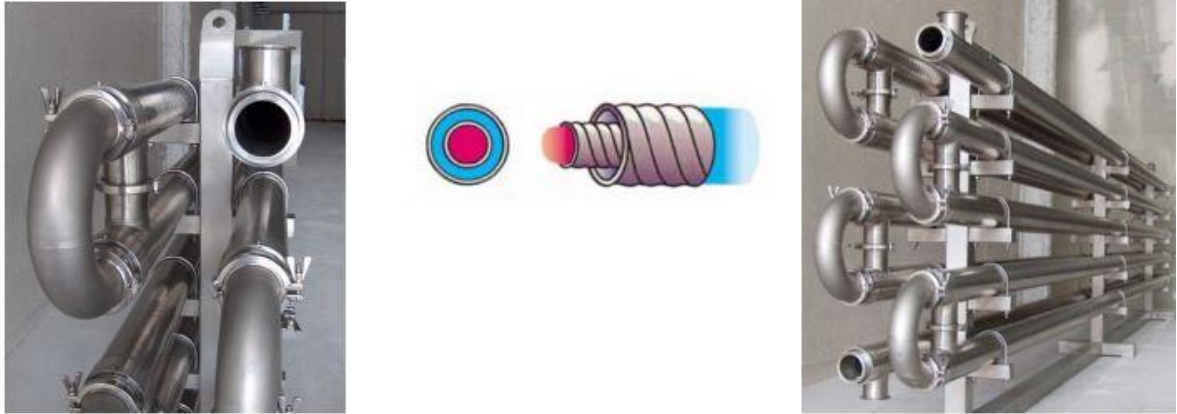
Sähkötöiden ja automaation osalta CHP-laitoksella on pumpun sähkömoottorin kytkentä, pakokaasulämpötilamittarin kytkentä sekä säätöventtiilien kytkentä ja ohjauksen säätö. Lämpötila-anturilla ohjataan säätöventtiiliä rajoittaen lämmönvaihtimen tehoa, jolla estetään rikkihapon tiivistyminen lämmönsiirtopinnoille. Säätöventtiilille ohjaussignaali tulee olla 0-10 V ja käyttöjännite 24 V AC. Lämpötila-anturina toimii termoelementti. Kiinteistövalvontaohjelmaan luodaan piirrokset järjestelmästä, jolla voidaan seurata ja ohjata sen toimintaa.

9.2 Hygienisoitu mädäte

Hygienisoinnissa mädätysjäännös lämmitetään 73 asteeseen ja pidetään siinä tunti. Pitoajan jälkeen luomutavarasta erotellaan nestemäinen ja kiinteä aines ruuvikuivaimella. Nestemäiset lannoitteet pumpataan varastosäiliöihin, joissa on jo valmiina lämmöntalteenotto-putkistoa.

9.2.1 Putkilämmönsiirrin

Putkilämmönsiirtimen sijoitus prosessiin tulisi hygienisoinnin jälkeen. Putkilämmönsiirtimen lämpö ohjattaisiin vastaavanlaisella kytkennällä prosessiin kuin mitä lämpöpumpulla (ks kuva 26). Ennen varastointisäiliöitä lämmönsiirtoneste ohjattaisiin lämmönsiirtimelle, josta se palautettaisiin takaisin järjestelmään ennen 1LS2 lämmönsiirrintä. Hygienisoinnissa käytetään lämmönsiirtimenä putkilämmönsiirrintä Finess Oy:n kaksoisputkirakennetta. Kaksoisputki on rakenteeltaan yksinkertainen ja helppo valmistaa. Kaksoisputki koostuu kahdesta päällekkäisestä putkesta, joissa virtaa nestettä vastakkaisiin suuntiin. Yleensä kuumempi tavara kulkee sisemmässä, pienemmässä putkessa ja viileämpi ulommassa minimoidakseen lämpöhäviöt ympäristöön.



Kuva 25. Finess Oy:n kaksoisputkityyppinen lämmönvaihdin.

Fyysisesti lämmönvaihtimet sijoitettaisiin hygienisoinnin jälkeen kompostilaitoksen yläkertaan lähelle ruuvikuivainta. Siirtimen kasaukseen menee aikaa kahdelta työmieheltä noin 1 päivä. Sekä luomulle, että normaalille mädätysjännökselle tulisi oma lämmönvaihdin, sillä luomulannoite ei saa sotkeentua normaalin lannoitteen kanssa. Yhden lämmönvaihtimen järjestelmässä lämmönvaihdin tulisi aina huuhdella yhden erän ajon jälkeen.

Taulukko 13. Putkilämmönsiirtimen ominaisuuksia

	<i>Vaippapuoli</i>	<i>Putkipuoli</i>
<i>Aine</i>	Vesi-glykoli 30 %	Mädätysjännös
$T_{in} [C]$	40	73
$T_{out} [C]$	55	59
$q_m [kg/s]$	2,5	2,5
<i>Painehäviö [bar]</i>	0,27	0,35
<i>Teho [kW]</i>	144	
<i>Pinta-ala [m²]</i>		20,1
<i>Tilavuus [l]</i>	420	354
<i>Suunnittelupaine [bar]</i>	10/-1	10/-1
<i>Materiaali</i>	AISI 304	AISI 316
<i>Rakenne</i>	114 x 2	76 x 1,5
<i>Koko</i>	Pituus 6000 mm	Halkaisija 114 mm

9.2.2 Lämpöpumppu

Lämpöpumpun tehtävä on siirtää työn avulla alempitasoista lämpöä korkeatasoisempaan tarpeeseen. Lämpöpumpun tehokkuutta mittaa sen COP kerroin (coefficient of power). Hyvällä ilma/ilmalämpöpumpulla se on 3 luokkaa. Numero 3 kertoo, että pumppu tuottaa 3 yksikköä lämpöenergiaa yhtä kulutettua sähköenergiayksikköä kohti. COP- kerroin laskeaan lämpöpumpulle yhtälön 11 mukaisesti

$$COP_{heating} = \frac{\Delta Q_{hot}}{\Delta W} \leq \frac{T_{hot}}{T_{hot}-T_{cool}} \quad (11)$$

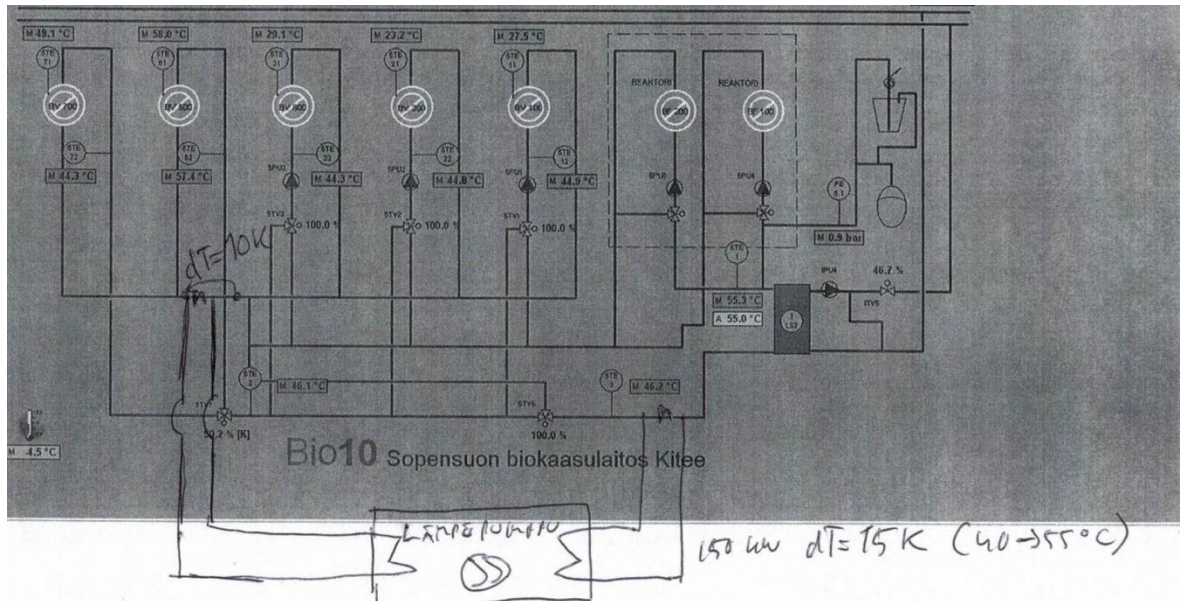
,jossa

ΔQ_{hot}	luovutettu lämpöenergia lämpönieluun	[J]
ΔW	kompressorin tekemä työ kylmäaineeseen	[J]
T_{hot}	kuumalähteen lämpötila	[K]
T_{cool}	kylmälähteen lämpötila	[K]

Finessen tarjoama lämpöpumppu on vakiomallinen, sitä ei ole varsinaisesti räätälöity tähän kohteeseen. Lämpöpumppu kytkettäisiin prosessiin kuvassa 26 esitetyllä tavalla.

Taulukko 14. Lämpöpumpun teknisiä arvoja.

<u>Lämmönlähde</u>	
T_{in}/T_{out} [°C]	n. 40/30
Teho [kW]	118
<u>Lämmöntuotto</u>	
T_{in}/T_{out} [°C]	n. 40/55
Teho [kW]	160
Kompressorin teho (2kpl Scroll) [kW]	45,9
Lämpökerroin (COP)	3,5
Päämitat (L/P/K) [m]	1,1/0,7/1,7
Paino [kg]	800



Kuva 26. Lämpöpumpun kytkentä prosessiin.

Ennen lämmönsiirrinneesten johtamista varastointisäiliöihin BV 500 ja BV700 neste johdetaan lämpöpumpulle, joka ottaa nesteestä lämpöä talteen jäädyttämällä sitä noin 10 °C. Jäähdytynyt neste johdetaan varastointisäiliöihin vastaanottamaan lämpöä hygienisoidusta mädätysjäännöksestä. Säiliöiden jälkeen lämpöpumpun keräämä lämpö siirretäisiin nesteeseen ennen lämmönsiirrintä 1LS2. Nesteen lämpötila nousisi lämpöpumpun jälkeen noin 40 asteesta 55 asteeseen, jos ajatellaan liuoksen olevan varastointisäiliöiltä palatesaan 40 asteesta. Lämpöpumpun avulla lämmönsiirrin 1LS2 tulisi melkein turhaksi sillä, lämpöpumppu nostattaa liuoksen lämpötilan reaktoreille haluttuun lämpötilaan 55 °C.

9.2.3 Automaatio

Automaatiolla tulisi varmistua siitä etteivät varastointisäiliöt BV500 ja BV700 jäätyisi. Säiliöiden lämpötila-anturit avaisivat lämpöpumpun ohitusventtiileitä säiliöiden alittaessa asetetun raja-arvon (esim 10 °C).

10 TALOUDELLINEN NÄKÖKULMA

Investoinnin kannattavuutta voidaan arvioida investoinnin takaisinmaksuajan perusteella. Takaisinmaksuaika kertoo, kuinka kauan kestää, että investoinnin aiheuttama säästö tai tuotto kattaa investoinnin. Investoinnin jälkeisinä vuosina säästöjen nykyarvo voidaan laskea yhtälöllä 12.

$$NA = a_{n,i} \times S \quad (12)$$

,jossa	NA	nykyarvo	[€]
	$a_{n,i}$	diskonttaustekijä	[-]
	S	vuosittainen säästö/tuotto	[€]

Diskonttaustekijä voidaan laskea yhtälön 13 avulla.

$$a_{n,i} = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (13)$$

,jossa	i	korkokanta	[-]
	n	mones vuosi	[-]

Korkokannalla kuvataan, pääoman hankintakustannuksia tai haluttua tuottoa investoinnista. Yleisesti laskennoissa käytetään 5 % korkokantaa. Jos heti investoinnin jälkeisinä vuosina saadaan suuremmat säästöt on silloin investoinnin nykyarvo suurempi, kuin jos säästö on tasainen vuosittain. Taulukoidaan 10 ensimmäisen vuoden nykyarvotekijät 5 % korkokannalla. 10 vuotena säästöjen nykyarvo on enää noin 61 %.

Taulukko 15. Diskonttaustekijät 5% korkokannalla

n	NA
1	0,952381
2	0,907029
3	0,863838
4	0,822702
5	0,783526
6	0,746215
7	0,710681
8	0,676839
9	0,644609
10	0,613913

10.1 CHP-laitos

Pakokaasut sisältävät vielä moottorista poistuessaan vielä runsaasti hyödynnettävissä olevaa lämpöenergiaa. Moottorin hukkalämpö tarkemmin hyödyntämällä voidaan laitosalueen 800 kW tehoisen kaasukattilan käyttöä pienentää, jolloin laitoksen toiminnan tarvitsema kaasun määrä pienenee. Säästynyt kaasu voidaan hyödyntää Arppentien polttomoottorissa tai kaasukattilassa tuottaen Kiteen kaukolämpöverkkoon lämpöenergiaa. Bio10 myy lämpöä Kiteen lämmölle 29 €/MWh hintaan.

Laitoksella ajetaan pääsääntöisesti vain yhtä CHP-laitosta toisen seistessä. Vain kun pörsin sähkönmyyntihinta on korkealla käytetään kumpaakin CHP-laitosta. Moottorin huipunkäyttöaika voidaan laskea yhtälöllä

$$\text{huipunkäyttöaika [h]} = \frac{\text{Vuoden aikana tuotettu energia [Wh]}}{\text{Nimellisteho [W]}} \quad (14)$$

Kun vain yhtä moottoria käytetään kerrallaan ja otetaan huomioon kunnossapitotöiden aiheuttamat seisokit ja että aina ei moottoreita pyöritetä täydellä teholla voidaan laskea mallillinen arvio huipunkäyttöajasta, sen ollen 4500 h. Edellisessä kappaleessa laskettiin CHP-laitoksesta saatava lämpöteho pakokaasunlämmönvaihtimesta. Se oli 29 kW/moottori, kun

moottori pyörii täydellä teholla. Arvioidaan investoinnin käyttö ja kunnossapitokuluiksi 5 €/tuotettu MWh_{th}. Pääoman koroksi asetetaan 5 %, joka on investointilaskelmissa yleinen.

Taulukko 16. Lämmönvaihtimien investointimenot ja säästötulot

	POLARSOL SPIRAALI	VAHTERUS LEVY,À 30KW	VAHTERUS, À 60KW	CONDENS SK-PESURI
LÄMMÖNVAIHDIN ASENNUS	-14 000 €	-14 700 €	-9 400 €	-100 000 €
PUTKI	-5 500 €	-5 500 €	-5 500 €	-10 000 €
SÄHKÖ & AUTO- MAATIO	-1 500 €	-1 500 €	-1 500 €	-3 000 €
MUUT ASENNUS- KULUT	-2 000 €	-2 000 €	-2 000 €	-2 000 €
YHTEENSÄ	-23 000 €	-23 700 €	-18 400 €	-115 000 €
VUOSITTAINEN LASKELMA				
LÄMMÖN MYYNTI	7 569 €	7 569 €	7 569 €	8 874 €
K JA KP KULUT	-1 305 €	-1 305 €	-1 305 €	-1 305 €
YHTEENSÄ	6 264 €	6 264 €	6 264 €	7 569 €

Vuosittainen diskontattu kumulatiivinen kassavirta esitetään taulukossa 17. Vuosittainen kassavirta on diskontattu 5 % korkoa vastaavalla diskonttaustekijällä. Taulukosta huomataan, että 4. ja 5. vuoden jälkeen halvemmissä vaihtoehdoissa investointi on maksanut itsensä takaisin.

Taulukko 17. Diskontattu kumulatiivinen kassavirta

	POLARSOL SPIRAALI	VAHTERUS LEVY 2 KPL	LE-VAHTERUS LEVY 1 KPL	CONDENS SK-PESURI
INVESTOINTI	-23 000,00 €	-23 700,00 €	-18 400,00 €	-115 000,00 €
KUM. KASSAVIRTA 1. VUOSI	-17 034,29 €	-17 734,29 €	-12 434,29 €	-107 791,43 €
2. VUOSI	-11 352,65 €	-12 052,65 €	-6 752,65 €	-100 926,12 €
3. VUOSI	-5 941,57 €	-6 641,57 €	-1 341,57 €	-94 387,74 €
4. VUOSI	-788,17 €	-1 488,17 €	3 811,83 €	-88 160,70 €
5.VUOSI	4 119,84 €	3 419,84 €	8 719,84 €	-82 230,19 €
6.VUOSI	8 794,14 €	8 094,14 €	13 394,14 €	-76 582,09 €
7.VUOSI	13 245,84 €	12 545,84 €	17 845,84 €	-71 202,94 €
8.VUOSI	17 485,56 €	16 785,56 €	22 085,56 €	-66 079,94 €
9.VUOSI	21 523,39 €	20 823,39 €	26 123,39 €	-61 200,90 €
10. VUOSI	25 368,95 €	24 668,95 €	29 968,95 €	-56 554,19 €

Taulukossa 18 esitellään investointien korollista ja korotonta maksuaikaa.

Taulukko 18. Investoinnin korollinen ja koroton takaisinmaksuaika

	POLARSOL SPIRAALI	VAHTERUS LEVY 2 KPL	VAHTERUS LEVY 1 KPL	CONDENS SK-PESURI
KOROTON TAK.MAK.AIKA (A)	3,7	3,8	2,9	15,2
KOROLLINEN TAK.MAK.AIKA (A)	4,2	4,3	3,3	29,2

10.2 Määtysjäännös

Taulukossa 19 on esitelty investointilaskelmat. Talteenotettu lämpö vähentää prosessin vaatimaa lämmöntuotantoa ja näin ollen biokaasua säästyy tuotettavaksi kaukolämpöverkoon. Kaukolämmön hintana on käytetty 29 €/MWh. Lämpöpumppuinvestoinnissa sähkön omakustannehinnaksi on arvioitu 30 €/MWh.

Taulukko 19. Määtysjäännöksen investointilaskelmat, laskentakorko 5 %

	Lämpöpumppu	Putkilämmönvaihdin
Lämmönvaihdin [€]	27500	45000
Asennus (arvio) [€]	10000	15000
Muut asennuskulut [€]	3000	5000
INVESTOINTI YHTEENSÄ [€]	40500	65000
Lämmön myyntitulot [€/a]	11454	10308
Käyttösähkö [€/a]	-3629	
Vuosittainen säästö [€]	7825	10308
Koroton takaisinmaksuaika [a]	5,2	6,3
Korollinen takaisinmaksuaika [a]	6,1	7,8

11 TULOSTEN TARKASTELU JA ANALYSOINTI

Pakokaasujen lämmöntalteenoton tehostaminen on varteenotettava vaihtoehto. Savukaasupesurin hyödyntäminen pakokaasun lämmön talteenotossa on selkeästi investointina kallis näin pienelle laitoskoolle. Vahteruksen tarjoamat levylämmönsiirtimet ovat perinteistä tekniikkaa, joilla ei pitäisi tulla yllättäviä ongelmia lämmönsiirtimien kanssa. Yhden lämmönsiirtimen tarjous on kuitenkin käytännön toteutukseltaan hankala, kun pääsääntöisesti laitoksella käytetään vain yhtä moottoria kerrallaan. Yhden moottorin käydessä pakokaasut pääsevät virtaamaan toiseen moottoriin päin ellei ongelmaa ratkaista venttiilein. Ratkaisu tekee muuten yksinkertaisesta järjestelmästä turhan monimutkaisen. Vahteruksen kahden lämmönsiirtimen versio on käytännöllisempi. Polarsol Oy:n spiraalilämmönvaihdin on hieman erikoisempaa tekniikkaa. Haponkestävän materiaalin Hastelloy C-276 ansiosta sillä voidaan päästä alempiin pakokaasun lämpötiloihin ilman lämmönsiirrinmateriaalin korrosiovaaraa.

Pakokaasupuolella hyviä vaihtoehtoja ovat Vahteruksen levylämmönsiirrin yhdelle moottorille sekä Polarsol Oy:n spiraalilämmönvaihdin. Happokastepisteen johdosta on varmasti hyvä ajaa testijakso korkeammalla lämpötilalla (esim 120 °C) ja tarkastaa lämmönsiirtimen kunto. Lähellä 100 astetta aletaan jo olla niin lähellä rikkihapon kastepistettä, että silloin tulee korroosiota seurata säännöllisin väliajoin. Biokaasulaitoksen tuottaman biokaasun rikkivetypitoisuus voi heitellä varsinkin reaktorin ruokinnan aikana suuresti.

Mädätysjäännöksen lämmön talteenottoon vaihtoehtoina ovat perinteinen kaksoisputkityyppinen lämmönsiirrin ja lämpöpumppu. Perinteisen kaksoisputkityyppisen lämmönsiirtimen ongelmana on sen vaadittu suuri koko. Koska mädätysjäännöstä ei pumpata koko ajan varastointisäiliöihin, putkilämmönsiirrin olisi massiivinen ja sitä myöten kallis. Myös erinäiset mädätysjäännöksen pumppausongelmat voivat osoittautua haastaviksi. Jo nyt laitoksella hygienisoinnissa tarvittavan lämmönsiirtimen pumppauksessa tulee ajoittain ongelmia, ja se kasvattaa kunnossapitokuluja. Hankittaessa putkilämmönsiirrin ongelmat varmasti lisääntyvät. Lämpöpumpputeknologiaa hyväksi käyttämällä ei tarvittaisi suuria putkiasennuksia, vain liitokset jo nykyiseen järjestelmään ja lämpöpumpun välille. Lämpöpumpun tarvitsema sähkö tuotettaisiin itse laitoksella, joten sekin puoltaisi lämpöpumpun asentamista. Lisäksi lämpöpumpulla voitaisiin huolehtia laitostilojen jäädytyksestä.

Mädätysjäännöksen takaisinmaksuaika on hieman pakokaasupuolta isompi (lämpöpumppu 6,1 ja putkilämmönsiirrin 7,8). Aika on investointina ehkä hieman pitkä, mutta tarjoukset sekä asennuskustannukset ovat vasta alustavia, joten ne vaativat tarkempaa suunnittelua ennen päätöstä jatkosta.

12 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tarkasteltiin erilaisia vaihtoehtoja hyödyntää hukkalämpövirtoja. Tarkastelun kohteeksi asetettiin CHP-moottorit sekä hygienisoitu mädätysjäännös. CHP-moottoreissa pakokaasuista otetaan talteen lämpöä jäädyttämällä kaasut 200 asteeseen. Potentiaalia vielä olisi, sillä rikkihappokastepiste tulee vasta 100-120 °C välillä biokaasun rikkivetypitoisuudesta riippuen. Lämmönsiirinvaihtoehtoina tarkasteltiin kahta erilaista levylämmönsiirintä, savukaasupesuri sekä spiraalilämmönsiirintä. Lisäksi biokaasun rikkihappokastepisteen vaikutusta tarkasteltiin ja pohdittiin materiaalivalintoja. Kaksi vaihtoehtoa nousi joukosta esiin: spiraalilämmönsiirrin ja levylämmönsiirrin yhdelle moottorille. Näiden investointien takaisinmaksuaika olisi 4,2 (spiraali) ja 3,3 (levy) vuotta. Spiraalilämmönsiirtimen paremmin korroosiota kestävä materiaali puoltaisi sen hankintaa. Kuitenkin kannattaa tehdä koeajoja eri lämpötiloilla, jotta varmistutaan lämmönsiirtimen korroosiokestävyydestä.

Mädätysjäännöksestä ei tällä hetkellä oteta talteen merkittävästi lämpöä. Mädätysjäännöksen lämmöntalteenottoa potentiaalia tarkasteltaessa lämmöntalteenottotavoiksi asetettiin perinteinen kaksoisputkityyppinen lämmönsiirrin ja sekä hieman erikoisempi vaihtoehto: lämpöpumppu. Kaksoisputkityyppinen lämmönsiirtimessä on omat ongelmansa, sen kalleus ja koko. Lämmönsiirintä ei tarvittaisi koko aikaa vaan silloin kun hygienisoitua mädätysjäännöstä pumpataan varastointisäiliöihin, jonka johdosta se pitäisi mitoittaa kohtuuttoman suureksi. Lämpöpumpputeknologialla voitaisiin jo hyödyntää voimassa olevia lämmöntalteenottoputkistoja. Asennustyönä lämpöpumppu olisi paljon yksinkertaisempi kuin putkilämmönsiirrin. Investoinnit olisivat takaisinmaksuajoiltaan CHP-moottoreita pitemmät 6,1 (lämpöpumppu) ja 7,8 (putkilämmönsiirrin). Lämpöpumpun hankintaa tulisi pohtia tarkempien tarjouksien perusteella.

LÄHDELUETTELO

Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T. ja Tamm, D. 2013. Biogas upgrading – Review of commercial technologies. SGC Rapport 2013:270, Svensk Gasteknisk Center, 82 p.

BioKymppi Oy. 2016. Prosessi.

Chen, Q., Finney, K., Li, H., Zhang, X., Zhou, J., Sharifi, V. & Swithenbank J. 2012. Condensing boiler applications in the process industry. *Applied Energy* 89, 1, pp. 30–36.

EuroObserver. 2014. Biogas barometer. Saatavissa: <http://www.euroobserver.org/pdf/biogas-barometer-2014-en/>

Huttunen, Markku & Kuittinen, Ville. 2015. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 18. University of Eastern Finland Library. 48s. ISBN 978-952-61-1874-1. Saatavissa: <http://www.biokaasuyhdistys.net/media/Biokaasulaitosrekisteri2014.pdf>

Iisa, K. Rikin oksidien muodostuminen ja poistaminen. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s.

Kymäläinen, Marita and Pakarinen, Outi (toim.). 2015. Biokaasuteknologia : Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Suomen biokaasuyhdistys. HAMK julkaisuja. Hämeenlinna, 204 s. ISBN 978-951-784-770-4

Latvala Markus. 2005. Jätevesilietteen anaerobinen käsittely ja biokaasun hyötykäyttö. Jyväskylän teknologiakeskus Oy, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Teknologiakeskus Hermia ja vesi- ja viemärilaitosyhdistys. Tampere. 20 s. Saatavissa: 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.

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)

Levy, E., Biligren, H. & DuPont, J. 2011. Recovery of Water from Boiler Flue Gas Using Condensing Heat Exchangers. Final Technical Report. Bethlehem, Lehigh University. 155 p.

Mutikainen, Mirja; Sormunen, Kai; Paavola, Heli; Haikonen, Turo and Väisänen, Mirva, 2016, Biokaasusta kasvua : Biokaasuliiketoiminnan ekosysteemien mahdollisuudet. Sitran selvityksiä 111, Sitra, Toukokuu 2016, 127 p.

Petersson, A. ja Wellinger, A. 2009. Biogas upgrading technologies – developments and innovations. IEA Bioenergy Task 37, 19 p.

Polarsol Oy. 2017. Hukkalämmön talteenottaja. Saatavissa: <http://www.polarsol.com/technology/komponentit-rekuperattori.html>

Rintala, J; Lampinen, A; Luostarinen, S; Lehtomäki, A. 2002. Biokaasusta uusiutuvaa energiaa maataloilla. Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Jyväskylän yliopisto

Torri, Pasi. 2014. Biokaasun mahdollisuudet. Gasum

Zábranská, J., Dohányos, M., Jeníček, P. & Kutil, J. 2000. Thermophilic process and enhancement of excess activated sludge degradability – two ways of intensification of sludge treatment in the Prague Central Wastewater Treatment Plant. Water Science and Technology 41 (9) 265–272.

Väisänen, Petri, and Jarkko Salmenoja. "Biokaasun Muodostuminen ja sen hallittu käsittely kaatopaikoilla." 2002.