

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Kemiantekniikan osasto

Kuitutekniikan laboratorio

Kuitutekniikan osaamiskeskus

Julkaisu 176

# **BIOJALOSTAMO SELLUTEHTAAN NÄKÖKULMASTA**

**DI Tiina Lohi**

**Lappeenranta 2008-2-19**

**ISBN 978-952-214-539-0**

**ISBN 978-952-214-540-6 (PDF)**

**ISSN 1459-2878**

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	2
2	TAUSTA.....	3
3	PUUN RAKENNE JA KEMIALLINEN KOOSTUMUS.....	4
3.1	Selluloosa.....	4
3.2	Hemiselluloosa.....	4
3.3	Ligniini.....	5
3.4	Uuteaineet .....	5
4	BIOMASSA.....	6
5	MIKÄ ON BIOJALOSTAMO?.....	7
6	BIOJALOSTAMO SELLUTEOLLISUUDESSA.....	8
7	ENERGIA.....	11
7.1	Kuoren ja hakkuutähteiden polttaminen.....	15
7.1.1	<i>EU ja Suomi</i> .....	15
7.1.2	<i>Raaka-aine</i> .....	16
7.1.3	<i>CHP ja IGCC</i> .....	19
7.2	Tuulivoimala.....	22
7.3	Mustalipeä.....	23
7.3.1	<i>Kaasutus</i> .....	25
7.3.2	<i>Fischer-Tropsch</i> .....	28
7.4	Ligniini.....	30
7.5	Hemiselluloosa.....	31
8	ETANOLI.....	33
8.1	Vilja.....	35
8.2	Puu .....	35
8.3	Selluloosa.....	36
8.4	Hemiselluloosa.....	36
8.5	Ominaisuuksia ja ympäristövaikutuksia .....	37
9	YHTEENVETO.....	38

## LÄHTEET

# 1 JOHDANTO

Uusista puunjalostustuotteista ovat olleet esillä erityisesti bioenergiaan ja biomateriaaleihin liittyvät tuotteet, funktionaalinen painaminen ja hybridimedia sekä terveystuotteiset elintarvikkeet. Näitä on tutkittu ja kehitetty pitkään, mutta vasta viimeaikaiset muutokset ovat nostaneet ne mielenkiinnon kohteeksi. /1/.

Kemiallinen sellu- ja paperitehdas voi vaihtua integroiduksi metsäbiojalostamoksi, IFBR:ksi, mikä tuottaa uusia biomateriaaleja paperituotteiden lisäksi. Tämä voi johtaa kasvavaan lisäarvoon tehtaalla sekä kasvihuonekaasujen pitoisuuden kontrollointiin. Varsin houkuttelevaa on parantunut kannattavuus, mikä tuottaa uusia tuotteita, diesel polttoainetta ja sellua. Muut kannustimet ovat investointi pääoman säilyttäminen, ydin bisneksen suojeleminen ja uusien työpaikkojen luominen. /2/.

Globaali kehitys on tehnyt energian hankinnasta yhden keskeisimmistä ongelmista tulevina vuosikymmeninä. Yhteisenä ongelmana on myös fossiilisten polttoaineiden CO<sub>2</sub> päästöjen rajoittaminen. Selluloosa on kaikkein runsain orgaaninen kemikaali maailmassa, jonka keskimääräinen tuotanto on 90 miljardia tonnia vuodessa. /3/. Luku on käsittämättömän suuri, kun vastaavasti maailman puunkulutus on 4,5 miljardia kuutiometriä vuodessa ja maailman paperi- ja kartonkituotanto yli 400 milj. t vuodessa, josta noin puolet uusiomassaa. /4/.

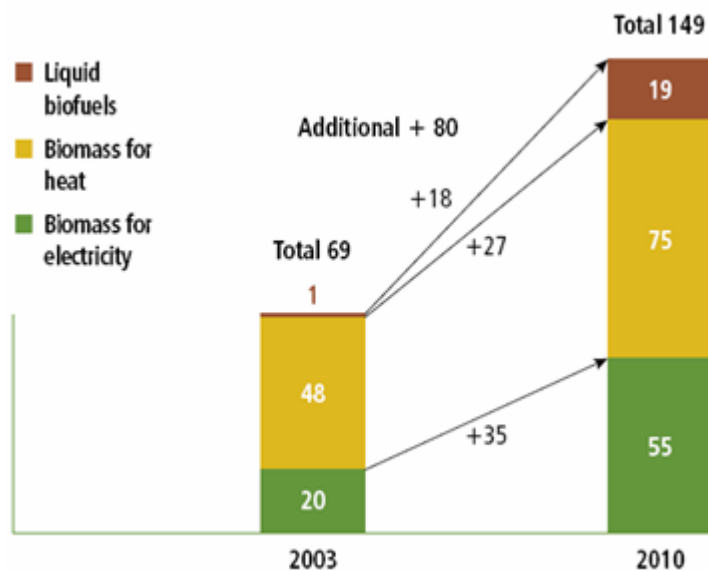
Kansainvälisen kilpailun johdosta puupohjaisen sellun hinta on laskenut noin 1 % vuodessa. Puu- ja biomassakustannukset korreloivat energian hinnan kanssa, jolloin raaka-aine kallistuu. Tämän seurauksena perinteinen metsäteollisuus tarvitsee lisätuloja puu, sellu ja paperituotteiden rinnalle. /5/.

## 2 TAUSTA

Fossiilisten energiamuotojen, erityisesti öljyn ja kaasun, reaalihintojen nousu, ilmastonmuutoksen hillitseminen, tuontienergiaan liittyvä epävarmuus ja tarve hajautettuun energiantuotantoon lisäävät biojalostamoiden kannattavuutta ja houkuttelevuutta. Lisäksi biopolttoaineiden ja erityisesti etanolin kansainvälinen kauppa on kehittynyt erittäin voimakkaasti. Tutkimus- ja kehitystyö mahdollistaa biojalostamoiden tuotantokustannusten alentamisen. /1/.

Biojalostamoiden kiinnostukseen vaikuttavia EU:n vaikuttimia ovat mm. seuraavat strategiat ja direktiivit /6/:

- Ilmastostrategia
- EU Biofuels Directive, jonka ohjearvona v. 2010 on 5,75 % ja 2 % 2005. Tällä hetkellä Suomessa bio- ja uusiutuvien polttoaineiden osuus liikennepolttoaineissa on noin 0,5 %. /7/.
- EU Green Paper energiahuoltostrategia, tavoitteena v. 2020 10 % maakaasua, 8 % biopolttoaineita sekä 2 % vetyä
- EU Biofuels for Transport – Technology Platform: visio 25 % v. 2030
- EU Biomass Action Plan (2005/628), kuva 1
- EU Strategy for Biofuels (2006/34)



Kuva 1. EU Biomass Action Plan tavoitteet, Mt. /8/.

## 3 PUUN RAKENNE JA KEMIALLINEN KOOSTUMUS

### 3.1 Selluloosa

Selluloosa on suurin uusiutuva polymeerilähde maailmassa. On arvioitu, että fotosynteesissä syntetisoituu keskimäärin  $10^{11}$ :sta aina  $10^{12}$  tonnia selluloosaa, melko puhtaassa muodossa. Suuri osa on yhdistynyt ligniinin ja muiden polysakkaridien (hemiselluloosan) kanssa soluseinässä. /9/.

Taulukko 1. Tyypillisten selluloosapitoisten kasvien kemiallinen koostumus /9/.

Lähde	Selluloosapitoisuus, %	Hemiselluloosa	Ligniini	Uuteaineet
Lehtipuu	43–47	25–35	16–24	2-8
Havupuu	40–44	25–29	25–31	1-5
Bagassi	40	30	20	10
Kookoskuitu	32–43	10–20	43–49	4
Maissitähkä	45	35	15	5
Maissin varsi	35	25	35	5
Puuvilla	95	2	1	0,4
Pellava (liotettu)	71	21	2	6
Pellava (liottamaton)	63	12	3	13
Hamppu	70	22	6	2
Juutti	71	14	13	2
Sisal	73	14	11	2
Vehnän olki	30	50	15	5

### 3.2 Hemiselluloosa

Hemiselluloosat ovat heteropolysakkariideja, jotka eroavat selluloosasta koostumukseltaan. Hemiselluloosan pääketju voi koostua vain yhdestä, kahdesta tai useammasta yksiköstä. /9/. Hemiselluloosassa on kaksi pääluokkaa, glukomannaani ja

ksylaani. Vallitseva hemiselluloosa havupuissa on asetyyli-galaktoglukomannaani noin 20 w/w % ja lehtipuissa glukuroniksyylaani 15–30 w/w %. Alkalisissa olosuhteissa glukomannaani on nopeasti pilkkoutunut, kun taas ksylaani on liuennut oligomeerisessä muodossa. Tästä johtuen kuumat alkaliset käsittelyt ovat sopivia lehtipuille, mutta eivät havupuille. /2/.

Hemiselluloosien tehtävä elävässä puussa on antaa puuainekselle sitkeyttä. Ne sitovat voimakkaasti vettä muodostaen yhdessä ligniinin kanssa joustavan matriisin, jossa lujuutta antavat selluloosafibrillit voivat liikkua toisiinsa nähden. Useimpien sellukuitupohjaisten tuotteiden sisältämällä hemiselluloosilla ei ole toiminnallista tehtävää, joten niitä voidaan pitää hyödyttöminä tuotteen massaa nostavina ainesosina. /10/.

### **3.3 Ligniini**

Kolmas suuri soluseinän polymeeri on ligniini. Selluloosan jälkeen, ligniini on suurin ja tärkein viljeltävä polymeerinen, orgaaninen aine. Ligniinin määrä kasveissa on melko vaihteleva, kun taas puulajeissa ligniinipitoisuus on 20–40 %. Ligniinin jakautuminen soluseinässä ja ligniinipitoisuus puun eri osissa ei ole tasainen. /9/.

### **3.4 Uuteaineet**

Rakenteellisten pääkomponenttien lisäksi puu koostuu myös suuresta määrästä muita alhaisen- ja korkean molekyylipainon yhdisteitä. Näitä kutsutaan lisäyhdisteiksi tai uuteaineiksi. Nämä yhdisteet voidaan uuttaa puusta orgaanisella liuottimella (terpeenit, rasvat, vahat ja fenolit) tai kuumalla vedellä (tanniinit ja epäorgaaniset suolat). /9/.

## 4 BIOMASSA

Biomassa koostuu biokompostoituvista tuotteista, jätteistä ja maatalousjätteistä (sisältäen kasvi- ja eläinaineksen), metsä- ja siihen kuuluvan teollisuuden jätevirroista, kuten myös biohajoavasta materiaalista teollisuudesta ja kunnallisjätteistä. /8/.

Biomassaa on toki hyödynnetty jo vuosikymmenet ja sitä käytetään erilaisten tuotteiden raaka-aineena. Autoihin on saatavilla biokomponenteilla täydennettyjä polttoainelaatuja, voimalaitoksissa käytetään energianlähteenä esimerkiksi puunkorjuun hakkuutähteitä, ja onhan metsäteollisuudenkin käyttämä kuitupuu myös biomassaa. Vielä kyse on kuitenkin ”täsmäbiomassasta”. Biojalostamosta voidaan puhua vasta, kun raaka-aineena voidaan käyttää edullista yleisbiomassaa. /11/.

Taulukoon 2 on koottu nykyiset ja tulevaisuuden biomassavarat EU:n alueella. Taulukosta nähdään, että pitkällä aikavälillä energiaviljakasvit (sokeri-, tärkkelys-, öljyviljakasvit) voivat olla tärkeä biomassan lähde. Nykyisin jätteet, puu-, maatalous-, kunnallis- tai teollisuusjätteen muodossa, ovat biomassan päälähde ja tärkeitä polttoaineita energian tuottamiseksi. Lisäksi ylijäämän, kunnallisjätteiden ja lietteen käytöstä on myös ympäristölle hyötyä. /12/.

Taulukko 2. Biomassavarat EU:ssa /12/.

<b>Raaka-aine</b>	<b>Nykyinen resurssi (kuivaa) Mt/a</b>	<b>Tulevaisuuden resurssi (kuivaa), Mt/a</b>
Lyhyen kierron metsä	5	75–150
Puujäte	50	70
Energia viljakasvit	-	250–750
Maatalousjäte	100	100
Kunnallisjäte	60	75
Teollisuusjäte	90	100

Kiinnostus hyödyntää puuta monimuotoisemmin on herännyt useista eri syistä /13/:

- Puu on uusiutuva luonnonvara ja täyttää siksi kestävän kehityksen vaatimukset
- Puu avaa CO<sub>2</sub> neutraalin kehityspolun kemian- ja energiateollisuudelle
- Öljyn hinta on noussut tasolle jossa puu raaka-aineena on mahdollinen
- Puu sisältää rakenteita ja yhdisteitä jotka ovat liian arvokkaita suoraan poltettavaksi.

Metsäbiomassan hyvä puoli on, että siitä valmistettuihin jalosteisiin sitoutuu huomattavasti vähemmän fossiilisia polttoaineita kuin käytettäessä esimerkiksi sokeriruokoa, ohraa tai vehnää. Siksi metsäbiomassa on tulevaisuudessa entistä kilpailukykyisempi raaka-aine. /1/.

## **5 MIKÄ ON BIOJALOSTAMO?**

Biorefinery eli suomeksi biojalostamo tarkoittaa tehdasta tai useiden tehtaiden kokonaisuutta, missä puupohjaisista tai muista biopohjaisista sivutuotteista tai jätteistä valmistetaan, fossiilisten raaka-aineiden sijaan, energiaa, kemikaaleja ja muita tuotteita. Lisäksi biojalostamon ideana on tuottaa minimaalinen määrä tai ei lainkaan ympäristövaikutuksia. /1, 14, 15, 16, 17/.

Syitä biojalostamon kiinnostukseen ovat kilpailukyvyyn parantaminen, öljyn hinnan nousu sekä kestävän kehityksen tavoitteiden ohjaamana metsäteollisuuden tulee pyrkiä hyödyntämään puuta yhä laajemmin ja useampiin tuotteisiin ja käyttökohteisiin. Biojalostamo-termi yhdistetään erityisesti uusien bioenergiatuotteiden, kuten toisen sukupolven biodieselin, bioetanolin ja kemiantuotteiden valmistukseen. Tulevaisuuden biojalostamojen tuotevalikoimaan voivat kuulua esimerkiksi liikenteen biopolttoaineet, sähkö ja kaukolämpö, sellu ja paperi, erilaiset kemikaalit, ravintoaineet – mielikuvitus on kattona. /1, 11, 13/.



Biojalostamo prosessoi biomassaa tuotteiksi, joiden keskinäistä määrää voi muutella myös kannattavuusnäkökohtien perusteella. Jalostamo voi toimia joko erillisenä tai integroituna massa-, paperi- tai kartonkitehtaaseen. /1/. Erillisenä yksikkönä toimiva biojalostamo käyttää lämpö- ja kemikaaliprosessia puupohjaisen biomassan muuttamiseksi polttoainepohjaiseksi etanoliksi, synteetikaasuksi, hyötykemikaaliksi, muovin raaka-aineeksi, farmasia ja muiksi korkea-arvoisiksi kemikaaleiksi. Integroitu biojalostamo, osana sellutehdasta, uuttaa ja muuntaa keittokomponentteja ja käyttää hyödyksi selluprosessin jätesivuvirtoja. /18/.

## **6 BIOJALOSTAMO SELLUTEOLLISUUDESSA**

Energiakustannukset, energian hankinta ja ilmastonmuutos ovat pääasioita, jotka vaikuttavat metsäteollisuuden tulevaisuuteen. Niillä on vaikutusta valmistuskustannuksiin, kuten myös investointeihin ympäri maailmaa. Biomassan kasvava kiinnostus energialähteenä voi toisaalta kasvattaa puun hintaa, mutta voi toisaalta avata uusia markkinoita metsäklusterille. Sellun rinnakkaistuotteet ja muut biomassatuotteet voivat johtaa uusiin bisnesmoduuleihin ja korkeampaan energiatehokkuuteen. /19/.

Perinteiset sellun ja paperin valmistajat ovat kohtaamassa uusia kilpailijoita trooppiselta ja subtrooppiselta alueelta. Kilpailijat käyttävät viimeisintä teknologiaa, ja heillä on puu- ja työvoimakustannusetu. Kasvavan globaalien kilpailun johdosta tuotteiden hinnat jatkavat laskuaan. Pysyäkseen elinkelpoisena, perinteisten tuottajien on kasvatettava tulojaan tuottamalla bioenergiaa ja biomateriaaleja puun, sellun ja paperin lisäksi. Niin kutsutussa Integrated Products Biorefinery (IFBR) kaikki tuotantolinjat ovat integroituja ja energiatehokkaita. Tulevaisuudessa emme puhuisi enää vain massa- ja paperitehtaasta vaan biojalostamosta. /1, 2/

Sellutehtaaseen integroitu jalostamo tarjoaa useita mahdollisuuksia verrattuna erillisenä yksikkönä toimivaan biojalostamoon. Tehtaan infrastruktuuria biomassan keräilyyn, käsittelyyn ja prosessointiin voidaan käyttää hyödyksi. Metanolin valmistuskustannukset

biomassasta, kun kyseessä on integroitu biojalostamo, ovat arviolta 20 % alhaisempia kuin tuotanto stand-alone tuotantolaitoksessa. /20/.

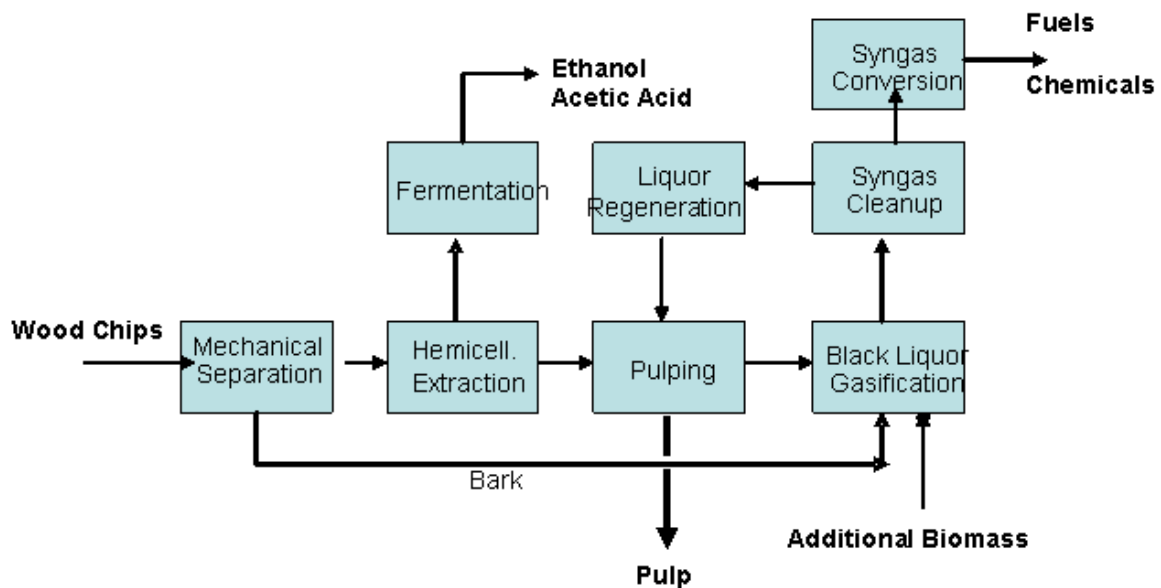
Sellutehtaan biojalostamon määritelmän mukaan, tavoitteena on biomassan ja muiden raaka-aineiden, mukaan lukien energian, täydellinen hyväksikäyttö sekä yhtäaikainen kuitujen, kemikaalien ja energian tuottaminen. Sellutehtaat esimerkiksi tekevät mustalipeää polttamalla sähköä viereiselle paperitehtaalle ja jopa tehtaan ulkopuolelle. Kaukana ei ole ajatus muunkinlaisten tuotteiden valmistamisesta sellutehtaan kyljessä. Sellutehtaan tuloja voidaan parantaa maksimoimalla sellun tuotanto sekä tekemällä etanolia, kemikaaleja ja polymeerejä hemiselluloosasta. Lisäksi kuljetuspolttoaineita voidaan valmistaa ligniinistä sekä kuorta ja biomassaa voidaan käyttää sellutehtaan polttoaineena. Ajatus ei ole kaukaa haettu, koska aikanaan sulfiittisellutehtaan jäteliemiä hyödynnettiin etanolin ja pekiloproteiinin valmistuksessa. /5, 17, 21/.

Biojalostamot ovat looginen kehitys metsäteollisuudelle. Teollisuus kontrolloi paljon raaka-ainetta ja tarvittavaa infrastruktuuria. Lisäksi sellu ja paperitehtaat keräävät ja prosessoivat biomassaa. Myös teollisuus itsessään, jota uusi globaali kilpailu on kovasti rasittanut, hyötyy biojalostamosta. /18/. Sellu- ja paperiteollisuus on ainutlaatuisessa asemassa. Heillä on mahdollisuus parantaa energiatehokkuutta ja laskea CO<sub>2</sub> päästöjä. Toimialalla on kyky tulla energiatuotteiden verkkotoimittajaksi sekä olla tärkeä toimija CO<sub>2</sub>:n poistajana ilmakehästä. Valitettavasti visio ei kuitenkaan toteudu yhdessä yössä. /19/.

Taulukko 3. Biojalostamon prosessit ja tuotteet /22/.

<b>Prosessit</b>	<b>Tuotteet</b>
Uutteet	Hemiselluloosa ja sokerit
Uutteiden jalostus	Etanoli, polymeerit ja kemikaalit
Pyrolyysi	Hartsit/puukomposiitit
Puu/mustalipeän kaasutus	Synteesikaasu
Kaasun jalostus	Sähkö, nestemäiset liikennepolttoaineet

Biojalostamossa puusta erotetaan eri fraktioita, joita jatkojalostetaan kemiallisen metsä-, kemian-, energia- ja rakennusteollisuuden komponenteiksi ja tuotteiksi. Kemiallisella sellutehtaalla on ainutlaatuinen edellytys laaja alaiseen puupohjaisten ”vihreiden” polymeerien ja muiden materiaalien ja kemikaalien tuotantoon. Fraktiointi voi tapahtua eri tavoin, puuraaka-ainetta uuttamalla, sellukeiton eri vaiheissa jätelipeästä erottamalla tai erilaisista kierroista erottamalla. Kuvan 2 konseptissa hakkeesta on uutettu keitossa hemiselluloosa ja sokerit käymisprosessin kautta ja muutettu etanolipolttoaineeksi. Moderni sulfaattisellutehdas tuottaa melkoisen määrän orgaanisia sivutuotteita mustalipeän ja kuoren muodossa. Keiton mustalipeä on kuvassa kaasutettu ja kaasutuksesta syntyvä synteettinen kaasu on käytetty polttoaineiden, kemikaalien tai sähkön tuotantoon. Lisäksi biomassaa voidaan lisätä kaasutukseen nostamaan polttoaineiden tai kemikaalien tuotantoa. Lisäksi mahdollisia hyödynnettäviä fraktioita ovat eri uuteaineet, hiilihydraatit ja ligniini. Tavoitteena on hyödyntää ja jalostaa puuraaka-ainetta mahdollisimman pitkälle ja kannattavasti. /13, 20, 21/.



Kuva 2. Diagrammi integroidusta puupohjaisesta biojalostamosta. /20/.

Sellutehtaalla biojalostamo tuo mahdollisuuden muuntaa enemmän raaka-ainetta tuotteiksi ja parantaa tehtaan kannattavuutta. On arvioitu, että USA:n metsäteollisuuden on mahdollista tuottaa 1,9 miljardia gallonia (1 nestegallona (USA) = 3,785 litraa)

etanolia ja 600 miljoonaa galloniaa etikkahappoa uuttamalla hemiselluloosat keitosta. Mustalipeän kaasutus voi potentiaalisesti tuottaa 116 miljoonaa BOE sähköenergiaa (BOE = 6,1 GJ) tai  $10^9$  miljoonaa barreliä (barrel = 117,35 l) nestemäisiä polttoaineita ja kemikaaleja. /20/.

Eurooppalainen metsäteollisuus ja suomalainen metsäklusteri ovat linjanneet biojalostamon yhdeksi keskeiseksi pitkän aikavälin kehityskohteeksi. Biojalostamoiden kannattavuus näyttääkin erityisen hyvältä, kun ne yhdistyvät metsäteollisuuteen. Teollisen mittakaavan jalostamo voi toimia Suomessa mahdollisesti viiden vuoden kuluttua, muualla jo ennen vuotta 2010. Kuitenkin biojalostamoksi muuttaminen voi olla suuresti yksilöllistä – varovaisesti räätälöity jokaiselle tehtaalle erikseen. /1, 23, 24/.

## 7 ENERGIA

Maailmanlaajuisesti energian kulutuksen odotetaan kasvavan yli 70 % prosenttia vuoteen 2020 mennessä. Kasvava energiantarve lisää fossiilisten polttoaineiden käyttöä, mikä on riski maapallon ilmastolle. Tämä lisää tarvetta vastata energian kysynnän kasvuun sekä säästää energiaa ja ympäristöä. Tarvitaan yhä monipuolisempia vaihtoehtoja energian tuotantoon. /25/. Kuten kuvasta 1 nähtiin, tavoitteena on käyttää puolet biomassasta lämmön tuotantoon. Toisena merkittävänä kasvajana on biomassan käyttö sähkön tuotantoon. Vaikka biopolttoaineet ovat saaneet suuren huomion osakseen, on tämä vasta kolmantena käyttökohteena, vaikkakin käytön toivotaan 18-kertaistuvan.

Biojalostamokonseptin toteuttamiseksi on useita eri tapoja. Tutkimuksessa rajaamme biojalostamon käsittelemään etupäässä energiaa. Tehdas, joka kuluttaa haketta 1,4 milj. t tuottaa 0,6 milj. t tuotetta, pääasiassa sellua. Sivutuotteita syntyy 0,8 milj. t, mitkä ovat pääasiassa mustalipeän ligniiniä ja joitain hiilihydraatteja. Nämä käytetään energian tuotantoon. Lisäksi metsänhoito jäännökset ja kuori käytetään energian tuotantoon. /26/.

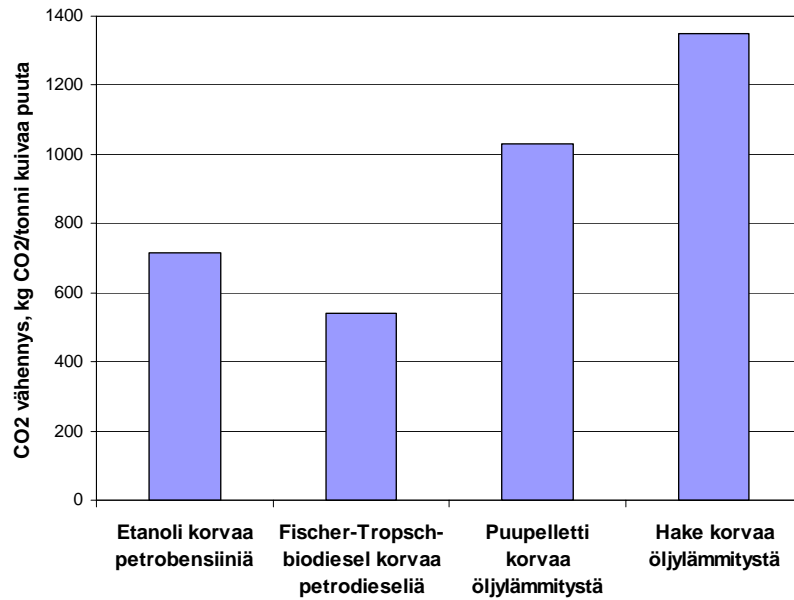
Puupolttoaineesta 80 % on peräisin metsäteollisuuden sivutuotteista, joista tärkeimmät ovat mustalipeä, kuori ja puru. Näiden käyttö on suoraan verrannollinen sahauksen,

selluloosan ja paperin tuotannon määrään. Mustalipeä ja kuori ohjautuvat lähes kokonaan energian tuotantoon, mutta esimerkiksi purulla ja kutterilla on vaihtoehtoisia käyttökohteita. Purusta lähes 60 % käytetään energiantuotantoon ja loput selluntuotantoon ja lastulevyjen valmistukseen. /7/.

Selluloosa, mikä on enimmäkseen hiiltä molekyylipainon perusteella, on runsain orgaaninen kemikaali maailmassa. Keskimääräinen tuotanto on 90 miljardia tonnia vuodessa. Mitattaessa energiatermein, vuosittainen hiilen tuotanto kasvimateriaaleina (ruoho, puut, kukat, viljat jne.) on 10-kertainen maailman vuosittaiseen energiankulutukseen verrattuna. /27/.

Sellu- ja paperiteollisuus on neljänneksi suurin energian kuluttaja maailmassa. Toisin kuin muut teollisuuden alat, sellu- ja paperiteollisuus myös tuottaa energiaa sivutuotteista ja saa biomassasta noin 50 % omasta energian tarpeestaan. Pitkällä aikavälillä teollisuudesta voi jopa kehittyä puhtaan energian toimittaja, jos biomassaa käytetään tehokkaasti. Nykyään sulfaattisellutehdas tuottaa jo ylimääräenergiaa, mikä myydään toisille teollisille käyttäjille; paikalliselle energiayhtiölle lämpönä tai sähköä. Esimerkkinä mainittakoon, että moderni sulfaattisellutehdas tuottaa 3,1 GJ ylimäärä polttoainetta ja 540 kWh sähköä/tonni sellua. /19/.

Metsätoimiala on yksi harvoista toimialoista maailmassa, jolla on potentiaalia tulla kokonaan hiilineutraaliksi. Puuenergia on ympäristöystävällistä ja hiilidioksidipäästöt on määritelty kasvihuoneutraaleiksi. Tästä johtuen metsät ovat valtava potentiaali pienentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta ja kasvihuonekaasujen emissiota muuntamalla metsämateriaali nestemäisiksi polttoaineiksi, sähköksi jne. Lisäksi ne eivät lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, koska hiilidioksidi sitoutuu nopeasti uuteen kasvuun tai vapautuu joka tapauksessa esimerkiksi hakkuutähteiden lahotessa. Myös tuotanto, kuljetus, maankäyttö ja varastointi on mahdollista tehdä hiilineutraalisti. Mutta paljon on tehtävä ennen kuin neutralointi on saavutettu. /27, 28, 29/. Kuvasta 3 nähdään miten puun käyttö energiana vaikuttaa hiilidioksidipäätöihin.

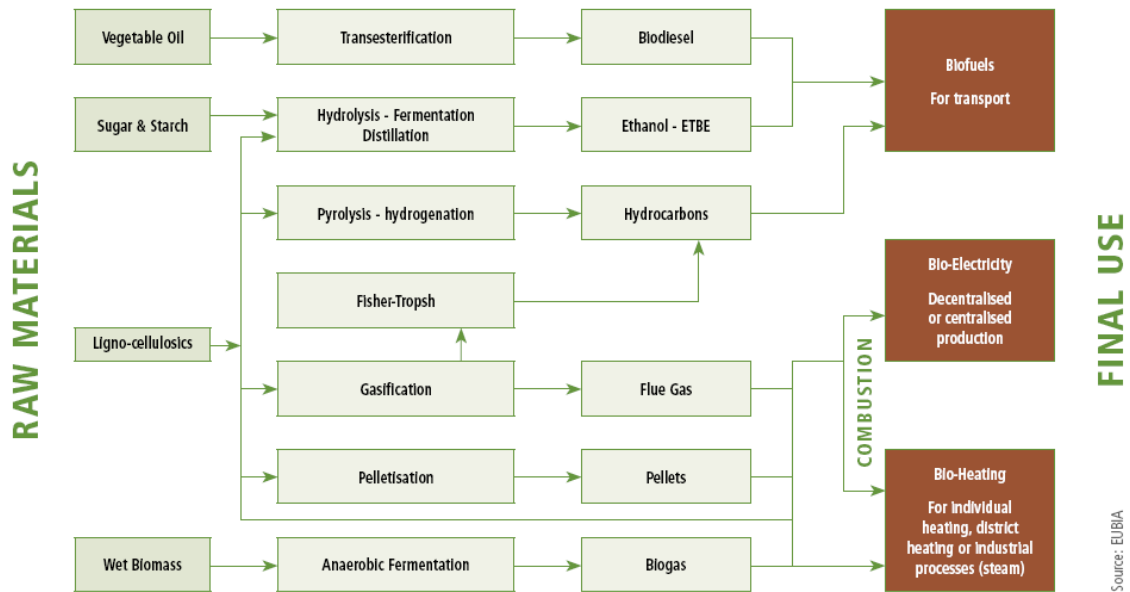


Kuva 3. Puunkäyttö energiaksi – hiilidioksidipäästöjen vähennys. /53/.

Bioenergia sektorilla biomassalähteitä voidaan käyttää kolmella tavalla:

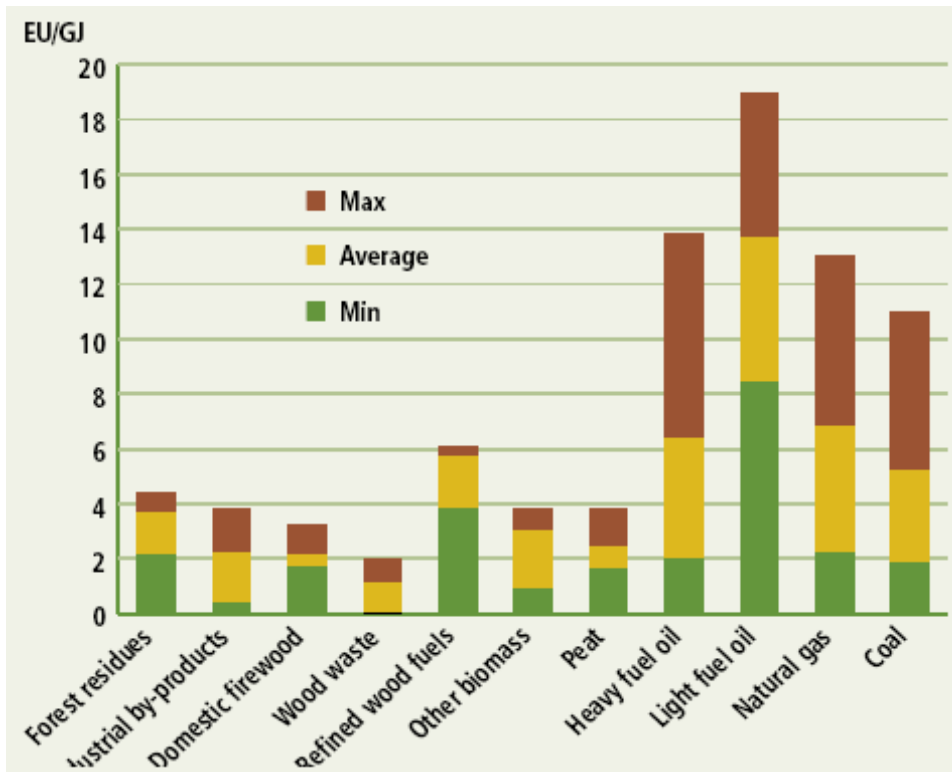
- Biomassa lämmitystarkoitukseen (biolämmitys)
- Biomassa sähkön tuotantoon (biosähkö)
- Biomassa liikennepolttoaineiksi (liikenne biopolttoaineet)

Kaaviokuva 4 esittää eri mahdollisuudet muuntaa biomassaa raaka-aineesta lopputuotteeksi. /8/.



Kuva 4. Biomassan muuntoprosessi lopputuotteeksi. /8/.

Bioenergiapotentiaali on hyvin laaja ja laajalti levinnyt ympäri maailmaa. Nykyään, biomassa on jo merkittävä avustaja maailman kokonaisenergian tarpeessa ja tavoittelee 12 % maailman kokonaistarpeesta. Käyttö on pääasiassa pohjautunut maatalous- metsäjäätteisiin ja luonnon metsiin. /8/. Kuten kuvasta 5 nähdään, biomassa on lisäksi halvempaa kuin fossiiliset polttoaineet.



Kuva 5. Polttoaineiden hinnat teollisissa energialaitoksissa Baltian maissa 2004 /8/.

Suomen tavoitteena on kaksinkertaistaa biopolttoaineiden käyttö seuraavien 20 vuoden aikana. Tällöin Suomen omavaraisuus energiasta olisi noin 40 %. Suomen energiatuotannosta lähes viidesosa tuotetaan nyt uusiutuvalla luonnonvaralla eli puulla. Suomen suurin bioenergian tuottaja on metsäteollisuus, jonka polttoaineista yli 70 % on peräisin puusta. Valtaosa tehdaspolttoaineesta on mustalipeää, mikä poltetaan kemikaalien regeneroimiseksi. Samalla syntyy energiaa. /30/.

## 7.1 Kuoren ja hakkuutähteiden polttaminen

### 7.1.1 EU ja Suomi

Vuosituhanen vaihteessa, kun Suomen energia- ja ilmastostrategiat hyväksyttiin, metsähakkeen käytön tavoitteeksi asetettiin 5 milj. m<sup>3</sup> vuoteen 2010 mennessä. Tarvittava hakemäärä voidaan kerätä kolmesta lähteestä, esimerkiksi 2,5 milj. m<sup>3</sup> hakkuutähdettä, 1,5 milj. m<sup>3</sup> kantomursketta ja 1 milj. m<sup>3</sup> nuorista metsistä saatavaa pienpuuhaketta. /31/.



Lisäksi Suomessa energia- ja ilmastostrategioiden tavoitteena on lisätä puupolttoaineen käyttöä 15 miljoonaa kiintokuutiometriä vuoteen 2010 mennessä. Myös EU on asettanut vuonna 2004 uusia tavoitteita biomassan energiankäytön lisäämiseksi. Euroopan bioenergiayhdistysten kattojärjestelmä AEBIOM tavoittelee 15 % biosähkön osuutta vuonna 2010. /28/.

Vuonna 2004 Suomessa käytetyn puun kokonaismäärästä poltettiin 46 %. Paperiin ja kartonkiin sitoutui 24 %, sahatavaraan 14, puulevyihin 4 sekä vientimassoihin 5 % puuaineksesta. Polttoainekäytön suuri osuus johtuu pääasiassa metsäteollisuuden puuainekäytön kuten kuoren ja jäteliemien poltosta. Osuudet eivät ole 2000-luvulla merkittävästi vaihdelleet, vaikka polton osuutta kasvattaa nykyisin myös metsähakkeen lisääntynyt käyttö energiantuotannossa. Määrät on laskettu puun kuiva-aineena. /32/.

Noin 35 % EU:n metsien vuotuisesta puunkasvusta jää hyödyntämättä. Monissa maissa markkinat pienikokoiselle harvennuspuulle, jota voidaan käyttää lämmön ja sähkön tuotannossa, ovat suppeat. Komissio aikookin tarkastella puun ja puutähteen energiakäytön vaikutuksia puunjalostusteollisuuden kannalta. /33/. On kuitenkin huomioitava, että pääosa maapallon puuvaroista poltetaan hyvin huonolla hyötösuhteella kehitysmaissa. /4/.

### **7.1.2 Raaka-aine**

Puuperäisten polttoaineiden käyttöä on mahdollista kasvattaa lähinnä lisäämällä metsähakkeen käyttöä. Metsähakkeen käyttö on noussut nopeasti ja tällä hetkellä sitä käytetään energiantuotantoon vajaat 3 milj. m<sup>3</sup>. Teknistaloudellisesti käytettävissä olevan potentiaalin on arvioitu olevan noin 30 TWh vuodessa, joka koostuu harvennus- ja päätehakkuiden yhteydessä syntyvistä hakkuutähteistä, rangoista ja kannoista. Jatkossa metsähakkeen käytön odotetaan edelleen lisääntyvän merkittävästi. Puupolttoaineiden käyttöä on mahdollista lisätä sekä rakennusten lämmityksessä että sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. /7, 28/.

Ensiharvennusten päätuote on kuitupuu, jonka ensisijainen käyttökohde on metsäteollisuudessa. Kuitenkin keskimäärin neljännes ensiharvennusten runkopuupoistumasta jää hakkuutähteeksi. Ainespuun minimiläpimitta vaikuttaa oleellisesti kertymän jakautumiseen aines- ja energiapuuosioon. Leimikkotasolla männikön ensiharvennuksessa minimiläpimitan nostaminen 7 senttimetrinä 9 senttimetriin siirtää ainespuukertymästä 24 prosenttia energiapuuksi ja laskeminen 7 senttimetrinä 5 senttimetriin puolestaan kasvattaa ainespuukertymää 15 prosenttia. Koko Suomen energiapuuharvennusten biomassapotentiaali on 4 milj. m<sup>3</sup>/vuosi, josta 3 milj. m<sup>3</sup> on kuorellista runkopuuta ja loput latvusmassaa. /7/.

Puu kotimaisena polttoaineena vähentää riippuvuutta tuontipolttoaineista. Puu on paikallinen polttoaine, sillä sen kuljettaminen kauaksi ei ole taloudellisesti kannattavaa. Raaka-aine pyritään löytämään läheltä voimalaitoksia, mihin metsämaitten kannot ovat yksi ratkaisu. Myös rakentamisen alle jääviltä tiealueilta, rakennuspaikoilta ja tonteilta voidaan korjata kantoja energiakäyttöön, jolloin niitä ei tarvitse läjittää kaatopaikoille. Kaatopaikkamaksujen noustessa näiden alueiden merkitys korostuu entisestään. Puupolttoaineilla voidaan korvata erityisesti turvetta, mikäli puuta on saatavilla kilpailukykyiseen hintaan. /28, 31/.

Metsähakkeen käyttö on kasvanut viime vuosina. Pääosa metsäpolttoaineista/metsähakkeesta saadaan kuusikoitten uudistushakkuiden oksista ja hukkarunkopuusta sekä nuorten harvennuskasvien pienpuusta. Näiden lisäksi uudistusalojen kannot ovat mittava raaka-aineresurssi. Kuusikoitten uudistusalojen kannoista saadaan polttoainetta enemmän kuin hakkuutähteistä. /31/. Metsähakkeesta arvioidaan käytettävän entistä suurempi osa kaukolämmön tuotannossa, koska pellettien valmistus vie merkittävän osan aiemmin kaukolämpösektorille ohjautuneista metsäteollisuuden sivutuotteista. /28/.

Pelletit ovat aivan viime vuosina nousseet kasvavan mielenkiinnon kohteeksi. Suomessa pellettituotanto on noin 300 000 t, josta suurin osa menee vientiin. Pellettienergiayhdistys on arvioinut, että vuoteen 2010 mennessä tuotanto voitaisiin nostaa 1,1 miljoonaan

tonniin. Tämä antaa mahdollisuuksia sahojen ja vaneritehtaiden sivutuotteiden käytön monipuolistamiseen alueellisesti, ja johtaa sahanpurun osalta selvään kilpailutilanteeseen sahojen oman energiakäytön ja jopa selluteollisuudelle toimitusten kanssa. Alueellisesti on myös mahdollista, että sahat voivat ryhtyä toimittamaan nykyistä enemmän omien sivutuotteidensa polttoon pohjautuvaa kaukolämpöä läheisiin taajamiin, jos lämpöenergian hinta nousee. /7/.

Polttoaineen tuotannon lisäksi kantojen nostolla on tavoitteena estää juurikäpäsienien leviäminen maaperässä ja siten vähentää seuraavan metsä sukupolven lahovaurioita. Samoin tukkimiehintäin tuhot vähenevät. Toisaalta voi myös käydä niin, että kun muuta ravintoa ei enää ole jäljellä, tukkimiehintäit syövät viljelytaimet. Kuusen kanto- ja juuripuun tilavuusarvo on 25–30 % rungon tilavuusarvosta, kuivamassasta enemmänkin. Kantoja nostettaessa maan pintaa ja humuskerrosta avataan mahdollisimman vähän maanpinnan rikkoutumisen ja ravinteiden huuhtoutumisen minimoimiseksi. Oikein hankittuna kantoenergiaa saadaan hehtaarilta lähes 200 MWh. /7, 31/.

Puuperäisen bioenergian käytön lisääntyminen ei kuitenkaan ole ongelmatonta. Metsäteollisuus on huolestunut puuperäisen bioenergian lisääntyvän käytön vaikutuksista raaka-aineen saantiin ja kustannusten nousuun, jos suhteellinen niukkuus puuraaka-aineesta lisääntyy. Metsäteollisuus on myös viitannut siihen, että jalostusarvoltaan arvokkaampi hyödyntämistapa on metsäteollisuustuotteet kuin energiakäyttö. Toisaalta bioenergian lisääntyvään käyttöön liittyy metsäteollisuudenkin näkökulmasta uusia mahdollisuuksia sekä kannattavuuden että imagon parantamisen kannalta. /7/.

Turve luokitellaan tällä hetkellä omaan polttoainekategoriaan IPCC:n uusien luokitusohjeiden mukaisesti. Turpeen polton päästöt rinnastetaan päästöjen laskennassa uusiutumattomiin fossiilisiin polttoaineisiin. Kansallisessa ilmastostrategiassa turve luokitellaan hitaasti uusiutuvaksi biopolttoaineeksi. Turvetta ei kuitenkaan pidetä uusiutuvana, vaikka Suomessa kasvu on nopeampaa kuin nykyinen käyttö. Parimetrinen kerroksen kasvu vaatii useita tuhansia vuosia. /34, 35, 36/

### 7.1.3 CHP ja IGCC

EU:n sellu- ja paperiteollisuus on suurin uusiutuvan bioenergian tuottaja ja kuluttaja Euroopassa ja kasvaa edelleen. Jo 49,5 % kokonaisprimääri energiankulutuksesta (1,3 milj. TJ) pohjautuu biomassaan. Suurin osa tästä energiasta tuotetaan CHP-laitoksessa (Combined Heat and Power). Puun lämpösisältö on fossiilisia polttoaineita selvästi alempi ja puupolttoaineessa on runsaasti vettä. Puu ei ole ollut kilpailukykyinen pelkässä sähköntuotannossa, vaan on soveltunut parhaiten yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon. Voimalaitoskokoluokassa puu soveltuu erityisesti poltettavaksi yhdessä turpeen kanssa monipolttoainekattiloissa. /28, 29/. Kuoren ja hakkuutähteiden polttamisen ideana sellutehtaalla on, että massan valmistukseen kelpaamattomat puunosat poltetaan CHP-voimalaitoksella lämmön ja sähkön tuottamiseksi. /33/.

Alholmenin sellutehtaalle valmistui 2002 maailman suurin biopohjaisen voimalaitos ja CFB-kattila. CHP-laitos tuottaa höyryä metsäteollisuudelle ja lämpöä kunnalle. Samalla puunhankintaketju uudistui ja perustuu nyt metsäjätteiden niputtamiseen. /37/.

Taulukko 4. Keskimääräinen polttoaineen käyttö Alholmenin tehtaan kattilassa. /37/.

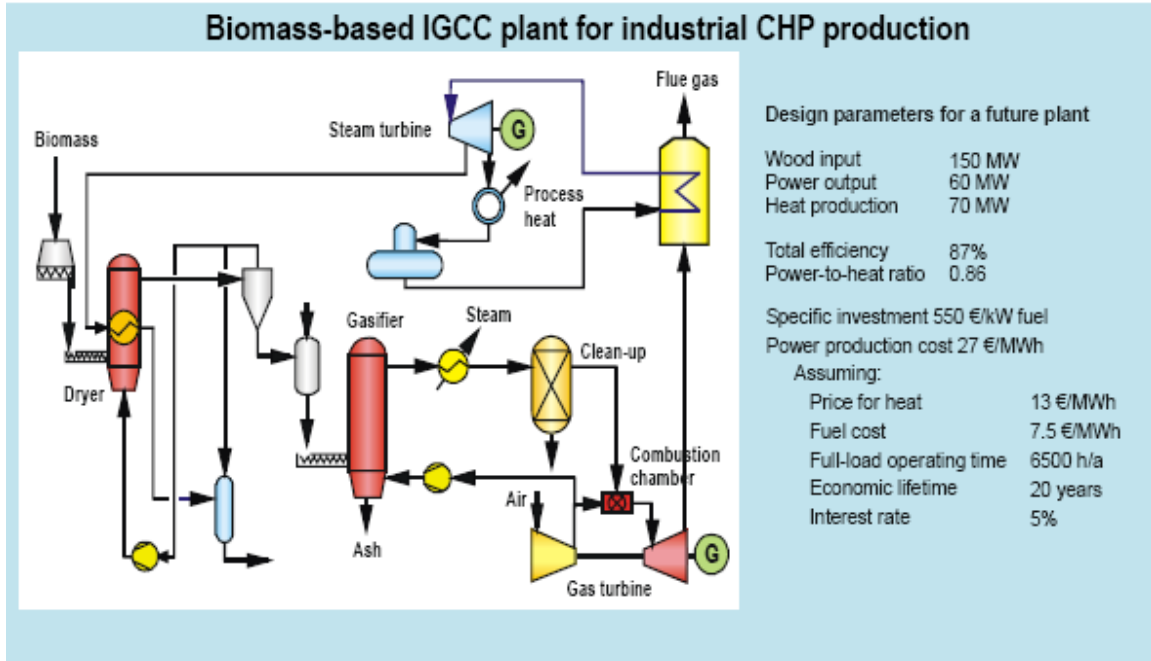
Keskimääräinen polttoaine jakauma		3500 GWh/a
Polttoaine	Lähde	Osuus
Puupohjainen polttoaine	Sellu- ja paperitehdas	30–35 %
Sahaus- ja metsäjäte	Läheiset sahat ja metsäsektori	5-15 %
Turve	Tuotantoalueet tehtaan lähetyviltä	45–55 %
Hiili tai öljy	Tuontipolttoaine, pääasiassa käynnistys- tai tukipolttoaineeksi	10 %

Tulevaisuudessa sähkön tarve kasvaa selvästi enemmän kuin lämmön. CHP-laitoksissa kannattaa silloin lisätä sähkön osuutta kokonaisenergian tuotannossa. Kaasutusteknologia tarjoaa mahdollisuuden soveltaa kombiteknikkaa myös kiinteätä polttoainetta käytettäessä. Tällöin puhutaan IGCC eli Integrated Gasification Combined-Cycle –laitoksesta. VTT:n tekemien teknistaloudellisten analyysien perusteella tuotetun sähkön

hinta alentuisi 20–30 %, jos soodakattiloita korvattaisiin IGCC-laitoksella. Tällöin sähkön saanti jopa kaksinkertaistuisi nykyisiin soodakattiloihin verrattuna. /34/.

Jos valtaosa Suomen soodakattiloista korvattaisiin IGCC-laitoksilla, saataisiin 500–800 MW lisää sähköä. Jos myös käytännössä suurin mahdollinen osuus biomass- ja jätepolttoaineesta käytettäisiin Suomessa IGCC-laitoksilla, saataisiin sähkötehoa jopa yli 1000 MW. /34/. Kaasutuksen kannattavuutta on kuitenkin kyseenalaistettu tehtaissa, joissa vuorokauden tuotanto jää alle 2000–3000 t. Lisäksi Suomessa on äskettäin rakennettu monta korkean hyötysuhteen soodakattilaa, joiden korvaaminen IGCC-laitoksella tuskin on järkevää. Toisaalta vanhojen kattiloiden korvaaminen tulisi kyseeseen, mutta näille kattiloille tyypillistä on pieni koko. IGCC-prosessin rikittömyys olisi yksi helpottava asia. Puujätteellä toimivien IGCC-laitoksen koelaitoksia on olemassa, mutta mustalipeälle ei. Tekniikka näyttäisi olevan kilpailukykyinen vasta hyvin suurissa laitoksissa.

Kaukolämpöä tuottavalla CHP-laitoksella, jossa raaka-aineena biomassaa, voidaan IGCC-teknologiaa soveltaen saavuttaa 45 % sähköhyötysuhde, jolloin yli puolet hyötyenergiasta saadaan sähköksi. Hyvän hyötysuhteen ja korkean rakennusasteen ohella IGCC-teknologian etuina ovat polttoainejoustavuus ja alhaiset päästöt. /34/. Puupolttaineiden poltosta syntyy muita kiinteitä polttoaineita vähemmän rikki-, typpi- ja raskasmetallipäästöjä. Puussa on myös muita kiinteitä polttoaineita vähemmän tuhkaa, joten hiukkaspäästöt ovat hallittavissa puhdistustekniikoilla. Puun poltto pienissä tulisijoissa ja kattiloissa on kuitenkin merkittävä pienhiukkaslähte. /28/.



Kuva 6. Biomassapohjainen IGCC-laitos lämmön ja sähkön tuottamiseen. /34/.

Biomassojen kaasutus sopii erityisesti hankalille jättepohjaisille polttoaineille. Kaasuttimia voidaan rakentaa esim. olemassa olevan hiilikattilan yhteyteen korvaamaan osan hiilestä ja siten alentamaan CO<sub>2</sub>-päästöjä. /34/.

Alholmenin sellutehtaan lisäksi UPM-Kymmene rakentaa uuden voimalaitoksen Caledonianin paperitehtaalte Skotlantiin. Laitoksessa tullaan käyttämään polttoaineena pääasiallisesti biomassaa ja tuotannossa syntyvää jätettä. Uuden voimalaitoksen on tarkoitus käynnistyä vuoden 2009 aikana, minkä jälkeen UPM:n hiilidioksidipäästöt vähenevät 75 000 tonnilla vuodessa. UPM:n mukaan yhtiö on viimeisen kymmenen vuoden aikana pystynyt alentamaan tuotannon hiilidioksidipäästöjä 25 % investoimalla biopolttoainepohjaiseen energiantuotantoon ja -tehokkuuteen. /38/.

Jos biomassan keruu on mahdollista niin laajalta alueelta, että laitoksen syöttöteho on 500 MW, valmistuskustannus näyttää lupaavalta. Samoin, jos lähtöaineena on jättepolttoaine, jonka käytöstä saadaan kaatopaikkakustannusta vastaava korvaus. 500 MW:n syöttöteho lienee mahdollinen vain lämpimissä maissa, joissa biomassaa kasvaa nopeasti. Bioraaka-ainetta riittää, jos turve otetaan mukaan polttoainevalikoimaan. /34/.

Suomen soissa lepää 11 miljardia tonnia turvetta. Turpeen osuus maamme energiankulutuksesta on kuutisen prosenttia. Kaiken turpeen polttaminen vapauttaisi teoriassa energiaa 58 000 terawattituntia. Geologian tutkimuskeskuksen mukaan nykyisellä tekniikalla voidaan saavuttaa kaikkiaan 13 000 TWh turvevarat, kun Pohjanmeren öljyn energiasisältö jää 9000 terawattituntiin. /35, 36/.

## **7.2 Tuulivoimala**

Euroopan unioni edellyttää, että määräosa koko energiantuotannosta tuotettaisiin uusiutuviin luonnonvaroihin perustuvilla menetelmillä, jotta niiden edellyttämä tekniikka kehittyisi jo ennen kuin uusiutumattomien luonnonvarojen mahdollinen hinnannousu pakottaa kehittämään uusiutuvien luonnonvarojen tekniikkaa edelleen. /39/.

Tuulivoima käyttää hyväksi ilmavirtauksen liike-energiaa, joka muutetaan sähköksi tuulivoimalan generaattorissa. Tuulivoima on vesivoiman tapaan investoinneiltaan kallista, mutta käyttökustannuksiltaan edullista energiaa. Tuulivoiman haittapuolena on, että sitä ei voida varastoida. Siksi tuulivoimasta saadun sähkön hinta jää yleensä alle jatkuvasti tuotetun ns. priimasähkön hinnan. /40/.

Vaikka tuulivoimalla tuotetaan vain 0,7 % koko maailman sähköstä, se on merkittävässä asemassa joissain maissa. Maailmanlaajuisesti tuulivoimakapasiteetti on yli nelinkertaistunut 1999–2005 välisenä aikana. Viime vuonna tuulivoiman kasvuvauhti Euroopassa oli 40 % ja kapasiteetti ylitti jo 20 000 MW rajan. Maailmassa rakennetaan joka vuosi noin 5000–10000 MW tuulivoimaa. Se vastaa noin 5–10 % koko maailman uudesta voimalaitostehosta. Kasvu kiihtyy sitä mukaa kun tuulivoimalaitosten hinnat laskevat ja fossiilisten polttoaineiden hinnat nousevat. /39, 40, 41/. Hyvät tuuliolosuhteet omaavalla paikalla, yksi 1 MW turbiini tuo sähköä 650 kotitaloudelle. /8/.

Tuulivoiman investointikustannukset ovat noin 1000 €/kW. Jos tuulivoimalan huipunkäyttöaika on 2500 tuntia, tulee investointikustannuksiksi vuosituotantoa kohti

noin 400 €/MWh. Jos pitoaika on 30 vuotta ja laskentakorko 5 % (annuiteetti 6,5 %), saadaan tuulivoimalan pääomakustannuksiksi 26 €/MWh. Kun tähän lisätään tuulivoiman käyttökustannukset, päädytään arvoon noin 28–30 €/MWh, jolloin tuulivoima alkaa olla jo kannattava investointi Suomenkin oloissa. Lisäksi tuulivoiman rakentamiseen voi saada merkittävän noin 40 %:n investointituen. /40/.

Tuulivoiman integroiminen sellutehtaaseen on mahdollista. Tästä esimerkkinä on Södran sellutehdas. Södran ensimmäinen vaihe käsittää kolme tuulivoimayksikköä ja kokonaisinvestoinnin arvo on 74–80 milj. SEK. Pääjohtaja Leif Brodén mukaan tarkoitus on hyödyntää olemassa olevaa teollisuusmaata tuottamaan tuulivoimaa 16–18 GWh vuodessa. /42/.

Tuulivoiman käytönaikaisista ympäristöhaitoista käyntiääni-, maankäyttö- ja maisemavaikutukset ovat merkittävimpiä. Lisäksi tuulivoimaloiden on arvioitu voivan haitata paikallista elämistää, erityisesti on tutkittu voimaloiden vaikutusta linnustoon. /39/. Edellä mainitusta haitoilta välttyään, jos tuulivoimala sijoitetaan teollisuuden yhteyteen. Käyttöääni, maankäyttö ja maisemavaikutukset eivät nouse tällöin kiistan kohteeksi. Lisäksi tehdasalueen eläimistö on muuta ympäristöä vähäisempää.

Jotta tuotanto olisi taloudellisesti kannattavaa, on tuulivoimala sijoitettava alueelle jolla tuulen keskinopeus on yli 5,5–7,5 m/s. Tämän vuoksi parhaita paikkoja tuulivoimaloille ovat merten rannikot, merialueet, aukeat mereen rajoittuvat pellot tai suurten mäkien/vuorten rinteet ja laet. /39/. Suomessa merenrannalla sijaitsevia sellutehtaita on mm. Kotkassa ja Kaskisissa. Lisäksi sellutehtaaseen integroidun tuulivoimalan etuna on valmis infrastruktuuri sähkön jakeluun.

### **7.3 Mustalipeä**

Uusiutuvien energiamuotojen käytössä bioenergia on tärkein ja sen varaan lasketaan myös valtaosa kasvusta. Metsäteollisuuden tähteet ja sivutuotteet ovat nyt ja jatkossa avainasemassa. /34/.



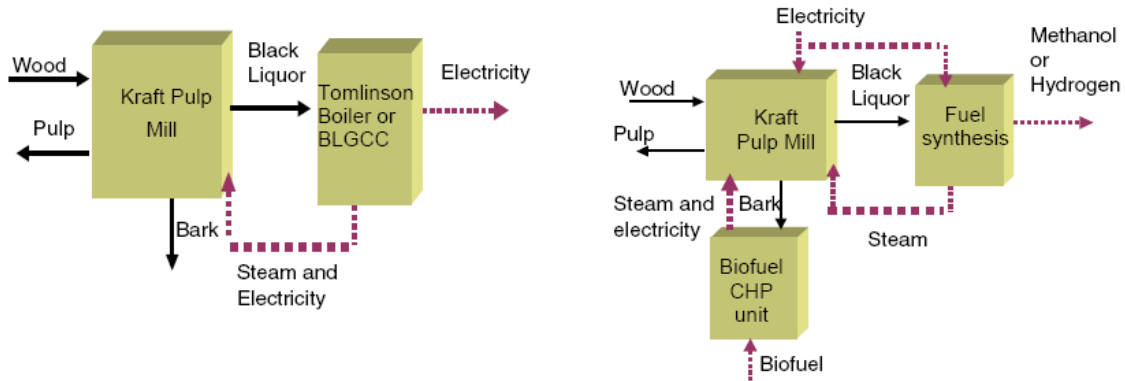
Kemiallisessa massanvalmistuksessa keiton tehtävänä on kemikaalien ja lämmön avulla poistaa kuituja sitovaa ligniiniä. Keittokemikaaleina käytetään kemikaaleja, jotka liuottavat mahdollisimman paljon ligniiniä ja mahdollisimman vähän selluloosaa. Ylivoimainen biomassan energiamuoto sellutehtaalla on tänä päivänä mustalipeä, ligniinirikas sivutuote. Mustalipeä sisältää noin puolet prosessiin syötetyn puun energiasta, mukaan lukien kemikaalit ( $\text{Na}_2\text{S}$  ja  $\text{NaOH}$ ) joita käytetään sulfaattiprosessissa. Mustalipeä on keitossa reagoinutta valkolipeää, johon on liennut puun yhdisteitä. Musta väri johtuu lipeään liuenneista, alkalien värjäämistä ligniiniyhdisteistä. Nykyään mustalipeä poltetaan niin kutsutussa Tomlinsonin soodakattilassa höyryn ja kemikaalien takaisin saamiseksi. Höyry ohjataan turbiinin läpi sähkön saamiseksi, mikä kattaa prosessin sähköntarpeen. Osa höyrystä poistetaan turbiinista kattamaan prosessin höyryn tarvetta.

Valtaosa USA:ssa toimivista Tomlinsonin kattiloista on 30–40 vuotta vanhoja ja käyttöikänsä päässä seuraavan 10–20 vuoden kuluessa. Näin ollen, sellu- ja paperiteollisuudessa on kiinnostusta saada parannettua mustalipeän prosessointitekniikkaa taloudellisilla käyttömahdollisuuksilla 2010 mennessä. /43/.

Idea tuottaa kemikaaleja mustalipeästä ja kuoresta, on kaukana uudesta, mutta on vasta nyt ollut ekonomisesti realistinen. Sulfaattisellun keitosta syntyvä mustalipeä on perinteisesti poltettu soodakattilassa keittokemikaalien regeneroimiseksi ja hyödyn ja tarvittavan sähkön tuottamiseksi. /24/. Keiton jätelipeälle on nykyisin olemassa uusia käyttömahdollisuuksia /44/:

- asentaa mustalipeän kaasutin
- lisätä Fischer Tropsch (F-T) yksikkö ja muuntaa kaikki mustalipeän kaasutuksen poistokaasut uusiutuviksi F-T polttoaineiksi (Renewable Fischer Tropsch Fuel)
- Muuttaa vanha kemikaalien talteenottoyksikkö biomassakattilaksi
- Hankkia lisää biomassaa tehtaalta ja asentaa lauhdutusturbiini muuntamaan ylimäärä höyry sähköksi

Kuvassa 7 on esitetty energia ja materiaalivirtoja eri biojalostamo konsepteissa. Lisäksi taulukkoon 5 on koottu kuvan vaihtoehtojen energiat.



Kuva 7. Energia ja materiaalivirrat eri sellutehtaan biojalostamo konsepteissa. Kiinteä viiva kuvaa virtoja, jotka ovat samoja kaikissa neljässä mahdollisessa konfiguraatiossa. /45/.

Taulukko 5. Energiavirrat neljässä (kuvassa) eri biojalostamo konseptissa. /45/.

	<b>RB</b>	<b>BLGCC</b>	<b>MeOH</b>	<b>H<sub>2</sub></b>
Sähköä verkkoon <sup>1</sup>	45	86	-55	-57
Liikennepolttoaine, MW (LHV)	0	0	271	261
Biopolttoaineita vientiin, MW (LHV)	32	21	-117	-123

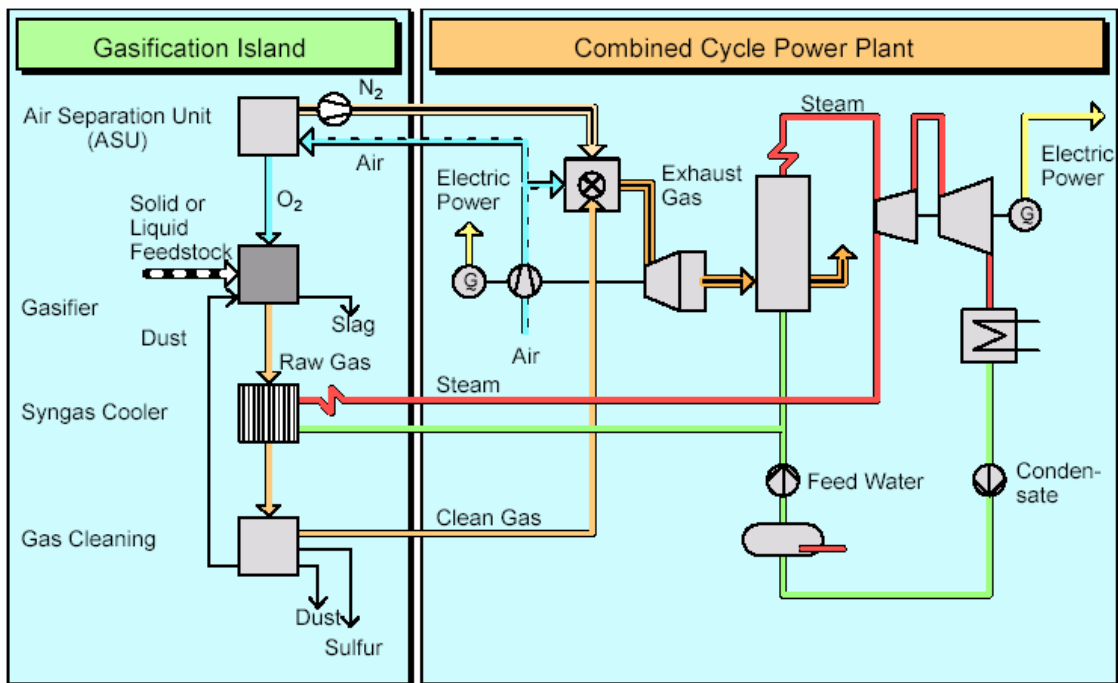
<sup>1</sup>A negative sign indicates import to the system.

### 7.3.1 Kaasutus

Kaasutuslaitoksen raaka-aineeksi käy mikä tahansa hiilipitoinen raaka-aine, esimerkiksi metsätähteet, kuori, peltobiomassat, yhdyskuntien kierrätyspolttoaineet tai turve. Biomassan kaasutus tuottaa vedystä (H<sub>2</sub>) ja hiilimonoksidista (CO) koostuvaa synteettistä kaasua, joka voidaan muuntaa sähköksi kaasuturbiinissa tai, pitkällä tähtäimellä, Fischer-Tropsch kuljetuspolttoaineeksi tai vedyksi. Suomessa kiinnitetään tällä hetkellä eniten huomiota metsätähteiden ja metsäteollisuuden sivutuotteiden hyödyntämiseen vaarantamatta metsäteollisuuden raaka-aineiden saantia. Metsäteollisuuteen tai

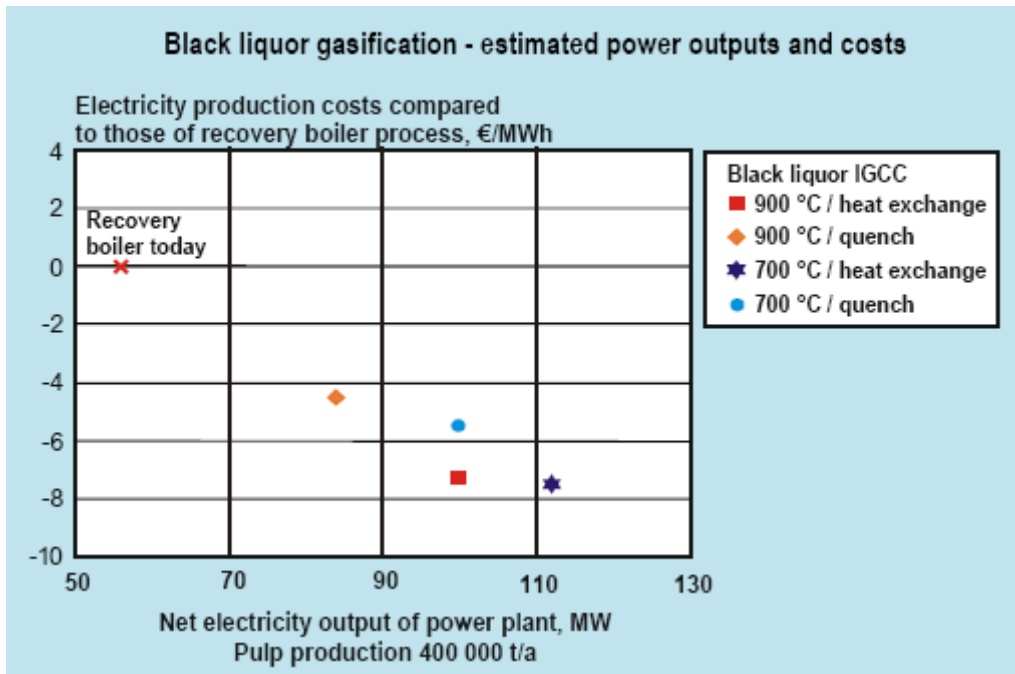
kaukolämpövoimalaitoksiin liitetyn polttonesteen valmistuksen uskotaan olevan erittäin kilpailukykyistä korkeasta hyötysuhteesta johtuen. /43, 46, 47/.

Kaasutus on prosessin kallein osa ja sen kustannustehokkuus on ratkaiseva tekijä. Mustalipeä on energiariikas sivutuote sulfaattisellun valmistuksesta, mikä on tällä hetkellä poltettu soodakattilassa sähkön ja höyryn tuottamiseksi. Kaasutus mahdollistaa suuremman energian takaisinsaannin sähkön tuotannossa verrattuna Tomlinsonin prosessiin. /19, 43/. Kuitenkaan kaasutinta ei välttämättä voida asentaa pieniin tehtaisiin.



Kuva 8. Integroitu kaasutus (IGCC). /48/.

200 MW laitos pystyy tuottamaan 50–60 000 tonnia polttoainetta vuodessa. Tämä vastaa noin 2 % Suomen nykyisestä liikennepolttoaineen kulutuksesta. Jos raaka-aineen hinta on 10 €/MWh, siitä seuraa että polttoaineen veroton tehdashinta olisi noin 40–50 snt/l, mikä vastaa dieselin jalostamohintaa. /46/.



Kuva 9. Mustalipeän kaasutus – sähköteho ja tuotantokustannukset /34/.

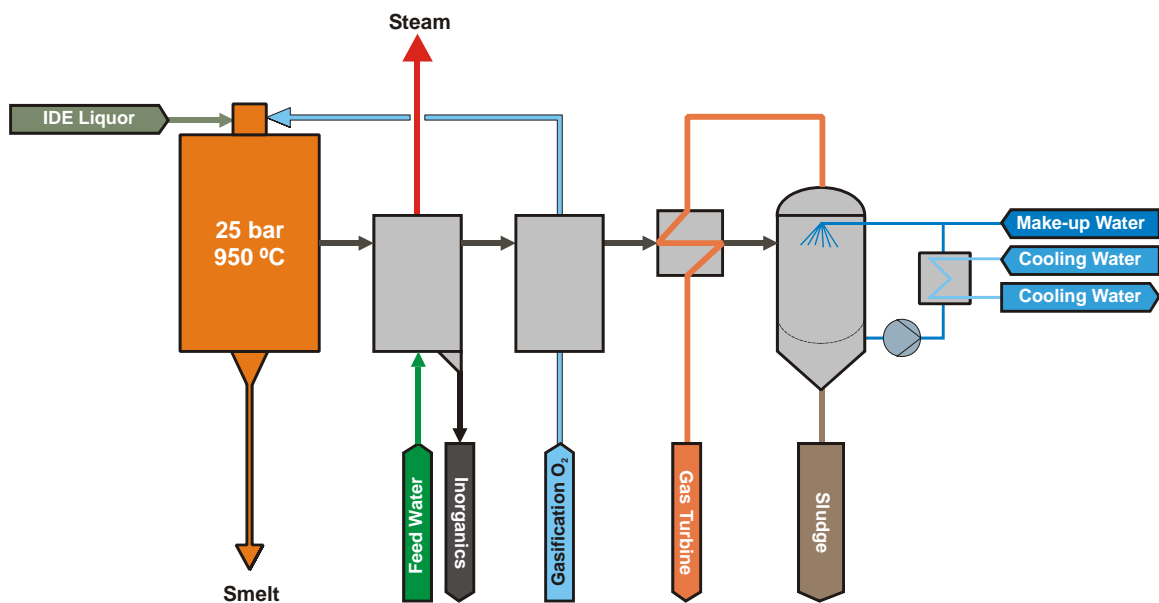
Ruotsissa arviolta 30 % dieselin ja bensiinin kulutuksesta voidaan korvata sellutehtaan synteettisillä polttoaineilla. Mustalipeän kaasutus on avain tuottaa tätä synteettistä polttoainetta. Liikennepolttoaineiden tuotanto näyttäisi olevan parempi vaihtoehto taloudellisessa mielessä kuin sähkön tuotanto. Mustalipeän kaasuttamiseksi on olemassa kaksi erilaista prosessia: korkea lämpötila (950–1000 °C) ja alhainen lämpötila (~ 600° C). Ruotsissa korkea lämpötila prosessia on aloitettu kehittää metanolin, DME:n tai synteettisen dieselin tuottamiseksi. /19/.

Mustalipeän muuntaminen synteettiseksi kaasuksi parantaa merkittävästi energian uudelleenkäyttöä mustalipeästä ja alentaa ympäristövaikutuksia. Mustalipeän kaasutuksella saavutetaan merkittävästi pienempi ympäristökuormitus koska partikkeli, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HAPS, VOC ja TRS ja CO<sub>2</sub>-päästöt alentuvat, sekä saavutetaan merkittävä parannus turvallisuudessa, kun mustalipeän kaasutus poistaa vaaralliset räjähdykset. /3/. Lisäksi rikkivapaat prosessit voivat helpottaa kaasutusta ja nostaa sähkötuotantotehoa.

Rikkivapaan prosessin taustalla ovat ympäristöasiat. Sellun laadun säilyttämiseksi yhtenä vaihtoehtona on käyttää prosessissa alkoholia, etanoli/metanoli. Myös alkoholiton

prosessi on tavoitteena. IDE prosessilla on alhaisemmat kustannukset kuin sulfaattisellun valmistuksessa. Tämä aiheutuu pääasiassa pienemmästä puuntarpeesta ja korkeammasta energian tuotannosta. Useimmissa tapauksissa käyttökustannukset tasoittavat perinteiseen sellunvalmistukseen verrattavia investointikustannuksia. Energian hinnan kasvaessa IDE prosessista tulee entistä houkuttelevampi. /48/.

Rikkivapaan keitto jätelipeän nettolämpöarvo on korkeampi kuin perinteisen sulfaattikeiton lipeällä. Kaasutus tapahtuu 950 °C:ssa ja 25 bar paineessa. /48/.

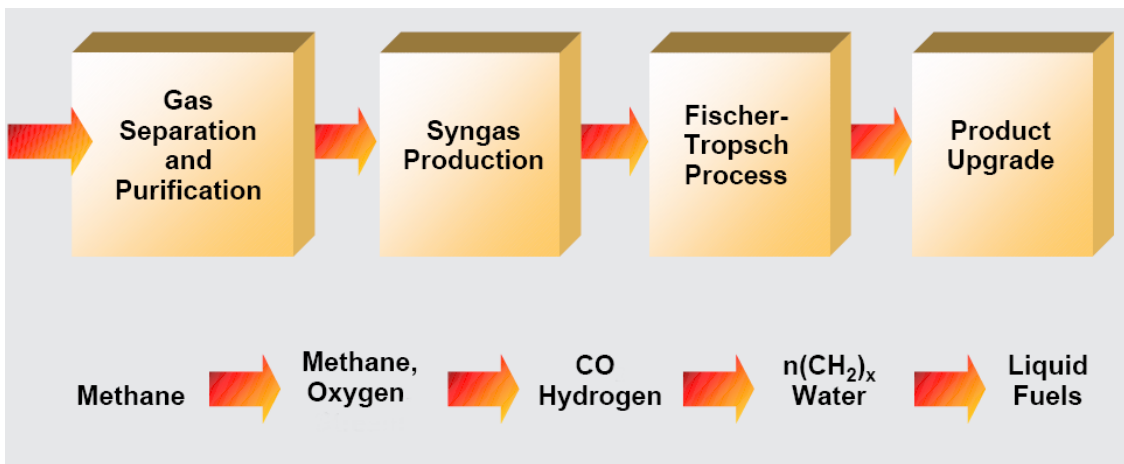


Kuva 10. Kaasutusprosessi rikkivapaassa prosessissa. /48/.

### 7.3.2 Fischer-Tropsch

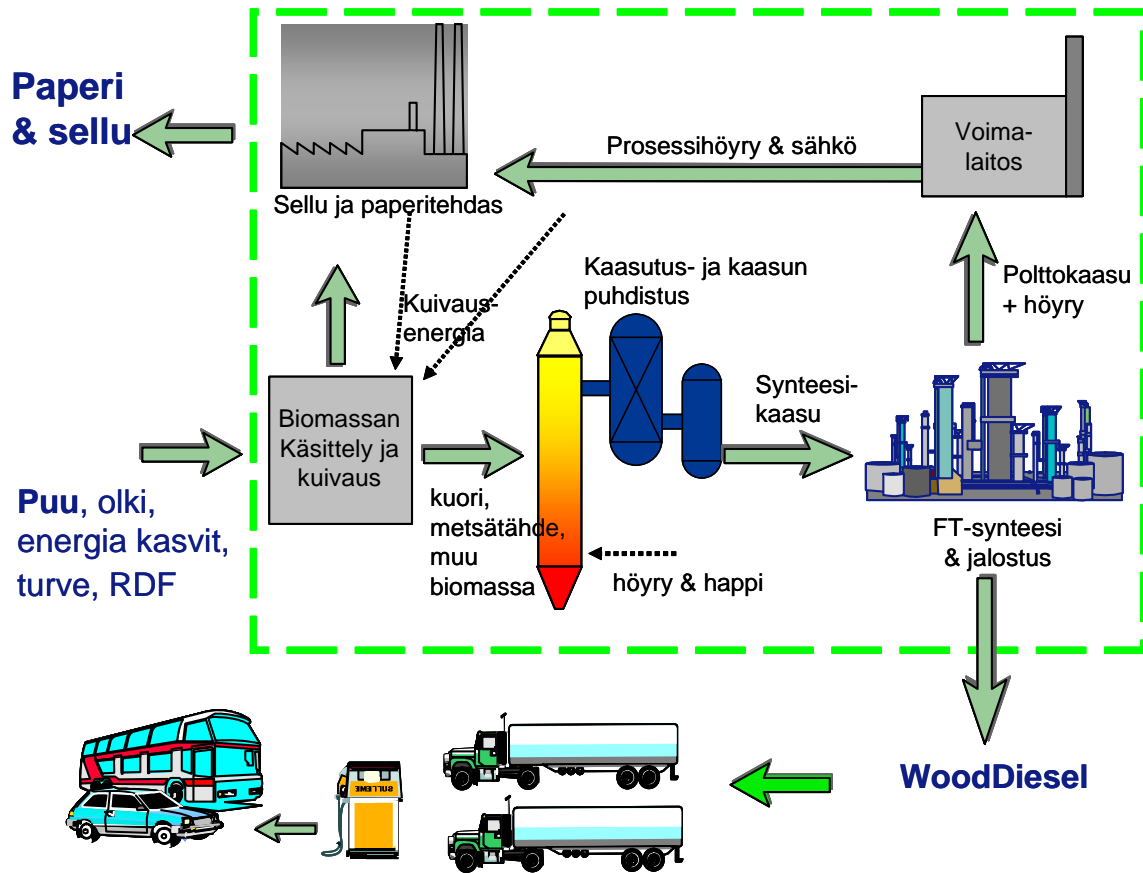
Fischer-Tropsch-tekniikka tulee olemaan uusi prosessi metsäteollisuudessa. Tekniikalla saavutetaan huomattavasti parempi taloudellisuus kuin perinteisessä, mustalipeän poltto soodakattilalla, tapauksessa. /44/. FT-tekniikan hyödyntämisestä on tullut nykyhinnoilla kannattavaa. Menetelmän avulla voidaan käyttää mitä tahansa raaka-ainetta, jotka sisältävät hiiltä. Biomassojen hyödyntäminen on vaikeampaa kuin puhtaan hiilen, mutta niiden käyttö hidastaa ilmastonmuutosta tehokkaammin kuin hiilen käyttö. /35/.

Fischer-Tropsch-tekniikka nestemäisen polttoaineen valmistamiseksi hiilestä tai maakaasusta kehitettiin Saksassa jo 1920-luvulla. Fischer-Tropsch:ssa biomassan käytön kokonaishyötysuhde on jopa 90 %, jos synteesissä syntyvä lämpö hyödynnetään sähköksi, lämmöksi tai teollisuuden prosessihöyryksi. Muuten hyötysuhde jää alle 60 prosentin. Tästä syystä tuotantolaitos on kannattavaa sijoittaa puuta tai turvetta käyttävän voimalaitoksen tai paljon lämpöä tarvitsevan sellu- ja paperitehtaan kupeeseen. Synteettisestä kaasusta voidaan valmistaa dieselin lisäksi myös kemikaaleja, vihreää maakaasua ja vetyä. /49/.



Kuva 11. FT-prosessin perusvaiheet kaasutuksen jälkeen. /46/.

Kuvan 12 Fischer-Tropsch-prosessissa biopolttoaine ensin kaasutetaan, sen jälkeen kaasu puhdistetaan synteetikaasuksi, joka koostuu vedystä ja hiilimonoksidista eli häkäkaasusta. Puhtaasta synteetikaasusta valmistetaan Fischer-Tropsch-tekniikalla dieseliä. /49/.



Kuva 12. FT-tekniikka integroituna sellu- ja paperiteollisuuteen. /46/.

## 7.4 Ligniini

Modernit sulfaattisellutehtaat ovat energian tuottajia. Yhdessä energiatehokkuuden kasvattamisen ja metsäjätteiden käytön lisäämisen kanssa, osa ligniinistä voidaan käyttää myös biotuotteena IFBR:ssä. Ligniini voidaan poistaa jätekeittolipeästä happosaostamisella. Kuitenkin, ligniinin saostamisen tulee olla rikki-vapaata, jotta polymeerien kuten polyuretaanin tuotanto on mahdollista. Toinen mahdollisuus on jätekeittolipeän kaasuttaminen synteesikaasuksi.

Ruotsalainen paperi- ja graafisen alan tutkimus- ja konsultointiyritys SFTI-Packforsk on kehittänyt ligniinin erottamista sellutehtaassa syntyvästä mustalipeästä. /11/. Tonni ligniiniä vastaa lämpöarvoltaan 0,65 tonnia mineraaliöljyä. /26/. Puhdasta ligniiniä voidaan käyttää korkealaatuisten biopoltoaineiden ja kemikaalien raaka-aineena.

Parhailtaan rakenteilla on koelaitos, joka tuottaa vuosittain 4 000 tonnia ligniiniä. Ligniinillä on tarkoitus korvata öljyä ja hiiltä erilaisissa polttoprosesseissa. Vastaavaan erotustekniikkaan perustuvia kaupallisia laitoksia toimii luultavasti jo vuoden-parin päästä. Kiinteän biomassan kaasutukseen perustuvia biojalostamoja on realistista odottaa 5–10 vuoden päästä, arvioivat Peter Axegård ja VTT:n tutkimusjohtaja Kai Sipilä. /11/. Rikkivapaat keittomenetelmät saattavat helpottaa ligniinin saostamista.

## **7.5 Hemiselluloosa**

Keiton aikana noin 20 tai 30 % puun painosta, hemiselluloosan ja ligniinin muodossa, liukenee keittolipeään. Liuennut materiaali on poltettu höyryn, sähkön ja keittokemikaalien, NaOH ja Na<sub>2</sub>S, regeneroimiseksi. /2/.

Hemiselluloosa on toiseksi yleisin materiaali, selluloosan jälkeen, noin 60 miljardin tonnin vuosituotannolla. Saatavuus ja laatu riippuvat eri raaka-aineiden ksyylaani ja mannaani rakenteesta. /50/. Hemiselluloosalla on alhainen lämpöarvo. Lisäksi se pilkkoutuu keiton aikana. Pilkkoutumattomat sokerit tarvitaan biopolttoaineisiin ja kemikaaleihin. /5/.

Ennen kuin puu keitetään, hemiselluloosa voidaan uuttaa yli 100 °C:ssa. Uuttaminen puhtaalla vedellä aiheuttaa happamat olosuhteet hemiselluloosasta vapautuvan etikkahapon johdosta. Uuttaminen voidaan suorittaa myös sulfaattiprosessin kanssa yhteensopivilla kemikaaleilla. Happamuus voi johtaa selluloosan pilkkoutumiseen happohydrolyysillä korkeissa lämpötiloissa. Tämä on ei-toivottua, koska biojalostamossakin massan tuotanto on yksi päätuotteista. /2, 5/.

Uutossa syntyy liuennutta polymeeri hemiselluloosaa, jossa on vähän ligniiniä. Uutetut hakkeet johdetaan alkalikeittoon, missä kuidut vapautuva ja syntyy mustalipeää. Lehti- ja havupuu tarvitsevat erilaiset lähestymistavat, koska niiden hemiselluloosat ovat kemiallisesti erilaisia. Esiuuton etuna on alhaisempi alkalipitoisuus, kasvanut delignifiointiaste, vähentynyt mustalipeäkuorma sekä kasvanut sellun tuotantoaste. On



myös tärkeää säilyttää tai jopa parantaa saantoa. Puun uuttamisvirtauksessa hemiselluloosa on osana konversioprosessissa tuottamassa etanolia, etikkahappoa, sokeripohjaisia polymeerejä ja kemikaaleja. Sokeripohjaiset polymeerit voivat syrjäyttää fossiilisia polttoaineita, jotka pohjautuvat puun pihkakomposiittien kehittämiseen uusiutuvista biokomposiitti materiaaleista. Mustalipeän kaasutus ja/tai ligniinin saostaminen ovat oleellinen osa IFPR (Integrated Products Biorefinery). Synteesikaasu ja ligniinin saostaminen ovat keskeisiä raaka-aineita lipeä polttoaineelle ja polyuretaanille. /2, 5/.

Keiton ja jäännöskeittolipeän kaasutuksen jälkeen, on mahdollista muuttaa synteesikaasut energiaksi tai lipeä polttoaineeksi ja/tai kemikaaleiksi. Päätös, valmistetaanko energiaa vai kuljetus polttoaineita, riippuu taloudellisista asioista ja/tai sijainnista. Ideana on, että sellutehtaat voivat huomattavasti parantaa tulojaan muuntamalla virrat IFB:ksi. Hemiselluloosan uuttamisen ja erottamisen jälkeen, jäteuutos voidaan yhdistää tuore- ja/tai jätekeittolipeään. /2, 3/.

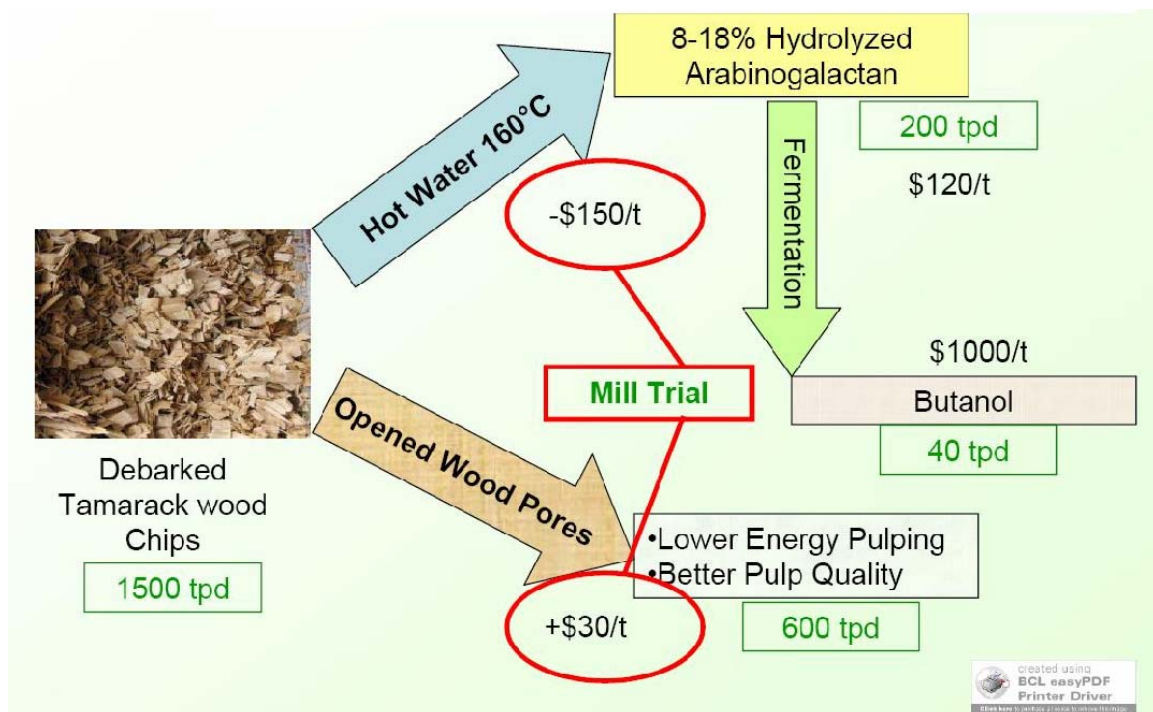
Taulukko 5. Polttoaineiden lämpöarvot ja hinnat. /5/.

<b>Polttoaine</b>	<b>Lämpöarvo, GJ/MT</b>	<b>Polttoaineen hinta, US\$/kuiva MT</b>	<b>Energian hinta, US\$/kuiva MT</b>
Öljy	43,5	555	11,8
Biomassa, 20 % kosteus	15	55	3,7
Mustalipeä, 20 % kosteus	12,6	$75 \cdot \frac{3}{4} = 56$ (org/inorg = 1/3)	4,4
Ligniini	26,9	75	2,8
Hiilihydraatti	13,6	75	5,5

Vaikka öljyllä on hyvä lämpöarvo ja hinta, sitä ei tule käyttää. Energia tulee hankkia biomassasta ja/tai mustalipeästä. Lisäksi on minimoitava hiilihydraattien käyttö energiatarpeeseen /5/.

Markkinahinta lehtipuu sellulle on noin 500 \$/m<sup>3</sup> adt. Perustuen hemiselluloosan (13,6 MJ/kg) ja ligniiniin (27 MJ/kg) lämpöarvoihin, arvot \$50/adt ja \$99/adt on laskettu hemiselluloosalle ja ligniinille, käyttäen \$55/MT hintaa biomassalle (20 % kosteus) 15 MJ/kg. /2/.

Lehtikuudessa runsaasti esiintyvistä arabinogalaktaneista voidaan kaavion 13 mukaan valmistaa kaasumaista polttoainetta, butanolia. Tosin saanto vaikuttaa hyvin alhaiselta, alle 3 % käytetystä puumäärästä.



Kuva 13. Butanolin valmistuskaavio hakkeesta /51/.

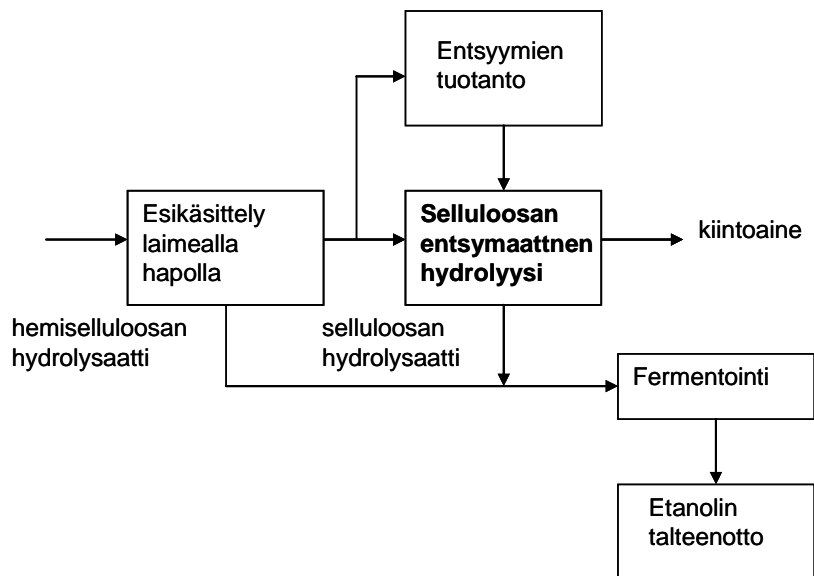
## 8 ETANOLI

Etanolia (CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-OH) on käytetty polttoaineena ensimmäisestä autosta lähtien. Etanoli palaa paremmin kuin bensiini ja on siten ympäristöä säästävämpi polttoaine. Etanoli on uusiutuva luonnonvara, mutta sen tuottaminen on toistaiseksi kallista. /52/. Tällä hetkellä käytännössä kaikki liikenteen biopolttoaineet maailmassa tehdään ruoasta. Etanoli

valmistetaan USA:ssa maissista, Brasiliassa sokeriruokasta ja Euroopassa vehnäväst, ohrasta ja sokerijuurikkaasta. Biodieselin raaka-aineena käytetään kasviöljyä. /53/.

Kiinnostus sekoittaa bioetanolia bensiiniin on lisääntynyt polttoaineen hinnan nousun ja kasvihuoneilmiön myötä. Sokeriruokoviljelmään hyödyntävä Brasilia tuottaa valtaosan maailman bioetanolista, jota myydään tällä hetkellä noin puolet halvemmalla kuin bensaa. Bioetanolia käytetään Euroopassa noin 500 000 tonnia vuodessa tieliikenteen polttoaineena. Noin puolet siitä tankataan ajoneuvoihin Ruotsissa, jossa julkinen taho on tukenut biopolttoaineiden käyttöä merkittävien verohelpotuksien ja investointitukien kautta. /54/.

Useissa maissa tarkastellaan nyt vaihtoehtoisia raaka-aineita ja niiden hintoja sekä pohditaan mahdollisuuksia tuottaa etanolia itse. Puupohjainen raaka-aine on herättänyt suurta mielenkiintoa, koska sen kustannukset ovat viljapohjaiseen raaka-aineeseen verrattuna matalat. /54/. Kuvassa 14 on esitettyä kaaviokuva etanolin valmistamiseksi entsymaattisella hydrolyysillä biomassasta (puusta, oljista, heinistä ja jätteistä). /53/.



Kuva 14. Entsyymaattinen hydrolyysin etanolin valmistamiseksi. /53/.

## 8.1 Vilja

Etanolia valmistettaessa käytetään lähinnä rehumaissia. Vehnää käytettäessä siitä otetaan ensin parhaat osat pois. Vilja täytyy ensin esikäsitellä, jotta saadaan tärkkelyksen glukoosit irti toisistaan. Glukoosien  $\beta$ -(1,4)-sidokset katkaistaan entsyymien avulla. Kun esikäsitteily on tehty, glukoosisiirappi käytetään ja saatu etanoli tislataan pois. Viljan biologinen jäte voidaan viedä eläinten rehuksi. /52/. Viljaetanoli vähentää vain vähän hiilidioksidipäästöjä. Päästökaupparamarkkinoilla hiilidioksiditonni maksaa 20–30 euroa. Viljasta tehdyllä etanolilla hiilidioksidin päästö vähenemän hinta nousee monikymmenkertaiseksi tonnilta, kun kasvin koko elinkaari lasketaan mukaan. /55/. Myös sokeriruokoa voidaan käyttää etanolin valmistukseen. /52/.

## 8.2 Puu

Puu on hyvä materiaali etanolin valmistukseen, sillä puun tuottaminen kuluttaa vähemmän energiaa kuin viljan kasvattaminen. Noin 15 % etanolin energiasta vastaa sitä määrää, jolla puu on saatu kasvamaan. Viljan osalta tämä vastaava energia on kaksinkertainen tai enemmän. Puu koostuu suurimmalta osaltaan lignoselluloosasta, mikä on maapallomme yleisin uusiutuva orgaaninen aine. Lignoselluloosan osat ovat tiukasti kiinni toisissaan, joten se on esikäsiteltävä ennen kuin selluloosa ja hemiselluloosa saadaan irti lignoselluloosasta. Rakenne hajoaa lähinnä kemiallisesti, happo- tai emäskäsittelyllä. Irti saadut selluloosa- ja hemiselluloosa-molekyylit katkaistaan yksittäisiksi sokereiksi, ja sokerit voidaan fermentoida etanoliksi sopivalla organismilla. Jotta lignoselluloosan fermentointi etanoliksi olisi kannattavaa pitää molemmat, selluloosa ja hemiselluloosa, käyttää hyväksi. Jotta lignoselluloosasta saataisiin kannattavasti fermentoitua etanolia, lignoselluloosan fermentoijabakteerin täytyy mm. tuottaa paljon etanolia ja sietää korkeita etanolipitoisuuksia. /52/.

Valitettavasti etanolin valmistus näyttää puusta tehtynä tulevan kalliiksi, tämä on noin 3-5 kertaa nykyinen öljytuotteiden veroton hinta. /34/.

### 8.3 Selluloosa

Puun eri rakennemolekyyleistä selluloosaa on eniten. Selluloosasta on periaatteessa helppo saada etanolia. Selluloosan glukoosit erotetaan toisistaan entsyymillä ja sokerit fermentoidaan. Selluloosan paras muuntotapa etanoliksi on sijoittaa yhtäaikaa sellulaasi, selluloosaa hajottava entsyymi, ja *S. cerevisiae* selluloosaan. Kuitenkin yleisesti käytetyn *Trichoderma* reesein sellulaasin lämpötilaoptimi on 45–50 °C, kun *S. cerevisiae*en vastaava arvo on noin 30 °C. Etanolin tuottajan pitää vaihtaa termofiilikseksi tai etsiä sellulaasi, jonka lämpötilaoptimi on sama kuin *S. cerevisiae*en optimifermentointilämpötila. Ennen kuin kumpikaan edellä mainituista järjestyys, vaatii menetelmä kompromisseja ja myöskään tulos ei ole siten paras mahdollinen. /52/.

Etanolin ja etikkahapon tuotantoon hakkeesta, voidaan käyttää jo tunnettua tekniikkaan. Etanolin hinnan täytyy olla vähintään > \$1000/MT, jotta selluloosa on taloudellista muuntaa etanoliksi. Selluloosa on kiteytynyt, kestävä ja sillä on omalaatuiset rakenteelliset ominaisuudet. Tästä johtuen sellu on arvokkaampaa kuin etanoli. /3, 5/.

### 8.4 Hemiselluloosa

Hemiselluloosasta on 40 % pentooseja. Tämä pentoosien määrä vaikeuttaa hemiselluloosan fermentointia etanoliksi. Ksyloosin tuottaminen alkoholiksi onnistuu pentoosifosfaattireitin kautta. Ksyloosi voidaan muuntaa ksyluloosiksi ksyloosi-isomeraasin avulla. Ksyluloosi taas on osa pentoosifosfaattireittiä ja siten osa koko metaboliareittejä. Pentoosifosfaattireitistä on yhteys glykolyysiin ja pyruvaattiin, josta koko etanolin valmistus alkaa. Vaikka *S. cerevisiae* ei pysty tuottamaan ksyloosista etanolia, ksyluloosista se pystyy tuottamaan etanolia 90 % teoreettisesta saannosta. Hemiselluloosan eri sokereiden etanoliksi muuttaminen on ongelma. Tästä ongelmasta on yritetty päästä eroon joko lisäämällä *S. cerevisiae*hin ksyloosi-isomeraasia pentoosien muuttamisen avuksi tai on yritetty käyttää eri lajien eri lailla geneettisesti muunneltuja kantoja. /52/.

## 8.5 Ominaisuuksia ja ympäristövaikutuksia

Etanoli ei ole yhtä energiapitoista kuin bensiini, yksi gallona bensiiniä vastaa 1,25 gallonaa etanolia. Etanolilla on korkeampi oktaaniarvo kuin bensiinillä. Alkoholikäyttöisen moottorin ongelma on etanolin huono itsesyttvyys eli se tarvitsee jonkin lisäaineen. Itsesyttvyyttä tarvitaan, jotta moottori toimisi ja saisi kaiken energian irti. Etanolin muita huonoja puolia ovat korkea höyrystymislämpötila ja heikko voitelukyky. Parhaiten etanolin ominaisuudet tulisivat esille sille suunnitellussa korkeapuristeisessa moottorissa. Talvella etanoli estää bensiinin jäätymistä, sillä sen jäätympiste on alhainen. /52/.

Etanoli on happipitoisempaa kuin bensiini, joten se palaa paremmin ja hiilimonoksidia syntyy vähemmän. Typen oksidien määrä on vähäisempi, verrattuna bensiinin palamiseen. Bensiinin poltossa syntyy myös aromaattisia yhdisteitä, mutta etanolia poltettaessa näitä ei synny. Etanolia poltettaessa syntyy kuitenkin asealdehydejä, mutta näitä karsinogeenisia aineita ei pääse ympäristöön, jos auton katalysaattori on kunnossa. Etanoli on myös haihtuvampaa kuin bensiini. Etanolin palaessa puhtaasti syntyy hiilidioksidia ja vettä. Hiilidioksidi, joka syntyy, ei periaatteessa kuormita ympäristöä eikä lisää kasvihuoneilmiötä. /52/.

Etanolia voidaan tuottaa lähellä käyttöpaikkaa, jolloin vältetään öljynkuljetuksilta. Kuitenkin etanolin valmistukseen käytettävien fermentoitavien kasvien viljely kuluttaa energiaa, ja ylipäätään viljelytoimiin, kuten istuttamiseen ja sadonkorjuuseen, kuluu energiaa. Viljakasveja ja sokeriruokoa pitää lannoittaa kalliilla typpilannoitteilla. Typpilannoitteiden määrää voidaan kuitenkin vähentää lisäämällä typensitobakteereita maahan. Tehoviljelyn ympäristöhaittana on eroosio. /52/.

## 9 YHTEENVETO

Kiinnostus biojalostamoja kohtaan on syntynyt kilpailukyvyn parantamisen, öljyn hinnan nousun sekä kestävä kehityksen asettamien tavoitteiden johdosta. Lisäksi EU on asettanut direktiivejä ja strategioita biomassan ja biopolttoaineiden käytölle.

Biomassaa on toki hyödynnetty jo vuosikymmenet ja sitä käytetään erilaisten tuotteiden raaka-aineena. Vielä kyse on kuitenkin ”täsmäbiomassasta”. Biojalostamosta voidaan puhua vasta, kun raaka-aineena voidaan käyttää edullista yleisbiomassaa. Metsäbiomassan etuna on, että siitä valmistettuihin jalosteisiin sitoutuu huomattavasti vähemmän fossiilisia polttoaineita kuin käytettäessä esimerkiksi sokeriruokoa, ohraa tai vehnää. Siksi metsäbiomassa on tulevaisuudessa entistä kilpailukykyisempi raaka-aine.

Sellutehtaaseen integroitu biojalostamo tarjoaa useita mahdollisuuksia verrattuna erillisenä yksikkönä toimivaan biojalostamoon. Olemassa oleva infrastruktuuri biomassan keräilyyn, käsittelyyn ja prosessointiin voidaan tehtaalla käyttää höydyksi. Sellutehtaan biojalostamon määritelmän mukaan, tavoitteena on biomassan ja muiden raaka-aineiden, mukaan lukien energian, täydellinen hyväksikäyttö sekä yhtäaikainen kuitujen, kemikaalien ja energian tuottaminen.

Kuoren ja hakkuutähteiden polttamisen ideana sellutehtaalla on, että prosessiin kelpaamattomat puunosat poltetaan CHP-voimalaitoksella lämmön ja sähkön tuottamiseksi. Alholmenin sellutehtaalle valmistui 2002 maailman suurimman biopohjaisen voimalaitos ja CFB kattila. Myös UPM-Kymmene rakentaa uuden voimalaitoksen Skotlantiin.

Jos valtaosa Suomen soodakattiloista korvattaisiin IGCC-laitoksilla, saataisiin 500–800 MW lisää sähköä. Kaukolämpöä tuottavalla CHP-laitoksella voidaan IGCC-teknologiaa soveltaen saavuttaa 45 % sähköhyötysuhde, jolloin yli puolet hyötyenergiasta saadaan sähköksi. Hyvä hyötysuhde ja korkean rakennusasteen ohella IGCC-teknologian etuina ovat polttoainejoustavuus ja alhaiset päästöt.

Euroopan unioni edellyttää, että määräosa koko energiantuotannosta tuotettaisiin uusiutuviin luonnonvaroihin perustuvilla menetelmillä. Yhtenä ratkaisuna on tuulivoima ja sen integroiminen sellutehtaaseen. Tällöin vältetään useimmilta tuulivoiman käytönaikaisilta ympäristöhaitoilta sekä hyödynnetään jo olemassa olevaa infrastruktuuria. Tuulivoiman integroiminen sellutehtaaseen on mahdollista. Tästä esimerkkinä on Södran sellutehdas.

Idea tuottaa kemikaaleja mustalipeästä ja kuoresta, on kaukana uudesta, mutta on vasta nyt ollut ekonomisesti realistinen. Mustalipeälle on nykyisin olemassa uusia käyttömahdollisuuksia soodakattilassa polttamisen lisäksi. Näistä kaasutus ja Fischer-Tropsch-prosessi ovat nousseet voimakkaimmin esille. Kaasutuksessa jo 200 MW laitos pystyy tuottamaan 50–60 000 tonnia polttoainetta vuodessa. Fischer-Tropsch- tekniikalla saavutetaan huomattavasti parempi taloudellisuus kuin mustalipeän poltolla soodakattilassa.

Lisäksi on hyvä muistaa ligniinin ja hemiselluloosan hyödyntäminen. Tonni ligniiniä vastaa lämpöarvoltaan 0,65 tonnia mineraali öljyä. Puhdasta ligniiniä voidaan käyttää korkealaatuisten biopolttoaineiden ja kemikaalien raaka-aineena.

Kiinnostus sekoittaa bioetanolia bensiiniin on lisääntynyt polttoaineen hinnan nousun ja kasvihuoneilmiön myötä. Lukuisat maat, mukaan luettuna Suomi, miettivät vaihtoehtoisia raaka-aineita ja hintoja etanolin tuottamiseksi. Puupohjainen raaka-aine avaa uusia mahdollisuuksia, koska sen kustannukset ovat viljapohjaista raaka-ainetta alhaisemmat.

Biojalostamo, biomassa, bioenergia, biopolttoaineet jne. ovat hyvin ajankohtainen aihe. Vaikka biomaailmaan panostaminen vaatii metsäteollisuudelta tutkimusta, kehitystä ja investointeja, se myös tuo metsäteollisuuden näkökulmasta uusia mahdollisuuksia, kannattavuutta ja imagon parantumista.



## LÄHDELUETTELO

1. Hetemäki, L. Puunjalostus vetämään biotaloutta. Talouselämä 23/2006. s. 35–39. Viitattu 1.2.2007. Saatavissa: <http://www.metla.fi/archive/2006/50712-hetemaki.pdf>
2. Heiningen, A. Converting a kraft pulp mill into an Integrated Forest Biorefinery. Department of Chemical and Biological Engineering, University of Maine, Orono, ME, USA. Viitattu 5.2.2007. s. 6. Saatavissa: <http://www.forestbioproducts.umaine.edu/documents/ForestBiorefinery.pdf>
3. Closset, G., Raymond, D. & Thorp, B. The Integrated Forest Products Biorefinery. A Preliminary Business Case. June. 2005. s. 12. Viitattu 6.2.2007. Saatavissa: [http://www.tri-inc.net/Biorefinery%20Business%20Case-June1%20\\_2\\_.pdf](http://www.tri-inc.net/Biorefinery%20Business%20Case-June1%20_2_.pdf)
4. Diesen, M. Economics of the Pulp and Paper Industry, Book 1. Fapet Oy, Jyväskylä, 1998, s. 186.
5. Heiningen, A. A Concept and Analysis for Converting a Kraft Mill into a Forest Biorefinery. University of Maine, Orono, ME, USA. Finnish Paper Research Community Serving Europe. 23, January 2007. Helsinki, Finland.
6. Sipilä, K. Puuenergian mahdollisuudet metsäteollisuudelle Euroopassa. VTT. Suomen paperi-insinöörien yhdistys. Syyskokous 16.–17.11.2006. Helsinki.
7. Hetemäki, L. Suomen metsiin perustuva hyvinvointi 2015. Katsaus Suomen metsäsektorin kehitykseen. Viitattu 6.2.2007. Saatavissa: [http://wwwb.mmm.fi/kmo/asiakirjat\\_raportit/Mets%C3%A4sektori-2015\\_260106%20\(2\).doc](http://wwwb.mmm.fi/kmo/asiakirjat_raportit/Mets%C3%A4sektori-2015_260106%20(2).doc)
8. European Renewable Energy Council. Biomass. Viitattu 3.4.2007. Saatavissa: <http://www.erec-renewables.org/default.htm>.
9. Koch, G. Handbook of Pulp, Raw material for pulp. Vol 1. Ed. Sixta, H.. s. 21–68.
10. Vuorinen, T. Näkökohtia hemiselluloosien hyödyntämiseen metsäteollisuuden biojalostamoissa. Kemian päivät, 27.–29.3.2007, Helsinki.
11. Packalén, A. Biojalostamo. Fortum. Forte 3/2006. s. 21–22. Viitattu 2.2.2007. Saatavissa: [http://www.fortum.com/gallery/forte/forte\\_2006/forte\\_3-06\\_fin\\_web.pdf](http://www.fortum.com/gallery/forte/forte_2006/forte_3-06_fin_web.pdf)
12. Biorefinery. Viitattu 12.2.2007. Saatavissa: <http://www.biorefinery.nl>

13. Gädda, L. Biojalostamo: kaikki irti puuraaka-aineesta. Viitattu 1.2.2007. Saatavissa: <http://www.forestindustries.fi/files/Painopisteet.ppt>
14. Halasz, L., Povoden, G., Narodoslowsky, M. Sustainable processes synthesis for renewable resources. Viitattu 9.2.2007. Saatavissa: [http://dcs.vein.hu/cikkek/Sustainable\\_processes\\_synthesis\\_for\\_renewable\\_resources.pdf](http://dcs.vein.hu/cikkek/Sustainable_processes_synthesis_for_renewable_resources.pdf)
15. National Renewable Energy Laboratory. What is a Biorefinery? Viitattu 12.2.2007. Saatavissa: <http://www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html>
16. Developing Biorefineries to Produce Energy, Ethanol and Other Industrial Products. Alternative Energy Conference. March, 3, 2005. Viitattu 10.4.2007. [http://www.engr.lsu.edu/conferences/altenergy2005/Ed\\_Lehrburger.ppt](http://www.engr.lsu.edu/conferences/altenergy2005/Ed_Lehrburger.ppt)
17. Ojanperä, K. Metsäteollisuus havittelee uutta bisnestä biojalostamoista. Tekniikka ja Talous 21.9.2006. Viitattu 18.4.2007. Saatavissa: [http://www.tekniikkatalous.fi/doc.do?f\\_id=1028957](http://www.tekniikkatalous.fi/doc.do?f_id=1028957)
18. Couch, G. A chemical cornucopia: Using forest biomass. Viitattu 18.2.2007. Saatavissa: [http://www.flcmidwest.org/200606\\_04.html](http://www.flcmidwest.org/200606_04.html)
19. Anon. Energy Efficient Technologies and CO<sub>2</sub> Reduction Potential in the Pulp and Paper Industry. International Energy Agency. 9<sup>th</sup> October, 2006. France, Paris. s. 14.
20. Iisa, K. Viitattu 10.4.2007. Saatavissa: [http://www.ipst.gatech.edu/expertise\\_new/faculty\\_bios/bio\\_iisa\\_kristiina.html](http://www.ipst.gatech.edu/expertise_new/faculty_bios/bio_iisa_kristiina.html)
21. Axegård, P. The pulp mill biorefinery. 1<sup>st</sup> International Biorefinery Workshop. U.S. DOE and EU, July, 20 and 21, 2005, Washington DC. Viitattu 2.2.2007. Saatavissa: [www.biorefineryworkshop.com/abstracts/existing\\_axegard.doc](http://www.biorefineryworkshop.com/abstracts/existing_axegard.doc)
22. Häggblom, R. Onko puuta runsaasti käytävä biojalostamo mahdollinen Suomessa? Heureka 9.11.2006. Viitattu 1.2.2007. Saatavissa: <http://www.metsafoorumi.fi/dokumentit/Haggblom091106.pdf>
23. Anon. Metsäsektori odottaa paljon bioenergiasta ja biojalosteista. Tekes. Viitattu 7.2.2007. Saatavissa: [http://www.tekes.fi/ajankohtaista/uutisia/uutis\\_tiedot.asp?id=5408&paluu=](http://www.tekes.fi/ajankohtaista/uutisia/uutis_tiedot.asp?id=5408&paluu=)
24. Farmer, M.C Adaptable Biorefinery: Some Basic Economic Concepts to Guide Research Selection. Institute of Paper Science and Technology. Viitattu 2.2.2007. Saatavissa: <http://www.cpbis.gatech.edu/research/findings/AdaptableBiorefineryMFarmerTAPPI2005.pdf>

25. Siemens. Ratkaisuja tulevaisuuden haasteisiin. Viitattu 10.4.2007. Saatavissa: [http://www.siemens.fi/portal.nsf/all/17D7E0243E58DBA3C225727B003671DC/\\$file/Siemens\\_Vuosikatsaus\\_2006\\_fi.pdf](http://www.siemens.fi/portal.nsf/all/17D7E0243E58DBA3C225727B003671DC/$file/Siemens_Vuosikatsaus_2006_fi.pdf)
26. Axegård, P. Utilization of Black Liquor and Forestry Residues in a Pulp Mill Biorefinery. Forest Based Sector Technology Platform Conference. Lahti, Finland. 22-23 November. 2006. Viitattu 5.2.2007. Saatavissa: [http://www.forestplatform.org/easydata/customers/ftp/files/Lahti\\_presentations/A\\_xegard\\_FTP\\_Lahti\\_2006-11-23\\_final\\_tama\\_nettiin.pdf](http://www.forestplatform.org/easydata/customers/ftp/files/Lahti_presentations/A_xegard_FTP_Lahti_2006-11-23_final_tama_nettiin.pdf)
27. Closset, G. Forest products biorefinery: technology for a new future. Solutions – for people, processes and paper. Tappi. September 2004, vol. 87(9).
28. Energiategollisuus. Puuenergia. Viitattu 10.4.2007. Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/sahko/sahkontuotanto/puuenergia>.
29. Mensink, M. Biorefinery for the forest based sector. Solander Symposium. Piteå, 28<sup>th</sup> March, 2007. Viitattu 10.4.2007. Saatavissa: <http://www.nolia.se/solandersymposium/presentation.php?id=9>.
30. Lehtinen, J. Ensin paperia, sitten sähköä. Tekniikka ja talous 26.10.2006. Viitattu 18.4.2007. Saatavissa: [http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f\\_id=1052212](http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f_id=1052212)
31. Anon. Kannot hyödyntämätön voimavara. Puuenergian teknologiaohjelman tuloksia 2/2004. Viitattu 10.4.2007. <http://www.tekes.fi/julkaisut/kannot.pdf>.
32. Seppälä, J. Puuaineksesta poltetaan lähes puolet. Tekniikka ja talous 14.12.2006. Viitattu 18.4.2007. Saatavissa: [http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f\\_id=1082808](http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f_id=1082808)
33. Biomassaa koskeva toimintasuunnitelma. Komission tiedonanto. Viitattu 3.4.2007. Saatavissa: [http://ec.europa.eu/energy/res/biomass\\_action\\_plan/doc/2005\\_12\\_07\\_comm\\_biomass\\_action\\_plan\\_fi.pdf](http://ec.europa.eu/energy/res/biomass_action_plan/doc/2005_12_07_comm_biomass_action_plan_fi.pdf)
34. Mattila, L., Saastamoinen, J. & Helynen, S. Energian tuotantoteknologiat. Energy visions 2030 for Finland. VTT Energy. Viitattu 3.4.2007. Saatavissa: [http://mango2.vtt.fi/vtt/uutta/img/ev/pdf/energyvisions\\_mattila.pdf](http://mango2.vtt.fi/vtt/uutta/img/ev/pdf/energyvisions_mattila.pdf)
35. Puustinen, T. Suossa on suunnaton aarre. Talouselämä, 20.10.2006. Viitattu 18.4.2007. Saatavissa: [http://www.talouselama.fi/doc.do?f\\_id=1048231](http://www.talouselama.fi/doc.do?f_id=1048231).
36. Törmänen, E., Savolainen, T. Turve voittaa kivihiilen ilmastovertailussa. Tekniikka ja talous 13.3.2007. Viitattu 19.4.2007. Saatavissa: [http://www.tekniikkatalous.fi/doc.te?f\\_id=1131966](http://www.tekniikkatalous.fi/doc.te?f_id=1131966)
37. Anon. The world's largest biofuel CHP plant. Alholmens Kraft, Pietarsaari. Viitattu 10.4.2007. Saatavissa: [http://www.tekes.fi/opet/pdf/Alholma\\_2002.pdf](http://www.tekes.fi/opet/pdf/Alholma_2002.pdf)

38. Seppälä, J. UPM rakentaa biovoimalaitoksen Skotlantiin. Tekniikka ja talous, 5.12.2006. Saatavissa: [http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f\\_id=1078219](http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f_id=1078219)
39. Wikipedia. Tuulivoima. Viitattu 18.4.2007. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuulivoima>
40. Energianet. Uusiutuvat energialähteet. Viitattu 3.4.2007. Saatavissa: <http://www.energianet.fi/index.php?page=sahkohoolto&osa=2>
41. Anon. Lausunto Uusiutuvan energian ohjelmasta ja Energiensäästöohjelmasta 2003–2006. Viitattu 3.4.2007. Saatavissa: [http://www.dodo.org/muuta/lausunto\\_uusiutuvan.html](http://www.dodo.org/muuta/lausunto_uusiutuvan.html).
42. Södra. Viitattu 4.4.2007. Saatavissa: <http://www.sodra.se/>.
43. Larson, E.D., Consonni, S., Katofsky, R.E., A cost-benefit assessment of biomass gasification power generation in the pulp and paper industry. Final report. 8 October 2003. s. 191.
44. Thorp, B., Raymond, D. Forest Biorefinery Could Open Door To Bright Future for P&P Industry. PaperAge. October 2004. s. 16-18.
45. Andersson, E., Harvey, S. Pulp-mill integrated biorefineries; a framework for assessing net CO<sub>2</sub> emission consequences. 6 s.
46. Reinikainen, M., Kurkela, E., Simell, P., McKeough, P. Biomassan kaasuttaminen ja Fischer-Tropsch-tekniikka. Ympäristötekniikan seminaari, 21.3.2007, Joensuu. Viitattu 3.4.2007. Saatavissa: [http://www.keti.fi/dman/Document.phx/~keti/Julkinen/ecoteekki/Ymp%E4risto%F6teknologian+seminaari\\_070321/Reinikainen?folderId=%7Eketi%2FJulkinen%2Fecoteekki%2FYmp%25E4rist%25F6teknologian%2Bseminaari\\_070321&cmd=download](http://www.keti.fi/dman/Document.phx/~keti/Julkinen/ecoteekki/Ymp%E4risto%F6teknologian+seminaari_070321/Reinikainen?folderId=%7Eketi%2FJulkinen%2Fecoteekki%2FYmp%25E4rist%25F6teknologian%2Bseminaari_070321&cmd=download).
47. Simell, P., Kurkela, E., McKeough, P. Biopolttoaineiden tuotanto metsäteollisuuden biojalostamossa. Kemian päivät, 27.–29.3.2007, Helsinki.
48. Henricson, K., Kuusio, M., Mickal, V., Ebeling, K. Sulfur-free cooking – A way to get more power out of your process. Pulp and Paper 2004. Helsinki.
49. Haukkasalo, A. Puusta tehdään pian dieseliä Suomessa. Energia-lehti 29.5.2006. Viitattu 18.4.2007. Saatavissa: [http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f\\_id=912814](http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f_id=912814)
50. Laine, C., Harlin, A. Industrial availability and quality of hemicelluloses for chemical and material use. Forest platform biorefinery. 22–23 November 2006. Lahti, Finland.
51. Sergey. Kraft mill biorefinery.

52. Haituri, H. Etanolin tuotto ja käyttö polttoaineena. Viitattu 19.2.2007. Saatavissa: [http://www.mm.helsinki.fi/users/lindstro/Opetus/Mikro\\_400/Seminaarityot/heli.html](http://www.mm.helsinki.fi/users/lindstro/Opetus/Mikro_400/Seminaarityot/heli.html)
53. Klemola, K. Liikenteen biopolttoaineet. Ympäristötekniikan seminaari. Joensuu 21.3.2007.
54. Salminen, K. Ruotsi etenee – Suomi jähkailee etanolin käytössä. Tekniikka ja Talous, 20.10.2005. Viitattu 18.4.2007. Saatavissa: [http://www.tekniikkatalous.fi/doc.do?f\\_id=793614](http://www.tekniikkatalous.fi/doc.do?f_id=793614)
55. Haukkasalo, A. Polttoainetta autolle vai ruokaa ihmisille. Energia-lehti 20.9.2006. Viitattu 18.4.2007. Saatavissa: [http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f\\_id=102871](http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f_id=102871)

