

AALTO-YLIOPISTO
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Energiatekniikan laitos

Tuomas Niskanen
Puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun energiatehokkuus

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Espoossa 4.6.2012

Työn valvoja: Professori Pekka Ahtila
Työn ohjaaja: Tekniikan tohtori Sari Siitonen

AALTO-YLIOPISTO PL 11000, 00076 AALTO http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ
Tekijä: Tuomas Niskanen		
Työn nimi: Puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun energiatehokkuus		
Korkeakoulu: Insinöörیتieteiden korkeakoulu		
Laitos: Energiatekniikan laitos		
Professori: Energiatalous ja voimalaitos- tekniikka	Koodi: Ene-59	
Työn valvoja: Professori Pekka Ahtila Työn ohjaaja: Tekniikan tohtori Sari Siitonen		
<p>Euroopan unioni on asettanut tavoitteekseen lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta energiankäytössä, vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja parantaa energiatehokkuutta. Syinä näihin tavoitteisiin on fossiilisten polttoaineiden määrän hupeneminen ja niiden käytöstä syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen ilmastomuutosta kiihdyttävä vaikutus.</p> <p>Tässä diplomityössä tutkitaan puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun energiatehokkuutta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Puupohjaista biokaasua valmistetaan uusiutuvasta metsäbiomassasta kaasuttamalla ja jalostamalla tuotekaasu vastaamaan maakaasua, jolloin siirrossa voidaan hyödyntää olemassa olevaa maakaasun siirtoverkostoa. Tarkasteltava puupohjaisen biokaasun tuotantoketju koostuu metsäbiomassan korjuusta, kuljetuksesta ja esikäsitteystä, biokaasun tuotannosta biojalostamossa sekä siirrosta ja loppukäytöstä. Tarkasteltavat loppukäyttövaihtoehdot ovat käyttö liikenteen biopolttoaineena, lämmityksessä ja CHP-tuotannossa.</p> <p>Tuotantoketjun tarkasteluun käytettiin massa- ja energiataseita. Työssä tarkasteltiin ketjun energiatehokkuutta sekä kasvihuonekaasupäästöjä ja saatuja tuloksia verrattiin fossiilisten vertailupolttoaineiden kasvihuonekaasupäästöihin EU:n uusiutuvien polttoaineiden direktiivin mukaisesti. Lämmityskäytössä ja CHP-tuotannossa syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä verrattiin Euroopan komission kiinteille ja kaasumaisille biopolttoaineille asettamiin vaatimuksiin. Metsäbioenergian hyödyntämisen ympärillä käytävän keskustelun vuoksi tässä työssä laskettiin kasvihuonekaasujen osalta sekä netto- että bruttopäästöt.</p> <p>Puupohjainen biokaasu täyttää selvästi EU:n asettamat kestävyyskriteerit kasvihuonekaasupäästöjen suhteen. Liikenteen biopolttoaineena kasvihuonekaasupäästövähennys on 93 % verrattuna fossiiliseen dieseliin ja 91 % verrattuna maakaasuun. Lämmityskäytössä ja CHP-tuotannossa kasvihuonekaasupäästövähennys on noin 98 % fossiiliseen vertailukohtaan nähden. Vertailun vuoksi palmuöljypohjaisella biodieselillä päästään ainoastaan n. 60 % kasvihuonekaasupäästövähennystä. Kun epäsuorat hiilidioksidipäästöt otetaan huomioon, ovat puupohjaisen biokaasun kasvihuonekaasupäästöt liikennekäytössä samalla tasolla maakaasun kanssa, mutta alemmat kuin dieselillä. Loppukäyttövaihtoehdoista lämmityskäytöllä on paras energiatehokkuus. Sen ketjuhyötysuhde on 91 %.</p>		
Päivämäärä: 4.6.2012	Kieli: suomi	Sivumäärä: 81 + 2
Avainsanat: bio-SNG, SNG, biokaasu, liikenteen biopolttoaine, metsäbioenergia		

AALTO UNIVERSITY PO Box 11000, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF MASTER'S THESIS
Author:	Tuomas Niskanen	
Title:	Energy efficiency of Bio-SNG production chain	
School:	School of Engineering	
Faculty:	Department of Energy Technology	
Professorship:	Energy Economics and Power Plant Engineering	Code: Ene-59
Supervisor:	Professor Pekka Ahtila	
Instructor:	Sari Siitonen D.Sc. (Tech.)	
<p>European union has set a goal to increase the share of renewable energy sources in energy use, decrease the amount of greenhouse gases and increase the energy efficiency. Reasons for these goals are the diminishing fossil fuel resources and climate change which is thought to be accelerated by greenhouse gases that are emitted from burning fossil fuels (and other fuels as well).</p> <p>This thesis studies the energy efficiency and greenhouse gas emissions that are emitted during the bio-synthetic natural gas (bio-SNG) production chain. Bio-SNG is produced by gasifying forest biomass and refining the product gas to be similar to natural gas. This makes it possible to utilize the existing natural gas transmission infrastructure. The studied production chain consists of harvesting, transporting and pre-handling of forest biomass, bio-SNG production in a biorefinery, transportation of bio-SNG via pipeline and end-use. The studied end-use applications are transport biofuel, heating and CHP-production.</p> <p>Production chain is studied by means of mass and energy balances. Greenhouse gas emissions are calculated according to principles presented by EU in the Renewable Energy Sources directive. Results were compared to the fossil reference fuel (diesel) and also to natural gas. Greenhouse gas emissions from heating and CHP-production are compared to emissions from fossil reference fuel that is defined by European Commission in sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity and heating. Due to the debate wallowing over indirect CO₂-emissions of forest bioenergy, both, net and gross greenhouse gas emissions are calculated.</p> <p>Bio-SNG fulfills clearly the sustainability criteria of greenhouse gas reductions set by the EU. As transport biofuel the greenhouse gas reduction is 93 % compared to diesel and 91 % compared to natural gas. In heating and CHP-production the greenhouse gas reductions are about 98 % compared to fossil reference fuel. For the sake of comparison palm-oil based biodiesel reduces greenhouse gas emissions only about 60 %. If the indirect CO₂ emissions are taken into account for, the greenhouse gas emissions of Bio-SNG as transport biofuel are similar to the emissions from the use of natural gas, but smaller than the emissions from the use of diesel. From the different end-use alternatives, heating has the best energy efficiency. Production chain efficiency for heating is 91 %.</p>		
Date:	4.6.2012	Language: Finnish
		Number of pages: 81+2
Keywords: bio-SNG, SNG, biogas, bio methane, biofuel for transport, forest bioenergy		

ALKUSANAT

Kuullessani Bio-SNG:stä ensimmäisen kerran keväällä 2011, oli se mielestäni kiinnostavin asia energia-alalla koko opiskeluaikanani. Olin mielestäni erityisen onnekas saadessani tehdä diplomityön modernista, uusiutuvista energialähteistä biokaasua suuressa mittakaavassa tuottavasta tekniikasta, joka on aidosti lähellä kaupallistumista. Diplomityön tekeminen oli todella tähänastisen elämäni suurin ponnistus ja uusia asioita oli opiskeltava ja sai opiskella jos nyt ei aivan päivittäin niin ainakin lähes päivittäin.

Työ tehtiin osana Cleen Ltd:n EFEU-ohjelmaa, jota myös TEKES on rahoittamassa. Tämän työn tuloksia on mahdollista hyödyntää jatkossa ohjelman puitteissa.

Haluan kiittää VTT:n Veikko Karvosta ja Jukka Nuottimäkeä, jotka auttoivat poltto-moottoreiden hyötysuhteiden selvittämisessä. Aalto-yliopistolta kiitoksen ansaitsevat biopolttoaineiden kuivattamiseen liittyvissä kysymyksissä avustanut Henrik Holmberg ja kostean kaasuseoksen termodynamiikassa avustanut professori Markku Lampinen.

Kiitokset myös työn valvojalle, professori Pekka Ahtilalle, hänen työn sisältöön ja rakenteeseen liittyvistä kommentistaan sekä lähtötietojen hankintaan sopivista lähteistä antamistaan vinkeistä. Kiitokset myös työn toiselle tarkastajalle, professori Sanna Syrille hänen antamistaan kommentista ja parannusehdotuksista.

Suurimman kiitoksen ansaitsee erinomaisesta ohjauksesta Sari Siitonen, jota ilman tämä työ ei olisi takuulla valmistunut. Sarin asiantuntemus, vaativuus sekä kiinnostus työhöni ja hyvinvointiini olivat välttämättömiä työn loppuunsaattamiseksi. Gasumilta haluan kiittää edelleen kaikkia mainiosta työilmapiiristä ja diplomityöhön liittyen Olli Nevalaista, jolta sain juuri valmistuneen diplomi-insinöörin tukea erityisesti työn alkuvaiheessa.

Samaan aikaan diplomityötään laatinut, hyvä ystäväni Antti Pirttilä ansaitsee myös kiitoksen. Hänen kanssaan Otaniemen opiskelijaravintoloiden lounailla ja vapaa-ajalla käymäni keskustelut diplomityön tekemisen iloista ja murheista olivat hyvin tärkeitä. Kiitokset myös muille teekkarimetsästäjille, joiden kanssa virkistäydyttiin niin jahdeissa, saunan lauteilla kuin kerhohuoneellakin. Kiitoksen ansaitsevat erityisesti äiti ja isä, Väiski, Riitta, Eljas, Sinikka, Matti-setä ja Johannes, joiden tuki ja kiinnostus työhöni oli sangen motivoivaa.

Espoossa

Tuomas Niskanen

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT LYHENTEET JA YKSIKÖT.....	3
1 JOHDANTO.....	5
1.1 Tausta.....	5
1.2 Tutkimuskysymys ja työn tavoitteet.....	6
2 BIO-SNG:N TUTKIMUS JA KÄYNNISSÄ OLEVAT PROJEKTIT.....	8
2.1 Synteettisen maakaasun tausta.....	8
2.2 Kaasutus ja kaasutintyypit.....	8
2.2.1 Leijupetikaasuttimet suoralla lämmöntuonnilla.....	9
2.2.2 Leijupetikaasuttimet epäsuoralla lämmöntuonnilla.....	11
2.2.3 Kaasuttimien vertailu.....	13
2.3 Valmiit laitokset.....	14
2.4 Rakenteilla olevat laitokset.....	15
2.5 Meneillään olevat projektit.....	16
2.6 Tuotantoketjujen tarkasteluun käytettävät menetelmät.....	18
2.7 Bio-SNG:n elinkaaritutkimuksia.....	18
3 ENERGIANKULUTUKSEN JA KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN LASKENTA.....	20
3.1 Energiatehokkuus ja energiategokkuuden tunnusluvut.....	20
3.2 Hiilidioksidipäästöjen tunnusluvut ja allokointi.....	22
3.3 RES-direktiivissä esitetty laskentatapa kasvihuonekaasupäästöille ja päästövähennys liikennekäytössä.....	23
3.4 Kasvihuonekaasupäästöjen laskenta sähkön- ja lämmöntuotannossa.....	26
3.5 Metsäbiomassan energiakäytössä syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen laskentatapaan kohdistunutta kritiikkiä.....	27
3.6 Bio-SNG:n tuotantoketjun energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen laskentamalli.....	29
4 BIO-SNG:N TUOTANTOKETJUN LASKENNASSA KÄYTETYT LÄHTÖTIEDOT.....	31
4.1 Raaka-aineen korjuu, kuljetus ja esikäsittely.....	31
4.2 Bio-SNG:n tuotantoprosessi biojalostamolla.....	34
4.2.1 Polttoaineen kuivatus.....	35
4.2.2 Kaasutus.....	37
4.2.3 Hapentuotantoyksikkö (ASU).....	39
4.2.4 Tuotekaasun puhdistusmenetelmät.....	40

4.2.5	Shift-konversio	43
4.2.6	Metanointi	44
4.2.7	Jalostaminen (upgreidaus).....	46
4.2.8	Komprimointi	47
4.2.9	Biojalostamon CHP-kytkentä.....	48
4.3	Siirtoputkisto.....	49
4.4	Loppukäyttövaihtoehdot	50
4.4.1	Bio-SNG liikennepolttoaineena	50
4.4.2	Bio-SNG lämmityskäytössä	51
4.4.3	Bio-SNG CHP-tuotannossa.....	52
5	TULOKSET JA TULOSTEN ARVIOINTI.....	53
5.1	Energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt tuotantoketjun eri vaiheissa... 53	
5.1.1	Metsäbiomassan korjuu, kuljetus ja murskaus.....	55
5.1.2	Biojalostamo.....	55
5.1.3	Bio-SNG:n siirto biojalostamolta loppukäyttöön.....	58
5.1.4	Bio-SNG:n loppukäyttö.....	58
5.2	Bio-SNG:n tuotantoketjun energiankulutus ja energiatehokkuus.....	58
5.3	Bio-SNG:n tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt.....	60
5.3.1	Bio-SNG:n liikennekäytön kasvihuonekaasupäästöt ja vertaaminen RES-direktiivin vaatimuksiin.....	60
5.3.2	Kasvihuonekaasupäästöjen vertaaminen kiinteille ja kaasumaisille biomassalähteille sähkön- ja lämmöntuotannossa asetettuihin vaatimuksiin ..	62
6	HERKKYYSTARKASTELU	63
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	69
	LÄHDELUETTELO	71

Liitteet

Liite 1 Biojalostamon pääkaavio

Liite 2 Biojalostamon vesi-höyry -piirin Solvo-malli

KÄYTETYT LYHENTEET JA YKSIKÖT

AGR	Acid Gas Removal, happamien kaasujen erottaminen
ASU	Air Separation Unit, hapentuotantoyksikkö
bar(a)	paineen yksikkö, absoluuttinen paine
bar(g)	paineen yksikkö, mittaripaine
BFB	Bubbling Fluidised Bed, kupliva leijukerros
CADC	Common Artemis Driving Cycles
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine, kombikytkentä
CCS	Carbon Capture and Storage, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CFB	Circulating Fluidised Bed, kiertävä leijupeti
CNG	Compressed Natural Gas, paineistettu maakaasu
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
CH ₄	metaani
CO	hiilimonoksidi l. häkä
CO ₂	hiilidioksidi
COS	karbonyylisulfidi
DFB	Dual Fluidised Bed
EC	Euroopan Komissio
ECN	Energy Research Centre of the Netherlands
EEA	European Environment Agency, Euroopan ympäristökeskus
FICFB	Fast Internally Circulating Fluidised Bed
g(CO _{2,ekv})	grammaa hiilidioksidiekvivalenttia
H ₂	vety
H ₂ S	rikkivety
H ₂ O	vesi
HC	Hiilivety (-päästö)
IEA	Internation Energy Agency, Kansainvälinen energijärjestö
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Hallitustenvälinen ilmastomuutos paneeli
i-m ³	irtokuutiometri
k-m ³	kiintokuutiometri
K	Kelvin, lämpötilan yksikkö
kW	kilowatti
kWh	kilowattitunti
LCA	Life Cycle Assessment, elinkaariarviointi
LHV	Lower Heating Value, alempi lämpöarvo
NEDC	New European Driving Cycle
NO _x	Typenoksidi (-päästö)
MJ	Megajoule
m ³ n	normikuutiometriä
MW	Megawatti
MWe	Megawattia sähköä
MWh	Megawattitunti
MWth	Megawattia lämpöä
N ₂	typpi
ppb	parts per billion, miljardisosa
ppm	parts per million, miljoonasosa
PSI	Paul Scherrer Institute

RES	Renewable Energy Source, uusiutuva energianlähde
RME	Rapeseed Methyl Esther eli rypsi-metyyli-esteri, 1. sukupolven biodiesel
SNG	Synthetic Natural Gas, Substitute Natural Gas, synteettinen maakaasu
TEG	Trietyleeniglykoli, kaasun kuivauksessa käytettävä yhdiste
TWh	terawattitunti
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Maapallon ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuus on lisääntynyt teollistumisen alettua jatkuvasti ja maailmalla vallitsee nykyään laaja yksimielisyys siitä, että ihmisen toiminta kiihdyttää ilmastonmuutosta. Kasvihuonekaasuista etenkin hiilidioksidia syntyy paljon fossiilisten polttoaineiden hyödyntämisestä (IPCC, 2007), minkä vuoksi fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan energiantuotannon korvaaminen uusiutuvilla energiamuodoilla on eräs keino ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämisen lisäämistä puoltavat myös hupenevat öljyvarat ja kasvava energiantarve. Toisaalta hiilidioksidipäästöjä syntyy merkittävästi myös maankäytön muutoksista (IPCC, 2007), jotka ovat lisääntyneet uusiutuvien polttoaineiden kysynnän kasvun myötä (EEA, 2011).

EU on asettanut tavoitteekseen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % vuoden 1990 tasosta, lisätä uusiutuvan energiantuotannon osuutta energian loppukäytössä 20 % ja parantaa energiatehokkuutta 20 % vuoteen 2020 mennessä. EU on valmis nostamaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoitettaan 30 %:in, mikäli muut kehittyneet maat sitoutuvat vastaaviin päästövähennyksiin ja kehittyvät maat osallistuvat vähennystalkoisiin riittävillä toimilla. (EC, 2010a).

Euroopan Unionin ja Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) mukaan energiatehokkuuden parantaminen on kustannustehokkain keino vähentää ilmastonmuutokseen vaikuttavia kasvihuonekaasupäästöjä (IEA, 2010), minkä lisäksi sen parantaminen on tehokas tapa edistää energian saannin varmuutta (EC, 2011). IEA:n mukaan energiatehokkuuden parantamisen pitäisi olla ensisijainen päästövähennyskeino vuoteen 2050 saakka (IEA, 2010).

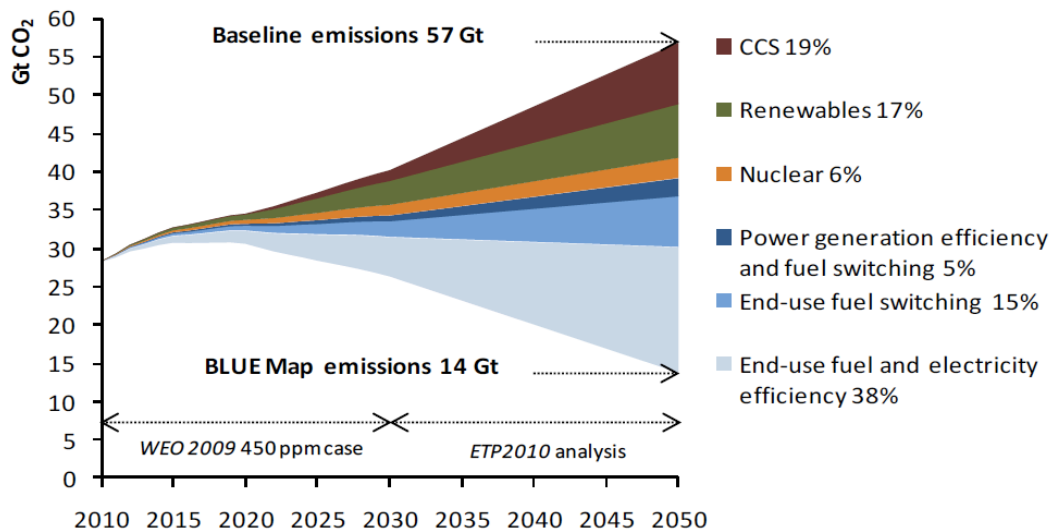
Kansainvälisen energiajärjestön ilmastonmuutoksen hillitsemiseen tähtäävässä BLUE Map -skenaariossa on esitetty avainteknologiat, joilla pyritään puolittamaan energiankäytöstä syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrä vuoden 2005 tasosta vuoteen 2050 mennessä (Kuva 1). Skenaarion mukaan 38 % hiilidioksidipäästöjen vähentämisestä voidaan saavuttaa polttoaineiden ja sähkön loppukäyttöä tehostamalla, 17 % lisäämällä uusiutuvien energialähteiden käyttöä ja 19 % hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla (CCS) (IEA, 2010).

Puupohjaista biokaasua (engl. bio-SNG, bio-synthetic natural gas, SNG, substitute natural gas) tuotetaan uusiutuvista metsäbiomassoista, joten se on eräs keino kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Tämän lisäksi puupohjaisen biokaasun jalostusprosessissa on vaihe, jossa hiilidioksidi erotetaan tuotekaasusta. Biopohjaisen hiilidioksidin talteenotto varastoitavaksi tässä vaiheessa voi tehdä Bio-SNG:n tuotantoprosessista jopa CO₂-negatiivisen. Puupohjainen biokaasu jalostetaan vastaamaan maakaasua, minkä vuoksi sen ainoa käytönaikainen merkittävä savukaasupäästö on typenoksidit (Asikainen & Jalovaara, 2002).

Suomen sähkönkulutus on kasvanut viimeisten 25 vuoden aikana merkittävästi nopeammin kuin kaukolämmön kysyntä ja tämän trendin odotetaan jatkuvan. Jotta energiatehokkaan CHP-tuotannon osuus sähköntuotannosta pysyisi jatkossakin korkealla, on tärkeää, että CHP-tuotannon rakennusasteita kohotetaan. (Siitonen & Rauhamäki, 2009)

Korkeisiin rakennusasteisiin päästään kombivoimalaitoksilla, minkä vuoksi kaasuilla on jatkossakin oma paikkansa Suomen energiantuotannossa. Bio-SNG:n avulla voidaan yhdistää energiatehokkaiden kombivoimalaitosten ja uusiutuvien metsäbiomassojen edut.

Biokaasuja voidaan käyttää myös ajoneuvoissa, mikä edistää EU:n tavoitetta lisätä biopolttoaineiden osuutta liikennekäytössä kymmeneen prosenttiin vuoteen 2020 mennessä (EC, 2009b).



KUVA 1. IEA:N ILMASTONMUUTOKSEN HILLITSEMISEEN TÄHTÄÄVÄ BLUE MAP -SKENAARIO (IEA, 2010)

Tässä työssä tarkastellaan puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun energiatehokkuutta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Puupohjaista biokaasua valmistetaan kaasuttamalla mm. metsätähteistä ja metsäteollisuuden sivuvirroista. Tuotekaasu jalostetaan samanlaatuiseksi maakaasun kanssa, minkä ansiosta sen siirrossa ja jakelussa voidaan hyödyntää jo olemassa olevaa maakaasuputkistoa. Tuotantoketju koostuu raaka-aineen korjuusta, kuljetuksesta ja esikäsittelystä sekä biokaasun tuotannosta biojalostamossa, biokaasun siirrostä ja loppukäytöstä (Kuva 2).



KUVA 2. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJU

1.2 Tutkimuskysymys ja työn tavoitteet

Puupohjaista biokaasua on tähän mennessä tuotettu vain pienen kokoluokan pilottilaitoksissa, mutta suuren kokoluokan biojalostamon rakentamiseksi on käynnissä selvityksiä Suomessa ja Ruotsissa. Tuotantoketjun ominaisenergiankulutuksen laskeminen mahdollistaa tuotantoketjun energiatehokkuuden vertaamisen puun vaihtoehtoiisiin energiakäyttökohteisiin.

Tämän diplomityön tavoitteena on tarkastella puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun energiatehokkuutta. Lisäksi tavoitteena on tarkastella tuotantoketjussa ja loppukäytössä syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä.

Tutkimuskysymys:

Kuinka paljon puupohjaisen biokaasun tuotanto kuluttaa energiaa ja aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä tuotantoketjunsä aikana?

Kysymykseen pyritään vastaamaan laskemalla, kuinka monta yksikköä energiaa yhden puupohjaisen biokaasu -yksikön (MWh) tuotantoketjun aikana kuluu. Lisäksi lasketaan, kuinka monta yksikköä hiilidioksidiekvivalentteja kasvihuonekaasupäästöjä syntyy yhtä puupohjaista biokaasu -yksikköä ($\text{gCO}_{2,\text{ekv}}/\text{MJ}_{\text{SNG}}$) kohden. Työssä lasketaan nettopäästöjen lisäksi bruttopäästöt. Tuotantoketjun päästöjä verrataan myös EU:n uusiutuvan energian direktiivissä eli ns. RES-direktiivissä uusiutuville liikenteen biopolttoaineille asetettuihin vaatimuksiin sekä Euroopan komission kertomuksessa KOM(2010)11 kaasumaisille biomassalähteille sähköntuotannossa ja lämmityksessä asetettuihin kestävyysliittymiin vaatimuksiin.

Työssä tarkastellaan Sisä-Suomessa sijaitsevaa puupohjaista biokaasua tuottavaa biojalostamoä, jonka tuotantoteho on 200 MW_{SNG}. Tässä työssä oletetaan, että biojalostamo kytketään kaukolämpöverkkoon ja sähköverkkoon. Näin ollen biojalostamolta voidaan myydä kaukolämpöä läheiselle yhdyskunnalle. Tilanteesta riippuen sähköä voidaan joko ostaa tai myydä.

Toisessa luvussa tarkastellaan bio-SNG:n tuotannossa käytettäviä kaasuttimia, aiemmin tehtyjä elinkaaritutkimuksia sekä Suomessa ja maailmalla rakennettuja laitoksia ja käynnissä olevia projekteja. Kolmannessa luvussa käydään läpi tuotantoketjujen tarkasteluun käytettäviä menetelmiä, energiatehokkuuteen ja kasvihuonekaasupäästöihin liittyviä tunnuslukuja sekä EU:n uusiutuvia polttoaineita käsittelevää RES-direktiiviä, minkä lisäksi tarkastellaan metsäbiomassan energiakäytön kasvihuonekaasupäästöjä ja kestävyyskriteerejä. Neljännessä luvussa käydään läpi koko puupohjaisen biokaasun tuotantoketju ja esitellään käytössä olevia teknologioita ja laskennan lähtötietoja. Viidennessä luvussa käydään läpi kunkin tuotantoketjun vaiheen laskentatulokset ja erityisesti biojalostamon energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt osaprosesseittain. Viidennessä luvussa esitetään lisäksi lopulliset tulokset eli energiatehokkuus ja kasvihuonekaasupäästöt sekä verrataan niitä EU:n asettamiin kestävyyskriteereihin. Kuudennessä luvussa arvioidaan tulosten luotettavuutta herkkyytstarkastelujen avulla. Seitsemännessä luvussa vedetään johtopäätökset ja pohdinnat sekä esitetään tarpeet jatkotutkimuksille.

2 BIO-SNG:N TUTKIMUS JA KÄYNNISSÄ OLEVAT PROJEKTIT

2.1 Synteettisen maakaasun tausta

Ajatus synteettisen maakaasun valmistamisesta kehittyi 1960-luvulla Yhdysvalloissa kun maakaasun kysynnän voimakkaan kasvun pelättiin aiheuttavan ennen pitkää puutetta maakaasusta. Tutkimus synteettisen maakaasun tuottamisesta kivi- ja ruskohiilestä aloitettiin ja tutkimusta kiihdytti edelleen 1970-luvun öljykriisi. Synteettisen maakaasun tuottamiseen liittyvää tutkimusta suoritettiin myös Saksassa ja Isossa-Britanniassa, mutta ainoa kaupallisen kokoluokan laitos rakennettiin Pohjois-Dakotaan, Yhdysvaltoihin. Dakota Gasification Companyn ruskohiilestä 4,8 miljoonaa kuutiometriä SNG:tä päivässä tuottava tuotantolaitos otettiin käyttöön 1984 ja se on käytössä edelleen. Kiinnostus SNG:n tuottamiseen nousi uudelleen maakaasun hintojen noustessa 2000-luvun alussa. Kiinnostuksen kasvun syynä on myös valtioiden halu vähentää riippuvuutta maakaasun tuonnista ja mahdollisuus tuottaa uusiutuvista energialähteistä maakaasun veroista tuotetta eli biosynteettistä maakaasua. Kiinassa ja Yhdysvalloissa on käynnissä toistakymmentä coal-to-SNG -projektia ja Euroopassa on ainakin yksi varmistunut bio-SNG -projekti. (Kopyscinski et al., 2010)

Bio-SNG:hen liittyvää tutkimusta tehdään ympäri Eurooppaa: Alankomaissa ECN tutkii epäsuoraa kaasutusta ja tuotekaasun tervanpoistotekniikoita, Suomessa VTT tutkii ultrapuhtaan polttokaasun valmistusta ja paineistettua happikaasutusta, Sveitsissä PSI on kehittänyt metanointia, Tanskassa Haldor Topsoe kehittää tervayhdisteiden katalyyttistä krakkausta ja metanointia.

2.2 Kaasutus ja kaasutintyytit

Kaasutus on hiilipitoisen polttoaineen konversiota kaasumaiseksi tuotteeksi, jolla on hyödynnettävissä oleva lämpöarvo. Kaasutin on bio-SNG:n tuotantoprosessin tärkein yksittäinen komponentti, minkä vuoksi sitä käsitellään jo tässä vaiheessa työtä. Lisäksi tässä esiteltävät kaasutintyytit ovat olleet ja ovat edelleen tutkimuksen kohteena nimenaan synteetikaasusovelluksiin.

Nykyään hallitseva kaasutusteknologia on osittaishapetus, jolla tuotettu synteetikaasu koostuu pääasiassa vedystä ja hiilimonoksidista vaihtelevissa suhteissa. Hapettimena voidaan käyttää puhdasta happea, ilmaa tai näiden ja vesihöyryn seoksia. Osittaishapetuksella voidaan kaasuttaa kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia raaka-aineita. (Higman & van der Burgt, 2008) Ilmankaasutuksen haittapuolena on tuotekaasun korkea tyyppi-toisuus, joka alentaa tuotekaasun lämpöarvoa.

Biomassan kaasuttamiseen käytettävien reaktoreiden tärkeimmät perustyytit ovat kiintopeti-, pöly- ja leijupetikaasuttimet. Kaasuttimet voidaan jakaa edelleen lämmöntuontitavasta riippuen epäsuoriin ja suoriin kaasuttimiin. Epäsuorassa kaasuttimessa kaasutus ja jäännöshiilen polttaminen tapahtuvat erillään toisistaan, jolloin kaasutuksen tarvitsema lämpö tuodaan kaasuttimeen epäsuorasti.

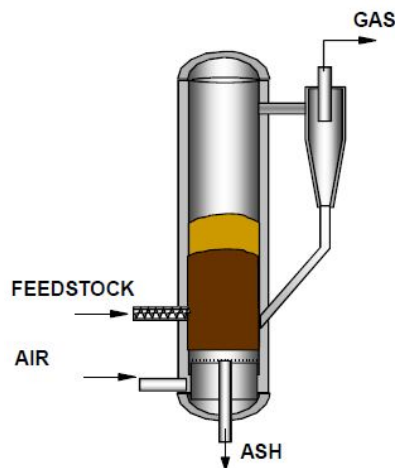
Tässä luvussa käsitellään kuitenkin ainoastaan ne kaasutintyytit, jotka soveltuvat parhaiten synteetikaasuntuotantoon biomassasta. Kiintopetikaasuttimia ei käsitellä, koska ne soveltuvat vain pieneen kokoluokkaan (Kurkela, 2010). Pölykaasuttimia ei käsitellä,

koska niistä saatavan tuotekaasun metaanipitoisuus on matala, minkä vuoksi ne eivät sovellu hyvin bio-SNG:n tuotantoon. Tämän lisäksi pölykaasuttimien vaatimaa biomassan torrefiointia eli paahtamista ei ole vielä demonstroitu suuressa kokoluokassa. Tarkasteltaviksi kaasutintyypeiksi valittiin siten leijupetikaasuttimet epäsuoralla ja suoralla lämmöntuonnilla.

2.2.1 Leijupetikaasuttimet suoralla lämmöntuonnilla

Leijupetikaasuttimessa polttoaine syötetään polttoaineen ja petimateriaalin muodostamaan petiin, jota leijutetaan alhaalta päin virtaavalla kaasutusaineella. Kaasutusaineena käytetään ilmaa, vesihöyryä, happea tai näiden seoksia. Varsinainen tuotekaasu poistuu reaktorin yläosasta kuljettuaan syklonin läpi. Syklonissa tuotekaasusta erottuvat petimateriaali ja vain osittain reagoineet polttoainepartikkelit palautetaan reaktoriin (Kuva 3). Leijupetikaasuttimelle on hyvästä sekoittumisesta johtuen ominaista erinomainen lämmön- ja aineensiiro kaasujen ja polttoainepartikkeleiden välillä, minkä ansiosta reaktorin lämpötilajakauma on tasainen ja lämpötilataso edistää tervojen hajoamista. (VTT, 2004)

Leijutusnopeutta lisättäessä petiin alkaa muodostua ylöspäin nousevia kaasukuplia. Kuplivalle leijukerrokselle (BFB, Bubbling Fluidised Bed) on ominaista selkeä leijukerroksen pinta. Leijutusnopeutta edelleen kasvatettaessa alkaa yhä suurempi osa leijukerroksen partikkeleista tempautua kaasuvirtauksen mukaan, jolloin kupliva leijutila muuttuu turbulenttiseksi leijutilaksi ja petimateriaalia on palautettava reaktoriin syklonin kautta. Tätä leijutilaa kutsutaan kiertäväksi leijupediksi (CFB, Circulating Fluidised Bed). (Hyppänen & Raiko 2002)



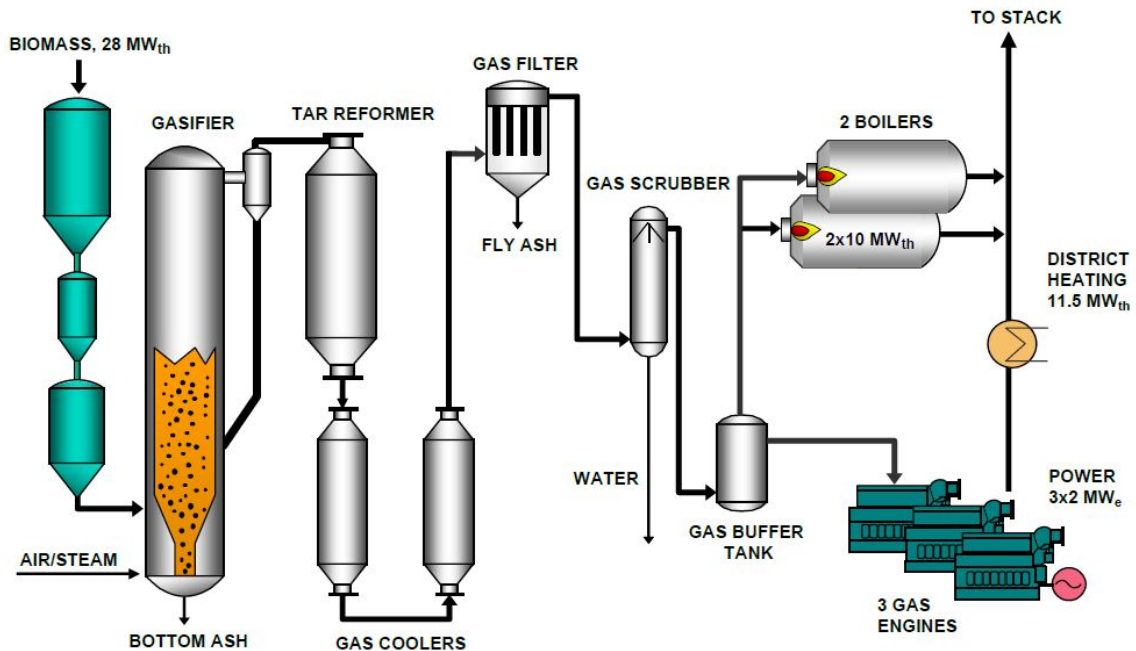
KUVA 3. LEIJUKERROSKAASUTTIMEN PERIAATEKUVA (KURKELA 2010)

Andritz-Carbona

Andritz-Carbonan synteesikaasua tuottavat kaasuttimet ovat paineistettuja kuplapetikaasuttimia (BFB), joissa leijutusaineena käytetään hapen ja vesihöyryn seosta. Andritz toimittaa kaasuttimia kokoluokassa 30–150 MW_{th}. Polttoaineeksi soveltuu mm. kuori ja muut puutähteet, metsätähdehake sekä pelletit ja sahanpuru.

Andritz-Carbona on toimittanut BFB-kaasuttimen Tanskan Skivessä sijaitsevaan CHP-laitokseen (Kuva 4). Kaasutin toimii 0,5 – 2 bar(g) paineessa ja kaasutusaineena käy-

tään ilman ja vesihöyryn seosta. Polttoaineena käytetään alustavasti pellettejä, mutta myös haketta voidaan käyttää. Tuotekaasu poltetaan kaasumoottoreissa ja kaasukattiloissa, jolloin syntyy sähköä ja lämpöä. Laitos on samalla kaasuttimen t & k -alusta puhtaan kaasun tuottamiseksi BtL / SNG -käyttöön, sillä jos leijutusaine vaihdettaisiin hapen ja höyryn seokseksi ja paine nostettaisiin 10 bar(g) paineeseen, voitaisiin polttoaineteho nostaa 150 MW_{th} tasolle. (Salo, 2010) Skiven CHP-laitoksen teknisiä tietoja on esitetty taulukossa 1.



KUVA 4. SKIVEN CHP-LAITOKSEN KYTKENTÄ (SALO 2010)

TAULUKKO 1 SKIVEN CHP-LAITOKSEN TEKNISIÄ TIETOJA

Polttoaineteho	19,5 MW _{th}	(maksimiteho 28 MW _{th})
Kaasutuslämpötila	850 °C	
Petimateriaali	dolomiitti	
Tuotanto CHP-ajossa	6 MWe / 11,5 MW _{heat}	3 x 2 MWe kaasumoottorit + jätelämpökattila
Tuotanto kaukolämpöajossa		2 x 10 MW _{th} kaasukattilat
Kokonaishyötysuhde	n. 90 %	
Tuotekaasun koostumus	CO 20 til-% CO ₂ 12 til-% H ₂ 16 til-% CH ₄ 4 til-% N ₂ tasapaino LHV 4,8-5,2 MJ/m ³ n	tervanpoiston jälkeen

Foster Wheeler

Stora Enson Varkauden sellutehtaalle rakennettiin vuonna 2008 meesauunille puupohjaisesta biomassasta tuotekaasua tuottava ilmanpaineinen kaasutin. Foster Wheelerin toimittaman CFB-kaasuttimen polttoaineteho on 12 MW_{th} (Taulukko 2)

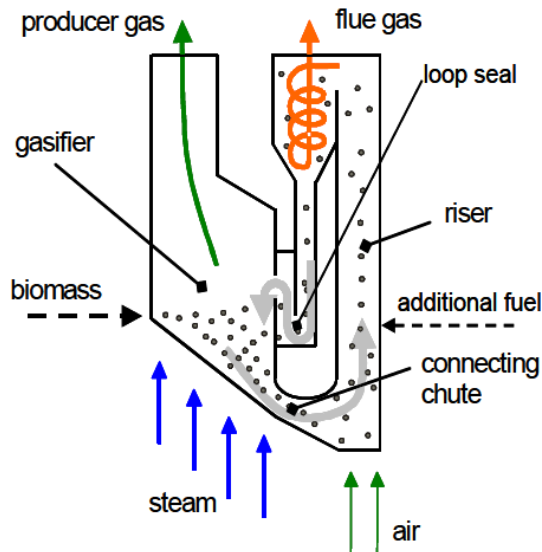
Varkaudessa testattiin ultrapuhtaan polttokaasun (UCG, Ultra Clean Gas) valmistusta Fischer-Tropsch -synteesiä varten. Kaasuttimen leijutusaine vaihdettiin testien ajaksi hapen ja vesihöyryn seokseksi, minkä jälkeen osa tuotekaasuvirrasta johdettiin ultrapuhdistukseen ja FT-synteesiin. (Jokela, 2011) Samaa kaasutinta voitaisiin käyttää myös bio-SNG:tä tuottavalla biojalostamolla.

TAULUKKO 2 VARKAUDEN CFB-KAASUTTIMEN TEKNISIÄ TIETOJA (JOKELA 2011)

Polttoaineteho	12 MW _{th}	
Kaasutuslämpötila	870 – 890 °C	
Petimateriaali	kalkkikiven ja hiekan seos	
hapen ja höyryn suhde	40-50 % happea	
Tuotekaasun koostumus	CO 14 til-% CO ₂ 19 til-% H ₂ 18 til-% CH ₄ 5 til-% H ₂ O 34 til-% N ₂ loput H ₂ S 120-200 ppm LHV 4,8-5,2 MJ/m ³ n	H ₂ S-pitoisuus laski alle 10 ppb:n lopullisen kaasun puhdistuksen jälkeen.

2.2.2 Leijupetikaasuttimet epäsuoralla lämmöntuonnilla

DFB-kaasuttimet (Dual Fluidised Bed, ”kaksoisleijupeti”) ovat olleet viime vuosina paljon esillä eri synteesikaasusovelluksia käsittelevissä tutkimuksissa. DFB-kaasuttimessa kaasutuksen tarvitsema lämpö tuodaan kierrättämällä petimateriaalia erillisten kaasutus- ja jäännöshiilen polttamisreaktoreiden välillä. Kuvassa 5 esitetty FICFB-kaasutin (Fast Internally Circulating Fluidised Bed) on eräs DFB-kaasutintratkaisu, joka koostuu BFB-kaasuttimesta ja CFB-tulipesästä. Biomassa syötetään BFB-kaasuttimeen, jossa se kaasutetaan höyryn avulla. Jäännöshiili ja petimateriaali johdetaan kourun kautta CFB-tulipesään, jossa käytetään leijutusaineena ilmaa. Jäännöshiili palaa tulipesässä ja lämmittää petimateriaalia. Kuuma petimateriaali erotetaan savukaasuista syklonissa ja palautetaan kaasuttimeen. Erillisten reaktoreiden ansiosta tuotekaasussa on ainoastaan polttoaineen mukana tullutta tyyppiä, eikä erillistä hapentuotantoyksikköä tarvita. Myös suuri osa hiilidioksidista poistuu savukaasujen mukana, eikä alenna tuotekaasun lämpöarvoa. (Seiffert et al., 2009)



KUVA 5. PERIAATEKUVA DFB/FICFB-KAASUTTIMESTA. (SEIFFERT ET AL 2009)

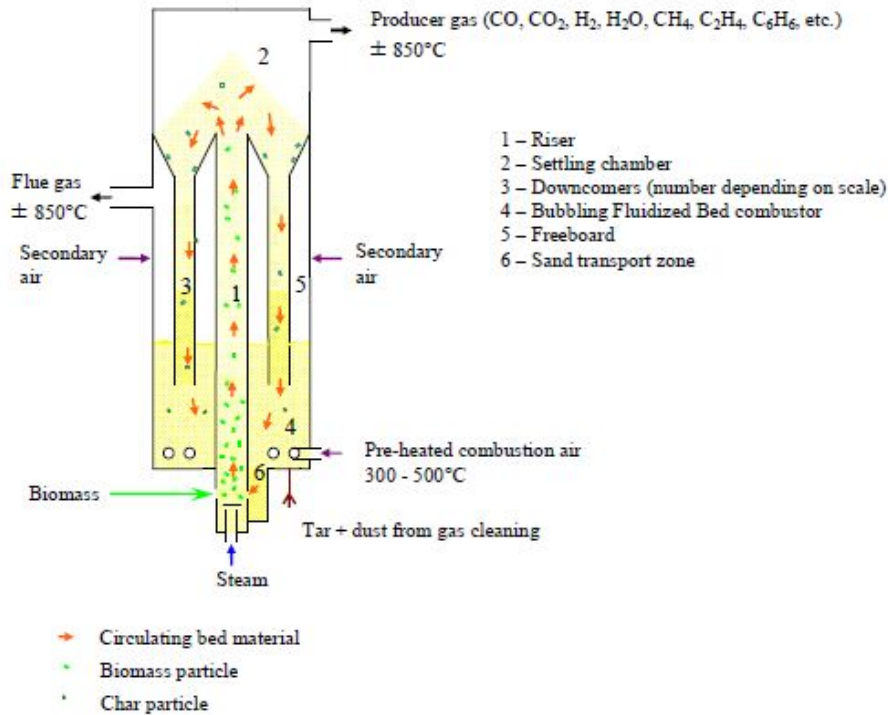
Repotec ja Metso

Luvuissa 2.3 ja 2.4 käsiteltävissä Güssingin ja GoBiGasin bio-SNG -projekteissa käytetään epäsuoria FICFB-kaasuttimia. Güssingin kaasutin on Repotecin valmistama. Go-BiGasin ensimmäisen vaiheen kaasuttimen toimittaa Repoteciltä hankkimallaan lisenssillä suomalainen Metso.

ECN

Energy Research Center of the Netherlands (ECN) kehittämässä epäsuorassa Milena-kaasuttimessa biomassaa kaasutetaan vesihöyryllä nousuputkessa, johon tuodaan lisäksi tulipesästä kuumaa hiekkaa (Kuva 6). Nousuputkessa kaasuuntuvan biomassan nopeus kasvaa ja se kulkeutuu ylös tasaantumiskammioon, jossa petimateriaali sekä jäännöshiili ja muut kiinteät partikkelit erottuvat tuotekaasusta ja kulkeutuvat laskuputkien kautta tulipesään. BFB-tulipesässä palavaa jäännöskoksia ja lämpenevää petimateriaalia leijutetaan esilämmitetyllä ilmalla. Pedin yläpuolelle syötettävän sekundääri-ilman avulla vähennetään häkä- ja hiilivetypäästöjä. Savu- ja tuotekaasut poistuvat Milena-kaasuttimessa FICFB-kaasuttimen tavoin eri kautta, minkä ansiosta tuotekaasun lämpöarvo on hyvä. (van der Meijden, 2010)

Milena-kaasuttimen 800 kW_{th} pilottilaitos otettiin käyttöön vuonna 2008. Polttoaineteholtaan 12 MW_{th} demonstraatiolaitoksen rakentaminen on tarkoitus aloittaa vuonna 2013. Demonstraatiolaitoksen jälkeen seuraavaksi kokoluokaksi on suunniteltu 50 MW_{th} ja kaupallisen kokoluokan laitoksen ennakoitua olevan polttoaineteholtaan 50–500 MW_{th}, jolloin bio-SNG:n tuotantomäärä olisi noin 0,04-0,4 miljardia kuutiometriä vuodessa. (ECN, 2010)



KUVA 6. MILENA-KAASUTTIMEN PERIAATEKUVA. (VAN DER MEIJDEN 2010)

2.2.3 Kaasuttimien vertailu

Synteesikaasusovelluksiin soveltuvia kaasuttimia on vertailtu taulukossa 3. Kurkela et al. (2008) päätyivät jatkokehittämään paineistettua happi-höyry -kaasutinta VTT:llä. Clausen (2011) keräsi biomassan synteesikaasusovelluksissa käytetyt kaasutintyyppit ja totesi, että yleisimmin on valittu paineistettu happi-höyry -kaasutus BFB-reaktorilla.

Epäsuoraan lämmöntuontiin perustuvalla höyrykaasuttimella on etunsa ja GoBiGas-projektin demonstraatiolaitos voi osoittaa kahden leijureaktorin monimutkaista järjestelmää kohtaan tunnetut huolet aiheettomaksi. Lisäksi hapen tuottaminen on kallista, mikä voi tehdä epäsuorista kaasuttimista kannattavampia kuin happi-höyry kaasuttimista.

TAULUKKO 3 SYNTEESIKAASUSOVELLUKSIIN SOPIVIEN KAASUTINTYYPPIEN VERTAILU (KURKELA ET AL. 2008 JA CLAUSEN 2011)

kaasutusteknologia	hyvät puolet	huonot puolet
happi-höyry-kaasutus leijukerosreaktorissa	<ul style="list-style-type: none"> + Hyvä hiilikonversio (93-98 %) + Hyvä kemiallinen hyötysuhde (75-80 %) + Reformoitu kaasu soveltuu synteetikaasusovelluksiin + Paineistus eduksi synteetikaasusovelluksissa + Yksinkertainen järjestelmä + Kokemuspohja on kohtuullinen + Hiilivetyjen kokonaispitoisuus kohtuullinen + kokoluokka 100-200 MW_{th}, jopa 567 MW_{th} 	<ul style="list-style-type: none"> - kaasutin ja reformeri vaativat happea, jonka tuottaminen on kallista
höyrykaasutus epäsuoralla lämmön tuonnilla	<ul style="list-style-type: none"> + Hyvä kemiallinen hyötysuhde + Reformoidun kaasun latu on hyvä ja se soveltuu hyvin synteetikaasusovelluksiin + Tyytön tuotekaasu + Kokoluokka 100-200 MW_{th} tai alle 	<ul style="list-style-type: none"> - Kaasutusvaiheen hiilikonversio matala (75-85 %) - Paljon tervoja - Järjestelmän monimutkaisuus kahden leijureaktorin ja niiden välisten virtojen vuoksi - Kokemuspohja hyvin vähäinen - Happea tarvitaan reformerissa

2.3 Valmiit laitokset

Güssing

Itävaltalaisen Güssingin kaupunkiin vuonna 2002 valmistunut hakevoimalaitos on toiminut teknologia-alustana myös puupohjaisen biokaasun valmistukselle. EU:n osittain rahoittaman projektin tarkoituksena oli demonstroida bio-SNG:n tuotantoa kiinteistä biopolttoaineista. Lisäksi tavoitteena oli integroida bio-SNG:n tuotanto olemassa olevaan infrastruktuuriin ja siten edistää EU:n tavoitetta uusiutuvien polttoaineiden kasvattamisesta liikennepolttoaineissa. Projektin toteuttaneeseen konsortioon kuului tahoja Itävallasta, Tšekin tasavallasta, Ranskasta, Saksasta ja Sveitsistä. (Seiffert et al., 2009)

Güssingin puolikaupallinen teholtaan 1 MW_{SNG} bio-SNG:n tuotantolaitos (Kuva 7) toimi joulukuusta 2008 vuoden 2009 loppuun. Kaasutus perustuu Repotecin valmistamaan

polttoaineteholtaan 8 MW_{th} FICFB-kaasuttimeen. Metanoinnin toimitti sveitsiläinen Paul Scherrer Institute. Güssingin laitoksen tuottama puupohjainen biokaasu täytti Itävallan ja Saksan maakaasuverkoston vaatimukset verkkoon syötettävälle kaasulle ja soveltui käytettäväksi olemassa olevissa maakaasuautoissa. (Rauch, 2011)



KUVA 7. GÜSSINGIN 1 MW_{SNG} DEMONSTRAATIOLAITOS (KRÖCHER ET AL. 2010)

2.4 Rakenteilla olevat laitokset

GoBiGas

Göteborg Energi Ab rakennuttaa Ruotsin Göteborgiin biojalostamon, joka tuottaa puupohjaista biokaasua ensimmäisessä vaiheessa 20 MW_{SNG} teholla vuosituotannon ollessa 160 GWh.

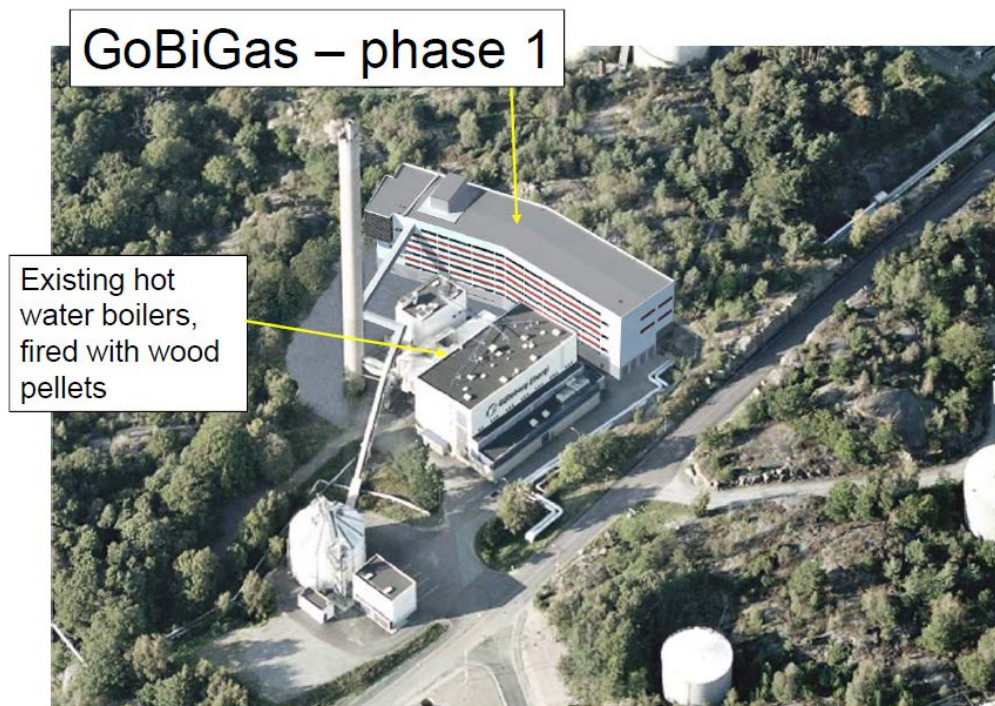
Ensimmäisessä vaiheessa käytetään polttoaineena puupellettejä. GoBiGas-projektin tavoitteena on 65-70 % saanto biomassasta metaaniksi ja yli 90 % kokonaishyötysuhde. Ensimmäinen vaihe on toiminnassa alkuvuodesta 2013. Biojalostamo tuottaa puupohjaisen biokaasun lisäksi kaukolämpöä, jota tuotetaan myös laitoksen matalalämpöisistä virroista lämpöpumppujen avulla. Tervanpoistossa käytetään rypsimetyyliesteriä (RME), joka on ensimmäisen sukupolven biodiesel. GoBiGas-projektin alustavat tekniset tiedot on esitetty taulukossa 4. (Gunnarsson, 2011)

Ensimmäisen vaiheen epäsuoraan kaasutukseen perustuvan demonstraatiolaitoksen evaluoinnin jälkeen päätetään projektin toisen vaiheen aloittamisesta. Toisessa vaiheessa on tarkoitus kasvattaa tuotantoteho 80-100 MW_{SNG}:iin, jolloin vuosituotanto olisi 640-800 GWh. Göteborg Energi Ab julkaisi 18.4.2012 lehdistötiedotteen, jossa se ilmoittaa lykkäävänsä tulevia biokaasuhankkeitaan. GoBiGas-projektin ensimmäinen vaihe viedään loppuun, mutta toisen vaiheen aloittaminen siirtyy toistaiseksi tuntemattomaan ajankohtaan. (Törnblom, 2012)

Rakenteilla olevan ensimmäisen vaiheen kaasuttimen toimittaa suomalainen Metso ja metanoinnin tanskalainen Haldor Topsøe.

TAULUKKO 4 GOBiGAS-BIOJALOSTAMON ALUSTAVIA TEKNISIÄ TIETOJA (GUNNARSSON 2011)

Polttoaineteho	32 MW _{th}	pellettejä 1. vaiheessa
SNG:n tuotantoteho 1. vaihe	20 MW _{SNG}	=160 GWh/a
SNG:n tuotantoteho 2. vaihe	80-100 MW _{SNG}	=640-800 GWh/a
Kaukolämpöteho 1. vaihe	5 MW _{heat}	
Lämpöpumpuille lämpöä 1. vaihe	6 MW	
Omakäyttösähkönkulutus	3 MW _e	
RME:n kulutus	0,5 MW	käytetään tervanpoistossa
Saanto	65-70 %	tavoite
Kokonaishyötysuhde	> 90 %	
Kaasun ominaisuudet	Paine n. 5 bar CH ₄ > 94 % H ₂ < 2,0 % CO ₂ +N ₂ < 4,0 %	



KUVA 8. GOBiGAS-PROJEKTIN ENSIMMÄINEN VAIHE (GUNNARSSON 2011)

2.5 Meneillään olevat projektit

E.On Bio2G

E.On suunnittelee keskisuuren kokoluokan biojalostamon rakentamista Etelä-Ruotsiin. Landskronaan tai Malmöön rakennettava bio-SNG:n tuotantolaitos olisi teholtaan 200 MW_{SNG} eli biokaasua tuotettaisiin vuodessa 1,6 TWh (20 000 m³/h). Bio2G-biojalostamo tuottaisi bio-SNG:n lisäksi sähköä ja lämpöä. Lämpö on tarkoitus myydä kaukolämpöverkkoon. E.On täydensi laitoksen ympäristölupahakemusta huhtikuussa

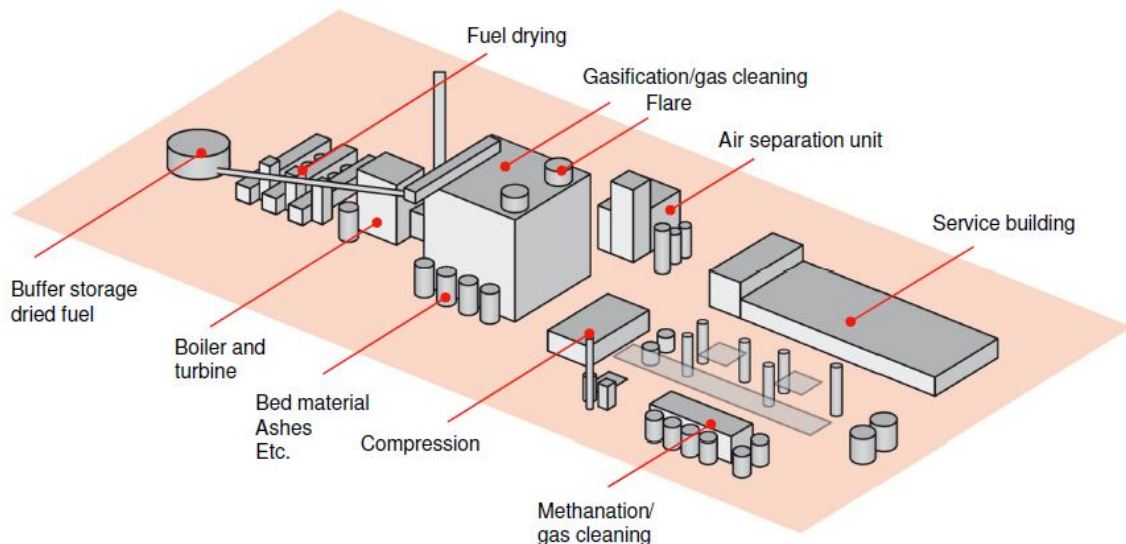
2012 ja päivitetyn arvion mukaan jalostamo otettaisiin käyttöön mahdollisesti vuoden 2015 aikana (E.On, 2012)

Bio2G-projektin biojalostamolla käytettäisiin polttoaineena metsätähteitä (latvuksia, oksia ja kantoja), sahojen sekä sellu- ja paperitehtaiden sivutuotteita (sahanpurua ja kuorta), maataloustuotteita (olkia, pajuja), kasvien tähteitä (siementen ja pähkinöiden kuoret) sekä purkupuuta. (Ståhl, 2011)

Bio2G-projektin biojalostamon alustavat tekniset tiedot on esitetty taulukossa 5 ja alustava layout kuvassa 9.

TAULUKKO 5 E.ON BIO2G-PROJEKTIN ALUSTAVIA TEKNISIÄ TIETOJA (FREDRIKSSON MÖLLER 2011, STÅHL 2011)

Polttoaineteho	345 MW _{th}	(josta voimakattila 40 MW _{th})
SNG:n tuotantoteho	200 MW _{SNG}	=1,6 TWh/a, 20 000 m ³ /h
CHP-ajo	14 MW _e / 55 MW _{heat}	omakäyttösähkö
Lauhdeajo	23 MW _e / 11 MW _{heat}	(9 MW sähköä myyntiin)
Saanto	60-65 %	
Kokonaishyötysuhde	≤ 80 %	



KUVA 9. BIO2G-BIOJALOSTAMON ALUSTAVA LAYOUT. (STÅHL 2011)

Joutsenon biojalostamo

Gasum Oy, Metsä-Fibre Oy ja Helsingin Energia suunnittelevat puupohjaista biokaasua tuottavan biojalostamon rakentamista Joutsenoon. Biojalostamo on tarkoitus integroida Metsä-Fibren sellutehtaaseen. Jalostamo tuottaisi uusiutuvasta puuraaka-aineesta biokaasua, joka siirrettäisiin Gasumin kaasuverkostossa käyttökohteisiin, mm. Helsingin Energian Vuosaaren voimalaitokselle. Jalostamon suunniteltu tuotantoteho on 200 MW_{SNG}. Konsortion tavoitteena on saada mahdollisen investointipäätöksen tekemistä varten tarvittavat tiedot valmiiksi vuoteen 2013 mennessä. Toteutuspäätöksen jälkeen laitoksen rakentaminen kestää 2-3 vuotta. (Gasum, 2011)

Tässä työssä tarkasteltava biojalostamo on suuruusluokaltaan sama kuin Joutsenoon suunniteltu biojalostamo, mutta sellutehtaan asemasta se on integroitu kaukolämpöverkkoon. Näin ollen työssä esitetyt lukuarvot (hyötysuhteet jne.) eivät välttämättä vastaa Joutsenon biojalostamon lukuarvoja.

2.6 Tuotantoketjujen tarkasteluun käytettävät menetelmät

Tuotantoketjujen tarkasteluun on olemassa useita erilaisia menetelmiä. Antikainen (toim., 2010) esittelee Suomen ympäristökeskuksen raportissa elinkaarietodien nykytilaa, hyviä käytäntöjä ja kehitystarpeita. Elinkaarimetodien avulla pyritään arvioimaan tuotteiden koko elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia ja täydellisimmillään elinkaari kattaa kaikki tuotteen edellyttämät toiminnot tai palvelut raaka-aineiden hankinnasta hylkäämiseen saakka. Elinkaarimetodien ovat esimerkiksi ISO-standardin 14040-sarjan mukainen elinkaarinarvio (LCA) sekä termodynaamiset menetelmät. Muita elinkaarijohtamista tukevia menetelmiä ovat esimerkiksi hiilijalanjälki ja ekologinen jalanjälki.

Heino ja Nordlund (2010) toteavat em. raportin termodynaamisia menetelmiä käsittelevässä luvussa, että kattavan elinkaarinarvion tekeminen vaatii suhteellisen paljon resursseja sekä eksaktia tietoa, jota ei uudenlaisia tuotteita suunniteltaessa ole olemassa. Tällöin käytetään usein yksinkertaistettua elinkaarinarviointia. He jatkavat edelleen, että teolliselle toimijalle yksinkertaistetun elinkaarinarvion korvaaminen termodynaamisilla menetelmillä voi olla perusteltua, koska teolliset prosessit perustuvat energian ja materiaalin muuntamiseen energiaksi ja palveluksi. Termodynaamisten menetelmien etuina he pitävät lisäksi sitä, että laskelmat ovat suhteellisen yksinkertaisia.

Bio-SNG:n tuotantolaitoksia ei ole vielä rakennettu suuressa kokoluokassa, eikä tarkkaa tietoa ole saatavilla edes koelaitoksista. Tästä syystä tässä työssä tuotantoketjun energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen tarkasteluun on perusteltua soveltaa termodynaamisia menetelmiä eli massa- ja energiataaseita.

2.7 Bio-SNG:n elinkaaritutkimuksia

Steubing et al. (2011) tutkivat metsäbiomassasta tuotetun bio-SNG:n ympäristövaikutuksia kahdesta hautaan LCA-elinkaarinarvioinnin avulla. He tutkivat bio-SNG:n käyttöä asuintalon lämmityksessä kaasukattilalla, sähkön- ja lämmöntuotannossa suuren kokoluokan kombivoimalaitoksessa ja mikro-CHP -laitoksessa sekä liikennekäytössä. He huomioivat todellisten syntyneiden kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi kasvihuonekaasupäästöt, jotka vältetään bio-SNG:n käytöllä. Laskennan tuloksena saadut tuotantoketjujen kasvihuonekaasupäästöt on koottu taulukkoon 6. Elinkaaritarkastelun tuloksena todetaan, että Bio-SNG:n käytöllä on pienempi ilmasto- ja lämmittävä vaikutus kuin fossiililla vertailukohdalla, mutta toisaalta monella muulla osa-alueella kuten rehevöitymisen ja ekotoksikologian osalta bio-SNG:n käytöllä on suurempia vaikutuksia. Steubing et al. näkevät bio-SNG:n tulevaisuuden liikenteen biopoltoaineena.

TAULUKKO 6 STEUBING ET AL. (2011) LAATIMAN BIO-SNG:N LCA-TARKASTELUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT. LUVUT ON MUUTETTU YKSIKKÖÖN $g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG}$.

	lämmitys [g(CO _{2,ekv})/ MJ _{SNG}]	kombi- voimalaitos [g(CO _{2,ekv})/ MJ _{SNG}]	mikro- CHP [g(CO _{2,ekv})/ MJ _{SNG}]	liikenne [g(CO _{2,ekv})/ MJ _{SNG}]
Viljely	0,00	0,00	0,00	0,00
Korjuu	4,94	4,94	4,94	4,94
Kuljetus	0,87	0,87	0,87	0,87
Tuotanto	4,36	4,36	4,36	4,36
Siirto	4,36	0,58	4,36	1,45
Käyttö	0,58	0,58	0,87	0,58
Auto ja tie-infrastruktuuri	0,00	0,00	0,00	21,22
Kokonaispäästöt	15,12	11,34	15,41	33,43
Prosessilämmön hyödyntämisellä vältetyt päästöt	-34,3023	-34,3023	-34,3023	-34,3023
Nettovaikutus	-19,4767	-23,2558	-19,186	-1,16279

Biojalostamon hyötysuhde on laskelmissa vain 58 %, josta 39 prosenttiyksikköä on SNG:tä ja 19 prosenttiyksikköä prosessilämpöä. Steubing et al. (2011) toteavat, että hyötysuhde on matala, koska data pohjautuu ensimmäiseen rakennettuun laitokseen, jonka koko on luultavimmin epäoptimaalinen energiatehokkuuden kannalta.

Raaka-aineen hankintaetäisyys on ainoastaan 24 km, mikä on suuren kokoluokan laitokselle aivan epärealistisen lyhyt. Tervanpoistotekniikkana on käytetty tuotekaasun pesua rypsimetyyliesterillä (RME), joka on ensimmäisen sukupolven biodiesel ja josta aiheutuu huomattavia kasvihuonekaasupäästöjä tuotantovaiheeseen, minkä lisäksi RME:n tuotantoketjusta aiheutuvat typpipäästöt ovat pääsyyinä bio-SNG:n rehevöitymistä edistävään vaikutukseen. Kaikki laskennassa käytetyt arvot kuten verkkosähkön päästökerroin ja siirtoverkon ominaisuudet ovat sidoksissa Sveitsin lukuihin.

Pucker et al. (2012) puolestaan vertailivat LCA-elinkaariarviointia hyödyntäen bio-SNG:n ympäristövaikutuksia kolmella eri kaasutintyyppillä ja eri polttoaineilla. Tutkimuksessa Bio-SNG:n loppukäyttökohteena oli tilan lämmitys. Metsätähteistä tuotetun bio-SNG:n kasvihuonekaasupäästöt ovat eri kaasutintyypeillä seuraavat: pölykaasuttimella 11,39 g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG}, happi-höyry -kaasutukseen perustuvalla kiertopetikaasuttimella (CFB) 13,06 g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG} ja ilma-höyry -kaasutukseen perustuvalla epäsuoralla Milena kaasuttimella 8,89 g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG}. Tutkimuksen perusteella bio-SNG:n lämmityskäytöllä saavutetaan maakaasuun verrattuna 80 % vähemmän kasvihuonekaasupäästöihin ja 29 % vähemmän verrattuna lämmöntuottamiseen hakekattilalla. Laskennassa käytettyjen kaasuttimien polttoaineteho on suuruusluokalta noin tuhat megawattia, mikä voi osittain selittää laskennan lähtötietoina käytettyjä sängen korkeita saantoja, jotka ovat pölykaasutinketjulle 60 %, kiertopetikaasutinketjulle 75 % ja epäsuoralle Milena-kaasutinketjulle peräti 79 %.

3 ENERGIANKULUTUKSEN JA KASVIHUONEKAASU- PÄÄSTÖJEN LASKENTA

3.1 Energiatehokkuus ja energiatehokkuuden tunnusluvut

Energiatehokkuuden mittaamista ja energiatehokkuuden tunnuslukuja ovat aiemmin käsitelleet mm. Siitonen (2010) ja Auvinen (2008).

Energian loppukäytön tehokkuudesta ja energiapalveluista annetussa EU-direktiivissä energiatehokkuus määritellään suoritteen, palvelun, tavarun tai energiantuotoksen ja energiapanoksen välisenä suhteena. (EC, 2006)

VTT määrittelee energiatehokkuuden energiamääränä, joka kulutetaan jonkin tietyn hyödyllisen tuotteen, prosessin tai palvelun tuottamisessa. (VTT, 2007)

Energiatehokkuuteen liittyviä tai sen kanssa osittain päällekkäisiä käsitteitä ovat tehokas energian käyttö ja energiansäästö. VTT (2007) määrittelee tehokkaan energian käytön pienimpänä mahdollisena energiamääränä, joka vaaditaan jonkin tietyn hyödyllisen tuotteen, prosessin tai palvelun tuottamiseen. Energiansäästö puolestaan voidaan ymmärtää energian kulutuksen absoluuttisena vähenemisenä jonkin tietyn ajanjakson aikana. Energiaa voidaan säästää parantamalla energiatehokkuutta tai vähentämällä tuotettujen palveluiden määrää tai laatua.

Energiatehokkuus voidaan yksinkertaisimmillaan laskea kaavalla (VTT, 2007):

$$EE_t = \frac{Q_t}{E_t}, \quad 3.1$$

jossa EE_t on energiatehokkuus ajan hetkellä t , Q_t prosessista saatava hyödyllinen tuote ajan hetkellä t ja E_t prosessiin syötetty energiamäärä ajan hetkellä t .

Energiatehokkuus on yksinkertaiselta vaikuttavasta laskentakaavasta huolimatta monimutkainen käsite ja se riippuu voimakkaasti ajasta, käytetyistä systeimirajauksista ja allokointimenetelmistä. Aika t voi olla vain lyhyt hetki kuten sekunti, mutta myös yhtä hyvin pitempi ajanjakso kuten tunti, viikko tai vuosi. Prosessista saatavat hyödylliset tuotteet vaihtelevat käytetyn systeimirajauksen mukaan ja prosessiin syötettävä energiamäärä tulisi allokoida kaikille tuotteille jollain useista vaihtoehtoisista allokointimenetelmistä. (VTT, 2007)

Eri tuotteiden energiatehokkuuksien vertaaminen on hyvin vaikeaa kolmesta syystä: ensiksi tuote, jonka valmistamiseen on käytetty enemmän energiaa voi olla kestävämpi ja pitkäikäisempi kuin energiatehokkaampi tuote. Toiseksi prosessista saatavien eri tuotteiden arvostus ja energiapanosten allokointi eri tuotteille voidaan tehdä eri menetelmillä. Kolmanneksi vertailun epävarmuutta lisäävät tiedon ja läpinäkyvyyden puute koskien eri tahojen laskelmissaan valitsemia systeimirajoja ja allokointimenetelmiä. (VTT, 2007)

Energiatehokkuuden muutoksia voidaan seurata erilaisten mittareiden avulla, jotka jakautuvat neljään kategoriaan: (Patterson, 1996)

1. termodynaamiset mittarit perustuvat [W, J, %]
2. fyysis-termodynaamiset [J/kg, MWh/t, W/kg]
3. taloudellis-termodynaamiset [EUR/Wh, EUR/J]
4. taloudelliset [EUR/t, EUR/a]

Kilponen (2003) lisää listaan vielä viidennen kategorian, joka on ympäristötekniiset mittarit. Niiden avulla mitataan energiankäyttöön liittyvät ominaispäästöt ja saadaan ominaisenergiankulutuksen lisäksi lisätietoa käytetyistä energialähteistä.

Vaikka kaasu on fyysinen tuote, on sen tärkein ominaisuus energiasisältö, minkä vuoksi Bio-SNG:n tapauksessa on parempi käyttää termodynaamisia mittareita. Bio-SNG:n tuotantoketjun energiatehokkuus ilmoitetaan hyötysuhteena ja sen yksikkö on prosentti. Tuotantoketjun energiatehokkuutta tarkastellaan Lovinsin (2004) esittämällä tavalla. Lovins esitti, että tuotantoketjun energiatehokkuus lasketaan kertomalla tuotantoketjun eri osien hyötysuhteet keskenään. Alla on Lovinsin (2004) esittämä laskentakaava muokattuna puupohjaisen biokaasun tuotantoketjulle soveltuvaksi:

$$\eta_{\text{tuotantoketju}} = \eta_{\text{korjuu, kuljetus ja esikäsittely}} \times \eta_{\text{biojalostamo}} \times \eta_{\text{siirto}} \times \eta_{\text{loppukäyttö}} \quad 3.2$$

Tuotantoketjun energiankulutus voidaan ilmoittaa myös hyötysuhteen käänteislukuna, jolloin käytettävä yksikkö on MWh/MWh_{SNG}. Tällöin yhden puupohjaisen biokaasu - megawattitunnin tuottamiseen ja loppukäyttökohteeseen siirtämiseen kuluva energiamäärä käy selvemmin ilmi.

Biojalostamon energiatehokkuus määritellään sen lopputuotteiden (puupohjainen biokaasu, lämpö- ja sähköenergia) energiasisältöjen ja energiankulutuksen välisenä suhteena. Kun kaikki lopputuotteet otetaan huomioon, puhutaan biojalostamon kokonaishyötysuhteesta ja kun tarkastellaan ainoastaan puupohjaisen biokaasun tuotantomäärää suhteessa käytetyn puun energiasisältöön, puhutaan biojalostamon saannosta.

Biojalostamon kokonaishyötysuhde lasketaan kaavalla:

$$\eta_{\text{biojalostamo}} = \frac{Q_{\text{Bio-SNG}} + Q_{\text{ulos}} + P_{\text{ulos}}}{Q_{\text{raaka-aine}} + Q_{\text{sisään}} + P_{\text{sisään}}}, \quad 3.3$$

jossa $Q_{\text{Bio-SNG}}$ on tuotetun bio-SNG:n energiamäärä, Q_{ulos} biojalostamolta vietävän lämmön energiamäärä, P_{ulos} biojalostamolta vietävän sähkön energiamäärä, $Q_{\text{raaka-aine}}$ biojalostamolle tuodun raaka-aineen energiamäärä, $Q_{\text{sisään}}$ biojalostamolle tuodun lämmön energiamäärä ja $P_{\text{sisään}}$ biojalostamolle tuodun sähkön energiamäärä.

Biojalostamon saanto lasketaan kaavalla:

$$\text{Saanto} = \frac{Q_{\text{Bio-SNG}}}{Q_{\text{raaka-aine}}}, \quad 3.4$$

jossa $Q_{\text{Bio-SNG}}$ on tuotetun bio-SNG:n energiamäärä ja $Q_{\text{raaka-aine}}$ biojalostamolle tuodun raaka-aineen energiamäärä.

Koko tuotantoketjun hyötysuhdetta laskettaessa käytetään biojalostamon kokonaishyötysuhdetta.

Tuotantoketjun loppupään tehokas energian käyttö tuottaa parhaat tulokset, koska energiansäästö loppupäässä vähentää energiankulutusta ja päästöjä kaikissa ketjun vaiheissa ennen loppukäyttöä (Lovins, 2004).

3.2 Hiilidioksidipäästöjen tunnusluvut ja allokointi

Hiilidioksidin ominaispäästöt voidaan laskea kaavalla (Siitonen, 2010, IEA, 2007):

$$\text{Ominaisenergian kulutus} = \frac{\text{Energiankulutus}}{\text{Tuotannon määrä}} \quad 3.5$$

Hiilidioksidin ominaispäästöjen yksikkö on tässä työssä RES-direktiivin mukaisesti $\text{g}(\text{CO}_{2,\text{ekv}})/\text{MJ}_{\text{SNG}}$. Kaavaa sovelletaan tässä työssä hiilidioksidiekvivalenttien ominaispäästöjen tarkasteluun jokaisessa tuotantoketjun vaiheessa. Metaani- ja typpioksiduulipäästöt muutetaan hiilidioksidiekvivalenteiksi päästöiksi kertomalla metaanin päästöt luvulla 23 ja typpioksiduulin päästöt luvulla 296 (EC, 2009b).

Kasvihuonekaasupäästöt täytyy allokoida prosessissa syntyville hyödyllisille tuotteille eli tässä tapauksessa biokaasulle, sähkölle ja lämmölle. Liikanen (1999) tarkasteli eri allokointimenetelmiä yhdistetylle sähkön- ja lämmöntuotannolle. Allokointimenetelmiä voidaan soveltaa myös biojalostamolle. Allokointimenetelmiä ovat mm. energiamenetelmä, exergiamenetelmä ja hyödynjakomenetelmä. Niitä ei kuitenkaan tarkastella tässä työssä tarkemmin koska RES-direktiivin mukaan on käytettävä energiamenetelmää, jossa kasvihuonekaasupäästöt allokoidaan tuotteille niiden energiasisältöjen mukaan. Energiamenetelmän huonona puolena on se, että se ei ota huomioon tuotteen energian arvoa. Esimerkiksi sähkö ja kaasu ovat arvokkaampia kuin lämpö, koska niistä voidaan tuottaa lämpöä.

Biojalostamalla syntyville tuotteille eli bio-SNG:lle, sähkölle ja lämmölle allokoidaan niiden energiasisältöjen suhteessa kaikki ennen allokointipistettä syntyvät kasvihuonekaasupäästöt. Biojalostamon lopputuotteelle kohdistuva kasvihuonekaasupäästö laskeaan kaavalla:

$$E_{\text{tuote}} = \frac{Q_{\text{tuote}}}{Q_{\text{tot}}} \times E, \quad 3.6$$

jossa E_{tuote} on tuotteelle kohdistuva ominaiskasvihuonekaasupäästö, Q_{tuote} tuotteen vuosittainen energiamäärä, Q_{tot} kaikkien biojalostamolta ulos vietävien tuotteiden (bio-SNG, sähkö, lämpö) vuosittainen energiamäärä ja E tuotantoketjun aikana syntyneet kasvihuonekaasupäästöt ennen allokointipistettä (eli ennen siirtoverkkoa).

Tuotantoketjun ostosähkölle käytetään verkkosähkön päästökerrointa, joka lasketaan Suomen ympäristökeskuksen vuosina 2006-2008 keräämistä Suomen sähkönhankinnan keskimääräisistä päästöistä (SYKE, 2011) (Taulukko 7). Metaani- ja typpioksiduuli-

päästöt muutetaan hiilidioksidiekvivalenteiksi kasvihuonepäästöiksi em. kertoimilla. Verkkosähkön hiilidioksidiekvivalenteiksi päästöiksi saadaan 310,66 kg(CO_{2,ekv})/MWh (vuosittainen vaihtelu voi olla tosin ±10 %).

TAULUKKO 7 SUOMEN SÄHKÖNHANKINNAN KESKIMÄÄRÄISET KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT VUOSINA 2006-2008 (SYKE 2011) JA HIILIDIOKSIDIEKVIVALENTIT PÄÄSTÖT RES-DIREKTIIVIN MUKAISILLA KERTOIMILLA

	CO ₂ [kg/MWh]	CH ₄ [kg/MWh]	N ₂ O [kg/MWh]
2006	309	1,05	0,01
2007	298	0,9	0,01
2008	254	0,76	0,01
Keskiarvo 2006-2008	287	0,9	0,01
RES-kertoimilla (CO _{2, ekv})	287	20,7	2,96

Herkkyytarkasteluissa tarkastellaan verkkosähkön ominaispäästökertoimen vaikutusta tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöihin. Kivihiiltä polttavalla lauhdevoimalaitoksella tuotetun sähkön ominaispäästökerroin on 851 kg(CO₂)/MWh (Siitonen, 2011). Myös kivihiililauhdelaitoksen ominaispäästökerroin voi vaihdella ±10 %.

3.3 RES-direktiivissä esitetty laskentatapa kasvihuonekaasupäästöille ja päästövähennys liikennekäytössä

EU:n uusiutuvien energialähteiden direktiivi (2009/28/EY) eli nk. RES-direktiivi tähtää uusiutuvan energiankäytön lisäämiseen ja asettaa tavoitteita sekä maakohtaisesti että koko EU:n laajuisesti. Direktiivissä esitellään sääntelypuitteita kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoitteille.

RES-direktiivin mukaan liikenteen polttoaineiden, biopolttoaineiden ja bionesteiden tuotannosta ja käytöstä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt lasketaan seuraavalla kaavalla (EC, 2009b):

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee}, \quad 3.7$$

jossa E on polttoaineen käytöstä aiheutuvat kokonaispäästöt, e_{ec} raaka-aineiden tuotannosta tai viljelystä aiheutuvat päästöt, e_l maankäytön muutoksista johtuvista hiilivarantojen muutoksista aiheutuvat annualisoidut päästöt, e_p jalostuksesta aiheutuvat päästöt, e_{td} kuljetuksesta ja jakelusta aiheutuvat päästöt, e_u käytössä olevasta polttoaineesta aiheutuvat päästöt, e_{sca} paremmista maatalouskäytännöistä johtuvasta maaperän hiilikertymästä saatavat vähennykset päästöissä, e_{ccs} hiilidioksidin talteenotosta ja geologisesta varastoinnista saatavat vähennykset päästöissä, e_{ccr} hiilidioksidin talteenotosta ja korvaamisesta saatavat vähennykset päästöissä ja e_{ee} sähkön ja lämmön yhteistuotannosta saatavasta ylimääräisestä sähköstä saatavat vähennykset päästöissä.

Tätä kaavaa sovelletaan loppukäytölle silloin, kun bio-SNG käytetään liikenteen biopolttoaineena.

Termit e_{sca} ja e_{ee} ovat epärelevantteja tämän työn kannalta. Termi e_{ccr} tarkoittaa prosessista talteenotettavan biopohjaisen hiilidioksidin hyödyntämistä kaupallisissa tuotteissa tai palveluissa, joissa normaalisti hyödynnetään fossiilisesta lähteestä peräisin olevaa hiilidioksidia. Termi on relevantti, jos biohiilidioksidille löytyy markkinat, mutta sitä ei käsitellä tässä työssä. Termi e_{ccs} käsittää hiilidioksidin talteenotosta ja geologisesta varastoinnista saatavat päästövähennykset, joita ei ole jo sisällytetty kohtaan e_p , ja rajoittuvat päästöihin, jotka vältetään ottamalla talteen ja varastoimalla hiilidioksidi, joka liittyy suoraan polttoaineen tuotantoon, kuljetukseen, jalostukseen ja jakeluun. Biojalostamalla hiilidioksidin talteenottoon liittyvät päästövähennykset voidaan siten sisällyttää kohtaan e_p .

Soimakallio et al. (2010) toteavat, että Kioton pöytäkirjan määritelmässä uudistushakkuussa ei tapahdu maankäytön muutosta ja jatkavat, että RES-direktiivissä voidaan soveltaa samanlaista määritelmää, jolloin on kyseenalaista, joudutaanko RES-direktiivin hiilivarantojen muutosten laskentaan laadittua kaavaa lainkaan soveltamaan uudistushakkuuden yhteydessä. Tässä työssä bio-SNG:n raaka-aineena käytetään uudistushakkuuden ja metsän harvennuksen yhteydessä syntyviä metsätähteitä. Täten myös kaavan toinen termi on tämän työn kannalta epärelevantti.

RES-direktiivin mukaan liikennekäytössä biopolttoaineen tuotannolla ja käytöllä on saavutettava vähintään 35 % vähennys kasvihuonekaasupäästöistä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Vuodesta 2017 alkaen päästövähennyksen on oltava vähintään 50 %. Vuoden 2018 alusta lähtien vähennyksen on oltava vähintään 60 % niiden biopolttoaineiden ja bionesteiden osalta, jotka on tuotettu laitoksissa, joissa tuotanto on alkanut aikaisintaan 1.1.2017. (EC, 2009b)

Kasvihuonekaasupäästöjen vähennys lasketaan kaavalla (EC, 2009b):

$$\text{päästövähennys} = \frac{(E_F - E_B)}{E_F}, \quad 3.8$$

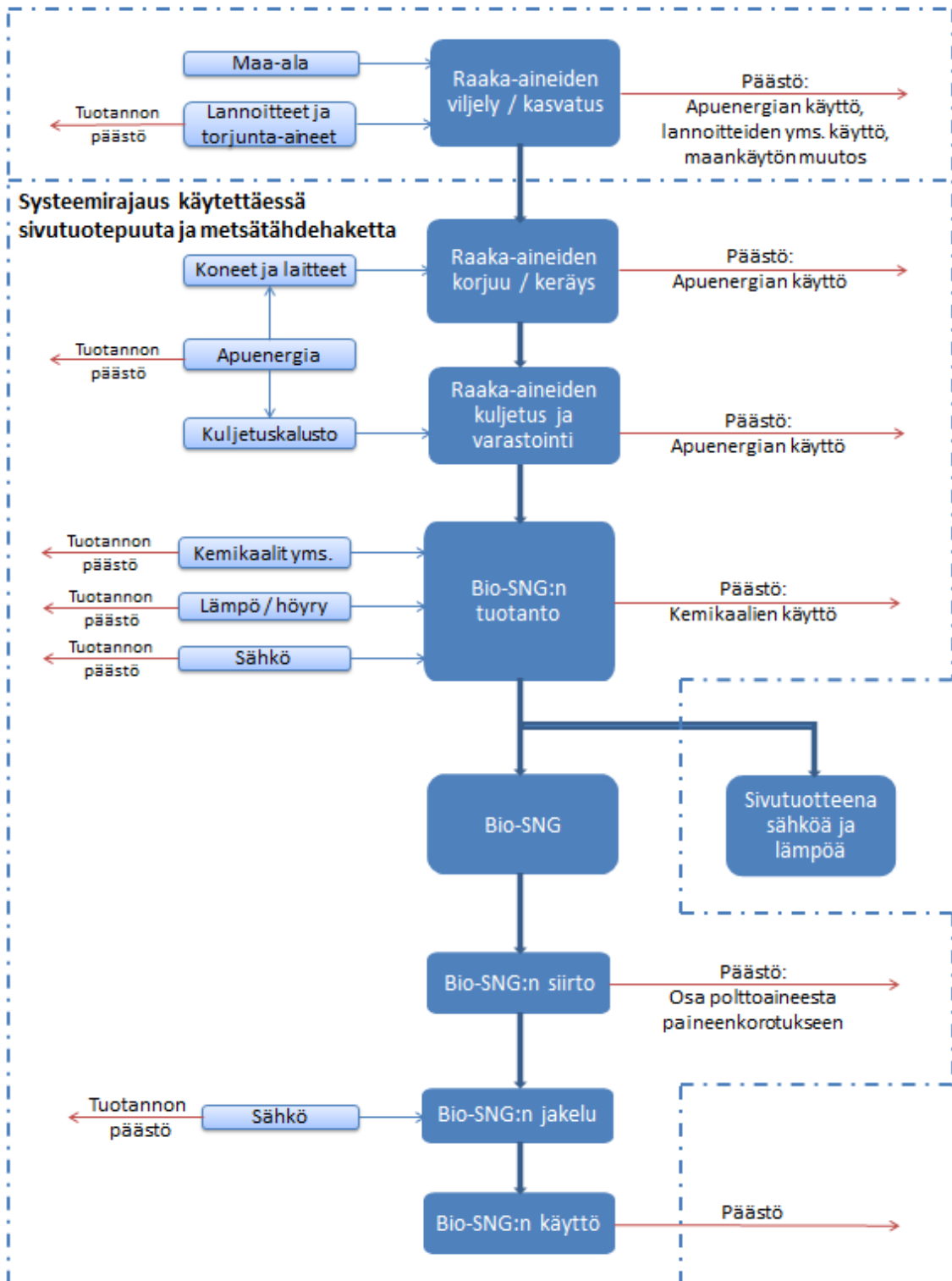
jossa E_B on biopolttoaineesta tai muusta bionesteestä aiheutuvat kokonaispäästöt ja E_F on fossiilisesta vertailukohdasta aiheutuvat kokonaispäästöt.

Liikennepolttoainekäytössä puupohjaisen biokaasun fossiilinen vertailukohta on bensiini ja diesel, joiden ominaispäästökertoimeksi RES-direktiivi esittää 83,8 g(CO_{2,ekv})/MJ.

Fossiilisen vertailupolttoaineen poltosta aiheutuvat metaani- ja typpioksiduulipäästöt on jätetty huomioimatta, minkä vuoksi niitä ei huomioida myöskään biopolttoaineen lopputuotuksessa. Tämä on perusteltua, sillä käytännössä biopolttoaineen käyttö tuskin aiheuttaa muutosta näissä päästöissä suhteessa fossiilisen polttoaineeseen. (Soimakallio et al., 2010)

RES-direktiivin mukainen systeemirajaus puupohjaisen biokaasun tuotantoketjulle on esitetty kuvassa 10, josta havaitaan, että raaka-aineen viljelystä ja kasvatuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt eivät koske metsätähdettä.

RES-direktiivin systeemirajaus



KUVA 10. RES-DIREKTIIVIN MUKAISEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖLASKENNAN JÄRJESTELMÄRAJAUS BIO-SNG:LLE. MUOKATTU (SOIMAKALLIO ET AL. 2010)

3.4 Kasvihuonekaasupäästöjen laskenta sähkön- ja lämmön- tuotannossa

Euroopan komissio (EC, 2010b) on esittänyt sähkön- ja lämmöntuotannossa käytettävien kiinteiden ja kaasumaisten biomassojen kasvihuonekaasupäästöjen laskemismenetelmän. Tätä sovelletaan tässä työssä loppukäyttövaiheelle, kun biokaasusta tuotetaan sähköä ja/tai lämpöä. Kasvihuonekaasupäästöjen laskentakaava on tämän työn kannalta merkitsevien termien osalta sama kuin RES-direktiivissä.

Erillistuotannossa hyötylämpöä tai sähköä tuottavien laitosten kasvihuonekaasupäästöt lasketaan kokonaispäästöistä kaavoilla (EC, 2010b):

$$EC_h = \frac{E}{\eta_h} \quad 3.9$$

ja

$$EC_{el} = \frac{E}{\eta_{el}}, \quad 3.10$$

joissa E on polttoaineen tuotannosta aiheutuvat kokonaispäästöt ennen energianmuuntaa, EC_h loppuenergiatuotteesta, tässä tapauksessa lämmityksestä, aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöjen kokonaispäästöt, EC_{el} loppuenergiatuotteesta, tässä tapauksessa sähköstä, aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöjen kokonaispäästöt, η_h lämmöntuotannon hyötysuhde ja η_{el} sähköntuotannon hyötysuhde.

Hyötylämpöä toimittavista energialaitoksista tulevalle sähkölle kohdistettavat kasvihuonekaasupäästöt lasketaan kaavalla (EC, 2010b):

$$EC_{el} = \frac{E}{\eta_{el}} \left(\frac{C_{el} \times \eta_{el}}{C_{el} \times \eta_{el} + C_h \times \eta_h} \right) \quad 3.11$$

Sähköä toimittavista energialaitoksista tulevalle hyötylämmölle kohdistettavat kasvihuonekaasupäästöt lasketaan kaavalla:

$$EC_h = \frac{E}{\eta_h} \left(\frac{C_h \times \eta_h}{C_{el} \times \eta_{el} + C_h \times \eta_h} \right), \quad 3.12$$

joissa C_{el} on exergian osuus sähkössä tai missä tahansa muussa energiankantajassa kuin lämmössä, arvona 100 % ($C_{el} = 1$) ja C_h Carnot-hyötysuhde (exergian osuus hyötylämmöstä).

Hyötylämmön Carnot-hyötysuhde, C_h , määritetään eri lämpötiloissa kaavalla:

$$C_h = \frac{T_h - T_0}{T_h}, \quad 3.13$$

jossa T_h on hyötylämmön lämpötila (kelvineinä) loppuenergian jakelupisteessä ja T_0 on ympäristön lämpötila, asetuksena 273 K (eli 0 °C).

Kun $T_h < 150\text{ °C}$ (423 K), C_h on 150 °C lämmön Carnot-hyötysuhde eli 0,3546.

Sähkötuoannossa, lämmityksessä ja jäädytyksessä käytetyistä kiinteistä tai kaasumaisista biomassapolttoaineista peräisin olevat kasvihuonekaasupäästöt, EC, ilmaistaan hiilidioksidiekvivalenttigrammoina lopullisen energialajin (lämpö, sähkö tai jäädytys) megajoulea kohti.

Kasvihuonekaasupäästövähennys lasketaan suhteessa fossiiliseen vertailukohtaan samalla tavalla kuin RES-direktiivissä. Fossiilisenä vertailuarvona käytetään sähkötuoannolle arvoa $198\text{ g}(\text{CO}_2, \text{ekv})/\text{MJ}_{\text{sähkö}}$ ja lämmöntuoannolle arvoa $87\text{ g}(\text{CO}_2, \text{ekv})/\text{MJ}_{\text{lämpö}}$.

3.5 Metsäbiomassan energiakäytössä syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen laskentatapaan kohdistunutta kritiikkiä

Nykyään puupohjaisten biopolttoaineiden hiilidioksidipäästöille käytetään laskennassa nettokerrointa 0, vaikka hiilidioksidipäästöjen bruttokerroin on $109,6\text{ t}(\text{CO}_2)/\text{TJ}$ (Tilastokeskus, 2011). Metsäbiomassan kohdalla nollapäästöjä on perusteltu ajatuksella, jossa poltossa syntyvän hiilidioksidin on katsottu sitoutuvan uudelleen kasvavaan puustoon ja sillä, että metsään lahoamaan jätetyt hakkuutähteet vapauttaisivat hiilidioksidia ilmaan joka tapauksessa. Tämä näkemys on kyseenalaistettu, sillä erityisesti kantojen energiakäytöllä voi olla suuret vaikutukset epäsuoriin hiilidioksidipäästöihin ja metsien monimuotoisuuteen (Repo et al., 2010) ja (Soimakallio et al., 2010). Suomen ympäristökeskuksen tutkijat rinnastivat kantojen poltosta syntyvän päästön kivihiilen päästöihin (SYKE, 2010). Metsätutkimuslaitoksen tutkijat puolestaan muistuttavat vastineessaan, että jos laskenta-ajanjaksona käytettäisiin SYKE:n käyttämän 20-30 vuoden sijaan esimerkiksi 100 vuotta, näyttäisi puu laskelmassa miltei ilmastoneutraalilta (Metla, 2011). SYKE perustelee lyhyttä laskenta-aikaa ilmastoarvioissa esitetyillä näkemyksillä, joiden mukaan päästöjä pitäisi vähentää tulevina vuosikymmeninä, jotta välttyttäisiin kaikkein voimakkaimmalta ilmastonmuutokselta tällä vuosisadalla (SYKE, 2010). Myös Euroopan ympäristökeskuksen (EEA) toimesta on otettu voimakkaasti kantaa maankäytön muutoksista johtuvien epäsuorien hiilidioksidipäästöjen huomioimiseksi biopolttoaineiden päästöjä laskettaessa (EEA, 2011).

Euroopan ympäristökeskuksen tieteellisen komitean (EEA Scientific Committee) syyskuussa 2011 julkaisemassa raportissa vaaditaan muutoksia RES-direktiivissä esitettyyn kasvihuonekaasupäästöjen laskentatapaan ja erityisesti maankäytön muutoksista johtuvaan termiin. Raportissa todetaan, että bioenergian polttaminen lisää hiilidioksidipäästöjä, jos biomassan kerääminen vähentää kasveihin ja maaperään sitoutuneen hiilen määrää tai vähentää meneillään olevaa hiilen sitoutumista kuten käy esimerkiksi edelleen kasvuvaiheessa olevan metsän hakkaamisessa. Tämän vuoksi myös epäsuorat maankäytön muutoksista johtuvat päästöt pitäisi ottaa huomioon elinkaarilaskennoissa.

Raportin mukaan on virheellistä olettaa, että biomassan polttaminen olisi hiilineutraalia perustuen ajatukseen, että polttamisessa vapautui hiiltä ainoastaan sen verran kuin kasvi on kasvaessaan sitonut ilmakehästä. Oletuksessa ei huomioida, että biopolttoaineiden tuotantoon käytettävä maa ei tuota enää kasveja muihin tarkoituksiin kuten esimerkiksi ruoaksi.

Biopolttoaineita poltettaessa syntyy kasvihuonekaasupäästöjä, minkä vuoksi bioenergian hyödyntäminen voi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vain jos

- 1) kasvit ja maaperä saadaan sitomaan enemmän hiilidioksidia kuin ne olisivat sitoneet ilman bioenergiantuotantoa
- 2) bioenergian tuotannossa hyödynnetään sellaisia viljelykasvien tähteitä ja jätteitä, jotka muuten mätänisivät ja siten tuottaisivat hiilidioksidipäästöjä ilmakehään

Tässä työssä tarkasteltavan puupohjaisen biokaasulaitoksen raaka-aineena hyödynnetään hakkuutähteitä. Euroopan ympäristökeskuksen raportin mukaan hakkuutähteiden bioenergiakäytön aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa on nykyisten direktiivien kaavoilla vain pieni virhe tai ei lainkaan virhettä. Virhe on sen sijaan suuri jos puut kaadetaan bioenergiaksi ja metsän annetaan kasvaa uudestaan. (EEA, 2011) Tämä johtuu pitkästä, jopa kymmeniä tai satoja vuosia kestävästä ajasta, jonka metsän uudistuminen vaatii.

Metsätähteiden keräämisestä ja käyttämisestä energiantuotantoon syntyy epäsuoria päästöjä, koska polttaminen vapauttaa tähteiden sisältämän hiilen hiilidioksidina pian keräämisen jälkeen sen sijaan, että tähteet hajoaisivat hitaasti korjuupaikalla. Energiayksikköä kohden syntyvät keskimääräiset epäsuorat hiilidioksidipäästöt laskevat ajan mittaan, mutta ensimmäisten muutamien vuosien, tai kantojen kohdalla parin vuosikymmenen kuluttuakin energiantuotannossa hyödynnettyjen metsätähteiden kokonaispäästöt ovat verrattavissa fossiilisten polttoaineiden päästöihin. (Repo et al. 2010)

Hajoavien metsätähteiden keruun vuoksi vähentyneistä hiilivarastoista johtuvat epäsuorat päästöt vastaavat 85-95 % bioenergian tuotantoketjun kokonaispäästöistä poislukien metsätähteiden poltosta syntyvät hiilidioksidipäästöt. Eri tutkimuksissa on arvioitu, että hakkuista, korjuusta, haketuksesta ja kuljetuksista syntyy kasvihuonekaasupäästöjä 4-20 kg(CO_{2,ekv})/MWh riippuen tutkittavasta bioenergian tuotantoketjusta. Luvussa on mukana myös metsätähteen poltossa syntyvät metaani- ja typpioksiduulipäästöt. Repo et al. (2010) osoittivat tutkimuksessaan, että hiilidioksidin kokonaispäästöt ovat kertaluokkaa suuremmat, jos epäsuorat päästöt otetaan huomioon. Jos oletetaan, että yhdessä kuutiometrissä metsätähdehaketusta on 2 MWh energiaa, syntyy maaperän vähentyvän hiilimäärän vuoksi epäsuoria päästöjä 100 kg(CO₂)/MWh.

Soimakallio et al. (2010) keräsivät eri tutkimuksissa esitettyjä arvioita hakkuutähteiden korjuun vaikutuksista maaperän hiilitaseisiin suhteutettuna hakkuutähteiden energiasisältöön. Sadan vuoden aikajänteellä arviot vaihtelivat välillä 11,1–16,5 g(CO_{2,ekv})/MJ (40–60 kg(CO_{2,ekv})/MWh). Lyhemmällä aikajänteellä hakkuutähteiden korjuun vaikutus maaperän hiilivajeeseen kasvaa. RES-direktiivissä maankäytön muutoksille käytetään 20 vuoden aikajännettä, jota vastaavaksi päästökseen kuusien latvuksille ja oksille on saatu 46,9 g(CO_{2,ekv})/MJ (169 kg(CO_{2,ekv})/MWh) (Kujanpää et al., 2010, Kujanpää, 2012). Repo et al. (2010) päätyivät tutkimuksessaan hakkuutähteiden osalta samaan suuruusluokkaan. Valitulla aikajänteellä on siten suuri vaikutus epäsuorien hiilidioksidipäästöjen suuruuteen. Kujanpää et al. (2010) tosin toteavat, että hakkuutähteiden hyödyntämisellä on ilmastoa lämmittävä vaikutus, vaikka aikajänteeksi valittaisiin pitempi 50-100 vuoden ajanjakso.

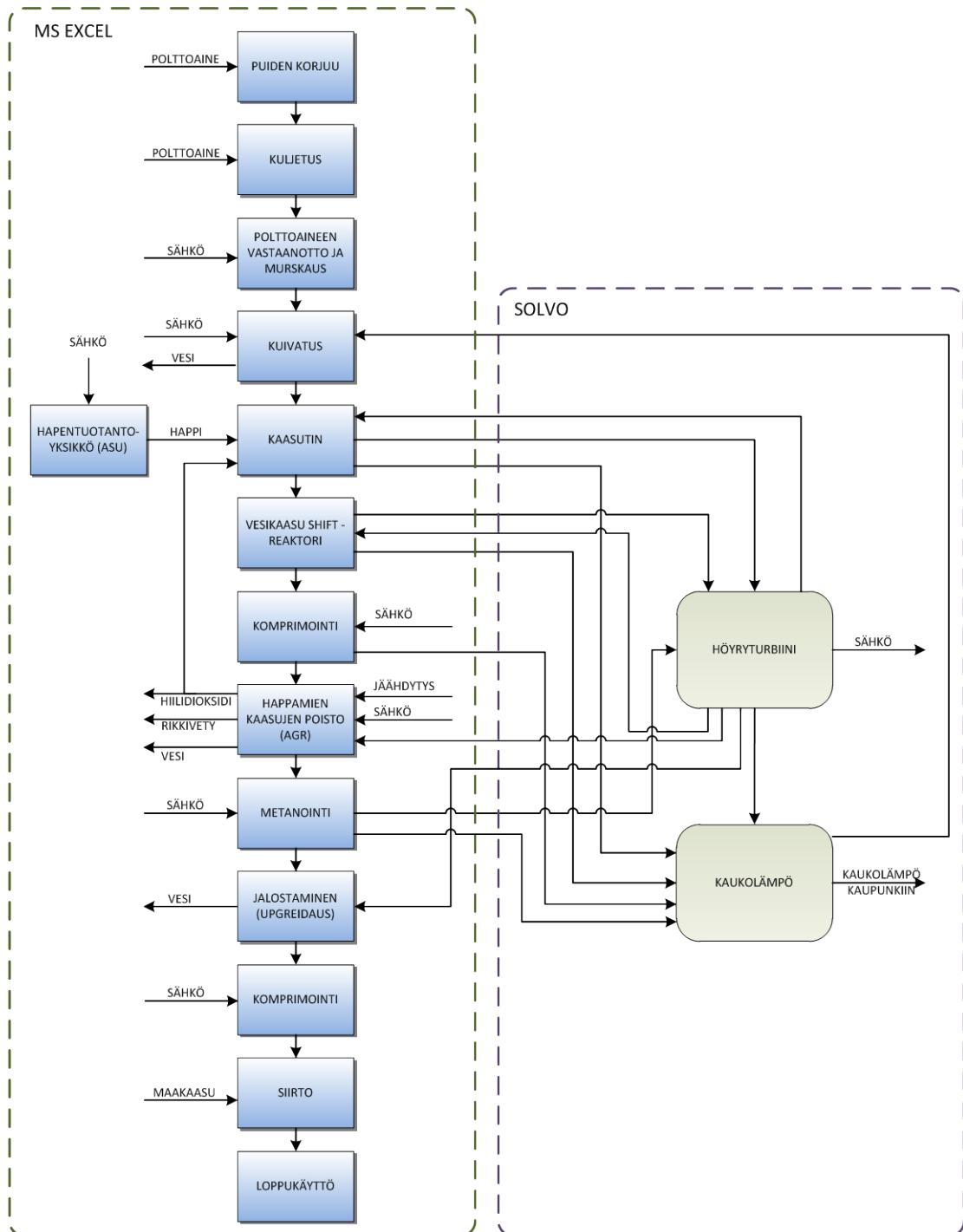
Metsäbiomassan energiakäytön kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan liittyvän kritiikin vuoksi tässä työssä lasketaan RES-direktiivin mukaisten nettopäästöjen lisäksi bruttopäästöt kahdella EEA:n mainitsemaalla tavalla, jotka ovat poltosta aiheutuvien biopohjaisten hiilidioksidipäästöjen huomioiminen tai metsätähteiden korjuusta metsän hiilitaseeseen aiheutuvien epäsuorien päästöjen sekä lannoitustarpeiden huomioiminen.

Epäsuorille hiilidioksidipäästöille käytetään tässä työssä Kujanpää (2012) esittämää arvoa $46,9 \text{ g(CO}_{2,\text{ekv}})/\text{MJ}_{\text{haketta}}$. Lannoitukselle käytetään Wihersaaren & Palosuon (2000) esittämää arvoa $2 \text{ g(CO}_{2,\text{ekv}})/\text{MJ}_{\text{haketta}}$. Luvut saatetaan yhteismitallisiksi muuttamalla ne vastamaan yhtä tuotettua bio-SNG megajoulea.

3.6 Bio-SNG:n tuotantoketjun energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen laskentamalli

Tässä työssä kasvihuonekaasupäästöt ja energiankulutus lasketaan Suomen olosuhteissa ja em. elinkaaritarkasteluista poikkeavalla tekniikalla. Tässä työssä mallinnettava biojalostamo pyritään kasaamaan komponenteista, jotka ovat saavuttaneet riittävän suuren kokoluokan ja teknisen maturiteetin.

Mitoituksen lähtökohdaksi asetettiin puupohjaisen biokaasun jatkuva tuotantoteho $200 \text{ MW}_{\text{SNG}}$ ja vuotuinen 8000 tunnin käyntiaika. Laskennan jakaminen eri ohjelmien välillä on esitetty kuvassa 11. Laskennan pääosa suoritettiin Microsoft cel -taulukkolaskentaohjelmalla. Biojalostamon CHP-osiossa laskettiin vo @ -simulointiohjelman avulla prosessista talteenotettavan lämmön avulla tuotettu sähkö- ja kaukolämpöteho. Solvo ® on Fortum Oyj:n kehittämä voimalaitosten suunnitteluun ja optimointiin käytettävä työkalu. Biojalostamosta laadittu pääkaavio on esitetty liitteessä 1 ja Solvo-malli liitteessä 2. Malleilla laskettiin energiatase ja saanto sekä biojalostamon kokonaishyötysuhde, tuotantoketjujen hyötysuhteet ja tuotantoketjun aikana syntyneet kasvihuonekaasupäästöt.



KUVA 11. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN ENERGIANKULUTUKSEN JA KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN LASKENNAN JAKAMINEN KÄYTETTYJEN OHJELMIEN (MS EXCEL JA SOLVO®) VÄLILLÄ.

4 BIO-SNG:N TUOTANTOKETJUN LASKENNASSA KÄYTETYT LÄHTÖTIEDOT

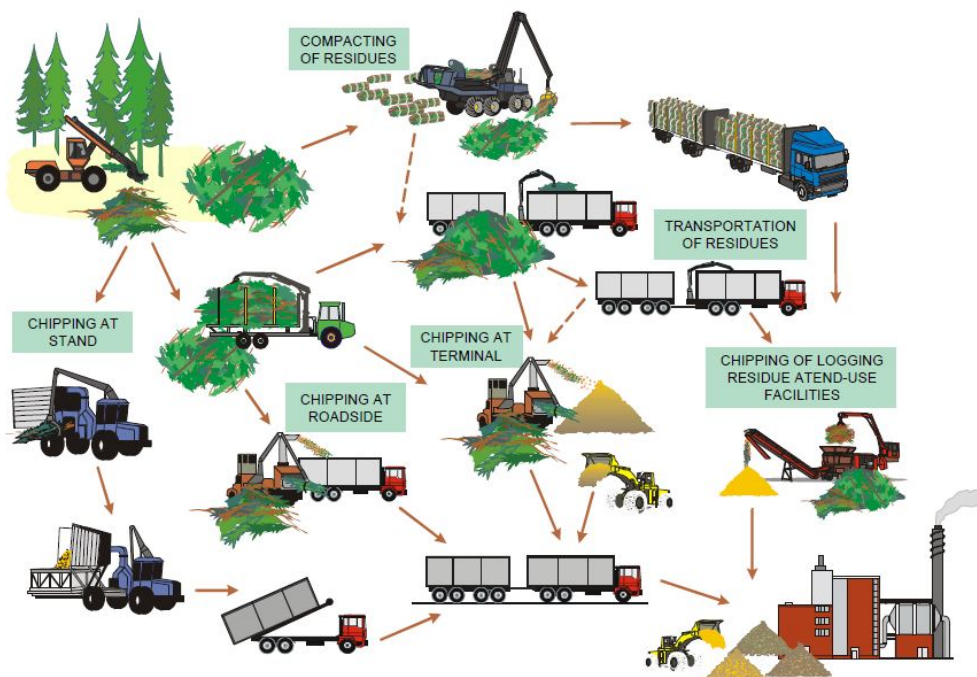
Puupohjaisen biokaasun tuotantoketju koostuu raaka-aineen korjuusta, kuljetuksesta ja esikäsittelystä sekä biokaasun tuotannosta, siirrosta ja loppukäytöstä. Tässä luvussa käydään läpi kukin tuotantoketjun vaihe ja esitetään laskennassa käytettäviä lähtötietoja.

4.1 Raaka-aineen korjuu, kuljetus ja esikäsittely

Metsähaketta tuotetaan pienpuusta, hakkuutähteistä, kannoista ja järeästä, mutta lahovikaisesta runkopuusta. Suomen lämpö- ja voimalaitoksissa käytetty metsähake (12,5 TWh) koostui vuonna 2010 seuraavista jakeista: 41 % pienpuu (koko-, ranka- ja kuitupuuta), 36 % hakkuutähteet, 16 % kannot ja 8 % järeä (lahovikainen) kuitupuuta. (Kärhä, 2011)

Jopa 90 % korjuukelpoisesta metsähakepotentiaalista on kytköksissä ainespuuleimikoihin ja metsähakkeen tuotanto integroituu usein ainespuun tuotantoon (Kuitto, 2005). Hakkuut tehdään nykyään lähes täysin koneellisesti harvestereilla ja lähikuljetus hoidetaan metsätraktoreilla (Kariniemi, 2011).

Hakkeen tuotantojärjestelmät voidaan jakaa seuraaviin perusmenetelmiin: palstahaketus, välivarastohaketus, terminaalihaketus ja käyttöpaikkahaketus. Hakkuutähteet voidaan toimittaa käyttöpaikkahaketuksen myös paalattuna (Kuva 12). (Kuitto, 2005)



KUVA 12. POLTTOAINEHAKKEEN VAIHTOEHTOISIA TUOTANTOKETJUJA. (WIHERSAARI 2005)

Palstahaketuksessa haketus tehdään palstalla palstahakkurilla ja hake toimitetaan käyttöpaikalle hake-autolla. Tienvarsihaketuksessa haketus tehdään hakkurilla tai murskaimella tienvarressa, josta hake tai murske toimitetaan käyttöpaikalle kaukokuljetuksena. Terminaalihaketuksessa metsäraaka-aine toimitetaan terminaaliin, jossa se hakete-

taan tai murskataan. Hake tai murske toimitetaan terminaalista käyttöpaikalle autolla, junalla tai laivalla. Käyttöpaikkahaketuksessa haketus suoritetaan vasta käyttöpaikalla.

Metsähakkeen tuotantoketjujen osuudet eri metsähakeraaka-aineilla on kerätty taulukoon 8, josta havaitaan, että pienpuulle ja hakkuutähteille tienvarsihaketus on tärkein haketuotantoketju. Järeälle lahovikaiselle runkopuulle tärkein haketuotantoketju on terminaalihaketus/-murkaus. Kantoja murskataan tavallisimmin käyttöpaikalla ja terminaalissa. Palstahaketusta ei enää käytetä laajamittaisesti metsähakkeen tuotannossa Suomessa. Kullakin hakkeentuotantoketjulla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, eikä yhtä ainoata oikeaa hakkeentuotantoketjua ole olemassa. (Kärhä, 2011).

Kärhä et al. (2010) tarkastelivat kiinteiden polttoaineiden saatavuutta ja käyttöä Suomessa vuonna 2020 ja kunkin metsähakelajin päätuotantoketjut ovat silloin samat kuin nykyään. Pienpuu- ja hakkuutähdehakkeen tuotannossa korostuu terminaalijä- ja käyttöpaikkahaketuksen rooli. Kannoilla puolestaan terminaalimurskauksen osuus kasvaa tulevaisuudessa hieman.

Metsähakkeentuotantoketjuista valittiin aiheen rajauksen vuoksi käytettäväksi haketus/murskaus käyttöpaikalla. Todellisuudessa polttoainetta toimitettaisiin biojalostamolle eri tuotantoketjujen yhdistelmillä.

TAULUKKO 8 METSÄHAKKEEN TUOTANTOKETJUJEN OSUUDET ERI METSÄHAKERAACA-AINEILLA VUONNA 2010. (KÄRHÄ 2011)

tuotantoketju / raaka-aine	pienpuu [%]	hakkuutähde [%]	kanto [%]	järeä (lahovikainen) runkopuu [%]
tienvarsihaketus/-murskaus	83	70	8	13
terminaalihaketus/-murskaus	10	7	41	59
käyttöpaikkahaketetus/-murskaus	7	23	51	28

Metsätyöt

Hakkuutähteitä kerätään ainespuun korjuun yhteydessä, minkä vuoksi niille kohdenneetaan ainoastaan metsätraktorin polttoaineenkulutus ja päästöt. Samoin harvennushakkuut ovat osa ainespuuntuotantoa, minkä vuoksi harvesterin energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt eivät kohdistu Bio-SNG:n tuotantoketjulle. Harvesterin, metsätraktorin ja kantojen nostokoneen polttoaineen ominaiskulutukset eri raaka-ainejakeiden tapauksissa on esitetty taulukossa 9. Metsätöiden ja kuljetusten kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa käytetään kulutetulle dieselille RES-direktiivin mukaista päästökerrointa, joka on 83,8 g(CO_{2,ekv})/MJ.

TAULUKKO 9 METSÄTYÖKONEIDEN POLTTOAINEEN OMINAISKULUTUKSET (SOIMAKALLIO ET AL. 2009A). KANTOJEN KULJETUKSEN POLTTOAINEEN OMINAISKULUTUS LASKETTU KÄRHÄ ET AL. (2009) TIETOJEN AVULLA.

	työkoneiden mini- mikulutus [l/m ³]	työkoneiden maksi- mikulutus [l/m ³]	työkoneiden kulu- tuksen keskiarvo [l/m ³]
Pienpuun metsätyöt harvesteri	0,73	2,2	1,465
metsätraktori	0,64	0,9	0,77
Hakkutähteiden met- sätyöt metsätraktori	0,75	1,13	0,94
Kantojen metsätyöt kantojen nostokone kantojen kuljetus	1,56	2,34	1,95 1,482
Järeä (lahovikainen) runkopuu. (päätehak- kuun luvut)			
harvesteri	0,31	0,73	0,52
metsätraktori	0,41	0,6	0,505

Metsäbiomassan kuljetukset

Olemassa olevalle tehdasalueelle integroidulla biojalostamolla voitaisiin kuljetusten osalta hyödyntää raidekuljetuksia ja mahdollisesti vesistökuljetuksia. Tätä työtä rajattiin kuljetusten osalta siten, että kaikki polttoainekuljetukset tehdään energiapuuautoilla kuljetusmatkan ollessa 100 km. Energiapuuautojen kuormakoot ja polttoaineenkulutukset eri polttoainekäyttöille on esitetty taulukossa 10. Energiapuuauton jaakohtainen polttoaineenkulutus on laskettu interpoloimalla täyteen lastatun täysperävaununlaisen rekan polttoaineenkulutuksesta.

Energiapuuautojen kuormakokojen avulla ratkaistaan kunkin raaka-ainekäteen vuosittaisten toimituskertojen lukumäärä, joista edelleen polttoaineenominaiskulutusten avulla polttoaineen kokonaiskulutus.

TAULUKKO 10 ENERGIAPUUAUTOJEN KUORMAKOOT (KÄRHÄ, 2011) SEKÄ POLTTOAINEENKULUTUS, JOKA ON LASKETTU LIPASTO (2011) TIEDOISTA.

	kuormakoko [MWh/kuorma]	kuormakoko [t(tuore)/kuorma]	polttoaineen- kulutus [l/100 km] (täysi)	polttoaineen- kulutus [l/100 km] (tyhjä)
pienpuu	65,0	24,3	43,4	33,0
hakkuutähde	57,0	20,3	41,7	33,0
kanto	85,0	24,2	43,3	33,0
järeä (laho- vikainen) runkopuu	106,0	30,2	45,9	33,0

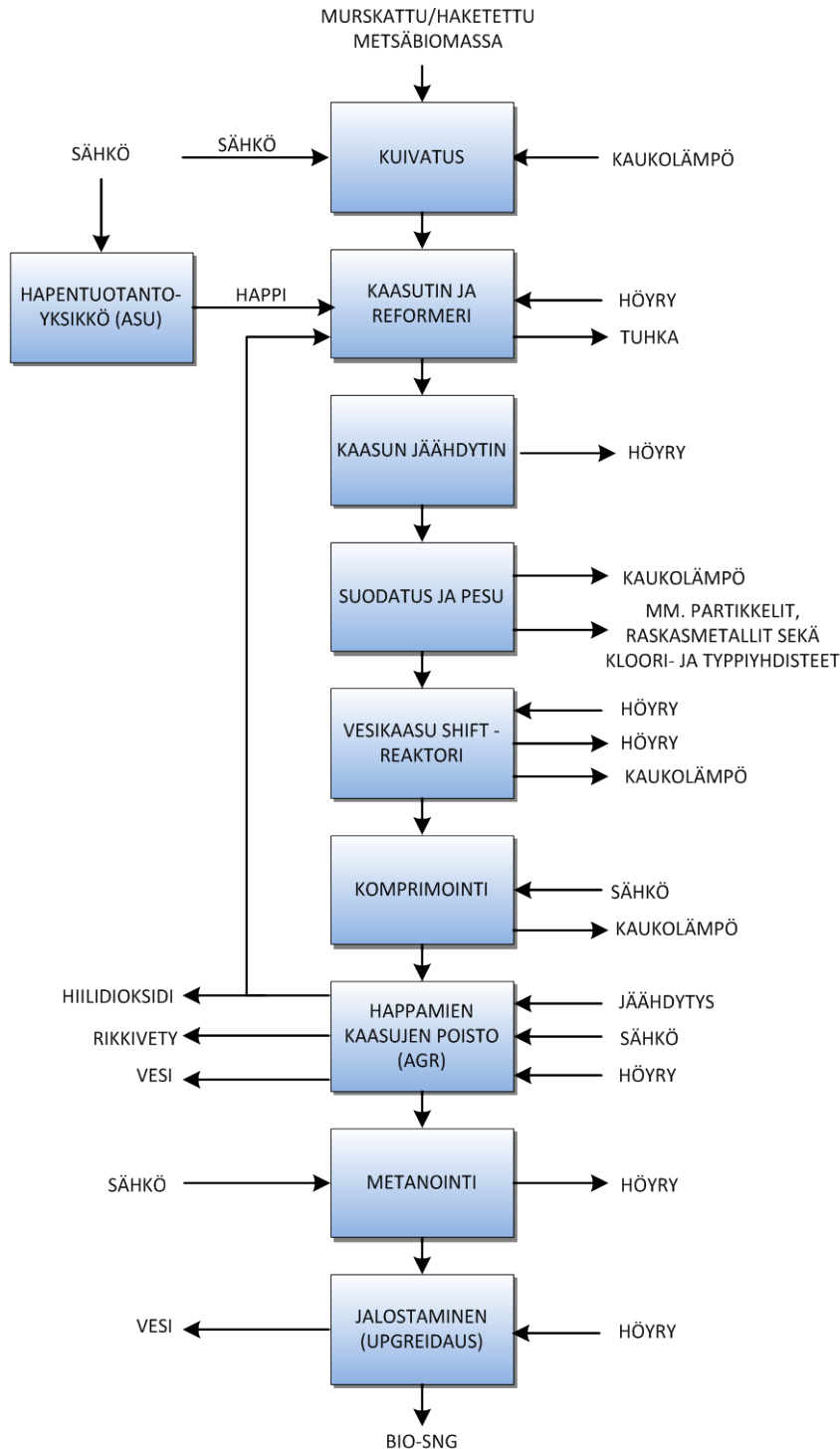
Metsäbiomassan esikäsittely (murskaus)

Käyttöpaikkamurskaimena käytetään BMH:n Biosaurus -murskainta. Metsäbiomassan murskaus palakokoon P63 kuluttaa sähköä keskimäärin 8 kWh/k-m³. Murskaaminen pienempään P45-luokan palakokoon kasvattaa sähkönkulutusta noin 15 %, jolloin sähkönkulutus on 9,2 kWh/k-m³. (Rautevaara, 2012)

Tässä työssä murskaus tehdään yhdellä 8000 h/a käyvällä murskaimella. Todellisuudessa murskaimet eivät käy ympäri vuorokauden ja niitä on rekkojen purkajoista ja käyttövarmuuden parantamisesta johtuen kaksi tai kolme kappaletta. Tällöin sähkötehoa vaaditaan hetkellisesti enemmän. Tämän lisäksi vastaanottokeiju on nyt laskettua laajempi, sillä polttoaine kulkee mahdollisesti vielä seulomon ja ylitemurskaimen kautta hihnakuljettimilla kostean polttoaineen varastoon, josta hake/murske siirretään edelleen hihnakuljettimella kuivatuksen kautta kuivan polttoaineen varastosiiloon ja edelleen kaasuttimien päiväsiiloille.

4.2 Bio-SNG:n tuotantoprosessi biojalostamolla

Tässä alaluvussa käydään läpi kaasutuksen termodynamiikkaa sekä tuotekaasun puhdistusmenetelmiä ja jalostusprosesseja. Jalostusprosessin lohkokaavio on esitetty kuvassa 13.



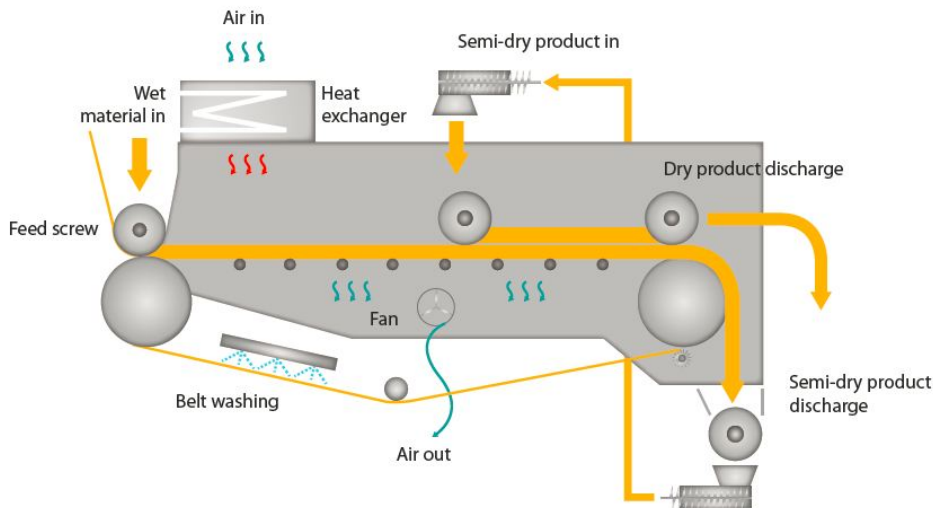
KUVA 13. LOHKOKAAVIO PUUPOHJAISEN BIOKAASUN JALOSTUSPROSESSISTA.

4.2.1 Polttoaineen kuivatus

Metsähake saapuu laitokselle n. 50 % kosteudessa. Kaasutettava biomassassa on kuivattava koska kaasutin edellyttää n. 15-20 % kosteuspitoisuutta. Metsäbiomassan kuivatukseen käytetään usein kuljetintyyppistä kuivuria. Se soveltuu hyvin matalalämpötilaiseen kuivatukseen, jolloin kuivatusilman lämmittämisessä voidaan käyttää teollisuuden hukkalämpöjä tai kaukolämpöä. Kuljetintyyppisen kuivurin eli hihnakuivurin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 14. Kuivatettava biomassassa levitetään hihnalle tasaiseksi pedik-

si. Lämmitetty kuivatusilma imetään pedin lävitse, jolloin vesi absorboituu kuivatusilmaan, minkä jälkeen lähes kylläisessä tilassa oleva kuivatusilma puhalletaan mahdollisen lämmöntalteenoton jälkeen ulos ja haluttuun kosteuteen kuivattu biomassa siirretään eteenpäin prosessissa.

Tässä työssä kuivausilman lämmittämiseen käytetään 90 °C lämpötilassa olevaa kaukolämpöä. Kuivurin lämpötehtarve lasketaan kuivurin ominaislämmönkulutuksen ja erotettavan vesimäärän avulla. Kuljetintyyppisen kuivurin ominaisenergiankulutus on 4000-6000 kJ/kg(H₂O) (Holmberg & Ramm-Schmidt, 2011). Holmberg (2012) arvioi, että modernin lämmöntalteenotolla varustetun kuljetintyyppisen kuivurin ominaislämmönkulutus voi olla 4000 kJ/kg(H₂O) tai jopa sen alle. Ominaisenergiankulutukselle löydettiin myös laitetoimittajan arvo 1,15 kWh/kg(H₂O), mikä on 4140 kJ/kg(H₂O) (Salo, 2009).



KUVA 14. KULJETINTYYPPISEN KUIVURIN TOIMINTAPERIAATE (METSO, 2010)

Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo valitussa kosteudessa (20 %) lasketaan kaavalla: (Raiko, 2002)

$$q_{iw} = \frac{q_i(100 - w)}{100} - 24,43 \times w, \quad 4.1$$

jossa q_{iw} on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo [kJ/kg], q_i tehollinen lämpöarvo [kJ/kg] ja w vesipitoisuus paino-%:na kosteasta polttoaineesta.

Taulukossa 11 on esitetty polttoaineen teholliset lämpöarvot ja kosteudet saapumistilassa, sekä niistä lasketut lämpöarvot valitussa (20 %) kosteudessa.

TAULUKKO 11 POLTTOAINEEN LÄMPÖARVOT JA KOSTEUDET KAATOTUOREENA (POLTTO JA PALAMINEN, 2002). SULUISSA ON ESITETTY KESKIARVO KAUKAAN VOIMA OY:N VOIMALAITOKSELLE MURSKATTUJEN POLTTOAINEIDEN KOSTEUKSISTA, JOTKA ON LASKETTU KÄRHÄ ET AL. (2011) ESITTÄMISTÄ LUVUISTA.

	tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]	kosteus saapumistilassa [%]	lämpöarvo 20 % kosteudessa [MJ/kg]
pienpuu	20	40 (44,75)	15,51
hakkuutähde	20	50 (38)	15,51
kanto	20	30 (31,375)	15,51
järeä (lahovikainen) runkopuu	20	45 (31,5)	15,51

Kuivurin sähkönkulutuksen ajatellaan muodostuvan pääosin kuivatusilmapuhaltimien sähkönkulutuksesta. Kuivatusilman tilavuusvirta lasketaan kuivan ilman tiheyden ja Mollier-diagrammin avulla katsomalla NTP-tilassa olevan ilman vesipitoisuus ja 85 °C:een lämmitetyn kuivatusilman vesipitoisuus vakioentalpiasuoraa pitkin siirryttäessä 5 °C ennen kyllästyskäyrää.

Kuivurin puhaltimien sähköteho lasketaan kaavalla:

$$P = \frac{\dot{V} \times \Delta p}{\eta}, \quad 4.2$$

jossa \dot{V} on kuivatusilman tilavuusvirta [m^3/s], Δp polttoainepedin ja kuivatuslaitteiston aiheuttama painehäviö [Pa] ja η puhaltimen hyötysuhde.

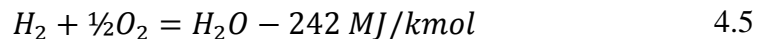
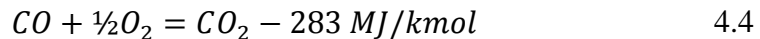
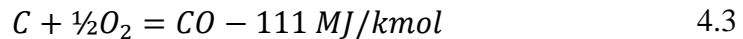
Holmberg (2012) arvioi painehäviöksi 500-1000 Pa ja puhaltimen hyötysuhteeksi 70 %.

4.2.2 Kaasutus

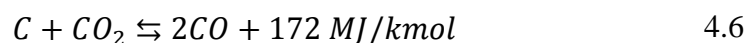
Tässä työssä valittiin kaasuttimeksi kuplapeti -tyyppinen leijukerroskaasutin, jossa käytetään kaasutusaineena hapen ja vesihöyryn seosta.

Kaasutuksen liittyvien kemiallisten reaktioiden tärkeimmät kaavat on esitetty alla (Higman & van der Burgt, 2008):

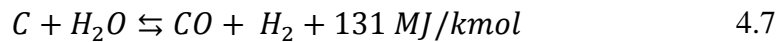
Palamisreaktiot:



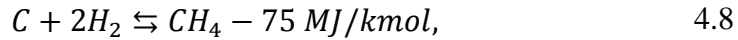
Boudouardin tasapainoreaktio:



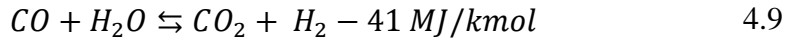
vesikaasureaktio:



metanointireaktio:



vesikaasu shift -reaktio:



Kaasutuksen tuotekaasu sisältää pääasiassa vetyä, hääkää, hiilidioksidia, metaania ja vettä. Kaasuttimen suorituskyky voidaan ilmaista kahdella tavalla, jotka ovat terminen hyötysuhde (HGE, Hot Gas Efficiency) ja kemiallinen hyötysuhde (CGE, Cold Gas Efficiency). Termisessä hyötysuhteessa on mukana kaasun tuntuva entalpia. Synteesi-kaasusovelluksissa usein käytettävä kemiallinen hyötysuhde määritetään kaavalla (Kurkela & Jahkola, 2002):

$$\eta_{kem} = \frac{\dot{m}_k q_k}{\dot{m}_p q_p}, \quad 4.10$$

jossa \dot{m}_k on tuotekaasun massavirta [kg/s], q_k tuotekaasun tehollinen lämpöarvo [MJ/kg], \dot{m}_p polttoaineen massavirta [kg/s] ja q_p polttoaineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

Kemiallinen hyötysuhde kertoo kuinka paljon polttoaineen sisältämästä energiasta saadaan siirrettyä tuotekaasuksi, jolla on hyödynnettävissä oleva lämpöarvo.

Kaasuttimen hapentarve lasketaan kaasutuksen ilmakertoimen (ER, equivalence ratio) avulla (Basu, 2006, muokattu):

$$ER = \frac{\text{kaasuttimeen syötettävän hapen määrä}}{\text{stoikiometrinen hapentarve}}, \quad 4.11$$

ER vaihtelee tavallisesti välillä 0,2-0,3 (Basu, 2006). Van der Meijden et al. (2010) käyttivät laskelmissaan arvoa 0,25. Tässä työssä käytetään samoin arvoa 0,25.

Paineistettuun leijupetiin perustuvan happi-höyry -kaasuttimen kemiallisen hyötysuhteen suuruus vaihtelee lähteittäin. Clausen (2011) esittää hyötysuhteeksi n. 80 %:a. Rollins et al. (2002) kertovat GTI:n demonstraatiolaitoksen kemiallisen hyötysuhteen vaihdelleen välillä 55-77 %, mutta samassa lähteessä simuloivat 82,1 % hyötysuhteen perustuen ylempään lämpöarvoon. Kurkela et al. (2008) esittävät leijureaktorin kemialliseksi hyötysuhteeksi 75-80 %. Tunån (2008) leijukerroskaasuttimelle esittämällä luvuilla kemialliseksi hyötysuhteeksi saadaan 84 %. Larson et al. (2009) puolestaan saavat kemialliseksi hyötysuhteeksi 79,8 % perustuen alempaan lämpöarvoon. Heidän laskelmissaan käyttämä kaasutin on nimenomaan leijupetiin perustuva paineistettu happi-höyry kaasutin, minkä vuoksi tämän työn laskennassa käytetään kemiallisena hyötysuhteena 80 %:a.

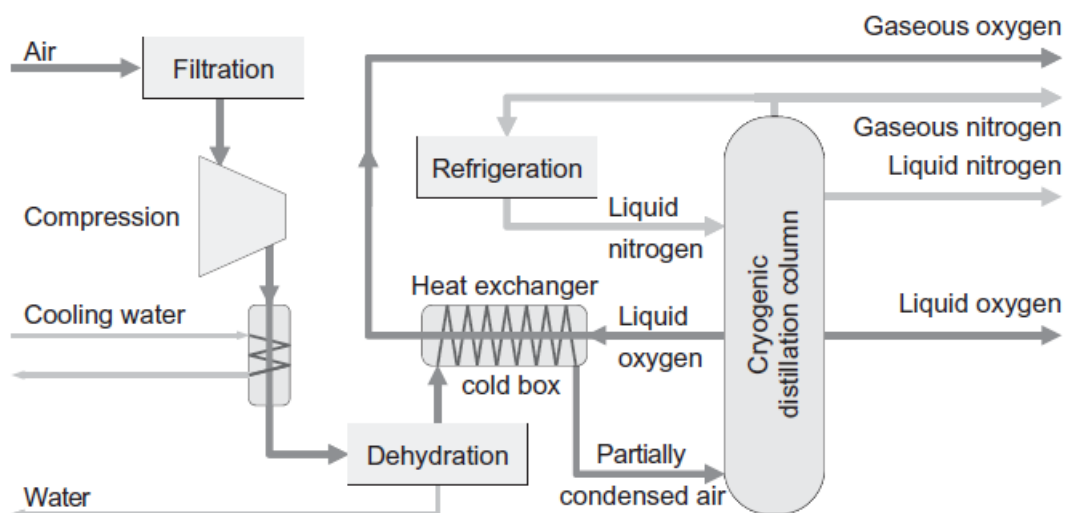
Larson et al. (2009) luvuista saadaan lisäksi laskettua kaasutuksessa käytettävä happi-höyry -suhde, joka on 1,32. Heidän artikkelistaan saadaan myös sulkusyötöiden paineistukseen käytettävän hiilidioksidin määrä, joka on 10 % syötettävän polttoaineen massavirrasta.

Nieminen (2011) laski kaasuttimesta saatavan tuotekaasun koostumuksen tasapainoreaktioiden ja Basun (2006) esittämän yksinkertaistetun mallin avulla. Tuloksena saadulla kaasun koostumuksella kaasuttimen kemiallinen hyötysuhde oli peräti 93,4 %, mikä todettiin epäilyttävän korkeaksi. Tässä työssä ohitettiin kaasuttimen yksinkertainenkin tasapainoreaktioihin perustuva mallintaminen, koska tulokset olisivat olleet epäluotettavia. Tässä työssä kaasuttimeen syötettävä polttoaineteho laskettiin kemiallisen hyötysuhteen avulla shift-reaktoria edeltävästä kaasutehosta.

Kaasuttimen stoikiometrinen hapentarve lasketaan kuivalle tuhkattomalle polttoaineelle. Laskennassa käytettiin puun keskimääräistä alkuainekoostumusta (Poltto & Palaminen, 2002). Polttoaineen tuhkapitoisuudeksi arvioitiin 1,5 % kuiva-aineesta.

4.2.3 Hapentuotantoyksikkö (ASU)

Kryogeeninen hapentuotantoyksikkö on nykyään ainoa hapentuotantotekniikka, jolla voidaan tuottaa tarpeeksi puhdasta happea (>99,5 %) tarpeeksi suurella kapasiteetilla (>60 t/d) (Clausen, 2011). Hapen on oltava puhdasta, koska maakaasun siirtoverkkoon syötettävän kaasun tulisi olla mahdollisimman vähätyppistä. Prosessin alkupäässä syötetty typpi rikastuu mentäessä prosessiin loppua kohden ja sen erottaminen tuotekaasusta prosessin myöhemmässä vaiheessa vaatii paljon energiaa. Kuvassa 15 on esitetty yksinkertainen kaaviokuva kryogeenisestä hapentuotantoyksiköstä.



KUVA 15. KRYOGEENINEN HAPENTUOTANTOYKSIKKÖ (RACKLEY 2010)

Hapentuotannon ominaissähkökulutus vaihtelee lähteestä riippuen välillä 0,2-0,299 kWh/kg(O₂) (Beysel, 2009, Tranier et al, 2009, van der Meijden et al, 2010).

Happi höyrytetään ulkoilmalla, esilämmitetään kaukolämmöllä 80 °C lämpötilaan ja lämmitetään 10,5 bar(a) höyryllä 180 °C lämpötilaan ennen syöttämistä kaasuttimeen.

4.2.4 Tuotekaasun puhdistusmenetelmät

Tuotekaasusta on poistettava mm. tervat, klooriyhdisteet, partikkelit sekä happamat kaasut kuten hiilidioksidi ja rikkivety. Tässä luvussa esitetään lyhyesti joitain käytössä olevia puhdistusmenetelmiä.

Tervanpoisto

Tervoille on useita määritelmiä, mutta yksinkertaisimmillaan ne voidaan määritellä hiilivetyinä, joiden molekyylimassa on suurempi kuin bentseenillä. Tervat pitää poistaa tuotekaasusta, jotteivät ne tiivistyessään aiheuta tukkeumia ja likaantumista suodattimiin, venttiileihin ja putkistoihin. Tuotekaasun tervapitoisuus riippuu kaasutintyyppistä. Leijutusaineena ilmaa käyttävän CFB-kaasuttimen tuotekaasun tervapitoisuus on 10 g/m³. (Anis & Zainal, 2011). Synteesiin menevän kaasun tervapitoisuus saa olla luokkaa 0,1 g/m³ (Cozens & Manson-Whitton, 2010).

Anis & Zainal (2011) käsittelevät eri tervanpoistotekniikoita kattavasti Review-artikkelissaan. Tervanpoistotekniikat jaetaan primäärisiin ja sekundäärisiin menetelmiin riippuen tervanpoiston sijainnista. Primääriset menetelmät poistavat tervoja heti kaasuttimessa, sekundääriset menetelmät kaasuttimen jälkeen. Tämän lisäksi sekundääriset menetelmät jaetaan märkiin ja kuumiin menetelmiin ja edelleen fysikaalisiin, katalyyttisiin ja termisiin menetelmiin. Primäärisiä tervanpoistotekniikoita ovat mm. tervojen hajoamista edistävien petimateriaalien kuten oliviinin ja dolomiitin käyttäminen. Sekundäärisiä märkiä fysikaalisia menetelmiä ovat erilaiset vesipesurit ja märät sähkösuotimet sekä bioöljyihin perustuvat pesurit kuten OLGA. Sekundäärisiä kuivia fysikaalisia menetelmiä ovat esimerkiksi hiekkapetifiltterit, erityyppiset kangas- tai kuitusuodattimet sekä keraamiset kynttiläsuodattimet. (Anis & Zainal, 2011)

Katalyyttinen krakkaus on tehokas tervanpoistotekniikka. Tervojen krakkaamiseen käytettävät katalyytit perustuvat usein nikkeliin, jonka toimintaa tuetaan esimerkiksi alumiinioksidin avulla. Katalyyttisellä tervanpoistolla voidaan hajottaa tervat lähes täydellisesti (Anis & Zainal, 2011).

Termisessä krakkauksessa terva hajotetaan muiksi yhdisteiksi lämmittämällä tuotekaasua tiettyyn lämpötilaan tietyn ajaksi. Lämpötilan nostaminen edistää tervayhdisteiden hajoamista. Myös termisellä krakkauksella voidaan hajottaa tervat lähes täydellisesti. (Anis & Zainal, 2011)

Katalyyttinen ja termisen krakkaus ovat houkuttelevimmat tervojen poistotekniikat tervojen täydellisen hajottamisen vuoksi. Lisäksi kummankin menetelmän etuna on tervojen hajoamisessaan luovuttaman energian siirtyminen tuotekaasuun sen sijaan, että kävisi kuten esimerkiksi vesipesuissa, joissa tervojen energia hukataan ja tämän lisäksi saadaan aikaan vedenkäsittelyongelmia. Termisen krakkauksen haittapuolena on lämpötilan noston vaatima energia, mikä joudutaan tuottamaan esim. polttamalla osa tuotekaasusta. Nikkelikatalyytit ovat tehokkaimpia muuntamaan tervat tuotekaasuksi. (Anis & Zainal, 2011)

Tässä työssä valittiin käytettäväksi tervojen katalyyttinen krakkaus tervareformerissa. Reformerin hajottaa tervayhdisteet ja raskaat hiilivedyt, jolloin syntyy lämpöä ja tuotekaasun koostumus muuttuu hieman. Ilmakaasutuksesta saadun tuotekaasun energiansäilytöjen ero ennen ja jälkeen reformeria on 7 promillea (Salo, 2004). Tämän vuoksi reformerin tarkempaa käsittelyä ei katsottu tämän työn puitteissa tarpeelliseksi.

Reformerin jälkeisessä kaasunjäähdyttimessä tuotekaasu jäähdytetään 900 °C:sta 180 °C lämpötilaan (Gassner & Maréchal, 2009). Vesi-höyrypiiriin saatava lämpöteho lasketaan kaasun ainevirran, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilaeron avulla. Kaasun jäähdyttimellä tuotetaan tulistettua höyryä, jonka paine on 80 bar(a) ja lämpötila 450 °C.

Suodatus

Tuotekaasusta erotetaan suodattamalla partikkeleiden lisäksi alkaleita, raskasmetalleja ja klooriyhdisteitä. Lämpötila-alue vaihtelee välillä 150-800 °C ja vaikuttaa valittavaan suodatintyyppiin: jäykät keraamiset kuitusuodattimet sopivat alle 900 °C lämpötiloihin, keraamiset letkusuodattimet alle 500 °C lämpötiloihin ja tefloniset letkusuodattimet alle 250 °C lämpötiloihin. (Kurkela, 2010)

Pesuri

Pesuri eli scrubberi erottaa tuotekaasusta tervareformerissa hajoamatta jääneet typpi-yhdisteet kuten ammoniakki (NH_3) ja vetysyanidini (HCN) sekä kloridit (Salo, 2004).

Pesurille tulevan kaasun lämpötila on 180 °C (Gassner & Maréchal, 2009).

Happamien kaasujen erottaminen (AGR)

Biomassasta tuotetun synteettikaasun rikinpoistoon käytettävistä menetelmistä yleisimpiä ovat adsorptio sinkkioksidipetiin (ZnO) ja peseminen metanolilla eli Rectisol-prosessi.

Sinkkioksidipeti toimii 250-300 °C lämpötilassa ja pystyy poistamaan rikkiä alle 100 ppb pitoisuuksiin. Sinkki voi reagoida halogeenien kanssa ja muodostaa haihtuvia aineita, jotka pitää poistaa toisessa reaktorissa. Toisen reaktorin peti koostuu tavallisesti aktiivista alumiinioksidista (Tunå, 2008). Rikkivety muodostaa sinkkioksidin kanssa sinkkisulfidia, joka voidaan regeneroida sinkkioksidiksi hapen avulla. Erottuva rikkidioksidi voidaan muuttaa kalsiumkarbonaatiksi tai -sulfaatiksi. (Steubing et al. 2011)

Rectisol-prosessissa (Kuva 16) tuotekaasu pestään -40 °C lämpötilassa olevaa metanolilla. Rikkivety (H_2S), hiilidioksidi (CO_2) ja karbonyylisulfidi (COS) liukenevat kylmään metanolin ja puhdistettu tuotekaasu johdetaan eteenpäin prosessissa. Rectisol-prosessilla päästää hyvin mataliin rikkipitoisuuksiin (lähteestä riippuen alle 0,001-0,1 ppmv $\text{H}_2\text{S} + \text{COS}$), mutta ongelmana on prosessin monimutkaisuus ja metanolin jäähdyttämiseen tarvittava suuri energiamäärä. (Korens et al. 2002, Linde 2011).

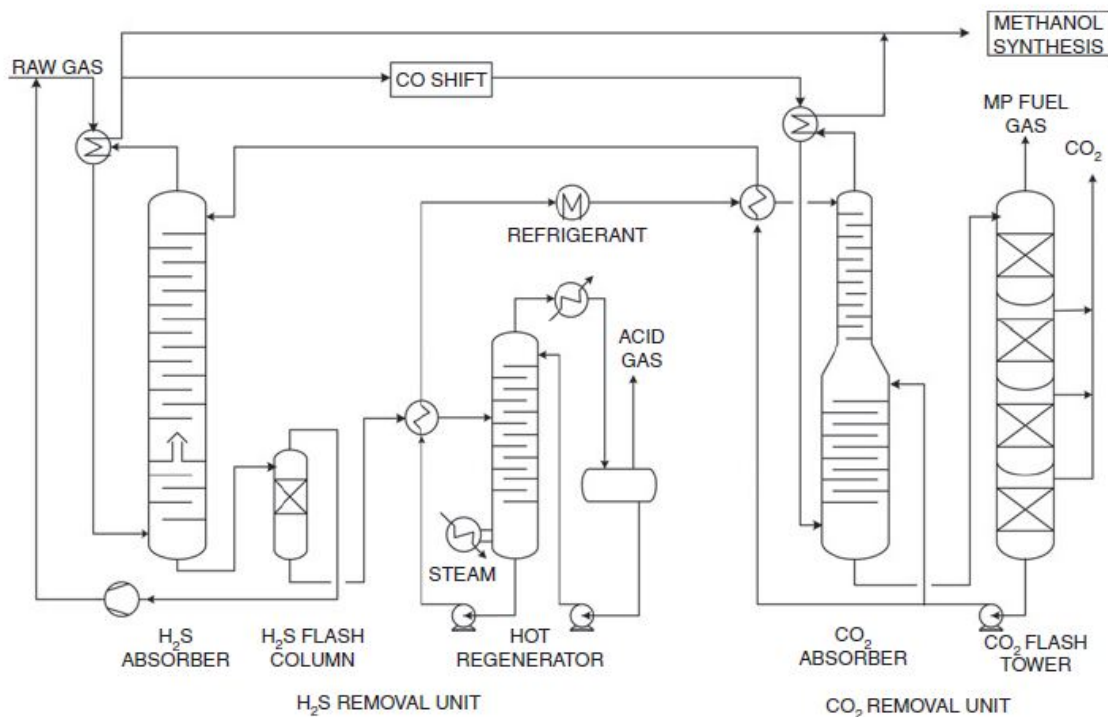
Tunå (2008) vertaili eri kytkentöjen hyötysuhteita ja tuli siihen tulokseen, että biojalostamon hyötysuhde on parempi rikinpoiston perustuessa sinkkioksidipetiin eikä Rectisol-

prosessiin. Higman (2007) puolestaan toteaa, että suuren sinkkioksidinkulutuksen vuoksi sinkkioksidipetiä voidaan käyttää kaasutussovelluksissa ainoastaan viimeisenä varmistuksena ennen metanointikatalyyttiä.

Rectisol-prosessin etuina ovat lukuisat referenssit, hiilidioksidin erottaminen ja mahdollisuus hyödyntää erotettu rikkivety vaikka rikkihapon tuotannossa. Metanolin jäädyttäminen vaatii paljon energiaa, mutta kiinnostavana vaihtoehtona olisi hapentuotantoyksiköltä saatavan nestemäisen typen hyödyntäminen jäädytyksessä.

Rectisol-prosessissa erotetusta hiilidioksidista 60-75 % voidaan ottaa talteen n. 2,75-4 bar(g) paineessa (Miller & Tillman, 2008). Erotettua hiilidioksidia voidaan hyödyntää prosessissa inertisointitarkoituksiin ja erityisesti polttoaineen sulkusyöttimien paineistus voidaan toteuttaa typen sijaan hiilidioksidin avulla, jolloin vältettäisiin vaikeasti erotettavan typen tuominen prosessiin. Rectisol-prosessi erottaa myös synteetikaasussa olevan veden (Lurgi, 2012).

Tässä työssä happamien kaasujen erottamistekniikaksi valittiin Rectisol-prosessi. Rectisol-prosessin energiankulutuslukuja on kerätty taulukkoon 12. Tässä työssä energiankulutus lasketaan Meerman (2011) esittämällä luvuilla, jotka on esitetty erotettua hiilidioksiditonna kohden. Lämmön ominaiskulutus on $90 \text{ MJ}_{\text{th}}/\text{t}(\text{CO}_2)$ ja sähkön ominaiskulutus $137 \text{ MJ}_e/\text{t}(\text{CO}_2)$. Lämpö tuodaan kylläisenä 6 bar(a) höyrynä.



KUVA 16. RECTISOL-PROSESSIN PERIAATEKUVA (MILLER & TILLMAN 2008)

TAULUKKO 12 RECTISOL-PROSESSIN KULUTUSLUKUJA

suure / lähde	Larson et al. (2006)	Bloch (2006)	Kohl & Nielsen (1997)	Boll et al. (2002)	Meerman et al. (2011)
Absorberin paine [bar]	32	56	78		
Tilavuusvirta / ainevirta absorberille	4068 kmol/h	8482,5 kmol/h	6021 kmol/h	100 000 m ³ (STP)/h (H ₂ ja CO)	
CO ₂ absorberille [kmol/s]	0,24	0,54	0,57		
H ₂ S absorberille [kmol/s]	0,02	0,02	0,004		
Erottava CO ₂ -määrä [kmol/s]	0,16	0,52	0,36		
Metanolin make-up [kg/h]	120	40	30	34,5-40,3	
Jäähdytysteho [MW]	7,41	4,2	2		
Jäähdytysvesivirta [m ³ /h]	0	133	300	1500-2000	
Lämmönkulutus [MW]	4	3,2	3,75	1,65-2,31	90 MJ _{th} /t(CO ₂)
Sähkökulutus [MW]	0,421	1,64	1,1	2-2,5	137 MJ _e /t(CO ₂)

Dakotan coal-to-SNG -laitoksessa jäähdytys perustui kylmäaineena käytettävään amoniakkiin ja pyöriviin koneisiin, joiden voimanlähteenä käytettiin prosessihöyryä, mutta tässä työssä oletetaan, että kylmäkompressoreita pyöritetään sähköllä ja että Meermanin (2012) sähkökulutuksessa on mukana kylmätehon tuottamiseksi vaadittava sähköteho.

Osa metanolista poistuu strippauskaasujen mukana ja sitä täytyy lisätä prosessiin jatkuvasti. Metanolin makeup-määräksi arvioidaan 40 kg/h. Modernin metanolin tuotantolaitoksen ominaispäästö on 0,54 t(CO₂)/t(metanolia) (Dolan, 2012).

4.2.5 Shift-konversio

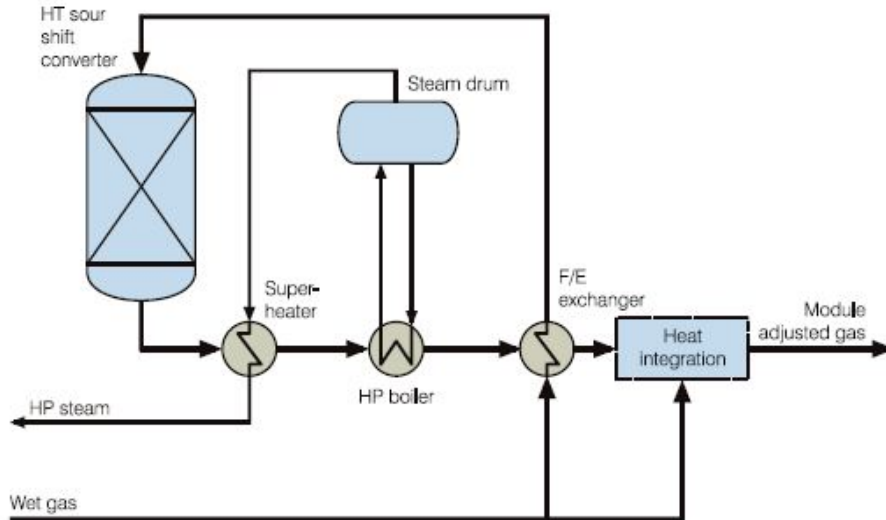
Vedyn ja hiilimonoksidin stoikiometrisen suhteen on metanointiprosessissa vaadittavien reaktioiden tapahtumiseksi oltava suurempi kuin 3. Tuotekaasussa suhde on kuitenkin usein 0,3...2, mikä on liian matala hyvän hiilimonoksidin konversion ja katalyyttien pitkän eliniän kannalta. Tämän vuoksi vedyn ja hiilimonoksidin suhdetta säädetään ennen metanointia vesikaasun shift -prosessilla. Eksotermisen vesikaasu shift -reaktion kaava on luvussa 4.2.2 esitetty kaava 4.9. (Kopyscinski et al. 2010)

Vedyn ja hiilimonoksidin suhdetta tarkastellaan lähteestä riippuen suoraan tai kaavalla, joka ottaa huomioon myös hiilidioksidin osuuden (Haldor Topsøe, 2011b):

$$\frac{H_2 - CO_2}{CO + CO_2} \geq 3 \quad 4.12$$

Shift-konversiota sanotaan ”likaiseksi”, jos reaktoriin menevässä kaasussa on huomattavan paljon rikkivetyä (Kurkela et al., 2008). Haldor Topsoe valmistaa likaiseen shift-konversioon katalyyttejä, jotka kestävät 320-500°C lämpötiloja (Haldor Topsoe, 2011a). Eksotermisestä vesikaasu shift -reaktiosta voidaan ottaa korkeaenergistä lämpöä talteen (Kuva 17).

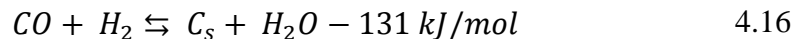
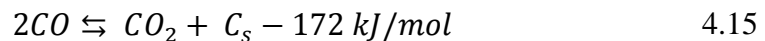
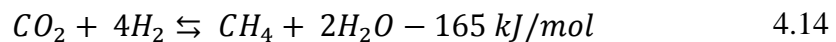
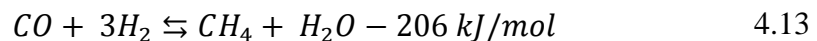
Shift -reaktoriin menevän tuotekaasun sisältämän vesihöyryn ja kuivan tuotekaasun välisen moolisuhteen on oltava vähintään 1,1. (McCarthy, 2009)



KUVA 17. SOUR-SHIFT –PROSESSIN PERIAATEKUVA (HALDOR TOPSØE 2011A)

4.2.6 Metanointi

Metanointi on prosessi, jossa tuotekaasun metaanipitoisuutta nostetaan katalyyttien avulla. Metanoinnissa vety ja hiilimonoksidi reagoivat keskenään muodostaen metaania ja vettä eli se on maakaasun höyryreformointiin nähden päinvastainen reaktio. Alla on esitetty metanointi-prosessin reaktioyhtälöt (Harms et al, 1980):

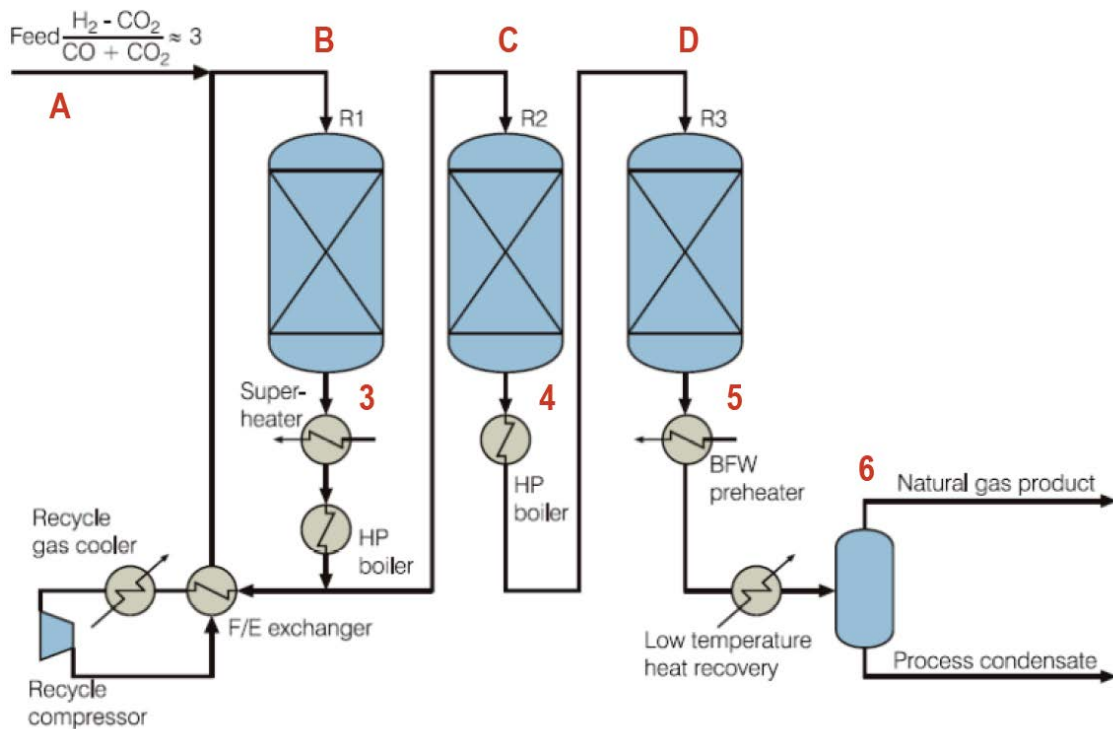


Metanoinnissa käytetään yleensä nikkeliin perustuvia katalyyttejä, koska ne ovat edullisia ja niillä on hyvä selektiivisyys ja aktiviteetti. Kloori ja rikkiä sisältävät yhdisteet, kuten esimerkiksi rikkivety (H_2S) ja karbonyylisulfidi (COS) myrkyttävät nikkeli-katalyytit helposti, minkä vuoksi niiden huolellinen poistaminen ennen metanointi-prosessia on tärkeää. (Kopyscinski et al. 2010)

Metanoinnissa tapahtuvat reaktiot ovat eksotermisiä, minkä vuoksi prosessissa syntyy paljon lämpöä, joka voidaan ottaa talteen. Termodynaamisesti metanointi-reaktiot suosivat korkeaa painetta ja matalaa lämpötilaa. (Kopyscinski et al. 2010)

Kopyscinski et al. (2010) esittelevät artikkelissaan kattavasti useita eri metanointitekno-
logioita, joista esitellään lyhyesti tässä työssä sovellettu tanskalaisen Haldor Topsøen
kehittämä ja kaupallistama TREMP-metanointiprosessi (Topsøe's Recycle Energy effi-
cient Methanation Process) (Kuva 18). TREMP-prosessissa metanointireaktiot tapahtu-
vat adiabaattisissa kiinteä peti -reaktoreissa, joiden lukumäärä riippuu sovelluksesta.
Ensimmäisen reaktorin lämpötilan nousua rajoitetaan kierrättämällä kompressorin avul-
la osa reaktorissa reagoineesta kaasusta takaisin reaktoriin syötettävään kaasuvirtaan.
Synteesikaasua jäähdytetään myös ottamalla jokaisen reaktorin jälkeen lämpöä talteen
vesi-höyry -piiriin. Haldor Topsøen kehittämät katalyytit kestävät 700 °C lämpötilan,
minkä ansiosta TREMP-prosessilla voidaan tuottaa 100 bar(g) paineessa ja 540 °C läm-
pötilassa olevaa tulistettua höyryä, jota voidaan hyödyntää sähköntuotannossa. Me-
tanoinnissa vapautuvasta lämmöstä 85 % saadaan talteen korkeapainehöyryä. (Haldor
Topsøe, 2011)

Metanointiin liittyvän laskennan lähtötietoina on käytetty taulukossa 13 esitettyjä kaa-
sun koostumuksia, tilavuusvirtoja ja lämpötiloja. (Harms et al. 1980)



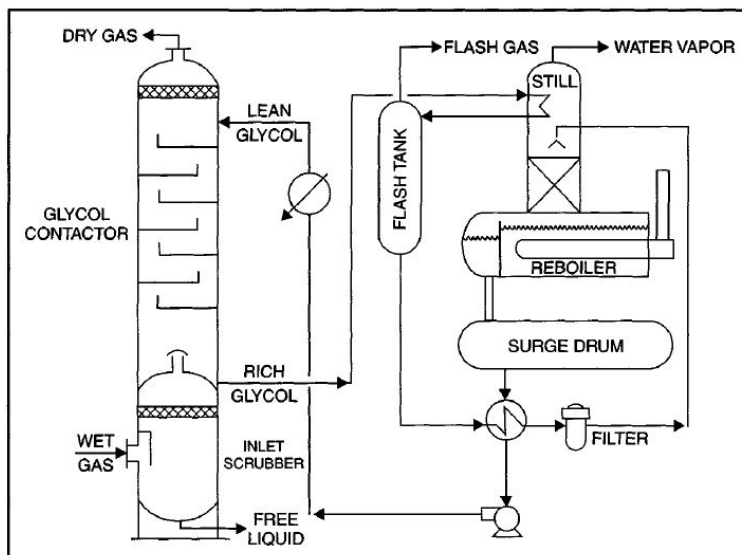
KUVA 18. METANOINTIPROSESSIN PERIAATEKUVA. MUOKATTU (BIOLLAZ 2011)

**TAULUKKO 13 KAASUN KOOSTUMUS, TILAVUUSVIRTA JA LÄMPÖTILA METANOINTIYKSIKÖN ERI PISTEIS-
SÄ (HARMS ET AL. 1980, BIOLLAZ 2011)**

	A	B	3/C	4/D	5	6
	[mol-%]	[mol-%]	[mol-%]	[mol-%]	[mol-%]	[mol-%]
H ₂	65,8	33,9	18,8	5,9	1,4	2,2
H ₂ O	0	18,2	26,8	35,5	38,6	0,2
N ₂	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	1,1
CO	18,4	6,7	1,1	0	0	0
CO ₂	2,6	3,7	4,2	1,9	0,8	1,2
CH ₄	11,6	36,6	48,5	56	58,5	95,3
C ₂ H ₆	1,2	0,4	0	0	0	0
	100	100	100	100	100	100
tilavuusvirta [Nm ³ /h]	100000	311000	276000	60300	59000	36200
lämpötila [°C]	25	300	600	430	300	35

4.2.7 Jalostaminen (upgreidaus)

Synteesikaasu sisältää metanoinnin jälkeen vettä, joka on erotettava ennen kaasun syöttämistä siirtoverkkoon. Kaasu jäädytetään, jolloin suuri osa metanoinnissa muodostuneesta vesihöyrystä lauhtuu pois. Kaasun lopullinen kuivattaminen voidaan suorittaa kuten maakaasullekin trietyleeniglykolilla (TEG). (Mokhatab et al, 2006.). Alamia (2010) esittää TEG-kuivaimen glykolin strippauskolonnin kiehuksen ominaisenergiakulutukseksi 8,7225 MJ/kg(H₂O, erotettu) ja lämpötilaksi 200 °C, mikä tarkoittaa n. 15 bar(a) painetasolla olevan kylläisen höyryn tarvetta. TEG-kuivaimen yksinkertaistettu virtauskaavio on esitetty kuvassa 19.



KUVA 19. TEG-KUIVAUKSEN YKSINKERTAISTETTU VIRTAUSKAAVIO (CARROLL, 2003)

Myös hiilidioksidin erottaminen on jalostamista (upgreidausta), mutta tässä työssä valituilla komponenteilla se erottuu jo Rectisol-prosessissa. Hiilidioksidin erottamiseen on

myös monia muita tekniikoita kuten esimerkiksi erilaiset membraanitekniikat, amiinipesut ja varsinkin biokaasusovelluksissa yleinen vesipesu.

Jalostukseen saapuvat ja sieltä poistuvat ainevirrat lasketaan skaalaamalla Harms et al. (1980) esittämistä luvuista (Taulukko 13).

4.2.8 Komprimointi

Maakaasun siirtoverkoston painetta pidetään yllä keskipakokompressoreilla.

Kompressoreiden tehontarve lasketaan kaavalla: (Mokhatab et al, 2006, muokattu)

$$P = \frac{\dot{m} \times \Delta h}{\eta_m \eta_s \eta_i}, \quad 4.17$$

jossa \dot{m} on massavirta [kg/s], Δh on entalpian muutos [kJ/kg], η_m mekaaninen hyötysuhde, η_s sähkömoottorin hyötysuhde ja η_i invertterin hyötysuhde.

Entalpian muutos ratkaistaan kaavalla: (Brown, 2005, muokattu)

$$\Delta h = \frac{\Delta h_p}{\eta_p} = \frac{1}{\eta_p} \times Z_{avg} R T_1 \frac{n}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \quad 4.18$$

jossa Δh_p on polytrooppinen entalpian muutos, η_p polytrooppinen hyötysuhde, Z_{avg} keskimääräinen kompressibiliteettikerroin, R kaasuseoksen ominaiskaasuvakio, T_1 kompressoriin saapuvan kaasuseoksen lämpötila, n polytrooppinen eksponentti, p_1 kompressoriin syötettävän kaasuseoksen paine ja p_2 kompressorista poistuvan kaasuseoksen paine.

Polytrooppinen eksponentti n ratkaistaan kaavalla: (Brown, 2005)

$$\frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{k} \times \frac{1}{\eta_p}, \quad 4.19$$

jossa k on ominaislämpökapasiteettien suhde.

Keskimääräinen kompressibiliteettikerroin Z_{avg} lasketaan kaavalla: (Ehrhardt & Steinbach, 2003)

$$Z_{avg} = 1 + 0,257 \left(\frac{p}{p_c} \right) - 0,533 \times \frac{\frac{p}{T}}{\frac{p_c}{T_c}}, \quad 4.20$$

jossa p on keskiarvo kompressorin tulo- ja lähtöpaineista [bar], p_c pseudokriittinen paine [bar], T keskiarvo kompressorin tulo- ja lähtölämpötiloista [K] ja T_c pseudokriittinen lämpötila [K].

Kompressorista poistuvan kaasun lämpötila lasketaan kaavalla: (Brown, 2005)

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad 4.21$$

Biojalostamolla tuotekaasun painetta korotetaan prosessin vaatimaan paineeseen keskikapokompressoreilla. Biojalostamolla on neljä kompressoria, sillä jalostetun bio-SNG:n siirtoverkon paineeseen korottavan kompressorin katsotaan kuuluvan osaksi siirtoverkkoa. Tämän työn biojalostamolla tarvitaan kompressorit hapentuotantoyksiköltä tulevan kaasutushapen komprimoimiseksi kaasuttimen paineeseen, sulkusyöttimien inertisoinnissa käytettävän Rectisol-prosessista saatavan hiilidioksidin komprimointiin, tuotekaasun komprimoimiseksi metanoinnin edellyttämälle painetasolle sekä ensimmäisen metanointireaktorin lämpötilan säätöön käytetyn kiertokaasun komprimointiin. Kompressoreiden tulo- ja lähtöpaineet on esitetty taulukossa 14.

TAULUKKO 14 BIOJALOSTAMON KOMPRESSOREIDEN TULO- JA LÄHTÖPAINEEET

	Metanoinnin kiertokaasu-kompressori (Harms et al., 1980)	AGR:ää edeltävä paineen korotus (Harms et al., 1980)	CO ₂ komprimointi sulkusyöttimille (Larson et al., 2009)	Hapen komprimointi
imupaine [bar(g)]	27	10	4	1
purkupaine [bar(g)]	34	30	11	10,5

4.2.9 Biojalostamon CHP-kytkentä

Biojalostamolta talteenotettavilla lämpövirroilla voidaan tuottaa ainakin osa prosessin tarvitsemasta sähköstä ja lämmöstä. Solvo-simulointiohjelmalla laadittiin yksinkertainen malli, jossa jalostusprosessin ylimääräinen lämpö otetaan talteen vesihöyrypiiriin ja kaukolämpöverkkoon. Solvo-mallista on kuva liitteessä 2.

CHP-laitoksen pääkomponentit ovat väliotollinen höyryturbiini, kaukolämmönvaihtimet, lauhdutin, syöttövesisäiliö sekä korkeapaineiset vesi- ja höyryputkistot ja lauhde- ja höyryputkistot. Höyryä tuotetaan biojalostamolla kahdella eri painetasolla: metanointiprosessista saadaan 100 bar(a) 540 °C höyryä ja reformerin jälkeisestä kaasunjähdyttimestä 80 bar(a) 450 °C höyryä. Kaasunjähdyttimen paine- ja lämpötilatasot ovat matalammat kuin metanoinnissa jotteivät puun ravinneaineiden mukana tulleesta kloorista muodostuneet yhdisteet aiheuttaisi kuumakorroosiota (Lindholm, 2000).

Generaattoriin kytketyssä höyryturbiinissa on väliotot painetasoilla 14,5 bar(a), 10,5 bar(a) ja 6 bar(a) sekä lauhdeperä 0,06 bar(a). 14,5 bar(a) höyryä käytetään TEG-kuivauksessa, jolloin lauhde palautetaan täysin. 10,5 bar(a) höyryä käytetään kaasutuksessa ja hapen lämmityksessä. Hapen lämmitykseen käytetyn höyryn lauhde palautetaan. Kaasutushöyryn sekoittuu tuotekaasuun, eikä lauhdetta palaudu. 6 bar(a) höyryä käytetään Rectisol-prosessissa happamien kaasujen strippauksessa, vesikaasu shift -reaktorissa sekä syöttövesisäiliön lämmityksessä. Rectisolin strippaushöyryn

lauhde palautetaan ja Shift-reaktoriin johdettavasta höyrystä valtaosa palautuu lauhteena kun tuotekaasu jäädytetään kaukolämmönvaihtimella. Pesurilta saatavan lauhteen on ajateltu sisältävän, mahdollisesti tervoja, suoloja ja muita syöttöveden vesikemialle haitallisia komponentteja, minkä vuoksi sieltä saatavia lauhteita ei oteta talteen vaan ne johdetaan jätevedenkäsittelyyn. Väliottohöyryjen lämpötilan säätöön tarvittava ruiskutusvesi otetaan 80 bar(a) syöttövesilinjasta. Syöttövesisäiliöön tuotava lisävesi esilämmitetään 65 °C lämpötilaan jäädyttämällä jalostukseen (upgreidaukseen) menevää tuotekaasuvirtaa.

Ylimääräistä sähköä voidaan myydä valtakunnan verkkoon ja kaukolämpöä voidaan ajaa Sisä-Suomessa sijaitsevan kaupungin kaukolämpöverkkoon, jonka muu tuotanto joustaa biojalostamolta saatavan kaukolämpötehon mukaan. Kesäaikaan ylimääräistä kaukolämpöä voitaisiin käyttää myös polttoaineen varastoon kuivattamiseksi. Varastoon kuivaaminen voidaan toteuttaa aumakuivatuksena, jolloin lämmitetty ilma johdetaan polttoaineaman alla olevaan ilmanakavaan (Haikonen, 2005). Aumakuivatuksen toteuttaminen vaatii lisää puhaltimia, kuljettimia ja tilaa polttoainekentältä. Varastoon kuivatuksen voisi toteuttaa tietysti myös hihnakuivureiden avulla johtamalla osan kuivatusta polttoaineesta varastosiilon sijaan polttoainekentälle erilliseen kuivatun polttoaineen aumaan. Varastoon kuivatus voisi olla eräs keino vuodenaikojen vaihtelusta johtuvan kaukolämmön kulutuksen vaihtelun tasaamiseksi, mutta siihen ei puututa tässä työssä.

4.3 Siirtoputkisto

Suomen maakaasun siirtoputkisto ulottuu itärajalta Imatralla länteen Lohjalle saakka ja pohjoisessa Kyröskoskelle kattaen Kaakkois- ja Etelä-Suomen suuret kaupungit. Siirtoputkiston pituus on 1190 km ja jakeluputkiston 1840 km. Kaasuverkoston alueella elää puolet suomalaisista (Kuva 20). Maakaasua käytetään mm. sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa, erillistuotannossa, teollisuusprosesseissa sekä liikennepolttoaineena. Kompressoriasemat, jotka sijaitsevat Imatralla, Kouvolassa ja Mäntsälässä, pitävät kaasuverkon paineen sopivalla tasolla maksimipaineen ollessa 54 bar(g). Komprimointiin tarvittava energia tuotetaan polttamalla maakaasua. Jalostetun bio-SNG:n paineen siirtoverkon paineeseen korottavan kompressorin vaatima energia tuodaan sähkönä. Kompressorin energiankulutus ja sähkönkulutuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt sisällytetään siirron lukuihin.

Suomessa maakaasun siirtoputkiston aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ovat 0,334 t(CO_{2,ekv})/TJ. Luvussa on mukana kaikki siirtoon liittyvät kasvihuonekaasupäästöt, joita ovat mm. komprimoinnissa ja paineenvähennysasemien lämmityksessä syntyvät CO₂-päästöt sekä metaanipäästöt kompressoreista ja putkistotöistä. Venäjän puolella koko maakaasun tuotantoketjun aiheuttamat päästöt ovat 8,544 t(CO_{2,ekv})/TJ. Luvut pohjautuvat Ruonakosken (2011) esittämiin arvoihin, mutta eroavat niistä hieman, koska metaanille ja typpioksiduulille käytetään RES-direktiivin mukaisia päästökertoimia.



KUVA 20. MAAKAASUPUTKISTON VERKOSTOKARTTA. (GASUM 2012)

4.4 Loppukäyttövaihtoehdot

4.4.1 Bio-SNG liikennepolttoaineena

Puupohjaista biokaasua voidaan käyttää liikennepolttoaineena ilman muutostöitä maakaasukäyttöisissä moottoreissa. Güssingin bio-SNG -laitokseen kytketyn tankkausaseman avulla todettiin, että bio-SNG:n soveltuu hyvin tankattavaksi olemassa olevilta maakaasun tankkausasemilta. Päästömittauksissa havaittiin, että maakaasukäyttöisen testiauton päästöt olivat sekä bio-SNG:llä että maakaasulla pienemmät kuin EURO 4 -päästölukituksen täyttävällä bensiinikäyttöisellä autolla. Tämän lisäksi bio-SNG:llä syntyi pienemmät HC- ja NO_x-päästöt kuin maakaasulla. Asetyleenipäästöt olivat puolestaan korkeammat Bio-SNG:llä kuin maakaasulla. Muiden päästökemppien osalta maakaasu ja bio-SNG olivat samalla tasolla. (Seiffert et al., 2009)

Kaupunkilinja-autojen polttoaineen ominaiskulutusta voidaan simuloida ns. Braunschweiger-syklillä. Kahden VTT:llä testatun kaupunkilinja-auton polttoaineen ominaiskulutukset on esitetty taulukossa 15. (Karvonen, 2012)

TAULUKKO 15 KAUPUNKILINJA-AUTOJEN POLTTOAINEEN OMINAISKULUTUKSET (KARVONEN 2012) JA NIISTÄ LASKETUT HYÖTYSUHTEET.

	ominaiskulutus [g/kWh]	hyötysuhde [%]
Man Lion's city (tyhjä)	494,52	14,56
Man Lion's city (täysi)	399,10	18,04
Scania Omnicity (diesel)	377,11	22,46
Scania Omnicity (kaasu)	409,71	17,57

Ottomoottori toimii optimaalisesti vain kapealla toiminta-alueella, joka on yleensä n. 60-80 % maksimikuormasta. Bensiinimoottoreilla optimaalinen kierrosalue on yleensä 2500-3000 rpm. Henkilöauton polttoaineenkulutuksen selvittämiseksi on olemassa erilaisia testisyklejä, joita ovat mm. tyyppihyväksyntään käytetty NEDC-sykli (New European Driving Cycle) ja CADC-sykli (CADC, Common Artemis Driving Cycles) (Nuottimäki, 2012). Kehitettyjen syklien tarkoituksena on simuloida todellisia ajotilanteita, minkä vuoksi mm. Artemis-sykleihin kuuluu erilliset syklit kaupunkiajolle, taajama-ajolle ja moottoritieajolle. Näin saadaan selville todellisia arkikäytön polttoaineenkulutuskertoja ja tankista renkaaseen -hyötysuhteita sen sijaan, että mitattaisiin hyötysuhde optimaaliselta kierros- ja kuormitusalueelta. VTT:n Efficaruse-projektissa on tutkittu Volkswagenin Passat Ecofuel -moottorin polttoaineenkulutusta eri sykleillä (Taulukko 16). Tulokset ovat alustavia, sillä bensiinianalyysin tulokset eivät olleet saapuneet vielä 24.4.2012 mennessä tutkijoille, minkä vuoksi tuloksiin on suhtauduttava pienellä varauksella.

TAULUKKO 16 VOLKSWAGEN PASSAT ECOFUEL -MOOTTORIN POLTTOAINEENKULUTUS, TEHTY TYÖ JA TANK-TO-WHEEL -HYÖTYSUHDE ERI TESTAUSSYKLEILLÄ. (NUOTTIMÄKI, 2012)

sykli	polttoaine	positiivinen työ syklin yli [kWh]	polttoaine-energiaa [kWh / 100 km]	polttoaineenkulutus [kg/100 km]	hyötysuhde [%]
Artemis Urban	bensiini	0,72	107	9,08	15,1
Artemis Urban	CNG	0,71	106	7,61	15,0
Artemis Road	bensiini	1,64	51	4,29	18,6
Artemis Road	CNG	1,65	46	3,35	20,8
NEDC	bensiini	0,97	61	5,13	14,4
NEDC	CNG	0,97	62	4,43	14,2
Artemis Motorway	bensiini	3,34	54	4,61	21,5
Artemis Motorway	CNG	3,34	50	3,6	23,2

Tässä työssä liikenteen polttoaineen ketjuhyötysuhdetta laskettaessa käytetään loppukäytön hyötysuhteena kaupunkilinja-auto Scania Omnicityn tank-to-wheel -hyötysuhdetta (17,57 %).

Maakaasun tankkausaseman sähkön ominaiskulutus on tankattua kaasukilogrammaa kohden 0,28 kWh/kg. (Moora, 2009)

4.4.2 Bio-SNG lämmityskäytössä

Lämmityskäytössä tarkastellaan modernia kondenssikattilaa. Kondenssikattila ottaa talteen myös palamisessa syntyneen vesihöyryn lämpöenergian, minkä ansiosta hyö-

tysuhde on korkeampi kuin tavallisessa lämmityskattilassa. Kondenssikattilan alempaan lämpöarvoon perustuva hyötysuhde on 110,3 %. (Oertli, 2012)

4.4.3 Bio-SNG CHP-tuotannossa

CHP-tuotannossa tarkastellaan kombivoimalaitosta. Kombivoimalaitoksessa (CCGT, combined cycle gas turbine) kaasuturbiinilaitoksen perään kytketyllä lämmöntalteenotokattilalla (HRSG, heat recovery steam generator) tuotetaan kaasuturbiinilta poistuvista kuumista savukaasuista korkeapaineista tulistettua höyryä, joka johdetaan edelleen höyryturbiiniin. Höyryturbiinista poistuva matalapaineinen höyry lauhdutetaan kaukolämmönvaihtimissa tai vaihtoehtoisesti erillisessä lauhduttimessa. Sähköä tuotetaan kaasuja höyryturbiineihin kytkettyjen generaattoreiden avulla.

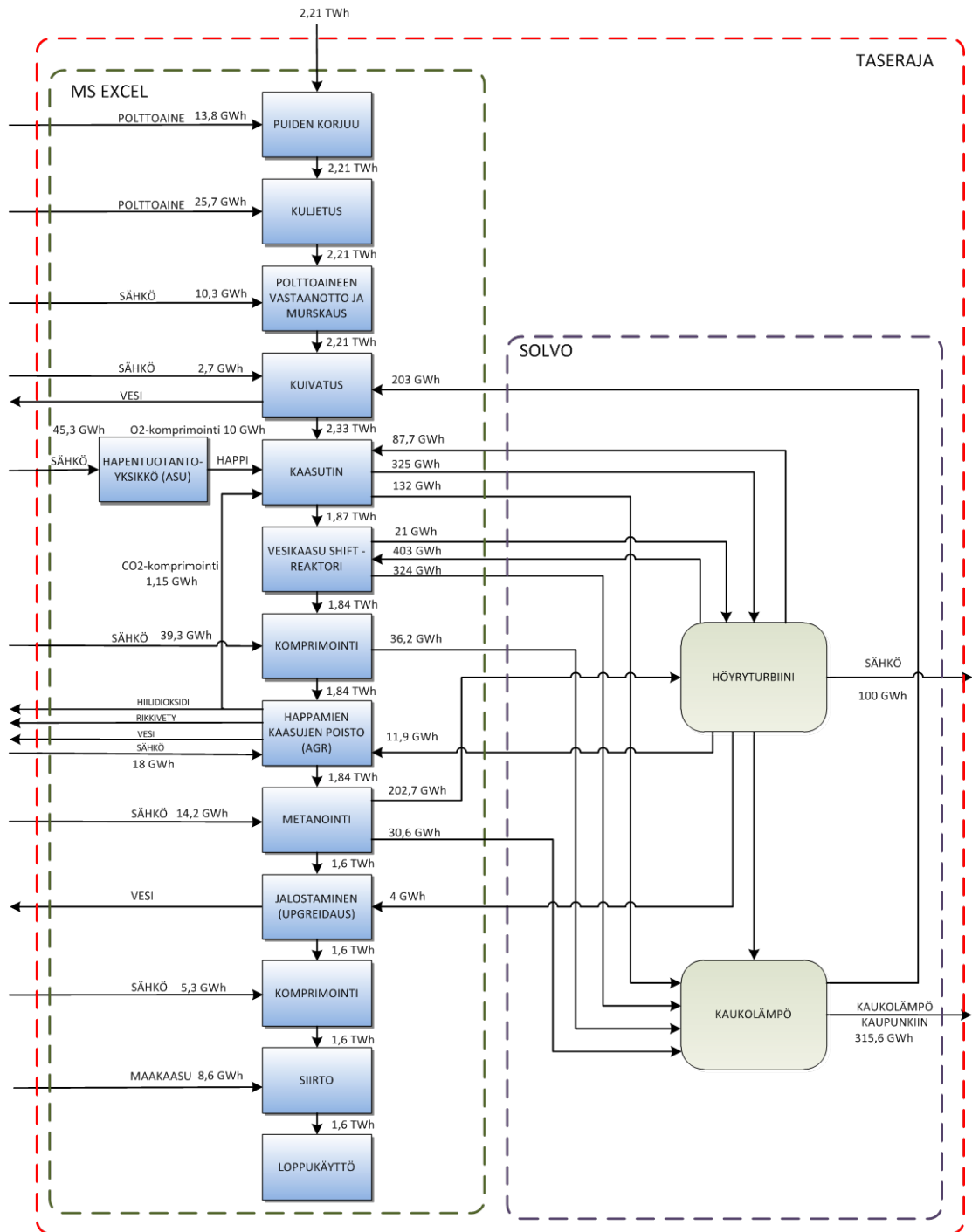
CHP-tuotannon lähtötietona käytetään Helsingin Energian Vuosaari B -kombivoimalaitoksen hyötysuhdetta ja rakennusastetta. Kombivoimalaitoksen lämpöteho on yhteensä 420 MW, sähköteho 470 MW ja hyötysuhde yhdistetyssä tuotannossa korkeimmillaan 92 %. Lauhdeajossa sähköntuotannon hyötysuhde on 52 %. (Länsi-Suomen Ympäristölupavirasto, 2005). Ympäristöluvassa annettujen sähkö- ja lämpötehojen suhteella saadaan voimalaitoksen rakennusasteeksi 1,119.

5 TULOKSET JA TULOSTEN ARVIOINTI

Tässä luvussa esitetään ensin välituloksina energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt tuotantoketjun eri vaiheissa ja biojalostamon osalta osaprosesseittain. Tämän jälkeen toisessa alaluvussa tulokset kootaan yhteen ja esitetään tuotantoketjun energiankulutus ja energiatehokkuus. Kolmannessa alaluvussa käsitellään koko tuotantoketjun aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä eri loppukäyttövaihtoehdoille ja verrataan niitä EU:n asettamiin vaatimuksiin.

5.1 Energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt tuotantoketjun eri vaiheissa

Kuvassa 21 on esitetty tuotantoketjun energiavirrat. Kuvasta käy ilmi eri prosessivaiheisiin menevä sähköenergia ja lämpö sekä prosessivaiheista höyryturbiinille tai kaukolämpöverkkoon saatavat energiat. Kuvasta puuttuu häviöt kuten esim. pohjatuhkan mukana poistuva energia. Tämän lisäksi eri jalostamoprosessien välillä kulkevan tuotekaasun energia ei sisällä tuntuva lämpöä vaan ainoastaan tuotekaasun sisältämän kemiallisen energian. Tämä esitystapa valittiin, jotta voidaan paremmin havaita biojalostamon saantoa heikentävät kohteet.



KUVA 21. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN ENERGIIVIRRRAT

Energiaa kuluu eniten biojalostamossa. Energiataseen perusteella suurimmat lämmön kulutuskohteet ovat metsäbiomassan kuivatus (203 GWh), vesikaasu shift -reaktori (403 GWh) ja kaasutin (87,7 GWh). Vesikaasu shift -reaktorille menevästä lämmöstä valtaosa (324 GWh) saadaan talteen kaukolämpöverkkoon. Suurimmat sähkönkuluttajat ovat hapentuotantoyksikkö (45,3 GWh tuottaminen + 10 GWh komprimointi kaasuttamisen paineeseen), happamien kaasujen puhdistusta edeltävä kompressori (39,3 GWh), happamien kaasujen erottaminen (18 GWh), metanoinnin kiertokaasukompressori (14,2 GWh) ja murskaus (10,3 GWh).

5.1.1 Metsäbiomassan korjuu, kuljetus ja murskaus

Metsäbiomassan korjuu

Biojalostamon raaka-ainetarve on 2,21 TWh/a. Hankittavan metsäbiomassan jakauma vastaa vuonna lämpö- ja voimalaitoksissa vuonna 2010 toteutunutta jakaumaa, jolloin toimitetut metsäbiomassamäärät ovat seuraavat: 0,889 TWh pienpuuta, 0,802 TWh hakkuutähteitä, 0,364 TWh kantoja sekä 0,159 TWh järeää (lahovikaista) kuitupuuta.

Metsätöiden energiankulutus koostuu harvestereiden ja metsätraktoreiden polttoaineenkulutuksesta. Metsätöissä kuluu energiaa 13760 MWh/a ja kasvihuonekaasupäästöjä syntyy 0,60 g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG}.

Metsäbiomassan kuljetus biojalostamolle

Energiapuuautoilla tehdään yhteensä 33520 toimitusta vuodessa, jolloin kuljetusten energiankulutus on 25670 MWh/a ja kasvihuonekaasupäästöt 1,12 g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG}.

Metsäbiomassan vastaanotto ja murskaus

Polttoaineen vastaanotossa huomioidaan ainoastaan murskauksen energiankulutus, joka lasketaan sähkönominaiskulutuksen avulla. Vuotuinen sähkönkulutus on palakokoon P45 murskattaessa 10300 MWh ja palakokoon P63 murskattaessa 8980 MWh. Jatkuvat sähköntehontarpeet ovat puolestaan 1,29 MW (P45) ja 1,12 MW (P63). Palakokoon P45 murskattaessa kasvihuonekaasupäästöjä syntyy 0,46 g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG}.

5.1.2 Biojalostamo

Polttoaineen kuivatus

Kuivurin lämpötehontarpeeksi saadaan 25,41 MW. Polttoaineen saapumiskosteudella on suuri vaikutus lämmöntarpeeseen, sillä kaatotuoreen puun kosteudella laskettuna tehontarve on 31,7 MW. Metsäbiomassasta tuotettu murske ehtii kuitenkin kuivua tuotantoketjunsä aikana, minkä vuoksi Kaukaan Voima Oy:n voimalaitokselle saapuvan polttoaineen kosteuksilla laskettu matalampi lämpötehontarve (25,41 MW) on realistisempi. Kuivatusilma lämmitetään 90 °C kaukolämpövedellä.

Puhaltimien sähköteho vaihtelee painehäviöstä ja saapuvan polttoaineen kosteudesta riippuen välillä 211-512 kW.

Polttoaineen kuivatuksen energiankulutus on 203 GWh lämpöä ja 1,7-4,1 GWh sähköä.

Kaasutin

Kaasuttimen polttoainetehoksi saadaan 291 MW_{th}. Tuotekaasussa on kemiallista energiaa 1,87 TWh. Kaasutushöyryntarve on 88 GWh. Reagoimattoman hiilen mukana poistuu energiaa 99 GWh, tuhkan ja hiilen mukana tuntuvana lämpönä 4 MWh ja muina lämpöhäviöinä 47 GWh.

Tuotekaasuun koostumus, paine ja lämpötila on esitetty taulukossa 17.

TAULUKKO 17 TUOTEKAASUN LÄMPÖTILA, PAINE JA KOOSTUMUS.

suure	arvo	[]
lämpötila	900	°C
paine	10	bar(a)
H ₂ -pitoisuus	26,9	vol-%
H ₂ O-pitoisuus	31,0	vol-%
N ₂ -pitoisuus	0,2	vol-%
CO-pitoisuus	15,2	vol-%
CO ₂ -pitoisuus	20,3	vol-%
CH ₄ -pitoisuus	5,8	vol-%
H ₂ S-pitoisuus	0,0150	vol-%

Hapentuotantoyksikkö

Stoikiometrinen hapentarve on 1,42 kg(O₂)/kg_{pa}, jolloin hapen massavirta on kaasutuksen ilmakerroin (0,25) huomioituna 5,56 kg(O₂)/s. Kompressorilta tulevan hapen esilämmittäminen vaatii 0,49 MW kaukolämpötehon ja 0,45 MW höyrytehon. Hapentuotantoyksikön sähkötehotarve vaihtelee valitusta ominaissähkönkulutuksesta riippuen välillä 3,8-5,7 MW. Tuloksien laskennassa on käytetty 5,7 MW tehoa.

Hapentuotantoyksikkö kuluttaa 45,3 GWh sähköä hapen tuottamiseen ja 10 GWh komprimointiin. Hapen lämmittäminen vaatii 7,5 GWh lämpöenergiaa.

Kaasunjäähdytin ja pesuri

Kaasunjäähdyttimen lämpötehoksi saadaan 40,7 MW, jolloin vesi-höyrypiiriin saadaan lämpöä 325 GWh.

Tuotekaasu jäähtyy edelleen pesurissa ja osa sen sisältämästä vesihöyrystä lauhtuu. Lämmenneestä pesuvedestä otetaan lämpöä talteen kaukolämpöpiiriin 16,5 MW teholla (132 GWh)

Vesikaasu shift -reaktori (WGS)

Vesikaasu shift -reaktorille menevään tuotekaasuun on lisättävä vesihöyryä 17,5 kg/s, jotta tuotekaasun sisältämän vesihöyryn ja kuivan tuotekaasun ainevirtojen suhteeksi saadaan reaktorin vaatima 1,1. Vesihöyryn ja hiilimonoksidin välinen reaktio on lievästi eksoterminen, jolloin reaktorin jälkeisestä kuumasta tuotekaasusta otetaan vesihöyrypiiriin lämpöä talteen 2,7 MW teholla (21,4 GWh). ”Hullun kierto” -periaatteella toimivan lämmönsiirtimen jälkeen tuotekaasua jäähdytetään kaukolämpövedellä, jolloin lauhtuvasta vesihöyrystä ja tuotekaasun tuntuvasta entalpiasta saadaan lämpöä talteen 40,5 MW teholla (324 GWh). Shift-reaktorilta poistuvassa tuotekaasussa on 1,84 TWh kemiallista energiaa.

Rikkivedyn ja hiilidioksidin erottaminen tuotekaasusta (AGR)

Rectisol-prosessin sähköntehon tarpeeksi saadaan 2,26 MW ja lämpötehon tarpeeksi 1,49 MW. Rectisol-prosessi kuluttaa sähköenergiaa 18 GWh ja lämpöenergiaa 11,9 GWh.

Strippauskaasujen mukana poistuu metanolia ja korvaavan tuotannon aiheuttama kasvi-huonekaasupäästö on 0,03 g(CO₂)/MJ_{SNG}, mikä on tämän työn kannalta merkityksettömän pieni.

Tuotekaasun metanointi

Korkeapainehöyrypiiriin saadaan lämpöä 25,3 MW teholla (202,7 GWh), jolloin korkeapainehöyryn massavirraksi tulee n. 9 kg/s. Tuotekaasua jäähdytetään kaukolämpövedellä ennen jalostusta, jolloin metanoinnissa muodostunut vesihöyry lauhtuu ja kaukolämpöpiiriin saadaan lämpöä talteen 3,8 MW teholla (30,6 GWh).

Bio-SNG:n jalostaminen (kuivaus)

TEG-kuivaus kuluttaa 14,5 bar(a) paineessa olevaa kylläistä höyryä 0,26 kg/s eli 0,5 MW teholla (4 GWh). Jalostetun bio-SNG:n lämpöarvoksi saatiin 47,6 MJ/kg ja massavirraksi 4,2 kg/s. Bio-SNG:n tuotantomäärä on 1,6 TWh.

Biojalostamon kaasukompressorit

Kompressorilaskennan tuloksena saadut sähkötehot ja energiankulutukset ovat:

- Metanoinnin kiertokaasukompressori: 1780 kW (14,2 GWh)
- Happamien kaasujen erottamista edeltävä kompressori: 4910 kW (39,3 GWh)
- Kaasutushapen kompressori: 1280 kW (10,2 GWh)
- Sulkusyöttimet paineistavan hiilidioksidin kompressori: 144 kW (1,15 GWh)

Tuotekaasua jäähdytetään happamien kaasujen erottamista (AGR) edeltävän kompressorin painepuolella, jolloin kaukolämpöpiiriin saadaan lämpöä 4,5 MW teholla (36,2 GWh).

Biojalostamon CHP-laitos

Biojalostamon CHP-laitoksen simulointimallin tulos on esitetty Liitteessä 2. Biojalostamon CHP-laitos tuottaa sähköä 12,532 MW teholla ja biojalostamo kuluttaa sitä 16,8 MW teholla, minkä vuoksi biojalostamolle on hankittava sähköä valtakunnan verkosta 34 GWh vuodessa.

Biojalostamo tarvitsee 25,9 MW kaukolämpötehon (207 GWh) ja lämmöntalteenotoista saadaan kaukolämpöä 65,3 MW teholla (523 GWh). Kaukolämpöä tuotetaan siten yli oman tarpeen, jolloin sitä myydään yhdyskunnan joustavaan kaukolämpöverkkoon 315 GWh.

5.1.3 Bio-SNG:n siirto biojalostamolta loppukäyttöön

Siirron hyötysuhde on n. 99,1 %. Siirron energiankulutus on 13,9 GWh ja kasviuonekaasupäästöt 0,35 g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG}. Luvuissa on mukana siirtoverkon energiankulutuksen lisäksi jalostetun bio-SNG:n siirtoverkon paineeseen korottavan kompressorin sähkökulutus.

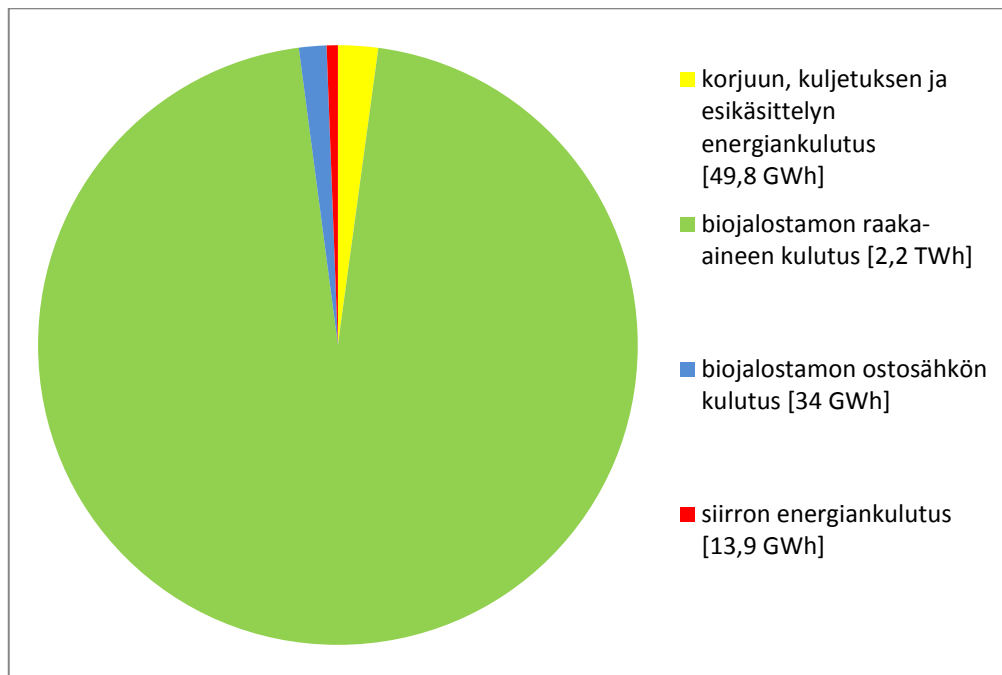
5.1.4 Bio-SNG:n loppukäyttö

Liikennepolttoainekäytössä tankkauksen aiheuttamat kasviuonekaasupäästöt lasketaan tankkauksen ominaissähkökulutuksen ja Suomen sähkönhankinnan keskimääräisen päästökertoimen avulla, jolloin tankkauksen kasviuonekaasupäästöiksi saadaan 1,83 g(CO_{2,ekv})/MJ_{SNG}. Tankkauksen kasviuonekaasupäästöjä laskettaessa on huomioitu tämän työn luvuilla tuotetun bio-SNG:n 5 % maakaasua matalampi lämpöarvo.

5.2 Bio-SNG:n tuotantoketjun energiankulutus ja energiatehokkuus

Tässä alaluvussa esitetään koko tuotantoketjun energiankulutus ja hyötysuhde eri loppukäyttövaihtoehdoille sekä biojalostamon kokonaishyötysuhde ja saanto.

Puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun energiankulutus on esitetty kuvassa 22. 96 % tuotantoketjun energiankulutuksesta on raaka-aineen kemiallista energiaa.



KUVA 22. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN ENERGIANKULUTUS

Biojalostamon energiankulutus ja -tuotanto sekä biojalostamon ulkopuolelta hankitut ja ulkopuolelle myydyt energiat on esitetty taulukossa 18. Biojalostamo tuottaa itse kaiken tarvitsemansa lämmön ja sitä riittää myös myyntiin. Sähköntuotanto ei riitä kattamaan omakäytösähkön tarvetta vaan sitä on hankittava lisää valtakunnan verkosta.

TAULUKKO 18 BIOJALOSTAMON ENERGIANKULUTUS- JA TUOTANTO SEKÄ BIOJALOSTAMON ULKOPUOLELTA HANKITUT JA ULKOPUOLELLE MYYDYT ENERGIAT.

Kulutus	raaka-aine lämpöenergia sähkö	2,21 TWh 207 GWh 134 GWh
Tuotanto	Bio-SNG kaukolämpö sähkö	1,6 TWh 523 GWh 100 GWh
Tuotetun Bio-SNG:n lisäksi myydään ulos / hankitaan ulkoa	kaukolämpöä myydään ulos sähköä hankitaan ulkoa	316 GWh 34 GWh

Biojalostamon kokonaishyötysuhde on 85 %. Biojalostamon saanto eli ulos saadun bio-SNG:n energian ja sisään syötetyn koston raaka-aineen energian suhde on 72 %. Kuitavulla raaka-aineella laskettuna saanto on 69 %.

Tuotantoketjun energiankulutuksesta 83,5 % allokoitiin bio-SNG:lle ja loput 16,5 % kaukolämmölle. Tällöin yhden puupohjaisen biokaasuyksikön (MWh) tuotantoketjun aikana kuluu 1,2 MWh energiaa.

Tuotantoketjun hyötysuhde ennen loppukäyttöä on 83 %. Tuotantoketjun kokonaishyötysuhde Lovinsin (2004) esittämällä tavalla laskettuna eri loppukäyttövaihtoehdoille on esitetty taulukossa 19. Liikennepolttoaineketjun kokonaishyötysuhde on 15 %, lämmityskäyttökäytön 91 % ja CHP-tuotantoketjun 76 %.

TAULUKKO 19 PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN KOKONAISHYÖTYSUHDE ERI LOPPUKÄYTTÖVAIHTOEHDOILLE LOVINSIN (2004) ESITTÄMÄLLÄ TAVALLA LASKETTUNA

tuotantoketju	liikennepolttoaine	lämmöntuotanto	CHP
korjuu, kuljetus ja esikäsitteily		0,98	
biojalostamo		0,85	
siirto		0,99	
loppukäyttö	0,18	1,10	0,92
tuotantoketjun kokonaishyötysuhde	0,15	0,91	0,76

Liikenteen biopolttoaineena tuotantoketjun kokonaishyötysuhde on matala verrattuna lämmöntuotanto- ja CHP-tuotantoketjujen kokonaishyötysuhteisiin. Ajoneuvojen tankto-wheel -hyötysuhteiden parantaminen on paras keino liikennepolttoaineketjun kokonaishyötysuhteen parantamiseksi. CHP-tuotantoketjun osalta on huomioitava, että voimalaitos on katsottu loppukäyttäjäksi. Lämpö ja sähkö täytyy siirtää sieltä edelleen kaukolämpö- ja sähköverkkoja myöten kuluttajille, jolloin syntyy vielä pienet lisähäviöt.

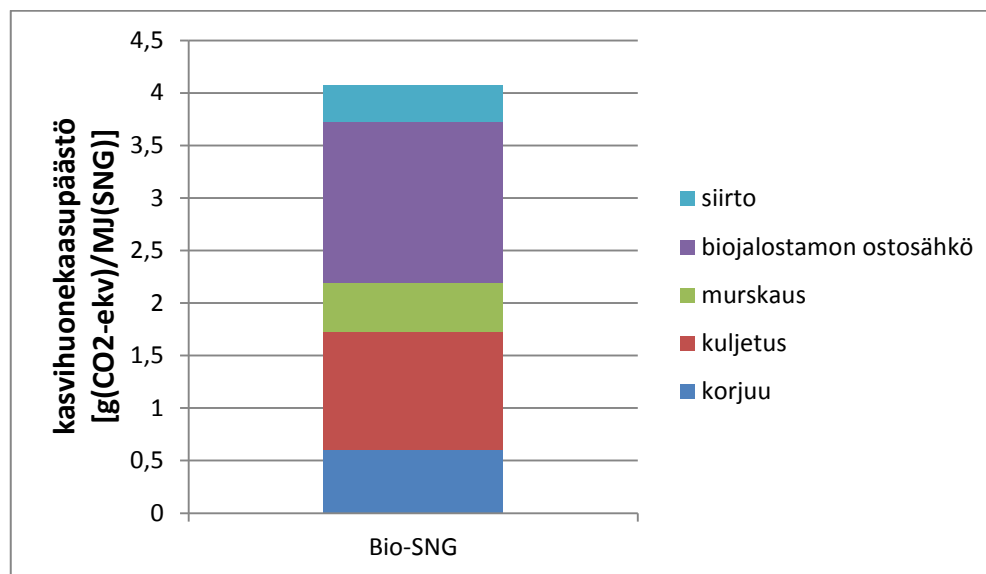
Saannon korottamiseksi parhaat vaikutukset saataisiin parantamalla kaasuttimen hyötysuhdetta ja metanoinnin hyötysuhdetta. Metanointiin saapuvan tuotekaasun energiasta muuttuu lämmöksi 16,5 %. Metanoinnin hyötysuhde riippuu saapuvan tuotekaasun me-

taanipitoisuudesta, minkä vuoksi kaasutuksessa syntyvän tuotekaasun tulisi sisältää heti mahdollisimman paljon metaania. Tuotekaasun korkea metaanipitoisuus on eräs epäsuorien kaasuttimien eduista verrattuna tässä työssä valittuun suoraan lämmöntuontiin perustuvaan kaasuttimeen.

5.3 Bio-SNG:n tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt

Kasvihuonekaasupäästöt esitetään ensin ennen loppukäyttöä ja sen jälkeen eri loppukäyttövaihtoehdoille. Liikennepolttoaineen tapauksessa käsitellään nettopäästöjen lisäksi bruttopäästöjä.

Puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt ennen loppukäyttöä ($4,1 \text{ g}(\text{CO}_{2,\text{ekv}})/\text{MJ}_{\text{SNG}}$) on esitetty vaiheittain kuvassa 23.



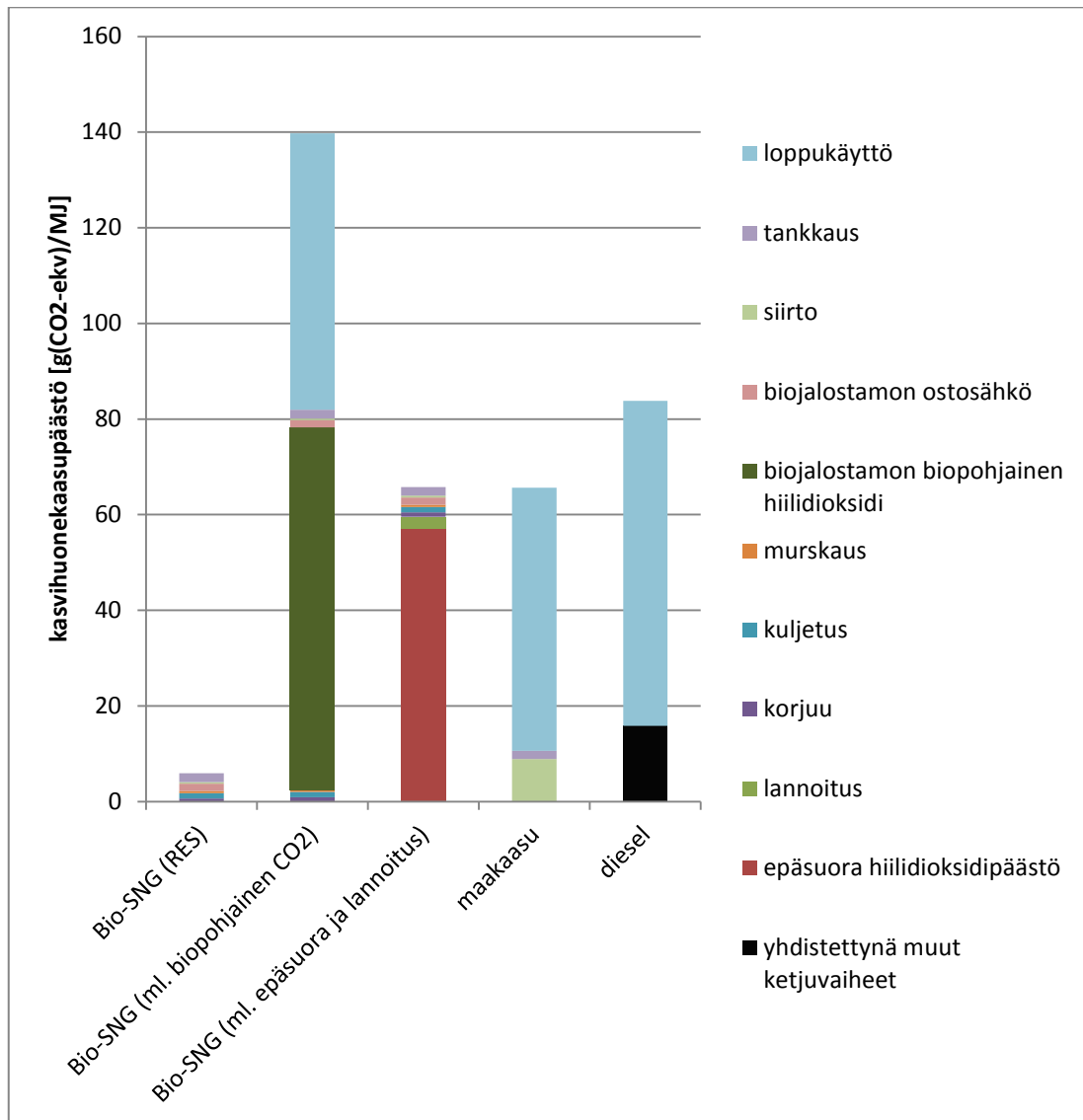
KUVA 23. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT ENNEN LOPPUKÄYTTÖÄ

Tuotantoketjun aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä merkittävimmät ovat biojalostamon ostosähköstä aiheutuvat päästöt sekä metsäbiomassan kuljetuksessa ja korjuussa käytetystä fossiilisesta dieselistä aiheutuvat päästöt. Siirrosta syntyvät kasvihuonekaasupäästöt ovat kaikista tuotantoketjun vaiheista pienimmät.

5.3.1 Bio-SNG:n liikennekäytön kasvihuonekaasupäästöt ja vertaaminen RES-direktiivin vaatimuksiin

Puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt loppukäytön ollessa liikennepolttoaine on esitetty kuvassa 24. Kuvassa on esitetty RES-direktiivin mukaisen fossiilisen vertailukohtan eli dieselin lisäksi maakaasuketjun kasvihuonekaasupäästöt. Näiden lisäksi on esitetty vaihtoehto, jossa Bio-SNG:n tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöihin otetaan huomioon myös biopohjainen hiilidioksidi sekä vaihtoehto, jossa metsäbiomassan korjuusta aiheutuvat epäsuorat hiilidioksidipäästöt ja lannoituksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt otetaan huomioon. Nämä vaihtoehdot on esitetty koska EEA (2011) suositteli kannanotossaan, että joko polton hiilidioksidipäästöt tai epäsuorat hiilidioksidipäästöt tulisi ottaa huomioon laskennassa. Dieselin osalta RES-direktiivissä esitettyä kerrointa $83,8 \text{ g}(\text{CO}_{2,\text{ekv}})/\text{MJ}$ on yritetty avata hieman vähentämäl-

lä kertoimesta dieselin poltosta aiheutuva suora päästö (68 g(CO_{2,ekv})/MJ). Erotuksen on ajateltu koostuvan dieselin tuotannosta, siirrosta ja jakelusta. Ne on merkitty kuvassa yhdistettynä muut ketjuvaiheet.



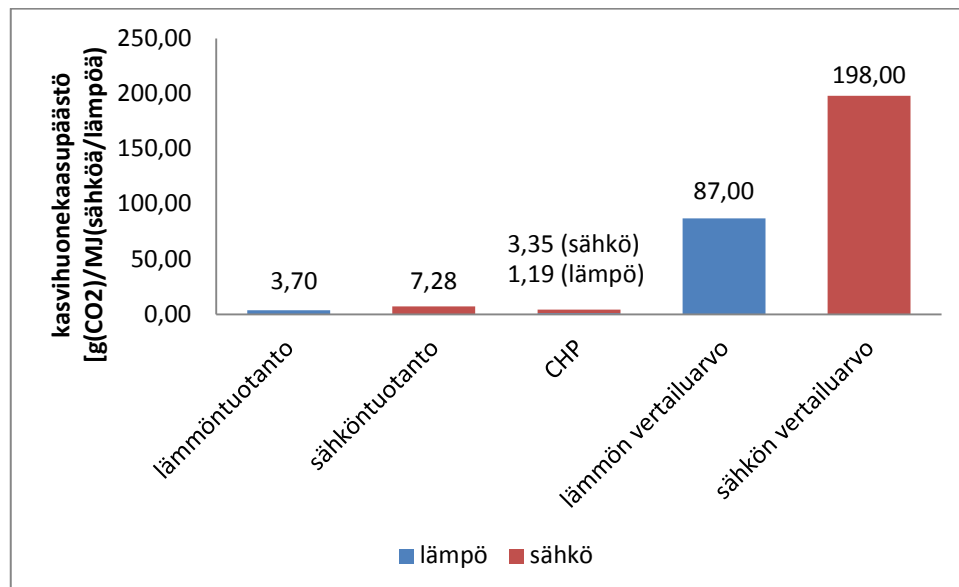
KUVA 24. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT LIIKKENEPOLTTOAINEENA RES-DIREKTIIVISSÄ ESITETTYLLÄ TAVALLA LASKETTUNA. BIO-SNG:N TUOTANTOKETJUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT ON ESITETTY MYÖS TAPAUKSESSA, JOISSA HUOMIOIDAAN BIOPOHJAINEN HIILIDIOKSIDI JA TAPAUKSESSA, JOSSA HUOMIOIDAAN EPÄSUORAT HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖT JA LANNOITUS. TÄMÄN LISÄKSI ESITETÄÄN FOSSIILISEN MAAKAASUN JA DIESELIN TUOTANTOKETJUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT.

Liikenteen biopolttoaineena bio-SNG:n tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästö on 5,9 g(CO_{2,ekv})/MJ. Luku koostuu aiempien tuotantoketjun vaiheiden kasvihuonekaasupäästöistä ja tankkausaseman sähkönkulutuksesta aiheutuvista kasvihuonekaasupäästöistä. Dieseliin verrattuna puupohjaisella biokaasulla saadaan 93 % vähemmän kasvihuonekaasupäästöissä. Maakaasuun verrattuna vähemmän on 91 %. Puupohjainen biokaasu täyttää siten selkeästi tiukimman RES-direktiivissä uusituvalle liikenteen biopolttoaineelle asetetun vaatimuksen, joka on 60 % vähennys kasvihuonekaasupäästöissä vuoden 2017 alun jälkeen käyttöönotetuille laitoksille.

Kuvasta 24 havaitaan, että jos biopohjainen hiilidioksidi tai epäsuorat hiilidioksidipäästöt otetaan huomioon, puupohjainen biokaasu tuottaa hiilidioksidiekvivalentteja päästöjä vähintään yhtä paljon kuin maakaasu. Kun biopohjainen hiilidioksidi huomioidaan, ovat tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt lähes 140 g(CO_{2,ekv})/MJ, jolloin päästöt ovat reilusti korkeammat kuin fossiilisilla liikennepolttoaineilla. Tämä koskee tietysti myös muita metsäbiomassasta tuotettuja liikenteen biopolttoaineita. Epäsuorien hiilidioksidipäästöjen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi valittu aikajänne. Tässä työssä käytettiin 20 vuoden aikajännettä ja pidemmällä aikajänteellä epäsuorat hiilidioksidipäästöt olisivat merkittävästi pienemmät.

5.3.2 Kasvihuonekaasupäästöjen vertaaminen kiinteille ja kaasumaisille biomassalähteille sähkön- ja lämmöntuotannossa asetettuihin vaatimuksiin

Kuvassa 25 on esitetty puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt kun loppukäyttö on sähkön ja lämmön erillis- tai yhteistuotantoa sekä lähteessä (EC, 2010b) esitetyt fossiiliset vertailuarvot.



KUVA 25. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT LOPPUKÄYTÖN OLLESSA SÄHKÖN JA LÄMMÖN ERILLIS- TAI YHTEISTUOTANTOA SEKÄ VERTAILUARVOT (EC, 2010B)

Lämmöntuotannossa saavutetaan 96 % kasvihuonekaasupäästövähennelmä fossiiliseen vertailukohtaan nähden. Sähköntuotannossa (lauhdeajo) vähennelmä on 96 %. CHP-tuotannossa vähennelmä on sähkölle ja lämmölle molemmille n. 98 %. Lämmöntuotannon päästöt tuotettua lämpö-megajoulea kohden ovat matalammat kuin Bio-SNG:n tuotantoketjulla johtuen kondenssikattilan alempaan lämpöarvoon perustuvasta hyötysuhteesta, joka on 110 %. CHP-tuotannossa kasvihuonekaasupäästöt on allokoitu exergian perusteella, minkä vuoksi tuotetulle sähkölle on allokoitu enemmän päästöjä.

6 HERKKYYSTARKASTELU

Tuloksia tarkasteltaessa havaittiin, että tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöistä valtaosa syntyi metsäbiomassan kuljetuksesta. Työssä valittu 100 km hankintaetäisyys voi olla tämän kokoluokan laitokselle hieman alakanttiin, minkä vuoksi hankintaetäisyyden kasvattamisen vaikutusta tulee ehdottomasti tarkastella. Herkkyystarkastelussa kokeillaan kaksinkertaisen hankintaetäisyyden vaikutusta tuloksiin.

Metsäbiomassalle olisi ollut helppo käyttää saapumiskosteutena yleisesti käytettyä 50 % kosteutta, mutta tässä työssä päädyttiin valitsemaan kullekin raaka-ainejakeelle realistisemmat kosteudet, jotka oli mitattu Kaukaan Voima Oy:n voimalaitokselle saapuvasta polttoaineesta. Laskennassa kävi kuitenkin ilmi, että metsäbiomassan kuivatus on suurin kaukolämmön kuluttaja biojalostamolla, minkä vuoksi on järkevää varmistaa suuremman saapumiskosteuden vaikutus tuloksiin.

Laskennassa käytetty verkkosähkön päästökerroin vastasi Suomen sähkönhankinnan keskimääräisiä päästöjä vuosina 2006–2008. Sähkönhankinnan päästökerroin vaihtelee vuosittain ja ostosähkön käytöstä aiheutuvat päästöt muodostavat suurimman osan tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöistä. Herkkyystarkastelussa testataan ääripään eli hiililauhteella tuotetun ostosähkön vaikutusta tuloksiin.

Siirtoverkon paine vaihtelee kaasun kulutuksen mukaan. Loppukevällä ja kesällä kaasun kulutuksen ollessa vähäisempää on paine n. 40 bar(g) ja talvella maksimissaan 54 bar(g). Jalostetun kaasun siirtoverkon paineeseen kohottavan kompressorin sähkönkulutus muodostaa noin puolet siirtoverkon bio-SNG:lle kohdistuvasta energiankulutuksesta. Herkkyystarkastelussa kokeillaan kesätilanteen vaikutusta tuloksiin.

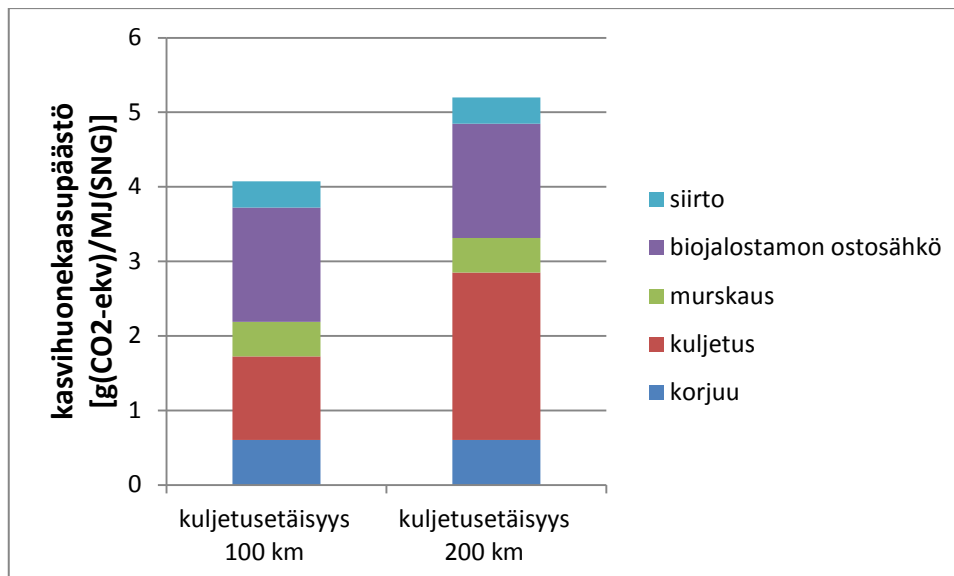
Hapentuotantoyksikön ominaissähkönkulutus oli laskennan lähtötietojen keruuvaiheessa yksi haastavimmista, koska luotettavaa lähdetä ei tuntunut löytyvän. Ominaissähkönkulutukset vaihtelivat kymmeniä prosentteja, minkä vuoksi laskennassa valittiin suurin sähkönkulutus. Hapentuotantoyksikön sähkönkulutus vastaa kolmasosaa koko biojalostamon sähkönkulutuksesta, minkä vuoksi herkkyystarkastelussa kokeillaan pienimmän löydetyn ominaiskulutusluvun vaikutusta tuloksiin.

Herkkyystarkastelussa tutkitaan siten seuraavien muutoksien vaikutusta tuloksiin:

1. puuraaka-aineen hankintaetäisyyden kaksinkertaistuminen
2. puuraaka-aineen saapumiskosteuden kohoaminen
3. siirtoverkon paineen vaikutus
4. ostosähkön päästökerroin
5. hapentuotantoyksikön sähkänominaiskulutus

Puuraaka-aineen hankintaetäisyyden kaksinkertaistumisen vaikutus tuloksiin

Puuraaka-aineen hankintaetäisyyden kaksinkertaistuminen 100 km:stä 200 km:iin tuplaa suoraan kuljetuksista aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt (Kuva 26).



KUVA 26. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT KUN PUURAAKA-AINEEN KULJETUSETÄISYYS ON 100 KM JA 200 KM.

Hankintaetäisyyden kaksinkertaistumisen seurauksena tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt kasvavat 28 %, mutta ovat edelleen reilusti alle kestävyyskriteereiden edellyttämän rajan ja kasvihuonekaasupäästövähennelmä dieseliin verrattuna on 91 % ja maakaasuun verrattuna 89 %. Koko tuotantoketjun energiatehokkuus heikkenee kaikilla loppukäyttövaihtoehdoilla reilun prosentin.

Puuraaka-aineen saapumiskosteuden kohoamisen vaikutus tuloksiin

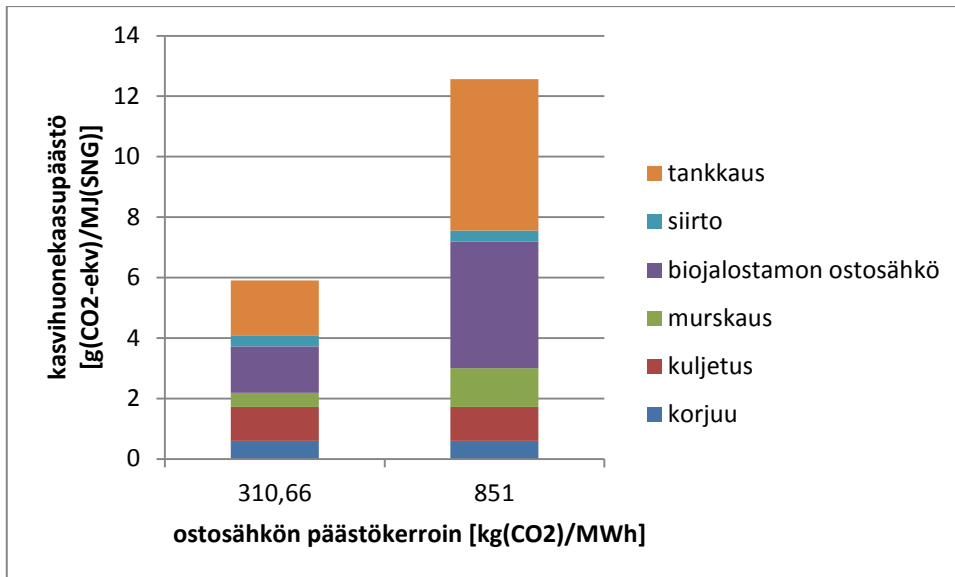
Vaihdettaessa puuraaka-aineen saapumiskosteus vastaamaan kaatotuoreen puun kosteuksia, kasvaa kuivatuksen lämmöntarve 50,4 GWh/a. Tällöin kaukolämpöä voidaan myydä vähemmän kaupungille ja kasvihuonekaasupäästöistä suurempi osa kohdistuu bio-SNG:lle. Biojalostamon kokonaishyötysuhde laskee reilun prosenttiyksikön ja tuotantoketjujen hyötysuhteet laskevat samoin noin prosenttiyksikön verran. Kasvihuonekaasupäästöt kasvavat kuitenkin vain n. 3 %, minkä vuoksi puupohjainen biokaasu täyttää kestävyyskriteerit vaikka polttoaineen saapumiskosteus kasvaisi reilusti.

Maakaasun siirtoverkossa vallitsevan paineen vaikutus tuloksiin

Kesätilanteessa jalostetun bio-SNG:n siirtoverkon paineeseen kohottavan kompressorin sähkötehtävyys laskee n. 50 % verrattuna talvitalanteeseen, jolloin siirron energiankulutus laskee 16 %. Vaikutus koko tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöihin on silti alle promillen eli merkityksettömän vähän. Vastaavasti tuotantoketjun energiatehokkuus pysyi lähes muuttumattomana.

Ostosähkön päästökertoimen kohoamisen vaikutus tuloksiin

Ostosähkölle on laskennassa käytetty Suomen sähkönhankinnan keskimääräistä päästökertoiminta (310,66 kg(CO₂)/MWh). Kuvassa 27 on esitetty tuotantoketjun aikana syntyvät kasvihuonekaasupäästöt kun ostosähkö tuotetaan marginaalipolttoaineella, päästökertoimen ollessa 851 kg (CO₂)/MWh.

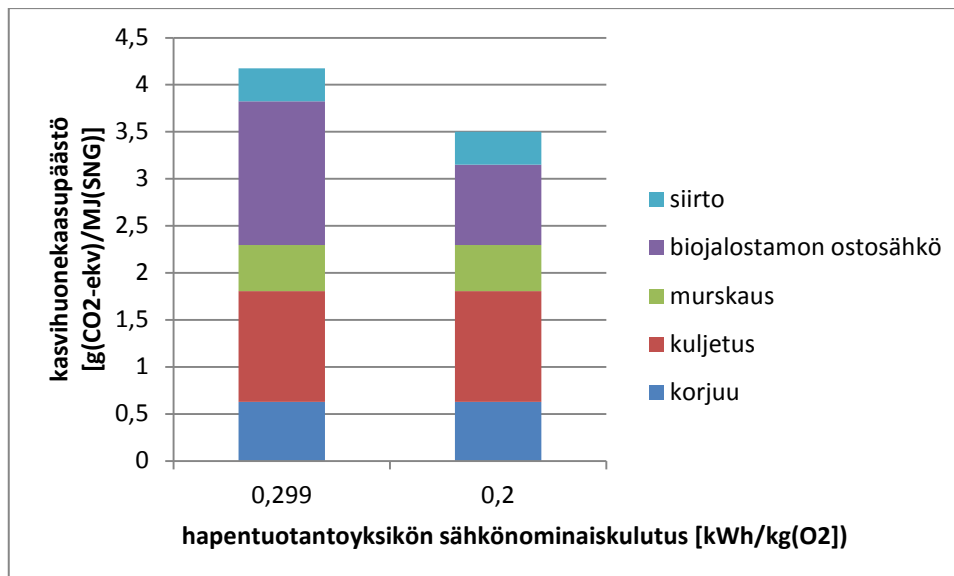


KUVA 27. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN LIIKKENNEMPOLTTOAINEKETJUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT SUOMEN SÄHKÖNHANKINNAN KESKIMÄÄRÄISELLÄ CO₂-PÄÄSTÖKERTOIMELLA JA MARGINAALITUOTANNON CO₂-PÄÄSTÖKERTOIMELLA.

Tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt ovat yli kaksinkertaiset kun ostosähkö on tuotettu marginaalipolttoaineella. Tankkauksen sähkönkulutuksesta aiheutuva päästö on 40 % koko tuotantoketjun päästöistä. Kasvihuonekaasupäästöjen tuplaantumisesta huolimatta puupohjainen biokaasu täyttää edelleen RES-direktiivissä asetetut kestävyyskriteerit, sillä kasvihuonekaasupäästövähennys on dieseliin verrattuna 85 % ja maakaasuun verrattuna 82 %. Sähkön- ja lämmöntuotannossa kasvihuonekaasupäästövähennys on edelleen n. 97 %. Energiatehokkuuteen sähkönhankinnan ominaispäästökertoimella ei luonnollisestikaan ole vaikutusta.

Hapentuotantoyksikön sähkönominaiskulutuksen kasvun vaikutus tuloksiin

Hapentuotantoyksikön sähkötehontarve vaihtelee valitusta sähkönominaiskulutuksesta riippuen välillä 3,8-5,6 MW. Sähkönominaiskulutuksen vaikutusta tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöihin on tutkittu kuvassa 28.



KUVA 28. PUUPOHJAISEN BIOKAASUN TUOTANTOKETJUN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT ENNEN LOPPUKÄYTTÖÄ HAPENTUOTANTOYKSIKÖN SÄHKÖNOMINAISKULUTUSLUVUILLA 0,299 JA 0,2 kWh/kg(O₂).

Tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt vähenevät 16 %, jolloin kasvihuonekaasupäästövähennelmä verrattuna fossiiliseen dieseliin on 93,7 % ja maakaasuun verrattuna 92,0 %. Tuotantoketjujen energiatehokkuus paranee noin puoli prosenttia.

Laskentamallin luotettavuuden pohdintaa ja tehtyjä yksinkertaistuksia

Mallin kaasuttimessa on sisään tulevien ja ulos lähtevien virtojen välillä n. 2 promillen ero energiataseessa ja 3 promillen ero massataseessa. Reformerin hapenkulutus on jätetty huomioimatta laskennassa, mutta se on suuruusluokaltaan muutama sata grammaa sekunnissa. Höyrynkulutuksista on jätetty huomioimatta reformeriin ja metanointiin menevät pienet höyryvirrat, joilla estetään alkuainehiilen aiheuttama katalyyttien deaktivoituminen. Näille virroille ei löytynyt lähtötietoja, minkä vuoksi ne arvioitiin pieniksi energiataseen kannalta, mutta toisaalta laitoksen käytettävyyden kannalta välttämättömiksi. Metanoinnin laskennassa käytetyt tiedot ovat peräisin Harms et al. (1980) kirjoittamasta artikkelista ja skaalaus on tehty suoraan tehojen suhteella. Artikkelin on vanha, mutta Biollaz viittasi samaiseen artikkeliin vuonna 2011 ja esitti samat luvut, joten niiden oletettiin olevan varsin käyttökelpoisia. Tosin skaalaus suoraan tehojen suhteella on silti epävarmaa. Polttoaineen vastaanotossa on jätetty huomioimatta kaikkien kuljettimien ja varastosiilojen ruuvipurkaimien sähkökulutukset. Niiden yhteisteho on luultavimmin joitakin satoja kilowatteja. Useiden käyttöhyödykkeiden kuten lisäveden ja paineilman valmistuksen energiankulutusta ei ole huomioitu. Lauhteenkäsittelyn energian- ja kemikaalien kulutusta ei ole huomioitu. Biojalostamon metaani- ja typpioksiduulipäästöt on oletettu normaaliajona mitättömän pieniksi.

Ostosähkön tarpeen lisääntyminen kasvattaisi tietysti kasvihuonekaasupäästöjä, mutta esim. liikennekäytössä kasvihuonekaasupäästöjen pitäisi kasvaa lähes viisinkertaisiksi verrattuna tämän laskennan tilanteeseen, jotta RES-direktiivissä asetettu kestävyyskriteeri ei enää täyttyisi. Kokonaishyötysuhde laskee ostosähkön määrän kasvaessa, mutta esim. 25 % lisäys biojalostamon sähkökulutukseen laskee biojalostamon kokonaishyötysuhdetta ainoastaan yhden prosenttiyksikön.

Kaikesta huolimatta tulokset ovat samansuuntaisia julkisuudessa esiintyneen saman kokoluokan E.On Bio2G-biojalostamon kanssa (Luku 2). Tässä työssä biojalostamon saanto on 72 % ja kokonaisyötysuhde 85 % kun vastaavat luvut E.On Bio2G-projektissa ovat 60-65 % ja ≤ 80 %. Luvut ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta E.On:in luvuista ei selviä, onko ne laskettu kuivalla vai kostealla polttoaineella. Polttoaineteho on tässä työssä 291,7 MW_{th} kun se E.On:illa on 345 MW_{th}. Ero polttoainetehossa johtuu luultavasti pääosin E.On:in 40 MW_{th} voimakattilasta, jonka avulla he oletettavasti pysyvät tuottamaan riittävästi lämpöä, jotta biojalostamosta saadaan sähköntuotannon suhteen omavarainen. Tässä työssä puuttuva sähköenergia yksinkertaisesti hankitaan ulkopuolelta. E.On:in biojalostamo tuottaa CHP-ajossa sähköä omaa käyttöä varten 14 MW teholla ja lauhdeajossa 23 MW teholla. Voimakattila hankaloittaa lauhdeajon vertaamista, mutta omakäyttösähkötehon tarve on suuruusluokaltaan samansuuntainen tässä työssä lasketun 16,8 MW tehon kanssa. Sähkön tuotantoteho puolestaan on tässä työssä lauhdeajossa ainoastaan 12,5 MW. Lukujen vertaaminen on tietysti hyvin hankalaa, kun ei tiedetä, mistä komponenteista E.On:in biojalostamo tarkalleen koostuu ja mitkä kaikki laitteet on katsottu biojalostamoon kuuluviksi. Kuten todettua, kaukolämmöntuotanto riippuu saapuvan polttoaineen kosteudesta ja E.On ilmoittaa biojalostamonsa kaukolämmöntuotantotehon olevan maksimissaan 55 MW. Tässä työssä ulos myytäväksi kaukolämpötehoksi saadaan polttoaineenkosteudesta riippuen 33,1-39,4 MW. E.On:in luvuista ei käy ilmi, että missä saapumiskosteudessa, millä polttoaineella ja millä kuivurin jälkeisellä kosteudella 55 MW kaukolämpöteho saavutetaan, joten lukujen vertaaminen on jälleen suuruusluokan samansuuntaisuuden tarkistamista lukuun ottamatta mahdotonta.

E.On:in voimakattilasta on varmasti hyötyä laitoksen ylösajotilanteissa lämmöntuottajana, minkä lisäksi siinä voidaan polttaa mahdollisia poistokaasuja ja Rectisolissa erottuva rikkivety. Tämän työn biojalostamolle ei laitettu voimakattilaa, mutta se on todennäköisesti välttämätön biojalostamon ajettavuuden kannalta. Integroimalla biojalostamo olemassa olevaan laitokseen voidaan välttyä erillisen voimakattilan hankinnalta.

Tuotantoketjun alkupään osalta löydettiin kirjallisuudesta vertailukohtia. Metsäbiomasan korjuun, kuljetuksen ja murskauksen energiankulutus on 2,2 % tuotetun murskeen energiasisällöstä. Wihersaari (2005) sai tutkimuksessaan eri haketuotantoketjuilla arvoja välillä 1,9-2,6 %. Kariniemi et al. puolestaan (2009) saivat tutkimuksessaan arvoja välillä 1,8-3,9 % keskiarvon ollessa 2,7 %. Kummankin tutkimuksen tulokset ovat samaa suuruusluokkaa tämän työn tulosten kanssa. Kariniemi et al. (2009) toteavat, että jokaisessa haketuotantoketjun tutkimuksessa käytetyt lähtöarvot vaikuttavat merkittävästi lopputulokseen, minkä vuoksi jokainen laskenta on uniikki.

Kasvihuonekaasupäästöjen vertaaminen vaihtoehtoihin puun energiakäyttökoh-teisiin ja aiemmin tehtyihin elinkaaritarkasteluihin sekä muihin liikenteen biopolttoaineisiin

RES-direktiivissä (EC, 2009b) esitetään jätetuusta tuotetulle Fischer-Tropsch -dieselille 95 % vähennystä kasvihuonekaasupäästöissä. Viljellyn puun tapauksessa vähennys on 93 %. Soimakallio & Koponen (2011) esittävät metsätähteistä tuotetun biodieselin kasvihuonekaasupäästöjen olevan välillä 4-67 g(CO_{2,ekv}/MJ), mikä tarkoittaa 20-95 % päästövähennemää. Tässä työssä saatujen tuloksien perusteella puupohjaisen biokaasun ja Fischer-Tropsch -dieselin kasvihuonekaasupäästövähennemät ovat lähes samat RES-

direktiiviin verrattaessa. Soimakallio & Koponen (2011) esittämiin lukuihin verrattuna puupohjaisen biokaasun kasvihuonekaasupäästövähennys on lähes sama tai enemmän.

Aiemmin tehtyihin bio-SNG:n tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästö- ja elinkaaritarkasteluihin (luku 2) verrattuna tässä työssä saatiin tulokseksi pienemmät kasvihuonekaasupäästöt. Steubing et al. (2011) saivat lämmityskäytön päästöiksi 15,12 g(CO_{2,ekv})/MJ, CHP-tuotannolle kombivoimalaitoksessa 11,34 g(CO_{2,ekv})/MJ ja liikennekäytössä 33,43 g(CO_{2,ekv})/MJ. Tässä työssä vastaavat luvut ovat 3,7 g(CO_{2,ekv})/MJ lämmityskäytölle, 7,3 g(CO_{2,ekv})/MJ lauhdesähkötuotannolle kombivoimalaitoksessa ja 5,9 g(CO_{2,ekv})/MJ liikennekäytölle. Liikennekäytössä valtava ero päästöissä johtuu siitä, että Steubing et al. (2011) olivat huomioineet autojen ja infrastruktuurin rakentamisessa ja kunnossapidossa syntyvät kasvihuonekaasupäästöt ja kun ne vähennetään lopputuloksesta, saadaan liikennekäytön kasvihuonekaasupäästöiksi 12,21 g(CO_{2,ekv})/MJ, mikä on jo paljon lähempänä tämän työn tulosta. Tuotantoketjun vaiheista merkittävimmät erot ovat korjuun aiheuttamissa kasvihuonekaasupäästöissä. Steubing et al. (2011) ovat laskeneet korjuusta aiheutuvan 4,94 g(CO_{2,ekv})/MJ kasvihuonekaasupäästöt kun tässä työssä vastaavat päästöt ovat ainoastaan 0,6 g(CO_{2,ekv})/MJ. Artikkelin perusteella voidaan vain spekuloida, mistä ero johtuu. Yksi syy voisi olla se, että Sveitsin olosuhteissa metsätoista kerätty Ecoinvent-data pitää sisällään jotain, mitä tässä työssä ei ole huomioitu kuten esim. metsätyökoneiden valmistuksessa syntyvät päästöt. Biojalostamon kasvihuonekaasupäästöt ovat tässä työssä 1,53 g(CO_{2,ekv})/MJ kun ne Steubing et al. (2011) työssä ovat 4,36 g(CO_{2,ekv})/MJ. Näiden päästöjen eroa selittää ainakin osittain Steubing et al. käyttämä data, joka perustuu ensimmäiseen rakennettuun demonstraatiolaitokseen (Güssing), jossa bio-SNG tuotetaan täysin eri tekniikalla kuin tässä työssä.

Pucker et al. (2012) saivat lämmityskäytössä kasvihuonekaasupäästöiksi 13,06 g(CO_{2,ekv})/MJ kun bio-SNG tuotetaan kiertopetiin perustuvalla happihöyry-kaasuttimella. Suurempiin kasvihuonekaasupäästöihin ovat syynä ainakin heidän käyttämänsä matalampi lämmityskattilan hyötysuhde sekä typpioksiduuli ja metaanipäästöjen huomioiminen myös loppukäytössä.

Soimakallio & Koponen (2011) keräsivät useiden nestemäisten liikenteen biopolttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjä 25:stä eri tutkimuksesta. Useimpien biopolttoaineiden (mm. vetykäsiteltyjen kasviöljyjen ja tiettyjen bioetanoliinien) kohdalla oli saatu tuloksia, jotka ylittävät jopa fossiilisen dieselin tai bensiinin tuotannosta ja käytöstä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt. Monet tutkituista biopolttoaineista täyttävät RES-direktiivin vaatimuksen 35 % kasvihuonekaasupäästövähennästä verrattuna fossiiliseen vertailukohtaan, mutta jatkossa rajan noustessa 60 %:iin, vaikuttaisi kestävyyskriteerien täyttyminen monien tutkimuksessa esitettyjen biopolttoaineiden kohdalla epävarmemmalta. Palmuöljypohjaisen biodieselin tuotantoketjulle esitetään artikkelissa kasvihuonekaasupäästöjä väliltä 34-143 g(CO_{2,ekv})/MJ, jolloin sen käytöllä päästäisiin parhaimmillaan 60 % kasvihuonekaasupäästövähennämään verrattuna fossiiliseen dieseliin. Soimakallio & Koponen (2011) keräämän aineiston perusteella vaikuttaisi siltä, että eläinrasvoista tuotettu biodiesel, metsätähteistä tuotettu FT-biodiesel ja selluloosasta tuotettu bioetanolit täyttäisivät selkeimmin myös kiristyvät kestävyyskriteerit.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tarkasteltiin puupohjaisen biokaasun tuotantoketjua energiatehokkuutta ja kasvihuonekaasupäästöjä alkaen metsäbiomassan korjuusta aina jalostetun biokaasun loppukäyttöön saakka. Biojalostamon tärkeimmiksi komponenteiksi valittiin leijupetiin perustuva happi-höyry -kaasutin katalyyttisella tervanpoistolla, happamien kaasujen erottaminen Rectisol-prosessilla ja TREMP-metanointi. Jalostusprosesseissa vapautunut lämpö otettiin talteen vesi-höyry -piiriin ja kaukolämpöverkkoon. Jalostettu Bio-SNG toimitettiin loppukäyttäjille olemassa olevan maakaasun siirtoverkoston avulla. Tutkitut loppukäyttövaihtoehdot ovat käyttö liikenteen biopolttoaineena, lämmityksessä ja CHP-tuotannossa.

Bio-SNG:llä saavutetaan liikennekäytössä 93 % kasvihuonekaasupäästövähennemä verrattuna fossiiliseen dieseliin ja 91 % vähennemä verrattuna maakaasuun. Useista neste-mäisistä liikenteen biopolttoaineista poiketen puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt alittavat selvästi myös tiukimmat liikenteen biopolttoaineille RES-direktiivissä asetetut vaatimukset. Puupohjainen biokaasu soveltuu siten uusiutuvaksi liikenteen biopolttoaineeksi ja edistää osaltaan EU:n tavoitteena olevaa 10 % biopolttoaineosuutta liikenteen polttoaineissa. Lämmityskäytössä ja lauhdesähköntuotannossa päästään n. 96 % ja CHP-tuotannossa n. 98 % kasvihuonekaasupäästövähennämää fossiiliseen vertailukohtaan eli maakaasuun nähden.

Metsäbiomassan kuten hakkuutähteiden hyödyntäminen energiantuotannossa vapauttaa niihin sitoutuneen hiilen hiilidioksidina välittömästi sen sijaan, että se vapautuisi hitaasti kymmeniä tai satoja vuosia kestävän hajoamisen seurauksena. Kun nämä epäsuorat hiilidioksidipäästöt tai biopohjainen hiilidioksidi otetaan huomioon, ovat bio-SNG:n tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt vähintään samalla tasolla maakaasun päästöjen kanssa. Toisaalta epäsuorien hiilidioksidipäästöjen laskentaan liittyy suuria epävarmuuksia ja ne riippuvat voimakkaasti valitusta aikajänteestä. Tässä työssä käytettyä 20 vuoden aikajännettä on perusteltu ajatuksella, jonka mukaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen on tärkeää lähivuosikymmeninä, jotta välttyttäisiin kaikkein voimakkaimmalta ilmastonmuutokselta tämän vuosisadan aikana.

Liikennepolttoaineketjun hyötysuhde on ainoastaan 15 %, mikä johtuu ajoneuvojen matalasta hyötysuhteesta. Toisaalta diesel-ajoneuvojen hyötysuhteet eivät ole merkittävästi maakaasuajoneuvojen hyötysuhteita parempia, minkä vuoksi biodieselin tuotantoketjulla on vastaava ongelma. Lämmityskäyttö- ja CHP-tuotantoketjujen hyötysuhteet ovat puolestaan 91 % ja 76 %. Lämmityskäyttö on siten erittäin energiatehokasta ja CHP-tuotannossa saadaan merkittävän kasvihuonekaasupäästövähennämän ja melko hyvän energiatehokkuuden lisäksi korkean rakennusasteen tuomat hyödyt.

Biojalostamo tuottaa kaiken tarvitsemansa lämmön ja sitä riittää myös myyntiin. Sähköntuotannon osalta biojalostamo ei ole tässä tapauksessa omavarainen ja sähköä on ostettava markkinoilta. On tärkeää todeta, että tässä työssä ei tarkasteltu integrointia mihinkään olemassa olevaan tuotantolaitokseen, vaan oletettiin, että kaikki tuotettu ylimääräinen kaukolämpö voidaan toimittaa kuvitteellisen yhdyskunnan kaukolämpöverkkoon. Integroiminen olemassa olevaan laitokseen, kuten sellu-/paperitehtaaseen tuo varmasti muutoksia lämpötila- ja painetasoihin sekä virtoihin, joihin prosessista syntyy lämpöä otetaan talteen. Tällä on myös omat vaikutuksensa laitoksen energiatehok-

kuuteen ja kasvihuonekaasupäästöihin. Ylimääräisen lämmön hyödyntäminen ORC-prosessilla (Organic Rankine Cycle) tai muulla matalalämpötilaisista virroista sähköä tuottavalla tekniikalla voisi olla kiinnostava vaihtoehto, koska tällöin ostosähkön tarve vähenisi ja integroiminen olisi helpompaa.

Diplomityön tuloksena saatua mallia voisi edelleen tarkentaa lisäämällä erilaisia raaka-aineen kuljetusmuotoja ja raaka-ainejakeita, kuten teollisuuden sivuvirtoja, joita ei tarkasteltu tässä työssä. Puupohjaista biokaasua on mahdollista myös nesteyttää ja kuljettaa kaasuverkon ulkopuolelle säiliöautoilla. Nesteytetyn puupohjaisen biokaasun tuotantoketjun energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt pitää laskea, jotta varmistetaan myös sen täyttävän RES-direktiivissä asetetut kestävyyskriteerit.

Rectisol-prosessissa erottuva hiilidioksidi on mahdollista ottaa talteen, jolloin biojalostamosta voidaan saada hiilidioksidineutraali. Dakotassa coal-to-SNG -laitoksen hiilidioksidi siirretään putkikuljetuksena öljykentille, jossa se syötetään maan sisään, mikä edistää öljyntuotantoa. Suomessa hiilidioksidille voi olla vaikeaa löytää käyttökohdetta, eikä siirtoputken rakentaminen Sisä-Suomesta rannikolle satamien läheisyyteen ole kovin realistista, mutta jos CO₂-päästöoikeuksien hinta kallistuu, voi tämän vaihtoehdon tarkastelu olla järkevää. Jotta hiilidioksidi kannattaisi ottaa talteen, olisi biopohjaisella hiilidioksidilla oltava taloudellista arvoa. Muuten se päästetään taivaalle vaikka se olisi hyvin puhtaana virtana helposti otettavissa talteen. Hiilidioksidin talteenoton suhteen Bio-SNG:llä on selkeä etu FT-dieseliin nähden, sillä metaanista koostuvan Bio-SNG:n jalostusprosessissa saadaan erotettua suurempi osa hiilidioksidista kuin pitkistä hiiliveytyketyistä koostuvan FT-dieselin jalostusprosessissa. Hiilidioksidin talteenotto on hyvin vaikeaa toteuttaa henkilöauton pakokaasuista.

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta bio-SNG:n tuottaminen ja käyttäminen on järkevää kaikissa tutkituissa loppukäyttövaihtoehdoissa. Puupohjainen biokaasu edistää samanaikaisesti useita EU:n tavoitteita, sillä sen käyttö parantaa energiatehokkuutta, vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja mahdollistaa useissa kohteissa siirtymisen fossiilisesta polttoaineesta uusiutuvaan polttoaineeseen ilman suuria investointeja olemassa oleviin laitteisiin.

LÄHDELUETTELO

Alamia, A., 2010. Thermo-economic assessment of CO₂ separation technologies in the framework of synthetic natural gas (SNG) production. Master's thesis. Department of Energy and Environment, Division of Heat and Power Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2010. 112 s.

Anis, S. & Zainal, Z. A., 2011. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 15:5 S. 2355-2377. doi:10.1016/j.rser.2011.02.018

Antikainen, R. (toim.) 2010. Elinkaarimetodiikkojen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2010. 83 s. ISBN 978-952-11-3734-1 (PDF)

Asikainen, A. & Jalovaara, J., 2002. Poltinpoltto. Teoksessa: R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, (toim.) Poltto ja palaminen. Jyväskylä: International Flame Research Foundation, 750 s.

Auvinen, H., 2008. Measuring energy and CO₂ efficiency in petrochemical industry by using energy balance analysis. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta, Energiatekniikan laitos. Espoo 79 s.

Basu, P., 2006. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Boca Raton, FL, USA : Taylor & Francis. 473 s. ISBN 0-8493-3396-2

Beysel, G., 2009. Enhanced Cryogenic Air Separation – A Proven Process Applied to Oxyfuel. Future Prospects. 1st Oxyfuel Combustion Conference, September 8th 2009. Cottbus, Saksa.

Biollaz, S., 2011. Biomethane Development in Switzerland. International Seminar on Biomass Gasification. 6-7.10.2011, Malmö, Sweden. Svenskt Gastekniskt Center Ab.

Bloch, H. P., 2006. Compressors and Modern Process Applications. Hoboken, New Jersey, USA. John Wiley & Sons, Inc. 339 s. ISBN 978-0471727927

Boll, W., Hochgesand, G., Higman, C., Supp, E., Kalteier, P., Müller, W-D., Kriebel, M., Schlichting, H., Tanz, H., 2002. Gas Production, 3. Gas Treating. Teoksessa: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH. Online ISBN 9783527306732. DOI: 10.1002/14356007

Brown, R. N., 2005. Compressors: Selection and Sizing. 3rd edition. USA. Gulf Professional Publishing. 620 s. ISBN 0-7506-7545-4

Carroll, J., 2003. Natural Gas Hydrates - A Guide for Engineers. USA, Elsevier. 276 s. ISBN: 978-0-7506-7569-7, ISBN (sähköinen):978-0-0805-1240-2

Clausen, L. R., 2011. Design of novel DME/methanol synthesis plants based on gasification of biomass. Väitöskirja. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Lyngby. 295 s. ISBN: 978-87-90416-44-7

Cozens, P., & Manson-Whitton, C., 2010. Bio-SNG: Feasibility Study, Establishment of a Regional Project, Final Report. [Viitattu 21.12.2012] Saatavissa: <http://www.cngservices.co.uk/assets/Bio-SNG-Feasibility-Study.pdf>

Damgaard, A., Riber, C., Fruergaard, T., Hulgaard, T., Christensen, T. H., 2010. Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration. Waste Management. Vol 30:7. S. 1244-1250. doi:10.1016/j.wasman.2010.03.025

Dolan, G., 2012. Improving Methanol Production Efficiency and Reducing Carbon Dioxide Emissions. Methanol Institute. [Viitattu 14.3.2012] Saatavissa: <http://www.methanol.org/Methanol-Basics/Resources/Improving-Methanol-Production-Efficiency.aspx>

EC, 2006. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/32/EY energian loppukäytön tehokkuudesta ja energiapalveluista sekä neuvoston direktiivin 93/76/ETY kumoamisesta. [Viitattu 17.11.2011] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0064:0085:FI:PDF>

EC, 2009a. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency, February 2009. 398 s. [Viitattu 22.11.2011] Saatavissa: ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/ENE_Adopted_02-2009.pdf

EC, 2009b. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta. [Viitattu 17.11.2011] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:fi:PDF>

EC, 2010a. Communication from the Comissions. Europe 2020. A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth. COM(2010) 2020, Brussels: 3.3.2010.

EC, 2010b. Komission kertomus neuvostolle ja Euroopan parlamentille kestävyteen liittyvistä vaatimuksista kiinteiden ja kaasumaisten biomassalähteiden käytössä sähkötuotannossa, lämmityksessä ja jäähdytyksessä. KOM(2010)11 lopullinen, Bryssel 25.2.2010.

ECN, 2011. Status of Development. Tieto yhtiön verkkosivuilta. [Viitattu 12.4.2012] Saatavissa: <http://www.milenatechnology.com/milena-gasification-technology/>

EEA, 2011. Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in Relation to Bioenergy. [Viitattu 27.10.2011]. Saatavissa: <http://www.eea.europa.eu/about-us/governance/scientific-committee/sc-opinions/opinions-on-scientific-issues/sc-opinion-on-greenhouse-gas>

- E.ON, 2011. E.ON går vidare med Malmö och Landskrona i biogassatsning. Tiedote yrityksen verkkosivuilla 17.11.2011. [Viitattu 29.11.2011] Saatavissa: <http://www.eon.se/templates/Eon2TextPage.aspx?id=74072&epslanguage=SV>
- Ehrhardt, K. & Steinbach, M. C., 2003. Nonlinear Optimization in Gas Networks. ZIB-Report 03-46. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin. [Viitattu 23.2.2012] Saatavissa: <http://www.zib.eu/Publications/Reports/ZR-03-46.pdf>
- Fredriksson Möller, B., 2011. E.ON Gasification development – Bio2G. SGC International Seminar on Biomass Gasification 6-7 October, Malmö Sweden.
- Gassner, M. & Maréchal, F., 2009. Thermo-economic process model for thermochemical production of Synthetic Natural Gas (SNG) from lignocellulosic biomass. Biomass and Bioenergy. Vol 33:11. S. 1587-1604. doi:10.1016/j.biombioe.2009.08.004
- Gasum, 2011. Gasum mukana suunnittelemassa biokaasua tuottavaa biojalostamo Joutsenoon. Gasumin lehdistötiedote 6.9.2011. [Viitattu 29.11.2011] Saatavissa: <http://www.gasum.fi/yritysinfo/media/uutiset/Sivut/GasumbiokaasuJoutseno.aspx>
- Gasum, 2012. Verkostokartta (päivitetty 28.2.2012)
- Gunnarsson, I., 2011. The GoBiGas Project - Efficient transfer of biomass to bio-SNG of high quality. SGC International Seminar on Gasification 7 October 2011, Malmö. [Viitattu 28.11.2011] Saatavissa: http://www.sgc.se/gasification2011/Resources/Ingemar_Gunnarsson.pdf
- Haikonen, T., 2005. Biopolttoaineen aumakuivauksen toimivuuden ja kannattavuuden arviointi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Espoo 77 s.
- Haldor Tøpsoe, 2011a. Sulphur resistant / sour water-gas shift catalyst. Esite yrityksen verkkosivuilla. [Viitattu 30.12.2011] Saatavissa: http://www.topsoe.com/business_areas/gasification_based/Processes/~media/PDF%20files/SSK/topsoe_SSK%20brochure_aug09.ashx
- Haldor Tøpsoe, 2011b. From solid fuels to substitute natural gas (SNG) using TREMP™. Esite yrityksen verkkosivuilla. [Viitattu 19.12.2011] Saatavissa: http://www.topsoe.com/business_areas/gasification_based/Processes/~media/PDF%20files/SNG/Topsoe_TREMP.ashx
- Hannula, I. & Kurkela, E., 2012. A parametric modelling study for pressurised steam/O₂-blown fluidised-bed gasification of wood with catalytic reforming. Biomass and Bioenergy. Vol 38. S. 58-67. doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.045,
- Harms, H., Höhle, B., Skov, A. Methanisierung kohlenmonoxidreicher Gase beim Energie-Transport. Chem.-Ing.-Tech. 52 (1980) Nr. 6, S. 504-515
- Heino, J. & Nordlund, H., 2010. Materiaalien ympäristöominaisuuksia ennakoivat termodynaamiset menetelmät. Teoksessa: Antikainen, R. (toim.) Elinkaarimetodiikojen

nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2010. 83 s. ISBN 978-952-11-3734-1 (PDF)

Higman, C. & van der Burgt, M., 2008. Gasification. 2. painos. Oxford, Iso-Britannia: Gulf Professional Publishing. 435 s. ISBN: 978-0-7506-8528-3

Holmberg, H. & Ramm-Schmidt, L., 2011. Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa, kurssin Ene-59.4130 luentomateriaali Aalto-yliopistossa, syksy 2011.

Holmberg, H., 2012. Suullinen tieto 14.2.2012.

Hyppänen, T. & Raiko, R., 2002. Leijupoltto. Teoksessa: R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, (toim.) Poltto ja palaminen. Jyväskylä: International Flame Research Foundation, 750 s.

IEA, 2007. Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions OECD/IEA, Paris. 321 s.

IEA, 2010. Executive summary. Teoksessa: Energy Technology Perspectives 2010 Scenarios & Strategies to 2050, Pariisi: OECD/IEA.

IPCC, 2007. Summary for Policymakers. Teoksessa: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (toim.) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom ja New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Jokela, V., 2011. NSE Biofuels Oy. Wood Based BTL Diesel Development 2007-2011. IEA Workshop, Piteå 19.10.2011. [Viitattu 1.12.2011] Saatavissa: http://128.131.132.12/app/webroot/files/file/minutes_and_presentations/Pitea_Oct2011/Workshop/V_Jokela_NSE_gasification.pdf

Kariniemi, A., Kärhä, K., Heikka, T., Niininen, M., 2009. Feedstock Supply Chain CO₂-eq Emissions – A Case Study on Forest Biomass for 2nd Generation Liquid Traffic Fuel. Metsätehon katsaus 38. [Viitattu 8.12.2011] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Katsaus/Katsaus_038_Feedstock_Supply_Chain_aka.pdf

Kariniemi, A., 2011. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2010. Metsätehon tulostalvosarja 10a/2011.

Karvonen, V., 2012. VTT. Maakaasukäyttöisten linja-autojen polttoaineen ominaiskulutus. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 20.4.2012.

Keto, M., 2010. Energiamuotojen kerroin, yleiset perusteet ja toteutuneen sähkön- ja lämmöntuotannon kertoimet 2000–2008, Raportti Ympäristöministeriölle. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. [Viitattu 19.3.2012] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=123453&lan=fi>

Kilponen, L., 2003. Energy Efficiency Indicators – Concepts, Methodological Issues, and Connection to Pulp and Paper Industry. Helsinki University of Technology, Energy Economics and Power Plant Engineering. 41 s.

Kohl, A. L. & Nielsen, R. B., 1997. Gas Purification. 5th edition. Elsevier. 1439 s. ISBN 978-0-88415-220-0

Kopyscinski, J., Schildhauer, T., Biollaz, S. M. A., 2010. Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009. Fuel. Vol 89:8. S. 1769-1783. doi:10.1016/j.fuel.2010.01.027

Korens, N., Simbeck, D. R., Wilhelm, D. J., 2002. Process screening analysis of alternative gas treating and sulfur removal for gasification – Revised final report. SFA Pacific, Inc., California. [Viitattu 19.12.2011] Saatavissa: http://www.fischer-tropsch.org/DOE/DOE_reports/739656-00100/SFA%20Pacific_Process%20Screening%20Analysis_Dec%202002.pdf

Kotiaho, V., Lampinen, M. J., Seppälä, A., 2004. Termodynamiikan ja lämmönsiirto-opin taulukoita. Raportti 136. Teknillinen korkeakoulu, Sovellettu termodynamiikka. 61 s. ISSN 1455-7533. ISBN 951-22-7259-8.

Kröcher, O., Vogel, F., Biollaz, S., 2010. Paul Scherrer Institut - Löst BioSNG die Vergärung ab? [Viitattu 28.11.2011] Saatavilla: http://www.biomasseenergie.ch/Portals/0/1_de/08_News%20and%20Agenda/Pdf/Kr%C3%B6cher.pdf

Kuitto, P.-J., 2005. Metsähaketuksen tuotantojärjestelmät. Teoksessa: Kuitto, P.-J. (toim.) Metsästä polttoaineeksi – Polttohakkeen tuotannon puoli vuosisataa. 2. painos. FINBIO – Suomen Bioenergiayhdistys. S. 93-101. ISBN 952-5135-28-4

Kujanpää, M., Eggers, J., Verkerk, H., Helin, T., Lindner, M., Wessman, H., 2010. Carbon balance of forest residue collection and combustion in Southern-Finland. Proceeding paper in the 18th European Biomass Conference and Exhibition.

Kujanpää, M., 2012. Konferenssipaperi metsätähteistä. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 24.5.2012

Kurkela, E. & Jahkola, A., 2002. Paineistetut poltto- ja kaasutusvoimaprozessit. Teoksessa: R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, (toim.) Poltto ja palaminen. Jyväskylä: International Flame Research Foundation, 750 s.

Kurkela, E., Simell, P., McKeough, P., Kurkela, M., 2008. Synteesikaasun ja puhtaan polttokaasun valmistus. Helsinki, Edita Prima Oy. VTT Publications 682. ISBN 978-951-38-7097-3 (nid.)

Kurkela, E., 2011. Thermal Gasification for Power and Fuels. VTT Gasification Team. September 2010. Esitys verkossa. [Viitattu 30.11.2011] Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/research/ene/bioenergy/gasification/thermal_gasification_for_power_and_fuels.pdf

Kärhä, K., Strandström, M., Lahtinen, P., Elo, J., 2009. Metsähakkeen tuotannon resursitarve Suomessa vuonna 2020. Metsätehon tulosalvosarja 10/2009.

Kärhä, K., Elo, J., Lahtinen, P., Räsänen, T., Keskinen, S., Saijonmaa, P., Heiskanen, H., Strandström, M., Pajuoja, H., 2010. Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa vuonna 2020. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto 66/2010. Edita Publishing Oy. S.68. ISBN 978-952-227-468-7.

Kärhä, K., 2011. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2010. Metsätehon tulosalvosarja 6/2011.

Kärhä, K., Mutikainen, A., Hautala, A., 2011. Saalasti Murska 1224 HF käyttöpaikkamurskauksessa. Metsätehon tulosalvosarja 7/2011. [Viitattu 14.2.2012] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2011_07_Saalasti_Murska_kk_am_ah.pdf

Lampinen, M. J. & Seppälä, A., 2008. Kemiallinen termodynamiikka energiatekniikassa. Raportti 153. Teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos, Sovelletun termodynamiikan laboratorio. 228 s. ISSN 1455-7533. ISBN 978-951-22-9212-7.

Larson, E. D., Consonni, S., Napoletano, S., Katofsky, R. E., Iisa, K., Frederick, J., 2006. A Cost-Benefit Assessment of Gasification-Based Biorefining in the Kraft Pulp and Paper Industry Volume 2. Detailed Biorefinery Design and Performance Simulation. Final Report. 21 December 2006. [Viitattu 28.2.2012] Saatavissa: <http://www.princeton.edu/pei/energy/publications/texts/Princeton-Biorefinery-Project-Final-Report-Vol.-2.pdf>

Larson, E. D., Jin, H., Celik, F. E., 2009. Large-scale gasification-based coproduction of fuels and electricity from switchgrass. Biofuels, Biorprod. Bioref. Vol 9:3. S. 174–194. DOI: 10.1002/bbb.137

Liikanen, J., 1999. Yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon päästöjen jakaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 19/1999. Helsinki. 76 s. ISBN 951-739-513-2

Linde, 2011. RECTISOL® Wash -esite yrityksen verkkosivuilla. [Viitattu 19.12.2011] Saatavissa: http://www.linde-engineering.com/en/process_plants/hydrogen_and_synthesis_gas_plants/gas_processing_plants/rectisol_wash/index.html

Lindholm, P., 2000. Selvitys puupolttoaineista. Tampereen yliopisto, Aluetieteen ja ympäristöpolitiikan laitoksen verkkojulkaisu 2000. 29 s.

Lovins, A. B., 2004. Energy Efficiency, Taxonomic Overview. Encyclopedia of Energy. Vol 2. Rocky Mountain Institute. Elsevier. S. 383-401.

Lurgi, 2012. The Rectisol® Process -esite yrityksen verkkosivuilla. [Viitattu 7.2.2012] Saatavissa:

http://www.lurgi.com/website/fileadmin/user_upload/1_PDF/1_Broshures_Flyer/english/0308e_Rectisol.pdf

Länsi-Suomen Ympäristölupavirasto, 2005. Lupapäätös ympäristölupavirasto, Nro 7/2005/2, Dnro LSY-2002-Y-166. [Viitattu 19.3.2012] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=35898>

McCarthy, J., 2009. Review of the Technology Selections for Perdaman Chemical and Fertilisers Pty., Ltd. Stokes Engineering Company.

Meerman, J. C., Ramírez, A., Turkenburg, W. C., Faaij, A. P. C., 2011. Performance of simulated flexible integrated gasification polygeneration facilities. Part A: A technical-energetic assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 15:6. S. 2563-2587. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2011.03.018

Metla, 2011. Kanto on kivihiiltä ilmastoystävällisempi polttoaine. [Viitattu 17.11.2011] Saatavissa: <http://www.metla.fi/tiedotteet/2011/2011-02-03-kanto-on-kivihilta-ilmastoystavallisempi.htm>

Metso, 2010. KUVO belt dryer. Esite yrityksen verkkosivulla. [Viitattu 9.4.2012] Saatavissa: [http://www.metso.com/MP/marketing/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-090218-2256E-27B91/\\$File/WHDU_R_2080_040-02.pdf?OpenElement](http://www.metso.com/MP/marketing/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-090218-2256E-27B91/$File/WHDU_R_2080_040-02.pdf?OpenElement)

Miller, B. G. & Tillman, D. A., 2008. Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems. Elsevier. 532 s. ISBN 978-0-12-373611-6

Mokhatab, S., Poe, W. A., Speight, J. G., 2006. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Oxford, UK. Gulf Professional Publishing. ISBN: 978-0-7506-7776-9

Moora, M., 2009. LCNG – A Bridge Solution to Lower Energy Prices in Rural Alaska. [Viitattu 13.3.2012] Saatavissa: http://pdcharris.adhostclient.com/files_pdch/LCNG-A%20Bridge%20Solution.pdf

Nuottimäki, J., 2012. VTT. Maakaasuauton hyötysuhde. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 24.4.2012.

Oertli, 2012. OERTLI GSR 230 Condens -esite yrityksen verkkosivuilla. [Viitattu 25.4.2012] Saatavissa: http://www.oertli.de/produkte/produkt_palette/gas_brennwert/stand_optimat_gsr_230_condens_22_200_kw/optimat_gsr_230_condens

Patterson, M. G., 1996. What is Energy Efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. Energy Policy. Vol 24:5. S. 377-390

Pucker, J., Zwart, R., Jungmeier, G., 2011. Greenhouse gas and energy analysis of substitute natural gas from biomass for space heat. Biomass and Bioenergy. Vol 38 (2012). S. 95-101 DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.02.040

Rackley, S. A., 2010. Carbon Capture and Storage. Elsevier. 435 s. ISBN 978-1-85617-636-1

Raiko, R., 2002. Palamisen termodynaamiset perusteet. Teoksessa: R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, (toim.) Poltto ja palaminen. Jyväskylä: International Flame Research Foundation, S. 452-453.

Rauch, R., 2011. Conversion of Biomass over Steam Gasification to Biofuels and Chemicals - Actual Status of Work. Workshop of IEA Bioenergy Task 33: Gasification and Alternative Fuels Development, Thursday, 14th April 2011, Copthorne Hotel Commodore, Christchurch, New Zealand. [Viitattu 28.11.2011] Saatavissa: <http://www.woodtech.canterbury.ac.nz/documents/workshops/110414presentations/3-%20R%20Rauch%20Austria.pdf>

Rautevaara, J., 2012. Product Engineer. BMH Technology Oy. Biosaurus-murskaimen sähkönkulutus. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 2.3.2012.

Regionalwerke AG Baden, 2011. Energie-Hub Baden - ein innovatives Projekt (vorläufig) ohne Realisationsmöglichkeit. 31.01.2011. Tiedote yrityksen verkkosivuilla. [Viitattu 30.11.2011] Saatavissa: http://www.regionalwerke.ch/index.php?id=96&tx_ttnews%5Btt_news%5D=91&tx_ttnews%5BbackPid%5D=5&cHash=7129b7eda7142d9b54a9fd8277f87482

Repo, A., Tuomi, M. & Liski, J., 2010. Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. GCB Bioenergy 3 (2011). [Verkkolehti]. S. 107-115. [Viitattu 27.10.2011] DOI: 10.1111/j.1757-1707.2010.01065.x.

Rollins, M. L., Reardon, L., Nichols, D., Lee, P., Moore, M., Crim, M., Luttrell, R., Hughes, E., 2002. Economic Evaluation of CO2 Sequestration Technologies Task 4, Biomass Gasification-Based Processing. Final Technical Report. DE-FC26-00NT40937. [Viitattu 23.2] Saatavissa: http://www.fischer-tropsch.org/DOE/DOE_reports/fc26-00nt40937-03/fc26-00nt40937-03-1.pdf

Ruonakoski, T., 2011. Suomeen tuotavan maakaasun polttoaineketjun kasviuonepäästöt. Helsinki, Aalto Print. 15 s., Aalto-yliopiston julkaisusarja Tiede + Teknologia 9/2011. ISBN: 978-952-60-4128-5 (pdf) ISBN: 978-952-60-4127-8

Salo, K., 2004. Evolution of Gas Cleaning. IEA Task WS2. 25 October 2004 Copenhagen, Denmark. [Viitattu 13.1.2012] Saatavissa: <http://media.godashboard.com/gti/IEA/6CarbonaKariSalo.pdf>

Salo, K., 2009. Applications of Bubbling Fluidized Bed Gasification. Ciemat, 12-13 November 2009, Madrid, Spain.

Salo, K., 2010. Carbona Gasification Technologies. Biomass Gasification Plant in Skive. Gasification 2010, Swedish Gas Centre (SGC), 28-29 October, Scandic Crown, Gothenburg, Sweden.

Seiffert, M., Rönsch, S., Schmersahl, M., Zeymer, M., Majer, S., Päts, C., Kaltschmitt, M., Rauch, R., Rehling, B., Tremmel, H., Ulrich, D., Biollaz, S., Schildhauer, T., 2009. Bio-SNG – Demonstration of the production and utilization of synthetic natural gas (SNG) from solid biofuels. Final Project Report. TREN/05/FP6EN/S07.56632/019895

Siitonen, S., Rauhamäki, J., 2009. The role of natural gas in energy efficiency improvement. 24th World Gas Conference (WGC2009) Buenos Aires, Argentina, 5-9 October, 2009.

Siitonen, S., 2010. Implications of energy efficiency improvement for CO₂ emissions in energy-intensive industry. Väitöskirja. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo.

Soimakallio, S., Antikainen R., Thun, R., 2009a. Assessing the sustainability of liquid biofuels from evolving technologies: a Finnish approach. VTT Research Notes 2482. ISBN 978-951-38-7292-2

Soimakallio, S., Mäkinen, T., Ekholm, T., Pahkala, K., Mikkola, H., Paappanen, T., 2009b. Greenhouse gas balances of transportation biofuels, electricity and heat generation in Finland—Dealing with the uncertainties. Energy Policy 37 (2009) 80–90

Soimakallio, S., Hongisto, M., Koponen, K., Sokka, L., Manninen, K., Antikainen, R., Pasanen, K., Sinkko, T., Thun, R., 2010. EU:n uusiutuvien energialähteiden edistämisdirektiivin kestävyyskriteeristö - Näkemyksiä määritelmistä ja kestävyuden todentamisesta. VTT Working Papers 150. Espoo, VTT. ISBN 978-951-38-7491-9. ISSN 1459-7683.

Soimakallio, S. & Koponen, K., 2011 How to ensure greenhouse gas emission reductions by increasing the use of biofuels? Suitability of the European Union sustainability criteria. Biomass and Bioenergy Vol. 35:8, S. 3504-3513. doi:10.1016/j.biombioe.2011.04.041

Steubing, B., & Reinhard, J., 2008. LCA of the Production of Synthetic Natural Gas from Wood and Considerations to the Optimal Plant Scale. 36th Discussion Forum LCA of Future Biofuels. Empa Akademie, November 17th 2008. [Viitattu 30.11.2011] Saatavissa: http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/77139/---/l=1

Steubing, B., Zah, R., Ludwig, C., 2011. Life cycle assessment of SNG from wood for heating, electricity, and transportation. Biomass and Bioenergy Vol. 35:7. S. 2950-2960. doi:10.1016/j.biombioe.2011.03.036

Ståhl, K., 2011. Bio2G – 200 MW biomassbaseret gasproduktion i Sverige. Ingeniörföreningen IDA, Copenhagen, 19.9.2011. [Viitattu 29.11.2011] Saatavissa: <http://ida.dk/netvaerk/idaforum/U0637a/Documents/10%20Bio2G%20i%20Sverige%20Krister%20Stahl.pdf>

SYKE, 2010. Kantojen poltosta syntyy kivihiileen verrattava päästö. [Viitattu 17.11.2011] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=365796&lan=fi>

SYKE, 2011. Suomen sähkönhankinnan päästöt elinkaarilaskelmissa. [Viitattu 1.3.2012] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=26328&lan=fi>

Tilastokeskus, 2011. Polttoaineluokitus. [Viitattu 10.11.2011] Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_2011.xls

Tranier, J.P., Dubettier, R., Perrin, N., 2009. Air separation unit for oxy-coal combustion systems Proceedings of the 1st international oxyfuel combustion conference. September 8–11, Cottbus, Saksa (2009).

Tunå, P., 2008. Rapport SGC 187: Substitute natural gas from biomass gasification. Rapport SGC 187, 1102-7371 : Svenskt Gastekniskt Center, Lund Institute of Technology, 2008. ISRN SGC-R-187-SE.

Tuomaala, M., Ahtila, P., Haikonen, T., Kalenoja, H., Kallionpää, E., Rantala, J., Tuominen P., Shemeikka, J., Rämä, M., Sipilä, K., Pursiheimo, E., Forsström, J., Wahlgren, I., Lahti P., 2012. Energiatohokkuuden mittarit ja potentiaalit. Helsinki, Unigrafia Oy. 334 s. Aalto-yliopiston julkaisusarja Tiede+Teknologia 1/2012. ISBN 978-952-60-4503-0 (painettu). ISBN 978-952-60-4504-7 (pdf).

Törnblom, A., 2012. Göteborg Energi gör en översyn av biogassatsningarna och bromsar framtida biogasprojekt. Lehdistöiedote yrityksen verkkosivuilla. [Viitattu 19.4.2012] Saatavissa: http://www.goteborgenergi.se/Om_oss/Pressrum/Pressreleaser/Arkiv/Bigas

van der Meijden, C. M., Veringa, H. J., Rabou, L. P. L. M., 2010. The production of synthetic natural gas (SNG): A comparison of three wood gasification systems for energy balance and overall efficiency. Biomass and Bioenergy. Vol 34:3. S. 302-311. doi:10.1016/j.biombioe.2009.11.001

van der Meijden, C. M., 2010. Development of the MILENA gasification technology for the production of Bio-SNG. Väitöskirja. Eindhoven University of Technology. ISBN: 978-90-386-2363-4

Vitasari, C. R., Jurascik, M., Ptasinski, K. J., 2011. Exergy analysis of biomass-to-synthetic natural gas (SNG) process via indirect gasification of various biomass feedstock. Energy Vol. 36:6. S. 3825-3837. doi:10.1016/j.energy.2010.09.026

VTT, 2004. Energia Suomessa – Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3. painos. Helsinki. Edita Prima Oy. ISBN 951-37-4256-3

VTT, 2007. Energy Use: Visions and Technology Opportunities in Finland. Helsinki, Suomi. 234 s. Edita Prima Ltd.

Wihersaari, M. & Palosuo, T., 2000. Puuenergia ja kasvihuonekaasupäästöt. Osa 1: Päätehakkuun haketuotantoketjujen kasvihuonekaasupäästöt. VTT Energian raportteja 8/2000. Espoo: VTT.

Wihersaari, M., 2005. Greenhouse gas emissions from final harvest fuel chip production in Finland. *Biomass & Bioenergy* 28 (2005). S. 435-443.

