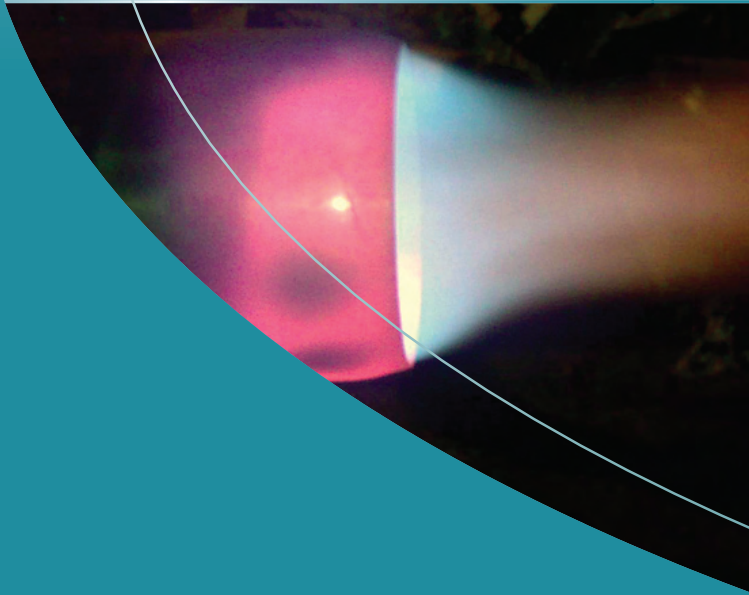


Ulla Lassi ja Bodil Wikman (toim.)

BIOMASSAN KAASUTUS SÄHKÖKSI, LÄMMÖKSI JA BIOPOLTTOAINEIKSI

HighBio-projektijulkaisu



BIOMASSAN KAASUTUS SÄHKÖKSI, LÄMMÖKSI JA BIOPOLTTOAINEIKSI

HighBio-projektijulkaisu

Toimittaneet Ulla Lassi ja Bodil Wikman

HIGHBIO-INTERREG POHJOINEN
1.7.2008–30.6.2011

Lämpöä, sähköä ja kemikaaleja biomassan kaasutuksen kautta
Värme, el och kemikalier via förgasning av biomassa



Gränslösa möjligheter



EUROPEISKA UNIONEN
Europeiska regionala
utvecklingsfonden

INTERREG
IV/NORD

Jyväskylän yliopisto
Kokkolan yliopistokeskus Chydenius
Kokkola 2011



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
KOKKOLAN YLIOPISTOKESKUS
CHYDENIUS



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU



ETC

LULEÅ
UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Taitto: Päivi Vuorio
Kannen kuva: Yrjö Muilu

ISBN 978-951-39-4312-7 (nid.)
ISBN 978-951-39-4313-4 (pdf)

Forsberg Rahkola
Pietarsaari 2011

ESIPUHE

Uusiutuva energia ja biomassan käyttö energian tuotannon raaka-aineena edistää kestäväää kehitystä ja luonnonvarojen monipuolista käyttöä vähentäen samalla riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Puuhakkeesta voidaan valmistaa sähköä, lämpöä, biopolttoaineita ja uusia kemian teollisuuden raaka-aineita. Biomassan mahdollisimman tehokas hyödyntäminen edellyttää huippuosaamista, uusien prosessien kehittämistä ja uudenlaista ajattelumallia, missä kansainvälisellä yhteistyöllä on myös keskeinen merkitys.

HighBio-projektissa (2008-2011) tuotettiin uutta tietoa biomassan kaa-
sutuksesta, tuotekaasun hyödyntämisestä esim. biopolttoaineiden valmis-
tuksessa ja biokaasutustuhkien hyötykäyttömahdollisuuksista hajautetun
energian tuotantoon liittyen. Pienimuotoisissa CHP-yksiköissä voidaan
tuottaa samanaikaisesti sähköä ja lämpöä kaasuttamalla puuta ja poltta-
malla muodostuva tuotekaasu. Kaasutuksella voidaan tuottaa hiukkasva-
paata, energiaintensiivistä kaasua, joten se on samalla vastaus EU:n yhä
tiukentuville ympäristövaatimuksille. Puukaasutusteknologian pioneeri-
työtä ovat tehneet useat Pohjois-Suomen alueella ja Pohjois-Ruotsissa toi-
mivat pk-yritykset, ja tässä kehitystyössä myös HighBio -projekti tutkijoi-
neen on ollut vahvasti mukana.

Uusiutuvan energian käytön lisääminen energiantuotannossa antaa
mahdollisuuden yrittäjyydelle ja maaseudun elinvoimaisuudelle. Jotta
nämä mahdollisuudet voidaan täysimittaisesti hyödyntää, tarvitaan sen
tueksi tutkimusta, uusien innovaatioiden tuottamista ja niiden menestyk-
sekästä kaupallistamista. Näihin haasteisiin myös HighBio-projekti on
osaltaan pyrkinyt vastaamaan mm. tutkimusyhteistyön, projektiseminaa-
rien ja sidosryhmätapaamisten kautta. Seudullinen yhteistyö yhdistettynä
jo nyt olemassa oleviin kansallisiin ja kansainvälisiin tutkimusverkostoi-
hin on muodostanut vahvan perustan tälle toiminnalle.

Lopuksi haluamme kiittää kaikkia projektiin osallistuneita yhteistyötahoja; tutkijoita, aktiivisia yrityksiä, rahoittajia sekä seminaarien ja sidosryhmätapaamisten aktiivista osallistujajoukkoa. Te teitte tästä projektista mielenkiintoisen, haasteellisen ja erityisesti yhteiskunnallisesti merkittävän.

Kokkolassa 12.5.2011

Ulla Lassi
Professori, soveltava kemia
HighBio-projektin
vastuullinen johtaja

Bodil Wikman
Projektikoordinaattori



HighBio-hankkeen puitteissa kumppanit ovat vaihdellen järjestäneet seminaareja ja vierailuja erilaisissa kohteissa. Kuvassa suomalainen HighBio-delegaatio opintokäynnillä Smurfit Kappan voimapaperi- ja bioenergiantuotantolaitoksessa Piteåssa, Ruotsissa, toukokuun 2010 projektiseminaarin yhteydessä.

SISÄLLYS

HAJAUTETTU ENERGIANTUOTANTO

Hajautettu energiantuotanto <i>Ulf-Peter Granö</i>	9
---	---

BIOMASSAN KAASUTUS

ETC- HighBio saavutukset <i>Magnus Marklund ja Olov Öhrman</i>	19
---	----

Myötävirtakaasutin biomassan kaasutukseen ja pienen mittakaavan CHP-tuotantoon <i>Yrjö Muilu ja Kari Pieniniemi</i>	31
---	----

Kaasutus ja tuotekaasun analysointi <i>Kari Pieniniemi ja Yrjö Muilu</i>	41
---	----

Kaasutusteknologian tulevaisuus <i>Jukka Konttinen</i>	50
---	----

Kaasutusteknologia käyttäjän näkökulmasta <i>Pentti Etelämäki</i>	53
--	----

BIOPOLTTOAINEET JA TUOTEKAASUN HYÖDYNTÄMINEN

Tulevaisuuden biopolttoaineet <i>Kirsi Partanen ja Ulla Lassi</i>	59
--	----

Synteesikaasusta uusia kemian tuotteita ja sovelluksia <i>Henrik Romar, Pekka Tynjälä ja Riikka Lahti</i>	68
--	----

TUHKAN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET

Kemiallisten menetelmien käyttö biotuhkien hyödyntämiseksi <i>Sari Kilpimaa, Toivo Kuokkanen ja Ulla Lassi</i>	81
--	----

TEKNIS-TALOUDELLINEN ARVIOINTI

Biomassapohjainen pienen mittakaavan yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto – taloudelliset edellytykset <i>Joakim Lundgren</i>	91
HighBio projekti-infot	98
HighBio-hankkeeseen liittyvät julkaisut ja raportit	101

HAJAUTETTU ENERGIANTUOTANTO

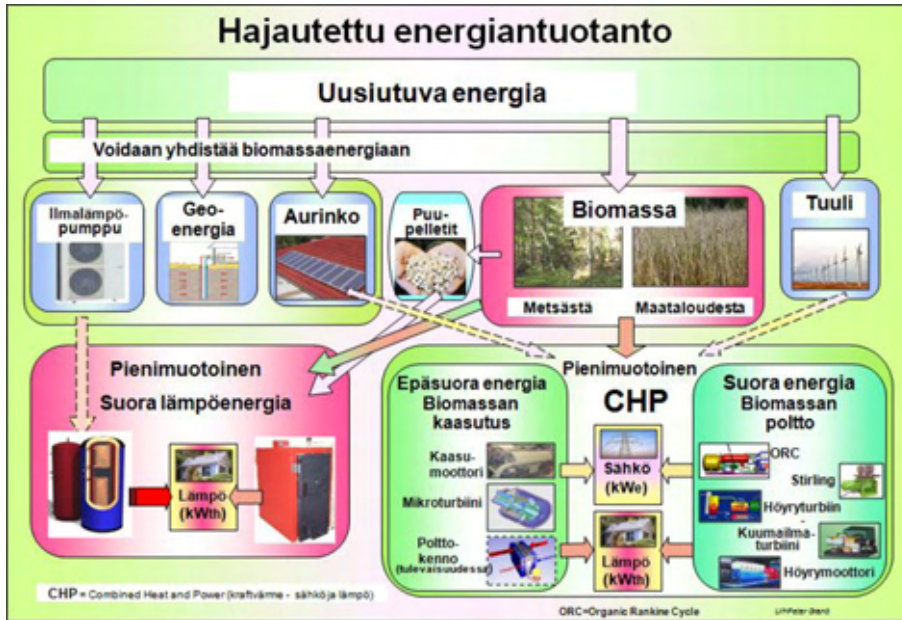
HAJAUTETTU ENERGIAN TUOTANTO

Ulf-Peter Granö

Tulevaisuudessa kansallisessa energiatuotannossa on tärkeää, että hajautetut pienimuotoiset ratkaisut tulevat raaka-aineen ja kuluttajan lähelle. Valitettavasti Suomessa vielä suurehkot yritykset käyttävät resurssejansa jarruttaakseen pienimuotoisia paikallisia energiantuotantoratkaisuja. Toivottavasti tulevaisuudessa järki voittaa ja hajautettua energiatuotantoa voidaan kehittää pienissä yksiköissä. Varsinkin pienet CHP -yksiköt (yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto) voivat edistää kestävästä energiatuotannon kehittymistä.

BIOMASSAN HAJAUTETTU JALOSTUS CHP-YKSIKÖIDEN YHTEYDESSÄ

Suomen ja Ruotsin metsissä on suuria määriä käyttämättömiä biopolttoaineresursseja. Niitä voitaisiin hyödyntää sähkön- sekä lämmöntuotannon lisäksi tulevaisuudessa myös raaka-aineina liikennepolttoaineeksi sekä kemiallisina raaka-aineina. Tekninen kehitys etenee nopeasti, ja nykyisin maailmanlaajuisesti tutkitaan jalostusprosesseihin yksinkertaisia sekä varmatoimisia ratkaisuja.

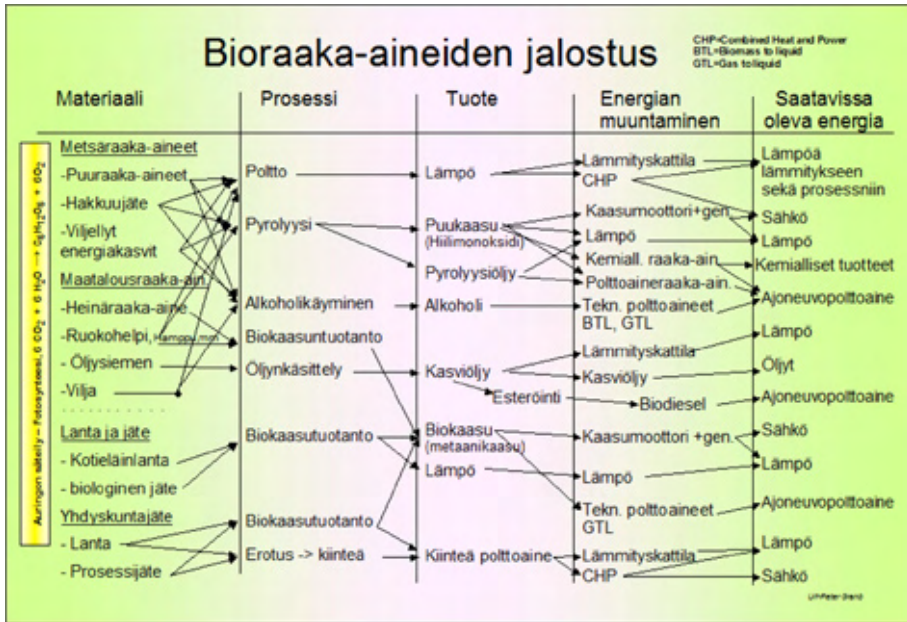


KUVA 1. Hajautettu energiantuotanto ja uusiutuvan energian käytön edistäminen.

Pienen mittakaavan energiaratkaisut biomassan jalostamiseksi lähimpien kuluttajille eivät ole toistaiseksi saaneet toivottavia kehitysresursseja. Suomessa valitettavasti suuret toimijat ovat näkyvästi esillä, ja tämän vuoksi usein myös kansallinen sekä EU-tuki kohdistuu näille. Viranomaisilla ja päättäjillä ei ole ollut kiinnostusta tai kykyä nähdä sitä merkittävää potentiaalia mikä pienen mittakaavan ratkaisuisissa, esim. lämpövoimatuotannossa on.

TIIVISTETTY KATSAUS – BIORAAKA-AINEIDEN JALOSTUS

Seuraavassa esitetään yleiskatsaus, jossa vertaillaan tiivistetysti eri bioraaka-aineiden jalostusta. Bioraaka-aineet voivat olla peräisin metsästä, maataloudesta, lannasta sekä muusta maatalousjätteestä, yhdyskuntajätteestä tai ne voivat olla esim. prosessiteollisuuden jätettä.



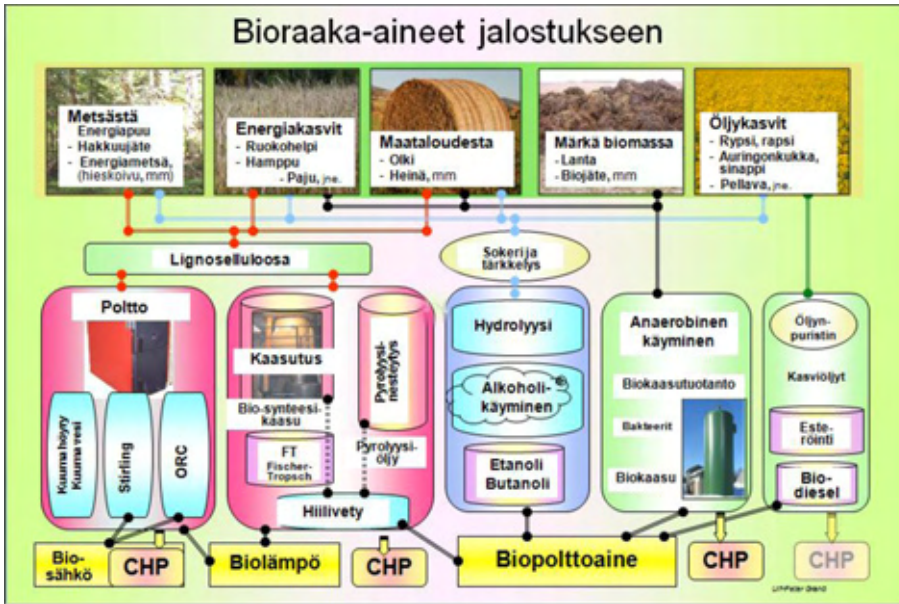
KUVA 2. Bioraaka-aineiden jalostusketjut.

CHP-LÄMPÖVOIMA

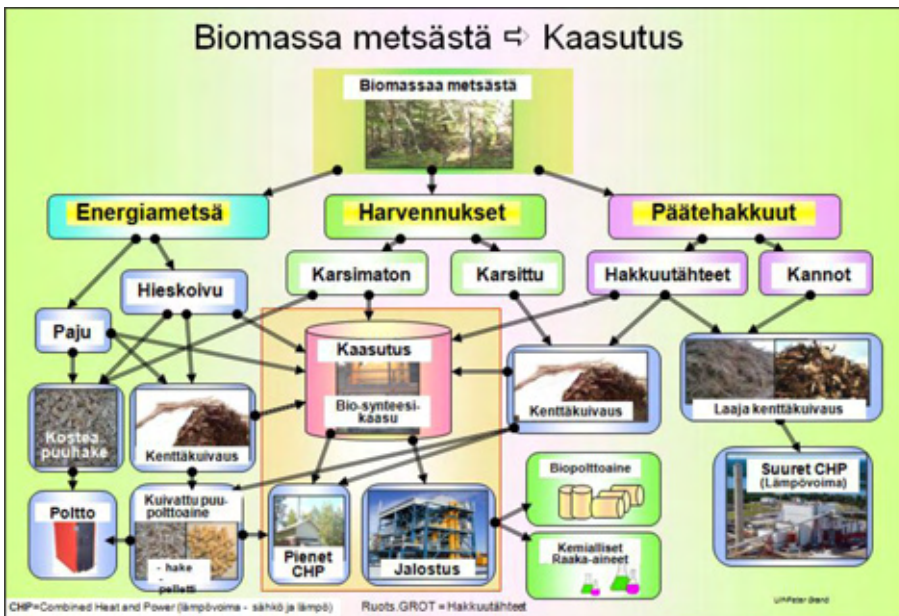
Hajautetut CHP-yksiköt sähkölle ja lähilämmölle voidaan muodostaa monin eri tavoin riippuen pitkälti siitä minkä suuruusluokan sähköntuotantoa tavoitellaan. Tärkeä tekijä on takuuhinta sähkölle tai sähköavustus.

Joitakin esimerkkejä erityyppin yksiköistä voisivat olla esimerkiksi:

- Puuhakkeen/pelletin suora poltto + Stirling
- Puuhakkeen/pelletin suora poltto + ORC (Organic Rankine Cycle)
- Puuhakkeen/pelletin suora poltto + pieni höyryturbiini
- Kaasutus + suora poltto + Kaasumoottori tai Mikroturbiini
- Kaasutus + suora poltto + ORC
- Kaasutus + Kaasumoottori (mäntämoottori)
- Kaasutus + Mikroturbiini
- Biokaasu + Kaasumoottori
- Biokaasu + Mikroturbiini
- Bio-Synteesikaasun ja biokaasun yhdistelmä + Kaasumoottori tai mikroturbiini



KUVA 3. Bioraaka-aineet jalostukseen.



KUVA 4. Biomassa metsästä.

BIOMASSA JA ÖLJYKASVIT

Metsästä ja maataloudesta peräisin olevat vihreän energian raaka-aineet voivat tulla monista eri raaka-ainelähteistä, kuten myöhemmin alla on kerrottu.

Biomassa metsästä –käsite voidaan pelkistää käsittämään:

- **Energiapuun**, erikokoista puuta raivauksesta ja harvennuksesta.
- **Hakkuujätteen**, oksat ja latvat hakkuualueelta.
- **Energiametsän**, tai lyhytkiertoisien energiametsän, esim. hieskoivun viljelyn.

Energiakasvit, joita viljellään pelloilla, ovat:

- Ruokohelpi, hamppu (kuituhamppu biomassaan), elefanttiheinä, jne.
- Paju tai salava, viljellään pääosin pelloilla ja on energiametsän välimuoto.

Maataloudesta

- Olki, heinä ja muut biokaasutuotantoon viljeltävät kasvit.

Märkä biomassa

- Lanta ja biojäte, kuten esimerkiksi pilaantunut rehu paaleissa tai siiloissa.

Öljykasvit

- Rypsi, rapsi, auringonkukka, sinappi, pellava, jne., joista voidaan puristaa bioöljyä, mikä puolestaan vaihtoesteröinnillä voidaan muuttaa biodieseliksi.

VIHREÄ ENERGIA – BIOMASSAN INTEGROITU JALOSTUS

Pienen mittakaavan hajautetulla biomassan jalostuksella on hyvät mahdollisuudet tulevaisuudessa olla keskeinen tekijä alueellisessa ympäristöajattelussa. Uusia tekniikoita tutkimalla voidaan paikallinen biomassaraaka-aine jalostaa paikallisille ja lähialueiden asiakkaille ja kuluttajille. Uudet tekniikat ovat sovellettavissa hajautetuille jalostusprosesseille. Energiaintegrointia kohtaan on esiintynyt kasvavaa kiinnostusta siten, että eri tavoin voidaan yhdistää jalostusprosesseja tehokkuuden kasvattamiseksi ja näin positiivisten synergiaetujen luomiseksi.

PUUKAASUTUS

Puubiomassan kaasutuksen kautta voidaan saada käyttökelpoista tuotekaasua, joka on kaasuna mielenkiintoinen raaka-aine. Sitä voidaan käyttää suoraan polttamiseen tai jatkojalostukseen.

Mielenkiintoisimpien vaihtoehtojen joukossa polttoaineiden tai kemiallisten raaka-aineiden suhteen on metsäperäisten bioenergiaraaka-aineiden puukaasutus.

Synteesikaasu tai tuotekaasu voidaan käyttää edelleen jalostukseen puhdistuksen ja kemiallisen muokkauksen jälkeen.

Käyttöalueita ovat:

- Suora poltto lämmöntuotantoa varten
- Suora poltto CHP -yksikössä, sähkön- ja lämmöntuotantoa varten
- Kaasupolttoaine sähköntuotantoon - CHP
 - mäntämoottorilla/kaasumoottorilla
 - kaasuturbiinilla
 - polttokennoilla (tulevaisuudessa)
- Jalostus ja jaottelu
 - ajoneuvopolttoaineiksi
 - kemiallisiksi raaka-aineiksi

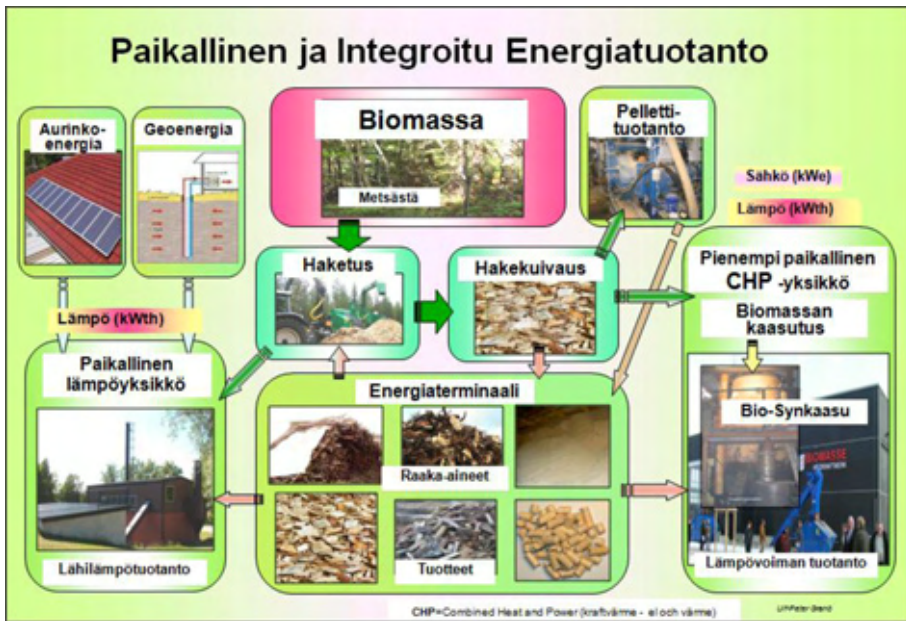
INTEGROINTIMAHDOSSUUDET

Lähilämmön lämpöyksikön toimijoiden yhteensovittaminen voi tapahtua eri tavoin ja kehittyä myös jatkuvasti kysynnän mukaan. Siksi on tärkeää, että heti lämpöyksikön sijoitusvaiheessa yritetään sijoittaa yksikkö siten, että tulevaisuuden muutokset voidaan toteuttaa sujuvasti. Energiainegroinnissa tarvitaan esim. maatila ja sen ympärille sujuvat logistiset ratkaisut ja sähkö- ja lämpöyhteyksiä johtojen ja putkien muodossa.

Joitakin esimerkkejä toimivista integroinnin palasista voisivat olla;

- Hakkeen kuivaus
- CHP-yksikkö (lämpövoima, sähkö + lämpö)
- Energiaterminaaleja, joilla on integroitu biomassaraaka-aineiden ja jalostettujen raaka-aineiden käsittely
- Biomassan kaasutus
- Aurinkoenergia
- Geoenergia
- Pellettituotanto
- Biokaasutuotanto maatiloilta
- Biokaasutuotanto lähilyhteisöltä
- Jalostus liikennepolttoaineen raaka-aineiksi

Se, millainen energiaintegraatti muodostuu, riippuu pääasiassa paikallisesta kehityksestä, tarpeesta ja kiinnostuksesta.



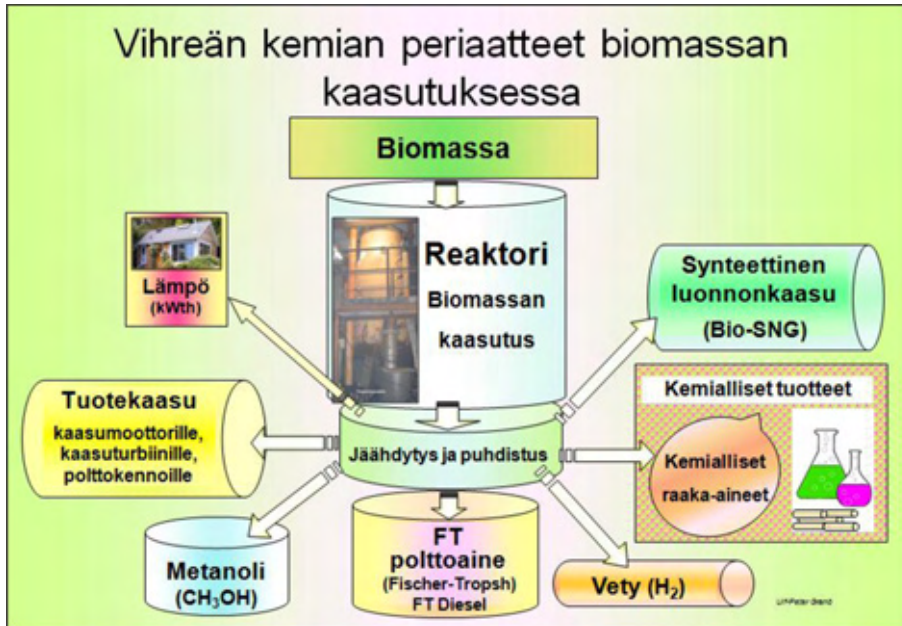
KUVA 5. Paikallinen ja integroitu energiantuotanto.

Energiaintegrointi kehittyy monesti asteittain ja on riippuvainen siitä mitä priorisoidaan. Tähän vaikuttavat erityisesti esimerkiksi paikallisen energiaosuuskunnan sekä lähialueen tarpeet ja kysyntä.

VIHREÄ KEMIA

Synteesikaasun tai tuotekaasun jalostuksen kautta voidaan tuoda esille monia erilaisia raaka-aineita sekä tuotteita. Suurimmat odotukset liittyvät liikennepolttoaineisiin fossiilisten polttoaineiden korvaajina. Kun raaka-aineena on metsästä saatava biomassa, se ei kilpaile ravinnontuotantoon soveltuvan peltoviljan kanssa.

Vihreän kemian kehittymisen kautta voidaan vähentää riippuvuutta fossiilisista öljytuotteista. Paikallisia bioenergiaresursseja voidaan hyödyntää paremmin, mikä voi lisätä työllisyyttä ja energiaomavaraisuutta alueella.



KUVA 6. Vihreä kemia – mahdollisuuksia biomassan kaasutuksessa.

PIENEMPIÄ YKSIKÖITÄ JALOSTUKSEEN

Hyvä vaihtoehto on se, että biomassan jalostus sijoitetaan CHP-laitoksen läheisyyteen. Tällöin voidaan tehokkaasti hyödyntää kaasutusprosessista saatavaa lämpöä sekä tuotekaasun jakelua. Täten voidaan varmistaa, että laitoksessa tuotettu heikkolaatuinen kaasu sekä lämpö voidaan hyödyntää CHP-laitoksessa sekä kaukolämpöverkossa.

Pienemmät biomassan kaasutukseen perustuvat yksiköt soveltuvat parhaiten paikallisiin CHP-laitoksiin yhdistettynä. Erityisesti mikäli saatavilla on tulevaisuuden kaasutusreaktoreja, joissa voitaisiin käyttää kostea tai kuivaa biopolttoainetta ja samalla valmistaa puukaasua ilman tervapartikkeleita. Biomassan kaasutukseen tarkoitettujen CHP-yksiköiden, joissa vaaditaan polttoaineen kuivaus sekä joissa tulee olla tehokas puhdistusyksikkö tervoilille ja muille epäpuhtauksille, täytyy olla riittävän suuria laitoksia, jotta kaasun tuotanto olisi taloudellisesti kannattavaa.

Jo tänään on olemassa hyvät mahdollisuudet hajautetun energiantuotannon myötä hyödyntää paikalliset bioenergiaraaka-aineet kestäväen kehitykseen hyväksi, pienimuotoisen jalostuksen kautta.

BIOMASSAN KAASUTUS

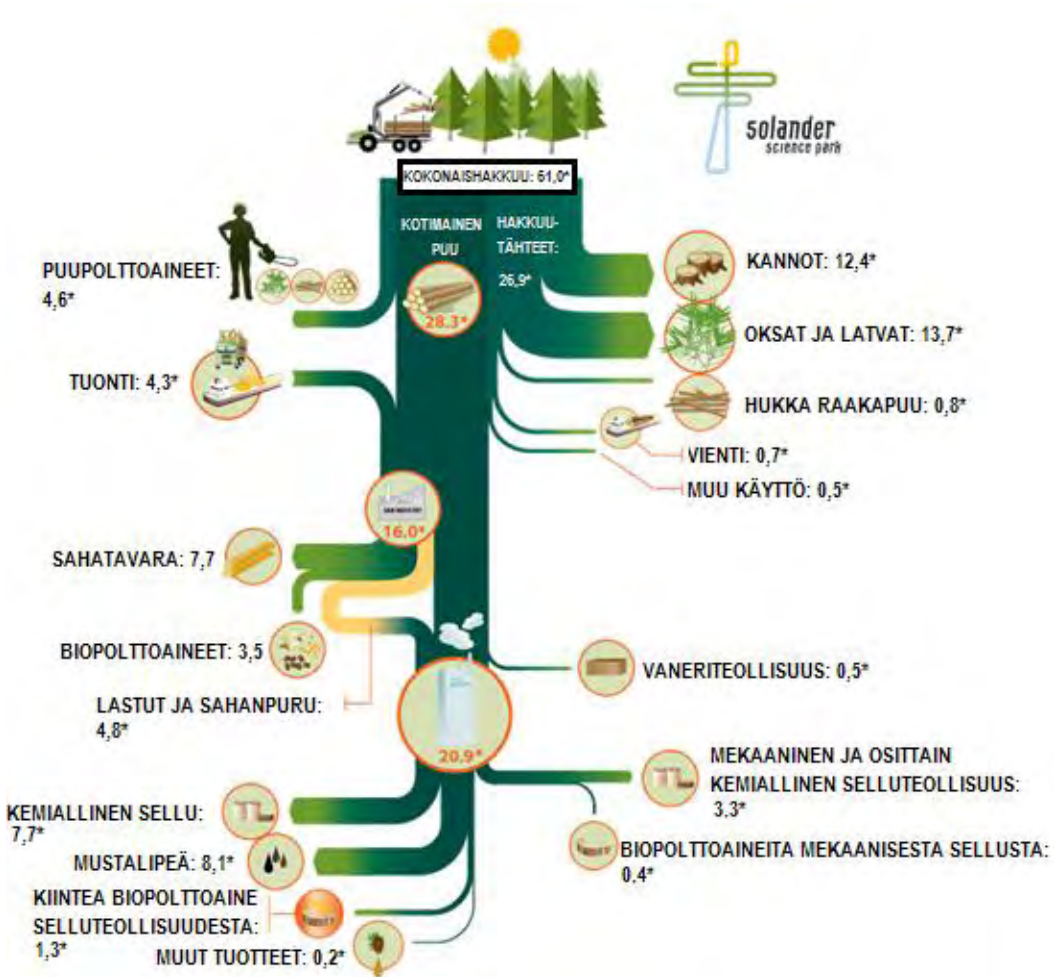
ETC-HIGHBIO SAAVUTUKSET

*Magnus Marklund ja Olov Öhrman
Energitekniskt Centrum, Piteå, Ruotsi*

MYÖTÄVIRTAKAASUTUS PILOT-MITTAKAAVASSA

Biomassan käytön lisääminen polttoainetuotannossa sekä maailmanlaajuisesti että paikallisesti auttaa vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä sekä pitkällä aikavälillä myös vähentämään kasvihuonekaasujen vaikutuksia. Biomassan avulla voidaan tuottaa energiaa (sähköä ja lämpöä) ja sitä voidaan muuntaa tehokkaasti arvokkaiksi kemikaaleiksi ja biopolttoaineiksi biojalostamoissa. Kuvassa 1 on esitetty biomassan kulku vuosittaisesta metsän hakkuusta Ruotsissa, mistä noin 45 % on hakkuujätteen muodossa (noin 70 TWh).

ETC:ssä (Piteåssa) on menossa biomassan kaasutus -projekti, joka on ollut myös osana HighBio-hanketta. Tähän mennessä projektiin on sisällytynyt pilottilaitoksen suunnittelu-, rakentamis- ja käyttöönotto vaihe. Laitos perustuu paineistettuun myötävirtakaasutukseen (Pressurized Entrained Flow Biomass Gasification, PEBG) ja tuottaa synteesikaasua puujätteestä sekä muista teollisuuden biomassajätteistä, joita ei hyödynnetä tällä hetkellä. Kaasutus perustuu korkeaan lämpötilaan (> 1200 °C) ja jauhetun biomassan kaasutukseen paineistetussa myötävirtakaasuttimessa, tuottaen alhaisen pitoisuuden tervaa ja muita hiilivetyjä. PEBG-kaasutuksen haittapuolena, verrattuna matalan lämpötilan pitkäkestoiseen kaasutukseen, on se, että raaka-aineen tulee olla jauhettu hienoksi jauheeksi (<1 mm) mikä tekee raaka-ainemateriaalin alttiiksi kuumuudelle ja kuonan muodostukselle. Tehtaiden suurimpia haasteita ovatkin raaka-aineen prosessointi ja jakelu, kuonanmuodostuksen kontrollointi sekä polttimen ja jäähdyttimen optimaalinen suunnittelu, jotta voidaan taata tasainen ja vakaa toiminta.



KUVA 1. Vuosittainen metsän hakkuu ja metsäbiomassan kulku Ruotsissa vuonna 2004.

Taulukko 1 esittää puun koostumuksen puun eri osissa. Taulukosta huomataan, että uuteaineiden ja tuhkan osuus on suurempi neulasissa ja kuoressa verrattuna runkopuuhun. Tämä tarkoittaa, että hakkuutähteillä (suurimmaksi osaksi neulasia ja kuorta) on korkeampi tuhkan ja uuteaineiden osuus.

TAULUKKO 1. Selluloosan, hemiselluloosan, ligniinin, uuteaineiden ja tuhkan prosenttiosuudet männyssä ja kuusessa.

	Selluloosa	Hemiselluloosa	Ligniini [m-%] kuiva-aine	Uuteaineet	Tuhka
Mänty (noin 70-vuotias)					
Runkopuu	41	27	28	3	1
Kuori, sisä	36	26	29	4.5	2
Kuori, ulko	25	20	48	3.5	2
Oksat	32	32	31	3.5	1
Neulaset	29	25	28	13	5
Kuusi (noin 110-vuotias)					
Runkopuu	43	27	28	0.8	1
Kuori	36	20	36	3.8	4
Oksat	29	30	37	1.7	2
Neulaset	28	25	35	6.1	5

ETC vihki PEBG-kaasuttimen 'IVAB-kaasuttimeksi' Solander Symposiumissa marraskuussa 2010 (sivukuva laitteistosta, katso kuva 2). Laitteistoa, jossa kaikki osajärjestelmät on systemaattisesti testattu ja ensimmäinen testiajo on suoritettu, otettiin käyttöön huhtikuussa 2011.



KUVA 2.

ETC:n PEBG-kaasutin (nimetty 'IVAB-kaasuttimeksi'), joka otettiin käyttöön huhtikuussa 2011.

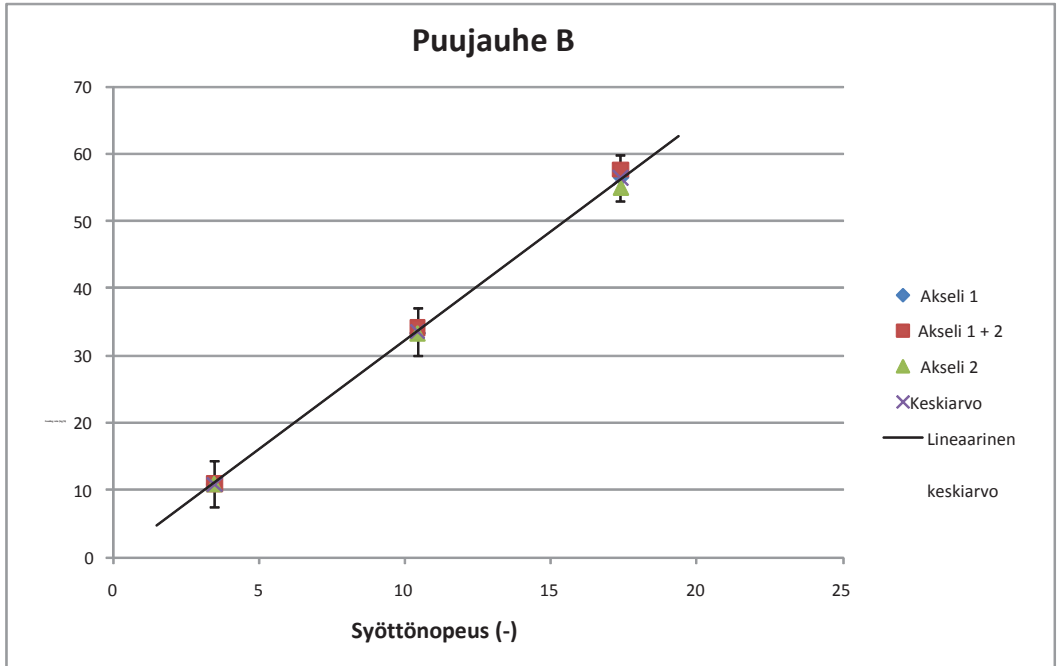
Ensimmäisissä kaasutuskokeissa keskitytään kaasuttamaan runkopuutanormaalissa ilmanpaineessa synteettisellä ilmaseoksella turvallisuuden varmistamiseksi. Myöhemmin tullaan testaamaan runkopuun kaasutusta paineistetuissa olosuhteissa kasvattaen hapen osuutta eri raaka-aineilla (kuori, kannot ja muut puujätteet). Kaasuttimen teho ja paine ovat 1 MW ja 10 bar, mutta käytännössä se tulee toimimaan 500 kW_{th} teholla 5 bar:n paineessa.

BIOMASSAJAUHEEN SYÖTTÖ

Biomassan varastointi ja syöttö jauheena voi olla ongelmallista johtuen biomassan kuiturakenteesta. Biomassajauhe on hienojakeista ja jakeilla on taipumus tarttua toisiinsa. Kestävä ja luotettava syöttöjärjestelmä on välttämätön kaikille prosesseille, joissa käsitellään biomassajauhetta, erityisesti poltossa ja kaasutuksessa (esim. PEBG-prosessissa). Näissä sovelluksissa tarvitaan vakaata ja stabiilia jauheen syöttöä. Markkinoilla on saatavilla erilaisia pneumaattisia jauheen syöttöjärjestelmiä normaali-ilmanpaineessa suoritettaville prosesseille, mutta ne eivät sellaisenaan sovellu paineistettuun prosessiin tarvittavan suuren kaasumäärän vuoksi. Parhaiten paineistettuun kaasutukseen sopii jatkuvatoiminen läpisyöttöjärjestelmä, jossa on kaksi erillistä polttoainesäiliötä, joita voidaan vuorotella täytöllä ja syötöllä. PEBG-kaasuttimessa on tällainen polttoaineen syöttöjärjestelmä, joka on alustavissa kokeissa osoittanut hyvää suorituskykyä.

Ensimmäiset syöttötestit PEBG-kaasutuksessa tehtiin kolmella eri raaka-aineella (kuorijauheella ja kahdella eri kokoluokkaa olevalla run-

kopuu jauheella) normaali-ilmanpaineessa. Syöttösystemi kalibroitiin syöttämään polttoainetta sekunnin välein. Lisäksi tarkasteltiin myös polttoainelaadun vaikutusta kokojakaumaan ja polttoaineen valinnan vaikutusta vakauteen. Kuvassa 3 on esitetty syöttönopeuden lineaarinen suhde mitatun polttoainejauheen (runkopuu) syöttönopeuteen.



KUVA 3. Mitatun polttoainevirtauksen ja puujauheen syöttönopeuden suhde.

POLTTOAINEEN VALMISTUS

Viime vuosikymmeninä pellettien valmistus ja jauheen polttaminen on kasvanut tasaisesti. Kummassakin prosessissa biopolttoaineen jauhatus on tärkeä osatekijä. Tämä koskee myös biopolttoaineen kaasutuskokeita, kuten syklonikaasutinta tai myötävirtakaasutinta, joissa käytetään puujauhetta. Jauheen vaatimukset eroavat kuitenkin näiden sovellusten välillä. Pellettituotannossa partikkelien kooksi hyväksytään jopa 3 mm kokoluokka. Sen sijaan jauheen termisessä poltossa ja kaasutuksessa partikkelikoko on jopa pienempi kuin 1 mm. Jauheen hiukkasista noin 10 % on oltava pienempiä kuin 100 µm, mikä on tärkeää liekin stabiilisuudelle.

Biopolttoaineen jauhaminen on monimutkaisempaa ja vaatii enemmän energiaa kuin kivihiilen jauhatus, koska hiili on hauraampaa ja siten hel-

pompaa pilkkoa. Aiemmat tutkimukset osoittavat, että hiilen jauhaminen vaatii energiaa 7-36 kWh/t, mikä on vähemmän kuin biomassalla (20–200 kWh/t). Jauheenpoltossa suurimman osan kuiva-aineesta on oltava kooltaan alle 1 mm, ja osan jopa alle 0,2 mm. Taulukossa 2 esitetään useita pelletin valmistajia ja heidän tuotantoaan. Bionorr erottuu joukosta suurimmalla jauhatuksen energiankulutuksella, joka on noin 74 kWh/t. Tämä johtuu siitä, että Bionorr käyttää erityistä prosessia, jossa jauhaminen tapahtuu ennen kuivausta. Normaalisti kuivaus tehdään ennen jauhamista ja siten vähennetään sähkön kulutusta. Taulukossa 2 esitetyt luvut eivät ole tarkkoja, koska ne perustuvat vain arvioihin jauhatuskapasiteetin ja moottorin tehokkuuden perusteella. Biomassan jauhamisessa voidaan olettaa keskimääräiseksi energiankulutukseksi 25 kWh/t, jos biomassan kosteus 10–12 %.

Energian tarve lisääntyy merkittävästi biomassan kosteuspitoisuuden kasvaessa. Bionorr käyttää noin kolme kertaa enemmän energiaa jauhamiseen kuin muut valmistajat. Bionorr käyttää haketta, jonka kosteuspitoisuus on noin 50 % verrattuna muihin laitoiksiin, jotka jauhavat kuivattua haketta tai sahanpurua, jonka kosteuspitoisuus on noin 12 %. Kokemus osoittaa, että seuraavat tekijät kosteuden lisäksi vaikuttavat tarvittavan energian määrään jauhamisessa:

1. Seulan tiheys
2. Seulan pinta-ala
3. Raaka-aineen koostumus

Jauhatuksen ohella toinen biomassan esikäsittelytekniikka on torrefiointi, joka on biomassan lämpökäsittelyprosessi, jossa hydrofiilinen materiaali muutetaan hydrofobiseksi. Prosessi tapahtuu 250–300 °C inertissä ympäristössä (savukaasu). Näissä lämpötiloissa lämpökäsittely muuttaa kuivan puun pääkomponenttien (selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini) rakennetta. Hemiselluloosa on vähiten lämpöä kestävä osa puusta ja tuottaa suurimman osan haihtuvista aineista torrefiointi-prosessissa. Hemiselluloosan hajoaminen myös aiheuttaa joitakin rakenteellisia muutoksia ligniinissä ja selluloosassa, mutta vaikutus ei ole merkittävä.

Taulukossa 3 on esitetty torrefiointikokeiden tuloksia. Taulukon tulokset osoittavat, että massanvaihto vaihtelee välillä 43–87% riippuen puulajista, lämpötilasta ja ajasta. Energian tuotossa näkyy myös suurta vaihtelua. Alhaisin energiatuotto on 50 % ja suurin noin 93 %. On myös joitakin tuloksia, jotka ovat korkeampia kuin edellä esitetyt.

TAULUKKO 2. Eri jauhatustekniikoita, joita käytetään Ruotsissa.

Omistaja	Merkki	Seula (mm)	Tuotanto (t/h)	Moottoriteho (kW)	Energiankulutus	Raaka-aine	Kosteuspit. %
1. Glommers	Venäläinen (tuntematon)	6	1,6	25	15,6	Lastut kuiva hake	9-15
2. SCA Bionorr	ABB		10	736	73,6	Raaka hake	45-55
3. Laxå Pellets	Andritz Sprout	2,5	8	200	25,0	Mänty / kuusi sahanpuru	10
4. Luleå Bioenergi	Buhler	3	(7-10)		24,7	Hake	10-15
5. Derome Bioenergi	Buhler	4-6	5	118	24,0	Sahanpuru	12
6. Lantmännens Agroenergi Ab	Andritz Sprout	4-6	10	315	31,5	Jalostus hake (max 15 mm)	11
7. Vida Pellets	Anritz Sprout	5	16	200	12,5	Lastut	12

TAULUKKO 3. Massa- ja energiavaihto torrefiointi-prosessissa.

Materiaali	Massavaihto (%)	Energia-vaihto (%)	Lämpöarvo (MJ/kg)	Lämpötila (°C)	Reaktioaika (min)
Vehnän olki	72,0	77,0	20,7		
Ruokohelpi	71,0	78,0	20,8	270	30
Paju	80,0	86,0	21,7		
Vehnän olki	55,1	65,8	22,6		
Ruokohelpi	61,2	69,0	21,8	290	30
Paju	72,0	79,2	21,9		
Paju	87,0	95,0	19,4	250	30
Paju	67,0	79,0	21,0	300	10
Puujäte	56,0	65,0	22,8		30
Puujäte	54,0	62,0	23,0	270	60
Puujäte	43,0	50,0	23,1		90
Koivu	68,9	88,3	21,1		
Mänty	72,1	92,9	22,3	280	120
Sokeriruokojäte	64,7	82,8	19,8		

Puun kolme pääkomponenttia ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini. Nämä kolme ainetta ovat polymeerejä, joilla on heikkoja kemiallisia sidoksia. Kuivan puun lämpökäsittelyn aikana lämpötila, joka ylittää 200 °C, muuttaa näiden sidosten rakennetta. Hemiselluloosan koostumus vaihtelee pehmeän (havupuut) ja kovan (lehtipuut) puumateriaalin välillä. Lehtipuuden hemiselluloosasta 80–90% on ksylaania, kun taas havupuut sisältävät 60–70% glukomannaania ja 15–30% arabinogalaktaania. Ksylaani on lämpöherkempi kuin muut komponentit, mikä selittää suuremman massahävikin torrefiointi-prosessissa havupuilla ja oljilla.

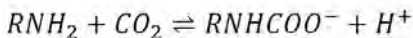
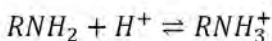
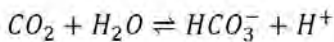
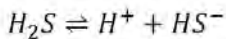
TUOTEKAASUN KOOSTUMUS

Biomassaa kaasuttaessa tuotetaan synteetikaasua, joka koostuu pääosin H₂:stä, CO:sta ja CO₂:sta. Näiden komponenttien lisäksi synteetikaasu voi sisältää pieniä määriä epäpuhtauksia esim. H₂S, COS, merkaptaaneja, rasakaita hiilivetyjä (terva) ja hiukkaspäästöjä. Kaasu voi sisältää myös pieniä määriä halogeeneja ja HCN:ää. Riippuen siitä mihin synteetikaasua käytetään, puhdistetaan kaasu eriasteisesti. Yleensä, jos kaasua käytetään katalyyttiseen synteesiin tuottamaan liikennepolttoaineita edellyttää se parempaa kaasunpuhdistusta kuin jos kaasua käytetään sähköntuotannossa. Kaasunpuhdistukseen on käytettävissä seuraavanlaisia menetelmiä:

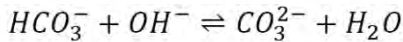
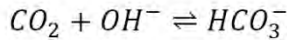
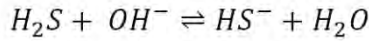
- Fysikaaliset ja kemialliset pesurit (absorptio)
- Adsorptio
- Terminen tai katalyyttinen käsittely
- Membraanit

ABSORPTIO

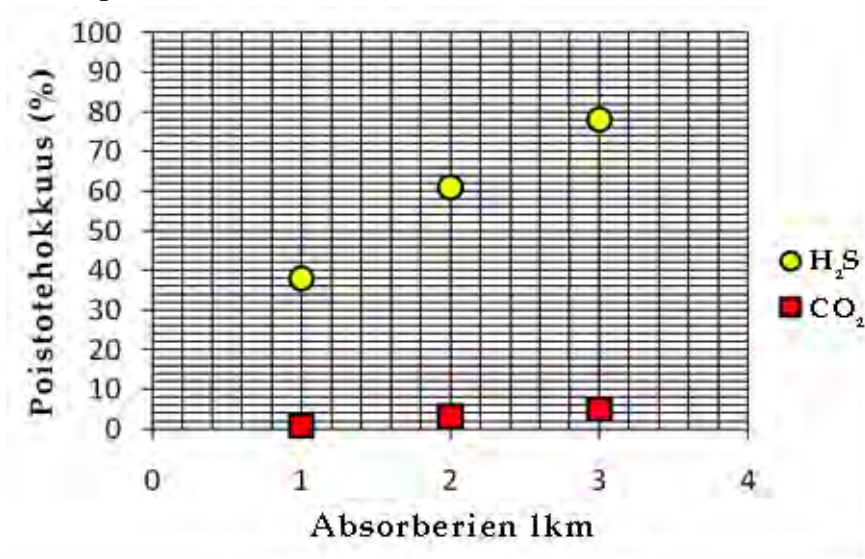
Kaasun liuetessa nesteeseen tapahtuu absorptiota. On olemassa kahdenlaista absorptiota, kemiallista ja fysikaalista. Esimerkki kemiallisesta absorptiosta on amiinipesu, jota voidaan käyttää puhdistamaan H₂S ja CO₂ synteetikaasusta. Käytettyjä amiiniliuoksia on useita. Yleisiä reaktioita, jotka tapahtuvat absorptiossa ovat:



Emäksisiä liuoksia voidaan myös käyttää puhdistamaan synteesikaasua. Usein käytetään Na_2CO_3 - tai K_2CO_3 -liuoksia, joiden pH on 9-11. Reaktiot ovat:



Esimerkki H_2S :n puhdistamisesta synteesikaasusta, joka on tuotettu mustaliipeää kaasuttamalla, on esitetty kuvassa 4. Kaavio osoittaa H_2S -määrän, joka voidaan poistaa synteesikaasusta absorberien (lyhyt kontaktaika) avulla, jotka ovat laimennettua viherliipeää. Kyseessä on siis eräänlainen emäspesu. Kolmen absorberin avulla tehdyssä kokeessa saatiin poistettua 78 % H_2S :ä synteesikaasusta.



KUVA 4. H_2S :n puhdistus synteesikaasusta laimennetulla viherliipeällä 50 °C:ssa. Kuvassa on esitetty poistotehokkuus absorberien lukumäärän funktiona.

Esimerkkejä kaupallisista prosesseista, joissa käytetään emäksisiä absorptioliuoksia, ovat Benfield, Catacarb, Flexsorb, Giammarco-Vetrocoke, Seaboard, Vacuum Carbonate, Vacasulf ja Alkacid jne.

Kun suuria määriä epäpuhtauksia on poistettava kaasusta, fyysikaalinen absorptio saattaa olla aiheellista. Orgaanisia liuottimia kuten metanolia

käytetään absorboimaan epäpuhtauksia kaasusta. Puhdistuksen jälkeen on saatavilla puhdistettua synteetikaasua sekä myös puhtaita erotettuja kaasuja, kuten esim. H_2S ja CO_2 . Esimerkkejä kaupallisista prosesseista ovat Selexol, Sepasolv, Purisol ja Rectisol.

Kaksi prosessia, jotka käyttävät sekä kemiallista että fysikaalista absorptiota, ovat Sulfinol ja Amisol. Fysikaalista absorptiota käytetään poistamaan suurin osa epäpuhtauksista ja kemikaalien avulla kaasu puhdistetaan sen lopulliseen koostumukseen. Esimerkki tällaisesta on Amisol-prosessi, jossa käytetään metanolia fysikaaliseen absorptioon ja alkyyliminiä kemiallisena liuottimena.

ADSORPTIO

Adsorptio tapahtuu yleensä matalassa lämpötilassa. Kuten absorptio, adsorptio voi olla fysikaalinen tai kemiallinen. Adsorptiossa kaasu sitoutuu suuripinta-alaisen materiaalin (esim. $500 \text{ m}^2/\text{g}$) pintaan. Esimerkkejä käytetyistä adsorptiomateriaaleista on aktiivihiili ja zeoliitti. Aktiivihiiltä on käytetty absorboimaan raskaampia hiilivetyjä kaasuvirrasta. Zeoliiteilla voidaan poistaa CO_2 :a tuotekaasusta. Adsorbenttien regenerointi voidaan tehdä lämmityksen tai paineen avulla. ZnO :a voidaan käyttää poistamaan H_2S kaasusta. H_2S reagoi ZnO :n kanssa muodostaen ZnS :a korkeissa lämpötiloissa. ZnS on vaikea elvyttää (regeneroida). Tämän vuoksi sitä käytetään vain poistamaan pieniä määriä epäpuhtauksia ennen kuin kaasua käytetään katalyyttisessä liikennepolttoainetuotannossa.

TERMINEN TAI KATALYYTTINEN KÄSITTELY

Epäpuhtaudet voidaan poistaa termisen tai katalyyttisen käsittelyn avulla. Hajut ja haihtuvat orgaaniset epäpuhtaudet voidaan hapettaa termisesti. Katalyyttisen käsittelyn avulla epäpuhtaudet voidaan poistaa alhaisissa lämpötiloissa.

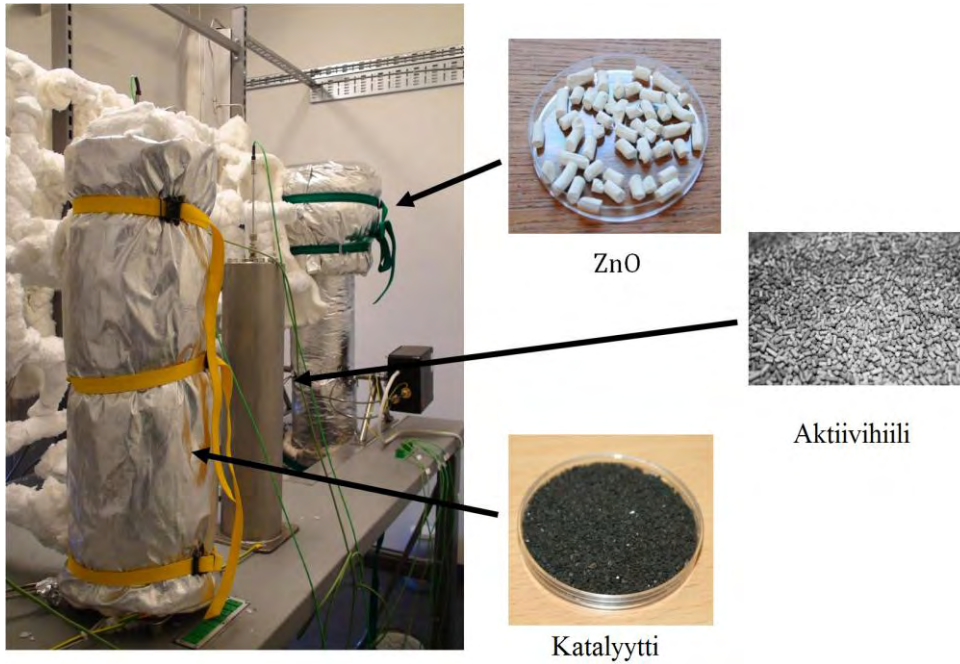
MEMBRAANIT

Viime aikoina membraaneja (kalvoja) on alettu käyttää kaasun puhdistuksessa. Zeoliittimembraania tai polymeerikalvoa käytetään erottamaan haluttu komponentti kaasusta. ETC:ssä on äskettäin testattu CO₂-selektiivisiä zeoliittimembraaneja korkeassa paineessa. Membraaneilla on loistavat mahdollisuudet biopolttoaineiden tuotannossa, koska biomassan kaasutuksessa synteetikaasun tulee olla puhdistettu CO₂:sta.

SYNTEESIKAASUSTA KORKEALAATUISIA TUOTTEITA

Useita tutkimushankkeita on käynnissä tällä alalla. BioDME -projekti on käynnissä Piteässä ja pilot-laitoksessa tuotetaan dimetyylieetteriä (4 tonnia/vrk) synteetikaasusta, joka on tuotettu mustalipeän kaasutuksessa. DME voidaan helposti muuntaa bensiiniksi. Vastaavasti myös dieseliä voidaan tuottaa synteetikaasusta ja Suomessa onkin meneillään aiheeseen liittyviä tutkimus- ja kehittämishankkeita. Synteetikaasua on jo pitkään muutettu useiksi eri tuotteiksi. Biomassan kaasutuksessa on tärkeää, että muodostunut synteetikaasu voidaan puhdistaa sopivan puhtaaksi nykyisillä teknologioilla tai että biomassasta kaasutettu synteetikaasun puhdistus ja katalyyttinen synteesi voidaan tehdä uusilla menetelmillä, kuten esimerkiksi zeoliittimembraanien avulla.

ETC:ssä on pienen mittakaavan laitos metanolin ja dimetyylieetterin katalyyttiseen synteisiin. Vuonna 2010 tehtiin ensimmäinen synteesi, jossa tuotettiin metanolia mustalipeän kaasutuksen kautta. Mustalipeän kaasutuksessa saatu kaasu puhdistettiin ensin bentseenistä hiilisuodattimen avulla (adsorptio) ja sitten rikkikomponenteista sinkkioksidin avulla. Puhdistettu kaasu johdetaan reaktoriin, jossa kaasu muutetaan metanoliksi katalyyttisesti. Kuvassa 5 on kuva reaktorilaitteistosta. Laitteisto tuotti yhteensä noin 0,6 dm³ nestemäistä biometanolia, katso kuva 6.



KUVA 5. Reaktorilaitteisto katalyyttiseen synteisiin, joka tuottaa metanolia synteetikaasusta. Laitteisto sisältää reaktorin, jossa on hiilisuodatin, sinkkioksidia kaasun puhdistukseen ja katalyytti metanolisynteisiin.



KUVA 6. Reaktorilaitteistolla tuotettua metanolia. Metanoli on tuotettu synteetikaasusta, joka on kaasutettu mustalipeästä.

MYÖTÄVIRTAKAASUTIN BIOMASSAN KAASUTUKSEEN JA PIENEN MITTAKAAVAN CHP-TUOTANTOON

Yrjö Muilu ja Kari Pieniniemi
Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu
CENTRIA tutkimus ja kehitys

Viime vuosina biomassan kaasutuksesta on tullut suosittu tutkimusaihe, joka on sekä teollisuuden että tieteellisen mielenkiinnon kohteena. Tuotekaasua tai synteesikaasua, jota muodostuu biomassan kaasutuksessa, voidaan käyttää pienimuotoisissa CHP-yksiköissä lämmön- ja sähköntuotannossa. Lisäksi tuotekaasua voidaan käyttää kemikaali- ja biopolttoainetuotannossa. Pienen mittakaavan CHP-tuotanto voidaan määritellä lämmön- ja sähköntuotannoksi kokoluokassa alle 100 kW. Mikro-CHP:tä käytetään usein kuvaamaan pienen mittakaavan CHP-järjestelmää, jossa sähkön tuotanto on alle 15 kW_e (Dong L. 2009). Centrian myötävirtakaasutinta (kuva 1), joka perustuu patentoituun EK-kaasutintekniikkaan, on käytetty HighBio-tutkimushankkeessa. CENTRIAn tutkimuskaasuttimen tuottama lämpö- ja sähköteho on 100 kW_{th} ja 50 kW_e.

Centrian myötävirtakaasutin koostuu hakkeen syöttöjärjestelmästä, ilman esilämmitin- ja syöttöjärjestelmästä sekä kaasuttimesta, jossa on tuhkan poisto ja kaasun puhdistussysteemi (kuva 1). CENTRIAn tutkimuksessa käyttämä kaasutin perustuu perinteiseen puun kaasutusprosessiin, mutta siinä on joitakin selviä teknisiä parannuksia, jotka tekevät siitä ainutlaatuisen ja monipuolisemman hajautettuun CHP-tuotantoon. EK-tekniikkaan perustuvassa biomassan kaasutusprosessissa polttoaineen laatu ei ole niin kriittinen kuin perinteisissä kaasutuslaitoksissa ja esim. ilmakeivattua (kosteuspitoisuus 30–40%) haketta (koivua, mäntyä, jne.), joka sisältää kuorta, voidaan syöttää kaasuttimeen.



KUVA 1. CENTRIAn myötävirtakaasutin, joka perustuu patentoituun EK-kaasutusteknologiaan.

Taulukossa 1 on esitetty prosessiolosuhteet Centrian myötävirtakaasuttimessa vakaan toiminnan aikana ja prosessikaavio on esitetty kuvassa 2.

TAULUKKO 1. Prosessiolosuhteet Centrian myötävirtakaasuttimessa vakaan toiminnan aikana.

Ominaisuus	Arvo
Raaka-ainevirta, kg/h	45
Ilmavirta, Nm ³ /h	52
Ilman lämpötila, °C	16
Reaktorin lämpötila, °C	1200
Pohjatuhan hävikki, kg/h	0.4
Tuotekaasuvirta, Nm ³ /h	78

Centrian T&K uusiutuvan energian laboratorion tutkimuksessa pyritään saamaan entistä kattavampi käsitys toimintaedellytyksistä, tuotekaasun tai synteetikaasun koostumuksesta sekä lämmön- ja sähkön- yhteistuotannon (CHP) optimoinnista. Tutkimus perustuu uusiutuvien energia- lähteiden, kuten hakkeen ja pienikokoisen harvennusjätteen sekä muiden maatalousbiomassojen kaasutukseen synteetikaasuksi. Tutkimuksen tarkoituksena on EU:n strategian mukaisesti vähentää riippuvuutta fossii-

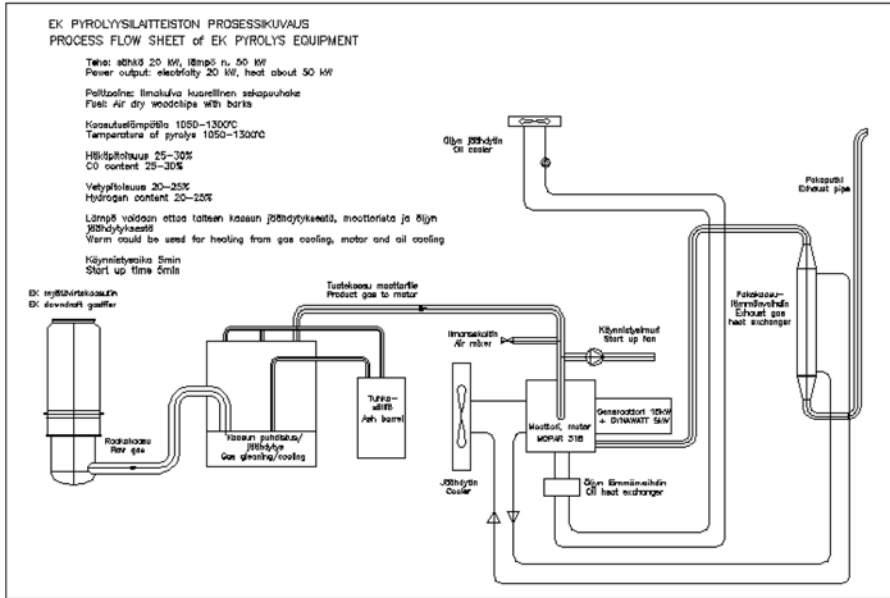
lisistä polttoaineista, vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja täyttää tiukat tavoitteet CO₂-päästöjen vähentämisessä.

Biomassan CHP-järjestelmien palamis- ja höyryturbiinitekologioita on yleisimmin käytetty erityisesti suurissa ja keskisuurissa biomass-CHP-järjestelmissä (Taulukko 2). Kaasutus, joka perustuu CHP-järjestelmiin saattaa olla tehokkaampi sähköntuotannossa kuin suorassa CHP-poltossa. Kaasu, jota saadaan kaasuttamalla, voidaan hyödyntää diesel-, kaas-, Stirling- ja ”kaksi-polttoaine”-moottoreissa tai kaasuturbiinissa. (Verigan 2009)

TAULUKKO 2. Suuren energian konversioteknologiat biomass-CHP-järjestelmissä (Dong L., 2009).

Ensisijainen tekniikka	Toissijainen tekniikka
Poltto, tuottaen vesihöyryä/kuumaa vettä	Höyrymoottori; höyryturbiini; Stirling-moottori; Orgaaninen Rankine Cycle (ORC)
Kaasutus, tuottaen kaasumaista polttoainetta	Polttomoottori (IC); mikro-turbiini; kaasuturbiini; polttokenno; Stirling-moottori
Pyrolyysi, tuottaen kaasumaisia ja nestemäisiä polttoaineita	Polttomoottori
Biokemiallinen/biologinen prosessi, tuottaen etanolia, biokaasua	Polttomoottori
Kemiallinen/mekaaninen prosessi, tuottaen biodieselä	Polttomoottori

Myötävirtakaasutusta voidaan pitää yhtenä parhaiten soveltuvana teknologiana hajautetussa pienimuotoisessa biomassaan perustuvassa yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa (jopa noin 1 MW_{th} kokoluokkaan asti). Kaupallisten kaasutuslaitosten valmistajia on yhteensä noin 50 Euroopassa, Yhdysvalloissa ja Kanadassa, joista 75 % perustuu kiintopeti-myötävirtakaasutukseen, 20 % leijupetikaasutukseen, 2,5 % vastavirtakaasutukseen, ja 2,5 % muihin (H. Knoef 2000).



KUVA 2. Centrian uusiutuvan energian laboriorion kaasuttimen prosessin kulkua kuvaava kaavio.

POLTTOAINEEN KULUTUKSEN JA KUORMITUKSEN ARVIOINTI KAASUTTIMESSA

Kaasuntuotanto Centrian uusiutuvan energian laboriorion kaasuttimes-
 sa ja kaasupolttolaitteen kulutus muokatussa IC-moottorissa on määritetty
 käyttäen eri sähkökuormitusta (tehoa): 9 kW, 18 kW ja 27 kW (kuva 3).
 Tässä tutkimuksessa käytetyn puuhakkeen kosteuspuiteisuus sekä mitattu
 ylempi ja alempi lämpöarvo on esitetty taulukossa 3. Hakkeen kosteuspuite-
 toisuus oli melko suuri eli 44,6 %.



KUVA 3. Tutkimusta kaasun tuotannosta ja polttoaineen koostumuksesta modifioidulla 8-litraisella, 6-sylinterisellä IC-moottorilla. Käytetty sähkötehon kuormitin 9 kW (vasemmalla) ja IC-kaasumoottori (oikealla).

TAULUKKO 3. Mitatut ominaisuudet käytetylle puuhakkeelle.

Puuhakkeen ominaisuus	Yksikkö	Mitattu arvo
Kosteus	%	44.6
Tuhka (kuiva-aineesta)	%	1.9
Ylempi lämpöarvo (HHV(kuiva))	MJ/kg	19.71
Alempi lämpöarvo (LHV(kuiva))	MJ/kg	18.3
Alin saavutettu lämpöarvo (LHV)	MJ/kg	9.5

Kaasun ja puun kulutus IC-moottorissa määritettiin lisäämällä sähköistä kuormitusta tyhjäkäyntilanteeseen ja nostamalla tehoa asteittain 9 kW aina 27 kW asti, käyttäen 9 kW sähkölämmittintä (Kuva 3). Jotta puukaasusta voidaan tuottaa 1 kWh sähköenergiaa, kaasunkulutus IC-moottorin tyhjäkäyntitilassa on melko suuri, 70,4 Nm³, verrattuna kuormitettuun tilanteeseen, jossa puukaasua käytettiin vain 2,6–3,0 Nm³ (Taulukko 4).

TAULUKKO 4. Mitatut arvot puukaasun kulutukselle IC-moottorissa.

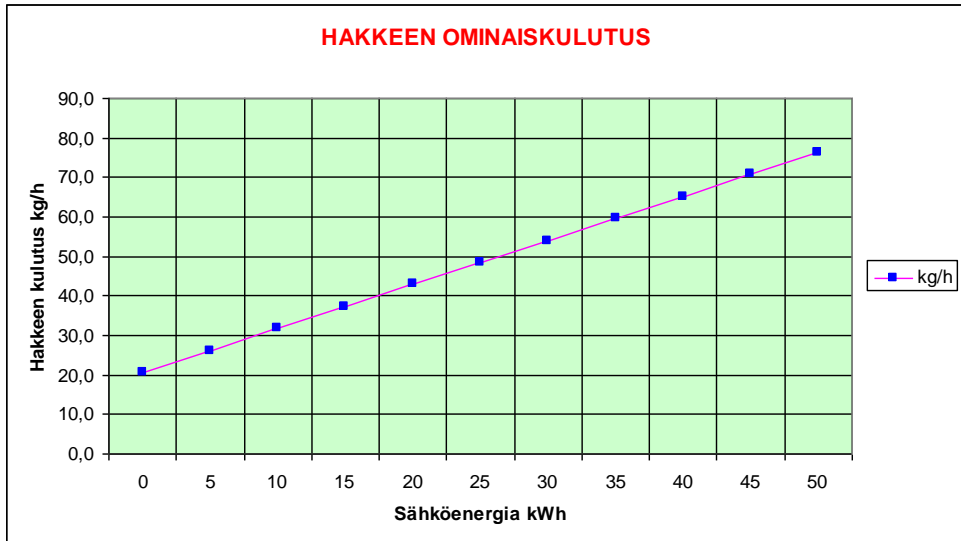
Mittaus	Yksikkö	Testiajo 1	Testiajo 2	Testiajo 3	Testiajo 4
Keskimääräinen tuotekaasun tilavuusvirta	Nm ³ /h	70	94	124	151
Hakkeen kulutus	kg/h		39.78	-	58.84
Lämpöteho	kW	22		45	52.5
Sähköenergia	kWh	0	9	18	27
Kaasun kulutus	Nm ³ /kWh	70.4	2.6	3.0	3.0

Hakkeen kulutus arvioitiin mittausten perusteella, jotka on esitetty taulukossa 4. Hakkeen kulutus oli 1,06 kg/kWh ja kaasun tuotannon laskettiin olevan 2,45–2,83 Nm³/kg. Hakkeen kulutus määritettiin myös käyttämällä Oilonin maakaasupoltinta, joka oli muunnettu puukaasukäyttöön. Samaa poltinta voidaan käyttää myös Stirling-moottorin CHP-yksikössä (kuva 5). Mittausten mukaan ilmakeivan hakkeen (kosteuspitoisuus 35 %) kulutus oli 57 l/h, mikä on noin 16 kg/h (ominaispaino noin 280 kg/m³). (ks. Kuva 4) Puukaasun tuotanto mitattiin kaasumittarilla ja sen todettiin olevan 7,49 Nm³/h. Tämän mittauksen mukaan 1 kg haketta tuottaa 3,6 Nm³ kaasua, mikä on melko suuri määrä verrattuna arvoihin, jotka on esitetty taulukossa 5.



KUVA 4. Arvioitu kaasun tuotanto käytettäessä kaasupoltinta. Puukaasukäyttöinen kaasupoltin (vasemmalla) ja testauslaitteisto (oikealla).

Mitattu hakkeen kulutus vs. tuotettu sähköenergia Centrian CHP-yksikössä on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Puuhakkeen kulutus (kg/h) vs. tuotettu sähköenergia (kWh).

Centrian mitatut kaasuntuotanto ja polttoaineen kulutus vastaavat hyvin kirjallisuudessa esitettyjä arvoja (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Mitattuja kaasutusparametrejä verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin tyypillisiin arvoihin.

Kaasutusparametri	Yksikkö	Mitatut arvot (Centrian kaasutin)	Tyypilliset arvot (Knoef 2005)
Kaasun tuotanto	Nm ³ /kg	2.5–2.8	2–3
Kaasun tuotanto	Nm ³ /kWe	2.6–3.0	2–3
Polttoaineen koostumus	kg/kWe	1.06	1–1.3
Kuormitus	kg/m ² .hr	2510	500–2000

On huomioitava, että käytetyn hakkeen kosteuspitoisuus oli noin 45 %, mikä on paljon korkeampi kuin kirjallisuusarvojen korkein hyväksyttävä kosteuspitoisuus, joka on 25 % myötävirtakaasuttimella (H. Knoef 2005). Alempi hakkeen lämpöarvo, jota käytettiin tässä kokeilussa, oli noin 9,0 MJ/kg, mikä on huomattavasti alhaisempi kuin kirjallisuuden arvo 13,5 MJ/kg puuhakkeella, jonka kosteuspitoisuus on 25 %.

TUOTEKAASUN HYÖDYNTÄMINEN

Korkean lämpötilan biomassan kaasutuksessa (1200–1400 °C) muodostuu biosynteesikaasua (H_2 ja CO suhteella 2:1), jota voidaan käyttää sekä raaka-aineena kemianteollisuudessa tuottamaan nestemäisiä polttoaineita (esim. etanoli, metanoli ja FT-diesel) että tuottamaan lämpöä ja sähköä tai muiden kemikaalien ja vedyn tuotantoon.

Matalan lämpötilan biomassan kaasutuksessa (800–1000 °C), muodostuu tuotekaasua, joka sisältää pääasiassa CO, H_2 , CO_2 , H_2O , CH_4 , N_2 , hiilivetyjä ja tervoja. Tätä kaasua voidaan käyttää polttoaineena kaasui- tai Stirling-moottorissa tuottamaan sähköä sekä lämpöä. Kun kaasulle tehdään tervan krakkaus, puhdistaminen ja reformointi, voidaan tuotekaasua käyttää kuten biosynteesikaasua useissa sovelluksissa esim. raaka-aineena synteettisen maakaasun (SNG) tuotantoon.

Lisäämällä vesihöyryä tai happea biomassan kaasutukseen prosessissa tapahtuu höyryreformointi ja tuotetaan biosynteesikaasua, jota voidaan käyttää Fischer-Tropsch-reaktioon tuottamaan raskaampia hiilivetyjä tai vesikaasun-siirto-reaktioon (WGS) tuottamaan vetyä. Tällä hetkellä vetyä käytetään pääasiassa kemianteollisuudessa, mutta tulevaisuudessa siitä voi tulla merkittävä polttoaine käytettäväksi esim. autoissa (Holladay, et al. 2009).

CENTRIAN MIKRO-CHP YSIKKÖÖN PERUSTUVA STIRLING-MOOTTORI

Stirling-moottori yhdistettynä biomassan kaasuttimeen on viimeisin asennettu laitteisto Centrian T&K uusiutuvan energian laboratoriossa (ks. kuva 6).



KUVA 6. SOLO Stirling 161 CHP-yksikkö Centrian t & k uusiutuvan energian laboratoriossa.

Stirling-moottori on lämpömoottori, joka toimii ilman tai muiden kaasujen syklisen puristuksen ja laajenemisen avulla eri lämpötiloissa siten, että lämpöenergia muunnetaan mekaaniseksi työksi. Stirling-moottori on tunnettu korkeasta hyötysuhteesta verrattuna höyrykoneisiin. Sillä on myös hiljainen käyntiäänä ja se on helppokäyttöinen, koska se voi käyttää lähes mitä tahansa lämmönlähteenä. Myös sen yhteensopivuus vaihtoehtoisten ja uusiutuvien energialähteiden kanssa vähentää merkittävästi riippuvuutta fossiilisista polttoaineista sekä CO₂-päästöjä. (http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine) Stirling-moottorissa lämpö, jota syntyy palamisessa, siirtyy työkaasuun korkeassa lämpötilassa (yleensä 700–750 °C) ja ylimääräistä lämpöä, jota ei ole muunnettu työksi siirtyy osaksi jäähdytysvettä 40–85 °C.

Stirling-moottorilla varustetulla mikro-CHP-yksiköllä on joitakin merkittäviä etuja verrattuna perinteiseen IC-moottoriin lämmön- ja sähkön-tuotannossa. Esimerkiksi huoltovälit Stirling-moottorissa ovat varsin pitkiä verrattuna Otto moottoreihin, joilla huoltoväli tyypillisesti 5000–8000 tuntia. Myös päästöt nykyisestä Stirling-polttimesta voivat olla 10 kertaa pienempiä kuin päästöt Otto-moottorista katalysaattorilla. (SOLO STIRLING GmbH versio 1.9, heinäkuu 2003). Stirling-moottorin kapasiteetti on sähköä 9 kW ja lämpöteho 26 kW ja kokonaisteho yli 95 % voidaan säästää.

LÄHTEET

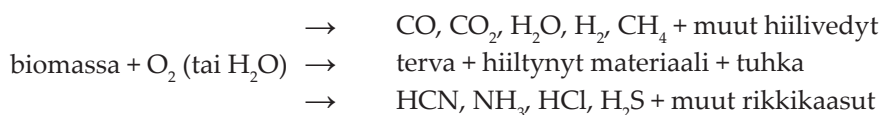
- Dong L., Liu H. and Riffat S. "Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems –A literature review." *Applied Thermal Engineering* 29, 2009: 2119–2126.
- Holladay, J.D., J. Hu, D.L. King, and Y. Wang. "An overview of hydrogen production technologies." *Catalysis Today* 139. 2009. 244 – 260.
- Knoef, H. *Inventory of biomass gasifier manufacturers and installations*. Enschede: Final Report to European Commission, Contract DIS/1734/98-NL, Biomass Technology Group BV, University of Twente, 2000.
- Knoef, H.A.M., ed. *Handbook Biomass Gasification*. BTG biomass technology group BV, The Netherlands, 2005.
- SOLO STIRLING GmbH. *Technical Documentation. Solo Stirling 161 Combined Heat and Power (CHP) Module*. Sildeffingen: www.stirling-engine.de, version 1.9, July 2003.
- Verigan, H.J. "Advanced Techniques for Generation of Energy from Biomass and Waste." *ECN publication.*, 2009: Available from: http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Overig/pdf/Biomassa_voordelen.pdf.

KAASUTUS JA TUOTEKAASUN ANALYSOINTI

Kari Pieniniemi ja Yrjö Muilu
Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu
CENTRIA tutkimus ja kehitys

BIOMASSAN KAASUTUS

Kaasutus on lämpökäsittelyprosessi, joka perustuu kuivaukseen, pyrolyysiin, hapetukseen ja kaasutukseen, jossa muodostuu kaasumaisia tuotteita ja pieniä määriä orgaanisia epäpuhtauksia, hiiltynyttä materiaalia ja tuhkaa. Kaasutus tapahtuu korkeassa lämpötilassa. Tuotekaasu koostuu seoksesta hiilimonoksidia (CO), vetyä (H₂), metaania (CH₄), hiilidioksidia (CO₂) ja typpeä (N₂) sekä sisältää myös joitakin orgaanisia epäpuhtauksia (terva) sekä pölyä, HCl, H₂S, NH₃, jne. (kuva 1.)



KUVA 1. Biomassan kaasutuksessa muodostuva tuotekaasu

Pyrolyysi on ensimmäinen vaihe termokemiallisessa biomassan konversiossa. Tavanomaista hidasta pyrolyysiä on käytetty tuhansia vuosia tuottamaan puuhiiltä. Nopea pyrolyysi tuottaa pääasiassa nestemäistä bioöljyä (60–75 m-%), jonkin verran kiinteää hiiltä (15–25 m-%) ja pysyviä kaasuja (0–20 m-%). Flash-pyrolyysiä pidetään parannettuna versiona nopeasta pyrolyysistä, jossa reaktioaika on muutamia sekunteja (Taulukko 1).

TAULUKKO 1. Pyrolyysin olosuhteet hitaassa, nopeassa ja flash-pyrolyysissä.

	Hidas pyrolyysi	Nopea pyrolyysi	Flash pyrolyysi
Pyrolyysin lämpötila (°C)	300–700	600–1000	800–1000
Lämmitys (°C/s)	0.1–1	10–200	>1000
Partikkelikoko (mm)	5–50	<1	<0.2
Kiinteä viipymäaika (s)	300–550	0.5–10	<0.5

Orgaaniset epäpuhtaudet vaihtelevat kevyistä hiilivedyistä raskaisiin polysyklisiin hiilivetyihin (PAH), jotka tunnetaan terveyhdisteinä (kuva 3). Lämpötilan noustessa sekundääri reaktio alkaa kaasufaasissa ja hapettuneet terveyhdisteet muunnetaan kevyiksi hiilivedyiksi, aromaattisiksi korkeammiksi hiilivedyiksi ja lopulta suuremmiksi PAH-yhdisteiksi tertiäärisissä prosesseissa. Tervan muuntaminen primäärituotteista aromaattisiksi hiilivedyiksi lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 2. (Li C. 2009)

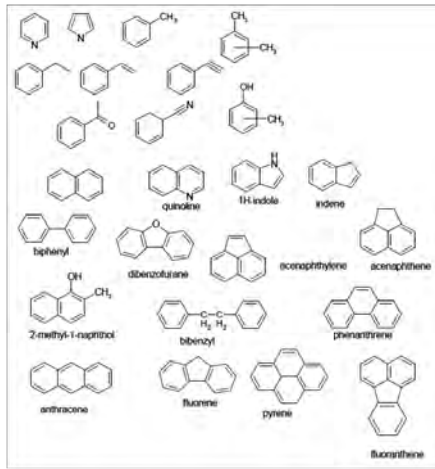
**KUVA 2.** Elliottin esittämä kaavio tervojen muodostumisesta biomassan kaasutuksessa (Elliott, 1988).

Terveyhdisteet voidaan jakaa viiteen ryhmään molekyylipainon perusteella, kuten taulukossa 2 on esitetty.

TAULUKKO 2. Tervayhdisteet jaettuna viiteen ryhmään. (Li C., 2009)

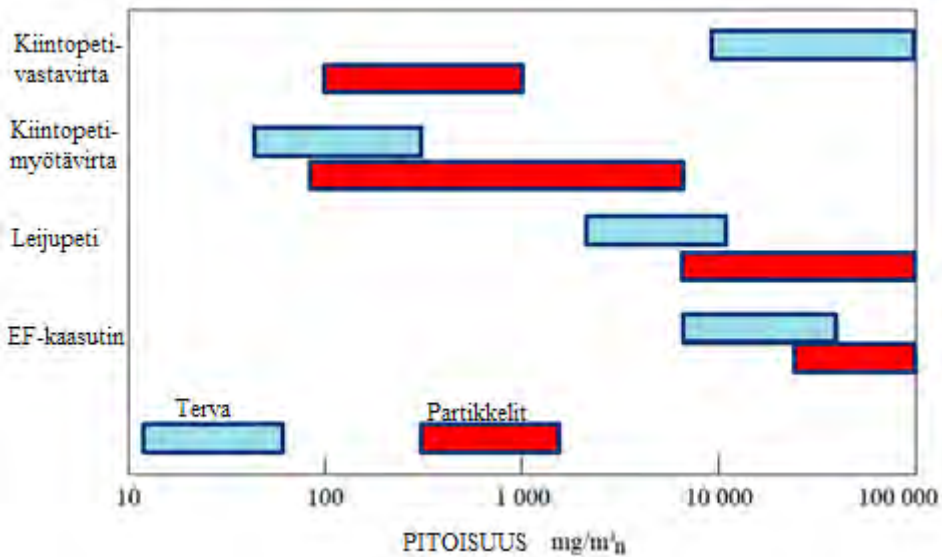
Terva-ryhmä	Nimi	Ominaisuus	Tyypillisiä yhdisteitä
1	GC-havaitsemattomat	Erittäin raskaat tervayhdisteet, joita ei voida mitata GC:n avulla	Määritellään vähentämällä GC-havaittavista tervafraktion kokonaismäärästä
2	Heterosykliset aromaattiset yhdisteet	Tervayhdisteet, jotka sisältävät heteroatomeja; hyvin vesiliukoisia	Pyridiini, fenoli, kresoli, kinoliini, isokinoliini, dibentsofenoli
3	Kevyet aromaattiset yhdisteet (1 rengas)	Yleensä kevyitä hiilivetyjä, joissa yksi rengas; ei tuota ongelmia kondensoitumalla tai liukoisuudella	Tolueneeni, etyylibentseeni, ksyleeni, styreeni
4	Kevyet PAH-yhdisteet (2–3 rengasta)	2 tai 3 rengasta yhdisteessä; kondensoituu matalassa lämpötilassa, jopa alhaisessa konsentraatiossa	Indeeni, naftaleeni, metyyli-naftaleeni, bifenyylili, asetanaftaleeni, fluoreeni, fenantreeni, antraseeni
5	Raskaat PAH-yhdisteet (4–7 rengasta)	Suuremmat kuin 3 rengasta sisältävät yhdisteet, kondensoituvat korkeassa lämpötilassa alhaisella konsentraatiolla	Fluoranteeni, pyreeni, kryseeni, peryleeni, koroneeni

Kaasutus, joka korkeissa lämpötiloissa (800–1000 °C), tuottaa merkittävän määrän tervaa, joka on edelleen suurin ongelma kaasutusprosessissa ja siksi tervan poistamista pidetään yhtenä suurimmista teknisistä ongelmista kaasutustekniikan kehittämisessä.



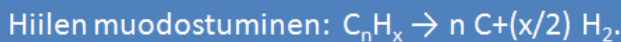
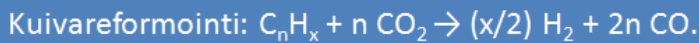
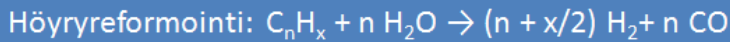
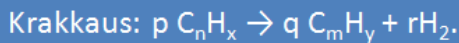
KUVA 3. Esimerkkejä muutamista yleisistä tervayhdisteistä.

Tervan, joka on määritelty orgaanisina epäpuhtauksina, joiden molekyylipaino on suurempi kuin bentseenin, koostumus ja määrä riippuvat biomassatyypistä, kaasuttimesta ja käytetyistä kaasutusolosuhteista. Keskimääräinen tervapitoisuus on noin 100 g/Nm³ vastavirtakaasuttimella, 10 g/Nm³ leijupetikaasuttimella ja 1g/Nm³ myötävirtakaasuttimella (Neeft J. 1999) (kuva 4).



KUVA 4. Tyypilliset partikkeli- ja tervapitoisuudet biomassaa kaasutettaessa (tervan k.p. > 150 °C) (Stålberg P. 1998)

Tärkeimmät tervan hajotusprosessit ovat krakkaus, höyry- ja kuivareformointi (kuva 5).



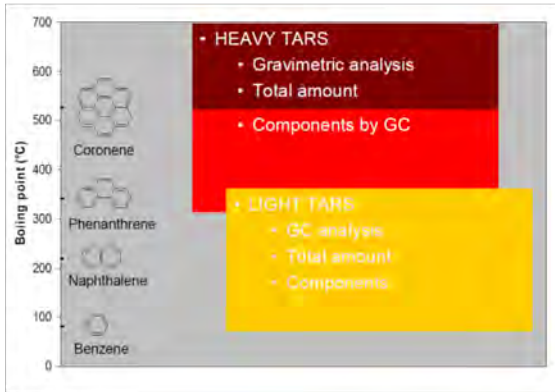
C_nH_x kuvaa tervaa, ja C_mH_y kuvaa hiilivetyjä, joilla alhaisempi hiililuku kuin C_nH_x

KUVA 5. Tärkeimmät tervan hajotusprosessit.

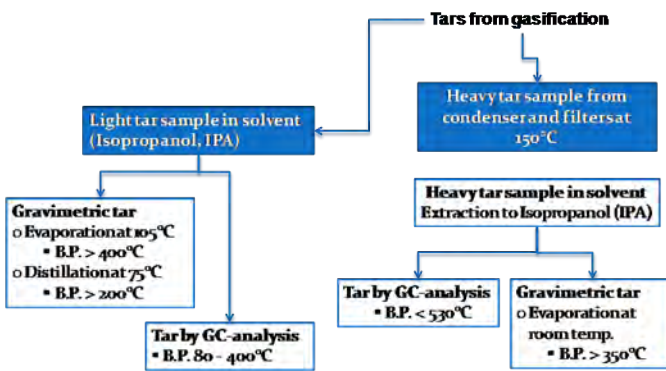
Tervaa voidaan vähentää kaasuttimessa muokkaamalla kaasutusolosuhteita tai kaasuttimen mallia (primäärimenetelmät) tai mekaanisella erotamisella, termisellä tai katalyyttisellä krakkauksella kaasutuksen jälkeen (sekundäärimenetelmät). EK-kaasuttimessa tervan muodostusta vähennetään ensisijaisesti kaasuttimen suunnittelulla ja sekundäärimenetelmänä kaasunpuhdistuksessa käytetään vain märkäpesuria.

TERVAN JA TUOTEKAASUN ANALYYSI

Epäpuhtauksien, kuten tervan analyysi tuotekaasusta suoritetaan useimmiten kaasukromatografialla (GC) tai gravimetrisesti. Näytteenotto tervanalyysimenetelmissä perustuu tervan talteenottoon tervaloukun avulla orgaaniseen liuottimeen tai adsorptiolla sopivaan adsorbenttiin (Li C. 2009). Perinteinen tervanäytteenottomenetelmä perustuu kylmäloukkuun yhdessä liuotinabsorption kanssa. Erilaisia liuottimia käytetään, mutta 2-propanolia suositeltiin Terva-protokollassa (Neeft 2005) (kuva 6).



KUVA 6. Kevyet tervat voidaan analysoida kaasukromatografialla, kun taas raskaat tervat gravimetrisesti. (Reinikainen 2009)



Terva-protokollan ohella olemme käyttäneet SPA (Solid Phase Adsorption) määrittämenetelmää kokonaistervapitoisuuden määrittämiseen tuotekaasusta CHP-yksikössä. Biomassa, jota käytettiin tässä kokeessa, oli puuhaketta, jonka kosteuspitoisuus oli noin 30 %. Tervanäytteet adsorboitiin kiinteään adsorbenttiin (XAD) ja adsorbentti uutettiin dikloorimetaaniin (DMC) Soxhlet-laitteistolla. DCM-uute haihdutettiin ja jäännös punnittiin (gravimetrisen menetelmä). Mitattu tervapitoisuus tuotekaasusta oli 143 mg/Nm³ (50% kuormitus) ja 138 mg/Nm³ (täysi teho), ks. taulukko 3).

TAULUKKO 3. Kokonaistervapitoisuus Centrian pilottikaasuttimesta ennen ja jälkeen tervan puhdistuksen.

Teho	Tuotekaasun tervapitoisuus mg/m ³ n (kuiva, NTP: 0°C, 1 atm)
50 %	143
100 %	138



KUVA 7. Centrian FTIR-kaasuanalysointilaitteisto, Gaset Dx4000N

Kaasuttimesta saatu tuotekaasu sisältää pääasiassa pysyviä kaasuja CO, H₂, CO₂, CH₄ ja N₂. Kaasupitoisuuksia ja kaasunlaatua voidaan seurata mitaamalla jatkuvatoimisesti FTIR-kaasuanalysointilaitteistolla (Gaset Dx4000N) CO-, CO₂-, CH₄-, etaani- ja etyleenipitoisuudet yhdessä bentseenin kanssa. Vety- ja typpikaasut voidaan analysoida mikro-GC:n avulla. Vetyä voidaan mitata myös Dräger X-am 3000 savukaasuanalysointilaitteistolla tuotekaasun laimentamisen jälkeen, koska H₂:n mitta-alue analysointilaitteistolla voi olla enintään 0,5 til-%.

Kokonaistervan näytteenoton aikana (taulukko 3) tuotekaasua seurattiin jatkuvasti FTIR-kaasuanalysointilaitteistolla ja mitatut pitoisuudet kaasussa on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Kaasun pääkomponenttien pitoisuudet (pysyvät kaasut) FTIR-analyysin avulla mitattuna Centrian kaasuttimen tuotekaasusta (STP 0 °C, 1 atm).

Teho	H ₂ O til-%	CO ₂ til-%	CO mg/Nm ³	CH ₄ mg/Nm ³
50 %	7,0	11,0	138	9
100 %	6,3	9,4	171	11

Tyypillinen tuotekaasun koostumus ja kaasujen pitoisuudet CENTRIAN tutkimuskaasuttimesta on esitetty taulukossa 5. Kaasun koostumus mitattiin ottamalla kaasu-näyte Tedlar kaasunkeräyspussiin ja analysoimalla pussin sisältö kaasukromatografilla.

TAULUKKO 5. Tyypillinen tuotekaasun koostumus ja pitoisuudet Centrian kaasuttimesta.

Tuotekaasun komponentti	til-%	g/Nm ³ (NTP 0°C, 1 atm)
CO	15	187
H ₂	15	14
CH ₄	2.5	18
CO ₂	15	295
N ₂	50	
Muut kaasukomponentit	2.5	

Kokonaistervan näytteenoton aikana (taulukko 3) polttomoottorin (IC-moottori) päästöjä seurattiin jatkuvasti mittaamalla O₂, CO₂, CO, NO_x-ja SO₂-pitoisuuksia savukaasusta. Jatkuva päästöjen mittaus kuivista savukaasuista, perustui paramagnetismiin (O₂), IR-absorptioon (CO, CO₂), UV-fluoresenssiin (SO₂) ja kemiluminesenssi-menetelmään (NO_x). Tulokset päästömittauksista arvioitujen virherajojen kanssa on esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Savukaasuyhdisteiden koostumus ja pitoisuudet virherajoihin.

Mitattu savukaasun komponentti	Mitattu savukaasun koostumus	Pitoisuus (kuiva, STP: 0°C, 1 atm)
O ₂	0.4 ±0.04 vol%	-
CO ₂	17±2 vol%	-
CO	568±63 ppm	170 ±19 mg/Nm ³
SO ₂	8±1 ppm	25 ±4 mg/Nm ³
NO _x	162±37 ppm	332 ±37 mg/Nm ³



KUVA 8. IC-kaasumoottorin päästömittaus.

LÄHTEET

- Elliott, DC. "Relation of reaction time and temperature to chemical composition of pyrolysis oils." *Proceedings of the ACS symposium series 376, pyrolysis oils from biomass*. 1988.
- Li C., Suzuki K. "Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification—An overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009: 594–604.
- Neeft, J.P.A. "Rationale for setup of impinger train as used in the Technical Specification of Sampling and Analysis of Tar and Particles in the Product Gases of Biomass Gasification." *Technical background document CEN BT/TF 143. Organic contaminants("tar")*. January 2005. <http://www.tar-web.net/>.
- Neeft J., Knoef H., Onaji P. J. Neeft, H. Knoef, P. Onaji, "Behaviour of Tar in Biomass Gasification Systems, Tar Related Problems and Their Solutions". Report No. 9919, Energy from Waste and Biomass, 1999.
- Neeft, J.P.A., "Rationale for setup of impinger train as used in the Technical Specification of Sampling and Analysis of Tar and Particles in the Product Gases of Biomass Gasification." *Technical background document CEN BT/TF 143 "Organic contaminants ("tar")*, 1999.
- Reinikainen, M. "Synthesis Gas Characterization at VTT laboratories and test facilities." VTT Finland , 2009.
- Stålberg P., et al. "Sampling of contaminants from product gases of biomass gasifiers", *VTT Research Notes 1903*. Technical Research Center of Finland, 1998.

KAASUTUSTEKNOLOGIAN TULEVAISUUS

Jukka Konttinen
Jyväskylän yliopisto

Biomassan leijukerroskaasutusta on tutkittu Suomessa ainakin 30 vuotta (Salo, 2009). 1990-luvun alkupuolella kaasutusteknologia oli Suomessa kiinnostava sähkön- ja lämmöntuotannossa (CHP). Puhuttiin ns. IGCC-teknologiasta (Integrated Gasification Combined Cycle), eli teknologiasta, jossa biomassa raaka-aine kaasutetaan korkeassa paineessa ja lämpötilassa, kaasu puhdistetaan ja johdetaan kombivoimalaitokselle. Kombivoimalaitos käsittää kaasu- ja höyryturbiinin sekä jätelämpökattilan yhdistelmän. (Kurkela, 2006). Suomessa oli kaksi kaupallisen kokoluokan Biomassa-IGCC demonstraatiohankettakin, mutta kumpikaan ei edennyt toteutukseen. Samoihin aikoihin kilpailevien energiantuotantomuotojen, kuten öljyn ja maakaasun, hinta teki kiinteisiin polttoaineisiin liittyvistä voimalaitosinvestoinneista epäkiinnostavia. Lisäksi voidaan todeta, etteivät asiakaina olleet metsäyhtiöt, isoista julkisista investointituista huolimatta, olleet sittenkään tarpeeksi halukkaita ottamaan riskiä kehittää IGCC-teknologiaa sellutehtaan yhteyteen.

IGCC-teknologioita kehitettiin myös fossiilisille raaka-aineille (kivihiihi, öljy).

2000-luvun loppupuolta kohti fossiilisen raakaöljyn saatavuus ja hintaepävarmuus, kasvihuonekaasupäästöt sekä metsäteollisuuden tarve kehittää paperille ja kartongille vaihtoehtoisia tuotteita ovat tehneet biomassan kaasutukseen perustuvan biojalostamon kiinnostavaksi. Käytännössä kaikilla isoilla suomalaisilla metsäyhtiöillä, kuten UPM Kymmene Oy, Stora Enso Oy sekä Metsäliitto on omat biojalostamohankkeensa kaupallistamisvaiheessa. Mukana ovat myös Neste Oil Oy sekä Vapo Oy. (Kurkela, 2009) Ko. hankkeissa pyritään demonstroimaan biomassan paineistettu kaasutus, kaasun puhdistus sekä saadun synteesikaasun prosessointi biopolttonesteiksi katalyyttisesti. Polttonesteistä kiinnostavin on biodiesel,

perustuen todennäköisesti siihen, että synteettinen dieseltuotanto on demonstroitua teknologiaa.

Biodieselin vaihtoehtoisia katalyyttisiä kaasutuksen synteetikaasun prosessoiteja on kehitteillä. Esimerkiksi Ruotsissa rakennetaan DME:n (Dimetyylieetteri) ja metanolin tuotanto- ja jakelulaitosta Piteåän Chemrec-yhtiön toimesta. Taustatoimijana mukana on autovalmistaja Volvo. (Gebart, 2011) Biomassan kaasutukseen perustuvia biopolttonesteiden demonstraatiolaitoksia on myös kehitteillä Pohjoismaiden lisäksi Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. (Bacovsky, 2009) Toimivista kaasutuslaitoksista voidaan mainita REPOTEC-prosessi Itävallassa. Laitos perustuu sähkön ja lämmön tuotantoon biomassan kaasutuksella, mutta tuotetun synteetikaasun prosessoinnilla on demonstroitu biodieselin sekä SNG (synteettinen maakaasu) tuotanto. SNG:tä voidaan käyttää myös liikennepolttoaineena, maakaasun tapaan. REPOTEC-teknologiaa ollaan ottamassa käyttöön isommassa mittakaavassa Ruotsissa ns. CoBiGas-projektissa. (Rauch, 2011)

Biopolttonesteiden tuotannon arvellaan lisääntyvän 3–6-kertaisesti maailmanlaajuisesti vuoden 2020 mennessä (Sohlström, 2010). Tuotannossa merkittävän osan tulee muodostamaan biomassaraaka-aineen prosessointi kaasutuksen avulla teollisessa mittakaavassa, ns. toisen sukupolven teknologiana. Etuna kaasutuksessa on, että voidaan käyttää raaka-aineita, jotka eivät haittaa ruoan tuotantoa.

Puubiomassan ja kiintoainejätteen kaasutus voi tuoda merkittäviä lisäyksiä myös CHP-tuotannossa ns. hajautetussa mittakaavassa, eli sähkön tuotannossa 10–1000 kW_e. Puhutaan ns. pien- tai mikro-CHP-teknologiasta. Kaasutukseen perustuvia laitteita on kehitteillä Pohjoismaissa sekä Keski-Euroopassa. Keskeinen osa on ns. häkäpönttö eli myötävirtakaasutin. (Konttinen, 2011) Vaikka pien-CHP ei olisikaan ratkaisu perusvoiman tuottamiseksi valtakunnan tasolla, se voi tuoda maaseutukuntiin uutta yritystoimintaa ja työpaikkoja sekä parantaa Suomen energiaomavaraisuutta ja huoltovarmuutta. Lisäksi voidaan saada uusia teknologisia vientituotteita. Pien-CHP voidaan myös yhdistää hybridiratkaisuna muihin uusiutuvan energian tuotantomuotoihin, kuten biokaasuun sekä aurinko- ja tuulivoimaloihin.

Isossa mittakaavassa Suomessa kaasutusta kaupallistetaan Lahdessa 160 MW_{th} CHP-laitoksella jätepolttoaineella. Jätteen käytöllä voidaan korvata fossiilisen kivihiilen käyttöä CHP-tuotannossa. Lahdessa on ollut vuodesta 1998 käytössä jätteen ja biomassan kaasutin kivihiilikattilan yhteydessä. (Lahti Energia, 2011). Biomassa-IGCC:n relevanssi ei ole sekään hävinnyt (Kurkela, 2006).

Kilpailevien energialähteiden hintasuhdanteiden lisäksi, biomassan kaasutusteknologian hitaaseen kaupallistumiseen ovat osaltaan vaikut-

taneet epäonnistuneet demonstraatiot. Kaikissa edellä esitetyissä kaasutukseen perustuvissa teknologiahankkeissa on vielä haasteena pitkän aikavälin korkean käytettävyyden toiminnan demonstrointi, samoin kuin kilpailukykyinen sähkön, lämmön ja biopolttonesteiden hinta. Teknologiset kehitystarpeet liittyvät erityisesti kaasun puhdistukseen.

LÄHTEET:

Bacovsky, N.: Overview on Wide Spread Implementation of 2nd Gen Bio-fuel Demonstration Plants in the World. 4th BTLtec, Graz, Itävalta, syyskuu 2009.

Gebart, R.: Swedish Research on Forest Biomass Gasification and Syngas Conversion into Second Generation Motor Fuels. Swedish-Finnish Flame Days, 2011, Piteå, Ruotsi, tammikuu 2011. http://www.ffrc.fi/FlameDays_2011/Session_4_Gasification/27gebart.pdf

Konttinen, J.: Onko jo pien-CHP:n aika? Motivan bioenergiapäivät, Varkaus, joulukuu 2010. http://www.motiva.fi/files/3765/Varkaus_Konttinen.pdf

Kurkela, E.: Biomassan ja jätteen kaasutus. Liekkipäivä 2006, Turku, tammikuu 2006. http://www.tut.fi/units/me/ener/IFRF/Liekkipaiva2006_BiomassaJateKaasutus_KURKELA.pdf

Kurkela, E.: Gasification R&D Activities in Finland. Finnish-Swedish Flame Days 2009, Naantali, tammikuu 2009. <http://www.tut.fi/units/me/ener/IFRF/FinSweFlameDays09/Kurkela.pdf>

Lahti Energia, www.roskatenergiaksi.fi. Katsottu 4.4.2011

Rauch, R.: Development of the biomass CHP Güssing to a biosyngas platform; Kraftwerk Güssing GmbH & Co KG; Austria. GREENSYNGAS workshop, Güssing, Itävalta, helmikuu 2011.

Salo, K. (Carbona Oy): Yksityinen keskustelu, 2009.

Sohlström, H.: Biorefineries – UPM and Biofuels. FOREST BIOENERGY conference, Tampere, syyskuu 2009.

KAASUTUSTEKNOLOGIA KÄYTTÄJÄN NÄKÖKULMASTA

Pentti Etelämäki

Keski-Pohjanmaan metsänomistajien liitto ry

Keski-Pohjanmaan Metsämarkkinointi Oy

Lämpöyrittäjät ja energiaosuuskunnat toimivat tyypillisimmin 0,3–2,0 MW laitospöytäkokoluokassa. Tähän saakka ne ovat keskittyneet lähes pelkästään lämmön tuottamiseen asiakkailleen. Asiakkaat ovat kustannustehokkaimmissa ratkaisuisissa laitospöytäkokoon suhteutettuna isoja ja hyvin lähellä lämmön tuotantoyksikköä ns. lyhyen putken päässä. Isommissa laitoksissa on yleensä enemmän asiakkaita, lämmönsiirtokanaalia on pitemmästi ja lämmöntuotanto on kaukolämpötyyppistä, mutta kuitenkin ns. lähienergiaa. Asiakkaat ovat pääsääntöisesti kuntia, kaupungeja, seurakuntia ja yrittäjiä. Sopimusratkaisuun lämmöntuotannosta on päädytty joko lähellä olevan koulun, teollisuushallin, kerrostalon, vanhainkodin tms. jo vesikiertoisen lämmityksen omaavan suurehkon lämmön käyttäjän takia. Polttoaineena käytetään enimmäkseen haketta, mutta turvepöytätyypissä myös turvetta. Hakkeen ja turpeen seosta käytetään erityisesti korkean lämmön kulutuksen aikana. Jotkut energiaosuuskunnat ovat sitoutuneet sopimuksessa vain puun käyttöön raaka-aineena. Kaikki energiaosuuskunnat eivät myöskään omista lämpölaitoksia, vaan ovat raaka-aineen toimittajia ja osa lisäksi lämmitystyön tekijöinä kunnan/kaupungin omistamalla laitoksilla. Energiaosuuskuntia on perustettu 1990-luvun alkupuolelta 2000-luvun alkupuolelle. Viime vuosina osuuskuntia ei ole juurikaan perustettu. Suomessa on energiaosuuskuntia kaikkiaan noin 80 kpl. Nyt on ollut selvästi havaittavissa, että pelkkään lämmöntuotantoon keskittyvät laitokset jatkavat elinkaarensa päähän olemassa olevilla laitteilla, sitten kaivataan jotain uutta. EU:n ja Suomen energiapolitiikka uusiutuvien energiamuotojen tavoitteineen ohjaa uusia investointeja energian jalostusasteen nostoon. Tässä kehityksessä CHP-laitokset ovat yhtenä ratkaisuna avainasemassa.

Lämpöyrittäjien ja energiaosuuskuntien odotukset CHP-laitoksilta ovat suuret. Teknisten ratkaisujen tulee olla toimivia, mahdollisimman yksinkertaisia ja ohjausjärjestelmältään helposti hallittavissa. Modulaarisuus olisi etu, jolloin komponentteja voitaisiin lisätä ja poistaa kuormituksen ja tarpeen mukaan. Peruskokoluokan tulisi vastata lämmöntuotannoltaan 0,3–2,0 MW lämmöntuotantotehoa ja sähkö-/kaasuteho olisi n. 50% tämän päälle. Laitteiden hyödyntämisaikasta odotetaan 3000–4000 tunnin huipun käyttöaikaa, eli esimerkiksi 0,3 MW laitoksen tulisi tuottaa vuodessa noin 600 MWh lämpöä ja noin 300 MWh sähköä/kaasua minimissään. Uuden tekniikan käyttöönotto tulisi olla joustavaa. Laitetoimittajat voisivat taata huoltovarmuuden esim. leasing-ratkaisuilla tai kattavalla huoltoverkostolla. Investoinnin takaisin maksuaika tulisi olla mieluummin lähempänä viittä vuotta kuin kymmentä vuotta.

Asiakaspotentiaalia tulee varmasti olemaan, kun puhutaan sähkön tuotannosta ja lähienergiasta. Varmaankin kaikki yli 100 000 kWh:n sähkökäyttäjät yhdistettynä lämmön tai jäähdytyksen hyötykäyttöön ovat potentiaalisia asiakkaita ja kynnys vielä laskee sähkön kallistuessa ja pieniä laitoksia suosivien kannustimien mahdollisesti toteutuessa Keski-Euroopan malliin. Lämmön tuotannon kilpailukykyä parantaa kilpailevien energiamuotojen, kuten kevyen polttoöljyn kallistuminen. Kannustimien lisäksi vaihtoehtoisesti tarjolla on vielä investointitukea ja edullista lainarahoitusta. Lähienergia on mainittu monien etujärjestöjen, mm. MTK:n, strategioissa. Pienten laitosten etu on kiistaton kuljetuksissa ja maaseudun työllistäjinä.

Puun kaasutusmenetelmä antaa mahdollisuuden monien korkeammalle jalostettujen energiatuotteiden tekemiseen ja niiden hyödyntämiseen paikallisesti. Kaasua voidaan hyödyntää monilla eri tekniikoilla mootto-reissa ja generaattoreissa. Tuotettua sähköä ja kaasua on helppo siirtää ja myydä lähialueelle. Tähän verrattuna lämmön siirto on epäedullisempää kalliin lämpökanaali-investoinnin ja lämmön siirtohävikin takia.

Perinteisessä lämmöntuotannossa pienet laitokset pääsevät vuositasolla 75–85% hyötysuhteeseen. Hyötysuhteeseen vaikuttavat laitoksen mitoitus (huipun käyttöaika), lämmön siirtoverkon pituus, polttoaineen keskimääräinen laatu, kattilan puhtaanapito ja polttoprosessin säädöt. Kesällä hyötysuhde on luonnollisesti paljon huonompi kuin talvella. Sekin on havaittu, että kaksi sarjaan liitettyä kattilaa on polttoainetehokkaampi ratkaisu kuin yksi iso, eli tehovaatimukseltaan 1 MW laitos toimii paremmalla hyötysuhteella kahdella 0,5 MW kattilalla, joista toinen on suurimman osan vuodesta kylmänä. Lämpölaitosten oman sähkökulutuksen on todettu olevan noin 1-2 % tuotetusta lämpöenergiasta, joten CHP-tuotannossa energiaosuuskuntien/ lämpöyrittäjien tuottama sähkö menisi valtaosin myyntiin.

Polttoainetehokkuus hakkeella paranee raaka-aineen kosteuden alentuessa. Tällöin myös kustannustehokkuus paranee pienempänä hakkeen menekkinä, haketus/kuljetuskuluna ja vähempien toimintahäiriöiden ansiosta. Hyvä raaka-aine lämmön tuotantoon on 30-35% kostea hake. Energiaosuuskuntien jäseniä on koulutettu tämän laatutavoitteen saavuttamiseksi jo vuosia. Olen ymmärtänyt, että CHP-tuotannossa hakkeen laatuvaatimus (kosteus) olisi samaa luokkaa.

Hallitus on laatinut velvoitepaketin, jossa uusiutuvan energian lisäykselle on määritelty tavoitteet vuoteen 2020 saakka. Tavoitteiden saavuttamiseksi on päätetty korotetuista energiaveroista fossiilisille polttoaineille ja myös turpeelle. Varsinaiset kannustimet, joihin sisältyy syöttötariffia, lämpöpreemiota, päästökauppaan sidonnaista sähköntuotantotukea, pienpuun energiatukea ym. investointeihin, lämpöjärjestelmien muuttamiseen liittyviä tukia ovat vielä lopullisesti hyväksymättä. Pieniä uusia laitoksia ja jo olemassa olevia pieniä laitoksia on esityksessä kohdeltu kaltoin laitoskorajojen ja minimituotantomäärien osalta. Keski-Euroopan mallin mukaista porrastusta syöttötariffiin ei olisi myöskään tulossa. Myös neljännesvuositarkastelu aiheuttaa spekulatiivisia ratkaisuja, jos se sellaisena säilyy.

Olisi suotavaa, että lähienergian monipuoliseen tuotantoon kannustetaan järkevillä elementeillä. Tällöin saavutetaan positiiviset vaikutukset niin työllisyyteen, tekniseen kehitykseen, bioenergian jalostukseen, metsänhoitoon, riskittömään energian tuotantoon ja pienempään ympäristön kuormitukseen.

BIOPOLTTOAINEET JA TUOTEKAASUN HYÖDYNTÄMINEN

TULEVAISUUDEN BIOPOLTTOAINEET

Kirsi Partanen¹, Ulla Lassi^{1,2}

¹Oulun Yliopisto, Kemian laitos, ²Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

JOHDANTO

Energiatarpeen on arvioitu kasvavan yli 50 % vuoteen 2025 mennessä, mikäli kasvu jatkuu nykyistä tahtia. Energiankäytön kasvu johtuu suurelta osin nopeasti kehittyvien maiden kasvavasta kulutuksesta. Fossiilisten polttoaineiden väheneminen ja niiden odotettavissa oleva maailmanmarkkinahinnan jatkuva nousu ovat saaneet yritykset, tutkimuslaitokset ja poliittiset päättäjät etsimään vaihtoehtoisia ratkaisuja liikenteessä käytettävien fossiilisten polttoaineiden rinnalle.

EU Direktiivi (Direktiivi 2003/30/EU) asettaa tavoitteet biopolttoaineiden käytön lisäämiseksi Euroopan Unionin alueella. Direktiivin tavoitteiden mukaisesti biopolttoaineiden osuuden liikenteen polttoaineista tulisi olla 2 % vuoden 2005 loppuun mennessä ja 5,75 % vuoden 2010 loppuun mennessä. Monet valtiot, Suomi mukaan lukien, eivät ole toistaiseksi pystyneet vastaamaan tavoitteisiin.

Biopolttoainekeskusteluissa, -tutkimuksessa ja biopolttoaineiden tuotannossa on tähän mennessä keskitytty pääasiassa bioetanolin ja biodieselin (etterit) valmistukseen. Kuitenkin etanolin energiatiheys nykyisiin fossiilisiin polttoaineisiin (benssiini, diesel) verrattuna on huomattavasti alhaisempi. Tämän vuoksi on tärkeä tutkia myös muita mahdollisia liikenteen polttoaineeksi sopivia orgaanisia yhdisteitä, kuten butanolia, pentaanolia sekä furfuraali- ja furaaniyhdisteitä.

Butanolin edut polttoaineena etanoliin verrattuna ovat huomattavat. Arviolta noin 0,7 litraa butanolia vastaa energiatihedeltään yhtä litraa etanolia. Lisäksi butanolilla on parempi ilma-polttoainesuhde (engl. air-to-fuel -ratio) ja se soveltuu säädön jälkeen käytettäväksi nykyisissä bensiinimoottoreissa. Ongelmana butanolin valmistukselle on ollut tähän asti

alhainen saanto, etenkin valmistettaessa butanolia biopohjaisista raaka-aineista.

5-Hydroksimetyylifurfuraalia on aiemmin tuotettu tehokkaasti ainoastaan fruktoosista, mutta ionisten liuottimien ja katalyyttien avulla sen valmistaminen onnistuu tehokkaasti myös glukoosista. 2,5-dimetyylifuraanilla on 40 % korkeampi energiatiheys kuin etanolilla. Tämän vuoksi furfuraalin valmistus on mielenkiintoinen vaihtoehto biopolttoaineiden valmistuksessa ja se tuo uutta näkökulmaa biomassan hyödyntämismahdollisuuksiin.

LIIKENTEEN POLTTOAINEET

Yleisimpinä liikenteen polttoaineina käytetään fossiilisia polttoaineita, joita ovat bensiini ja diesel. Niitä kulutetaan maailmanlaajuisesti lähes viisi biljoonaa litraa vuodessa. Maailman autoista 97 % käyttää energialähteenään fossiilisia polttoaineita. Vaihtoehtoisia polttoaineita käytetään toisittaiseksi vain 3 % ja näistä 1-2 % on valmistettu uusiutuvista energialähteistä.

Ajoneuvojen polttoaineiden öljyriippuvuutta voidaan vähentää kehittämällä vaihtoehtoisia ja uusiutuvia polttoaineita tai kehittämällä ajoneuvoja ja moottoreita, jotka voivat hyödyntää entistä monipuolisemmin erilaisia energialähteitä. Vaihtoehtoisina liikenteen polttoaineina käytetään tai suunnitellaan käytettäväksi biodieseliä, maa- ja biokaasua, nestekaasua, alkoholeja, kuten metanolia, etanolia ja butanolia, furfuraalijohdannaisia sekä vetyä.

Nestemäisten ja kaasumaisten polttoaineiden ohella muina energialähteinä tutkitaan esim. litiumioniakulla toimivia sähköautoja. Näistä ensimmäiset sovellukset ovat jo markkinoilla ja lähes jokaisella ajoneuvovalmistajalla on jo olemassa hybridiajoneuvokonsepti. Sähköautoilla vähennetään riippuvuutta nestemäisistä polttoaineista. On kuitenkin hyvä muistaa, että myös sähköautojen akkujen tarvitsema energia tulee tuottaa. Se, miten energia tuotetaan, määrää pitkälti näiden ajoneuvojen ”ekologisuuden”.

Liikenteen polttoaineiden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia

Taulukossa 1 on esitetty bensiinin, dieselin ja alkoholipolttoaineiden kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia. Yleisimmin käytetyn etanolin energiatiheys on huomattavasti alhaisempi, kuin esimerkiksi butanolin ja 2,5-di-

metyylifuraanin (DMF). Etanolibensiiniseoksen kokonaisenergiämäärä ei kuitenkaan laske merkittävästi muihin polttoaineseoksiin verrattuna, koska Suomessa suurin sallittu etanolipitoisuus tällä hetkellä on ainoastaan 10 –tilavuus % (E10 bensiini).

TAULUKKO 1. Bensiinin, dieselin ja alkoholipolttoaineiden kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia.
(Gautam et al. 2000)

Poltto- aine	Energia tiheys (MJ/L)	RON*	MON**	Vesiliu- koisuus (%)	Ilma-poltto- ainesuhde	Viskosi- teetti, (20°C)
Bensiini	32	91–99	81–89	mitätön	14.6	0.4–0.8
Diesel	35.5	-	-	mitätön	(60–100 joutok.) 14.7	4 (40°C)
n-Penta- noli	27.8	Alhai- nen	Alhainen	0	11.68	-
n-Butanoli	29.2	96	78	7	11.12	3.64
Etanoli	19.6	130	96	100	8.94	1.52
Metanoli	16	136	104	100	6.43	0.64
2,5-di- metyyli- furaani	30	119		2.3	-	-

* RON = Oktaaniluku mitattuna kierrosnopeudella 600 rpm (Research Octane Number)

** MON = Oktaaniluku mitattuna kierrosnopeudella 900 rpm (Motor Octane Number)

EU:n biopolttoaineita koskevaa lainsäädäntöä

Liikenteen biopolttoaineiden ominaisuuksia ja eri aineiden pitoisuuksia on säädelty Euroopan unionissa yhtenevillä säädöksillä. Eurooppalainen polttoainedirektiivi (2003) ja EN 228 -laatustandardi (European Standard, En 228:2004) sallivat biopolttoaineiden happipitoisuudeksi korkeintaan 3,7 massa- %, joten alkoholit ja furaanit eivät sovellu liikenteen biopolttoaineiksi sellaisenaan, vaan usein biopolttoaineet ovatkin eri aineita sisältäviä seoksia. Myös E85-polttoaine, jossa etanolipitoisuus on tavanomaista suurempi, suositellaan käytettäväksi varta vasten tälle polttoaineelle tarkoitettussa bensiinimoottoreissa. Taulukossa 2 on eurooppalaisen polttoainedirektiivin eri ominaisuuksille määrittämiä enimmäisarja-arvoja.

TAULUKKO 2. Euroopan polttoainedirektiivin eri parametreja ja niiden enimmäisraja-arvoja listattuna.
(Eurooppalainen polttoainedirektiivi 2003)

Ominaisuudet	Yksikkö	Enimmäisraja-arvo
Höyrynpaine, kesäkausi*	kPa	60,0**
Olefiinit	tilavuus- %	18,0
Aromaattiset aineet	tilavuus- %	35,0
Bentseeni	tilavuus- %	1,0
Happipitoisuus	massa- %	3,7
Metanoli	tilavuus- %	3,0
Etanoli	tilavuus- %	10,0
Eetterit (mm.DMF)	tilavuus- %	22,0
Muut hapettimet	tilavuus- %	15,0

*)Alkaa viimeistään 1.5. ja päättyy aikaisintaan 30.9. Jäsenvaltiot, joissa arktiset tai ankarat talviolosuhteet, alkaa viimeistään 1.6. ja päättyy aikaisintaan 31.8.

**)Valtiot, joissa ankarat talviolosuhteet, kesäkauden aikana enintään 70 kPa.

Biopolttoaineiden valmistamisessa on huomioitava myös esimerkiksi polttoaineseoksen hapetuksen kestävyys, koska säilytettäessä polttoaineet voivat joutua kosketuksiin ilman hapen kanssa. Hapetuksessa voi syntyä sakkaumia, jotka voivat tukkia auton moottorin polttoainesuodattimia. Turvallisuussyistä myös esimerkiksi biopolttoaineiden leimahduspiste ei saa olla alle 55 °C. (Motiva 2006)

Euroopan parlamentti on hyväksynyt direktiivin uusiutuvan energian käytöstä (COM(2008) 19) joulukuussa 2008. Sen mukaan vuoteen 2020 mennessä tulisi uusiutuvan energian osuus energian kulutuksesta olla 20 %. Biopolttoaineiden raaka-aineina tulisi suosia orgaanisia jätemateriaaleja, non-food biomassoja ja lignoselluloosaa, kuten selluteollisuuden jäteliemiä. Jos biopolttoaineen valmistuksessa tarvittava raaka-aine saadaan tuotettua maaperästä, joka on ruoan tuottamiseen sopimatonta, voidaan siitä antaa bonusta hiilidioksidipäästörajoituksille. Uusiutuvan energian käyttöä koskevassa direktiivissä asetetaan lisäksi kullekin jäsenvaltiolle kansalliset kokonaistavoitteet.

Biomassojen hyödyntäminen polttoainetuotannossa

Biopolttoaineiden valmistuksessa on perinteisesti käytetty ruoaksi soveltuvia biomassoja ja näiden viljelmien tieltä ruoan tuotantoa on vähennetty maailmanlaajuisesti. Biopolttoaineiden valmistuksen kustannusrakenne on myös kääntänyt tutkimuksen suuntaa soveltuviin jäännösbiomassoi-

hin ja yhdyskuntajättemateriaaleihin. Suomessa biopolttoaineiden valmistuksessa voidaan hyödyntää metsäteollisuuden jäännöslieitteitä, joilla on yleensä korkea selluloosa- ja energiapitoisuus, sekä elintarviketeollisuuden jätteitä, kuten heraa ja perunan kuoria.

Jäännösbiomassat ovat ongelmallisia hyödyntää biopolttoaineiden tuotannossa, koska ne sisältävät usein paljon erilaisia fragmentteja ja käsitteystä jääneitä kemikaaleja. Nämä seikat hidastavat ja häiritsevät valmistusprosessia. Jäännösmateriaalit on käsiteltävä ympäristölle edullisella tavalla, jotta niiden hyödyntäminen olisi ekologista. Jäännösbiomassoilla on korkea energiasisältö, jolloin ne soveltuvat hyvin esimerkiksi kaasutukseen (Sricharoenchaikul et al, 2002). Kaasutettaessa biomassan esikäsitelyn tarve vähenee, mutta kaasun puhdistaminen on välttämätöntä.

ALKOHOLIT LIIKENTEEN POLTTOAINEINA

Alkoholipohjaisia polttoaineita voidaan käyttää korvaamaan fossiilisia polttoaineita polttomooottoreissa ja -kennoissa. Alkoholeista käytetään polttoaineina tai niiden komponentteina metanolia, etanolia, propanolia ja butanolia. Useita pitkäketjuisia alkoholeja voitaisiin käyttää polttoaineina niiden kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksien puolesta, mutta toistaiseksi niiden valmistaminen tähän tarkoitukseen ei ole kaupallisesti kannattavaa. Etanolin käyttö on laajinta sen alhaisen toksisuuden ja yleisesti tunnettujen valmistusmenetelmien ansiosta (Minteer, 2006).

Etanoli liikenteen polttoaineena

Bioetanoli on yleisimmin käytetty alkoholipohjainen liikenteen polttoaine. Sitä käytetään yleensä seoksena bensiinin kanssa. Etanolin tehottomuutta on kritisoitu paljon, mutta sen käyttö ja valmistus polttoaineeksi tunnetaan hyvin. Etanolin tuotanto on aiheuttanut huomattavia ympäristöhaittoja esimerkiksi Etelä-Amerikassa, jossa biopolttoainetiljelmien vuoksi on hävitetty paljon arvokkaita sademetsiä.

Butanoli liikenteen polttoaineena

n-Butanoli on yksiarvoinen alkoholi. Se soveltuu joko sellaisenaan tai moottorin säätämällä nykyisten bensiinikäyttöisten autojen moottoreihin polttoaineeksi fossiilisten polttoaineiden rinnalla tai yksistään (Ramey et al, 2000). Butanolin korkeiden valmistuskustannusten vuoksi sen kau-

palliset markkinat löytyvät kuitenkin toistaiseksi teollisista kemikaali- ja liuotinmarkkinoista (Ramey et al, 2000). Butanolin etuna on alhainen liukoisuus veteen, joka pienentää haittavaikutuksia, mikäli butanolia pääsee kulkeutumaan pohjaveteen. Lisäksi butanolilla on alhainen höyrynpaine, jolloin butanolin jakelu ja tankkaaminen onnistuvat nykyisiä jakeluverkostoja käyttäen.

Muut alkoholit

Raskaampien alkoholien käyttö liikenteen polttoaineena on vaihtoehto etanolille korkeamman energiatihedden ja alhaisen vesiliukoisuuden vuoksi. Haaraketjuisilla alkoholeilla on korkeammat oktaaniluvut verrattuna saman hiilimäärän omaaviin suoraketjuisiin alkoholeihin (Minteer 2006). Haaraketjuisia alkoholeja ei voida toistaiseksi syntetisoida tarpeeksi taloudellisesti luonnon mikro-organismeja käyttämällä.

Metanolia ei ole tutkittu liikenteen polttoaineena yhtä paljon kuin etanolia. Metanolitutkimus on keskittynyt lähinnä kaasufaasisynteesiin ja metanolin käyttöön polttokennosovellutuksissa. Metanolia käytetään toistaiseksi lähinnä muiden polttoaineiden raaka- ja lisäaineena, esim. dimeylieetterin valmistuksessa (Minteer 2006).

Furaanit ja furfuraalit liikenteen polttoaineina

Furfuraalit ja furaanit on nostettu biopolttoainekeskustelussa vaihtoehtoiksi, koska niiden valmistaminen sokereista onnistuu kohtuullisen hyvin tunnetuilla menetelmillä. Lisäksi niillä on polttoaineiksi hyviä ominaisuuksia. Esimerkiksi 2,5-dimetyylifuraanin (DMF) energiatiheys on noin 40 % etanolia suurempi (Hadlington 2007; Zhao et al, 2007; Román-Leshkov et al., 2007). 2,5-DMF:n valmistaminen on tapahtunut aiemmin lähinnä fruktoosista, mutta uudet menetelmät mahdollistavat myös glukoosin hyödyntämisen raaka-aineena (Zhao et al, 2007). Tämä mahdollistaa esim. metsäteollisuuden selluloosapitoisten jäännösbiomassojen hyödyntämisen.

ALKOHOLIEN VALMISTAMINEN

Alkoholeja valmistetaan yleisimmin fermentoimalla sokereita entsyymikatalyytin avulla. Katalyyttisiä menetelmiä, joissa biomassaa kaasutetaan

ensin synteesikaasuksi, kehitetään paljon ja ensimmäisiä kaupallisia laitosia on jo mm. Amerikassa.

Entsyymikatalyyttinen valmistus

Alkoholien, erityisesti etanolin, valmistaminen entsyymikatalyytin avulla tunnetaan hyvin. Sokerien luontaista käymiskykyä on hyödynnetty pitkään erilaisten alkoholijuomien valmistamisessa. Tunnetuin menetelmä on valmistaa etanolia sokeripohjaisesta raaka-aineesta *Saccharomyces cerevisiae* -entsyymin eli hiivan avulla (Glazer et al, 1995; Helle et al., 2004; Lawford et al, 2002).

Etanolin valmistaminen

Hiiva käyttää sokeria energialähteenään (hiililähde). Tällöin tapahtuu anaerobinen (hapeton) käymisreaktio. Kemiallisesti kyse on hapetuspelkistysreaktiosta, jossa ei tapahdu nettopelkistymistä tai hapettumista. Käymisen lopputuotteena syntyy yhdisteitä, jotka solu erittää ympäristöönsä. Etanoli erotetaan vesipohjaisesta liuoksesta tislamalla. Kaikkea vettä ei saada näin pois, vaan lisäksi voidaan joutua käyttämään erilaisia kuivauskemikaaleja.

Butanolin valmistaminen

Butanolin valmistamisessa käytetään eri *Clostridium*-suvun bakteereita. Butanolin valmistaminen tapahtuu kolmessa vaiheessa. Ensimmäinen vaihe on ns. asidogeeninen vaihe, jossa pH on neutraali ja prosessivaiheen tuotteina saadaan etikka- ja voihappoa. Toinen vaihe on ns. Solventogeeninen vaihe, joka tehdään alhaisessa pH:ssa (noin 4,3–4,4). Toisen vaiheen tuotteina saadaan asetonia, butanolia ja etanolia. Kolmas vaihe on ns. alkogeeninen vaihe, jolloin tuotteet (butanoli, asetoni ja etanoli) erotetaan toisistaan.

Katalyyttinen valmistus

Katalyyttiset menetelmät ovat varsin yleisiä raakaöljyn käsittelyssä. Tällöin reaktiolämpötilat voivat olla useita satoja asteita ja reaktiot tapahtuvat kaasu-kiintoainerajapinnoilla. Biomassan terminen stabiilisuus on huomattavasti alhaisempi kuin raakaöljyllä. Tällöin biomassan käsittely-

prosessien tulisi tapahtua nestefaasissa tai alhaisessa lämpötilassa kaasufaasissa, mikäli biomassan hajoaminen synteetikaasuksi halutaan estää. Tällöin prosessit ovat hitaampia ja tarvittavat reaktoritilavuudet suurempia (Klass et al., 2004).

Maailmalla on jo kehitetty ensimmäisiä kaupallisia laitoksia, joissa valmistetaan biopolttoaineita biomassaa kaasuttamalla ja konvertoimalla kaasua katalyyttisesti biopolttoaineiksi. Näitä yhtiöitä ovat mm. Choren, Coscata ja Range Fuels. Yhtiöt valmistavat lähinnä etanolia ja alkaaneja (Klass et al., 2004). Kaasutusmenetelmät eivät ole toistaiseksi tarpeeksi selektiivisiä pidempiketjuisten alkoholien ja alkaanien tuotantoon (Lin et al., 2009). Tunnetuimmat prosessit ovat metanolisynteesi ja Fischer-Tropsch-synteesi. Biomassan konvertoimisessa synteetikaasuksi tarvitaan useita osavaiheita, joita ovat biomassan kaasutus, kaasun puhdistus, (useimmisissa tapauksissa vesikaasun siirtoyksikkö) ja synteetikaasun muuntaminen (Klass et al., 2004)..

YHTEENVETO

Sokereiden muuntaminen liikenteen biopolttoaineiksi vaatii vielä paljon tutkimista ja kehitystyötä. Etanolin fermentointi tunnetaan hyvin, mutta vaihtoehtoisia menetelmiä tarvitaan. Butanolin ja furaanien ominaisuudet liikenteen polttoaineina ovat monin osin paremmat kuin etanolilla. Niiden valmistusmenetelmät eivät ole vielä taloudellisesti kannattavia tähän tarkoitukseen.

Menetelmäkehityksen onnistumisesta riippuu, valmistetaanko biopolttoaineita tulevaisuudessa fermentoimalla, kaasuttamalla vai ionisten liuottimien ja metallikatalyyttien avulla.

LÄHTEET

Direktiivi 2003/30/EU. Official journal of the European Union, L123/42, 17.5.2003, DIRECTIVE 2003/30/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, "on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport", lähdetieto 25.8.2009, http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/en_final.pdf

- Direktiivi COM(2008)19. Euroopan yhteisöjen komissio, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi, "Uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä", Renewable Energy Directive (COM (2008) 19), 24.8.2009, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0019:FIN:FI:PDF>
- Eurooppalainen polttoainedirektiivi 2003. Euroopan unionin virallinen lehti L 76/10, 22.3.2003, Luettavissa verkossa 29.3.2010, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:076:0010:0019:FI:PDF>
- European standard, En 228:2004, Automobile fuels – Unleaded petrol – Requirements and test methods, Luettavissa verkossa, 29.3.2010: http://www.aspen.se/Files/Technology/standards/EN%20228%20vers%202008_07_II_.pdf
- Gautam, M., Martin II, D.W., Proc. Inst. Mech. Engrs, 2000, 214 A, 497
- Glazer, A.N. ja Nikaido, H.; Microbial Biotechnology: Fundamentals of Applied Microbiology, W.H. Freeman and Company. USA, 1995, 327–358
- Hadlington S. Chemistry World, news, 2007
- Helle, S.S., Murray, A., Lam, J., Cameron, D.R., Duff, S.J.B, Bioresour. Technol. 2004, 92, 163
- Klass, D.L, in Encyclopedia of Energy, ed. C.J. Cleveland, Elsevier, London, 2004, 193-212
- Lawford, H.G., Rosseau, J.D., Appl. Biochem. Biotechnol., 2002, 98-100, 429
- Lin, Y-C, Huber, G.W., Energy and Environmental Science, 2009, 2, 68
- Minteer, S., Alcoholic fuels, 1st edition, CRC Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006, 1-3
- Motiva 2006. Vaihtoehtoiset polttoaineet ja ajoneuvot – opas, Motiva, 2006, Luettavissa verkossa 29.3.2010: http://www.motiva.fi/files/2131/Vaihtoehtoiset_polttoaineet_ja_ajoneuvot.pdf
- Ramey, D., Yang, S-T, Production of Buturic Acid from Biomass, Final Report, for U.S. Department of Energy, Morgantown, WV, 2000
- Román-Leshkov, Y., Barrett, C.J., Liu, Z.Y., Dumesic, J.A. Nature, 2007, 447, 982
- Sricharoenchaikul, V., Agrawal, P., Frederick, W.J., Jr., Ind. Eng. Chem. Res. 2002, 41, 5640
- Zhao, H., Holladay, J.E., Brown, H., Zhang, Z.C. Sciencemag., 2007, 316, 1597

SYNTEESIKAASUSTA UUSIA KEMIAN TUOTTEITA JA SOVELLUKSIA

Henrik Romar¹, Pekka Tynjälä^{1,2}, Riikka Lahti^{1,2}
Kokkolan yliopistokeskus Chydenius; Oulun yliopisto, Kemian laitos

BIOMASSAPOHJAJAISIA BIOPOLTTOAINEITA

Biomassa on uusiutuva raaka-aine, jolla on hyvät edellytykset biopolttoainetuotannossa. Termisen käsittelyn (kaasutus) avulla voidaan muuttaa biomassa kaasuksi, jota voidaan käyttää polttoaine- ja kemikaalituotannossa. Tänä päivänä fossiilisten polttoaineiden tilalle kehitettävien uusien biomassapohjaisten polttoaineiden tutkimus on erittäin aktiivista. Sekä maailmanlaajuisesti että myös EU:ssa on asetettu tavoitteeksi kasvattaa biopolttoaineiden käyttöä. EU:n tavoitteena on kasvattaa biopolttoaineiden osuus 5,75 %:sta (2010) 10 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Vielä vuonna 2009 biopolttoaineiden osuus oli vain 1,4 %.

ENSIMMÄISEN JA TOISEN SUKUPOLVEN BIOPOLTTOAINEET

Biopolttoaineet jaetaan ensimmäisen ja toisen sukupolven polttoaineisiin riippuen lähtöaineesta, jota on käytetty polttoainetuotannossa. Ensimmäisen sukupolven polttoaineiden raaka-aineet ovat mm. vehnä, maissi, soke-riruoko, joita käytetään myös elintarvikkeina (ks. taulukko 1).

TAULUKKO 1. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet.

Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet			
Polttoaine	Nimitys	Raaka-aine	Prosessi
Bioetanoli	Perinteinen bioetanoli	Sokeriruoko, juurikas, vehnä, maissi	Hydrolyysi + fermentointi
Kasviöljy	Puhdas kasviöljy	Rapsi, rypsi	Kylmäpuristus Uuttaminen
Biodiesel	RME (rapsiöljymetyyliesteri) FAME (rasvahappometyyliesteri)	Rapsi, rypsi	Kylmäpuristus Uuttaminen Vaihtoesteröinti
Biodiesel	Jäte-biodiesel	Jäterasvat ja -öljyt, eläinrasvat	Vaihtoesteröinti
Biokaasu	Paranneltu biokaasu	(Märkä) biomassa	Metabolia
Bio-ETBE		Bioetanoli	Kemiallinen synteesi

Toisen sukupolven biopolttoaineiden (ks. taulukko 2) raaka-aineena käytetään pääasiassa lignoselluloosapitoista jättemateriaalia, kuten hakkuujätettä, maatalousjätettä ja erityisiä viljeltyjä energiakasveja kuten ruokohelpeä. Jossain määrin käytetään myös elintarvikettä, kuten täkkelyspitoisia perunajätettä. Ideana toisen sukupolven polttoaineissa on, että raaka-aineena käytetyt ylijäämä- ja jättemateriaalit eivät kilpaile elintarviketuotannon kanssa. Koska raaka-aine koostuu usein lignoselluloosasta, vaatii se kovempaa esikäsittelyä. Raaka-aineen pilkkomiseen sokereiksi käytettyjä menetelmiä ovat entsymaattinen hydrolyysi ja happohydrolyysi, jolloin vapautetut sokerit voidaan käymisen (fermentoinnin) avulla muuttaa alkoholeiksi. Myös suoraan kaasuttamalla biomassa tuotekaasuksi (vety, hiilimonoksidi) ja puhdistamalla kaasua saadaan tuotettua biopolttoaineita.

TAULUKKO 2. Toisen sukupolven biopolttoaineet.

Toisen sukupolven biopolttoaineet			
Polttoaineet	Nimitys	Raaka-aine	Prosessi
Bioetanoli	Selluloosapohjainen bioetanoli	Lignoselluloosa	Edistyksellinen hydrolyysi + fermentointi
Synteettinen biopolttoaine	Biomass-to-liquid (BTL) Fischer-Tropsch diesel Biometanoli Seosalkoholit Bio-dimetyylieetteri (Bio-DME)	Lignoselluloosa	Kaasutus + katalyyttinen synteesi
Biodiesel	Vetykäsitelty biodiesel	Kasviöljyt Eläinrasvat	Vedytys
Biokaasu	SNG (synteettinen maakaasu)	Lignoselluloosa	Kaasutus + synteesi
Biojäte	Biojäte	Lignoselluloosa	Kaasutus + synteesi tai Biologinen prosessi

MITÄ VALMISTUSMENETELMIÄ TULEVAISUUDESSA KÄYTETÄÄN?

Kun uusi biopolttoaine tuodaan markkinoille, joita hallitsevat fossiiliset polttoaineet, on laajamittaisessa polttoainetuotannossa arvioitava koko prosessi eri näkökulmista. Tärkeimmät neljä arviointikriteeriä ovat tehokkuus, taloudellisuus, ympäristövaikutukset ja käyttötarkoitus. Muita huomioitavia näkökohtia ovat:

1. Polttoaine on tuotettu kaasutusprosessin kautta, jossa materiaalina voidaan käyttää erityyppisiä biomassoja kuten maatalous- ja yhdyskuntajätettä
2. Valmistusprosessi mahdollistaa joustavan tuotannon sekä biopohjaisesta että fossiilisesta raaka-aineesta
3. Polttoaineen jakeluun soveltuu olemassaoleva jakelujärjestelmä
4. Biopolttoaine sekoittuu nykyisten polttoaineiden kanssa
5. Polttoaineen energiatiheys on suuri

6. Polttoainetta voidaan helposti käyttää polttokennoissa
 7. Tehokas hyötysuhde koko tuotantoketjussa*
 8. Polttoaineen tuotantolla ja käytöllä on mahdollisimman vähän haitallisia vaikutuksia ympäristölle
 9. Polttoaineen hinta on alhainen, alhaisempi tai vain hieman korkeampi kuin vastaavan fossiilisen polttoaineen
 10. Polttoaineen tuotannossa käytetään edistyneitä teknologioita
- * (englanniksi well-to-wheel) tarkoittaa, että kaikki tärkeät vaiheet polttoaineketjussa on otettu huomioon, kuten raaka-aineen viljely, korjuu, kuljetus polttoainetehtaaseen, polttoainejakelu asemille ja kulutus ajoneuvossa

BIOPOLTTOAINEITA SYNTEESIKAASUSTA

Biomassan kaasutuksessa muodostuu nk. synteetikaasua (Bio-SNG, biosynteettinen maakaasu). Synteetikaasu koostuu pääosin vedystä (H_2) ja hiilimonoksidista (CO), mutta sisältää myös pieniä määriä epäpuhtauksia, kuten rikkiyhdisteitä ja tervoja.

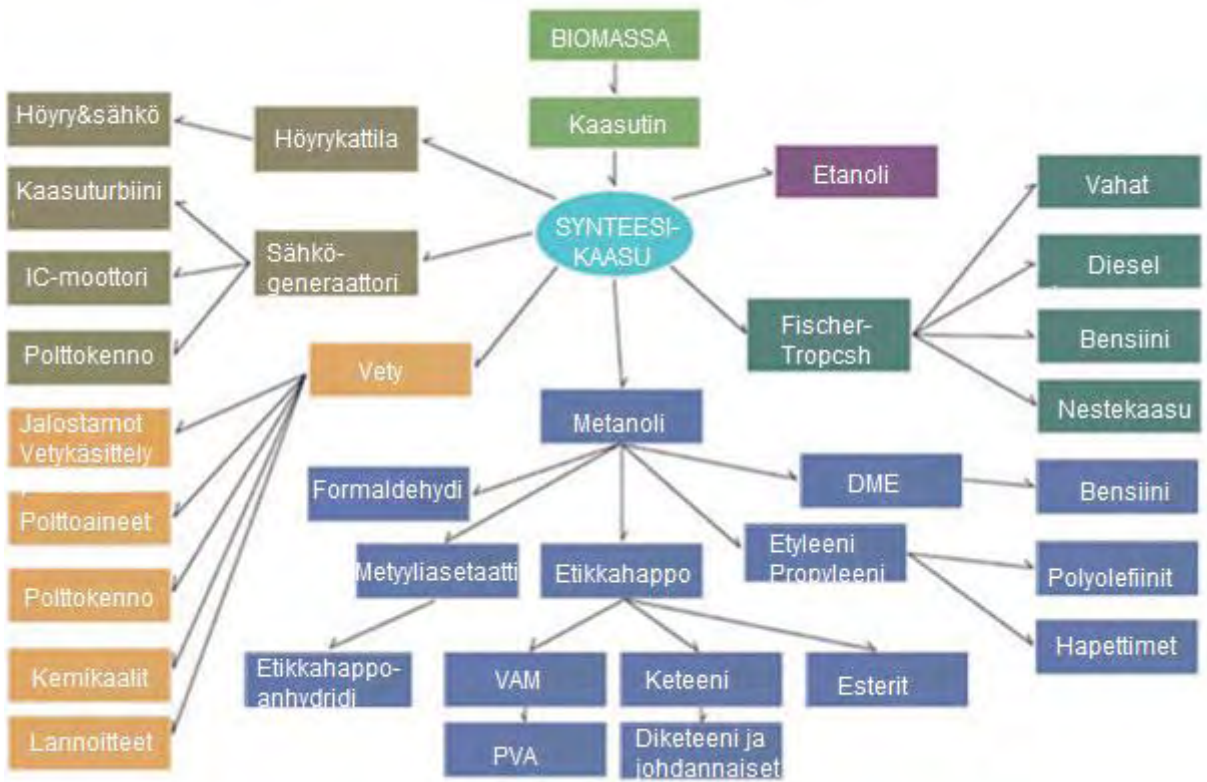
Synteetikaasulla on monia käyttösovelluksia:

- Suora energiantuotanto polttamalla
- Vetyä voidaan käyttää sellaisenaan tai kemikaalituotannossa
- Katalyyttisen käsittelyn (Fischer-Tropsch -synteesi) avulla voidaan tuottaa orgaanisia yhdisteitä bensiinistä biodieseliin ja vahoihin

Myös metanolisynteessin avulla voidaan tuottaa polttoaineita kuten dimetyylieetteriä (DME) ja muita kemikaaleja.

TUOTEKAASUN PUHDISTUS SYNTEESIKAASUKSI

Biomassan kaasutuksessa syntyy pääasiassa vetyä ja hiilimonoksidia (H_2 ja CO), sekä useita muita kemiallisia yhdisteitä. Suuri osa näistä yhdisteistä on ei-toivottuja. Syntyvien komponenttien laatu ja määrä riippuvat useasta tekijästä, kuten raaka-aineesta, kaasutustekniikasta ja kaasutuksen lämpötilasta. Yleisesti ottaen, mitä korkeampi kaasutuslämpötila on, sitä vähemmän haitallisia yhdisteitä syntyy. Jos kaasu puhdistetaan synteetikaasuksi, jolla on tiukat käyttörajat, kaasun puhdistuskustannukset voivat olla korkeat, jopa 50 % kokonaiskustannuksista.



KUVA 1. Biomassan kaasutuksen mahdollisia käyttösovelluksia.

KATALYYTIT JA KATALYTTIN VALMISTUS

Katalyytti on aine, joka nopeuttaa kemiallista reaktiota kulumatta itse reaktiossa. Katalyyttiä käyttämällä reaktioon tarvitaan vähemmän energiaa ja reaktiot tapahtuvat miedommissa olosuhteissa.

Katalyytti koostuu yleensä aktiivisesta metallista, tukiaineesta ja promootorista. Aktiiviset metallit määrittävät katalyytin kemiallisen aktiivisuuden. Aktiivisen metallin valinnan määrittää pääasiassa se käytetäänkö katalyyttiä hapetus- vai pelkistysreaktioon, sekä olosuhteet, joissa katalyyttiä käytetään. Muita tärkeitä ominaisuuksia ovat metallin liukoisuus ja pelkistyskyky. Yleensä katalyytin aktiiviset metallit saadaan prekursorisuolasta, joita voivat olla nitraatit ja kloridit, jne. Tukiaineen valintaan vaikuttavat katalyytin käyttötarkoitus ja reaktio-olosuhteet, kuten lämpötila ja pH. Tukiaineen tärkeimmät ominaisuudet ovat tuottaa laaja reaktiopinta-ala katalyyttiin sekä varmistaa katalyytin mekaaniset ominaisuudet

kuten kestävyys. Yleisesti käytettyjä tukiainemateriaaleja ovat alumiinioksidi, piioksidi, aktiivihili, hiilinanoputket sekä zeoliitit. Promoottori, joka vaikuttaa katalyytin aktiivisuuteen ja stabiilisuuteen voidaan liittää joko katalyytin tukiaineen pintaan tai aktiiviseen metalliin. Aktiiviseen metalliin liitettynä promoottori voi vaikuttaa esim. katalyytin sähköisiin ominaisuuksiin vähentäen katalyytin myrkyttymistä.

FISCHER-TROPSCH -SYNTEESI

Saksalaiset tutkijat Franz Fischer ja Hans Tropsch kehittivät jo vuonna 1923 nk. Fischer-Tropsch -synteesin (FTS), joka tuotti synteesikaasusta alifaattisia hiilivetyjä sekä dieseliä. Katalyytteinä käytettiin kobolttia (Co), rautaa (Fe) ja ruteenia (Ru). Vuonna 1925 patentoitiin uusi Fischer-Tropsch -prosessi ja ensimmäinen kaupallinen FT-tehdas rakennettiin Saksaan vuonna 1935. FT-tuotanto koki huippunsa toisen maailmansodan aikana, kun Saksa tarvitsi nestemäistä polttoainetta.

1950-luvun puolivälistä eteenpäin FT-polttoaineiden tuotanto ei ollut enää kannattavaa, koska Lähi-Idästä tuotu öljy oli halpaa ja fossiiliset polttoaineet valtasivat maailman markkinat. 1950-luvulla Etelä-Afrikkaan rakennettiin uusi FT-tehdas maan ollessa ilman öljyä kauppasaarron vuoksi. Yhtiö (Sasol) tuotti nestemäistä polttoainetta prosessilla, joka perustui kaasutettuun hiileen (CTL, coal-to-liquids) ja raudan katalysoimaan FT-synteesiin, mikä johti maan riippumattomuuteen öljystä.

Öljykriisin aikana 1970-luvulla sekä Yhdysvallat että Eurooppa rahoittivat aktiivisesti FT-tutkimusta. Suomessa sellu- ja paperiyhtiö UPM Kymmene Oy suunnittelee pilottitehtaan rakentamista tarkoituksenaan tuottaa FT-biodieseliä sellutehtaan jätebiomassasta. VTT (Valtion Teknillinen tutkimuskeskus), Stora Enso ja Neste Oil ovat yhteisyrityksenä rakentaneet (NSE Biofuels Oy) koelaitoksen Varkauteen, joka tuottaa puuperäisestä biomassasta toisen sukupolven biopolttoainetta. Edellä mainittu koelaitos on suuruusluokkaa 12 MW, ja se on rakennettu olemassa olevan sellutehtaan yhteyteen, jolloin on mahdollista käyttää olemassa olevaa infrastruktuuria. FT-synteesin pohjautuvaa hajautettua pienen kokoluokan biopolttoainetuotantoa taas ei ole toteutettu käytännössä..

Fischer-Tropsch -synteesi suoritetaan olosuhteissa, joissa on suhteellisen korkea paine (20–60 bar) ja korkea lämpötila (200–450 °C). Vaativat reaktio-olosuhteet yhdistettynä reaktiokaasuihin (vety (räjähtävä) ja hiilimonoksidi (myrkyllinen)) johtavat siihen, että reaktio on suoritettava hyvin valvotuissa olosuhteissa. FT-reaktio tuottaa suuren jakauman erilaisia tuotteita. Mitä tuotteita muodostuu, määräytyy useasta tekijästä:

- Synteesikaasun koostumus (raaka-aineesta riippuen). Erityisen tärkeä on H_2/CO -suhde. Polttoainetuotannossa (diesel ja bensiini) käytetään H_2/CO -suhdetta 2,0–2,5. Bio-SNG tuotetaan kaasuttamalla puupohjaista materiaalia, jonka H_2/CO -suhde on noin 1, jonka H_2 osuutta kasvatetaan lisäämällä vettä (katso reaktio 2).
- Reaktio-olosuhteet (lämpötila, paine ja reaktioaika). Reaktio suoritetaan lämpötilassa 200–250 °C paineen ollessa 20–60 Bar.
- Katalyytin valinta ja katalyyttiset ominaisuudet. Katalyyttinä polttoaineen valmistuksessa käytetään Fe- tai Co-pohjaisia katalyyttejä. Katalyyttiä käytetään harvoin puhtaassa muodossa, vaan yleensä metalli sekoitetaan tukiaineen kanssa.

Reaktiot

1. Vety reagoi hiilimonoksidin kanssa muodostaen hiilivetyjä ja vettä

$$(2n + 1) H_2 + n CO \rightarrow C_n H_{(2n+2)} + n H_2O$$

Tämä on Fischer-Tropsch-synteesin pääreaktio. Reaktio tuottaa jakauman orgaanisia yhdisteitä ja on lähes mahdotonta, että tuotteena syntyisi yhtä puhdasta komponenttia.

H_2/CO -suhdetta voidaan säädellä vettä lisäämällä:

2. $H_2O + CO \rightarrow H_2 + CO_2$

Vaikka yllä olevassa reaktiossa muodostuu ei-toivottua CO_2 :a, ovat hyödyt vedyn muodostuksesta kuitenkin suuremmat. Reaktio tapahtuu pääasiassa silloin, kun käytetään puupohjaista raaka-ainetta, joka tuottaa synteesikaasua alhaisella H_2/CO -suhteella.

FISCHER-TROPSCH -SYNTEESIN KEHITTÄMINEN HIGHBIO -HANKKEESSA

Taustaa

HighBio-hankkeen tavoitteena on kehittää uusia kemiallisia tuotteita, jotka perustuvat kaasutuksessa syntyviin tuotteisiin, vety (H_2) ja hiilimonoksidi (CO). Yksi tavoitteista on muuntaa synteesikaasua katalyyttisesti ajoneuvojen polttoaineeksi nk. Fischer-Tropsch -menetelmällä. Kuten edellä mainittiin, FT-reaktio on katalyyttinen reaktio, jossa synteesikaasua (vetyä ja hiilimonoksidia) muunnetaan hiilivedyiksi paineistetussa reaktorissa,

jossa lämpötila on 200 ja 300 asteen välillä. Hankkeen aikana Kokkolan yliopistokeskus Chydeniuksessa on rakennettu reaktorilaitteisto ja tuotettu, testattu ja optimoitu eri katalyyttejä FT-synteesissä.

Projektin puitteissa olemme keskittyneet synteetikaasun katalyyttiseen käsittelyyn kemiallisiksi yhdisteiksi. Reaktorissa on testattu FT-synteesiin soveltuvia katalyyttejä ja kehitystyön tavoitteena on ollut tuottaa aktiivinen ja vakaa katalyytti FT-reaktioon. Muodostuneiden reaktiotuotteiden analysoiminen ja tunnistaminen on ollut myös keskeinen osa tutkimusta. Tutkimusta on tehty lisäksi kaasutuksen tuotekaasun sisältämän tervapitoisuuden määrittämisen kanssa.

Ensimmäinen kehitysvaihe oli rakentaa reaktorisysteemi. Kaavio reaktorista on esitetty kuvassa 2.

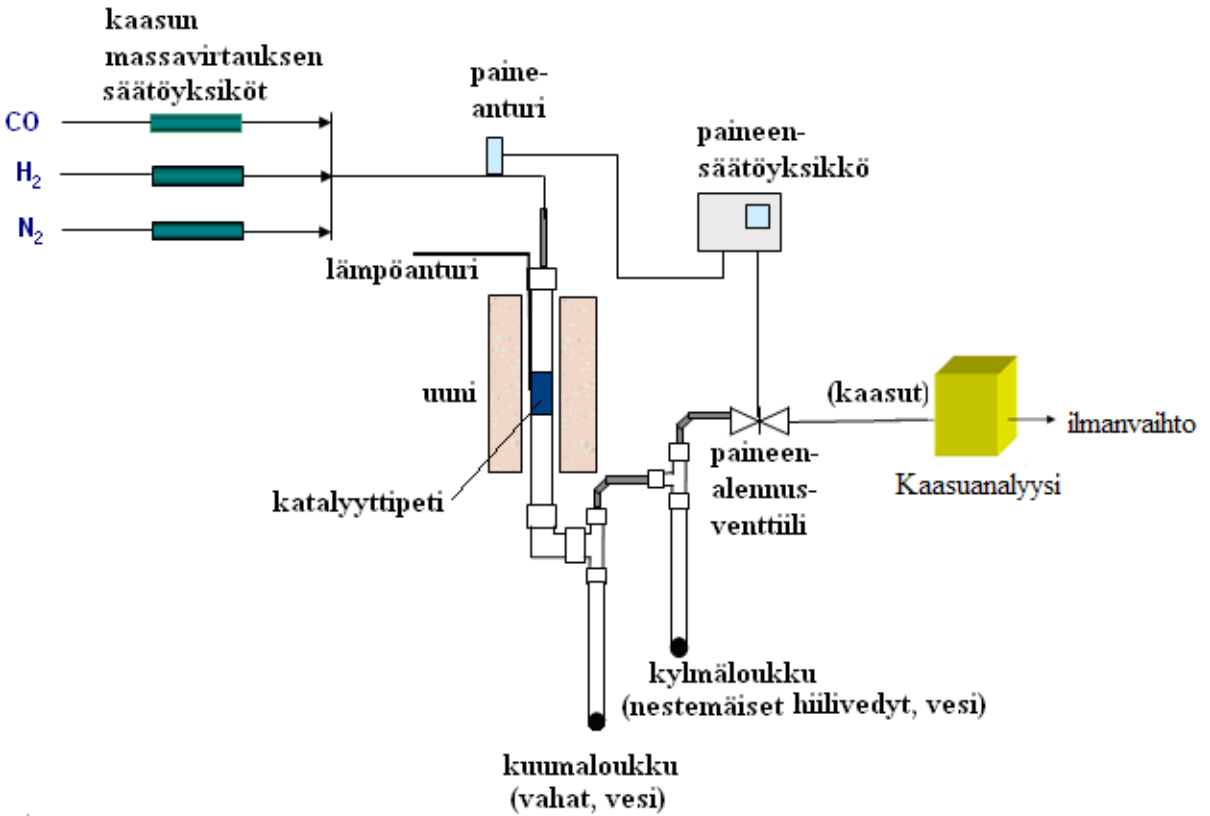
Reaktorisysteemi koostuu seuraavista osista:

- Reaktori, jota ympäröi lämmitettävä uuni
- Lämpötila-anturi (Pt 1000, K-tyyppi), joka on asennettu keskelle katalyyttipetiä
- Massavirtasäätimet yksittäisten kaasuvirtojen säätöön (vety, hiilimonoksidi ja typpi)
- Paineensäätöyksikkö, jota ohjataan ja valvotaan paineanturilla
- Keräysloukut muodostuvien tuotteiden keräykseen (lämmitetty pitkäketjuisille hiilivedyille sekä vahoille ja jäähdytetty kevyille hiilivedyille)
- On-line kaasuanalysointori (GC-FID/TCD) reaktiossa muodostuville kaasuille

Reaktorilaitteistoa on muokattu useaan otteeseen projektin aikana vastaamaan kehittyneitä tarpeita. Viimeisin laitteiston uudistus sisältää katalyyttiseen tervankrakkausyksikön. Kaikki katalyyttien testaus projektissa on tehty kyseisellä laitteistolla.

Synteetikaasun muuttaminen katalyyttien avulla liikenteen polttoaineiksi on ollut tärkein osuus tehdystä työstä projektin työpaketissa 3. Katalyyttien valmistaminen ja testaus on paljon aikaa vievä prosessi. Eri katalyyttimateriaaleja ja tukiaineita on testattu. Kaikki tukiaineet on lahjoittanut Sasol (Saksa).

Katalyyttien valmistuksessa on myös testattu eri metalleja ja metallisuoloja aktiivisen katalyytin tuottamiseksi. Eri lisäaineiden, jalometallien ja puolijalometallien vaikutusta katalyyttiin on tutkittu. Optimoituja katalyyttejä on testattu puhtailla reaktiokaasuilla ja synteettisellä synteetikaasulla.



KUVA 2. Reaktorilaitteisto Kokkolan yliopistokeskuksessa.

Katalyytin valmistusvaiheita ovat:

- Katalyytin (aktiivinen metalli) liuotus veteen ja impregnointi huokoisen tukiaineen pintaan ja kuivaus poistamaan vettä
- Kalsinointi, jolloin metallisuolasta saadaan oksidi
- Pelkistys, jolla metallioksidi saadaan puhtaan metallin muotoon
- Katalyytin testaus mallireaktioissa
- Reaktiotuotteiden analyysi

ANALYYSIMENETELMÄT

Jotta voitaisiin analysoida miten valmistetut katalyytit toimivat tarvitaan analyttisiä menetelmiä nestemäisten ja kaasumaisten orgaanisten tuotteiden tunnistamiseen.

Analysointiin käytettiin kahta menetelmää:

FT-IR (Fourier-muunnos-infrapunaspektrometri), joka kertoo tuotteen sisältämistä kemiallisista sidoksista.

GC-MS (kaasukromatografi-massaspektrometri), jonka avulla voidaan selvittää tuotteiden koostumus ja osuudet tuotejakaumasta.

Ensimmäiset tuotteiden tunnistamiset tehtiin FT-IR:n avulla. Menetelmä antaa tietoa minkä tyyppisiä sidoksia tuote sisältää, mutta antaa vain vähän tietoa tuotteen sisältämistä kemiallisista yhdisteistä.

Kaasukromatografiamenetelmää kehitettiin projektin aikana. Aluksi analysointiin käytettiin GC-FID-laitteistoa ja sen jälkeen GC-MS -laitteistoa. Ensin mainittu menetelmä riittää erottamaan tuotteet, mutta sen avulla on vaikea tunnistaa yksittäisiä komponentteja. GC-MS on parempi tekniikka tuotteiden erottamiseen ja orgaanisten yhdisteiden tunnistamiseen. Pitkällisen menetelmäkehityksen tuloksena saatiin paljon yksityiskohtaista tietoa muodostuneiden yhdisteiden koostumuksesta.

Reaktorissa syntyvien kaasumaisten tuotteiden ns. pysyvien kaasujen (vety, hiilimonoksidi, typpi, hiilidioksidi ja metaani) ja kaasumaisten hiilivety-yhdisteiden (C1-C6) analysointiin hankittiin on-line kaasuanalysaattori. GC-FID/TCD -laitteisto asennettiin reaktoriin (on-line) ja kokeet uudella laitteistolla ovat antaneet paljon uutta ja hyödyllistä tietoa siitä miten katalyytit käyttäytyvät.

Biomassaa kaasutettaessa muodostuvat tervat ovat yksi suurimpia ongelmia kaasutuksessa. Terva on orgaanisista yhdisteistä koostuva yhdisteryhmä. Projektissa on kehitetty ja rakennettu tuotekaasusta kaasunäytteiden keräämistä varten keräyslaitteisto, jolla voidaan analysoida kaasun sisältämiä tervayhdisteitä. Kerätyt tuotteet on analysoitu GC-MS:llä.

JOHTOPÄÄTÖKSET

- Projektin aikana kehitetty reaktorilaitteisto on ollut hyvä työkalu tutkittaessa katalyyttejä ja reaktiomekanismeja katalyytin pinnoilla.
- Valmistettujen katalyyttien avulla on onnistuttu tuottamaan yhdistettä, joka vastaa raakaöljystä valmistettua dieseliä.
- Katalyyttien jatkotestaus, ensisijaisesti pitkän aikavälin testaus paineistetulla “oikealla” synteesikaasulla, on tarpeen.
- Biomassan kaasutuksessa syntyvän tuotekaasun puhdistusprosessin, erityisesti vesikäsitteilyn, kehittäminen.
- Jatkotutkimus kaasun sisältämistä tervayhdisteistä ja puhdistusprosessin kehittäminen.

TUHKAN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET

KEMIALLISTEN MENETELMIEN KÄYTTÖ BIOTUHKIEN HYÖDYNTÄMISEKSI

*Sari Kilpimaa, Toivo Kuokkanen ja Ulla Lassi
Oulun yliopisto, Kemian laitos*

JOHDANTO

Bioenergiaa käytetään maailmanlaajuisesti korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Paineet sähkön hinnannousulle ja erilaiset ympäristösertifikaatit ovat kasvattaneet biomassapohjaisen lämmön- ja sähköntuotannon suosiota. Biomassan käytöllä on useita etuja, koska se on uusiutuvaa, sitä voidaan hyödyntää paikallisesti ja se luo työpaikkoja etenkin haja-asutusalueille. Biomassan poltossa ja kaasutuksessa muodostuu sivutuotteena biotuhkaa. Kaasutus on epätäydelliseen palamiseen perustuva reaktio, jossa hiilipitoinen biomassa muutetaan biokaasuksi. Korkeissa lämpötiloissa (1200-1400 °C) kaasutuksessa muodostuu synteetikaasua, joka sisältää hiilimonoksidia (CO) ja vetyä (H₂). Matalissa lämpötiloissa (800-1000 °C) muodostuu tuotekaasua, joka sisältää hiilimonoksidia CO, vetyä H₂, metaania CH₄ ja muita hiilivetyjä C_xH_y. Synteetikaasusta ja myös tuotekaasusta voidaan puhdistuksen jälkeen valmistaa erilaisia tuotteita, kuten metanolia ja öljyä. (Knoef, 2005)

Puun poltossa muodostuvan biotuhkan hyödyntämistä esimerkiksi lannoitekäytössä on tutkittu paljon. Tuhkan fysikaaliset, kemialliset ja liukoisuusominaisuudet täytyy määrittää ennen hyötykäyttöä asianmukaisilla tutkimusmenetelmillä. Lainsäädännössä on määritelty suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet lannoitekäyttöön tai maanparannusaineena hyödynnettäville tuhkillle. Polttoprosessissa ja kaasutuksessa muodostuvien biotuhkien ominaisuudet voivat olla erilaisia, joten niiden hyötykäyttökohteetkin voivat poiketa toisistaan. HighBio -projektissa tutkittiin suomalaisen puun poltossa ja kaasutuksessa muodostuneiden biotuhkien ominaisuuksia ja mahdollisia hyötykäyttökohteita.

Tutkimuksessa tarkasteltiin neljää eri tuhkaa, joista kaksituhkanäytettä on muodostunut biomassan kaasutuksessa ja kaksi polttoprosesseissa. Tuhka 1 on biokaasutustuhkaa, ja se on muodostunut Entimos-kaasuttimella, joka on yhdistelmä vastavirta- ja myötävirtakaasuttimesta. Myös tuhka 2 on biokaasutustuhkaa, ja se on muodostunut myötävirtakaasuttimessa. Tuhka 3 on muodostunut lämpövoimalaitoksen polttoprosessissa. Tuhka on pääasiassa pohjatuhkaa, mutta seassa voi olla hieman myös lentotuhkaa, sillä ne menevät samaan säiliöön prosessissa. Tuhkanäytteissä 1-3 on raaka-aineena 100 % suomalainen puu. Tuhka 4 on polttotuhkaa, jonka raaka-aineena on suomalainen puu (75 %) ja turve (25 %). Lentotuhka on muodostunut kattilassa, jossa on kupliva leijupeti.

POTENTIAALISET HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET

Biomassan poltossa muodostuneen tuhkan hyödyntämistä on tutkittu paljon, mutta hyödyntämismenetelmät eivät välttämättä ole suoraan sovellettavissa kaasutuksessa muodostuneen tuhkan hyödyntämiseen. Tuhkan hyödyntäminen tuleekin aina arvioida tapauskohtaisesti. Kaasutustuhkan ominaisuudet riippuvat mm. kaasutettavasta raaka-aineesta, kaasutustekniikasta ja lämpötilasta.

Poltossa muodostuneita tuhkia on perinteisesti hyödynnetty lannoitteena ja maanparannusaineena. Kaasutuksessa muodostuneilla tuhkillä on kuitenkin tyypillisesti vähemmän lannoittava vaikutus kuin poltossa syntyneillä tuhkillä. Neutralointikyky kuvaa tuhkan kalkitsemisvaikutusta ja hyötykäyttöpotentiaalia maanparannusaineena happamoituneilla alueilla. SMA Mineral Ltd.:n valmistaman kaupallisen kalkin neutralointikyky on 38 %. Tuhkan hiilipitoisuuden olisi suositeltavaa olla alle 10 %, jotta sen käyttö maanparannusaineena olisi järkevää. Tämä ehto ei tyypillisesti täyty kaasutuksessa muodostuneiden tuhkien osalta. Vaatimus alhaiselle hiilipitoisuudelle johtuu siitä, että inertti hiilimatriisi vähentää ravinteiden määrää tuhkassa. Toisaalta hiilipitoinen tuhka on hydrofobista, jolloin se reagoi huonosti veden kanssa ja ravinteet eivät pääse liukenemaan. (Nurmesniemi *et al.* 2005, Pels *et al.* 2005)

Tietyissä biokaasutusprosesseissa muodostunut tuhka muistuttaa ominaisuuksiltaan aktiivihiihtä, jota käytetään mm. adsorbenttina. Biotuhkan adsorptio-ominaisuudet eivät tyypillisesti ole yhtä hyviä kuin aktiivihiihtä, mutta tuhkan ominaisuuksia voidaan parantaa eri menetelmillä. Tuhkan aktivointi voidaan tehdä kemiallisesti tai fysikaalisesti. Toisaalta tuhka muodostuu kaasutus- tai polttoprosessin sivutuotteena, joten sen hinta on melko alhainen. Tämän vuoksi tuhkia voidaan käyttää suurempia määriä korvaamaan aktiivihiihtä.

Tuhkaa voidaan hyödyntää polttoaineena, mikäli se sisältää merkittäviä määriä palamatonta hiiltä. Hiilipitoisuuden tulisi olla suurempi kuin 35 paino-% tai lämpöarvon suurempi kuin 15 MJ/kg, jotta hyödyntäminen polttoaineena olisi järkevää. Tuhkan hyödyntäminen polttoaineena ei ratkaise kokonaan tuhkan loppusijoittamisesta aiheutuvaa ongelmaa, sillä poltossa muodostuu vähän hiiltä sisältävää tuhkaa. Muodostuneet vähähiiliset tuhkat muistuttavat ominaisuuksiltaan perinteisesti poltossa syntyneitä tuhkia. Kyseiset vähähiiliset tuhkat voidaan hyödyntää mahdollisuuksien mukaan mm. maanparannusaineena tai maarakentamisessa. (Pels *et al.* 2005)

TUHKAN OMINAISUUKSIEN MÄÄRITTÄMINEN

Tuhkan fysikaaliset, kemialliset ja liukoisuusominaisuudet pitää määrittää ennen tuhkan hyötykäyttöä. pH ja sähkönjohtavuus mitattiin liuottamalla tuhkaa ja tislattua vettä neste-kiintoainesuhteella L/S 10. Kuiva-ainepitoisuus määritettiin standardin SFS-EN 12880 (SFS-EN, 2000a) mukaisesti ja hehkutushäviö standardin SFS-EN 12879 (SFS-EN, 2000b) mukaisesti. Liunneen orgaanisen hiilen (DOC) määrittäminen tehtiin standardin SFS-EN 1484 (SFS-EN, 1997) mukaisesti. Kokonaishiilipitoisuus (TC) määritettiin alkuaineanalyysillä (Perkin Elmer CHNS analyser), ja määrittäminen perustuu näytteen poltossa syntyneen hiilidoksidin määrittämiseen. (Perkin-Elmer, 1991).

Neutralointikyky ja reaktiivisuus määritettiin standardien SFS-EN 12945 (SFS-EN, 2002) ja SFS-EN 13971 (SFS-EN, 2003) mukaisesti. Tuhkan ominaispinta-ala määritettiin typen adsorptio-desorptio isotermin avulla (Micromeritics ASAP 2020). Samaa menetelmää käytettiin huokoskoon ja huokostilavuuden määrittämiseen.

Metallien kokonaiskonsentraatiot määritettiin happohajotuksella (suolahapon ja typpihapon seoksella tapahtuva mikroaaltoavusteinen hajotus) ja analysoitiin ICP-OES:lla. Elohopean konsentraatio määritettiin kylmähöyryatomiabsorptiotekniikalla.

TAULUKKO 1. Fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet neljälle tutkitulle biotuhkalle.

Ominaisuus	Yksikkö	Tuhka 1	Tuhka 2	Tuhka 3	Tuhka 4
pH		10,7	9,0	12,2	12,4
Sähkönjohtavuus	mS cm ⁻¹	1,03	0,455	3,9	7,87
Kuiva-ainepitoisuus	%	18,7	16,4	43,9	99,8
Hehkutushäviö	%	94,8	68,4	79,6	8,7
DOC	mg kg ⁻¹	649	565	570	0,84
Kokonaishiilipitoisuus	%	89,4	60,9	72,3	6,5
Neutralointikyky	% Ca	3,8	8,0	7,9	13,3
Reaktiivisuus	% Ca	1,6	6,6	6,6	10,0
Kalkitsemiskyky	t t ⁻¹	10	4,8	4,8	2,9
Pinta-ala	m ² g ⁻¹	100	15	206	29,8
Huokoskoko	nm	3,91	15,9	2,64	3,18
Huokostilavuus	cm ³ g ⁻¹	0,098	0,0564	0,1374	0,024

Taulukkoon 1 on koottuna määritettyjä fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia neljälle tutkitulle tuhkalle. Kaikki tuhkat ovat emäksisiä. Sähkönjohtavuus kuvaa tuhkassa esiintyvien liukoisten elektrolyyttien määrää. Korkea sähkönjohtavuuden arvo kuvastaa sitä, että osa liukoista metalleista voi esiintyä suoloina, kuten hydroksideina, sulfaatteina tai oksideina. Polttotuhkille sähkönjohtavuuden arvot ovat suurempia kuin kaasutustuhkille. Kaasutustuhkat sisältävät paljon kosteutta, sillä niiden kuiva-ainepitoisuus on pieni. Hehkutushäviö kuvastaa orgaanisen aineen määrää tuhkassa. DOC-arvo kertoo tuhkasta liukenevan orgaanisen hiilen määrän. Neutralointikyky ja reaktiivisuus vaihtelevat eri tuhkille. Neutralointikyvyn perusteella voidaan arvioida tuhkan kalkitsemiskykyä, ja reaktiivisuuden perusteella voidaan arvioida neutralointikyvyn nopeutta ja tehokkuutta. Paras kalkitsemiskyky on tuhkalla 4, sillä sitä tarvitaan vain 2,9 tonnia korvaamaan 1 tonni kaupallista kalkkia.

Pinta-ala, huokoskoko ja huokostilavuus ovat tärkeitä ominaisuuksia arvioitaessa tuhkan hyötykäyttöä esimerkiksi adsorbenttimateriaalina. Adsorptio-ominaisuudet ovat tyypillisesti parempia tuhkalla, jonka pinta-ala on suurempi. Huokoskoon perusteella voidaan päätellä tuhkan adsorptio-ominaisuuksia.

TAULUKKO 2.

Raskasmetallien kokonaispitoisuudet (mg kg^{-1} ; d.w.) neljälle tutkitulle tuhkanäytteelle ja lainsäädännössä määritellyt suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet lannoitekäytössä tai metsälannoitteena hyödynnettäville tuhille. (Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista, MMMa 12/2007)

Alku- aine	Yksikkö	Raja-arvo (metsälän- noitteena)	Raja-arvo (maatalous- käyttö)	Tuhka 1	Tuhka 2	Tuhka 3	Tuhka 4
Cd	mg kg^{-1} (d.w.)	15	1,5	< 0,3	6,3	1,6	5
Cu	mg kg^{-1} (d.w.)	700	600	15	130	21	83
Pb	mg kg^{-1} (d.w.)	150	100	< 3	25	10	27
Cr	mg kg^{-1} (d.w.)	300	300	7	210	9	82
Mo	mg kg^{-1} (d.w.)			< 1	15	< 1	6
Zn	mg kg^{-1} (d.w.)	4500	1500	85	7950	130	380
As	mg kg^{-1} (d.w.)	30	25	< 3	< 3	< 3	19
Co	mg kg^{-1} (d.w.)			< 1	8	1	8
V	mg kg^{-1} (d.w.)			< 2	7	3	210
Ni	mg kg^{-1} (d.w.)	150	100	3	110	10	36
Sb	mg kg^{-1} (d.w.)			< 4	< 4	< 4	< 4
Ba	mg kg^{-1} (d.w.)			120	880	250	860
S	mg kg^{-1} (d.w.)			180	3260	830	8420
Ca	mg kg^{-1} (d.w.)			12 800	78 400	46 300	96 300
Mg	mg kg^{-1} (d.w.)			2650	6670	8020	16 600
K	mg kg^{-1} (d.w.)			7110	9340	14 000	18 900
P	mg kg^{-1} (d.w.)			1550	9560	4120	12 700
Hg	mg kg^{-1} (d.w.)	1,0	1,0	< 0,040	0,040	< 0,040	0,56

Taulukkoon 2 on koottuna raskasmetallien kokonaispitoisuudet neljälle tutkitulle tuhkalle. Konsentraatiot on esitetty kuivapainoa kohti. Taulukosta 2 nähdään, että raskasmetallien kokonaispitoisuudet tuhkillä 1, 3 ja 4 ovat alhaisemmat kuin Suomen lainsäädännössä määritellyt suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet metsälannoitteena hyödynnettäville tuhkillä. Näitä tuhkia voisi hyödyntää sellaisenaan metsälannoitteena. Maatalouskäytön näkökulmasta ainoastaan tuhkaa 1 voitaisiin hyödyntää suoraan, sillä kadmiumpitoisuus on liian korkea tuhkillä 2, 3 ja 4. Tuhkalla 2 on lisäksi liian korkea nikkeli- ja sinkkipitoisuus, jotta sitä voisi hyödyntää suoraan maataloudessa. Taulukosta 2 nähdään myös joidenkin ravinteiden kokonaispitoisuus. Korkea kalsiumpitoisuus kaikissa tutkituissa tuhkissa kertoo niiden olevan potentiaalisia maanparannusaineita.

YHTEENVETO

Tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla poltto- ja kaasutusprosesseissa muodostuvien tuhkien ominaisuuksia. Tuloksista voidaan päätellä, että tuhkat 3 ja 4 voitaisiin hyödyntää lannoitteena, sillä ne sisältävät paljon ravinteita. Kyseisten tuhkien raskasmetallipitoisuudet ovat myös alhaisemmat kuin Suomen lainsäädännössä määritellyt suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet metsälannoitteena käytettäville tuhkillä. Polttotuhka 4 on voimakkaasti emäksinen ja sen kalkituskyky on hyvä, joten voidaan olettaa sen toimivan hyvin maanparannusaineena. Tuhkaa voitaisiin siis hyödyntää kalkin sijasta.

Kaasutusprosessissa muodostuneiden tuhkien sekä polttoprosessissa muodostuneen tuhkan 3 hiilipitoisuus on korkea. Tuhkillä 1 ja 3 on lisäksi melko suuri ominaispinta-ala ja ne ovat huokoisia, joten kyseisiä tuhkia voitaisiin mahdollisesti käyttää adsorbenttinä. Tuhkia 1-3 voitaisiin myös hyödyntää polttoaineena niiden korkean hiilipitoisuuden ansiosta. Tässä tutkimuksessa määritettiin fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia neljälle eri tuhkalle. Tuloksista voidaan päätellä, että kaasutus- ja polttoprosesseissa muodostuvien tuhkien ominaisuudet vaihtelevat paljon, ja niiden hyötykäyttösovellukset ovat sen vuoksi erilaisia.

LÄHTEET

- Knoef, H.A.M., Handbook Biomass Gasification, 2005, BTG biomass technology group BV, The Netherlands, 378 s.
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista, MMMa 12/07.
- Nurmesniemi, H., Pöykiö, R., Perämäki, P. ja Kuokkanen, T., 2005, The use of a sequential leaching procedure for heavy metal fractionation in green liquor dregs from a causticizing process at a pulp mill, *Chemosphere*, 61, 1475-1484.
- Pels, J.R., de Nie, D.S. ja Kiel, J.H.A., Utilization of ashes from biomass combustion and gasification, 14th European Biomass Conference & Exhibition, 17-21 October 2005, 17 s.
- Perkin-Elmer, Users Manual PE 2400 Series II CHNS/O Analyzer, 1991, Perkin-Elmer Corp. Norwalk, Connecticut USA, pp. 1-6 (Chapter 1).
- SFS-EN, 1997, Eurooppalainen standardi SFS-EN 1484, Vesianalyysi. Ohjeita orgaanisen hiilen kokonaismäärän (TOC) ja liuenneen orgaanisen hiilen (DOC) määrittämiseen, Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 15 s.
- SFS-EN, 2000a, Eurooppalainen standardi SFS-EN 12880, Lietteen karakterisointi, kuiva-aineen ja vesipitoisuuden määrittäminen, Suomen standardisoimisliitto SFS, Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 7 s.
- SFS-EN, 2000b, Eurooppalainen standardi SFS-EN 12879, Lietteen karakterisointi, hehkutushäviön määrittäminen, Suomen standardisoimisliitto SFS, Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 7 s.
- SFS-EN, 2002, Eurooppalainen standardi SFS-EN 12945, Liming Materials, Determination of Neutralizing Value, Titrimetric Methods, Suomen standardisoimisliitto SFS, Kemianteollisuus ry, Helsinki, 10 s.
- SFS-EN, 2003, Eurooppalainen standardi SFS-EN 13971, Carbonate liming materials, Determination of reactivity, Potentiometric titration method with hydrochloric acid, Suomen standardisoimisliitto SFS, Kemianteollisuus ry, Helsinki, 12 s.

TEKNIS-TALOUDELLINEN ARVIOINTI

BIOMASSAPOHJAINEN PIENEN MITTAKAAVAN YHDISTETTY LÄMMÖN- JA SÄHKÖNTUOTANTO – TALOUDELLISET EDELLYTYKSET

Joakim Lundgren

Luleå tekniska universitet

Kiinnostus biomassapohjaiseen yhdistettyyn lämmön- ja sähköntuotantoon (CHP = Combined Heat and Power) Euroopassa kasvaa ja sillä tulee olemaan tärkeä rooli siirryttäessä kestävämpään energian tuotantoon. Uusia voimaloita perustettaessa on tärkeää, että investointi on taloudellisesti perusteltua. Sähkön korkeampi hinta ja vihreät sertifikaatit ovat parantaneet mahdollisuuksia tuottaa sähköä ja lämpöä myös pienemmässä mittakaavassa. Pohjoismaat soveltuvat hyvin tällaisten pienten laitosten toimintaan, muun muassa siksi, että maissa on runsaat biomassaresurssit. Nykyään biomassapohjainen CHP-tuotanto tapahtuu pääosin suuremmissa mittakaavassa vesi-höyryjärjestelmällä, joka tunnetaan ns. Rankine-syklinä. Muut tekniikat, kuten Stirling-moottori ja kaasutusjärjestelmät (kaasutin, jossa kaasuturbiini tai kaasumoottori), ovat vielä kehitteillä ja vaativat lisää tutkimusta ja kehitystä. Taulukossa 1 on esitetty eräitä biomassapohjaisia CHP-reittejä ja kuvattu nykyisen kehityksen tila.

TAULUKKO 1. Kehityksen tila muutamalle valitulle biomassapohjaiselle CHP-reitille. Kolme ensimmäistä tekniikkaa perustuvat kaasutukseen.

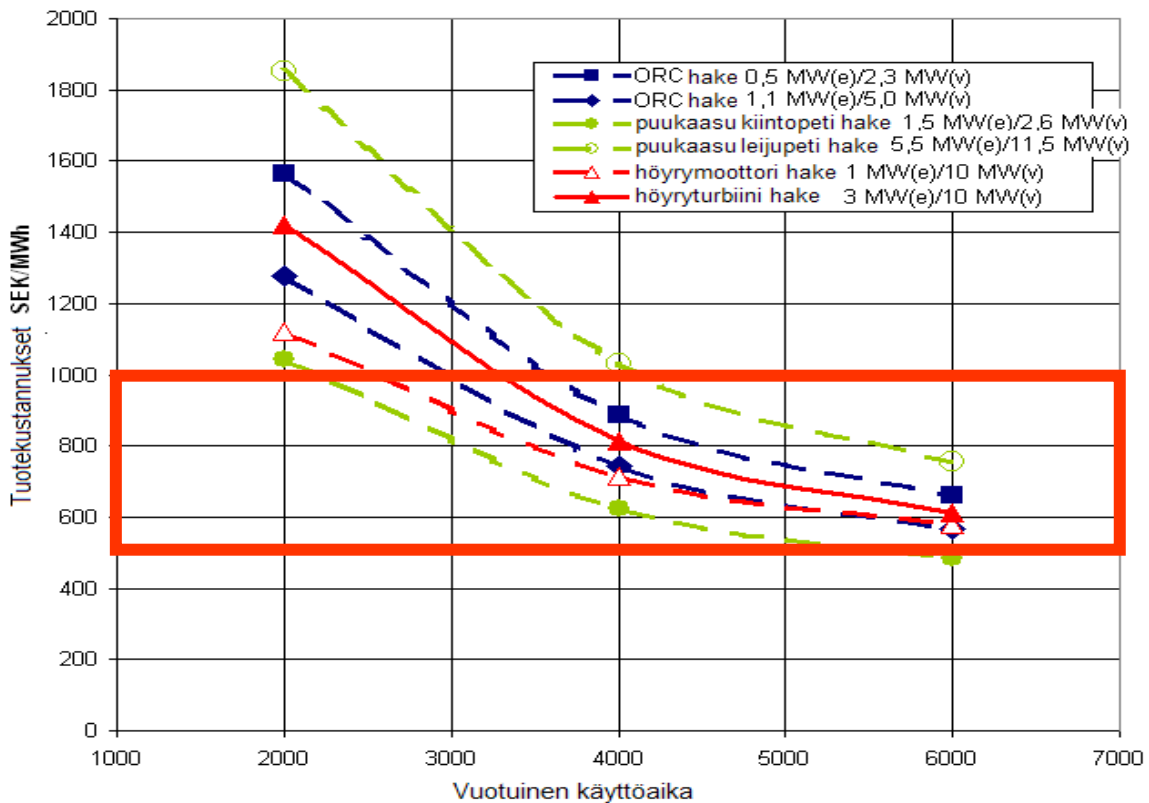
TEKNIikka	10-500 kW _{th}	0.5-5 MW _{th}	5-10 MW _{th}	>10 MW _{th}
Kiintopetikaasutus Kaasumoottori				
Leijupetikaasutus Kaasumoottori				
Kaasuturbiini, tuote- kaasulla toimiva				
Orgaaninen Rankine- sykli (ORC)				
Höyrykierto (Rankine)				
Stirling-moottori (pel- letit)				

Kaupallinen	Demonstraatio	Pilotti	Ei mahdollinen
-------------	---------------	---------	----------------

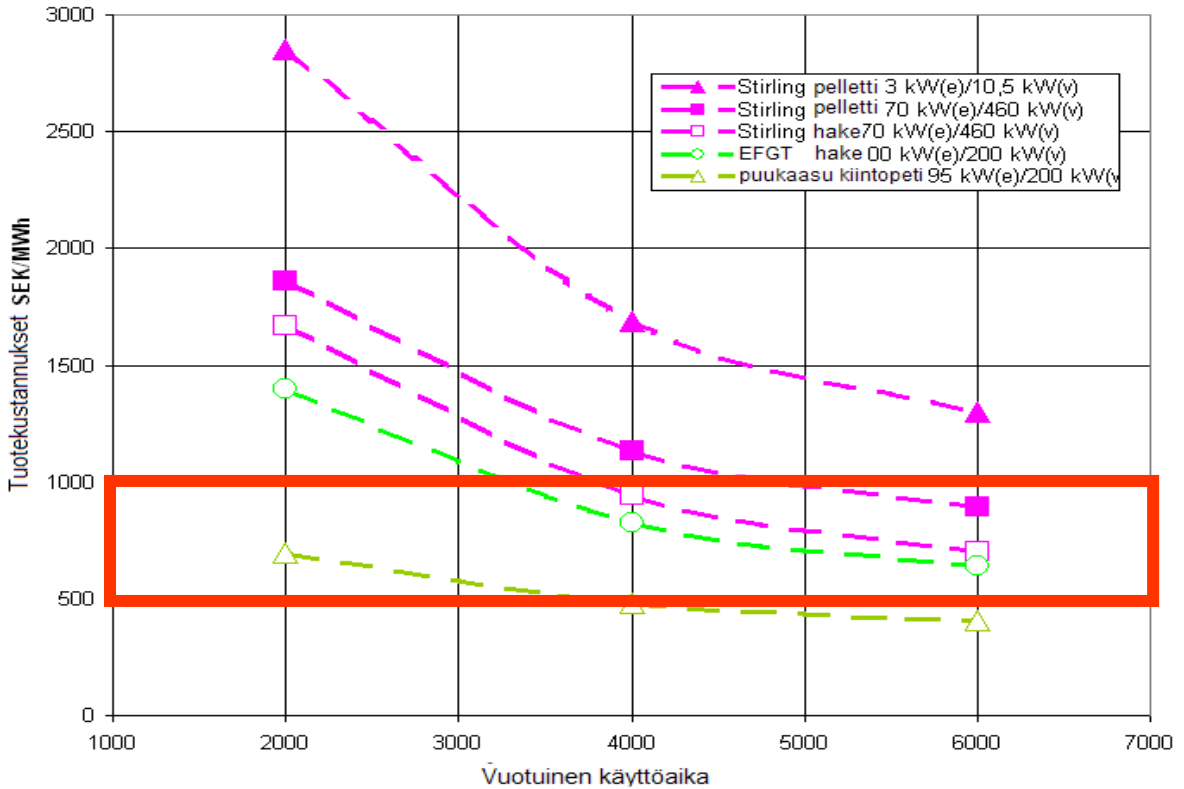
KUINKA PALJON PIENIMUOTOINEN BIOMASSAPOHJAINEN SÄHKÖNTUOTANTO SAA MAKSAA?

Sähkömarkkinat perustuvat marginaaliseen hinnoitteluun, mikä tarkoittaa, että hinta määräytyy kysytyimmän tuotannon kustannuksista. Nykyään sähkön hinta perustuu suuren mittakaavan sähköntuotantoon hiili- ja öljyvoimaloissa. Pienimuotoinen sähköntuotanto, riippumatta polttoaineesta, kilpailee tämän tuotannon kanssa. Laajamittaisen sähköntuotannon hinta on tällä hetkellä 350–550 kruunua (SEK) per MWh_{el} (n. 39–61 €/MWh_{el}) sisältäen myös sähkönjakelun kustannukset. Fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaan sähköntuotannon kustannuksiin lisätään myös hiilidioksidipäästöjen aiheuttamat kustannukset, mikä aiheuttaa suurimman kuluerän hiilivoimaloissa. Hiilidioksidipäästöjen hinta määräytyy markkinoiden mukaan ja se vaihtelee. Viime vuosina päästökaupassa hinta on vaihdellut lähes 0 kruunusta (SEK) noin 280 kruunuun (SEK) per MWh_{el} (n. 0-31 €/MWh_{el}). Tästä syystä on vaikea arvioida tarkasti, kuinka paljon pienimuotoiseen biomassan jalostukseen perustuva sähköntuotanto saisi maksaa. Mutta jos oletetaan päästökustannusten olevan lähivuosina välil-

lä 160–450 kruunua (SEK) per MWh_{el} (n. 18–50 €/ MWh_{el}) ja jos tuotanto- ja jakelukustannukset laajamittaisessa tuotannossa säilyisivät entisellään, niin tarkoittaisi se että pienimuotoinen biomassaan perustuva sähkön- tuotannon hinta voisi olla välillä 500–1000 kruunua (SEK) per MWh_{el} (n. 56–112 €/ MWh_{el}). Joissakin maissa, kuten Ruotsissa, on nykyään vaikea saavuttaa kannattavaa tuotantoa. HighBio -hanke pyrkii kehittämään tehokkaampia ja luotettavampia CHP-laitoksia, mikä tarkoittaa, että laitoksilla voisi olla paremmat taloudelliset toimintaedellytykset. Muun muassa vuosittaisella laitoksen käyttöajalla on suuri merkitys sähkön hintaan ja se on suoraan yhteyksissä synteesikaasun laatuun. Kuvat 1 ja 2 osoittavat sähkön tuotantokustannukset vuotuisen käyttöajan funktiona eri tekniikoilla sekä vastaavat tehtaiden koot. Punaisessa kentässä on kustannusten vaihteluväli, jolla pienimuotoista sähköntuotantoa voitaisiin perustella suhteessa edellä esitettyihin perusteluihin.



KUVA 1. Sähkön tuotantokustannukset (SEK/MWh) vuotuisen käyttöajan funktiona eri biomassapohjaisilla CHP-tekniikoilla, yli 500 kW_{el} laitoksissa.



KUVA 2. Sähkön tuotantokustannukset (SEK/MWh) vuotuisen käyttöajan funktiona eri biomassapohjaisilla CHP-tekniikoilla, alle 100 kW_{el} laitoksissa.

Kuten kuvat 1 ja 2 osoittavat, on erittäin tärkeää, että laitos on ollut toiminnassa keskeytyksettä suurimman osan vuotta. Useimpien tekniikoiden osalta sähkön tuotantokustannukset ovat kohtuullisia, jos laitoksen vuotuinen käyttöaika on yli 4000 tuntia. Arviot sähkön tuotantokustannuksista HighBio-hankkeessa käytetyistä kaasutustekniikoista ovat parhaillaan työn alla ja tulokset esitetään projektin loppuraportissa.

Erittäin lupaava tekniikka biomassapohjaiseen pienen mittakaavan yhdistettyyn lämmön- ja sähköntuotantoon on ulkoisesti lämmitetyt kaasuturbiinit (EFGT, externally fired gas turbine). Palava kaasu tuotetaan kaasuttamalla ja kaasunpuhdistuksen jälkeen kaasu lämmitetään erillisessä palotilassa. Kuumia kaasuja käytetään lämmittämään paineilma lämmönvaihtimen avulla korkeassa lämpötilassa, 800–1000 °C. Kuuma ilma laajenee ja turbiini tuottaa sähköä. Vaikein ongelma näissä sovelluksissa on pinnoitekerroksen muodostuminen lämmönsiirtopinnoille. Pinnoitekerros aiheuttaa heikon lämmönsiirron kaasun ja ilman välillä, ja siten alen-

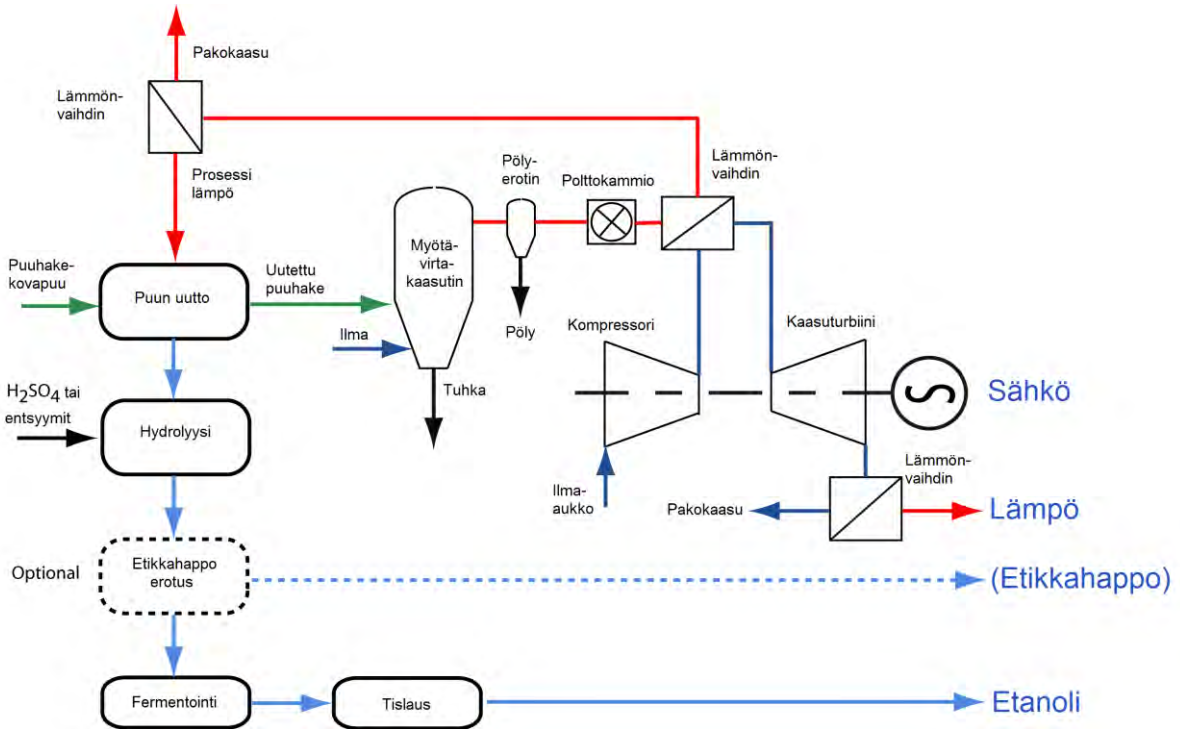
taa sähköntuotannon hyötysuhdetta korkeampien kustannusten vuoksi. On siis todennäköistä, että tehdas on taloudellisesti kannattamaton, varsinkin kun siihen on asennettava kalliit kaasunpuhdistuslaitteistot turhien häiriöiden ehkäisemiseksi. Pinnoitekerros aiheutuu suurista emäspitoisuuksista (lähinnä natrium, kalium) biopolttoaineiden tuhkassa. Siksi olisi toivottavaa tuottaa paljon puhtaampaa kaasua, mikä voitaisiin saavuttaa puhtaammilla raaka-aineilla.

HighBio -hankkeen puitteissa on tutkittu ns. kuumavesiuutto-prosessin integroimista EFGT-laitokseen. Uuttoprosessi "pese" hakkeen (tässä tapauksessa koivuhakkeen) paineistetussa vesisysteemissä (noin 8 bar). Osa hakkeen sisältämästä hemiselluloosasta on uutettu tuottaen fermentoitavissa olevia sokereita, joita voidaan käyttää esim. bioetanolin tuotantoon tai vihreiden kemikaalien tuotantoon. Tämän seurauksena CHP-laitokset tulisi muuntaa pienen kokoluokan biojalostamoiksi, joka ei tuota vain lämpöä ja sähköä, vaan myös kemikaaleja. "Pestyn" polttoaineen on havaittu sisältävän huomattavasti vähemmän alkalimetalleja ja myös sen lämpöarvo on suurempi. Kuvassa 3 on valokuva koivupuulastuista ennen uuttoa ja uuton jälkeen.



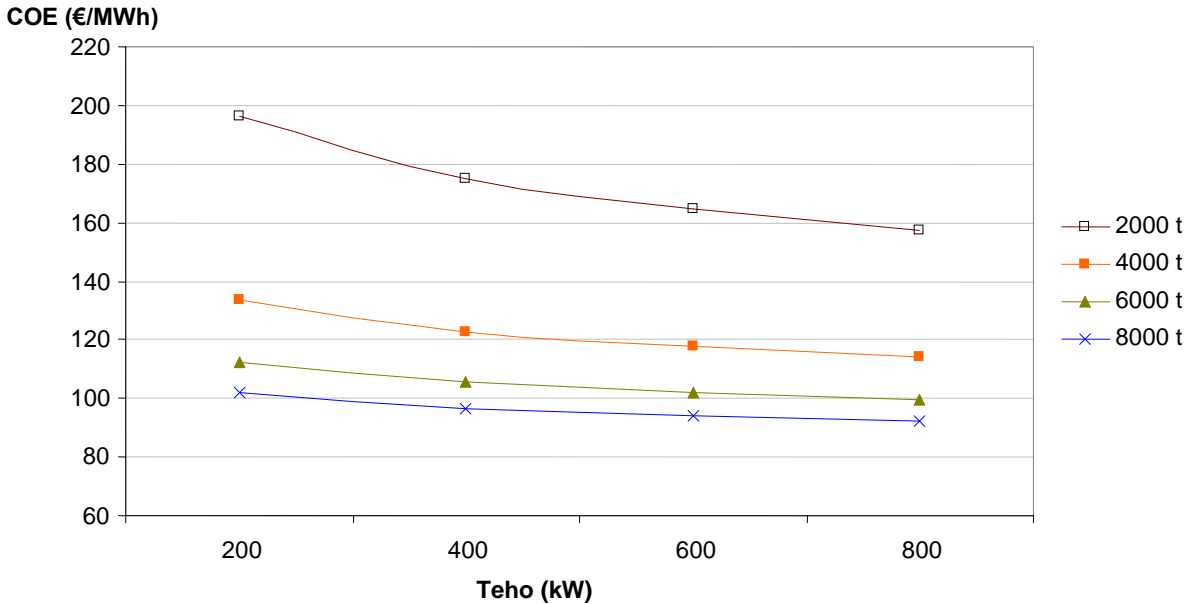
KUVA 3. Koivupuulastuja ennen (vasemmalla) ja jälkeen (oikealla) uuttoa.

Kuvassa 4 on esitetty kyseisen kuumavesiuutto-prosessin energia- ja materiaalivirrat integroituna EFGT-laitokseen. Prosessiin on mahdollista sisällyttää erotusprosessi hydrolyysin jälkeen ja tuottaa näin myös etikka-happoa.



KUVA 4. Kuumavesiuutto -prosessi integroituna EFGT-laitokseen

Laitoksen koolla ja vuotuisella käyttöajalla on merkittävä vaikutus sähkön tuotanto-kustannuksiin. Kuvassa 5 on taloudellinen arviointi tämäntyyppisestä integroidusta laitoksesta.



KUVA 5. Sähkön tuotantokustannukset (€/MWh) laitoksen tehon funktiona eri käyttötunneilla.

Tulokset osoittavat, että sähkö voidaan tuottaa kokoluokassa 200–800 kW_{el} kustannuksilla 85–195 €/MWh_{el} (joka vastaa noin 770–1800 SEK / MWh). Koko laitoksen taloutta voidaan parantaa, kun fermentoitavien sokereiden tuotantoyksikkö on myös rakennettu. Kustannukset tuottaessa fermentoitavia sokereita (65 g ksyloosia litrassa) ovat arviolta 0,4–4,2 € kilogrammaa ksyloosia kohti. Konsepti on mielenkiintoinen, mutta vaatii vielä lisätutkimusta.

HIGHBIO PROJEKTI-INFOT

- INFO 1 Uusi projekti alkaa, HighBio - Interreg Pohjoinen (2008)
- INFO 2 Jyväskylän yliopisto, Kokkolan yliopistokeskus Chydenius, U-P Granö (2008)
- INFO 3 HighBio - Interreg Pohjoinen-projekti, U-P Granö (2008)
- INFO 4 Bioenergiaraaka-aineiden jalostus, U-P Granö (2008)
- INFO 5 Pienempiä CHP-yksiköitä, U-P Granö (2008)
- INFO 6 Joitakin käytettyjä lyhenteitä sekä termejä, U-P Granö (2008)
- INFO 7 Uusiutuva energia - Vihreä energia, U-P Granö (2008)
- INFO 8 Fossiilinen kaasu sekä biomassasta saatava kaasu, U-P Granö (2008)
- INFO 9 Katalyyysi ja katalyytit, U Lassi (2008)
- INFO 10 Kaasunäytteenotto, U Lassi (2008)
- INFO 11 Kaasuvirtausmittaukset, U Lassi (2008)
- INFO 12 Logistiikkaesimerkki biomassalle, U-P Granö (2008)
- INFO 13 Laitteisto biomassan pienentämiseen, U-P Granö (2008)
- INFO 14 Kaasutukseen tarkoitettun metsähakkeen jälkikuivaus, U-P Granö (2008)
- INFO 15 CHP biomassan suoralla poltolla, U-P Granö (2008)
- INFO 16 Lämpövoiman tuotanto biomassan kaasutuksen kautta, J Lundgren (2008)
- INFO 17 Biopolttoaineita synteetikaasuista, H Romar (2008)
- INFO 18 Kioton ilmastopimus, A Rönnskog (2008)
- INFO 19 Fischer-Tropsch-menetelmän kehitys, A Rönnskog (2009)
- INFO 20 Metsästä saatujen sivutuotteiden kaasutus polttoaineiden valmistusta varten, O Öhrman (2009)
- INFO 21 HighBio-tutkimus, ETC, Piteå, H Hedman (2009)
- INFO 22 LTU:n energiatekniikan osaston T&K, J Lundgren (2009)
- INFO 23 Kasvihuonekaasupäästöjen terveysvaikutukset, H Snellman (2009)
- INFO 24 Centrian tutkimusympäristö, Y Muilu (2009)
- INFO 25 Hakkeen kulutus poltinkäytössä, Y Muilu (2009)
- INFO 26 Moottorin teho puukaasulla, Y Muilu (2009)
- INFO 27 Lämmön avulla jalostaminen - Pyrolyysi, U-P Granö (2009)

- INFO 28 Bio-Synteesikaasun Fermentointi, U-P Granö (2009)
- INFO 29 Biomassan tuotekaasun kokonaistervan määrittäminen. Tervanäyteenotto, K Pieniniemi (2009)
- INFO 30 Kokonaistervapitoisuuden määrittäminen, K Pieniniemi (2009)
- INFO 31 Oulun yliopisto, Kemian laitos, A Heponiemi ja S Kilpimaa (2009)
- INFO 32 Jäteperunapohjaisen bioetanolin valmistaminen, T Kuokkanen ja S Kilpimaa (2009)
- INFO 33 Uusi kaasutuslaitos ETC:n yhteyteen, M Marklund (2009)
- INFO 34 CHEMPLANT -projekti, R Puskala (2009)
- INFO 35 Biomassan integroitu jalostus, U-P Granö (2009)
- INFO 36 Puuta kaasuksi muuttava puukattila, U-P Granö (2009)
- INFO 37 Koillismaahan alueen puupellettien sekä hakkeen lämpökeskus- ja pienpoltossa syntyvien tuhkien hyötykäyttöön liittyvä tutkimus, M Kuokkanen ja T Kuokkanen (2009)
- INFO 38 Biotuhkan käyttö on ekoteko, M Kuokkanen ja T Kuokkanen (2009)
- INFO 39 Biopolttoaineen torrefiointi, H Salman (2009)
- INFO 40 Biohajoavuuden määrittäminen vedessä, H Prokkola ja T Kuokkanen (2009)
- INFO 41 Biopolttoaineikaasutuksen integrointi teollisiin prosesseihin, J Lundgren (2009)
- INFO 42 Biomassan hajautettu CHP- jalostus, U-P Granö (2009)
- INFO 43 Kemiallisten menetelmien käyttö tavoitteena biotuhkien hyödyntäminen, S Kilpimaa, T Kuokkanen ja U Lassi (2009)
- INFO 44 Esimerkkejä pienen mittakaavan CHP- yksiköiden laitteistojen valmistajista, U-P Granö (2010)
- INFO 45 CHP vaihtoehtona energiaosuuskunnille, U-P Granö (2010)
- INFO 46 Fischer-Tropsch-synteesin kehitys, Henrik Romar ja Riikka Lahti (2010)
- INFO 47 Tehokas polttoaineen muuntaminen ja tuhka- ominaisuuksia entained flow kaasutuksessa, M Stenberg (2010)
- INFO 48 Tuhkien hyödyntämistä koskevaa lainsäädäntöä, S Kilpimaa, T Kuokkanen ja U Lassi (2010)
- INFO 49 Reaktorin designnäkökohtia entrained flow biomassan kaasutukselle, M Marklund (2010)
- INFO 50 Esimerkkejä biomassan kaasuttimien valmistajista, U-P Granö (2010)
- INFO 51 Biokaasu/ Biometanioli, H Petäistö ja H Snellman (2010)
- INFO 52 Voima, Y Muilu (2010)
- INFO 53 Biomassan kaasutus polttoaineeksi, U-P Granö (2010)
- INFO 54 Biopohjaiset polttoaineet, H Romar (2010)
- INFO 55 Centrian tutkimuslaitteiston muutostyöt, H Snellman (2010)
- INFO 56 Synteesikaasun katalyyttinen konvertointi liikenteen polttoaineiksi, R Lahti ja H Romar (2010)
- INFO 57 Puun esikäsitteily kuumavesi-uuton kautta, J Lundgren (2010)
- INFO 58 Katalyyttien karakterisointi, K Partanen ja U Lassi (2010)
- INFO 59 Katalyyttien valmistus, K Partanen ja U Lassi (2010)
- INFO 60 Tuotekaasun puhdistus synteesikaasuksi, H Romar (2010)

- INFO 61 Kaasunpuhdistustekniikoita, O Öhrman (2010)
- INFO 62 Biohajoavuuden määrittäminen kiinteässä faasissa Bod OxiTop -menetelmällä, H Prokkola, M Kuokkanen ja T Kuokkanen (2010)
- INFO 63 Biopolttoaineen esikäsittely (Jauhatus), H Salman (2010)
- INFO 64 Lämpöarvojen määrittäminen pommikalorimetrillä, I Jerkku, T Kuokkanen ja U Lassi (2010)
- INFO 65 Biopolttoaineen syöttö paineistettuun reaktoriin, H Salman ja F Weiland(2010)
- INFO 66 Biopolttoaineen kulku paineistetussa kaasutusreaktorissa, F Weiland (2010)
- INFO 67 Polttoaineen koostumuksen vaikutus kaasutusprosessiin, Osa 1 termokemiallinen mallinnus- Vaikutus kuonan muodostumiseen, M Öhman (2010)
- INFO 68 Polttoaineen lisäaineiden vaikutus kaasutusprosessiin, Osa 2 termokemiallinen mallinnus- Vaikutus kuonan muodostumiseen, M Öhman (2010)
- INFO 69 Joitakin käytettyjä lyhenteitä sekä termejä, A Rönnskog (2010)
- INFO 70 Partikkelikokojakauman määrittäminen biotuhkasta, S Kilpimaa, T Kuokkanen ja U Lassi (2010)
- INFO 71 Tervan poisto tuotekaasusta, R Lahti ja H Romar (2010)
- INFO 72 Annostelututkimuksia ruuviannostelussa syöttölaiteelle, F Weiland (2010)
- INFO 73 Bioenergiaressurssien priorisointi, H Snellman (2010)
- INFO 74 ETC vihki käyttöön ainutlaatuisen koelaitoksen, M Marklund (2010)
- INFO 75 Considering forest residues and stumps as fuel feed stocks in slagging biomass gasification, A-C Johansson (2011)
- INFO 76 Stirling- moottorin asentaminen puukaasukäyttöön, K Jarva ja M Niskanen (2011)

HIGHBIO-HANKKEESEEN LIITTYVÄT JULKAISUT JA RAPORTIT

- Eriksson, D., Weiland, F., Hedman, H., Stenberg, M., Öhrman, O., Lestander, T.A., Bergsten, U. and Öhman, M. (2011) Scots pine stump-root biomass: A possible large scale feed-stock for gasification. To be submitted to Bioresource Technology.
- Haapasaari, S. (2009), tutkimusprojekti (Stora Enso Oulu, aiheesta Tuhkasta valmistetun flokkauskemikaalin käyttö yhdyskuntavesien fosforinpoistossa).
- Heponiemi, A., Rahikka, L., Lassi, U. and Kuokkanen T. (2009) Catalytic oxidation of industrial wastewaters - a comparison study using different analyzing methods, Chemical Engineering Transactions Volume 17.
- HIGHBIO –projekti (2009) EnePro konferenssi, Advancing Research in the Energy Field at the University of Oulu, 3.6.2009, Oulu
- Hägström, C., Öhrman, O., Gebart, R., Hedlund, J., Catalytic synthesis of methanol from black liquor derived synthesis gas. 4th International DME Conference, Stockholm, 6-9 Sep. 2010.
- Jerkku, I. (2010), tutkimusprojekti. Pommikalorimetrisia tutkimuksia kemian laitoksen uutta kalorimetriä testaten ja käyttäen.
- Jokinen, H. (2009), tutkimusprojekti aiheesta Heikkolaatuisen ja kostean puubio-massan hyödyntäminen
- Karhu, H. (2009) tutkimusprojekti (EVO Kuusamo, aiheesta Tuhkasta valmistetun flokkauskemikaalin käyttö yhdyskuntavesien fosforinpoistossa).
- Karhu, H. LuK-tutkielma (2010) Kuitusavi – hyödynnettäväksi soveltuva paperiteollisuuden jättemateriaali, 31 s.
- Karvonen, L. (2009) tutkimusprojekti (Kokkolan Voima, aiheesta Tuhkasta valmistetun flokkauskemikaalin käyttö yhdyskuntavesien fosforinpoistossa).
- Karvonen, L., LuK-tutkielma (2009) Oulun alueen puu- ja turvepohjaiset tuhkat ja niiden hyötykäyttö, 34 s.
- Kilpimaa, S., Kuokkanen T. and Lassi U. (2009) Bio-ethanol production from waste potatoes, In: Proceedings of the EnePro Conference, 3.6.2009, Oulu, s. 21-23

- Kilpimaa, S., Kuokkanen, T. and Lassi, U. Bio-ethanol production from waste potatoes (2009) EnePro konferenssi, Advancing Research in the Energy Field at the University of Oulu, 3.6.2009, Oulu
- Kilpimaa, S., Kuokkanen, T. and Lassi, U. (2011) Physical and chemical properties of wood ash from burning and gasification processes. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 879-887.
- Kilpimaa, S., Kuokkanen, T. and Lassi, U. (2011) Chemical and leaching properties of wood ash from burning and gasification processes, submitted for publication in *Chemical Speciation and Bioavailability*.
- Kuokkanen, M. ja Kuokkanen, T. (2009) Puu- ja turvepellettien sekä hakkeen lämpökeskus- ja pienpoltossa syntyvien tuhkien hyötykäyttöön liittyvä tutkimusraportti, Oulun yliopisto, Report Series in Chemistry No. 74. 45 sivua.
- Kuokkanen, M., Kuokkanen, T., Nurmesniemi, H. and Pöykiö, R. (2009) Wood pellet ash – a potential forest fertilizer and soil conditioning agent (a case study), *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, s. 659-667.
- Kuokkanen, M., Kuokkanen, T., Stoor, T., Niinimäki, J. and Pohjonen, V. (2009) Chemical Methods in the Development of Eco-Efficient Wood-based Pellet Production and Technology, *Waste Management & Research*, Volume 27, s.561-571
- Kuokkanen, M., Pöykiö, R., Kuokkanen, T. and Nurmesniemi, H. (2009) Wood ash – a potential forest fertilizer, In: *Proceedings of the EnePro Conference*, 3.6.2009, Oulu, s. 89-93.
- Kuokkanen, M., Prokkola, H., Larkomaa, J., Stoor, T., Siltaloppi L. and Kuokkanen T.: Specific Staining and Optical Microscopy – a New Method for Characterization of Starch-containing Wood Pellets. - Special Issue of *Research Journal of Chemistry and Environment*, *Proceedings of ICCE-2009*, 2010, 311-317.
- Kuokkanen, T., Kaakinen, J., Kuokkanen, M., Prokkola, H. and Lassi, U. (2009) Jättemateriaalien hyödyntämiseen liittyviä kemiallisia tutkimuksia, *EnePro Conference*, Advancing Research in the Energy Field at the University of Oulu, 3.6.2009, Oulu
- Kuokkanen, V. (2010) tutkimusprojekti Tutkimusraportti eräiden rakeistettujen tuhkien kemiallisista ominaisuuksista ja kokeiluista adsorbenttimateriaalina jätevesien puhdistuksessa.
- Lahti R. Synteesikaasun katalyyttinen konvertointi Fischer-Tropsch synteesin avulla liikennepolttoaineiksi, pro gradu -tutkielma (2010).
- Lassi, U., Granö, U-P., Tynjälä, P., Kuokkanen, T. and Muilu, Y. (2009) Refining of new products and raw materials by gasification of biomass, In: *Proceedings of the EnePro Conference*, 3.6.2009, Oulu, s. 32-35.
- Marklund, M. and Engström F. (2010) Water spray characterization of a coaxial air-assisted swirling atomizer at sonic conditions. *Atomization and Sprays* 20(11):955–963.
- Marklund, M., Hedman, H., Weiland, F. And Gebart, R. (2011) Pilot gasification plant for syngas generation from forest residues. *Proc. Nordic Wood Bio refinery Conference*, March 22-24 2011, Stockholm, Sweden.

- Muilo, Y., Pieniniemi, K., Granö, U-P. and Lassi, U. (2010) A novel approach to biomass gasification in a downdraft gasifier. In: 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May, 2010, Lyon, France, p. 688-692.
- Partanen, K., Tiainen, M. and Lassi, U. (2011) Catalysts used in conversion of 5-hydroxymethylfurfural into 2,5-dimethylfuran, submitted to 10th Europa-Cat conference, Glasgow, 2011.
- Pieniniemi, K. and Lassi, U. (2010) Gas emission measurements with a FTIR gas analyzer – verification of the analysis method. In: Proceedings of SkyPro Conference, Clean air research at the University of Oulu, 3.6.2010, Oulu, Finland, p. 117-121.
- Romar, H., Lahti, R., Tynjälä, P. and Lassi, U. (2010) Co and Fe catalysed Fischer-Tropsch synthesis in biofuel production, submitted Topics in Catalysis.
- Romar, H., Lahti, R., Tynjälä, P. and Lassi, U. (2010) Co and Fe catalysed Fischer-Tropsch synthesis in biofuel production, In: Proceedings of 13th Nordic Symposium on Catalysis, Extended abstracts, Helsingör, Denmark, August 29-31, 2010.
- Romar, H., Pieniniemi, K., Tynjälä, P. and Lassi, U. (2010) Sampling and determination of tars in biomass-derived product gas. In: Proceedings of SkyPro Conference, Clean air research at the University of Oulu, 3.6.2010, Oulu, Finland, p. 122-125.
- Romar, H., Tynjälä, P. and Lassi, U. (2011) Effects of early reactions on the Fischer-Tropsch activity and stability over Ru- and Re-enhanced cobalt catalysts, submitted to 10th EuropaCat conference, Glasgow, 2011.
- Runtti, H. (2009), tutkimusprojekti aiheesta Teollisten sivutuotteiden hyödyntäminen vedenkäsittelyssä (projektissa mukana tuhkaliete eräänä adsorbenttina).
- Shu, T. (2009), Co catalysts in Fischer-Tropsch synthesis, opinnäytetyö
- Takkinen, T. Esitutkimus jakeistuksen vaikutuksesta Oulun biotuhkien ominaisuuksiin, pro gradu -tutkielma, valmistuu 2011.
- Tolonen, E. (2010), tutkimusprojekti "Viisivaiheinen sekventiaalinen uutto Kokolan Voiman tuhkalte".
- Tuuttila, T. Biomassan kaasutuksessa muodostuvan synteetikaasun katalyyttinen konvertointi kevyiksi olefiineiksi ja edelleen muoveiksi, raportti (2010)
- Öhrman, O., Häggström, C., Wiinikka, H., Hedlund, J., Gebart, R. Analysis of trace components in synthesis gas generated by black liquor gasification. Submitted to Fuel, 2010.
- Öhrman, O., Johansson, A-C., Lindblom, M., H₂S removal with short time contactors in a pressurized black liquor gasification plant. International Chemical Recovery Conference, Williamsburg, USA, March 29-April 1, 2010.

KIITOKSET HIGHBIO-HANKKEEN RAHOITTAJILLE

EU:n aluekehitysrahasto, Interreg IV A Nord
Lapin liitto & Lapin lääninhallitus, Suomi
Länsstyrelsen i Norrbottens län, Ruotsi
Norrbottens Läns landsting, Ruotsi
Norrbottens forskningsråd, Ruotsi
Luleå Tekniska Universitet, Ruotsi
Energitekniskt Centrum, Ruotsi

Chydenius-Instituutin kannatusyhdistys,
Suomi (HighBio-projektijulkaisu)

Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi

HighBio-projektijulkaisu

HighBio-projektissa, joka on toteutettu heinäkuusta 2008 kesäkuuhun 2011, tuotettiin uutta tietoa biomassan kaasutuksesta, tuotekaasun hyödyntämisestä esim. biopolttoaineiden valmistuksessa ja biokaasutustuhkien hyötykäyttömahdollisuuksista hajautetun energian tuotantoon liittyen. Pienimuotoisissa CHP-yksiköissä voidaan tuottaa samanaikaisesti sähköä ja lämpöä kaasuttamalla puuta ja polttamalla muodostuva tuotekaasu. Kaasutuksella voidaan tuottaa hiukkasvapaata, energiantensiivistä kaasua, joten se on samalla vastaus EU:n yhä tiukentuville ympäristövaatimuksille. Puukaasutusteknologian pioneerityötä ovat tehneet useat Pohjois-Suomen alueella ja Pohjois-Ruotsissa toimivat pk-yritykset, ja tässä kehitystyössä myös HighBio-projekti tutkijoineen on ollut vahvasti mukana.

Hankkeen toteuttajat ovat Suomesta Jyväskylän yliopisto, Kokkolan yliopistokeskus Chydenius (Lead Partner), Oulun yliopisto ja Keski-Pohjanmaan Ammattikorkeakoulu, Centria, Ylivieska. Ruotsista ovat osallistuneet Luleå Tekniska Universitet ja Energitekniskt Centrum, Piteå. Hankkeen päärahoittaja on ollut EU:n Aluekehitysrahasto, Interreg IV A Pohjoinen.

ISBN 978-951-39-4313-4



INTERREG
IV|A|NORD

Gränslösa möjligheter



EUROPEISKA UNIONEN
Europeiska regionala
utvecklingsfonden