

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

ENERGIATEKNIikka

Janne Suomela

**BIOPOLTTOAINEITA TUOTTAVAN HYBRIDIJÄRJESTELMÄN
OPTIMOINTI**

Pieni kaksoispolttoainekäyttöinen CHP-laitos sähköntuotannossa

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 31.03.2014

Työn valvoja

Professori Seppo Niemi (TkT)

Työn ohjaaja

Tutkimusjohtaja Erkki Hiltunen (FT)

ALKUSANAT

Seisoin hetken päälläni kootakseni ajatuksiani. Sitten hihkaisin: -Hei!
(Muumipapan mietekirja)

Tämä diplomityö on tehty osana DESY-Lähienergia -projektia (2012–2014) Vaasan yliopiston teknillisessä tiedekunnassa. Aloitin energiatekniikan opintoni vuonna 2011. Kaksi vuotta aikaisemmin olin valmistunut ympäristötekniikan insinööriksi. Innostus energia-alaan houkutti kuitenkin vielä jatkamaan opintoja energiatekniikan parissa, mikä osoittautui loistavaksi valinnaksi. Opinnot Vaasan yliopistossa koostuivat lähinnä diesel- ja kaasumootoritekniikasta uusiutuvaa energiaa kuitenkin unohtamatta. Uusiutuva energia on ollut pitkään lähellä sydäntäni ja Poltto- ja voiteluaineita koskeva erikoistyö -kurssilla tehdyn biokaasuun liittyvän harjoitustyön aikana huomasinkin innostukseni biopolttoaineita kohtaan.

Kesällä 2012 sain kesätyöpaikan tutkimusavustajana Erkki Hiltusen johtamasta Uusiutuvat energiat -tutkimusryhmästä. Sillä tiellä olen edelleen. Diplomityön tekemisen tullessa ajankohtaiseksi sain aiheen biopolttoaineiden hybridituotannon ja CHP-laitoksen optimoimiseen liittyen. Aloitin tämän diplomityön tekemisen keväällä 2013 ja nyt keväällä 2014 olen saanut tuon valtavan urakan päätökseen. Noihin kuukausiin on mahtunut niin ylä- kuin alamäkiäkin. Nuo kuukaudet ja koko opiskeluaika ovat olleet hieno matka, jonka aikana olen oppinut valtavasti ja välillä iskenyt päätäkin harmaaseen kiiveen. Kaikkien matkalla kohdattujen vaikeuksien jälkeen olen kuitenkin aina huutanut ”Hei!”, merkiksi uuden oivaltamisesta ja oppimisesta.

Tämä diplomityö ei olisi ollut mahdollista ilman tärkeitä ihmisiä. Tahdon kiittää tutkimusjohtaja Erkki Hiltusta ja professori Seppoa Niemeä tämän diplomityön aiheesta. Kiitän Erkki Hiltusta diplomityöni ohjauksesta, tarkastamisesta ja mahdollisuudesta työskennellä tutkimusavustajana Uusiutuvat energiat -tutkimusryhmässä tämän pitkän tien aikana. Kiitän Seppo Niemeä työn valvomisesta ja tarkastamisesta sekä mielenkiintoisista energiatekniikan luennoista.

Tahdon kiittää koko Uusiutuvat energiat -tutkimusryhmän työntekijöitä tuesta ja mahdollisuudesta keskustella diplomityöhöni liittyvistä asioista. Tahdon kiittää myös Petri Välistuota ja Birgitta Martinkauppia opastamisesta MatLabin ihmeelliseen maailmaan sekä Anne Mäkirantaa ja Carolin Nuortilaa diplomityöni oikolukemisesta. Erityisesti tahdon kiittää Katriina Sirviötä biodieselin huuruksista hiihtolenkeistä ja Teemu Ovaskaa lukuisista lopputyötäni eteenpäin vieneistä keskusteluista kahvikupin äärellä.

Tahdon kiittää myös biodieselin tuotantolaitoksen ja biokaasulaitoksen edustajia. Kiitos, että sain teiltä käyttööni tietoja, jotka mahdollistivat tämän diplomityön toteuttamisen.

Kiitos ystäväilleni, jotka ovat antaneet minulle välillä muuta ajateltavaa. Suuri kiitos kuuluu vanhemmilleni, jotka ovat tukeneet minua hyvinä ja huonoina hetkinä.

Tärkeintä ei ole päämäärä, vaan matka. Kiitos teille kaikille, jotka olette olleet osa tätä pitkää prosessia!

Vaasassa 31.03.2014

Janne Suomela

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	6
TIIVISTELMÄ	9
ABSTRACT	10
1. JOHDANTO	11
2. BIOPOLTTOAINEET	13
2.1. Biodiesel	13
2.1.1. Raaka-aineet	14
2.1.2. Biodieselin valmistaminen transesteröinnillä	15
2.1.3. Rypsimetyyliesteri	20
2.1.4. Ominaisuuksista	21
2.1.5. Käyttö	23
2.1.6. Glyseroli	23
2.2. Bioetanoli	25
2.2.1. Raaka-aineet	25
2.2.2. Bioetanolin valmistaminen käymällä	26
2.2.3. Ominaisuuksista	27
2.2.4. Rankki	28
2.3. Biokaasu	29
2.3.1. Raaka-aineet	29
2.3.2. Biokaasun valmistaminen mädätyksellä	31
2.3.3. Ominaisuuksista	35
2.3.4. Käyttö	38
2.3.5. Sivutuotteet	39
3. YHDISTETTY SÄHKÖN JA LÄMMÖN TUOTANTO	40
4. YHTEISTUOTANTOMALLI	43
4.1. Biopolttoaineiden tuotantolaitosten esittely	43
4.1.1. Biodieselin tuotantolaitos	44
4.1.2. Bioetanolin tuotantolaitos	45
4.1.3. Biokaasun tuotantolaitos	47
4.2. Laskenta	48
4.2.1. Materiaalivirrat	48
4.2.2. CHP-laitos	51
5. TULOKSET	54
5.1. Optimaaliset materiaalivirrat	54
5.1.1. Biodiesel- ja bioetanolilaitokset toimivat kapasiteettiensa mukaan	54
5.1.2. Biodiesel- ja biokaasulaitokset toimivat kapasiteettiensa mukaan	58
5.2. CHP-laitoksen mitoitus sähköntuotantoon	61

6. POHDINTA	69
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	73
8. YHTEENVETO	75
LÄHDELUETTELO	77
LIITTEET	84

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

AFME	Animal Fat Methyl Ester
CBG	Paineistettu biokaasu (Compressed Biogas)
CH ₃ OH	Metanoli
C ₂ H ₅ OH	Etanoli
C ₃ H ₇ OH	Propanoli
C ₄ H ₉ OH	Butanoli
C ₅ H ₁₂ OH	Amyylialkoholi, 1-pentanoli
C ₃ H ₈ O ₃	Glyseroli
C ₆ H ₁₂ O ₆	Glukoosi
CH ₂ -OOC-R ₁	Glyseridi
CO ₂	Hiilidioksidi
CHP	Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto (Combined Heat and Power)
DF	Kaksoispolttoainemoottori (Dual Fuel)
FAEE	Rasvahapon etyyliesteri (Fatty Acid Ethyl Ester)
FAME	Rasvahapon metyyliesteri (Fatty Acid Methyl Ester)
FFA	Vapaat rasvahapot (Free Fatty Acids), R ₁ -COOH
GD	Kaasudieselmoottori (Gas Diesel)
HCl	Suolahappo (vetykloridi)

HHV	Ylempi lämpöarvo (Higher Heating Value)
H ₂ O	Vesi
HRT	Hydraulinen viipymäaika (Hydraulic Retention Time), syötteen viipymä biokaasureaktorissa
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
HV	Lämpöarvo (Heating Value)
KOH	Kaliumhydroksidi
LBG	Nesteytetty biokaasu (Liquefied Biogas)
LHV	Alempi lämpöarvo (Lower Heating Value)
LME	Pellavametyyliesteri (Linseed Methyl Ester)
LNG	Nesteytetty maakaasu (Liquefied Natural Gas)
N ₂	Typpikaasu
NAOH	Natriumhydroksidi (lipeä)
NG	Maakaasu (Natural Gas)
NO _x	Yleinen nimitys typpimonoksidille (NO) ja typpidioksidille (NO ₂)
O ₂	Happikaasu
R _{1,2,3}	Rasvahappoketju, esimerkiksi palmitiini
R ₁ -COONa	Saippua
R-O-CO-R _{1,2,3} tai R _{1,2,3} -COO-R	Esteri (biodiesel)

ROH	Alkoholi, jossa R on esimerkiksi CH ₃ (metanoli)
RME	Rypsimetyyliesteri (Rapeseed Methyl Ester)
RTOME	Kirjolohimetyyliesteri (Rainbow Trout Methyl Ester)
SG tai SI	Kipinäsytytteinen kaasumoottori (Spark Ignited Gas Engine)
SME	Soijametyyliesteri (Soybean Methyl Ester)
SOME	Lohiöljymetyyliesteri (Salmon Oil Methyl Ester)
TS	Kuiva-ainepitoisuus (Total Solids)
VFA	Haihtuvat rasvahapot (Volatile Fatty Acids)
VS	Orgaaninen kuiva-ainepitoisuus (Volatile Solids)
Wobbe-indeksi	Kuvaa kaasun sisältämää energiaa yksikössä MJ/m ³

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Janne Suomela
Diplomityön nimi:	Biopolttoaineita tuottavan hybridijärjestelmän optimointi – Pieni kaksoispolttoainekäyttöinen CHP-laitos sähköntuotannossa
Valvojan nimi:	Professori Seppo Niemi (TkT)
Ohjaajan nimi:	Tutkimusjohtaja Erkki Hiltunen (FT)
Tutkinto:	Diplomi-insinööri
Koulutusohjelma:	Sähkö- ja energiatekniikka
Oppiaine:	Energiatekniikka
Opintojen aloitusvuosi:	2011
Diplomityön valmistumisvuosi:	2014

Sivumäärä: 96

TIIVISTELMÄ

Biopolttoaineilla on suuri merkitys yhtenä ratkaisuna fossiilisten polttoaineiden korvaajana. Biodieselillä, -etanolilla ja -kaasulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita esimerkiksi ajoneuvoissa. Hajautetussa energiantuotannossa biodieseliä ja -kaasua voidaan käyttää polttoaineena pienissä sähkön- ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa eli CHP-laitoksissa.

Tämä diplomityö on tehty osana Vaasan yliopiston teknillisen tiedekunnan DESY (Distributed Energy Systems) -projektia (2012–2014). Tämän diplomityön tarkoituksena oli optimoida biopolttoaineiden hybridituotantojärjestelmä, joka tuottaa puhtaita biopolttoaineita ja kaikki sivutuotteet voidaan hyödyntää. Diplomityö perustuu oletukseen, että biodieselin ja bioetanolin tuotannosta sivutuotteena muodostuvat glyseroli ja rankki voidaan hyödyntää biokaasun tuotantolaitoksen raaka-aineena. Biokaasulaitos tuottaa biokaasua ja sivutuotteena mädätysjäännöstä, joka voidaan hyödyntää lannoitteena tai maanparannusaineena. Tässä diplomityössä optimoitiin myös biodieseliä ja biokaasua polttoaineena käyttävä CHP-laitos sähkön tuottamiseksi esimerkkinä käytettyyn kylään.

Teoriaosuudessa on esitelty biodieselin, -etanolin ja -kaasun valmistusmenetelmät, käytettäviä raaka-aineita ja muodostuvia pää- ja sivutuotteita. Empiriaosuudessa laskettiin optimaaliset biodieselin, -etanolin ja -kaasun materiaalivirrat. Optimointi perustui biodieselin ja biokaasun sekä teoreettisen bioetanolin tuotantolaitoksien tuotantokapasiteetteihin. Empiriaosuudessa optimoitiin lisäksi CHP-laitos sähköntuotantoon.

Tuloksena saatiin kaksi biopolttoaineiden hybridituotantomallia, joissa kaikki materiaalivirrat voidaan hyödyntää. Tuloksena saatiin myös mitoitus CHP-laitokselle, jolla tuotetaan sähköenergiaa esimerkkinä käytetyille kylälle sekä biodiesel ja -kaasumäärät, joilla tämä CHP-laitos voidaan toteuttaa.

AVAINSANAT: biodiesel, bioetanol, biokaasu, glyseroli, rankki, materiaalivirrat, hybridituotanto, CHP

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author:	Janne Suomela
Topic of the Thesis:	Optimization of Biofuel Producing Hybrid System – Small Dual Fuel CHP Plant in Electricity Production
Supervisor:	Professor Seppo Niemi (D.Sc. (Tech.))
Instructor:	Research Director Erkki Hiltunen (PhD)
Degree:	Master of Science in Technology
Degree Programme:	Electrical and Energy Engineering
Major of Subject:	Energy Engineering
Year of Entering the University:	2011
Year of Completing the Thesis:	2014

Pages: 96

ABSTRACT

Biofuels are a great option to replace fossil fuels. It is possible to replace fossil fuel in vehicles by biodiesel, bioethanol and biogas. Biodiesel and biogas are used as a fuel to produce heat and power in small CHP (Combined Heat and Power) plants.

This thesis is a part of the DESY Local Energy (Distributed Energy System) project (2012–2014) in the Faculty of Technology at the University of Vaasa. The purpose of this thesis was the optimization of a hybrid production system of biofuels in which pure biofuels are produced. In this system all residues can be utilized. This thesis is based on the hypothesis that the residues glycerol and distiller's grain from the production of biodiesel and bioethanol can be utilized as raw materials in the biogas production plant. The biogas plant produces biogas and digested sludge as a residue. This residue can be used as a fertilizer or a soil conditioner. Additionally, the CHP plant which uses biodiesel and biogas as a fuel was optimized to produce the electricity for a case village.

In this thesis, first, the different production methods and various raw materials of biofuels as well as the originating residues were described. Second, in the empirical part of this thesis, the material flows were optimized in the production of biodiesel, bioethanol and biogas. The optimization is based on the production capacities of a real biodiesel plant and a real biogas plant and a theoretical bioethanol plant. Furthermore, the CHP plant was optimized to produce the electricity for the case village.

As a result, two biofuel hybrid production models were formed. In these models all material flows can be utilized. Furthermore, the size of the CHP plant and the amount of biodiesel and biogas used as fuel in the CHP plant were calculated to cover the electricity demand of the case village.

KEYWORDS: Biodiesel, Bioethanol, Biogas, Glycerol, Distiller's Grain, Material Flow, Hybrid Production, CHP

1. JOHDANTO

Tämä diplomityö on osa Vaasan yliopiston teknillisen tiedekunnan DESY-Lähienergia (Distributed Energy Systems) -projektia (2012–2014). Biopolttoaineilla on suuri merkitys yhtenä ratkaisuna fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi. Biodieselillä, -etanolilla ja -kaasulla voidaan korvata fossiilista dieseliä ja bensiiniä esimerkiksi ajoneuvoissa. Hajautetussa energiantuotannossa biodieseliä ja -kaasua voidaan hyödyntää pienissä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa (CHP, combined heat and power).

Tavoitteena oli tarkastella biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotantolaitosten materiaalivirtoja ja optimoida niiden pohjalta biopolttoaineiden yhteistuotantomalli, jossa tuotetaan biopolttoaineita ja kaikki sivutuotteet pystytään hyödyntämään. Yhteistuotantomallissa näiden kolmen tuotantolaitoksen ei välttämättä tarvitse sijaita toistensa välittömässä läheisyydessä. Tavoitteena oli myös optimoida pieni CHP-laitos sähköntuotantoon.

Työssä käytetyssä esimerkkitapauksessa biodieselin tuotantoyksikkö käyttää raaka-aineena eläinperäistä rasvaa, josta saadaan päätuotteena biodieseliä ja sivutuotteena glyserolia. Bioetanolin tuotantoyksikkö käyttää raaka-aineena jäteperunaa, josta saadaan päätuotteena bioetanolia ja sivutuotteena rankkia. Biodieselin ja bioetanolin tuotannon sivutuotteena syntyvät glyseroli ja rankki voidaan käyttää biokaasuntuotantolaitoksen raaka-aineena. Biokaasuntuotantolaitoksesta saadaan biokaasua ja sivutuotteena maanparrannusaineksi soveltuvaa mädätysjäännöstä.

Tutkimusmenetelminä käytettiin sekä kirjallista tutkimusta että optimointimenetelmää. Käytetty optimointimenetelmä ei ole matemaattinen optimointi. Työssä biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotantolaitoksien materiaalivirrat optimoitiin siten, että kaikki sivutuotteet kyetään hyödyntämään, eikä jätteitä muodostu. Materiaalivirrat optimoitiin aluksi siten, että biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitokset lukittiin toimimaan kapasiteettiensa mukaan. Materiaalivirrat optimoitiin myös tilanteelle, jossa biodieselin ja biokaasun tuotantolaitokset lukittiin toimimaan kapasiteettiensa mukaan.

Pohjanmaalla sijaitsevilta biodieselin ja biokaasun tuotantolaitoksilta saatiin laskentaa varten tuotantotiedot. Bioetanolin osalta käytettiin teoreettisia tuotantotietoja. Näiden tuotantotietojen perusteella laskettiin biopolttoaineiden tuotantolaitosten materiaalivirrat ja etsittiin sellaiset tuotantomallit, joilla kaikki materiaalivirrat kyettäisiin hyödyntämään.

CHP-laitokseen liittyvässä laskennassa käytettiin esimerkkinä erästä Pohjanmaalla sijaitsevaa kylää, jonka sähköenergiantarve tulisi kattaa biodieseliä ja biokaasua polttoaineena käyttävällä mäntämoottorikäyttöisellä CHP-laitoksella. Kylän sähkönkulutuksen perusteella laskettiin mitoitus CHP-laitokselle sekä biodiesel- ja kaasumäärät kattamaan laitoksen polttoaineen tarve. Laskennat suoritettiin ohjelmalla MATLAB R2013a.

2. BIOPOLTTOAINEET

Biopolttoaineet ovat uusiutuvia, biohajoavia ja vähän saastuttavia polttoaineita, joilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. Biopolttoaineilla voidaan vähentää riippuvuutta tuontiöljystä, alentaa kasvihuonepäästöjä ja tarjota vaihtoehtoja energiakysymysten ratkaisemiseen niin hajautetusti kuin keskitetystikin. Nigam & Singh (2011: 53) jaottelevat biopolttoaineet primaarisiin ja sekundaarisiin polttoaineisiin. Primaarisia polttoaineita käytetään prosessoimattomasti suoraan muun muassa lämmön- ja sähköntuotantoon, ja niitä ovat esimerkiksi puuhake ja puupelletti. Tässä diplomityössä tarkasteltavat biopolttoaineet eli biodiesel, bioetanoli ja biokaasu valmistetaan biomassaa konvertoimalla, ja niistä voidaan käyttää nimitystä sekundaariset biopolttoaineet. Niitä voidaan käyttää myös ajoneuvojen polttoaineina. (Nigam & Singh 2011: 53.)

Sekundaariset biopolttoaineet voidaan jakaa ensimmäisen, toisen ja kolmannen sukupolven biopolttoaineisiin. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineita ovat sokerista ja tärkkelyksestä fermentoimalla valmistettu etanoli sekä kasviöljyistä ja eläinrasvoista transesteröimällä valmistettu biodiesel. Toisen sukupolven biopolttoaineet valmistetaan biologisella tai termokemiallisella prosessilla ruoaksi kelpaamattomasta jätteestä kuten lignoselluloosapitoisesta biomassasta. Kolmannen sukupolven biopolttoaineet ovat peräisin mikrobeista ja mikrolevistä. (Nigam & Singh 2011: 55-56.) Ensimmäisen ja toisen sukupolven biopolttoaineiden erona pidetään usein sitä, että ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet valmistetaan ruoaksi kelpaavista raaka-aineista. Eläinrasva, josta valmistetaan biodieseliä esteröimällä, on aina jätteistä peräisin.

2.1. Biodiesel

Uusiutuvista raaka-aineista transesteröinnillä valmistettavia polttoaineita kutsutaan esteröidyiksi biodieseleiksi. Raaka-aineena käytetään kasviöljyjä ja eläinrasvoja. Rudolph Diesel kehitti dieselmoottorin vuonna 1893. Dieselin kehittämä moottori oli suunniteltu toimimaan kasviöljyllä ja moottori esiteltiin vuonna 1911 Pariisin maailmannäyttelyssä (World's Fair in Paris). Transesteröinti keksittiin jo vuonna 1853, ja ensimmäisen ker-

ran transesteröityä kasviöljyä käytettiin polttoaineena Etelä-Afrikassa ennen toista maailmansotaa. Kasviöljyä käytettiin dieselmootoreiden polttoaineena 1920-luvulle asti, jonka jälkeen petrodieselin käyttö yleistyi sen kasviöljyä alhaisemman viskositeetin vuoksi. (Demirbas 2008: 112-114.) Kasviöljyjen etuja tavalliseen dieseliin verrattuna ovat esimerkiksi suuri lämpösisältö, saatavuus ja uusiutuvuus. Haittoja tavalliseen dieseliin verrattuna ovat korkea viskositeetti, vähäinen haihtuvuus ja tyydyttymättömien hiilivetyketjujen reaktiivisuus. (Ma & Hanna 1999: 3.)

Korkean viskositeetin vuoksi kasviöljyä ei voida suoraan käyttää polttoaineena kaikissa dieselmootoreissa (Demirbas 2008: 121). Kasviöljyjen viskositeetin alentamiseksi on olemassa erilaisia ratkaisuja kuten pyrolyysi, laimentaminen eli sekoittaminen tavalliseen dieseliin, mikroemulsio ja transesterointi. Näistä ainoastaan transesteröinnin tuloksena saadaan biodieseliä eli öljyjen ja rasvojen monoalkyyliestereitä. (Knothe, Gerpen & Krahl 2005: 26.) Tässä diplomityössä keskitytään biodieselin valmistamiseen transesteröimällä. Biodiesel on hyvä vaihtoehto korvaamaan perinteistä dieseliä puristussytyteisessä polttomootorissa (Demirbas 2008: 111).

Kemiallisen määritelmän mukaan biodiesel on biolipideistä transesteröimällä saatavien pitkäketjuisten rasvahappojen monoalkyyliesteri. Teknisesti biodiesel on dieselmootorissa käytettäväksi soveltuva polttoaine, joka koostuu kasviöljyistä ja eläinrasvoista peräisin olevien pitkäketjuisten rasvahappojen monoalkyyliestereistä. (Demirbas 2008: 114.) Euroopassa biodieselin tulee täyttää standardissa EN 14214 esitetyt vaatimukset. Yhdysvalloissa biodieselin laatuvaatimukset on määritelty standardissa ASTM D6751.

2.1.1. Raaka-aineet

Biodieseliä voidaan valmistaa kasviöljyistä, eläinrasvoista, levästä ja käytetyistä jättekasviöljyistä kuten paistorasvoista. Tavallisimpia biodieselin valmistuksessa käytettäviä kasviöljyjä ovat soijasta, rypsisistä ja rapsista, palmusta, maissista, auringonkukasta, puuvillan siemenistä, maapähkinästä sekä kookospähkinästä puristettu öljy. Raaka-aineeksi soveltuvia eläinrasvoja saadaan esimerkiksi ruoantuotannon sivutuotteena syntyvästä eläinperäisestä jätteestä, kuten naudasta, kanasta, siasta ja kalasta. (Mo-

ser 2009: 246; 253.) Nykyään pyritään käyttämään raaka-aineita, joita ei käytetä ruoantuotannossa. Tällaisia ruoaksi kelpaamattomia kasviöljyjä ovat esimerkiksi jatropa- ja neem-öljy (Demirbas 2008: 118). Raaka-aineena käytettävät eläinrasvat, kuten kalanperkuujätteet ovat puolestaan sivutuotteita, joten ne eivät vaikuta ruoantuotantoon (Moser 2009: 253).

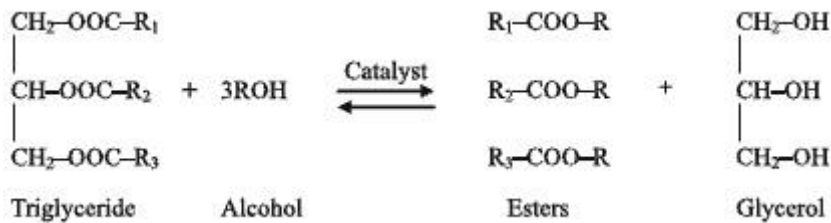
Eläinperäinen jäte murskataan pienempään kokoon ja keitetään sopivassa lämpötilassa, jolloin rasva sulaa ja se voidaan erotella mekaanisesti tai liuottamalla. Kasvien siemenet murskataan, minkä jälkeen öljy saadaan niistä puristamalla ja lopuksi suodattamalla. Kasviperäisten jäteöljyjen (yellow grease) esikäsittely koostuu vedenpoistosta ja suodattuksesta. Rasvansuodattimista (ravintolat) kerättyjen rasvojen (brown grease) esikäsittely koostuu kiinteiden epäpuhtauksien ja veden erottamisesta lämmön avulla, suodattamalla ja sentrifugoimalla. (Jayasinghe & Hawboldt 2012: 802.) Levästä öljy saadaan puristamalla, uuttamalla liuottimella tai ylikriittisellä nesteellä (fluidilla). (Demirbas & Demirbas 2010: 143). Kun neste on ylikriittisessä tilassa sen neste- ja kaasufaasi häviävät, jolloin neste on yhdessä faasissa. Kasviöljyt ja eläinrasvat käsitellään niiden sisältämien vapaiden rasvahappojen, fosfolipidien, steroleiden, veden, hajuaineiden ja muiden epäpuhtauksien vuoksi. Puhdistamisen jälkeenkin niihin jää jonkin verran vapaita rasvahappoja (FFA, free fatty acids) ja vettä. (Ma & Hanna 1999: 1.)

Valmistuksessa voidaan hyödyntää eri raaka-aineita riippuen eri tekijöistä kuten paikallisista kasvuolosuhteista, alueellisesta saatavuudesta, kasvien öljyisällöstä, rasvahappokoostumuksesta, sivutuotteiden hyödynnettävyydestä ja kyvystä kasvaa maanviljelyyn sopimattomassa maaperässä (Moser 2009: 246).

2.1.2. Biodieselin valmistaminen transesteröinnillä

Transesteröityminen on reaktio, jossa kasviöljyjen ja eläinrasvojen triglyseridit reagoivat alkoholin kanssa muodostaen monoalkyyliesteriä ja glyserolia katalyytin läsnäollessa. Reaktioyhtälö on esitetty kuvassa 1. Reaktiosta käytetään myös nimitystä alkoholyysi (Ma & Hanna 1999: 7). Kuvassa olevat termit R_1 , R_2 ja R_3 kuvaavat rasvahappoketjuja. Useimmiten ketjut ovat raaka-aineesta riippuen palmitiinia, steariinia, oleiinia,

linolia tai linoleenia. ROH on yleisesti alkoholi, jossa R on esimerkiksi metanolille CH₃. (Leung, Wu & Leung 2010: 1085.)



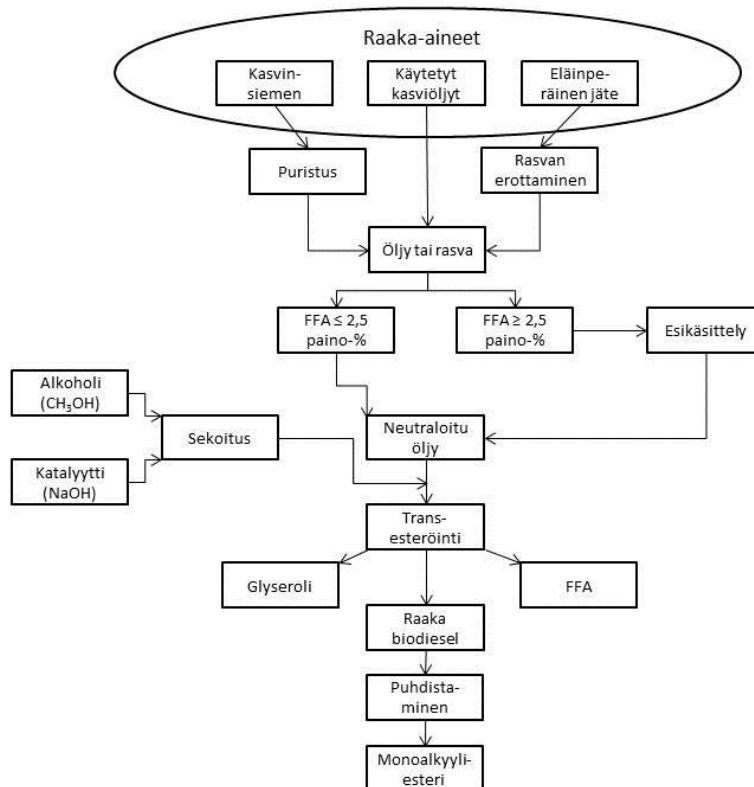
Kuva 1. Transesteröinti-reaktio. (Demirbas 2008: 121)

Reagoidessaan alkoholin kanssa triglyseridit muuttuvat vaiheittain diglyseridiksi, monoglyseridiksi ja lopulta glyseroliksi (C₃H₈O₃). Jokaisessa vaiheessa vapautuu yksi mooli esteriä. Reaktio on tasapainoreaktio, jossa triglyseridin ja alkoholin stökiometrisen moolisuhde on 1:3. Toisin sanoen, kun kolme moolia alkoholia reagoi yhden moolin triglyseridiä kanssa katalyytin läsnäollessa, saadaan lopputuotteena kolme moolia esteriä ja yksi mooli glyserolia. Jotta haluttua tuotetta eli esteriä saadaan mahdollisimman paljon, on tämän moolisuhteen oltava suurempi. (Ma & Hanna 1999: 7-9.) Tavallisesti emäksellä katalysoitaessa tämä moolisuhde on 1:6 ja esimerkiksi jäteruokaöljyllä jopa 1:15. Optimiarvoa suurempi moolisuhde ei kasvata saatavan monoalkyyliesterin määrää. (Leung ym. 2010: 1091.)

Transesteröinnissä alkoholina voidaan käyttää metanolia (CH₃OH), etanolia (C₂H₅OH), propanolia (C₃H₇OH), butanolia (C₄H₉OH) ja amyylialkoholia (C₅H₁₂OH). Tavallisesti käytetään metanolia tai etanolia. Metanoli on yleisin sen muita alkoholeja alhaisemman hinnan vuoksi. Sen etuja ovat myös lyhytketjuisuus ja poolisuus. (Ma & Hanna 1999: 7.) Saatava lopputuote riippuu käytetystä alkoholista siten, että esimerkiksi metanolilla esteröitäessä muodostuu metyyliesteriä (FAME = Fatty Acid Methyl Ester) ja etanolilla esteröitäessä etyyliesteriä (FAEE = Fatty Acid Ethyl Ester). Molemmista käytetään kuitenkin yhteistä nimitystä biodiesel. Biodiesel voidaan nimetä myös käytet-

tävän raaka-aineen mukaan. Esimerkiksi soijaöljyn metyyliesteristä käytetään lyhennettä SME (SME, soybean oil methyl ester).

Reaktiossa käytetään katalyyttiä kasvattamaan reaktionopeutta ja muodostuvan reaktiotuotteen määrää. Katalyyttinä voidaan käyttää emäksiä, happoja tai entsyymejä. Emäskatalyyttinä voidaan käyttää natriumhydroksidia (NaOH), kaliumhydroksidia (KOH), karbonaatteja sekä natriumin ja kaliumin alkoksiedeja kuten natrium- tai kaliummetoksidia. Käytetty alkoksidi voi olla myös natrium- tai kaliumetoksidi. Biodieselin valmistaminen emäskatalyyttiä käyttäen on esitetty kuvassa 2.

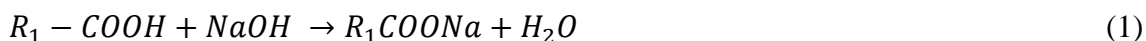


Kuva 2. Biodieselin valmistaminen emäskatalyyttiä käyttäen. (Demirbas 2008: 162; Leung ym. 2010: 1086)

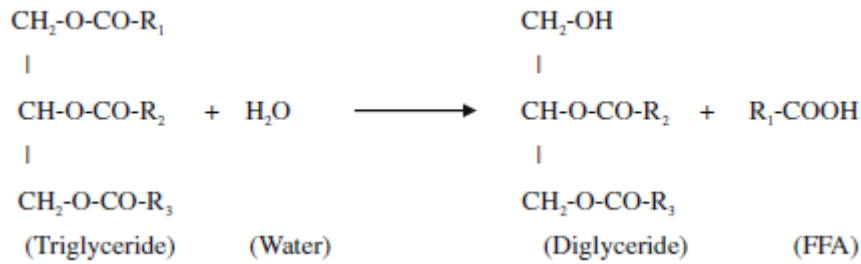
Happokatalyyttinä voidaan käyttää rikkihappoa (H_2SO_4), sulfonihappoa ja suolahappoa (HCl). Entsyymikatalyyttinä voidaan käyttää lipaaseja. Emäskatalyyttiä käytettäessä transesteröityminen tapahtuu happokatalyyttiä nopeammin. (Ma & Hanna 1999: 7.) Tavallisesti katalyyttinä käytetään natrium- tai kaliumhydroksidia. Emäskatalyytin käyttämisen etuna on reaktion vaatima alhainen lämpötila ja paine, suuri saantoprosentti (98 %), lyhyt reaktioaika ja vähäiset sivureaktiot. (Demirbas 2008: 161; 163).

Suurella katalyytin pitoisuudella voidaan tehostaa triglyseridien konversiota ja kasvattaa monoalkyyliesterin määrää. Esimerkiksi natriumhydroksidia käytettäessä reaktio saavuttaa optimaalisen tason konsentraation ollessa 1,5 massaprosenttia. Liian suurella konsentraatiolla natriumhydroksidin kohdalla alkaa esiintyä saippuoitumista triglyseridien reagoissa ylimääräisen emäskatalyytin kanssa. (Leung ym. 2010: 1091.) Ma & Hannan (1999: 7) mukaan emäskatalyyttiä käytettäessä alkoholi ja triglyseridit eivät saisi sisältää vettä saippuoitumisen vuoksi.

Kasviöljyt ja rasvat saattavat sisältää vapaita rasvahappoja (FFA, free fatty acids). Leungin ym. (2010: 1085) mukaan emäskatalyyttiä käytettäessä emäs reagoi vapaiden rasvahappojen kanssa muodostaen saippuaa ja vettä reaktioyhtälön 1 mukaisesti.

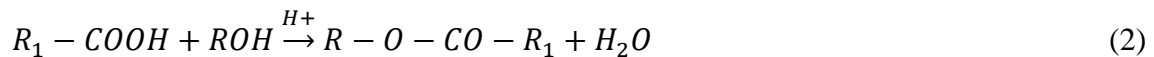


Tämä on transesteröitymisen kannalta epäedullista, koska saippuan muodostuminen vähentää saatavan monoalkyyliesterin määrää ja vaikeuttaa esterin ja glyserolin erottamista lopputuotteesta. Saippuoitumisen vuoksi myös katalyyttiä kuluu enemmän. Öljyistä ja rasvoista peräisin oleva tai saippuoitumisen yhteydessä muodostuva vesi aiheuttaa hydrolyysiä. Kuvan 3 mukaisesti vesi hydrolysoi triglyseridit diglyserideiksi ja muodostaa vapaita rasvahappoja. (Leung ym. 2010: 1085.)



Kuva 3. Triglyseridien hydrolysoituminen (Leung ym. 2010: 1086).

Vapaita rasvahappoja voidaan esteröidä biodieseliksi reaktioyhtälön 2 mukaisesti käyttämällä happokatalyyttiä, joka tavallisesti on rikkihappo. Happokatalyytti soveltuu käytettäväksi, kun kasviöljyt ja rasvat sisältävät paljon vapaita rasvahappoja. (Leung ym. 2010: 1085.)



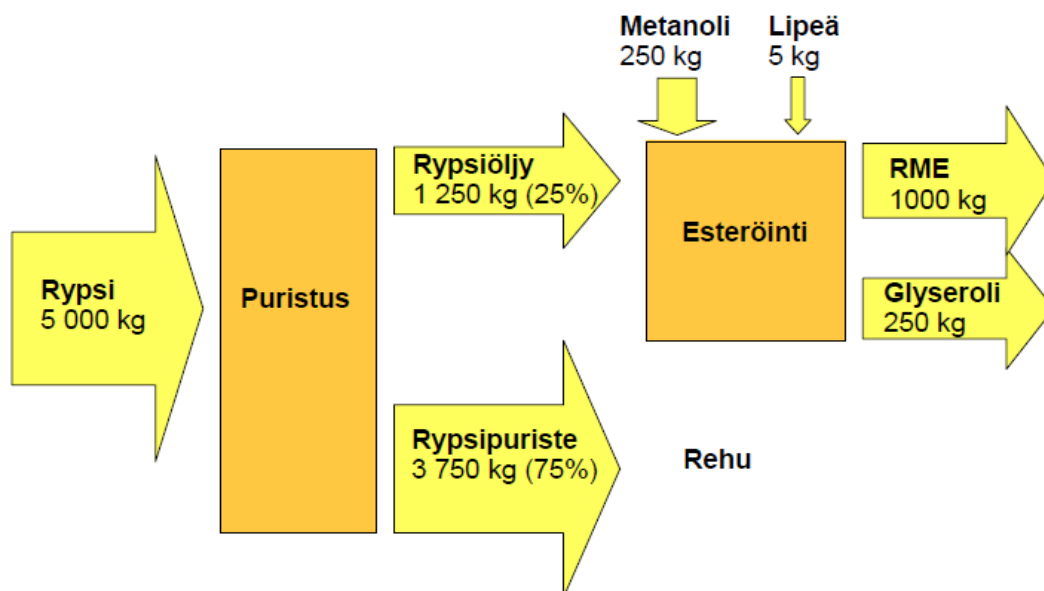
Transesteröitymisaste muuttuu reaktion edetessä. Alussa reaktio on hidaskas alkoholin ja öljyn sekoittuessa keskenään. Tämän jälkeen reaktio etenee nopeasti maksimiinsa, jonka jälkeen reaktio pysyy melko vakiona. Koska kyseessä on tasapainoreaktio, liian pitkä reaktioaika saa aikaan tuotteiden muuttumista takaisin lähtöaineiksi, jolloin halutun lopputuotteen eli monoalkyyliesterin määrä vähenee. (Leung ym. 2010: 1091.)

Transesteröimällä saatu tuote on sekoitus estereitä, glyserolia, alkoholia, katalyyttiä ja tri-, di- ja monoglyseridejä. Epäpuhtaudet kuten monoglyseridit nostavat same- ja jähmepistettä. Eläinrasvat sisältävät enemmän tyydyttyneitä rasvahappoja kuin kasviöljyt, joten niistä valmistetun biodieselin same- ja jähmepisteet ovat korkeammat. (Ma & Hanna 1999: 7-8.) Sivutuote glyseroli erotellaan lopputuotteesta laskeuttamalla tai separoimalla ja kerätään talteen käyttöarvonsa vuoksi. (Ma & Hanna 1999: 7-8)

Glyserolin erottamisen jälkeen raaka biodiesel sisältää vielä epäpuhtauksia kuten jäämiä katalyytistä, vedestä, reagoimatonta alkoholia, vapaata glyserolia ja transesteröinnin aikana muodostunutta saippuaa. Biodiesel neutraloidaan ja alkoholi poistetaan ennen pesemistä. Hapon lisäämisellä raakaan biodieseliin saadaan poistettua ylimääräinen katalyytti ja saippuat. Alkoholi poistetaan tislaamalla. Pesemisen tarkoituksena on poistaa katalyyttijäämät, saippuat, suola, alkoholijäämät ja vapaa glyseroli. (Leung ym. 2010: 1089.)

2.1.3. Rypsimetyyliesteri

RME (rape seed methyl ester) on rypsiä valmistettu biodiesel. Kuvassa 4 on esitetty kaaviona yhden RME-tonnin tuottamisen vaiheet ja materiaalivirrat. Taulukossa 1 on esitetty materiaalivirrat yhden RME-tonnin tuottamiselle, ja kun raaka-ainetta eli rypsiä on käytettävissä 1000 kg.



Kuva 4. Yhden RME-tonnin tuottamiseen tarvittavat materiaalivirrat (Vihma, Aro-Heinilä & Sinkkonen 2006: 10).

Taulukko 1. Materiaalivirrat eri RME:n tuotantomäärille.

	Lopputuotetta 1t	Rypsi 1 t	Rypsiöljyä 1 t
Rypsi (kg)	5000 kg ^a	1000 kg	4000 kg
Rypsiöljy (kg)	1250 kg ^a	250 kg	1000 kg
Rypsipuriste (kg)	3750 kg ^a	750 kg	3000 kg
RME (kg)	1000 kg ^a	200 kg	800 kg
Glyseroli (kg)	250 kg ^a	50 kg	200 kg

^a Lähteestä Vihma ym. 2006: 10

2.1.4. Ominaisuuksista

Biodieseliltä vaaditut ominaisuudet määritellään standardissa SFS-EN 14214: 2013. Standardissa määritellään, että biodieselin tulee sisältää vähintään 96,5 % monoalkyyliesteriä (FAME) ja tiheyden täytyy olla välillä 860-900 kg/m³. Esimerkiksi taulukosta 2 nähdään, että eläinrasvaperäisellä metyyliesterillä (AFME) tiheys on 872 kg/m³. Standardi määrittelee lisäksi raja-arvot muun muassa viskositeetille, leimahduspisteelle, setaaniluvulle, jodiluvulle ja hapettumisen kestolle (SFS-EN 14214: 2013). Taulukossa 2 on esitetty joitain eri raaka-aineista valmistettujen biodiesalien ominaisuuksia.

Taulukko 2. Biodiesalien ominaisuuksia.

	Kinemaattinen viskositeetti (cst, 40°)	Tiheys (kg/m ³)	Jodiluku	Happoluku (mg KOH/g)	Setaaniluku	Lämpöarvo (MJ/kg)
<u>Kasvipinäinen</u>						
LME ^{a, b}	-	895 ^a	203 ^a	0,26 ^a	40 ^a	36,8 ^a
RME ^{a, b}	4,5 ^a	882 ^a	123 ^a	0,23 ^a	57 ^a	-
<u>Eläinperäinen</u>						
SOME ^{a, b}	4,8 ^a	894 ^a	145 ^a	0,15 ^a	54 ^a	37,2 ^{a, c}
AFME ^{a, b}	4,5 ^a	872 ^a	79 ^a	0,35 ^a	67 ^a	37,3 ^{a, c}
RTOME ^{a, b}	4,7 ^a	886 ^a	137 ^a	0,42 ^a	53 ^a	-

^a Vauhkonen, Niemi, Hiltunen, Salminen & Pasila 2009: 120

^b LME, linseed methyl ester; RME, rapeseed methyl ester; SOME, salmon oil methyl ester; AFME, animal fat methyl ester; RTOME, rainbow trout methyl ester

^c LHV, lower heating value

Pieni viskositeetti on edullinen moottorin toiminnan kannalta. Suuri viskositeetti suurentaa pisarakokoa ja huonontaa seoksen muodostumista. Korkea viskositeetti aiheuttaa ongelmia myös moottorin kylmäkäynnistyksessä. Monoalkyyliesterien viskositeetti on suurempi kuin fossiilisen dieselöljyn. Raja-arvot on määritelty standardissa SFS-EN 14214: 2013. (Hoekman, Broch, Robbins, Cenicerros & Natarajan 2012; 154)

Leimahduspiste kuvastaa biodieselin puhtautta, sillä pienetkin metanolijäämät alentavat leimahduspistettä merkittävästi. (Hoekman ym. 2012: 156.) Polttoaineet, joiden seetaaniluku on yli viisikymmentä, ovat sopivimpia käytettäväksi nykyaikaisessa puristus-sytytteisessä moottorissa. (Majevsky & Khair 2006: 227-228.) Jodiluku kuvaa biodieselin tyydyttymättömyysastetta eli kuinka paljon rasvahappoketjut sisältävät kaksoissidoksia (Hoekman ym. 2012: 156). Kaksoissidokset sitovat happea, joten tyydyttymättömyysaste vaikuttaa biodieselin hapettumiseen.

Biodieselin hapettumisen kestolla on merkitystä sen varastoinnin kannalta. Biodieselin tulee kestää hapettumista SFS-EN 14214: 2013 -standardin mukaan 110 °C lämpötilassa vähintään 8 tuntia, kun hapettumista mitataan Rancimat-menetelmää käyttäen. Menetelmä mittaa muutoksia johtokyvyssä, jonka aiheuttavat haihtuvat oksidatiiviset aineet. Monityydyttymättömät monoalkyyliesterit lisäävät hapettumisherkkyyttä. Standardissa SFS-EN 14214: 2013 on annettu raja-arvot monityydyttymättömien metyyliesterien ja linoleenihapon pitoisuuksille.

Polttoaineessa oleva vesi aiheuttaa korroosiota moottorin polttoainejärjestelmässä, edistää mikrobien kasvua ja monoalkyyliesterien hydrolyysiä. Glyseroli aiheuttaa moottorissa sakkaantumista palamisen aikana. Standardissa on annettu lisäksi raja-arvot kokonaisglyserolille, joka koostuu vapaan glyserolin lisäksi myös biodieseliin huonon konversion seurauksena jääneistä mono-, di- ja triglyseridiin sitoutuneesta glyserolista. Glyserolijäämät vaikuttavat polttoaineen toimivuuteen matalassa lämpötilassa, viskositeettiin ja voitelevuuteen. Biodieselissä olevat metallit kuten natrium ja kalium toimivat biodieseliin jääneen katalyytin indikaattorina. Metallit lisäävät polttoaineen palamisessa muodostuvaa tuhkaa. (Moser 2009: 244-246.)

Biodieselin ylempi lämpöarvo (HHV, higher heating value) on noin 39-41 MJ/kg. Tämä on alempi kuin tavanomaisen dieselin alempi lämpöarvo (LHV, lower heating value), joka on 43 MJ/kg. (Demirbas 2008: 111.) Standardissa SFS-EN 14214: 2013 ei määritellä lämpöarvolle raja-arvoja.

2.1.5. Käyttö

Biodiesel soveltuu hyvin dieselmootoreiden polttoaineeksi. Sitä voidaan käyttää kaikissa dieselmootoreissa ilman, että moottoriin tarvitsee tehdä muutoksia. Biodieseliä voidaan käyttää polttoaineena sellaisenaan tai sitä voidaan sekoittaa tavanomaisen dieselin kanssa. (Demirbas 2008: 57; 111.)

Perinteisen dieselmootorin lisäksi erilaisia dieselsovelluksia ovat muun muassa kaksoispolttoainemoottori eli DF-moottori (DF, dual fuel) ja kaasudieselmoottori eli GD-moottori (GD, gas diesel). DF- ja GD-mootoreissa voidaan käyttää polttoaineena sekä kaasua että dieseliä. Merkittävin ero näiden moottorityyppien välillä on ruiskutuksessa. (Raiko ym. 2002: 605). Sähköntuotannossa tai yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa (CHP) käytettävät polttomoottorit vaihtelevat tehoiltaan muutamasta kilowatista useisiin megawatteihin. (Persson, Jönsson & Wellinger 2006: 12-13.)

2.1.6. Glyseroli

Biodieselin tuotannossa muodostuu päätuotteen lisäksi sivutuotteita. Kun raaka-aineena on öljysiemen, saadaan sivutuotteena öljyn erottamisen yhteydessä puristetta. Kun raaka-aineena on eläinperäinen jäte, saadaan sivutuotteena rasvan erottamisen yhteydessä jätteestä jäljelle jäävä muu ruhon osa. Transesteröinnin sivutuotteena syntyy glyserolia ja päätuotteen eli biodieselin puhdistamisen yhteydessä epäpuhtauksia, saippuaa, lyhytketjuisia rasvahappoja sekä metanolia sisältävää pesuvettä. Erityisesti glyseroli voidaan hyödyntää biokaasun tuotannossa joko lisäsyötteenä tai sellaisenaan. Pesuvesi sisältää myös paljon hajoavaa orgaanista ainesta, mutta sen käyttö biokaasun tuottamisessa vaatii lisää tutkimuksia. (Kolesárová, Hutnan, Bodík & Spalková 2011: 1-2, 11.) Tämän diplomityön kannalta tärkein sivutuote on glyseroli.

Raakaglyserolia (g-phase) muodostuu noin 10 kg jokaista tuotettua 100 kg biodieseliä kohden (Kolesárová ym. 2011: 2). Raakaglyserolia muodostuu noin 16-18 % käytetyn raaka-aineen (kasviöljy, eläinrasva) painosta (Hutnan, Kolesarova, Bodik, Spalkova & Lazor 2009: 1). Emäskatalysoidun transesteröinnin sivutuotteena syntyvä raakaglyseroli sisältää 50-60 % glyserolia, 12-16 % alkalipitoista saippuaa tai hydroksidia, 15-18 % metyyliesteriä, 8-12 % metanolia ja 2-3 % vettä sekä muita komponentteja (Kolesárová ym. 2011: 2). Raakaglyseroli voidaan käsitellä vahvalla mineraalilihapolla, jolloin sen glyserolipitoisuus saadaan nostettua 78-82 %:in (Hutnan 2009: 1). Glyserolia käytetään lääke-, ruoka- ja kosmetiikkateollisuudessa. Raaka-glyserolin puhdistaminen on kuitenkin kallista erityisesti pienille ja keskisuurille biodieselin tuottajille. Raakaglyserolin taloudellista hyödyntämistä ajatellen sen käyttöä on tutkittu mädätyksen ohella useissa sovelluksissa kuten polttamisessa, kompostoinnissa ja eläinten rehuna. (Kolesárová ym. 2011: 2-3.)

Glyseroli voidaan hyödyntää esimerkiksi lääke-, kosmetiikka- ja ruokateollisuudessa, eläinten rehuntuotannossa, hiiliraaka-aineena käymisprosessissa, polymeereissä ja voiteluaineissa (Vicente, Martinez & Aracil 2004: 297). Raakaglyseroli voidaan hyödyntää mädättämällä se biokaasuksi anaerobisissa olosuhteissa., koska se on orgaaninen, helposti hajoaava ja sitä voidaan varastoida pitkiä aikoja. On havaittu, että glyserolin käyttö käymisprosessissa yhdessä mm. teurasjätteen, yhdyskuntajätteen, sianlannan, maissirehun ja rapsinsiemenjauhon kanssa lisää metaanin tuottoa. (Fountoulakis, Petousi, Manios 2010: 1849.)

Useat mikro-organismit pystyvät käyttämään glyserolia ravinnokseen. Raakaglyseroli sisältää paljon energiaa, minkä vuoksi se soveltuu hyvin biometanoinnin raaka-aineeksi. Sillä saadaan suuri biokaasun tuotto pienissäkin reaktoritilavuuksissa. Puhdistamista vaativiin käyttöihin verrattuna raakaglyserolin biometanoinnin etuna ovat pienemmät investointikustannukset ja yksinkertaisemmat hyötykäyttömenetelmät. (Kolesárová ym. 2011: 3.)

2.2. Bioetanoli

Bioetanoli on uusiutuvista raaka-aineista valmistettua kipinäsytytteiseen eli bensiini-käyttöiseen polttomoottoriin soveltuvaa nestemäistä biopolttoainetta. Bioetanoli soveltuu monin tavoin käytettäväksi myös puristussytytteisissä moottoreissa. Bioetanolista voidaan käyttää myös nimitystä etyylialkoholi, ja sen kemiallinen kaava on C_2H_5OH . Bioetanoli soveltuu polttoaineeksi sellaisenaan tai sekoitettuna bensiiniin.

2.2.1. Raaka-aineet

Bioetanolia voidaan valmistaa sokeri- tai tärkkelyspitoisesta raaka-aineesta, jolloin bioetanolista käytetään usein nimitystä ensimmäisen sukupolven bioetanoli. Toisen sukupolven bioetanolin raaka-aineena käytetään lignoselluloosapitoista biomassaa ja kolmannen sukupolven bioetanolin raaka-aineena mikrobeja ja mikrolevää. (Nigam & Singh 2011: 55-58.) Ensimmäisen sukupolven bioetanoli on näistä oleellisin tässä diplomityössä. Taulukossa 3 on esitetty eräiden raaka-aineiden määrät yhden etanolikuution tuottamiseksi.

Taulukko 3. Raaka-aineiden määrät yhden etanolikuution tuottamiseksi. (Jordbruksverket 2004: 10.)

Raaka-aine	kg
Sokeriruoko	12700
Sokerijuurikas	10300
Peruna	8500
Puu	3850
Melassi	3600
Maissi	2680
Vehnä	2600

Brasilia on yksi merkittävimmistä bioetanolin tuottajista. Maan bioetanoli tuotetaan pääasiassa sokeriruokosta. Euroopassa bioetanoli tuotetaan pääasiassa sokerijuurikkaan melassista, joka on sokerintuotannon sivutuote. (Sánchez & Cardona 2008: 5272; Balat, Balat

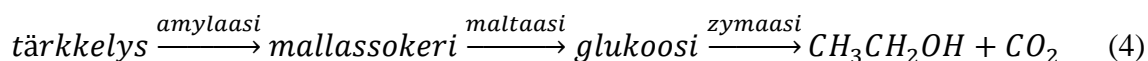
& Öz 2008: 554.) Sokeriruo'on ja sokerijuurikkaan lisäksi muita sokeripitoisia raaka-aineita ovat melassi ja hedelmät (Lin & Tanaka 2006: 628). Tärkkelyspitoisia raaka-aineita ovat maissi, peruna, viljakasvien siemenet kuten vehnä, ruis ja ohra sekä näistä saatavat ruoantähteet (Sánchez & Cardona 2008: 5276; Lin & Tanaka 2006: 628). Lignoselluloosapitoisia raaka-aineita ovat esimerkiksi maatalouden sivutuotteet kuten pelloille viljan korjuun yhteydessä jäävä biomassa kuten oljet, sokeriruoकोजाते (bagassi), ja energiakasvit sekä havu- ja lehtipuu. (Sarkar, Ghosh, Bannerjee & Aikat 2012: 20; Galbe & Zacchi 2012: 70).

2.2.2. Bioetanolin valmistaminen käymällä

Bioetanolin valmistusmenetelmä riippuu käytettävästä raaka-aineesta. Kaikille menetelmille on yhteistä, että tietyssä vaiheessa valmistusprosessia sokeri käytetään etanoliksi. Käyminen tarvitsee onnistuakseen entsyymejä, joita saadaan hiivasta ja raaka-aineen mikrobeista. Etanolin valmistus sokerista on esitetty reaktioyhtälössä 3, jonka mukaisesti glukoosi muuntuu hiivan avustuksella etanoliksi ja hiilidioksidiksi. (Napari 2007: 165). Sokeriruo'on, sokerijuurikkaan, melassin ja hedelmien sisältämä sokeri voidaan käyttää suoraan etanoliksi (Lin & Tanaka 2006: 628).



Tärkkelyksestä saadaan tuotettua paljon bioetanolia. Tärkkelyksen muuntaminen bioetanoliksi on hankalampaa kuin sokerin, koska se täytyy ensin hydrolysoida korkeassa lämpötilassa entsyymien avulla käymisen kannalta sopivaan muotoon eli sokeriksi (glukoosi). Hydrolysoinnissa voidaan käyttää myös happoa. (Sánchez & Cardona 2008: 5274.) Etanolin valmistus tärkkelyksestä on esitetty reaktioyhtälössä 4, jossa tärkkelyksen sisältämät D-glukoosiketjut pilkotaan ensin amylaasientsyymillä mallassokeriksi (maltoosi) ja se pilkotaan maltaasientsyymillä glukoosiksi, joka lopulta fermentoidaan zymaasientsyymien läsnäollessa etanoliksi ja hiilidioksidiksi. (Balat ym. 2008: 555; Napari 2007: 165.)



Toisen sukupolven bioetanoli, joka valmistetaan lignoselluloosapitoisista raaka-aineista, täytyy muuntaa sokeriksi ennen fermentoimista. Lignoselluloosa on monimutkainen polymeeri, joka on rakentunut selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Nämä täytyy ensin erotella toisistaan esikäsitellyssä, minkä jälkeen selluloosa hydrolysoidaan esimerkiksi entsyymien läsnäollessa glukoosiksi. Myös hemiselluloosa voidaan hydrolysoida sokeriksi kuten ksyloosiksi. Muodostuneet sokerit fermentoidaan etanoliksi, joka lopuksi vielä erotetaan tislamalla. (Sarkar ym. 2012: 20-23.)

2.2.3. Ominaisuuksista

Etanolilla on suuri oktaaniluku, joka mahdollistaa suuren puristussuhteen käyttämisen ja ehkäisee nakutusta bensiinimoottorissa. Etanoli sisältää 35 painoprosenttia happea. Korkean happipitoisuuden vuoksi stökiometrinen palaminen saavutetaan ilmapolttoaine-suhteella 8,95, joka on pienempi kuin bensiinin (14,4). Polttoaineen sisältämän hapen vuoksi päästöistä hiilimonoksidi ja hiilivedyt saattavat vähentyä. Etanoli muodostaa joidenkin hiilivetyjen kanssa atseotrooppisen nesteseoksen, jossa nesteen ja höyryn koostumus on sama vakiokiehumispisteessä. Yleisimmissä etanolin atseotrooppisissa kiehumislämpötila on pienempi kuin etanolilla itsessään ja sekoitettavalla aineella. Esimerkiksi etanolin kiehumispiste on 78 °C ja n-oktaanin 126 °C, ja niiden atseotrooppisella seoksella se on 77 °C, kun seoksessa etanolin määrä on 88 massaprosenttia. Tämän ominaisuuden ansiosta saadaan suurempi höyrynpaine sekoittamalla etanolia muihin polttoaineisiin. Etanoli ei ole erityisen haihtuvaa ja sillä on suuri höyrystymislämpö, joka heikentää haihtumista kylmissä olosuhteissa. (Jeuland, Montagne, Gautrot 2004: 562-564.) Taulukossa 4 on esitetty joitakin etanolin ominaisuuksia.

Etanolilta vaaditut ominaisuudet määritellään standardissa EN 15376: 2011. Standardi määrittelee ominaisuudet, kun etanolia käytetään seoksena bensiinin kanssa. Standardissa on määritelty muun muassa alaraja etanolipitoisuudelle, jonka on oltava vähintään 98,7 %.

Taulukko 4. Etanolin ominaisuuksia.

Ominaisuus	Etanoli	Lähde
Setaaniluku	8	(Balat 2008: 552)
Oktaaniluku	107	(Balat 2008: 552)
LHV (MJ/kg)	26,7	(Balat 2008: 552)
Tiheys (kg/m ³)	794	(Jeuland 2004: 562)
Viskositeetti (mm ² /s)	1,52	(Valtanen 2007: 309)
Kiehumispiste (C°)	78,4	(Jeuland 2004: 562)

Helpoimmin bioetanoli soveltuu käytettäväksi kipinäsyttöisessä moottorissa. Sitä voidaan käyttää polttoaineena sellaisenaan, mutta usein sitä sekoitetaan bensiiniin eri suhteissa. Bioetanoli-bensiiniseoksen käyttäminen ei vaadi muutoksia moottorin rakenteissa. Usein käytetty seossuhde on 10 % etanolia ja 90 % bensiiniä, jolloin polttoaineesta käytetään nimitystä E10. Kun etanolia on seoksessa 85 % ja bensiiniä 15 %, täytyy moottoriin tehdä muutoksia. Tällaisesta polttoaineesta käytetään nimitystä E85. (Balat & Balat 2009: 2276.)

2.2.4. Rankki

Ensimmäisen sukupolven bioetanolin valmistuksen sivutuotteena muodostuu muun muassa kasvijätteitä ja rankkia. Rankin ominaisuudet vaihtelevat riippuen etanolin valmistuksessa käytettävästä raaka-aineesta. Bioetanolin tuotannossa muodostuu sivutuotteena myös fermentorin pesuvettä, jäähdytysvettä ja lämpökattilan vuotovettä, jotka voivat olla sekoittuneena rankkiin ja aiheuttaa laatuvariaatioita. Rankkia muodostuu noin 20 litraa jokaista tuotettua bioetanolilitraa kohden. (Wilkie ym. 2000: 72.)

Rankin määrä ja sen sisältämä orgaaninen aines vaihtelevat merkittävästi. (Wilkie ym. 2000: 72). Rankki sisältää orgaanista ainesta, ja se voidaan mädättää biokaasuksi (Wilkie ym. 2000: 81).

2.3. Biokaasu

Biokaasu on uusiutuva polttoaine, jota voidaan tuottaa orgaanisista jätteistä ja sivuvirroista sekä energiakasveista. Biokaasu voidaan hyödyntää esimerkiksi CHP-laitoksissa lämmön ja sähkön tuottamiseen sekä ajoneuvojen kaasumoottoreissa. Biokaasusta käytetään myös nimitystä biometaani. Biokaasua tuotetaan mädättämällä orgaanista ainesta anaerobisissa olosuhteissa, jolloin sivutuotteena saadaan esimerkiksi lannoitteeksi soveltuvaa mädätysjäännöstä. (Weiland 2010: 849.) Anaerobinen mädätys on vakaa ja laajasti käytetty biokemiallinen muunnosprosessi. Ensimmäiset teolliset mädättämöt olivat toiminnassa jo 1900-luvun alkupuolella. Viime vuosina orgaanisen jätteen käsitteleminen anaerobisesti mädättämällä on lisääntynyt merkittävästi. Mädätys on tehokas tapa käsitellä erityyppistä biomassaa ja jätettä. (Appels, Lauwers, Degreè, Helsen, Lievens, Willems, Van Impe & Dewil 2011: 4296.) Orgaanisen aineksen hajoaminen perustuu alkeellisten bakteerien toimintaan. Biokaasua muodostuu kontrolloidusti mädättämöissä ja kontrolloimattomasti esimerkiksi kaatopaikoilla. (Alakangas 2000: 145.)

Biokaasua muodostuu orgaanisen aineen hajotessa, joten sen tuotanto ei lisää ilmakehän hiilikuormaa. Biokaasun tuottamisessa käytettävä raaka-aine hajoaisi mätänemällä tai lahoamalla joka tapauksessa riippumatta siitä, käytetäänkö se energiantuotannossa vai ei. (Lampinen & Laakkonen 2010: 6.) Biokaasu sisältää paljon metaania ja käsittelyn jälkeen jopa 99 %.

2.3.1. Raaka-aineet

Biokaasun valmistuksessa voidaan käyttää raaka-aineena biomassaa, joka sisältää pääosin hiilihydraatteja, proteiinia, rasvoja, selluloosaa ja hemiselluloosaa. Paljon ligniiniä sisältävät raaka-aineet kuten puu eivät sovellu biokaasun tuotantoon niiden hitaan hajoamisen vuoksi. (Weiland 2010: 852.) Taulukossa 5 on esitetty joidenkin raaka-aineiden metaanintuottopotentiaaleja.

Taulukko 5. Biokaasun saantopotentiaali eri raaka-aineilla, muokattu (Lehtomäki & Rintala 2006: 31).

Metaanin tuotto		
Raaka-aine	l CH ₄ / kg ^a	m ³ CH ₄ / t ^b
Teurastamojäte	570	150
Biojäte	500-600	100-150
Energiakasvit	300-500	30-150
Lanta	100-400	7-20

^a orgaanista ainetta

^b märkápaino

Paljon tärkkelystä sisältävät raaka-aineet ja glyseroli ovat hyviä lisäsyötteitä biokaasuntuotannossa. Esimerkiksi glyseroli hajoaa nopeasti ja tuottaa paljon biokaasua. (Latvala 2009: 22.) Biokaasun koostumus ja saanto riippuvat käytettävästä raaka-aineesta (Weiland 2010: 852).

Biokaasua voidaan tuottaa orgaanisesta raaka-aineesta. Krishania, Kumar, Vijay & Malik (2013: 3) jakaa raaka-ainetyypit kolmeen kategoriaan: kiinteään, puolikiinteään ja nestemäiseen jakeeseen. Kiinteä raaka-aine koostuu energiakasveista, maanviljelyn sivutuotteista, öljyisten siementen puristeesta, rikkaruohoista, pilaantuneesta rehusta, kasvien lehdistä ja kiinteästä yhdyskuntajätteestä. Puolikiinteä jäte koostuu karjan, lampaan, vuohen ja sian lannasta ja lihajätteestä, kalastuksen jätteistä, siipikarjan jätteestä, teurasjätteestä ja ihmisperäisestä jätteestä. Nestemäinen on peräisin tislamoista, meijereistä, sellu- ja paperiteollisuudesta, siipikarjateollisuudesta, sokeriteollisuudesta ja elintarviketeollisuudesta. Maanviljelyksestä peräisin oleva jäte sisältää paljon huonosti hajoavaa lignoselluloosaa, joten se vaatii esikäsittelyn ja lisäaineiden käyttöä. (Krishania ym. 2013: 3.)

Biokaasun tuottamisen raaka-aineena voidaan käyttää myös bioetanolin ja biodieselin valmistuksen sivutuotteita. Bioetanolin valmistuksen sivutuotteena syntyy raaka-aineesta riippuen muun muassa kasvien jäämiä ja tislauksesta jäljelle jäävää rankkia. Biodieselin valmistuksen sivutuotteena syntyy raakaglyserolia, pesuvettä biodieselin

puhdistamisesta, puristetta ja kasvijäännöksiä. (Wilkie 2007.) Näistä glyseroli ja rankki ovat tärkeimmät tässä diplomityössä.

2.3.2. Biokaasun valmistaminen mädätyksellä

Biokaasun tuotantoon käytettävä raaka-aine vaatii toisinaan esikäsittelyn. Esikäsittelyn tarkoituksena on poistaa syötteestä epäpuhtauksia, murskata se sopivaan kokoon ja homogenisoida se. Esikäsittelyssä säädetään kuiva-ainepitoisuus ja orgaaninen kuorma sopivaksi mädätysprosessin onnistumiseksi. (Latvala 2009: 23.) Syötteen laadusta riippuen se täytyy hygienisoida tai steriloida ennen biometanointia tai sen jälkeen (Latvala 2009: 23; Weiland 2010: 857).

Maanviljelyn sivutuotteet sisältävät lignoselluloosaa, jonka vuoksi ne täytyy esikäsitellä alkalikäsittelyllä (esim. NaOH), termokemiallisella käsittelyllä rikkihapolla (H_2SO_4) tai jauhamisella. Alkalikäsittelyllä erotellaan ligniini ja selluloosa. Happokäsittely hajottaa ligniiniä ja tehostaa entsyymaattista hydrolyysiä selluloosan hajottamiseksi. Jauhaminen valmistaa raaka-aineen entsyymaattiselle hydrolyysille, koska raaka-aine on tällöin pienemmässä koossa ja ligniini vähemmän kiteistä. Lisäaineilla ja ravinteilla kuten nikkelillä, entsyymeillä ja hivenaineilla sekä makroravinteilla tehostetaan bakteerien toimintaa ja syötteen hajoamista. (Krishania ym. 2013: 3-4.)

Biokaasua tuotetaan mädättämällä orgaanista raaka-ainetta anaerobisissa olosuhteissa. Biometanoinnissa hyödynnetään mikrobien kykyä hajottaa orgaaninen aines biokaasuksi ja ravinnerikkaaksi käsittelyjäännökseksi. (Krishania ym. 2013: 2.) Biometanointi voidaan jakaa neljään erilliseen vaiheeseen, jotka ovat hydrolyysi, asidogeneesi eli happokäyminen, asetogeneesi eli etikkahapon muodostus ja metanogeneesi eli metaanin muodostus. Prosessissa käytettävä syöte sisältää muun muassa hiilihydraatteja, proteiineja ja lipidejä, jotka hajoavat hydrolyysivaiheessa sokereiksi, aminohapoiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi. Asidogeenisissä nämä hajoavat edelleen propionaatiksi ja butyraatiksi, jotka taas hajoavat asetogeenisissä etikkahapoksi ja vedyksi. Metaanibakteerien vaikutuksesta näistä muodostuu lopulta metaania. Hydrolyysissä aminohapoista vapautuu ammoniakkaa, joka liukenee käsittelyjäännökseen. (Latvala 2009: 29.)

Biometanointi tapahtuu mikro-organismien avulla, minkä vuoksi niiden elinolosuhteista on tärkeää huolehtia. Biometanoinnin onnistumisen kannalta tärkeitä parametreja ovat lämpötila, kuormitus, pH, hydraulinen viipymäaika (HRT, hydraulic retention time), haihtuvat rasvahapot ja alkaliteetti sekä inhibitiot. (Latvala 2009: 34-36.)

Anaerobinen hajoaminen voi tapahtua eri lämpötila-alueilla. Psykofiilinen hajoaminen tapahtuu lämpötila-alueella 12-16 °C lähinnä luonnossa kuten soilla ja sedimentissä sekä kaatopaikoilla. Mesofiilinen hajoaminen tapahtuu lämpötila-alueella 35-37 °C esimerkiksi märehtijöiden pötsissä ja mädättämöissä. Krishanian ym. (2013: 4) mukaan tämä tapahtuu lämpötila-alueella 32-35 °C. Termofiilinen hajoaminen tapahtuu lämpötila-alueella 55-60 °C mädättämöissä ja geotermisesti lämpenevissä ekosysteemeissä. Krishanian (2013: 4) mukaan tämä tapahtuu alueella 50-60 °C. Termofiilisen mädätyksen etuna on patogeenisten bakteerien tuhoutuminen korkeammissa lämpötiloissa. Heikkoutena puolestaan on heikentynyt prosessin stabiilisuus ja suuri lämmitysenergian tarve. (Gallert & Winter 1997: 405.) Termofiilinen prosessi on mesofiiliseen prosessiin verrattuna herkempi lämpötilan ja pH:n vaihteluille. Lämpötilan vuoksi hygienisoituminen on tehokasta ja syötteen käsittelyaika on lyhyt. Termofiilinen prosessi kestää myös hyvin kuormitusta. (Latvala 2009: 34.)

Prosessin pH vaihtelee kuormituksen mukaan. Muutokset syöteseoksessa tai viipymäajassa vaikuttavat kuormitukseen. Kuormitus vaihtelee välillä 3-9 kgVS/m³/d (Latvala 2009: 34). Yksikkö kuvaa kuinka monta kilogrammaa orgaanista kuiva-ainetta (VS, volatile solids) syötetään vuorokaudessa yhtä reaktorin nestetilavuuskuutiota kohden. Liian suuri orgaaninen kuormitus johtaa haponmuodostajabakteerien toiminnan kiihtymiseen, jolloin haihtuvien rasvahappojen (VFA, volatile fatty acids) pitoisuuden nousu aiheuttaa pH:n alenemista. Metaanibakteerien toiminta heikkenee ja metaanin tuotto huonontuu. Metaanibakteereille sopiva pH on 6,5-7,5. Kuormituksen suureneminen taas saattaa aiheuttaa pH:n liiallista nousua, jolloin haponmuodostajabakteerien toiminta häiriintyy ja koko prosessi saattaa pysähtyä. Näiden bakteerien optimaalinen pH on 5,2-6,3. (Latvala 2009: 34-35.)

Hydraulinen viipymäaika (HRT, hydraulic retention time) on riippuvainen materiaalin tasalaatuisuudesta, kokonaiskuiva-ainepitoisuudesta (TS, total solids), orgaanisen aineen määrästä, lämpötilasta, reaktorin tilavuudesta ja sekoituksesta. HRT tarkoittaa sitä aikaa, jonka syöteseos eli biomassa viipyy reaktorissa. Pitkällä viipymällä saadaan tuotettua enemmän biokaasua, mutta lämmitys- ja sekoitustarve kasvaa. Liian lyhyellä viipymällä reaktori saattaa ylikuormittua ja biokaasun tuotanto laskea huonon hajoamisen seurauksena. Suomalaisilla biokaasulaitoksilla HRT on yleensä 12-30 vuorokautta. HRT on riittävä, kun orgaanisen aineen reduktio on 50-60 %. (Latvala 2009: 35.)

Haihtuvia rasvahappoja muodostuu asidogeesivaiheessa. Sen perusteella voidaan seurata biometanoinnin toimintaa. Liian suuri rasvahappojen määrä on merkki liian suuresta orgaanisesta kuormasta, sillä mikrobitoiminta heikkenee pH:n alentuessa. Alkaliteetti kuvaa reaktorin puskurikapasiteettia yksikössä mg CaCO₃/l. Alkaliteetti kuvaa lukuarvoa, joka tarvitaan vapaiden rasvahappojen puskuroimiseen. Vapaiden rasvahappojen ja alkaliteetin suhteen perusteella voidaan havaita muutokset prosessissa jo ennen pH:n muuttumista. (Latvala 2009: 36.)

Sekoittamisella on tarkoitus saada käsiteltävä syöte tasalaatuiseksi ja estää eroavien pitoisuuksien ja lämpötilojen muodostuminen. Sekoituksen tärkein tehtävä on saada mikro-organismit ja syöte kosketuksiin toistensa kanssa biometanoinnin tehostamiseksi. Liiallinen sekoitus saattaa vähentää biokaasun muodostumista. Hitaan sekoittamisen on havaittu sietävän äkkikuormituksesta aiheutuvaa häiriötä nopeaa sekoittamista paremmin. Liika sekoittaminen vaikuttaa mikrobibiomassan rakenteisiin, mikä vähentää rasvahappojen hapettumista ja aiheuttaa epästabiilisuutta. (Krishania ym. 2013: 5.)

Suomessa on käytössä kolme erityyppistä biokaasulaitosta, jotka ovat maatilalaitokset, jätevedenpuhdistamoiden biokaasulaitokset ja yhteiskäsittelylaitokset. Maatilojen yhteydessä toimivat biokaasulaitokset ovat yleensä pieniä yksiköitä, joissa käsitellään omalla tilalla tai lähialueen tiloilla syntyvää karjan lantaa ja peltobiomassaa. Lanta ja peltobiomassa kerätään esisäiliöön, jossa on sekoitin ja lämmitin. Peltobiomassa murskataan ennen syöttämistä esisäiliöön, mutta se voidaan myös hienontamisen jälkeen

syöttää suoraan reaktoriin. Esisäiliön tarkoituksena on tehdä mädätettävästä massasta tasalaatuista. (Latvala 2009: 19; 26.)

Jätevedenpuhdistamoiden biokaasulaitoksissa käytettävä syöte on yhdyskuntajätevesilietettä. Lieite johdetaan normaalista jätevedenkäsittelyprosessista sakeutusaltaaseen, jossa lietteen kuiva-ainepitoisuus nostetaan 2-8 %:in, ja lopulta biokaasureaktoriin. Syötteenä voidaan käyttää myös teollisuuden jätevesiä ja rasvakaivolietteitä. (Latvala 2009: 27.)

Yhteiskäsittelylaitoksilla voidaan käsitellä useita erityyppisiä jätteitä ja sivutuotteita. Syöte kerätään varastosäiliöön, joka voi toimia myös sekoitussäiliönä. Ennen reaktoria syöte kerätään esisäiliöön. Yhteiskäsittelylaitoksilla on käytössä useita eri esikäsittelemenetelmiä, koska syötteenä käytettävä raaka-aine vaihtelee. Erilaisia esikäsittelemenetelmiä ovat murskaus, seulonta, sakeuttaminen, liettäminen ja hygienisointi. (Latvala 2009: 28.)

Biometanointiprosessi voi olla yksi- tai kaksivaiheinen, märkä, kuiva tai puolikuiva, panos- tai jatkuvatoiminen. Kaasun tuotanto vaihtelee ajan mukaan ja kaasun tuotannon pitämiseksi vakiona täytyy useisiin tekijöihin kiinnittää huomiota. Biometanointi toimii normaalisti kiinto-ainepitoisuuden ollessa 6-10 %, jolloin puhutaan märkämädätyksestä. Kiintoainepitoisuuden ollessa suuri eli yli 20 % puhutaan kuivamädätyksestä. (Krishania 2013: 5-6.) Latvalan (2009: 29) mukaan märkäprosessilla toimivan biokaasulaitoksen syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee noin välillä 5-15 % ja kuivaproessin noin 20-50 %. Märkäprosessin kuiva-ainepitoisuus rajoitetaan lähinnä sekoittimien ja pumppujen toimintakyvyn vuoksi (Latvala 2009: 29). Käytettävä reaktorityyppi riippuu kiintoainepitoisuudesta. Esimerkiksi kiintoainepitoisuuden ollessa suuri soveltuu jatkuvatoiminen sekoittava reaktori parhaiten. (Krishania ym. 2013: 6.)

Biokaasureaktorit voidaan jakaa kahteen perustyyppiin: täyssekoitusreaktoriin ja tulpavirtausreaktoriin. Yleisin Suomessa käytössä oleva biokaasulaitoksen toimintatapa kaikilla laityypeillä on täyssekoitteinen, yksivaiheinen, mesofiilinen, jatkuvatoiminen märkäprosessi, jolloin reaktorityypiksi soveltuu täyssekoitusreaktori. Täyssekoitusreak-

toriin lisätään syötettä jatkuvasti kerran tunnissa tai kerran vuorokaudessa. Käsittelyjäännöstä poistetaan tasaisesti. Joissakin tapauksissa käytetään jälkikaasuuntumissäiliötä, jossa käsittelyjäännöksen vielä sisältämä hajoava aines tuottaa jälkikaasuksi kutsuttua biokaasua. (Latvala 2009: 30.)

Tulppavirtausreaktori on putkimainen ja soveltuu kuiville materiaaleille. Tässä reaktori-tyypissä raaka-aine syötetään toisesta päästä ja käsitelty materiaali saadaan ulos toisesta ilman, että uusi ja vanha syöte pääsevät kosketuksiin toistensa kanssa. Biometanointi tapahtuu tässä reaktori-tyypissä vaiheittain siten, että hydrolyysi, happo- ja metaanikäyminen tapahtuvat eri reaktoreissa. Olosuhteet voidaan näin säätää eri vaiheille sopiviksi. (Latvala 2009: 31.)

Kuivaprosessin ero märkäprosessiin on lähinnä suurempi kuiva-ainepitoisuus. Kuiva-ainepitoisuuden ollessa suuri ei syötettä ja käsittelyjäännöstä voida siirtää pumpuilla, vaan ne siirretään esimerkiksi hydraulisesti tai ruuveilla. Kuivaprosessit jaetaan jatkuva-toimisiin ja panostoimisiin yksiköihin. Suomessa kuivaprosessi on vähän käytetty. Esimerkkinä jatkuvatoimisesta mädättämöstä on jatkuvatoiminen tulppavirtausprosessi, jossa reaktori on vaakatasoon rakennettu putki, jonka sisällä käsiteltävää syötettä siirretään ruuvilla. Ruuvi sekoittaa massaa, ja muodostuva biokaasu saadaan kerättyä reaktorin yläosasta. (Latvala 2009: 32.) Kuivaprosessi voi olla myös panostoiminen, jossa syötteet viedään kahdesta lämmitettävästä moduulista koostuvaan reaktoritilaan. Biokaasu imetään pois moduulista. Osa käsitellystä syötteestä poistetaan reaktorista, ja uutta syötettä sekoitetaan vanhan sekaan. Käsitellystä materiaalista erotellaan hajoamaton materiaali (metalli, muovi) pois, minkä jälkeen se voidaan jälkikompostoida tai käyttää lannoitevalmisteena. (Latvala 2009: 33.)

2.3.3. Ominaisuuksista

Raaka biokaasu sisältää pääkomponentteina noin 55-65 % metaania (CH₄) ja 30-40 % hiilidioksidia (CO₂) (Appels ym. 2011: 4300). Biokaasu sisältää vähäisiä määriä useita eri yhdisteitä riippuen sen alkuperästä. Biometanoimalla tuotettu kaasu sisältää yleensä vähemmän haitallisia yhdisteitä kuin kaatopaikalla muodostunut kaasu. Kaasun sisältä-

mät yhdisteet riippuvat myös käytetystä syötteestä. Biokaasu saattaa sisältää jonkin verran rikkivetyä ja ammoniakkia sekä hyvin vähäisiä määriä typpeä, halogeeniyhdisteitä, happea, vettä, hiukkasia ja piiyhdisteitä kuten siloksaaneja. (Persson, Jönsson & Wellingner 2006: 5-8.) Tärkeimpiä syitä biokaasun puhdistamiselle ovat sen käyttö esimerkiksi ajoneuvojen kaasumootoreissa, lämpökattiloissa ja polttokennoissa tai syöttö maakaasuverkkoon, lämpöarvon nostaminen ja standardisointi. (Persson ym. 2006: 16.)

Biokaasun sisältämä rikki aiheuttaa korroosiota esimerkiksi kompressoreissa, kaasun varastointitankeissa ja moottoreissa. Halogeeniyhdisteet hapettuvat palamisen yhteydessä muodostaen palamistuotteita, jotka aiheuttavat korroosiota pako- ja savukaasuputkitoissa. Siloksaanit ovat haihtuvia piiyhdisteitä, jotka muuttuvat palamisen yhteydessä epäorgaanisiksi piipitoisiksi yhdisteiksi. Esimerkiksi moottoreissa nämä yhdisteet kerääntyvät venttiileihin ja sylinterin seinämiin ja aiheuttavat tukoksia ja eroosiota. Suuret ammoniakkipitoisuudet aiheuttavat palamisessa typen oksidien (NO_x) määrän nousun palamiskaasuissa. (Persson ym. 2006: 7-8.)

Hiilidioksidin poistamisella saadaan nostettua biokaasun lämpöarvoa, Wobbe-indeksiä ja koostumusta samankaltaiseksi kuin maakaasulla (NG, natural gas). Kun biokaasun Wobbe-indeksi on sama kuin maakaasulla, sitä voidaan syöttää maakaasuverkkoon. Wobbe-indeksi kuvaa kaasun sisältämää energiaa yksikössä MJ/m³ (0 °C, 101,3 kPa), ja se voidaan laskea kaavasta 1. Koska Wobbe-indeksi lasketaan lämpöarvon avulla, on olemassa ylempi ja alempi Wobbe-indeksi samoin kuin ylempi ja alempi lämpöarvo (HHV, higher heating value; LHV, lower heating value). Taulukossa 6 on esitetty esimerkkinä Ruotsissa käytössä olevan standardin mukaiset vaatimukset, jotka puhdistetun biokaasun tulee täyttää. Taulukossa 7 on esitetty muun muassa biokaasun, kaatopaikka-kaasun ja kahden eri alkuperää olevan maakaasun ominaisuuksia. (Persson ym. 2006: 16.)

$$\text{Wobbe-indeksi} = \frac{HV}{\sqrt{\rho}}, \text{ missä } HV = \text{lämpöarvo (LHV tai HHV)}, \rho = \text{tiheys} \quad (1)$$

Taulukko 6. Ruotsin biokaasustandardissa puhdistetulta biokaasulta vaaditut ominaisuudet, muokattu (Persson ym. 2006: 9) mukaan.

Ominaisuus	Yksikkö	Lukuarvot
Alempi Wobbe-indeksi ^c	MJ/m ³	43,9-47,3 ^a
Oktaaniluku		> 130
Veden kastepiste	°C	< t ^b -5
CO ₂ +O ₂ +N ₂	vol-%	< 5
O ₂	vol-%	< 1
Kokonaisriikki ^c	mg/m ³	< 23
NH ₃ ^c	mg/m ³	20

^aVastaa metaanipitoisuutta 95-99 %

^bYmpäristön lämpötila

^cNormaaliolosuhteet (0 °C, 101,3 kPa)

Taulukko 7. Eri kaasujen ominaisuuksia, muokattu (Persson ym. 2006: 6).

Parametri	Yksikkö	Kaatopaikka- kaasu	Biokaasu	Maakaasu (Pohjanmeri)	Maakaasu (Hollanti)
LHV	MJ/kg	12,3	20,2	47	38
Tiheys ^a	kg/m ³	1,3	1,2	0,84	0,8
Ylempi Wobbe-indeksi ^a	MJ/m ³	18	27	55	43,7
Metaaniluku		>130	>135	70	-
Metaani	vol-%	45	63	87	81
	vol-%	35-65	53-70	-	-
Hiilivedyt	vol-%	0	0	12	3,5
Vety	vol-%	0-3	0	0	-
Hiilidioksidi	vol-%	40	47	1,2	1
	vol-%	15-50	30-47		
Typpi	vol-%	15	0,2	0,3	14
	vol-%	5-40	-	-	-
Happi	vol-%	1	0	0	0
	vol-%	0-5	-	-	-
Rikkivety	ppm	<100	<1000	1,5	-
	ppm	0-100	0-1000	1-2	-
Ammoniakki	ppm	5	<100	0	-
Klooriyhdisteet ^a	mg/m ³	20-200	0-5	0	-

^a Normaaliolosuhteet (0 °C, 101,3 kPa)

2.3.4. Käyttö

Biokaasu sisältää paljon energiaa ja sitä hyödynnetään pääsääntöisesti energiantuotannossa. Biokaasua käytetään monipuolisesti lämmön, höyryn ja sähkön tuottamiseen sekä liikennepolttoaineena. Biokaasun hyödyntämismahdollisuuksiin vaikuttaa merkittävästi se, missä sitä tuotetaan ja kuinka sitä voidaan käyttää tuotantoyksikön läheisyydessä. Hyödyntämisvaihtoehtoja ovat lämmöntuotanto, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto CHP-laitoksessa, mekaaninen energia ja liikennekäyttö. (Latvala 2009: 44.) Biokaasu voidaan käyttää CHP-laitoksissa, jotka toimivat kaasumootorilla tai kaksoispolttoaineella DF-mootorilla (DF, dual fuel). Biokaasua voidaan käyttää myös mikrokaasuturbiineissa ja polttokennoissa. (Weiland 2010: 857.) Metaani on voimakas kasvihuonekaasu, jonka ympäristövaikutuksia voidaan vähentää polttamalla se soihdussa, mikäli sitä ei muuten voida hyödyntää. (Latvala 2009: 48.)

Yhdistetty sähkön ja lämmöntuotanto on yleinen biokaasun hyödyntämistapa, koska laitosten läheisyydessä usein sijaitsee sähköä ja lämpöä tarvitsevia toimintoja. Pelkän lämmön tuottaminen on kannattavaa vain, jos lähistöllä on ympäri vuoden paljon lämpöä tarvitsevia kohteita. Biokaasulla tuotettu lämpö käytetäänkin bioreaktorin lämmön ylläpitämiseen. Tuotettavasta biokaasusta 10-40 % kuluu laitoksen oman energiantarpeen tuottamiseen. (Latvala 2009: 46.)

Liikennepolttoaineena käytettäessä biokaasu täytyy puhdistaa vastaamaan laadultaan maakaasua. Liikennebiokaasu on paineistettu noin 200-250 bariin. (Persson ym. 2006: 14.) Paineistetusta biokaasusta käytetään nimitystä CBG (compressed biogas). Biokaasua voidaan käyttää polttoaineena kaasumootorissa, joka voi olla puristussytytteinen kaksoispolttoainemoottori (DF) tai kipinäsytytteinen kaasumoottori (SG, spark ignited gas engine) (Raiko ym. 2002: 605).

Nesteytetystä biokaasusta käytetään nimeä LBG (liquefied biogas). LBG:tä voidaan käyttää maakaasun (LNG, liquefied natural gas) tavoin esimerkiksi laivojen polttoaineena. (Motiva 2013.)

Puhdistettu biokaasu voidaan liikennepolttoaineena käyttämisen lisäksi syöttää myös maakaasuverkkoon. EU-mailla on erilaiset säädökset kaasun syöttämiselle kaasuverkkoon. Esimerkiksi Saksa, Ruotsi ja Sveitsi ovat määrittäneet biokaasulle laatustandardin, jotta se voidaan syöttää maakaasuverkkoon. Biokaasusta täytyy puhdistaa epäpuhtaudet, ja metaanipitoisuuden täytyy olla yli 95 %, jotta sitä voidaan käyttää erilaisissa kaasusovelluksissa. Ruotsissa ja Sveitsissä metaania hyödynnetään paljon muun muassa kuljetussektorilla. (Weiland 2010: 857.)

Biokaasun tuotannossa syntyy sivutuotteena käsittelyjäännöstä, joka soveltuu hyvin lannoitteeksi. Mädätyksen seurauksena orgaanisesti sitoutuneet ravintoaineet kuten typi mineralisoituvat sekä hiilen ja typen suhde alenee. Nämä lisäävät typen lyhytaikaista lannoitevaikutusta. Mädätys vähentää jopa 80 % hajuista sekä tuhoaa rikkaruohojen siemeniä, bakteereja, viruksia, sieniä ja loisia, minkä vuoksi sillä on suuri merkitys, kun käsittelyjäännös käytetään lannoitteena. (Weiland 2010: 857.)

2.3.5. Sivutuotteet

Biokaasulaitoksessa muodostuu sivutuotteena käsittelyjäännöstä. Käsittelyjäännöksestä käytetään usein myös nimitystä multa. Käsittelyjäännös on mädätyksestä jäljelle jäävä osa. Se voidaan hyödyntää lannoitteena tai maanparannusaineena. Ennen käsittelyjäännöksen hyötykäyttöä se täytyy käsitellä hygienisoimalla tai sterilioimalla riippuen käytetystä raaka-aineesta. (Latvala 2009: 38.)

Mädätysjäännös voidaan lannoitteena ja maanparannusaineena hyödyntämisen lisäksi mädättää uudelleen, käyttää energiantuotannossa tai teollisuuden tuotteissa. Mädätysjäännös on ravinteista rikas biolannoite, jolla voidaan korvata mineraalilannoitteita. Mädätysjäännöstä voidaan käyttää myös kuivikkeena navetoissa, kuitulevyjen ja komposiittimateriaalien valmistuksessa. Mahdollisia hyödyntämismahdollisuuksia on useita. (Al Seadi, Drosch, Fuchs, Rutz, Janssen 2013: 292-296.)

3. YHDISTETTY SÄHKÖN JA LÄMMÖN TUOTANTO

Sähköä ja lämpöä voidaan tuottaa yhdistetysti CHP-laitoksessa (CHP, combined heat and power). Lämmön ja sähkön tuottamiseen voidaan käyttää eri teknologioita kuten kaasu-, höyry- ja mikroturbiinia, mäntäpolttomootoria, polttokennoa tai stirling-mootoria. CHP-laitokset voivat olla suuren, pienen tai mikrokokoluokan laitoksia. (Knowles 2011: 6-11.)

Suuren kokoluokan CHP-laitokset ovat teholtaan yli 2 MW ja jopa 1 GW suuruisia. Niitä käytetään esimerkiksi teollisuudessa, jossa kaasuturbiinia pyörittävän savukaasun lämpö voidaan hyödyntää prosessissa, tai jossa muodostuu paljon höyryä pyörittämään turbiinia. Suuret CHP-laitokset ovat useimmiten kaasu- tai höyryturbiineja tai mäntämoottoreita. Mäntäpolttomootorit ovat usein kaasumoottoreita ja niitä käytetään lämmön ja sähkön tuoton suhteen (heat-to-power-ratio) ollessa alhainen. (Knowles 2011: 7.)

Pienen kokoluokan CHP-laitosten teho vaihtelee tavallisesti 100 kW ja 2 MW välillä. Pienissä laitoksissa käytetään samaa teknologiaa kuten suurissakin. Mäntäpolttomootorit ovat kuitenkin tavallisimmin käytetty niiden suhteellisen alhaisen hinnan ja tehokkuuden vuoksi. (Knowles 2011: 8-9.) Myös polttokennoja voidaan käyttää pienissä CHP-laitoksissa. Polttokennot käyttävät polttoaineena vetyä. Puhdasta vetyä ei ole edullisesti saatavilla, joten polttoaineena käytetään maakaasua tai vastaavaa hiilivetyä, josta vety erotetaan termokemiallisella prosessilla. Tässä muodostuva lämpö mahdollistaa polttokennon käytön CHP-laitoksessa. (Knowles 2011: 8-9.)

Mikrokokoluokan CHP-laitokset soveltuvat sähkön ja lämmön tuottamiseen pienissä rakennuksissa tai omakotitaloissa tai useamman kiinteistön energian yhteistuotantoon. Mikro-CHP-laitokset voivat olla mäntäpolttomootoreiden lisäksi stirling-mootoreita ja polttokennoja. Mäntämoottoreita, jotka vastaavat teholtaan henkilöauton moottoria, voidaan käyttää energian tuottamiseen pienissä rakennuksissa niin yksityisellä kuin julkisellakin sektorilla. Tätä pienemmät laitokset, jotka ovat teholtaan noin 5 kW, soveltuvat käytettäväksi omakotitalojen energian tuottamiseen. Mikro-CHP-laitokset voivat

käyttää polttoaineena esimerkiksi maakaasua ja kaasumaisia tai nestemäisiä biopolttoaineita. Mikrokokoluokan laitokset ovat teholtaan pienempiä kuin pienen kokoluokan laitokset. (Knowles 2011: 10-11.)

Mäntäpolttomoottorissa (reciprocating internal combustion engine) palaminen tapahtuu sylinterin sisällä. Sylinteriin ruiskutettu kaasumainen tai höyrystynyt polttoaine aiheuttaa palaessaan mäntään kohdistuvan paineen. Paineen vaikutuksesta liikkuva mäntä tuottaa mekaanista työtä. Polttomoottori voi olla kipinä- tai puristus-sytytteinen. Kipinä-sytytteinen moottori on yleensä bensinikäyttöinen ja puristus-sytytteinen dieselkäyttöinen. (Raiko ym. 2002: 585.)

Kaasumoottori voi olla sekä kipinä- että puristus-sytytteinen. Kipinä-sytytteisessä kaasumoottorissa kaasun ja ilman seos sytytetään sytytystulpalla ja moottorista käytetään usein nimitystä SI-moottori (spark ignited gas engine) tai SG-moottori. Puristus-sytytteisessä moottorissa kaasun ja ilman seos sytytetään ruiskuttamalla puristustahdin lopussa pieni määrä nestemäistä sytytyspolttoainetta, joka syttyessään sytyttää kaasun ja ilman seoksen. Puristus-sytytteisestä kaasumoottorista käytetään nimeä dieselkaasumoottori (GD, gas diesel) ja kaksoispolttoainemoottori (DF, dual fuel). (Raiko ym. 2002: 605.)

Kaksoispolttoainemoottorit käyttävät tavallisesti hyvin vähän nestemäistä polttoainetta. Monet moottorit käyttävät esimerkiksi täydellä teholla ajettaessa vain noin yhden prosentin sytytyspolttoainetta. (Raiko ym. 2002: 605.) Monet kaksoispolttoainemoottorit voivat toimia myös ilman kaasua. Moottorista voidaan saada täysi teho myös nestemäisellä polttoaineella. Usein sytytyspolttoainelaitteisto mitoitetaan siten, että pelkällä poltonesteellä voidaan päästä vain noin 30 % tehoon. On myös kaksoispolttoainemootteireita, joita voidaan ajaa sekä kaasulla että nestemäisellä polttoaineella ja saavuttaa täysi teho. (Raiko ym. 2002: 609.) Kaksoispolttoainemootteireissa polttoaine voidaan vaihtaa kaasusta dieseliin ja toisinpäin jopa kesken ajon (Henham & Makkar 1998: 2002).

Raiko ym. (2002: 604) käyttää kaasumoottorista, jonka sähköntuotannossa muodostuvaa hukkalämpöä voidaan käyttää esimerkiksi asuintalojen lämmitykseen, nimitystä ko-

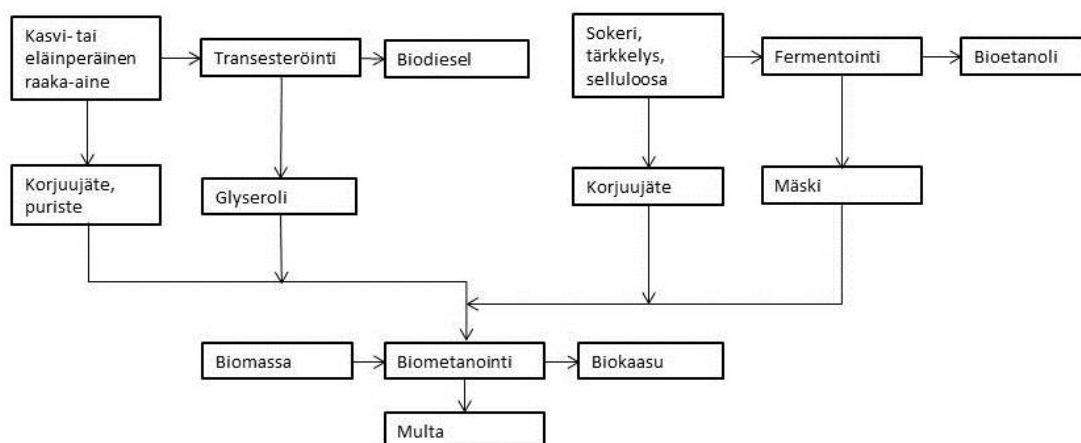
konaisenergialaitos. Koska moottorilla tuotetaan tällöin sekä sähköä että lämpöä, on kyseessä CHP-laitos.

Kaasumoottoreita (SG, DF, GD) käytetään voimalaitoksissa energian tuottamiseen. Kaksoispolttoainemoottorilla toimivasta voimalaitoksesta käytetään myös nimitystä monipolttoainevoimalaitos (multi-fuel power plant) silloin, kun se voi toimia sekä kaasulla että nestemäisellä polttoaineella. SG-moottori toimii kaasulla. DF-moottori toimii kaasulla, joka sytytetään sytytyspolttonesteellä. DF-moottorissa voidaan käyttää myös dieselpolttoainetta. GD-moottoria puolestaan voidaan ajaa sekä kaasulla että dieselpolttoaineella. Monipolttoainevoimalaitoksia voidaan käyttää niin hajautetussa kuin keskiteytyssäkin energiantuotannossa. (Wärtsilä 2013a.) Polttomoottorit, joita voidaan ajaa sekä kaasulla että nestemäisellä polttoaineella soveltuvat käytettäväksi yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa (Wärtsilä 2013b).

Knowlesin (2011: 6) mukaan mäntäpolttomoottoreiden sähkön tuoton hyötysuhde vaihtelee välillä 25-40 %. Lämmön hyödyntäminen nostaa kokonaishyötysuhteen jopa 95 %:iin. Nykyaikaiset moottorit ovat kuitenkin niin tehokkaita, että niillä saavutetaan korkeampia sähköhyötysuhteita, kuin Knowles (2011:6) ilmoittaa. Dual fuel -moottoreita käytetään pienen mittakaavan sovelluksissa niiden hyvän sähköhyötysuhteen vuoksi, joka Perssonin (2006:13) mukaan voi olla 43 %. Toisaalta mäntäpolttomoottorilla voidaan päästä sähköntuotannossa jopa 49 %:iin, jolloin CHP-sovelluksissa kokonaishyötysuhde voi olla 90 % (Wärtsilä 2013b.) Heedman ja Kaarsbergin (2001: 274) mukaan sähköhyötysuhde vaihtelee dieselmootoreilla välillä 30-50 % ja (maa)kaasumoottorilla välillä 25-45 %. Dual fuel -moottorille Department of Energy and Climate Change (2014) ilmoittaa hyötysuhteeksi 35-45 %. Moottoria voidaan ajaa sekä kaasulla että öljyllä ilman hyötysuhteen huonontumista.

4. YHTEISTUOTANTOMALLI

Luvussa 4.1. esitellään lyhyesti laskennassa käytettävät biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotantolaitokset sekä niiden tuotantotiedot, joita on käytetty laskennan pohjana. Luvussa 4.2. esitellään laskentaosio, jossa tunnetut materiaalivirrat optimoidaan siten, että kustakin tuotantoyksiköstä saadaan puhtaita biopolttoaineita ja kaikki materiaalivirrat pystytään hyödyntämään. Luvussa 4.3. esitellään laskennan tulokset. Kuvassa 5 on esitetty biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotannossa muodostuvat materiaalivirrat.



Kuva 5. Biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotannossa syntyvät materiaalivirrat.

4.1. Biopolttoaineiden tuotantolaitosten esittely

Kun materiaalivirrat jokaisesta tuotantoyksiköstä tunnetaan, ne voidaan optimoida. Eläinperäisen biodieselin ja biokaasun tuotantoyksiköiden materiaalivirrat perustuvat Pohjanmaalla sijaitsevilta tuotantolaitoksilta saatuihin tietoihin. Bioetanolin tuotantoyksikön tiedot perustuvat käytöstä poistetulle bioetanolilaitokselle ilmoitettuun tuotantomäärään.

4.1.1. Biodieselin tuotantolaitos

Biodieselin tuotantolaitos valmistaa biodieseliä eläinrasvasta, joka on periaatteessa jä-tettä. Eläinrasvaa muodostuu vuodessa noin 3500 t, josta osa käytetään rehun valmis-tukseen. Sisältämiensä vapaiden rasvahappojen vuoksi eläinrasva esteröidään käyttäen katalyyttinä rikkihappoa. Tämän jälkeen loput triglyseridit transesteröidään kahdessa vaiheessa käyttäen katalyyttinä emästä (NaOH, KOH). Lopuksi tuotettu raaka biodiesel puhdistetaan neutraloimalla ja separoimalla. Tuotantolaitoksessa valmistettua biodiese-liä voidaan käyttää dieselmoottoreissa ja kiinteistöjen lämmityspolttoaineena eli bio-polttoöljynä. Sitä voidaan sekoittaa myös fossiiliseen dieseliin eri suhteissa.

Tuotantolaitos toimii panosperiaatteella: vuorokaudessa pystytään tuottamaan yksi pa-nos, jolloin vuorokauden tuotantokapasiteetti on noin 8000 l eli 7000 kg biodieseliä ja 1000 kg glyserolia. Yhden panoksen tuottamiseen tarvittavat raaka-aineet sekä niiden määrät on esitetty taulukossa 8. Laitoksen teoreettinen tuotantokapasiteetti vuodessa on 2500000 l (2500 m³) biodieseliä, jolloin sivuotteena muodostuu 330000 kg (260 m³) glyserolia.

Taulukko 8. Yhden panoksen tuottamiseen tarvittavat ainemäärät.

Raaka-aine	Määrä (kg)
Eläinrasva	7300
Metanoli	1150
Kaliummetylaatti (katalyytti)	155
Pesuaine	30
Antioksidantti	70
Deaktivointiaine	30
Rikkihappo	60

Tuotantolaitoksen arvioidaan olevan toiminnassa noin 310 vuorokautta vuodessa (t_{vrk}). Tätä lukuarvoa on käytetty vuodessa tuotetun biodieselin raaka-ainemäärän laskemi-seen. Yhden panoksen tuottamiseen tarvittavan eläinperäisen rasvan määrä on 7300 kg ($m_{eläinrasva/vrk}$). Eläinrasvan tiheyden oletetaan olevan sama kuin vastaavan biodieselin eli

872 kg/m^3 ($\rho_{\text{eläinrasva}}$). Vuodessa käytettävän eläinrasvan määrä on noin 2600 m^3 ($V_{\text{eläinrasva}}$) ja se lasketaan kaavan 2 osoittamalla tavalla.

$$V_{\text{eläinrasva}} = (m_{\text{eläinrasva}} / \text{vrk} * t_{\text{vrk}}) / \rho_{\text{eläinrasva}} \quad (2)$$

Taulukossa 9 on esitetty materiaalivirrat, kun a) tuotetaan yksi panos (vrk), b) raaka-ainetta on 1000 kg, c) lopputuotetta halutaan saada 1000 kg.

Taulukko 9. Materiaalivirrat eri biodieselin tuotantomäärille.

Laatu	Tuotanto (vrk)	Raaka-ainetta 1 t	Lopputuotetta 1 t
Eläinrasva	7300 kg	1000 kg	1043 kg
Eläinperäinen biodiesel	7000 kg	959 kg	1000 kg
Glyseroli	1008 kg	138 kg	144 kg

4.1.2. Bioetanolin tuotantolaitos

Bioetanolilaitoksen osalta materiaalivirtojen laskenta ei perustu todelliseen olemassa olevan tuotantolaitosten tietoihin. Laskennassa on käytetty erään käytöstä poistetun laitoksen bioetanolin tuotantomäärää, joka oli 850 m^3 bioetanolia vuodessa. Tässä diplomityössä oletetaan, että käytettävä raaka-aine on perunajäte. Taulukon 3 mukaan yhden etanolikuution tuottamiseksi tarvitaan perunaa 8500 kg (m_{peruna}). Tällöin yhtälön 3 mukaisesti, kun halutaan tuottaa etanolia 850 m^3 (V_{etanoli}), tarvitaan perunaa raaka-aineeksi 7225000 kg ($m_{\text{tot,peruna}}$).

$$m_{\text{tot,peruna}} = V_{\text{etanoli}} * m_{\text{peruna}} \quad (3)$$

Luvussa 4.2. esitettävä laskenta suoritettiin tilavuusyksikössä (m^3), joten saatu raaka-aineena käytettävän perunan massa muutettiin tilavuusyksikköön (m^3). Tätä varten määritettiin perunan tiheys. Tiheyden määrittämiseksi hankittiin tavallista suomalaista ruokaperunaa. Perunoiden massat määritettiin kolmelle eri perunamäärälle. Massat olivat $m_1=116,4843$ g, $m_2=113,7220$ g ja $m_3=76,3020$ g. Mittalasiin mitattiin tislattua vettä tilavuuden $V_{alku}=250$ ml verran. Perunat upotettiin mittalasiin ja muuttunut tilavuus määritettiin jokaisen eri massan m_1 , m_2 ja m_3 kohdalla erikseen. Vesi mittalasisissa vaihdettiin jokaista määritystä varten. Tilavuudet kirjattiin ja ne olivat $V_1=310$ ml, $V_2=310$ ml ja $V_3=320$ ml. Näiden perusteella määritettiin perunamäärille kolme tiheyden arvoa ρ_1 , ρ_2 ja ρ_3 kaavan 4 osoittamalla tavalla. Näistä laskettiin kaavan 5 mukaisesti keskiarvo ρ_{peruna} , jonka arvoksi saatiin 1060 kg/ m^3 . Kaavan 6 mukaan 850 m^3 tuottamiseksi etanolia tarvitaan raaka-aineeksi perunaa 6800 m^3 .

$$\rho_{1,2,3} = \frac{m_{1,2,3}}{V_{1,2,3} - V_{alku}} \quad (4)$$

$$\rho_{peruna} = \frac{(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)}{3} \quad (5)$$

$$V_{peruna} = \frac{m_{tot,peruna}}{\rho_{peruna}} \quad (6)$$

Bioetanolin valmistamisessa muodostuvaa sivutuotetta eli rankkia muodostuu 20-kertaisesti muodostuvaan bioetanoliiin nähden. Kun biokaasulaitoksen koko on 850 m^3 , muodostuu rankkia 17000 m^3 .

4.1.3. Biokaasun tuotantolaitos

Biokaasun tuotantolaitos on tyypiltään yhteistuotantolaitos. Laitoksessa käsitellään kunnalliselta jätevedenpuhdistamolta tulevaa lietettä, kotitalouksien erilliskerättyä biojätettä, mallaslietettä ja viljan lajittelujätettä. Biokaasulaitoksella vuonna 2012 käsitellyt syötteen ja niiden määrät sekä kapasiteetit on esitetty taulukossa 10. Ympäristölupa mahdollistaa 4000 m³ käsittelyn vuodessa.

Taulukko 10. Biokaasulaitoksen kapasiteetti ja vuonna 2012 käsiteltyjen syötteiden määrä.

Syöte	Kapasiteetti (m ³)	Määrä v.2012 (m ³)
Jätevesiliete	2000	1973
Biojäte	700	398,8
Mallasliete	700	548,3
Viljan lajittelujäte	300	7
Yhteensä	3700	2918,1

Vuonna 2012 tuotetun biokaasun määrä oli 175237,6 m³, joka vastaa 54,1 %:n osuutta kokonaiskapasiteetista. Laitoksen biokaasuntuotantokapasiteetti on 390 t eli 323900 m³ vuodessa. Laitoksessa on lämpökattila, jossa osa tuotetusta biokaasusta poltetaan ja tuotettu lämpö käytetään laitoksen omassa prosessissa. Kattila toimii tarpeen vaatiessa myös kevyellä polttoöljyllä. Omaan toimintaan kuuluu vuodessa 47200 m³ eli 26,9 % tuotetusta biokaasusta, jolloin ylijäämä on 276700 m³ vuodessa, mikäli laitos toimii täydellä kapasiteetilla. Ylijäämää ei tällä hetkellä kyetä hyödyntämään, joten se poltetaan soihdussa. Biokaasun tuotannon sivutuotteena syntyvä liete kuivataan ja jäljelle jäävä mädätysjäännös käytetään neutraloinnin jälkeen laitoksen läheisyydessä sijaitsevan kaatopaikan maisemointiin. Mädätysjäännöstä muodostui vuonna 2012 noin 729 m³. Kapasiteetin mukaan mädätysjäännöstä muodostuu 1354 m³.

4.2. Laskenta

Materiaalivirrat ja CHP-laskelmat on laskettu ohjelmalla MATLAB R2013a. Kappaleessa 4.2.1. on laskettu biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotantolaitosten materiaalivirrat. Kappaleessa 4.2.1. on laskettu CHP-laitoksen mitoitus erään esimerkkinä käytetyn kylän energiankulutukselle ja biodiesel- ja biokaasumäärät, joilla se voitaisiin toteuttaa.

4.2.1. Materiaalivirrat

Materiaalivirrat laskettiin käyttäen biodieselin ja -etanolin tuotantolaitosten kapasiteetteja, jolloin glyserolin vaihteluvälinä käytettiin 0-260 m³ ja rankin vaihteluvälinä 0-17000 m³. Tällöin biokaasulaitoksen raaka-aineen määrä (rankki+glyseroli) vaihteli välillä 0-17260 m³. Materiaalivirrat laskettiin myös siten, että biokaasulaitoksen raaka-ainekapasiteettia ei ylitetä. Tällöin glyserolin määrä vaihteli välillä 0-260 m³ ja rankin määrä 3700-3440 m³. Glyserolin määrän noustessa rankin määrän täytyi vähetä, jotta biokaasulaitoksen kapasiteetti pysyi kokoajan vakiona (3700 m³). Koska laskennassa käytetty bioetanolilaitos perustuu käytöstä poistetulle laitokselle ilmoitettuun tuotantomäärään, toimii jälkimmäinen laskenta bioetanolilaitosta uudelleen mitoittavana laskentana.

Materiaalivirtojen laskennassa on oletettu, että raaka-aineen, polttoaineen ja sivutuotteen määrät muuttuvat suhteessa toisiinsa. Esimerkiksi glyserolin määrän kasvaessa kasvaa biodieselin ja käytettävän raaka-aineen määrät samassa suhteessa. Tässä laskennassa tarkasteltiin biodieselin ja etanolin kohdalla missä suhteessa tarvitaan raakaainetta ja missä suhteessa saadaan itse polttoainetta, kun sivutuotteen määrät vaihtelevat tietyllä välillä.

Biodieselin osalta laskettiin kertoimet biodieselille ja eläinrasvalle eli missä suhteessa eläinrasvaa tarvitaan ja biodieseliä muodostuu sivutuotteena muodostuvaan glyseroliin nähden. Kertoimet biodieselille ja eläinrasvalle on määritetty kaavojen 8 ja 9 osoittamalla tavalla. Kaavoissa $V_{\text{biodieselkapasiteetti}}$ on 2500 m³, $V_{\text{glyserolikapasiteetti}}$ on 260 m³

ja $V_{\text{eläinrasvakapasiteetti}}$ on 2600 m^3 . Kertoimien määrittämisessä on käytetty biodieselin tuotantolaitoksen kapasiteettia.

$$\text{biodieselkerroin} = \frac{V_{\text{biodieselkapasiteetti}}}{V_{\text{glyserolikapasiteetti}}} \quad (8)$$

$$\text{eläinrasvakerroin} = \frac{V_{\text{eläinrasvakapasiteetti}}}{V_{\text{glyserolikapasiteetti}}} \quad (9)$$

Kertoimien perusteella määritettiin kaavojen 10 ja 11 mukaisesti eläinrasvan ja biodieselin määrä, kun glyserolin määrä vaihteli tietyllä välillä. Kaavoissa $V_{\text{glyseroli}}$ vaihteli alueella $0\text{-}260 \text{ m}^3$.

$$V_{\text{biodiesel}} = \text{biodieselkerroin} * V_{\text{glyseroli}} \quad (10)$$

$$V_{\text{eläinrasva}} = \text{eläinrasvakerroin} * V_{\text{glyseroli}} \quad (11)$$

Bioetanolin kohdalla laskenta toteutettiin vastaavalla tavalla. Bioetanoli- ja perunakertoimet laskettiin kaavojen 12 ja 13 osoittamalla tavalla. Kaavoissa $V_{\text{bioetanolikapasiteetti}}$ on 850 m^3 , $V_{\text{rankkikapasiteetti}}$ on 17000 m^3 ja $V_{\text{perunakapasiteetti}}$ on 6800 m^3 . Kertoimien määrittämisessä on käytetty käytöstä poistetulle bioetanolin tuotantolaitokselle ilmoitettua tuotantokapasiteettia sekä kyseiselle laitokselle laskettua raaka-aineena käytettävän perunan ja sivutuotteena muodostuvan rankin kapasiteettia.

$$\text{bioetanolikerroin} = \frac{V_{\text{bioetanolikapasiteetti}}}{V_{\text{rankkikapasiteetti}}} \quad (12)$$

$$\text{perunakerroin} = \frac{V_{\text{perunakapasiteetti}}}{V_{\text{rankkikapasiteetti}}} \quad (13)$$

Kertoimien perusteella määritettiin kaavojen 14 ja 15 mukaisesti perunan ja bioetanolin määrät, kun sivutuotteena muodostuvan rankin määrä vaihteli tietyllä välillä. Kaavoissa V_{rankki} vaihteli ensimmäisessä laskennassa alueella 0-17000 m³ ja toisessa laskennassa 3700-3440 m³.

$$V_{\text{bioetanol}} = \text{bioetanolikerroin} * V_{\text{rankki}} \quad (14)$$

$$V_{\text{peruna}} = \text{perunakerroin} * V_{\text{rankki}} \quad (15)$$

Biokaasun kohdalla laskettiin biokaasu- ja multakertoimet vastaavalla tavalla kaavojen 16 ja 17 osoittamalla tavalla. Kaavoissa $V_{\text{biokaasukapasiteetti}}$ on 324000 m³, $V_{\text{mädätettäväkapasiteetti}}$ on 3700 m³ ja $V_{\text{multakapasiteetti}}$ on 1354 m³. Kertoimien määrittämisessä on käytetty biokaasulaitoksen kapasiteettia. Kaavoissa esiintyvä sana multa tarkoittaa mädätysjäännöstä ja mädätettävä biokaasulaitoksen raaka-ainetta.

$$\text{biokaasukerroin} = \frac{V_{\text{biokaasukapasiteetti}}}{V_{\text{mädätettäväkapasiteetti}}} \quad (16)$$

$$\text{multakerroin} = \frac{V_{\text{multakapasiteetti}}}{V_{\text{mädätettäväkapasiteetti}}} \quad (17)$$

Kertoimien perusteella määritettiin kaavojen 18 ja 19 mukaisesti biokaasun ja sivutuotteena syntyvän mädätysjäännöksen (multa) määrät, kun biokaasulaitoksen raaka-aineen

määrä vaihteli tietyllä välillä. Kaavoissa 18 ja 19 $V_{\text{mädätettävä}}$ vaihteli glyserolin ja rankin yhteenlasketun määrän mukaan alueella $0-(V_{\text{glyseroli}}+V_{\text{rankki}})$ ja toisessa laskennassa $V_{\text{mädätettävä}}$ pysyi vakiona (3700 m^3).

$$V_{\text{biokaasu}} = \text{biokaasukerroin} * V_{\text{mädätettävä}} \quad (18)$$

$$V_{\text{multa}} = \text{multakerroin} * V_{\text{mädätettävä}} \quad (19)$$

4.2.2. CHP-laitos

Laskennassa mitoitettiin aluksi CHP-laitos tunnetun sähköenergian tarpeen mukaan, jonka jälkeen laskettiin biodieselistä ja biokaasusta saatava teho. Laskettujen tehojen perusteella määritettiin biodiesel- ja biokaasumäärät, joilla CHP-laitoksen mitoitus voidaan toteuttaa. CHP-laitokseen liittyvässä laskennassa on käytetty esimerkkinä erään kylän vuotuista sähkökulutusta. Laskenta toteutettiin kolmella eri sähkökulutuksella. Käytetyt kulutukset olivat pelkästään asuintalojen sähkökulutukselle 3500 MWh, asuintalojen ja kunnan yhteenlasketulle sähkökulutukselle 4400 MWh sekä asuintalojen, kunnan, teollisuuden, yritysten ja maatalouden yhteenlasketulle sähkön kulutukselle 28900 MWh.

Sähkökulutuksien perusteella määritettiin, minkä tehoisella CHP-laitoksella kylän sähkökulutus voitaisiin kattaa. Laskennassa määritettiin CHP-laitoksen kokonaisteho, jolla sähkökulutus voidaan kattaa. Kokonaisteho tarkoittaa sähkön ja lämmön tuoton tehoa yhteensä. Laskennassa on oletettu, että CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde on 85 %. Kokonaishyötysuhteella tuotetusta tehosta käytetään jatkossa nimitystä teho ja sähköhyötysuhteella tuotetusta tehosta nimitystä sähköteho.

Laskenta toteutettiin laskemalla kahdella eri sähköntuoton hyötysuhteella, jotka olivat 35 % ja 45 %. Kokonaishyötysuhdetta käytetään myöhemmin laskettaessa biopolttoai-

neista saatavaa tehoa. CHP-laitoksen teho on laskettu kaavojen 20 ja 21 avulla. Kaavoissa $\eta_1=0,35$, $\eta_2=0,45$, $E_1=3500$ MWh, $E_2=4400$ MWh, $E_3=28900$ MWh ja $t=8760$ h (1 vuosi). Laskenta on suoritettu tarkemmilla E_1 , E_2 ja E_3 arvoilla.

$$P_{anto} = \frac{E_{1,2,3}}{t} \quad (20)$$

$$\eta_{1,2} = \frac{P_{anto}}{P_{otto}} \Rightarrow P_{otto} = \frac{P_{anto}}{\eta_{1,2}} \quad (21)$$

CHP-laitos käyttää polttoaineena biodieseliä ja biokaasua. Kappaleessa 4.2.1. laskettiin biodieselin ja biokaasun materiaalivirtoja. Biodieselin ja biokaasun vuodessa tuotettujen määrien perusteella laskettiin polttoaineiden sisältämä energia tiheyksien ja lämpöarvojen avulla. Laskennassa energia laskettiin biodieselin määrille 0-2500 m³ ja biokaasun määrille 0-324000 m³. Biopolttoaineiden sisältämät energiat on laskettu kaavoilla 22 ja 23. Kaavoissa $m_{biopolttoaine}$ on biodieselin ja -kaasun massa. $\rho_{biopolttoaine}$ on tiheys, joka biodieselille on 872 kg/m³ (taulukko 2, AFME) ja biokaasulle 1,2 kg/m³ (taulukko 7). $V_{biopolttoaine}$ on biopolttoaineen tilavuus, joka on biodieselille 0-2500 m³ ja biokaasulle 0-324000 m³. $E_{biopolttoaine}$ on biodieselille ja biokaasulle laskettu energia yksikössä MJ. $HV_{biopolttoaine}$ on biopolttoaineen lämpöarvo, joka biodieselille on 37,3 MJ/kg (taulukko 2, AFME) ja biokaasulle 20,2 MJ/kg (taulukko 7).

$$m_{biopolttoaine} = \rho_{biopolttoaine} * V_{biopolttoaine} \quad (22)$$

$$E_{biopolttoaine} = m_{biopolttoaine} * HV_{biopolttoaine} \quad (23)$$

Biodieselistä ja biokaasusta saatava teho voitiin laskea, kun polttoaineiden sisältämä energia, aika ja CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde tunnetaan. Lasketusta tehosta CHP-laitoksessa voidaan hyödyntää sen kokonaishyötysuhteen verran, jonka tässä oletetaan olevan 85 %. Lisäksi laskettiin myös teho pelkän sähkön tuottamiselle käyttäen sähköhyötysuhteita 35 % ja 45 %. Teho ja sähköteho on laskettu kaavojen 24 ja 25 osoittamalla tavalla. Kaavoissa $P_{\text{biopolttoaine}}$ on biodieselistä ja biokaasusta saatava teho. $E_{\text{biopolttoaine}}$ on edellä laskettu biodieselin ja biokaasun sisältämä energia. η_{CHP} on CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde. $P_{\text{sähkö,biopolttoaine}}$ on biodieselistä ja biokaasusta saatava sähköteho ja $\eta_{\text{sähkö,CHP}}$ on CHP-laitoksen hyötysuhde (35 % ja 45 %) sähkön tuottamiselle.

$$P_{\text{biopolttoaine}} = \left(\frac{E_{\text{biopolttoaine}}}{t} \right) * \eta_{\text{CHP}} \quad (24)$$

$$P_{\text{sähkö,biopolttoaine}} = P_{\text{biopolttoaine}} * \eta_{\text{sähkö,CHP}} \quad (25)$$

Kun laskettiin CHP-laitokselta vaadittava teho esimerkkikylän energiankulutuksen kattamiseksi ja biodieselistä ja biokaasusta saatava teho, voitiin etsiä millaisilla biodiesel- ja biokaasumäärillä tuo energiankulutus voidaan kattaa ja millainen on biopolttoaineista saatava teho tuolloin. Materiaalivirtalaskennasta saatiin biodieselin ja biokaasun tilavuudet välillä 0-2500 m³ ja 0-324000 m³ (Liitteet 1, 3 ja 7). CHP-laitokseen liittyvästä laskennasta saatiin biodieselistä ja biokaasusta saatavat tehot noilla tilavuuden vaihteluväleillä (Liite 7). Kun CHP-laitokselta vaadittava teho tiedettiin, voitiin liitteen 7 taulukkoja käyttäen hakea biodieselistä ja biokaasusta saatavat tehot ja tarvittavat biodieselin ja biokaasun tilavuudet, joilla CHP-laitokselta vaadittu teho voitiin kattaa.

5. TULOKSET

Tässä luvussa esitellään kappaleessa 4.2. esitetyn laskennan tuloksia. Materiaalivirtalaskennan tuloksena saatiin biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotantolaitoksille optimaaliset materiaalivirrat, joissa kaikki materiaalivirrat voidaan hyödyntää. CHP-laitoslaskennan tuloksena saatiin mitoitus kyläkokoluokan CHP-laitokselle sekä biodiesel- ja biokaasumäärät, joilla se voidaan toteuttaa. Materiaalivirtalaskennan tulokset esitellään kappaleessa 5.1. ja CHP-laitoslaskennan tulokset kappaleessa 5.2..

5.1. Optimaaliset materiaalivirrat

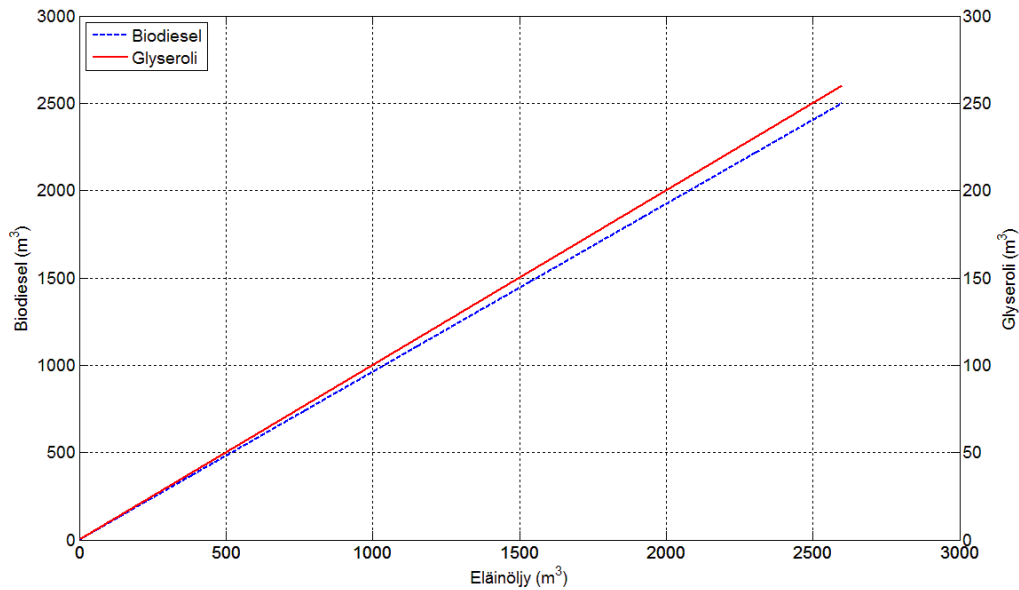
Laskennan tarkoituksena oli tutkia millaisia ovat biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotannon materiaalivirrat ja etsiä optimaalinen tilanne, jossa tuotetaan puhtaita biopolttoaineita ja kaikki sivutuotteet kyetään hyödyntämään. Tuloksena saatiin biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitosten materiaalivirrat, kun polttoaineita tuotetaan kyseisten laitosten kapasiteettien mukaan (yhteistuotantomalli1). Laskentaan liittyvät tulokset on esitetty kappaleessa 5.1.1.. Näin saatiin selville minkä kokoluokan biokaasulaitos tarvitaan käsittelemään biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitoksen sivuvirrat.

Tuloksena saatiin myös materiaalivirrat, kun biodieselin ja biokaasun tuotantolaitokset toimivat nykyisten kapasiteettiensa mukaan (yhteistuotantomalli 2). Tällöin saatiin mitoitettua uudelleen käytöstä poistettu bioetanolilaitos. Tähän laskentaan liittyvät tulokset on esitetty kappaleessa 5.1.2..

5.1.1. Biodiesel- ja bioetanolilaitokset toimivat kapasiteettiensa mukaan

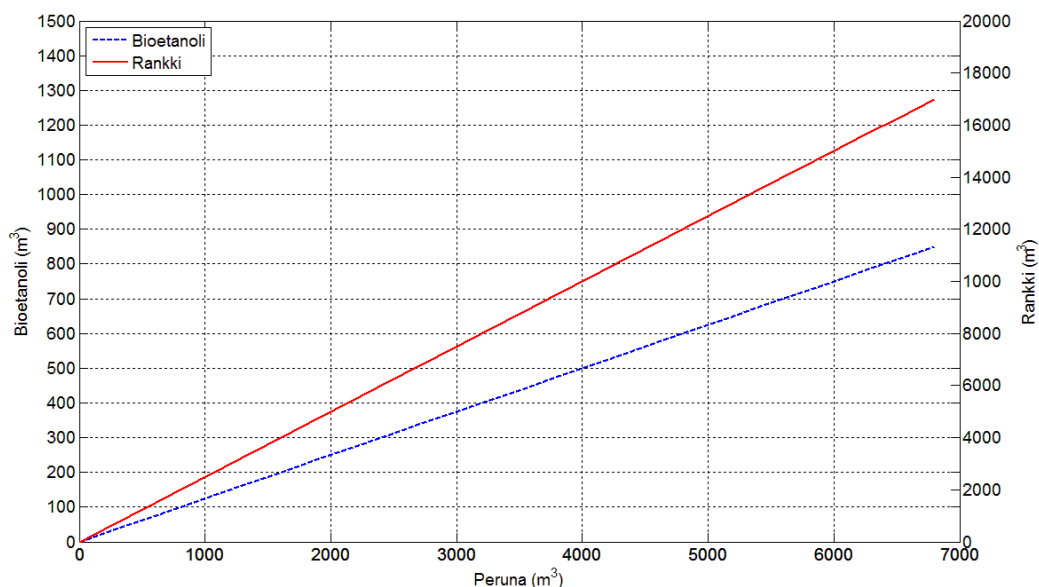
Eläinrasvaa raaka-aineena käyttävältä tuotantolaitokselta saadaan polttoaineena biodieseliiä ja sivutuotteena glyserolia. Kuvassa 6 on esitetty biodieselin ja glyserolin saanto raaka-aineen funktiona. Kuvassa katkoviivalla esitetty biodieselin määrä luetaan vasemmanpuoleisesta y-akselista ja yhtenäisellä viivalla piirretyn glyserolin määrä oikeanpuoleisesta y-akselista. Biodieselin tuotantolaitoksen toimiessa kapasiteettinsa mu-

kaan biodieseliä saadaan 2500 m^3 ja glyserolia 260 m^3 . Liitteessä 1 on esitetty tarkemmat arvot biodieselin tuotantolaitoksen materiaalivirroista, joiden mukaan kuva 6 on piirretty.



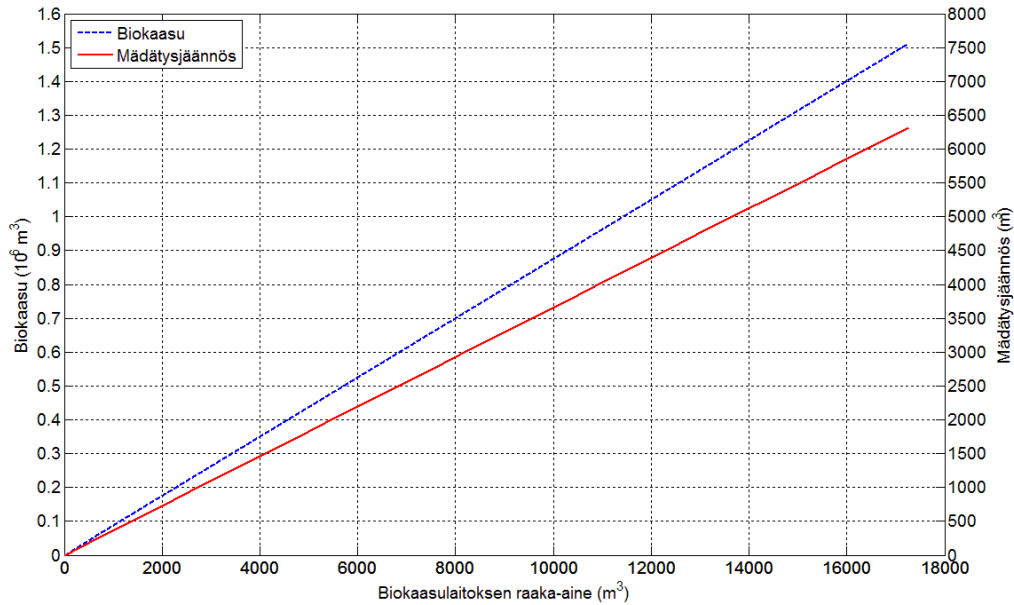
Kuva 6. Biodieselin ja glyserolin tuotanto eläinrasvan funktiona.

Perunaa raaka-aineena käyttävästä laitoksesta saadaan bioetanolin lisäksi sivutuotteena rankkia. Kuvassa 7 on esitetty bioetanolin ja rankin saanto raaka-aineen funktiona. Katkoviivalla esitetyn bioetanolin määrä on luettavissa vasemmanpuoleisesta y-akselista ja yhtenäisellä viivalla esitetyn rankin määrä oikeanpuoleisesta y-akselista. Kuvasta nähdään 850 m^3 bioetanolia tuottavan laitoksen materiaalivirrat. Tarkemmat arvot, joiden perusteella kuvaaja on piirretty, ovat liitteessä 2.



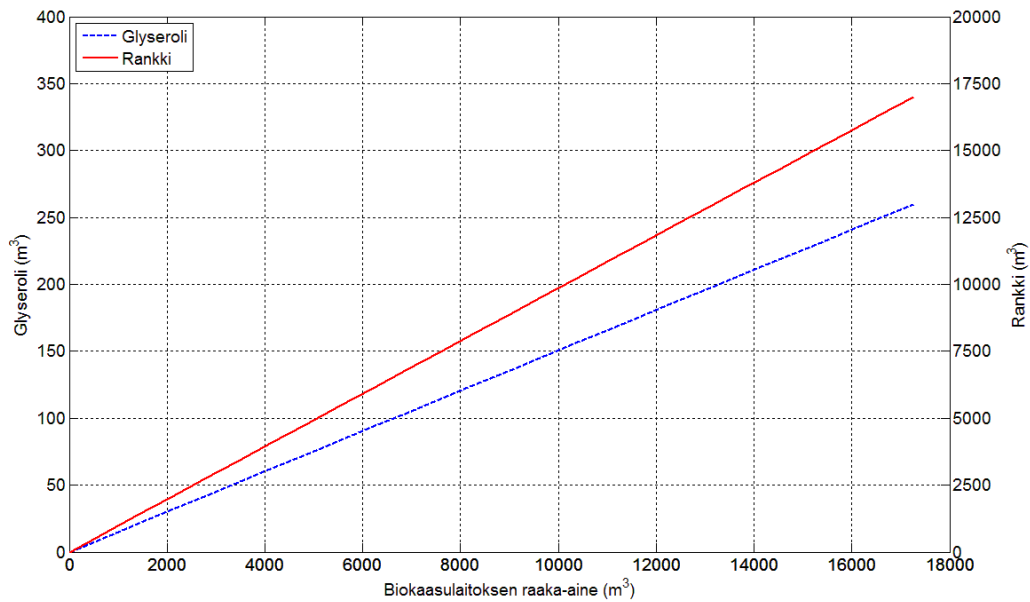
Kuva 7. Bioetanolin ja rankin tuotanto raaka-aineena käytettävän perunan funktiona.

Biokaasulaitos käyttää raaka-aineena biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitosten sivutuotteina muodostuvia glyserolia ja rankkia, joiden saanto on esitetty edellä kuvissa 6 ja 7. Päätuotteena saadaan biokaasua ja sivutuotteena mädätysjäännöstä. Kuvassa 8 on esitetty biokaasun ja mädätysjäännöksen saanto biokaasulaitoksen raaka-aineen (glyseroli+rankki) funktiona. Raaka-aineen määrä koostuu edellä esitettyjen kuvien 6 ja 7 glyserolin ja rankin saannoista. Kuvassa katkoviiivalla esitetyn biokaasun määrä luetaan vasemmanpuoleisesta y-akselista ja yhtenäisellä viivalla esitetty mädätysjäännös luetaan oikeanpuoleisesta y-akselista. Vasemmasta y-akselista luettavat biokaasumäärät ovat muodossa akselilta luettava arvo kerrottuna 10^6 :lla. Tässä biokaasulaitoksen raaka-aine muodostuu biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitosten kapasiteettien mukaan, jolloin todellisen biokaasulaitoksen kapasiteetti ylitetään. Biokaasulaitoksen kapasiteetin tulisi olla yli 17260 m^3 , jotta kaikki muodostuva glyseroli ja rankki kyettäisiin hyödyntämään biokaasun tuotannossa. Tällöin biokaasua muodostuu yli $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ja mädätysjäännöstä yli 6000 m^3 . Tarkemmat arvot, joiden perusteella kuvaaja on piirretty löytyvät liitteestä 3.



Kuva 8. Biokaasun ja mädätysjäännöksen tuotanto raaka-aineen (glyseroli+rankki) tilavuuden funktiona.

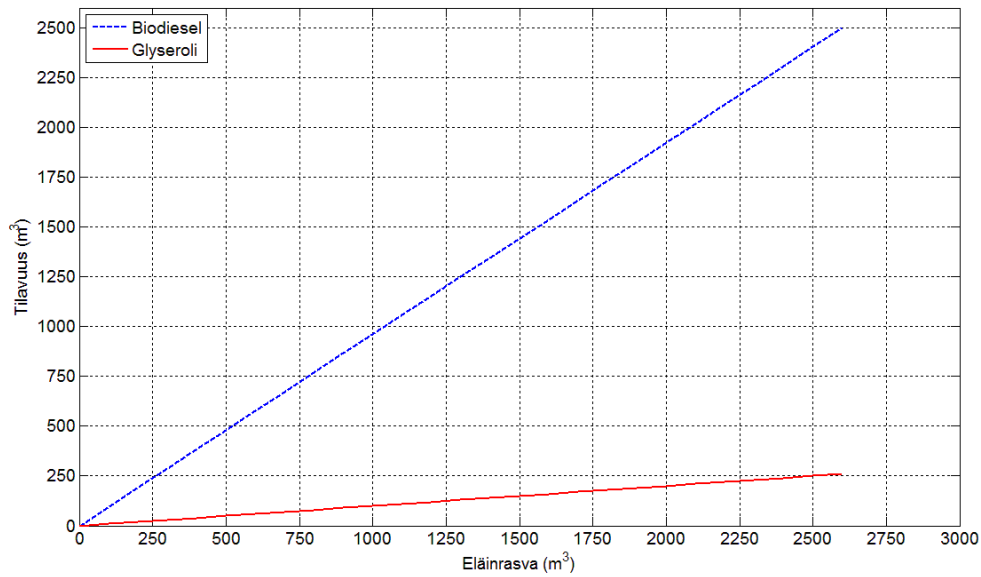
Biodieselin, bioetanolin ja biokaasun optimaalisessa tuotannossa kaikki materiaalivirrat voidaan hyödyntää. Tämän tilanteen saavuttamiseksi täytyy biodieselin ja bioetanolin tuotannossa muodostuvat sivutuotteet, glyseroli ja rankki hyödyntää biokaasun tuotannossa. Biokaasun tuotannon sivutuotteena muodostuva mädätysjäännös hyödynnetään lopulta maanparannusaineena. Kuvassa 9 on esitetty glyserolin ja rankin määrä biokaasulaitoksen raaka-aineen funktiona. Katkoviivalla esitetty glyserolin määrä luetaan vasemmasta y-akselista ja yhtenäisellä viivalla esitetty rankin määrä luetaan oikeasta y-akselista. X-akselilla on esitetty biokaasulaitoksen raaka-aineen määrä välillä 0-17260 m³, joka on kuvassa näkyvien glyserolin 0-260 m³ ja rankin 0-17000 m³ summa. Esimerkiksi, kun x-akselilta luetaan biokaasulaitoksen raaka-aineen määräksi 17260 m³, niin glyserolin määrä vasemmasta y-akselista luettuna on 260 m³ ja rankin määrä oikeasta y-akselista luettuna on 17000 m³.



Kuva 9. Glyserolin ja rankin osuudet biokaasulaitoksen raaka-aineessa.

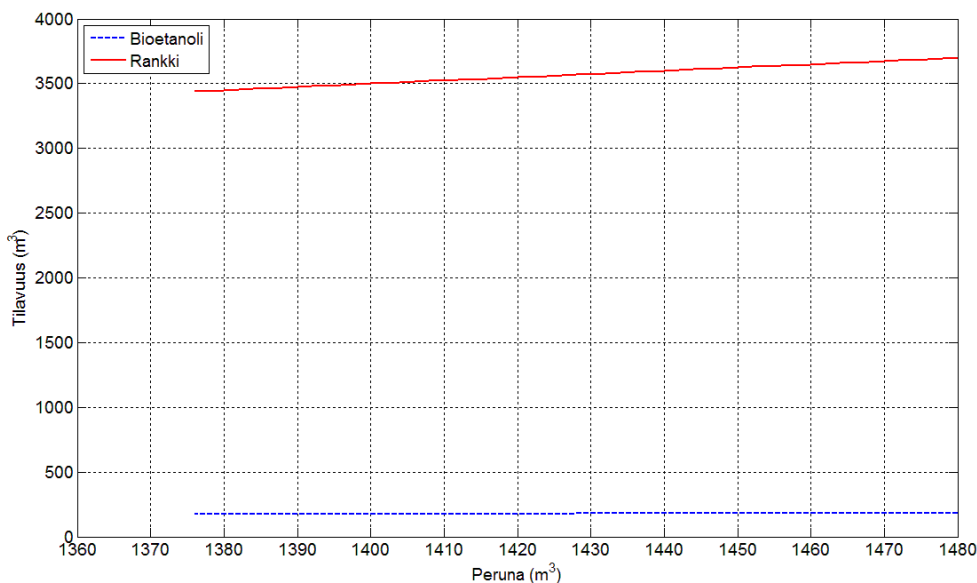
5.1.2. Biodiesel- ja biokaasulaitokset toimivat kapasiteettiensa mukaan

Laskennassa materiaalivirrat määritettiin myös niin, että biokaasulaitoksen todellista kapasiteettia ei ylitetä, jolloin tuloksena saatiin mitoitus bioetanolilaitokselle biodieselin tuotantolaitoksen toimiessa nykyisellä kapasiteetilla. Laskenta voitiin perustella sillä, että tarkasteltavista laitoksista bioetanolin tuotantolaitos ei ollut todellinen. Kuvassa 10 on esitetty biodieselin tuotantolaitoksen materiaalivirrat, josta nähdään biodieselin ja glyserolin saanto eri eläinrasvamäärillä. Laitoksen toimiessa kapasiteettinsa mukaan biodieseliä saadaan 2500 m³ ja glyserolia 260 m³. Eläinrasvan määrä tällöin on 2600 m³. Tämän toisen laskennan materiaalivirtojen tarkemmat arvot on esitetty biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotantolaitosten osalta liitteissä 4-6.



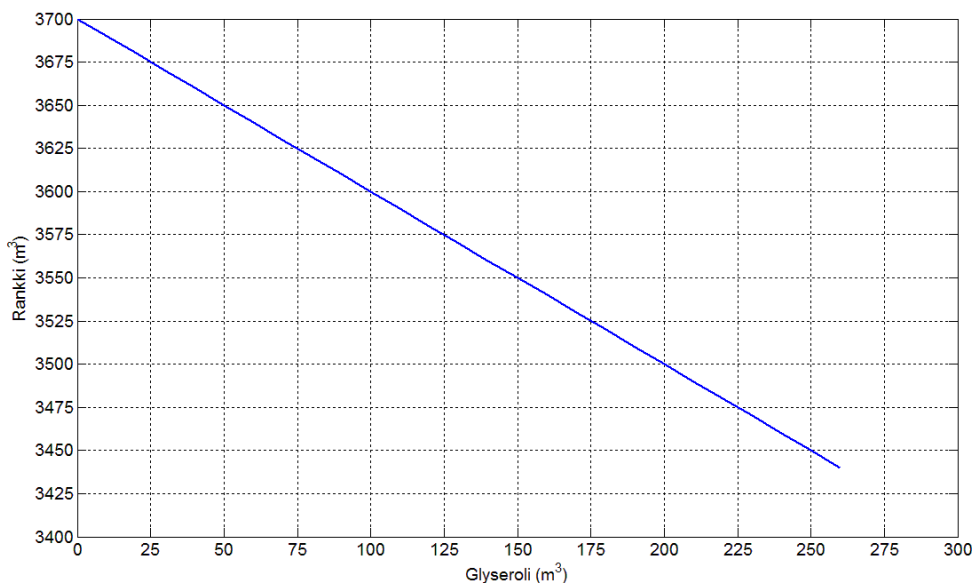
Kuva 10. Biodieselin ja glyserolin määrä eläinrasvan funktiona.

Kuvassa 11 on esitetty bioetanolin tuotantolaitoksen materiaalivirrat, kun biokaasulaitoksen kapasiteettia ei ylitetä. X-akselilta luetaan raaka-aineena käytettävän perunan määrä ja y-akselilta perunan funktiona muodostuvat bioetanolin ja rankin määrät. Biokaasulaitoksen toimiessa nykyisen kapasiteettinsa mukaan se pystyy käsittelemään raaka-ainetta 3700 m³. Tällöin rankin määrä saa vaihdella välillä 3440-3700 m³, kun kuvan 10 mukaan glyserolin määrä vaihtelee välillä 0-260 m³. Raaka-ainetta eli perunaa tarvitaan tällöin 1376-1480 m³, josta saadaan bioetanolia 172-185 m³. Liitteessä 5 on nähtävillä tarkemmat arvot.



Kuva 11. Bioetanolin ja rankin määrä raaka-aineena käytettävän perunan funktiona.

Kuvassa 12 on esitetty rankin määrä glyserolin määrän funktiona, kun biokaasulaitoksen raaka-aineen määrä pysyy vakiona. Kuvasta nähdään, kun rankin saanto vähenee ($3700\text{--}3440\text{ m}^3$), niin glyserolin saannon ($0\text{--}260\text{ m}^3$) on puolestaan kasvettava. Mikäli biodieselin tuotantolaitokselta saatavan glyserolin saanto on nolla, niin rankin saannon on tällöin oltava 3700 m^3 . Vastaavasti, kun glyserolin saanto on 260 m^3 , niin rankin saannon on oltava 3440 m^3 . Tällöin biokaasulaitoksen raaka-aineen määrä on vakio ja tuotantolaitos toimii kapasiteettinsa mukaan, kuten liitteestä 6 nähdään.



Kuva 12. Rankin määrä glyserolin määrän funktiona.

5.2. CHP-laitoksen mitoitus sähköntuotantoon

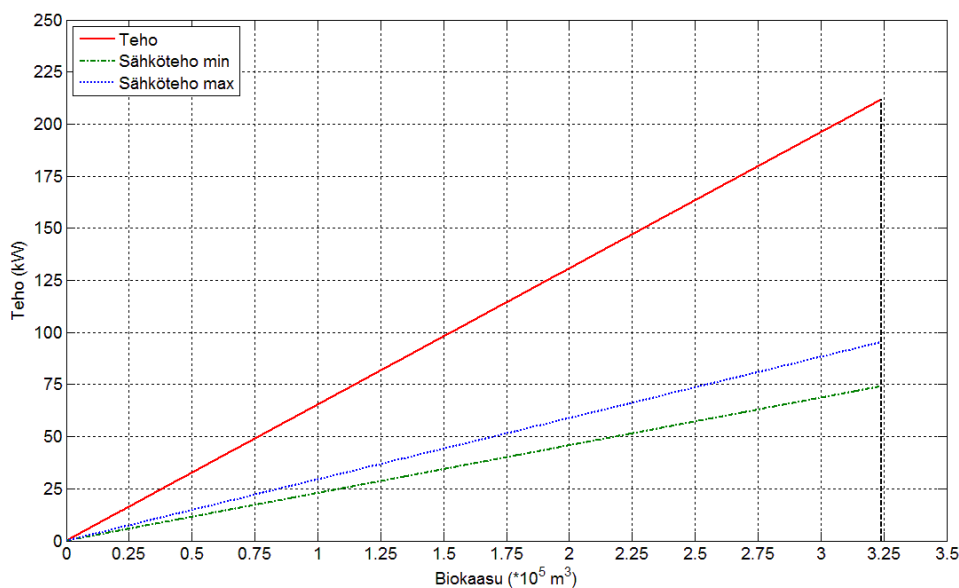
Laskennan tuloksena saatiin mitoitus esimerkkikylän sähkönkulutuksen kattavalle CHP-laitokselle. Ensimmäisessä laskennassa mitoitettiin CHP-laitos kattamaan pelkästään asuintalojen sähkönkulutus (3500 MWh). Kun sähköhyötysuhde oli 35 %, CHP-laitoksen kokonaistehon täytyisi olla vähintään 1,16 MW. Sähköhyötysuhteella 45 % CHP-laitoksen tehon tulisi olla vähintään 0,90 MW.

Toisessa laskennassa CHP-laitoksen kokonaisteho laskettiin asuintalojen ja kunnan kiinteistöjen sähkönkulutukselle (4400 MWh). Sähköhyötysuhteella 35 % CHP-laitoksen kokonaistehon tulisi olla vähintään 1,44 MW ja 45 %:n sähköhyötysuhteella vähintään 1,12 MW.

Kolmannessa laskennassa CHP-laitoksen kokonaisteho laskettiin asuintalojen, kunnan kiinteistöjen, teollisuuden, yritysten ja maatalouden sähkönkulutuksille (28900 MWh). Sähköhyötysuhteella 35 % CHP-laitoksen kokonaistehon tulisi olla vähintään 9,43 MW ja 45 %:n sähköhyötysuhteella tehon tulisi olla vähintään 7,33 MW.

Tuloksena saatiin myös eri biodieselmääristä saatava teho, kun biodieselin tilavuus vaihteli välillä 0-2500 m³, ja eri biokaasumääristä saatava teho, kun biokaasun tilavuus vaihteli välillä 0-324000 m³. Biopolttoaineesta saatava teho tarkoittaa sitä kokonaistehoa, joka CHP-laitoksesta saadaan, kun biopolttoaine käytetään laitoksen polttoaineena. Teho laskettiin CHP-laitoksen kokonaishyötysuhteella 85 %. Liitteessä 7 on nähtävissä eri biodieselin ja biokaasun määristä saatavat tehot ja liitteessä 8 on nähtävissä sähkötehot, kun ne käytetään polttoaineena CHP-laitoksessa.

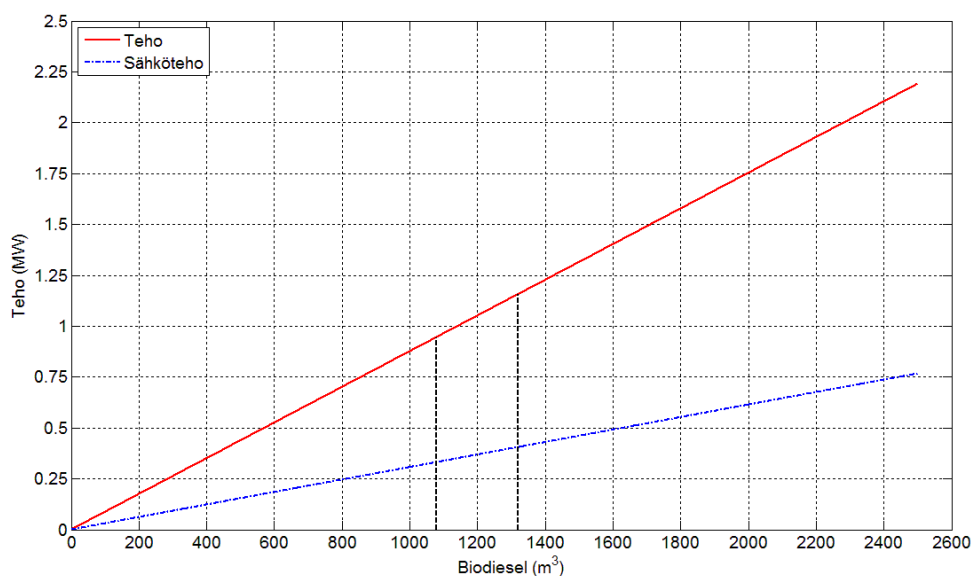
Kuvassa 13 on esitetty biokaasusta saatava teho ja sähkötehot eri sähköhyötysuhteilla. Yhtenäinen viiva kuvaa biokaasusta saatavaa tehoa joka vaihteli tilavuuksilla 0-324000 m³ välillä 0-210 kW (kokonaishyötysuhde 85 %). Katkoviiva kuvaa sähkötehoa (0-74 kW) eri kaasumäärillä, kun sähköhyötysuhde on 35 %. Pisteiviiva kuvaa sähkötehoa (0-95 kW) sähköhyötysuhteella 45 %. Oikeassa reunassa oleva pystykatkoviiva kuvaa kuinka paljon biokaasua (0-210 kW) tarvitaan lasketuissa CHP-laitosmalleissa.



Kuva 13. Biokaasusta saatava kokonaisteho ja sähköteho sähköhyötysuhteilla 35 % ja 45 %.

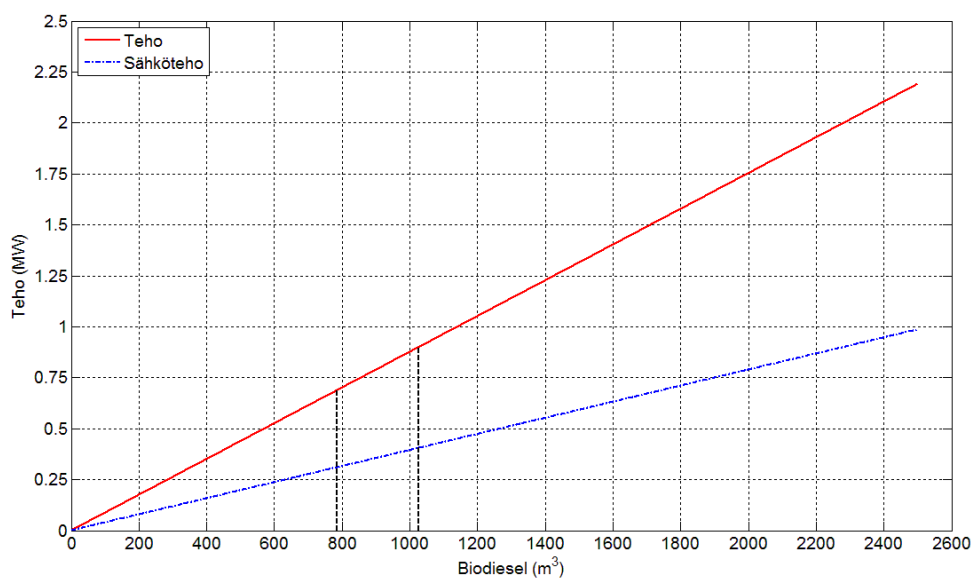
Tuotettu biokaasu ei riitä yksinään polttoaineeksi lasketuissa CHP-laitoksissa. Kuvissa 14-17 on esitetty biodieselin määrät ja niistä saatavat tehot, joilla CHP-laitosmallien teho voidaan toteuttaa, kun edellä esitetty biokaasun tilavuuden vaihteluväli oli 0-324000 m³ ja tehon vaihteluväli oli 0-210 kW.

Kuvassa 14 on esitetty asuintalojen energian tuottamiseen soveltuva 1,16 MW (≈ 1,2 MW) 85 %:n kokonaishyötysuhteella ja 35 %:n sähköhyötysuhteella toimivan CHP-laitoksen toteuttamiseksi tarvittava määrä biodieseliä ja siitä saatava teho. Yhtenäisellä viivalla on esitetty biodieselistä saatava teho kokonaishyötysuhteella 85 % ja katkoviivalla biodieselistä saatava sähköteho sähköhyötysuhteella 35 %. Biodieselin määrä vaihtelee välillä 0-2500 m³. Oikeanpuoleinen pystykatkoviiva osoittaa tarvittavan biodieselmäärän, kun biokaasua ei käytetä lainkaan. Tällöin biodieseliä käytetään 1319 m³, ja siitä saadaan tehoa 1,16 MW. Vasemmanpuoleinen pystykatkoviiva osoittaa tarvittavan biodieselmäärän, kun biokaasua käytetään 324000 m³. Tällöin biodieseliä käytetään 1078 m³, ja siitä saadaan tehoa 0,94 MW. Tällöin biokaasulla täytyy tuottaa 210 kW. Kun biokaasua on vähemmän käytettävissä, tarvitaan biodieseliä enemmän.



Kuva 14. Biodieselmäärät ja tehot, joilla 1,16 MW CHP-laitos voidaan toteuttaa (kokonaishyötysuhde 85 %, sähköhyötysuhde 35 %).

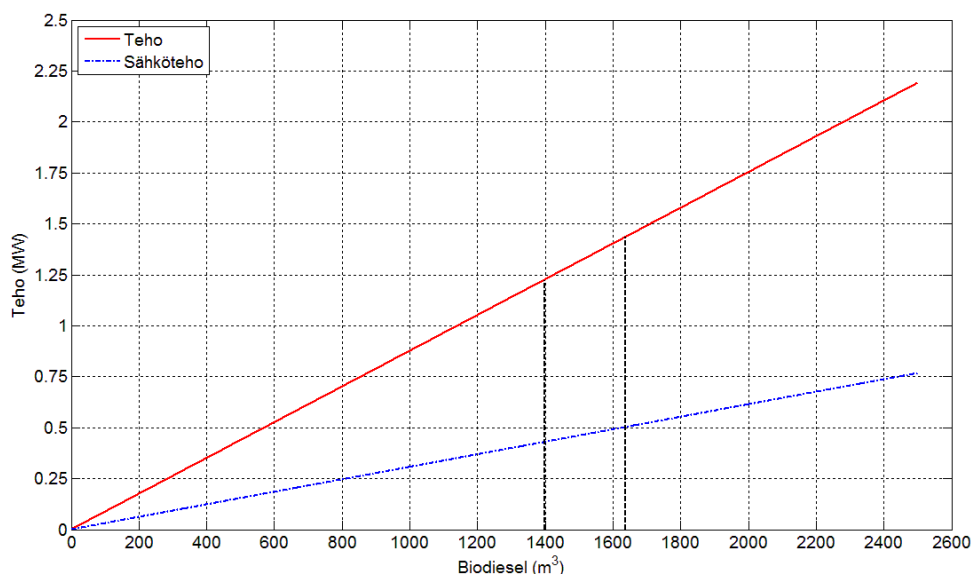
Kuvassa 15 on esitetty asuintalojen energian tuottamiseen soveltuva 0,90 MW ($\approx 0,9$ MW) (kokonaishyötysuhde 85 %) CHP-laitos, joka toimii sähköhyötysuhteella 45 %, ja sen toteuttamiseksi tarvittava biodieselmäärä ja siitä saatava teho. Kuvassa yhtenäisellä viivalla on esitetty biodieselistä saatava teho kokonaishyötysuhteella 85 % ja katkoviivalla biodieselistä saatava sähköteho biodieselmäärän vaihdelta välillä 0-2500 m³. Kuvassa pystyssä olevilla katkoviivoilla on rajattu alue, jolla CHP-laitokselta vaadittu teho voidaan toteuttaa. Biodieselistä täytyy saada tehoa 0,69-0,90 MW, kun biokaasusta saadaan tehoa 0-210 kW. Biodieseliä tarvitaan tällöin 785-1026 m³ ja biokaasua 0-324000 m³. Mitä vähemmän biokaasua käytetään, sitä enemmän biodieseliä tarvitaan.



Kuva 15. Biodieselmäärät ja tehot, joilla 0,90 MW CHP-laitos voidaan toteuttaa (kokonaishyötysuhde 85 %, sähköhyötysuhde 45 %).

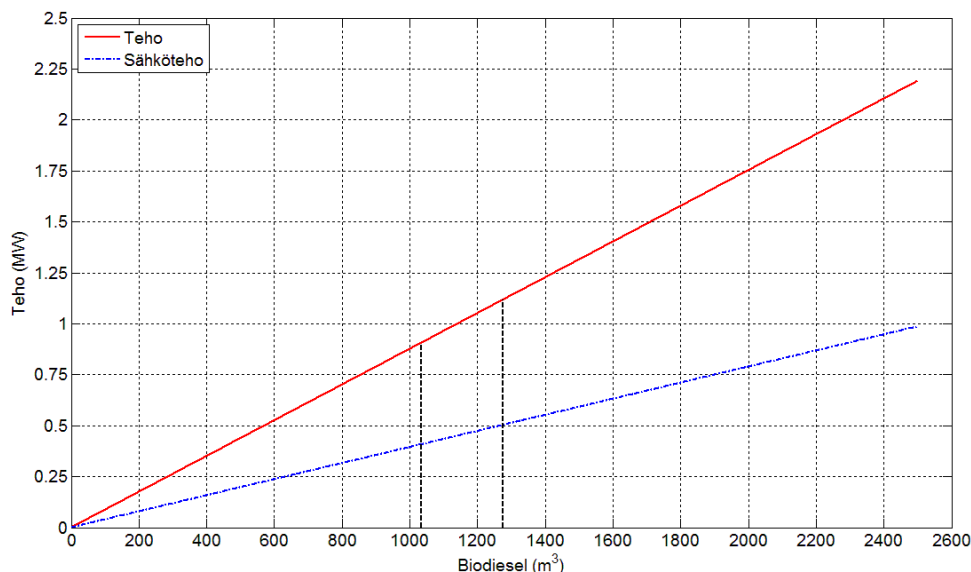
Kuvassa 16 on esitetty asuintalojen ja kunnan kiinteistöjen energiankulutuksen kattamiseksi soveltuva teholtaan 1,44 MW ($\approx 1,4$ MW) (kokonaishyötysuhde 85 %) CHP-laitos, jonka sähköhyötysuhde on 35 %. Kuvassa yhtenäisellä viivalla on esitetty biodieselistä saatava teho kokonaishyötysuhteella 85 % ja katkoviivalla sähköteho biodieselin

määrän vaihdella välillä 0-2500 m³. Kuvasta nähdään, että biokaasun tehon vaihdella välillä 0-210 kW täytyy biodieselillä tuottaa tehoa 1,22-1,44 MW. Tämä teho voidaan tuottaa 1397-1638 m³:lla biodieselillä. Biodieselin määrän ja siitä saatavan tehon vaihteluväli on piirretty kuvaan pystysuoralla katkoviivalla. Biodieselillä tarvitaan sitä enemmän, mitä vähemmän biokaasua on tarjolla.



Kuva 16. Biodieselmäärät ja -tehot, joilla 1,44 MW CHP-laitos voidaan toteuttaa (kokonaishyötysuhde 85 %, sähköhyötysuhde 35 %).

Kuvassa 17 on esitetty asuintalojen ja kunnan kiinteistöjen energian tuottamiseksi soveltuva 1,12 MW ($\approx 1,1$ MW) (kokonaishyötysuhde 85 %) CHP-laitos, jonka sähköhyötysuhde on 45 %. Kuvassa yhtenäisellä viivalla on piirretty biodieselistä saatava teho kokonaishyötysuhteella 85 % ja sähköteho, kun biodieselin määrän vaihteluväli on 0-2500 m³. Kuvasta nähdään, että tämä teho voidaan tuottaa 1033-1274 m³:lla biodieselillä, kun biokaasun määrä vaihtelee välillä 0-324000 m³. Biodieselistä saatava teho vaihtelee tuolloin välillä 0,90-1,12 MW ja biokaasusta saatava teho välillä 0-210 kW. Biodieselin määrän ja siitä saatavan tehon vaihteluväli on piirretty kuvaan pystysuoralla katkoviivalla. Mitä enemmän biokaasua on tarjolla, sitä vähemmän biodieselillä tarvitaan.

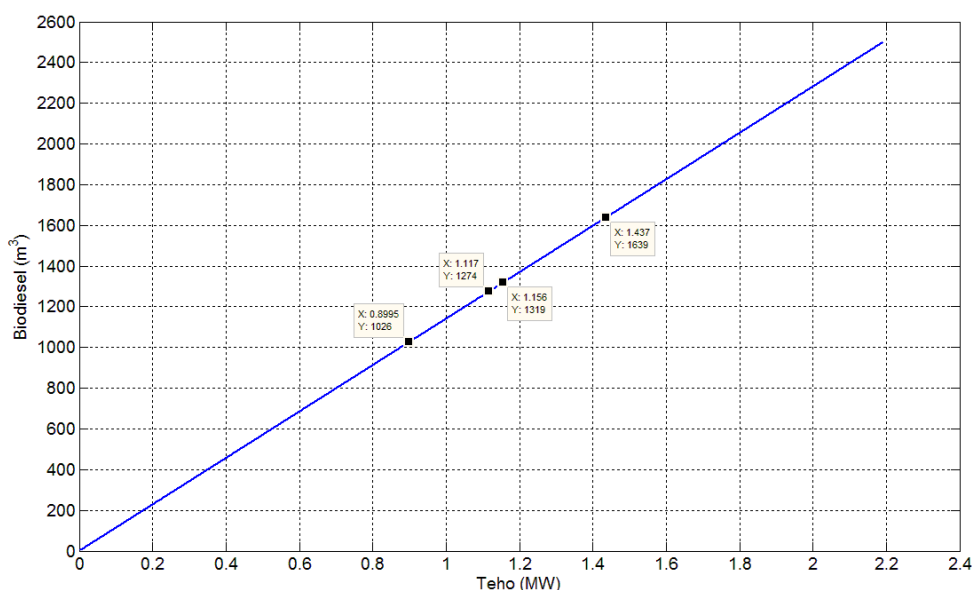


Kuva 17. 1,12 MW CHP-laitoksen biodieselmäärä ja -teho (kokonaishyötysuhde 85 %, sähköhyötysuhde 45 %).

Asuintalojen, kunnan, teollisuuden, yritysten ja maatalouden sähköenergian tarpeen kattamiseksi CHP-laitoksen tulisi olla kokoluokaltaan noin 9,43 MW ($\approx 9,4$ MW) (kokonaishyötysuhde 85 %) sähköhyötysuhteella 35 %, ja noin 7,33 MW ($\approx 7,3$ MW) (kokonaishyötysuhde 85 %) sähköhyötysuhteella 45 %. Tässä diplomityössä tarkasteltavien biodieselin ja biokaasun tuotantolaitosten kapasiteetti ei riitä tuottamaan polttoainetta tuonkokoisiin CHP-laitoksiin. Näillä tehoilla CHP-laitokset luokitellaan suuren kokoluokan laitoksiksi, jonka alaraja on noin 2 MW. Tässä työssä oli tarkoitus optimoida pienen kokoluokan CHP-laitos. Biodieselistä ja biokaasusta saatavat tehot ja sähkötehot eri polttoainemäärillä on esitetty taulukkomuodossa liitteissä 7 ja 8. Liitteistä nähdään kuvaajia vastaavat arvot tarkemmin.

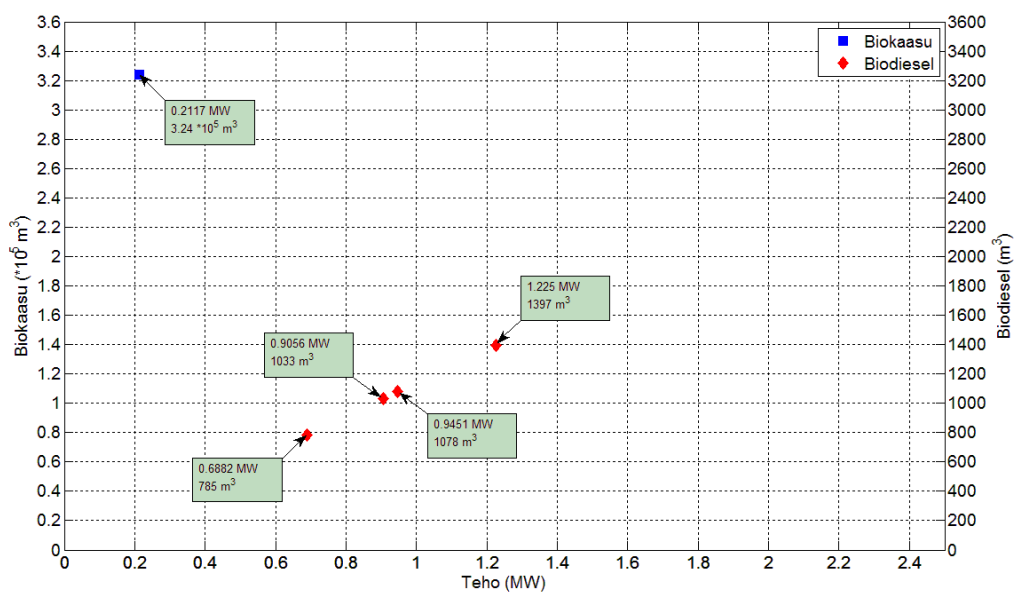
Kuvissa 18 ja 19 on nähtävissä yhteenveto biodieselistä ja biokaasusta saatavasta tehosta eri CHP-laitosmalleissa. Kuva 18 esittää CHP-laitoksia, jotka toimivat ainoastaan biodieselillä ja kuva 19 esittää sekä biodieselillä että biokaasulla toimivaa CHP-laitosta. Kuvassa 18 on esitetty biodieselistä saatava teho eri polttoainemäärillä. Kuvaajaan on piirretty neljä pistettä, jotka esittävät CHP-laitoksen tehoja ja millä biodieselmäärillä ne

on toteutettu. Kuvassa on esitetty sähköhyötysuhteella 35 % toimivat 1,16 MW ja 1,44 MW sekä 45 % sähköhyötysuhteella toimivat 0,90 MW ja 1,12 MW CHP-laitokset.



Kuva 18. Biodieseliä polttoaineena käyttävät CHP-laitokset.

Kuvassa 19 on esitetty viisi pistettä. Laatikkokuviolla on esitetty biokaasusta ja salmiakkikuviolla biodieselistä tarvittavat tehot ja polttoainemäärät eri CHP-kokoluokissa. Biodieselin määrää ja tehoa kuvaavat neljä salmiakkikuviollista pistettä, jotka esittävät biodieselistä saatavia tehoja, kun kaikki biokaasu käytetään polttoaineena CHP-laitoksessa. Kun kaikki biokaasu käytetään CHP-laitoksessa polttoaineena, niin sähköhyötysuhteella 35 % toimivat 1,16 MW ja 1,44 MW CHP-laitokset käyttävät biodieseliä 1078 m³ ja 1397 m³ ja niistä saadaan tehoa 0,94 MW ja 1,22 MW. Vastaavasti sähköhyötysuhteella 45 % toimivat 0,90 MW ja 1,12 MW CHP-laitokset käyttävät biodieseliä 785 m³ ja 1033 m³ ja niistä saadaan tehoa 0,69 MW ja 0,90 MW. Kaikissa näissä tapauksissa biokaasua käytetään 324000 m³ ja siitä saada tehoa 0,21 MW.



Kuva 19. Biodieseliä ja biokaasua käyttävät teholtaan 0,90 MW, 1,16 MW, 1,12 MW ja 1,44 MW CHP-laitokset. Esimerkiksi 1,44 MW CHP-laitos käyttää biodieseliä 1,225 MW (1397 m^3) ja biokaasua 0,2117 MW (324000 m^3).

6. POHDINTA

Tämä diplomityö perustuu biopolttoaineiden tuotannon osalta oletukseen, että biodieseliä, bioetanolia ja biokaasua voidaan tuottaa kaikki sivutuotteet hyödyntäen. Optimaalisen tuotannon löytämiseksi käytettiin matemaattista laskentaa, jolla voitiin laskea eri biodiesel-, bioetanoli- ja biokaasumäärien tuottamiseen tarvittavat raaka-ainemäärät ja muodostuvat sivutuotemäärät. Laskennassa oli tarkoitus käyttää todellisilta biopolttoaineiden tuotantolaitoksilta saatuja tuotantotietoja. Tiedot saatiin sekä biodieselin ja biokaasun tuotantolaitoksilta. Bioetanolin tuottamiseen sopivaa tuotantolaitosta ei tämän diplomityön aikataulun kannalta tavoitettu. Tutkimuksessa oli tarkoitus käyttää tunnettua bioetanolin tuotantolaitosta, joka oli lopettanut toimintansa. Lopulta päädyttiin kuitenkin käyttämään kyseisen laitoksen bioetanolin tuotantokapasiteettia.

Matemaattisessa laskennassa oletettiin, että tuotantoprosessista saatavat biopolttoaineiden ja sivutuotteiden määrät riippuvat suoraan siitä, kuinka paljon raaka-ainetta on saatavilla. Tarkastelun kohteena oli sivutuotteiden hyödyntäminen, joten laskennassa tarkasteltiin missä suhteessa biopolttoaineita ja raaka-aineita tarvitaan saataviin sivutuotteisiin nähden. Tutkimuksen kannalta oleellista oli tarkastella, millaisia materiaalivirrat tarkasteltavissa tuotantolaitoksissa olivat. Tarkkojen materiaalivirtojen määrittäminen vaatisi teoreettista laskentaa kemiallisia reaktioyhtälöitä käyttäen ja kokeellista tutkimusta laboratorio-olosuhteissa.

Laskennassa jouduttiin tekemään myös joitain oletuksia. Esimerkiksi oletettiin, että biodieselin tuotantolaitoksen sivutuotteena muodostuva raaka-glyseroli on puhdasta glyserolia. Tästä syystä laskennassa voitiin käyttää glyserolin tiheyttä. Teoriaosuudessa esitetyn tiedon mukaan raaka-glyserolia muodostuu 16-18 % raaka-aineen massasta ja tässä diplomityössä käytetyn biodieselin tuotantolaitoksen prosessissa yhden panoksen valmistamisessa glyserolia muodostuu 14 %. Materiaalivirtalaskennassa glyserolia muodostui reilu 14 % raaka-aineen massasta, kun oletetaan raaka-glyserolin olevan puhdasta glyserolia. Todellisuudessa raaka-glyseroli sisältää jäämiä muun muassa katalyyttistä ja alkoholista. Laskennassa oletettiin myös eläinrasvan tiheyden olevan sama kuin eläinrasvasta valmistetulla biodieselillä.

Bioetanolin kohdalla oletettiin raaka-aineeksi perunajäte. Kirjallisuudesta saatiin lukuarvo, siitä kuinka paljon perunaa kilogrammoina tarvitaan tuottamaan 1 m³ bioetanolia. Perunamäärän laskemisessa tarvittiin tiheyttä, joka määritettiin kokeellisesti, koska luotettavaa lukuarvoa ei ollut saatavilla. Kirjallisuudesta saadun tiedon perusteella oletettiin, että rankkia muodostuu 20 l tuotettua bioetanolilitraa kohden eli suhteessa 20:1. Todellisuudessa muun muassa käytetty raaka-aine vaikuttaa rankin muodostumiseen.

Biokaasulaitos, jonka tuotantotietoja tässä työssä käytettiin, hyödyntää prosessissaan raaka-aineena jätevesilietettä, biojätettä, mallaslietettä ja viljan lajittelujätettä. Laskennassa käytetyn biokaasulaitoksen raaka-aine koostuu kuitenkin glyserolista ja rankista. Oletuksena oli, että glyseroli ja rankki voidaan mädättää yhdessä. Materiaalivirtalaskennassa on oletettu, että biokaasua ja multaa muodostuu suhteessa raaka-aineeseen. Biokaasun muodostukseen vaikuttaa todellisuudessa käytetty raaka-aine. Todellisen biokaasulaitoksen raaka-aineista ja laskennassa käytetyistä raaka-aineista saatetaan saada toisistaan eroavat biokaasumäärät. Teoriaosuudessa esitetyn tiedon mukaan rankki ja glyseroli sisältävät orgaanista ainesta ja soveltuvat hyvin lisäsyötteenä biokaasulaitokselle. Glyserolin ja rankin yhteismädätys vaatisi tarkempia teoreettisia laskelmia ja kokeellista tutkimusta niistä saatavan biokaasumäärän selvittämiseksi. Tässä työssä pyrittiin selvittämään kuinka paljon biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitoksissa muodostuu glyserolia ja rankkia ja ovatko niiden määrät mädätyksen kannalta sopivia. Lisäksi arvioitiin kuinka paljon niistä voidaan saada biokaasua sekä mädätysjännöstä.

Materiaalivirratt olisi voitu laskea myös massayksikössä, jolloin tilavuudeksi muuttamiselta ja siihen liittyviltä oletuksilta olisi vältytty. Laskenta suoritettiin kuitenkin tilavuusyksikössä, koska esimerkiksi biokaasulaitoksen tuotantotiedot esimerkiksi raaka-aineen vastaanottokapasiteetin osalta oli käytettävissä ainoastaan tilavuuksina.

Materiaalivirtojen laskennassa käytettiin biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotantolaitosten kapasiteetteja, koska ainoastaan biokaasuntuotantolaitokselta saatiin kapasiteettien lisäksi vuoden 2012 tuotantotiedot. Todellisessa tilanteessa biopolttoaineita oletettavasti tuotetaan alle kapasiteettiensa. Esimerkiksi biokaasun osalta materiaalivirtojen laskennassa käytettiin biokaasuntuotannolle lukua 324000 m³. Vuonna 2012 kuitenkin

tuotettiin biokaasua noin 175000 m³. Laskennassa olisi voitu tehdä oletuksia kapasiteetteja pienemmästä tuotannosta. Ihannetilanteessa kaikilta tutkittavilta biopolttoainelaitoksilta olisi saatu esimerkiksi jonkin menneen vuoden tuotantotiedot. Ihannetilanteessa myös kaikki tarkasteltavat tuotantolaitokset olisivat olleet toiminnassa olevia laitoksia. Materiaalivirtalaskennassa saadut tulokset ovat lisäksi sovellettavissa vain käytettyjä raaka-aineita ja tuotantotietoja käytettäessä.

Tässä työssä käytetty biokaasulaitos on myös melko pieni. Laskennassa olisi mahdollisesti voitu käyttää myös suurempaa biokaasulaitosta, joka kykenisi käyttämään biokaasun ja bioetanolin tuotantolaitoksilla muodostuvat sivutuotemäärät. Toisaalta ennen tämän työn aloittamista ei tiedetty muodostuvien sivutuotteiden määriä.

CHP-laitokseen liittyvässä laskennassa oletettiin laitoksen hyötysuhteeksi 85 %, joka oletettavasti on realistisempi luku kuin kirjallisuudesta saatu maksimihyötysuhde 95 %. Laskennassa olisi voitu käyttää muutakin hyötysuhdetta. Sähköhyötysuhteen oletettiin vaihtelevan välillä 35-45 %, mikä aiheuttaa melko suuren vaihteluvälin CHP-laitoksen teholumemiin. CHP-laitoksen kohdalla myös oletettiin, että laitosta voidaan ajaa kahdella eri polttoaineella, biodieselillä ja biokaasulla. Eri lähteiden mukaan CHP-laitosten sähköhyötysuhde vaihteli jopa välillä 25-50 %. Nykytekniikalla pystytään saavuttamaan paljon suurempi sähköhyötysuhde kuin 25 %. Laskennassa päädyttiin käyttämään sähköhyötysuhteen vaihteluväliä 35-45 %, jotta tulokset olisivat realistisia. Laskennan tuloksena saadut mitoitetut eri sähkönkulutuksen kattaville CHP-laitoksille ovat suuntaa-antavia. Kaupalliset CHP-laitokset saattavat olla kokoluokaltaan erilaisia kuin laskennassa mitoitetut. Saadut mitoitetut CHP-laitokselle ja tarvittavat biopolttoainemäärät ovat vähimmäisarvoja, joilla esimerkkinä käytetyn kylän sähkönkulutus voidaan katata. Todelliset luvut täytyisi luultavasti olla laskettuja arvoja suuremmat, jotta energian tuotanto varmasti kyetään turvaamaan.

Työssä myös oletettiin, että kaikki muodostuva biokaasu voidaan käyttää CHP-laitoksessa polttoaineena. Biokaasun puhdistamisen vaikutusta ei ole huomioitu. Jos esimerkiksi lasketuista biokaasumääristä poistetaan muun muassa hiilidioksidi ja kaasu puhdistetaan vastaamaan lähes puhdasta metaania, on polttoaineeksi käytettävä biokaasu

sumäärä mahdollisesti laskettua pienempi. Tällöin biodieseliä tarvittaisiin CHP-laitoksen polttoaineeksi laskettua enemmän.

Taloudellista näkökulmaa ei voi tämän laskennan tuloksia tarkastellessa jättää huomioida. Tässä diplomityössä keskityttiin tarkastelemaan biopolttoaineiden tuotannossa liikkuvia materiaalivirtoja siten, että kaikki materiaalivirrat voidaan hyödyntää. Tästä syystä optimointia ei tässä suoritettu aivan siinä matemaattisessa merkityksessä kuin se yleisesti ymmärretään. Biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuottamisella on jokin hinta. Laskenta olisikin voitu toteuttaa ottamalla huomioon, mitä eri biopolttoaineiden tuottaminen maksaa ja optimoida tilanne siten, että tuotetaan sitä biopolttoainetta eniten, jonka tuottaminen on tietynä hetkenä edullisinta. Tässä työssä optimoidussa hybridituotantojärjestelmässä kaikkien kolmen tuotantolaitosten ei välttämättä tarvitse sijaita toistensa välittömässä läheisyydessä. Etäisyydet, joilta glyserolia ja rankkia kannattaa taloudellisesti kuljettaa mädätettäväksi biokaasulaitokselle, vaatisivat myös lisälaskelmia.

CHP-laitoksen optimoinnin kohdallakin taloudellisella näkökulmalla on merkitystä. Energiaa kannattaa tuottaa sillä polttoaineella, mikä on edullisinta tietynä hetkenä. CHP-laitokseen liittyy myös investointikustannuksia. Tässä työssä on tarkasteltu ainoastaan minkä tehoisella CHP-laitoksella ja millaisilla biopolttoainemäärillä esimerkkikylän sähköenergiatarve voidaan kattaa. CHP-laitoksen taloudellinen toteutettavuus vaatisi lisälaskelmia.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tarkoituksena oli optimoida biodieselin, bioetanolin ja biokaasun yhteistuotantomalli, jolla tuotetaan biopolttoaineita ja kaikki materiaalivirrat voidaan hyödyntää. Mallin luomiseksi tavoitteena oli tutkia ovatko biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitoksilta saatavat glyserolin ja rankin määrät ylipäättään niin suuria, että ne voitaisiin käyttää biokaasulaitoksen raaka-aineena. Tarkoituksena oli myös optimoida kahdella biopolttoaineella toimiva CHP-laitos sähköntuotantoon.

Tuloksena saatiin kolmen eri biopolttoainetta tuottavan laitoksen materiaalivirrat eri tuotantomäärillä ja luotiin kaksi erilaista yhteistuotantomallia. Ensimmäisessä mallissa laskettiin biopolttoaineita tuottavien laitosten materiaalivirrat, kun biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitokset toimivat kapasiteettiensa mukaan. Tässä tapauksessa glyserolia ja rankkia muodostui enemmän kuin biokaasulaitoksessa kapasiteettinsa puolesta kyetään vuodessa mädättämään. Biokaasulaitoksen pitäisi tällöin olla huomattavasti suurempi optimitilanteen saavuttamiseksi. Toisessa mallissa materiaalivirrat laskettiin biokaasulaitoksen kapasiteetin mukaan. Koska bioetanolilaitos ei ollut toiminnassa oleva laitos, tuotantolaitos päätettiin mitoittaa uudelleen. Biodieselin tuotantolaitos toimi samalla kapasiteetilla kuin ensimmäisessä mallissa

Kaikkien näiden tuotantolaitosten toimiessa nykyisillä kapasiteeteillaan ei optimitilannetta saavuteta, eli kaikkia biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitosten sivutuotteita ei kyetä hyödyntämään biokaasun tuotannossa. Tällöin sivutuotteille olisi löydettävä muita hyödyntämiskeinoja tai biokaasulaitoksen kapasiteettia olisi kasvatettava. Sivutuotteita kuitenkin muodostuu niin paljon, että biodieselin, bioetanolin ja biokaasun yhteistuotanto on perusteltua. Uudelleen mitoitettuna bioetanolilaitoksen ja nykyisen biodieselin tuotantolaitoksen sivutuotteet pystyttäisiin käsittelemään biokaasulaitoksen toimiessa nykyisellä kapasiteetilla.

Materiaalivirtoihin liittyvät laskennat ovat melko karkeita. Se riittää tässä tapauksessa, kun halutaan tutkia millaisia materiaalivirrat ylipäättään näiden tuotantolaitosten kesken

ovat ja ovatko muodostuvien sivutuotteiden määrät yhteistuotantomallin kannalta järkeviä.

CHP-laitoslaskenta osoittaa, että biodiesel- ja biokaasulaitoksilta saatavat polttoainemäärät ovat niin suuria, että niitä voitaisiin käyttää polttoaineena CHP-laitoksessa, jolla tuotetaan sähköä pienehköön kylään. Pelkällä biokaasulla ei sähköä kyetä tuottamaan tarpeeksi. Biodieseliä puolestaan tuotetaan enemmän kuin kyläkokoluokan CHP-laitoksessa voidaan hyödyntää. Ylimääräinen biodiesel voidaan hyödyntää esimerkiksi ajoneuvojen polttoaineena.

CHP-laitos mitoitettiin kolmelle eri sähköenergiantarpeelle ja kahdelle eri sähköhyötysuhteelle. Ero oli merkittävä sähköhyötysuhteilla 35 % ja 45 %. Molemmilla luvuilla laskettaessa biodieselin ja biokaasun kapasiteetit yhdessä olivat riittävät, kun CHP-laitoksella oli tarkoitus kattaa energiantuottaminen esimerkkikylän asuintaloille ja kunnan kiinteistöille. Suuremmalla sähköhyötysuhteella polttoaineita jää käytettäväksi enemmän esimerkiksi liikennekäyttöön. Laskennassa esimerkkinä käytetyn kylän energiantarve oli hyvin suuri myös teollisuus otettuna huomioon. Tätä energiantarvetta ei biodieselin ja biokaasun tuotantolaitosten kapasiteeteilla kyetä kattamaan. Diplomityön tarkoituksena oli optimoida pieni CHP-laitos, jolla voidaan tuottaa sähköä pienehkölle kylälle.

Saadut tulokset osoittavat, että biopolttoaineiden yhteistuotanto on perusteltua ja polttoaineilla voidaan tuottaa energiaa kyläkokoluokassa. Yksittäistapaukset vaativat vielä tarkempaa tutkimista ja erityisesti taloudellisen toteutettavuuden selvittämistä.

8. YHTEENVETO

Tämä diplomityö tehtiin osana Vaasan yliopiston teknillisen tiedekunnan DESY-Lähienergia (Distributed Energy Systems) -projektia (2012–2014). Työn tavoitteena oli optimoida biodieseliä, bioetanolia ja biokaasua tuottava hybridituotantojärjestelmä, jossa kaikki sivutuotteet voidaan hyödyntää. Biodieselin tuotantolaitos valmistaa eläinrasvasta biodieseliä ja sivutuotteena glyserolia. Bioetanolilaitos valmistaa jäteperunasta bioetanolia ja sivutuotteena rankkia. Glyseroli ja rankki käytetään biokaasulaitoksen raaka-aineena. Biokaasulaitoksesta saadaan biokaasua ja sivutuotteena maanparannusaineeksi soveltuvaa mädätysjäännöstä. Tavoitteena oli myös mitoittaa pieni CHP-laitos tuottamaan esimerkkinä käytetyn kylän sähköenergia.

Teoriaosuudessa esiteltiin biodieselin, bioetanolin ja biokaasun valmistusprosesseja ja näissä valmistusprosesseissa muodostuvia sivutuotteita, ominaisuuksia ja käyttökohteita. Lisäksi esiteltiin CHP-laitoksen teoriaa ja laitoksen soveltamista energiantuotantoon.

Empiriaosuudessa laskettiin biodieselin, bioetanolin ja biokaasun tuotantolaitosten materiaalivirrat todellisten tuotantotietojen pohjalta, lukuun ottamatta bioetanolin tuotantolaitosta, joka perustui käytöstä poistetulle tuotantolaitokselle ilmoitettuun tuotantomäärään. Materiaalivirtojen perusteella etsittiin optimaaliset tuotannot, joissa kaikki sivutuotteet voidaan hyödyntää.

CHP-laitokseen liittyvässä laskennassa käytettiin esimerkkinä kylää, jonka sähkönkulutus tulisi toteuttaa biodieseliä ja biokaasua polttoaineena käyttävällä mäntämoottorikäyttöisellä CHP-laitoksella. Biopolttoaineille laskettujen materiaalivirtojen perusteella etsittiin optimaaliset biodiesel- ja biokaasumäärät, joilla tämä sähkönkulutus voitaisiin kattaa.

Tuloksena saatiin biodieselin, biokaasun ja bioetanolin tuotantolaitosten materiaalivirtojen perusteella kaksi yhteistuotantomallia, joissa kaikki materiaalivirrat voidaan hyödyntää. Ensimmäisessä mallissa laskettiin muodostuvat materiaalivirrat, kun biodieselin ja bioetanolin tuotantolaitokset toimivat kapasiteettiensa mukaan. Tässä mallissa bio-

kaasulaitoksen kapasiteetin tulisi olla todellista suurempi. Toisessa mallissa mitoitettiin käytöstä poistettu bioetanolilaitos uudelleen. Tällöin biodieselin ja biokaasun tuotantolaitokset toimivat kapasiteettiensa mukaan. Lisäksi tuloksena saatiin mitoitus esimerkkinä käytetyn kylän energiantarpeen kattavalle CHP-laitokselle sekä biodiesel- ja biokaasumäärät, joilla CHP-laitos voidaan toteuttaa.

Tulokset osoittavat, että biodieselin, -etanolin, ja kaasun yhteistuotanto on perusteltua. CHP-laitoslaskennan tulokset osoittavat lisäksi, että biodiesel ja -kaasumäärillä voidaan tuottaa sähköenergiaa pienelle kylälle. Yhteistuotantomallin toteuttamista ajatellen tarkemmat tutkimukset ja taloudellisen toteutettavuuden selvittäminen ovat kuitenkin tarpeen.

LÄHDELUETTELO

- Alakangas, Eija (2000). *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia* [online]. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), [siteerattu 13.08.2013]. Saatavilla World Wide Webissä:
<URL:<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>>
- Al Seadi, Teodorita, Bernhard Drogg, Werner Fuchs, Dominik Rutz & Rainer Janssen (2013). Biogas Digestate Quality and Utilization. Teoksessa: *The Biogas handbook - Science, Production and Application*, 267–301. Toim. Arthur Wellinger, Jerry Murphy & David Baxter. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Appels, Lise, Joost Lauwers, Jan Degève, Lieve Helsen, Bart Lievens, Kris Willems, Jan Van Impe & Raf Dewil (2011). Anaerobic Digestion in Global Bio-Energy Production: Potential and Research Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online] 15:9 [siteerattu 12.08.2013], 4295–4301. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121>>
- Balat, Mustafa, Havva Balat & Cahide Öz (2008). Progress in Bioethanol Processing. *Progress in Energy and Combustion Science* [online] 34:5 [siteerattu 10.06.2013], 551–573. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2007.11.001>>
- Demirbas, Ayhan (2008). *Biodiesel: A realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Lontoo: Springer-Verlag London Limited. 208 s. ISBN 978-1-84628-994-1.
- Demirbas, Ayhan & M.Fatih Demirbas (2010). *Algae Energy. Algae as a New Source of Biodiesel*. Lontoo: Springer-Verlag London Limited. 199s. ISBN 978-1-84996-049-6.

Department of Energy and Climate Change (2014). *Compression-Ignition Engines* [online], [siteerattu 10.03.2014]. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:http://chp.decc.gov.uk/cms/compression-ignition-engines/?phpMyAdmin=ff232c1_d3b302ac6e951f554eeeeafdf>

Fountoulakis, M.S., I.Petousi & T.Manios (2010). Co-digestion of Sewage Sludge with Glycerol to Boost Biodas Production. *Waste Management* [online] 30:10 [siteerattu 24.07.2010], 1849–1853. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.011>>

Galbe, Mats & Guido Zacchi (2012). Pretreatment: The Key to Efficient Utilization of Lignocellulosic Materials. *Biomass and Bioenergy* [online] 46 [siteerattu 01.12.2013], 70–78. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.026>>

Gallert C. & J. Winter (1997). Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion of Source-Sorted Organic Wastes: Effect of Ammonia on Glucose Degradation and Methane Production. *Applied Microbiology and Biotechnology* [online] 48:3 [siteerattu 04.09.2013], 405–410. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:http://download.springer.com/static/pdf/511/art%253A10.1007%252Fs002530051071.pdf?auth66=1385291707_82097c77d55c6b9909cbffc40bcfec47&ext=.pdf>

Henham M. & M.K.Makkar (1998). Combustion of Simulated Biogas in a Dual-Fuel Diesel Engine. *Energy Conversion and Management* [online] 39:16-18 [siteerattu 26.02.2014], 2001–2009. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:[http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00071-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00071-5)>

Hoekman, S., A. Broch, C. Robbins, E. Cenicerros, M. Natarajan (2012). Review of Biodiesel Composition, Properties and Specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online] 16:1 [siteerattu 19.06.2013], 143–169. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>>

Hutnan M., N. Kolesarova, I. Bodik, V. Spalkova & M. Lazor (2009). Possibilities of Anaerobic Treatment of Crude Glycerol from Biodiesel Production. *36th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering* [online] [siteerattu 11.11.2013], 1–13. ISBN 978-80-227-3072-3. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:<http://kchbi.chtf.stuba.sk/cevoze/doc/Possibilities%20of%20anaerobic%20treatment%20of%20crude%20glycerol%20from%20biodiesel%20production.pdf>>

Jayasinghe, Punyama & Kelly Hawboldt (2012). A Review of Bio-oils from Waste Biomass: Focus on Fish Processing Waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online] 16:1 [siteerattu 27.06.2013], 798–821. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.005>>

Jeuland N., X. Montagne & X. Gautrot (2004). Potentiality of Ethanol as a Fuel for Dedicated Engine. *Oil and Gas Science and Technology - Rev. IFP* [online] 59:6 [siteerattu 10.06.2013], 559-570. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:<http://dx.doi.org/10.2516/ogst:2004040>>

Jordbruksverket (2004). *Marknadsöversikt – Etanol, en jordbruks- och industriprodukt.* [online], [siteerattu 28.02.2014]. Saatavilla World Wide Webistä:

<URL:http://www2.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/trycksaker/Pdf_rapporter/ra04_21.pdf>

Knothe, Gerhard, Jon Van Gerpen & Jürgen Krahl (2005). *The Biodiesel Handbook.* Illinois: AOCS Press. 302s. ISBN 1-893997-79-0.

- Knowles, J. (2011). Overview of Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems. Teoksessa: *Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) – Advanced Design, Performance, Materials and Applications*, 3–16. Toim. Robert Beith. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. ISBN 978-1-84569-795-2.
- Kolesarova, Nina, Miroslav Hutnan, Igor Bodik & Viera Spalkova (2011). Utilization of Biodiesel By-Products for Biogas Production. *Journal of Biomedicine and Biotechnology* [online] [siteerattu 11.11.2013], 1–15. Saatavilla World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1155/2011/126798>>
- Krishania, Meena, Virendra Kumar, Virendra Kumar Vijay, Anushree Malik (2013). Analysis of Different Techniques Used for Improvement of Biomethanation Process: A Review. *Fuel* [online] 106 [siteerattu 17.08.2013], 1–9. Saatavilla World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.007>>
- Lampinen, Ari & Anu Laakkonen (2010). *Kunnat liikennebiokaasun tuottajina ja käyttäjinä* [online]. Suomen biokaasuyhdistys ry. 102 s. ISBN 978-952-92-6843-6. Saatavilla World Wide Webistä: <URL:http://www.liikennebiokaasu.fi/syventava_opas_netti.pdf>
- Latvala, Markus (2009). *Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT): Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä* [online]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 114 s. ISBN 978-952-11-3498-2. Saatavilla World Wide Webistä: <URL:<http://hdl.handle.net/10138/37998>>
- Lehtomäki Annimari & Jukka Rintala (2006). *Biokaasun mahdollisuudet ja tuotannon potentiaali Suomen maataloudessa*. PTT-Katsaus. [online] 22 [siteerattu 22.11.2013], 22–28. Saatavilla World Wide Webissä: <URL:www.biokaasufoorumi.fi/GetItem.asp?item=digistorefile;117374;254>

- Leung, Dennis Y.C., Xuan, Wu & M.K.H.Leung (2010). A Review on Biodiesel Production Using Catalyzed Transesterification. *Applied Energy* [online] 87:4 [siteerattu 8.4.2013], 1083-1095. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>>
- Lin Y. & S. Tanaka (2006). Ethanol Fermentation from Biomass Resources: Current State and Prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology* [online] 69:6 [siteerattu 30.05.2013], 627–642. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1007/s00253-005-0229-x>>
- Ma, Fangrui & Milford, A. Hanna (1999). Biodiesel Production: A Review. *Bioresourcetechnology* [online] 70:1 [siteerattu 14.3.2013], 1–15. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852499000255>>
- Majewski, W. A. & M. K. Khair (2006). Diesel Emissions and Their Control. Warrendale: SAE International. 561 s. ISBN 978-0-7680-0674-2.
- Moser, Bryan R. (2009). Biodiesel Production, Properties, and Feedstocks. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant* [online] 45:3 [siteerattu 17.05.2013], 229-266. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1007/s11627-009-9204-z>>
- Motiva (2013). *Kaasuautot*. [online]. Päivitetty 19.12.2013 [siteerattu 3.3.2014]. Saatavilla World Wide webistä:
<URL:http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvo_tekniikka/moottoritekniikka/kaasuautot>
- Napari, Pirjo (2007). *Orgaaninen kemia*. 7. painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 330 s. ISBN 978-951-37-1568-7.

Nigam P. S. & A. Singh (2011). Production of Liquid Biofuels from Renewable Resources. *Progres in Energy and Combustion Science* [online] 37:1 [siteerattu 29.05.2013], 52–68. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>>

Persson, Margareta, Owe Jönsson & Arthur Wellinger (2006). Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection. *IEA Bioenergy*. [online], [siteerattu 26.08.2013]. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_report_final.pdf>

Raiko, Risto, Jaakko Saastamoinen, Mikko Hupa & Ilmari Kurki-Suonio (2002). Poltto ja palaminen. 1.painos. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemioiden tutkimuskeskus. 750 s. ISBN 951-666-604-3.

Sarkar, Ghosh, Bannerjee & Aikat (2012). Bioethanol Production from Agricultural Wastes: An Overview. *Renewable Energy* [online] 37:1 [siteerattu 04.06.2013], 19–27. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>>

SFS-EN 15376 (2011). Automotive Fuels. Ethanol as a Blending Component for Petrol. Requirements and Test Methods. Helsinki: Finnish Standards Association.

SFS-EN 14214 (2013). Liquid Petroleum Products. Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for Use in Diesel Engines and Heating Applications. Requirements and Test Methods. Helsinki: Finnish Standards Association.

Valtanen, Esko (2007). *Matematiikan ja fysiikan käsikirja*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 381s. ISBN 978-952-9867-28-8.

- Vauhkonen, V., S.Niemi, E.Hiltunen, H.J. Salminen & A.Pasila (2009). The First Generation Biodiesel: The Effects of Raw Material on Physical Properties, Oxidation Stability and Emissions. *Clean Electrical Power, 2009 International Conference* [online] [siteerattu 22.08.2013], 117–123. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1109/ICCEP.2009.5212074>>
- Vicente, G., M.Martinez & J.Aracil (2004). Integrated Biodiesel Production: a Comparison of Different Homogeneous Catalysts Systems. *Bioresurce Technology* [online] 92:3 [siteerattu 24.07.2013], 297–305. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2003.08.014>>
- Weiland, Peter (2010). Biogas Production: Current State and Perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* [online] 85:4 [siteerattu 12.08.2013], 849–860. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://dx.doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>>
- Wilkie Ann. C. (2007). Biogas and Biofuel Synergies. *2007 Farm to Fuel Summit St. Petersburg, Florida*. 19.07.2007. [online], [siteerattu 09.09.2013]. Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://biogas.ifas.ufl.edu/Publs/Biogas-and-Biofuel-Synergies-19Jul07.pdf>>
- Wärtsilä (2013a). *Gas and Multi-Fuel Powerplants*. [online], [siteerattu 27.02.2014] Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://www.wartsila.fi/file/Wartsila/en/1278532913298a1267106724867-Gas-and-multi-fuel-power-plants-112013.pdf>>
- Wärtsilä (2013b). *Combined Cooling, Heating and Power*. [online], [siteerattu 27.02.2014] Saatavilla World Wide Webistä:
<URL:<http://www.wartsila.fi/file/Wartsila/en/1278532913474a1267106724867-Combined-cooling.pdf>>

LIITTEET

LIITE 1. Biodieselin tuotantolaitoksen materiaalivirrat ensimmäisessä laskennassa (yhteistuotantomalli 1).

Eläinöljy (m ³)	Biodiesel (m ³)	Glyseroli (m ³)
0	0	0,0
52	50	5
104	100	10
156	150	16
208	200	21
260	250	26
312	300	31
364	350	36
416	400	42
468	450	47
520	500	52
572	550	57
624	600	62
676	650	68
728	700	73
780	750	78
832	800	83
884	850	88
936	900	94
988	950	99
1040	1000	104
1092	1050	109
1144	1100	114
1196	1150	120
1248	1200	125
1300	1250	130
1352	1300	135
1404	1350	140
1456	1400	146
1508	1450	151
1560	1500	156
1612	1550	161
1664	1600	166
1716	1650	172
1768	1700	177

Eläinöljy (m ³)	Biodiesel (m ³)	Glyseroli (m ³)
1820	1750	182
1872	1800	187
1924	1850	192
1976	1900	198
2028	1950	203
2080	2000	208
2132	2050	213
2184	2100	218
2236	2150	224
2288	2200	229
2340	2250	234
2392	2300	239
2444	2350	244
2496	2400	250
2548	2450	255
2600	2500	260

LIITE 2. Bioetanolin tuotantolaitoksen materiaalivirrat ensimmäisessä laskennassa (yh-teistuotantomalli 1).

Peruna (m ³)	Bioetanoli (m ³)	Rankki (m ³)
0	0	0
136	17	340
272	34	680
408	51	1020
544	68	1360
680	85	1700
816	102	2040
952	119	2380
1088	136	2720
1224	153	3060
1360	170	3400
1496	187	3740
1632	204	4080
1768	221	4420
1904	238	4760
2040	255	5100
2176	272	5440
2312	289	5780
2448	306	6120
2584	323	6460
2720	340	6800
2856	357	7140
2992	374	7480
3128	391	7820
3264	408	8160
3400	425	8500
3536	442	8840
3672	459	9180
3808	476	9520
3944	493	9860
4080	510	10200
4216	527	10540
4352	544	10880
4488	561	11220
4624	578	11560
4760	595	11900
4896	612	12240
5032	629	12580

Peruna (m ³)	Bioetanolli (m ³)	Rankki (m ³)
5168	646	12920
5304	663	13260
5440	680	13600
5576	697	13940
5712	714	14280
5848	731	14620
5984	748	14960
6120	765	15300
6256	782	15640
6392	799	15980
6528	816	16320
6664	833	16660
6800	850	17000

LIITE 3. Biokaasun tuotantolaitoksen materiaalivirrat ensimmäisessä laskennassa (yh-teistuotantomalli 1).

Glyseroli+rankki (raaka-aine) (m ³)	Biokaasu (m ³)	Multa (m ³)
0	0	0
345	30228	126
690	60457	253
1036	90685	379
1381	120913	505
1726	151142	632
2071	181370	758
2416	211598	884
2762	241827	1011
3107	272055	1137
3452	302283	1263
3797	332512	1390
4142	362740	1516
4488	392968	1642
4833	423197	1769
5178	453425	1895
5523	483653	2021
5868	513882	2148
6214	544110	2274
6559	574338	2400
6904	604567	2526
7249	634795	2653
7594	665023	2779
7940	695252	2905
8285	725480	3032
8630	755708	3158
8975	785936	3284
9320	816165	3411
9666	846393	3537
10011	876621	3663
10356	906850	3790
10701	937078	3916
11046	967306	4042
11392	997535	4169
11737	1027763	4295
12082	1057991	4421
12427	1088220	4548
12772	1118448	4674

Glyseroli+rankki (raaka-aine) (m ³)	Biokaasu (m ³)	Multa (m ³)
13118	1148676	4800
13463	1178905	4927
13808	1209133	5053
14153	1239361	5179
14498	1269590	5306
14844	1299818	5432
15189	1330046	5558
15534	1360275	5685
15879	1390503	5811
16224	1420731	5937
16570	1450960	6064
16915	1481188	6190
17260	1511416	6316

LIITE 4. Biodieselin tuotantolaitoksen materiaalivirrat toisessa laskennassa (yhteistuotantomalli 2).

Eläinöljy (m ³)	Biodiesel (m ³)	Glyseroli (m ³)
0	0	0
100	96	10
200	192	20
300	288	30
400	385	40
500	481	50
600	576	60
700	673	70
800	769	80
900	865	90
1000	962	100
1100	1058	110
1200	1154	120
1300	1250	130
1400	1346	140
1500	1442	150
1600	1538	160
1700	1635	170
1800	1731	180
1900	1827	190
2000	1923	200
2100	2019	210
2200	2115	220
2300	2212	230
2400	2308	240
2500	2404	250
2600	2500	260

LIITE 5. Bioetanolin tuotantolaitoksen materiaalivirrat toisessa laskennassa (yhteistuo-
tantomalli 2).

Peruna (m ³)	Bioetanoli (m ³)	Rankki (m ³)
1480	185,0	3700
1476	184,5	3690
1472	184,0	3680
1468	183,5	3670
1464	183,0	3660
1460	182,5	3650
1456	182,0	3640
1452	181,5	3630
1448	181,0	3620
1444	180,5	3610
1440	180,0	3600
1436	179,5	3590
1432	179,0	3580
1428	178,5	3570
1424	178,0	3560
1420	177,5	3550
1416	177,0	3540
1412	176,5	3530
1408	176,0	3520
1404	175,5	3510
1400	175,0	3500
1396	174,5	3490
1392	174,0	3480
1388	173,5	3470
1384	173,0	3460
1380	172,5	3450
1376	172,0	3440

LIITE 7. Biodieselistä ja biokaasusta saatavat tehot megawatteina (MW), kun CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde on 85 %.

Biodiesel (m ³)	Teho (MW)	Biokaasu (m ³)	Teho (kW)
0	0,000	0	0
50	0,044	6480	4
100	0,088	12960	8
150	0,132	19440	13
200	0,175	25920	17
250	0,219	32400	21
300	0,263	38880	25
350	0,307	45360	30
400	0,351	51840	34
450	0,395	58320	38
500	0,438	64800	42
550	0,482	71280	47
600	0,526	77760	51
650	0,570	84240	55
700	0,614	90720	59
750	0,658	97200	64
800	0,701	103680	68
850	0,745	110160	72
900	0,789	116640	76
950	0,833	123120	80
1000	0,877	129600	85
1050	0,921	136080	89
1100	0,964	142560	93
1150	1,008	149040	97
1200	1,052	155520	102
1250	1,096	162000	106
1300	1,140	168480	110
1350	1,184	174960	114
1400	1,227	181440	119
1450	1,271	187920	123
1500	1,315	194400	127
1550	1,359	200880	131
1600	1,403	207360	135
1650	1,447	213840	140
1700	1,490	220320	144
1750	1,534	226800	148
1800	1,578	233280	152
1850	1,622	239760	157

Biodiesel (m ³)	Teho (MW)	Biokaasu (m ³)	Teho (kW)
1900	1,666	246240	161
1950	1,710	252720	165
2000	1,753	259200	169
2050	1,797	265680	174
2100	1,841	272160	178
2150	1,885	278640	182
2200	1,929	285120	186
2250	1,973	291600	191
2300	2,016	298080	195
2350	2,060	304560	199
2400	2,104	311040	203
2450	2,148	317520	207
2500	2,192	324000	212

LIITE 8. Biodieselistä ja biokaasusta saatavat sähkötehot sähköhyötysuhteilla 35 % ja 45 %.

Biodiesel (m ³)	P _{e,35 %} (MW)	P _{e,45 %} (MW)	Biokaasu (m ³)	P _{e,35 %} (kW)	P _{e,45 %} (kW)
0	0,000	0,000	0	0	0
50	0,015	0,020	6480	1	2
100	0,031	0,039	12960	3	4
150	0,046	0,059	19440	4	6
200	0,061	0,079	25920	6	8
250	0,077	0,099	32400	7	10
300	0,092	0,118	38880	9	11
350	0,107	0,138	45360	10	13
400	0,123	0,158	51840	12	15
450	0,138	0,178	58320	13	17
500	0,153	0,197	64800	15	19
550	0,169	0,217	71280	16	21
600	0,184	0,237	77760	18	23
650	0,199	0,256	84240	19	25
700	0,215	0,276	90720	21	27
750	0,230	0,296	97200	22	29
800	0,245	0,316	103680	24	30
850	0,261	0,335	110160	25	32
900	0,276	0,355	116640	27	34
950	0,291	0,375	123120	28	36
1000	0,307	0,395	129600	30	38
1050	0,322	0,414	136080	31	40
1100	0,338	0,434	142560	33	42
1150	0,353	0,454	149040	34	44
1200	0,368	0,473	155520	36	46
1250	0,384	0,493	162000	37	48
1300	0,399	0,513	168480	39	50
1350	0,414	0,533	174960	40	51
1400	0,430	0,552	181440	41	53
1450	0,445	0,572	187920	43	55
1500	0,460	0,592	194400	44	57
1550	0,476	0,611	200880	46	59
1600	0,491	0,631	207360	47	61
1650	0,506	0,651	213840	49	63
1700	0,522	0,671	220320	50	65
1750	0,537	0,690	226800	52	67
1800	0,552	0,710	233280	53	69
1850	0,568	0,730	239760	55	70

Biodiesel (m ³)	P _{e,35%} (MW)	P _{e,45%} (MW)	Biokaasu (m ³)	P _{e,35%} (kW)	P _{e,45%} (kW)
1900	0,583	0,750	246240	56	72
1950	0,598	0,769	252720	58	74
2000	0,614	0,789	259200	59	76
2050	0,629	0,809	265680	61	78
2100	0,644	0,828	272160	62	80
2150	0,660	0,848	278640	64	82
2200	0,675	0,868	285120	65	84
2250	0,690	0,888	291600	67	86
2300	0,706	0,907	298080	68	88
2350	0,721	0,927	304560	70	90
2400	0,736	0,947	311040	71	91
2450	0,752	0,967	317520	73	93
2500	0,767	0,986	324000	74	95