



Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista

Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista

Toimittaja
Niklas von Weymarn



ISBN 978-951-38-6968-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2007

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland

phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

VTT, Tietotie 2, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7071

VTT, Datavägen 2, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7071

VTT Technical Research Centre of Finland, Tietotie 2, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland

phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7071

von Weymarn, Niklas (toim.). Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista. Espoo 2007. VTT Tiedotteita – Research Notes 2412. 44 s.

Avainsanat biomass, biofuels, alcohols, bioethanol, cellulosic materials, straw, reed canary grass, conversion, hydrolysis, biorefineries, modelling, investments

Tiivistelmä

Etanolia tuotetaan maailmalla huomattavia määriä. Pääosa liikennekäyttöön päätyvästä etanolista tuotetaan Brasiliassa ja Yhdysvalloissa käyttäen pääraaka-aineena joko sokeriruo’osta saatua sokeria (sakkaroosia) tai maissin ja muiden viljalajien jyivistä saatua tärkkelystä. Suomessa liikennepolttoainekäyttöön tarkoitettua etanolia tuotetaan tällä hetkellä vain yhdessä (pienessä) laitoksessa.

Tässä tiedotteessa raportoidaan tutkimuksesta, jonka tavoitteena oli soveltaen nykyistä parasta tietämystä arvioida, miten maatalouden korsibiomassoihin pohjautuva bioetanolituotantomalli soveltuisi teknisesti, taloudellisesti ja ilmastovaikutustensa kannalta Suomen olosuhteisiin. Arvion pohjaksi suunniteltiin hypoteettinen tuotantolaitos, joka vuodessa 160 000 tonnista raaka-ainetta (olkea ja/tai ruokohelpeä) tuottaisi noin 31 000 tonnia etanolia. Korsibiomassan riittävyys järkevän kokoiseksi arvioidulla korjuualueella rajaisi siis tehdaskoon Suomessa suurin piirtein tähän kokoluokkaan. Etanolin ohella laitos tuottaisi myös sähkö- ja lämpöenergiaa, josta merkittävä osa palautuisi etanolilaitoksen käyttöön.

Laitoksen investointimenoksi arvioitiin noin 110 miljoonaa euroa. Etanolin tuotantokuluiksi arvioitiin vastaavasti noin 1 €/litra etanolia. Tämä luku sisältää sekä suorat tuotantokulut että investoinnin kuoletuksen. Arviomme mukaan hypoteettisen laitoksen investointimeno ja tuotantokulut olisivat noin kaksinkertaiset verrattuna vastaavankokoiseen, viljan jyviä raaka-aineenaan käyttävään bioetanolilaitokseen. Investointi tämäntyypiseen, tässä tutkimuksessa sovelletuilla lähtöarvoilla toimivaan tuotantolaitokseen ei siis tämän alustavan arvion mukaan olisi kannattavaa.

Prosessikonsepteja ja teknologiaa kehittämällä selluloosapohjaisen bioetanolituoton kannattavuus on todennäköisesti kuitenkin mahdollista saavuttaa. Jatkokehitystyön keskeisiä tavoitteita ovat i) sellaisten konseptien löytäminen, jotka perustuvat huomattavasti halvempien raaka-aineiden käyttöön, ii) entsyymikulujen alentaminen tai vaihtoehtoisten hydrolyysiratkaisujen kehittäminen, iii) etanolisaannon parantaminen, iv) investointimenojen alentaminen ja/tai v) arvokkaampien sivutuotteiden identifiointi (esim. ligniinille, joka nykyisissä konsepteissa menee kokonaisuudessaan polttoon).

Alkusanat

Tässä tiedotteessa raportoidaan tuloksia kahdesta tutkimusprojektista. Pääosa tuloksista on tuotettu *Esikäsittely- ja hydrolyysitekniikoiden kehittäminen kotimaisten agroraaka-aineiden hyödyntämiseksi bioetanolin tuotossa* (AGROETA) -projektissa. AGROETA oli kaksivuotinen projekti, joka päättyi syyskuussa 2007. Projektin pääsuorittajat olivat Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) sekä Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT). Tutkimusta ohjasi johtoryhmä, johon kuului, pääsuorittajien ja Tekesin ohella, myös edustajat seuraavista kotimaisista yrityksistä: Lännen Tehtaat, Neste Oil, Panimolaboratorio, Rintekno ja Suomen bioetanolit. Projektia rahoittivat Tekesin ClimBus-tekniologiaohjelma, VTT, MTT sekä edellä mainitut johtoryhmäyritykset. Ilmastovaikutusarvioinnit ja pääosa raaka-ainevarojen arvioinneista on tehty VTT:n Biojalostamo-tekniologiateeman rahoittamassa *Biojalostamo-konseptien järjestelmätarkastelut ja kilpailukyky* (BIOSYS) -projektissa.

Tässä tiedotteessa kuvattujen tulosten tuottamiseen on osallistunut suuri joukko tutkijoita. Keskeisimmät tutkijat olivat (aakkosjärjestyksessä):

- Eemeli Hytönen (VTT, teknistaloudelliset laskelmat)
- Anne Kallioinen (VTT, esikäsittely ja entsyymaattinen hydrolyysi)
- Anu Kaukovirta-Norja (VTT)
- Markku Kontturi (MTT, oljen korjuuaikatutkimukset)
- Olavi Myllymäki (VTT)
- Tuula Mäkinen (VTT; BIOSYS-projektipäällikkö)
- Teuvo Paappanen (VTT, raaka-aineiden riittävyyslaskelmat)
- Katri Pahkala (MTT, ruokohelven korjuuaikatutkimukset)
- Merja Penttilä (VTT)
- Matti Siika-aho (VTT, esikäsittely ja entsyymaattinen hydrolyysi)
- Sampo Soimakallio (VTT, ilmastovaikutukset)
- Eemeli Tsupari (VTT, ilmastovaikutukset)
- Jaana Uusitalo (VTT, käyminen)
- Liisa Viikari (VTT; nykyään Helsingin yliopisto)
- Niklas von Weymarn (VTT, AGROETA-projektipäällikkö).

Lisäksi AGROETA-projektiin osallistuivat diplomitöidensä kautta Klaus Gentz (TKK) ja Alex Saarto (Åbo Akademi/Rintekno).

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Alkusanat	4
1. Johdanto.....	7
2. Menetelmät	10
2.1 Raaka-aine	10
2.1.1 Riittävyys Suomessa	10
2.1.2 Ohran korjuuaikatutkimukset	10
2.1.3 Ruokohelven korjuuaikatutkimukset.....	10
2.2 Prosessi ja talous.....	11
2.2.1 Laboratoriokokeet oljella ja ruokohelvellä	11
2.2.2 Mallinnus	12
2.3 Ilmastovaikutukset.....	12
3. Tulokset	13
3.1 Raaka-aine	13
3.1.1 Riittävyys Suomessa	13
3.1.1.1 Viljan viljelyn pinta-alat ja kesantoalat TE- keskuksittain	13
3.1.1.2 Etanolitehtaan sijoituspaikan arviointia	15
3.1.2 Korjuuajankohta.....	17
3.1.2.1 Ohran olki	17
3.1.2.2 Ruokohelvi.....	20
3.1.3 Logistiikka	23
3.1.4 Hinta tehtaan portilla.....	24
3.1.4.1 Oljen korjuun ja kuljetuksen kustannukset.....	24
3.1.4.2 Ruokohelven korjuun ja kuljetuksen kustannukset.....	24
3.2 Prosessi.....	27
3.2.1 Etanolin valmistus selluloosasta.....	27
3.2.2 Valitut osaprosessit	28
3.2.3 Kokonaisprosessin massatase.....	29
3.2.4 Sivuvirtaratkaisut	31
3.2.5 Tehtaan energiatase.....	31

3.3	Talous	32
3.3.1	Laitoksen mitoitus ja investointimenot	32
3.3.2	Tuotantokulut ja kannattavuus	33
3.3.3	Kannattavuuden herkkyysanalyysi.....	35
3.4	Ilmastovaikutukset.....	37
3.4.1	Oljen korjuu	37
3.4.2	Kuljetukset, jalostus ja jakelu	38
3.4.3	Kokonaisvaikutukset.....	39
4.	Yhteenveto.....	40
	Lähdeluettelo	43

1. Johdanto

Biopolttoaineet ovat biomassoista valmistettuja polttoaineita. Tieliikenteen nykyisiä pääbiopolttoaineita ovat etanoli ja tästä valmistettu ETBE sekä esteröimällä tuotetut biodieselit. Nykyisiä liikennebiopolttoaineita käytetään pääasiassa siten, että niitä lisätään bensiiniin (etanoli ja ETBE) tai dieseliin (biodieselit). Etanolia voidaan myös käyttää sellaisenaan. Tällöin on käytettävä etanolille kehitettyjä moottoreita.

Biopolttoaineeksi nimitettävä etanoli on siis tuotettu uusiutuvista raaka-aineista, tai laajemmin biomassoista. Tästä etuliite ”bio-” ja termi ”bioetanoli”.

Etanolin ja muiden tieliikennebiopolttoaineiden kysyntä on kovassa kasvussa. Kansainvälinen energijärjestö IEA arvioi vuoden 2005 kokonaistuotoksi vajaat 20 miljoonaa öljykvivalenttitonnia (Mtoe), mistä noin 85 % oli bioetanolia (Anon., 2006). Samaisen raportin varovaisempi tulevaisuuden arvio ennustaa tieliikennebiopolttoainetuotannon kasvavan vuoteen 2015 mennessä 54 miljoonaa öljykvivalenttitonniin. Tämä määrä vastaisi kuitenkin vain noin 4 %:a tieliikenteen kokonaispolttoainekulutuksesta vuonna 2015.

Johtavia tieliikennebiopolttoaineiden tuottajamaita, volyyminä mitattuna, ovat Brasilia (v. 2005 8,2 Mtoe) ja Yhdysvallat (7,7 Mtoe) (Anon., 2006). EU on näihin verrattuna vielä suhteellisen pieni toimija (3,0 Mtoe). Suomessa toimii yksi iso kaupallinen tuotantolaitos (Neste Oil Oyj:n ensimmäinen NExBTL-laitos Kilpilahdessa, joka käynnistyi kesällä 2007; toinen samanlainen laitos on rakenteilla niin ikään Kilpilahteen) sekä muutamia pienempiä kaupallisia laitoksia, jotka tuottavat bioetanolia (St1 Biofuels Oy), biodieseliä (rasvaestereitä) tai biometaania.

Tuotantokapasiteetin lisärakentamiseen on maailmanlaajuisesti monia kannustimia. Euroopassa kehitystä ohjaa vuonna 2003 asetettu ”biopolttoainedirektiivi” (2003/30/EC). Suomessa astuu vuonna 2008 voimaan em. direktiivin ohjaamana niin kutsuttu käyttövelvoitelaki. Se määrää, että Suomessa myytävistä tieliikenteen polttoaineista on oltava asteittain suureneva osuus biopolttoaineita siten että vuonna 2010 biopolttoaineiden osuus polttoainemyynnistä vastaisi 5,75 energiaprosenttia. Eurooppa-neuvoston keväällä 2007 julkaiseman energiapaketin puit-

teissa asetettiin uusi tavoite, joka määrää, että biopolttoaineosuuden tulisi vuoteen 2020 mennessä nousta jo 10 energiaprocenttiin.

Etanolia, jonka uskotaan säilyvän tärkeimpänä globaalina tieliikennebiopolttoaineena ainakin vuoteen 2015 saakka, voidaan tuottaa eri tavoin:

- uusiutuvista raaka-aineista tai muista hiilihydraattirikkaista biomassoista sokeria, joka mikrobeja soveltaen (käymisteitse) muutetaan etanoliksi
- öljystä etyleeniä ja tästä kemiallisia katalyyttejä soveltaen etanolia
- fossiilisista raaka-aineista tai biomassoista kaasuttamalla synteetikaasua ja synteetikaasusta kemiallisia katalyyttejä tai mikrobeja soveltaen etanolia.

Edellä mainituista etanolin tuotantomenetelmävaihtoehdoista teollisesti kaikkein suosituin on sokeriin perustuva käymisreitti. Globaalisti merkittävimmät teolliset sokerilähteet nykyisille bioetanolitehtaille ovat sokeriruoko ja -juurikas, maissi, vilja sekä muutamat muut tärkeyspitoiset maataloustuotteet (nk. ensimmäinen sukupolvi). Sakkaroosista (sokeriruoko ja -juurikas) sekä tärkeyspitoisista alkavien tuotantoprosessien ohella bioetanolia voidaan tuottaa myös selluloosasta (nk. toisen sukupolven bioetanoli). Luonnossa selluloosaa ei löydy suuria määriä sellaisenaan (puhtaana), vaan tyypillinen massatuotantoon sopiva selluloosarikas materiaali sisältää myös merkittäviä määriä hemiselluloosaa, ligniiniä ja erilaisia mineraaleja. Tästä johtuu termi lignoselluloosa. Toisen sukupolven tuotantoreitti on teknisesti ensimmäisen sukupolven reittiä huomattavasti haastavampi, koska raaka-aineen käymiskelpoiset sokerit ovat raaka-aineesta vaikeammin erotettavissa kuin esim. tärkeyspitoisista. Potentiaalisia raaka-ainelähteitä toisen sukupolven tuotannolle ovat erilaiset korjuutähteet ja runsaasti lignoselluloosaa sisältävät teollisuuden prosessointisivuvirrat, puubiomassa sekä energiakasvit.

Kaupallisia toisen sukupolven tuotantolaitoksia on jo maailmalla muutamia toiminnassa. Venäjällä toimi ainakin vielä 1990-luvun lopulla tämännäyttöpäisiä laitoksia. Myös Ruotsissa sijaitsevaan sulfiittimassatehtaaseen integroitu etanolitehdas (Domsjö Fabriker, Örnsköldsvik) voidaan luokitella kaupalliseksi toisen sukupolven laitokseksi. Uusia toisen sukupolven teollisen mittakaavan tuotantolaitoksia rakennetaan paraikaa, varsinkin Yhdysvalloissa. Ensimmäisten uusien laitosten uskotaan olevan toiminnassa aikaisintaan ensi vuonna.

Tämä tiedote käsittelee etanolin valmistamista kotimaisista maatalouden selluloosarikkaista materiaalivirroista, lähinnä viljan oljesta ja energiakasvina tunnetusta ruokohelvestä. Oljen potentiaali on kotimaisista maatalouden korsibiomas-soista selkeästi suurin. Ruokohelpi on vastaavasti mielenkiintoisimpia Suomessa kasvatettavia energiakasveja.

Pääosa tässä esitetyistä tuloksista on tuotettu Tekesin suurimmaksi osaksi rahoittamassa AGROETA-projektissa. Projekti koostui seuraavista vaiheista:

- Arvioitiin raaka-aineiden saatavuus eri puolella Suomessa.
- Tutkittiin raaka-aineiden koostumuksen ja korjuuajan merkitystä bioetanolin tuottoon.
- Tutkittiin laboratoriossa etanolituoton tehokkuutta valituilla konversioteknologioilla.
- Arvioitiin syntyneiden sivuvirtojen hyödyntämistä ja kierrätystä.
- Suunniteltiin hypoteettinen tuotantolaitos ja laskettiin sen massatase.
- Laskettiin laitoksen energiatase ja pohdittiin energiaan liittyviä integroitiratkaisuja.
- Arvioitiin laitoksen investointimeno ja etanolituoton kulut.
- Arvioitiin tehdasinvestoinnin kannattavuus.

VTT:n Biojalostamo-tekniologiateeman rahoittamassa *Biojalostamo-konseptien järjestelmätarkastelut ja kilpailukyky* (BIOSYS) -projektissa arvioitiin lisäksi tutkitun tuotantoreitin kasviuonekaasutase (ks. kohta 2.3 Ilmastovaikutukset).

Käytännön kokeissa olkimateriaaleista tutkittiin vain ohran olkea. Eri viljalajien olkimateriaalin on mm. VTT:llä havaittu kuitenkin käyttäytyvän valitussa prosessikonseptissa hyvin samankaltaisesti. Ohran oljen tiedetään itse asiassa olevan esim. vehnän olkeen verrattuna hieman vaikeammin prosessoitava lähtöaine. Suunniteltu hypoteettinen tehdas pystyisi siis käyttämään, joko samanaikaisesti tai erikseen, kaikkia kotimaisia olkiraaka-aineita sekä ruokohelpeä.

2. Menetelmät

2.1 Raaka-aine

2.1.1 Riittävyys Suomessa

Työn alussa arvioitiin raaka-aineen riittävyys Suomessa. Arvioiden perustana käytettiin Maa- ja metsätalousministeriön ylläpitämää Matilda-tilastotietokantaa maanviljelystä Suomessa, josta voi hakea tietoa koko maata koskien, työvoima- ja elinkeinokeskuksittain (TE-keskus) sekä kunnittain (www.matilda.fi). Arvoihin on laskettu kuuluvan kaikkien eri viljalajien olkipotentiaali kyseisellä alueella.

2.1.2 Ohran korjuuaikatutkimukset

Ohranäytteet otettiin vuosina 2005 ja 2006 Jokioisten kartanoiden ohra- ja viljelyk-sistä, joissa lajikkeena oli Artturi-rehuohra. Näyteala (40 m x 50 m) jaettiin vii-teen lohkokseen, ja kukin lohko jaettiin vielä kuuteen ruutuun (kuusi näytteenotto-kertaa ohran eri kasvuvaiheissa). Lohkon sisällä ruudut arvottiin eri näytteenot-tokertojen varten. Kussakin ohran kasvuvaiheessa lohkoilta (5) leikattiin maan pintaa myöten ohrasta yhden neliön näytealalta kaksi näytettä, kukin kooltaan 0,5 m x 1 m. Kummankin näytteen tuorepaino punnittiin. Toinen näyte silputtiin ja siitä määritettiin kuiva-ainepitoisuus. Toinen näyte kuivattiin alle +40 °C :ssa tasokuivurissa kokonaisuutena ja varastoitettiin paperisäkissä, ja siitä määritettiin oh-ran satokomponentit (olki, lehdet, tähkä/jyvät) ja kemiallinen koostumus.

2.1.3 Ruokohelven korjuuaikatutkimukset

Tutkimukseen käytettiin kahta eri-ikäistä ruokohelpipeltoa, joista vanhempi oli kylvetty vuonna 1990 (koe 702) savimaalle ja nuorempi vuonna 2003 (koe 703) multavalle maalle. Koealueet jaettiin neljään lohkokseen, jotka kokeessa 703 jaet-tiin vielä kuuteen (2005) tai yhdeksään (2006) koeruutuun. Ruutujen paikat ar-vottiin lohkon sisällä eri näytteenottokertoja varten. Kokeessa 702 näytteenotto-kertoja oli ainoastaan kolme, sillä käytettävissä oleva ala oli pienempi. Näytteet otettiin jokaisesta ruudusta leikkaamalla kasvusto 1 m²:n alalta. Osa näytteestä käytettiin kuiva-aineen määrittämiseen. Lehtien ja varsien osuus biomassasta määritettiin 0,25 m² alalta korjatuista kasveista. Loput kasveista kuivattiin alle +40 °C:ssa kemiallisia analyysejä varten.

Vuonna 2005 määritettiin kaikista näytteistä biomassan määrä, kasvosienien osuudet (lehdet ja korsi mukaan lukien lehtitupet ja kukinnot), kuidut (selluloosa, hemiselluloosa, ligniini) ja liukoiset sokerit (glukoosi, fruktoosi, sakkaroosi, fruktaani, kokonaissokeri). Lisäksi kokeen 702 kevätnäytteistä ja kokeen 703 näytteistä 4, 8 ja 9 määritettiin tuhkapitoisuus ja kivennäisaineita. Vuonna 2006 kaikista näytteistä määritettiin biomassan määrä, kasvosienien osuudet. Lisäksi kokeesta 703 näytteistä 4–9 määritettiin kuidut ja liukoiset sokerit. Eri kehitysvaiheissa korjatusta materiaalista tehtiin myös tuhka- ja kivennäisainemääriytyksiä.

Kasvustomääriytykset (biomassa ja kasvuston koostumus) ohra- ja ruokohelpitukimukissa tehtiin MTT:n Kasvintuotannon tutkimuksessa ja kemialliset määriytykset MTT:n Kemian laboratoriossa.

2.2 Prosessi ja talous

2.2.1 Laboratoriokokeet oljella ja ruokohelvellä

Raaka-aineen konversiota etanoliksi tutkittiin VTT:n laboratoriossa. Osa höyryräjäytyskokeista tilattiin alihankintana joko Lundin yliopistosta Ruotsista tai KCL:ltä. MTT:ltä saadut raaka-ainenäytteet silputtiin ja käsiteltiin happokatalyytillä esikäsittelyn tehostamiseksi. Esikäsittelyn olosuhteet vaihtelivat hieman suorituspaikkojen mukaan. Lundissa kokeet tehtiin höyryräjäytykseen suunnitellussa koelaitteistossa. Seulomattomattoman raaka-aineen happamuus laskettiin lisäämällä siihen rikkidioksidia. Ylälämpötila oli 190 °C ja viipymäaika ylälämpötilassa 5 min. KCL:llä höyryräjäytyksiin käytettiin kymmenen litran reaktoria, jossa oli tarkoitukseen sopiva poistoventtiili ja sykloni tuotteen talteenottoon. Silputun ja seulotun (2 mm seulakoko) materiaalin happamuus laskettiin rikkihapolla, ja ylälämpötilat olivat 190–206 °C. Hypoteettiseen tehtaaseen valittiin seuraavat olosuhteet: hapotus rikkihapolla siten, että rikkihapon alkukonsentraatio oli 0,25 massaprosenttia, ja viipymäaika ylälämpötilassa 200 °C viisi minuuttia.

Entsymaattiseen hydrolyysiin testattiin useita kaupallisia entsyymejä. Tehokas hydrolysoituminen edellyttää sekä sellulaasivalmisteiden että mahdollisesti β -glukosidaasivalmisteiden lisäämistä. Sellulaaseista testattiin seuraavat: Econase[®] (AB Enzymes), Spezyme[®] CP (Genencor) ja Celluclast[®] 1.5 L (Novozymes). β -Glukosidaasivalmiste oli Novozym 188 (Novozymes). Sellulaasien tehokkuu-

desa ei ollut suuria eroja. Hypoteettisessa tehtaassa käytettiin entsyymiannostusta 10 FPU sellulaasia / g kuivaa raaka-ainetta ja 100 nkat Novozym 188-valmistetta / g kuivaa raaka-ainetta. Lämpötila ja happamuus oli säädetty arvoihin 45 °C ja pH 5. Entsymaattisen hydrolyysin alussa kuiva-ainepitoisuus oli säädetty 15 massaprosenttiin.

Noin kolmen tunnin esihydrolyysin jälkeen materiaali siirrettiin bioreaktoriin (fermentoriiin), jossa sen lämpötila säädettiin 32 °C:seen. Joukkoon lisättiin hiivasolut (VTT:n oma hiivakanta, joka ainakin puhtailla sokereilla kasvaessaan tuottaa myös viisihiilistä sokereista etanolia). Käymisen (fermentoinnin) aikana happamuutta ei säädetty. Sopivaksi käymisajaksi hypoteettisessa tehtaassa arvioitiin 70 tuntia.

Käymisen jälkeen kiintoaine erotettiin suodattamalla ja sen lämpöarvo arvioitiin soveltaen seuraavia standardimenetelmiä: DIN 51718, DIN 51720, CEN 335 ja DIN 51900.

2.2.2 Mallinnus

Aine- ja energiataseet laskettiin VTT:llä kehitetyllä kaupallisella Balas-prosessisimulointiohjelmistolla (balas.vtt.fi). Investointi- ja käyttökustannuslaskelmat tehtiin taseiden pohjalta Microsoftin Excelillä.

2.3 Ilmastovaikutukset

Oljen korjuun vaikutuksia viljelysmaan kasvihuonekaasupäästöihin ja satotason arvioitiin saatavilla olevien kansallisten ja kansainvälisten selvitysten perusteella. Ruokohelven viljelyn kasvihuonekaasupäästöjä arvioitiin Tekesin ClimBus-ohjelmaan kuuluneessa BIOGHG-hankkeessa (Mäkinen *et al.*, 2006). Kyseisessä hankkeessa ja sen jatkotöissä (Soimakallio *et al.*, 2007a ja b) käytettyjä laskenta-periaatteita on sovellettu VTT:n omarahoitteisessa BIOSYS-projektissa tehdyissä olki- ja ruokohelpietanolin kasvihuonekaasupäästövaikutusten alustavissa arvioissa. Etanolin prosessoinnin massa- ja energiataseina käytettiin AGROETA-projektissa laboratoriokokeissa ja mallinnuksessa syntyneitä oletuksia ja tuloksia.

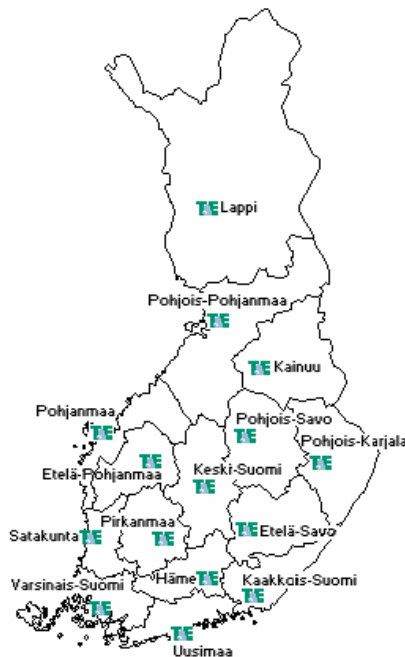
3. Tulokset

3.1 Raaka-aine

3.1.1 Riittävyys Suomessa

3.1.1.1 Viljan viljelyn pinta-alat ja kesantoalat TE-keskuksittain

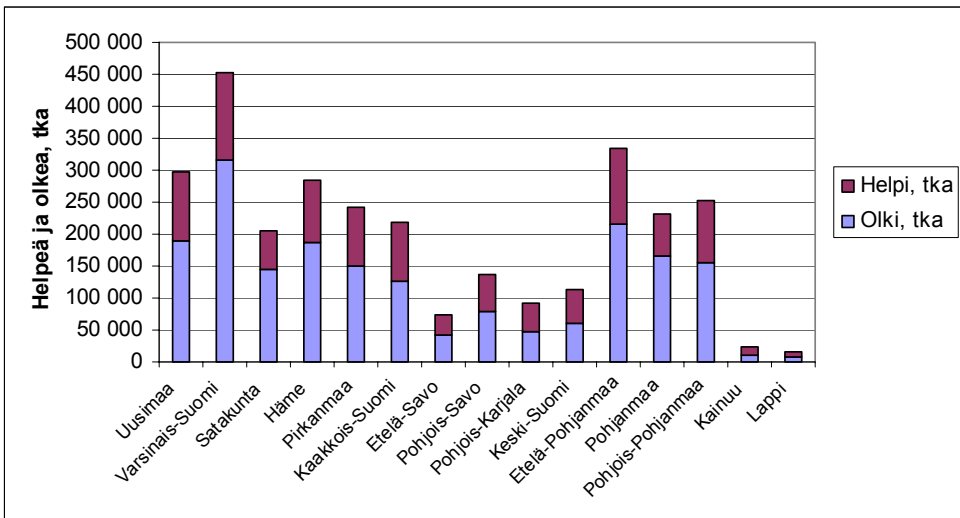
TE-keskukset esitetään kuvan 1 kartassa. Viljan viljelyn pinta-alat vuonna 2005 ja maksimaalinen olkipotentiaali etanolin valmistuksessa ovat taulukossa 1 ja kuvassa 2. Olkipotentiaali on laskettu vilja-alan avulla olettaen oljen määräksi $2 t_{ka}/ha$ ja että 20 % oljesta menee kuivikekäyttöön maatalouteen. Samoin taulukossa 1 ja kuvassa 2 esitetään kesantopeltojen määrä ja ruokohelven määrä, jos koko kesantoala käytetään ruokohelven viljelyyn. Ruokohelven satotasoksi on oletettu $4,5 t_{ka}/ha$.



Kuva 1. TE-keskukset Suomessa (www.te-keskus.fi).

Taulukko 1. Viljan viljelyala, siltä saatavan oljen maksimipotentiali, kesantoala ja sillä kasvatettavan ruokohelven maksimipotentiali (www.matilda.fi).

TE-Keskus	Viljalla, ha	Ylim.olki, tka	Kesanto, ha	Helpi kesanolla, tka	Olki ja helpi, yht., tka
Uusimaa	119 200	190 720	23 770	106 965	297 685
Varsinais-Suomi	196 600	314 560	30 954	139 293	453 853
Satakunta	89 800	143 680	13 957	62 807	206 487
Häme	116 950	187 120	21 288	95 796	282 916
Pirkanmaa	93 100	148 960	20 643	92 894	241 854
Kaakkois-Suomi	79 500	127 200	20 404	91 818	219 018
Etelä-Savo	26 100	41 760	7 136	32 112	73 872
Pohjois-Savo	49 200	78 720	12 796	57 582	136 302
Pohjois-Karjala	30 000	48 000	9 593	43 169	91 169
Keski-Suomi	38 300	61 280	11 641	52 385	113 665
Etelä-Pohjanmaa	134 300	214 880	26 738	120 321	335 201
Pohjanmaa	103 500	165 600	14 571	65 570	231 170
Pohjois-Pohjanmaa	97 300	155 680	21 526	96 867	252 547
Kainuu	6 300	10 080	2 780	12 510	22 590
Lappi	4 500	7 200	2 064	9 288	16 488
YHTEENSÄ	1 184 650	1 895 440	239 861	1 079 375	2 974 815



Kuva 2. Oljen maksimimäärä ja kesantopelloilla viljeltävän ruokohelven maksimimäärä TE-keskuksittain.

TE-keskuksittain tarkasteltuna suurimmat viljan viljelyalat olivat vuonna 2005 Varsinais-Suomessa (196 600 ha), Etelä-Pohjanmaalla (134 300 ha), Uudellamaalla (119 200 ha) sekä Hämeessä (116 950 ha). Sadantuhannen hehtaarin tai hieman sitä pienempiä vilja-aloja oli Pohjanmaalla, Pohjois-Pohjanmaalla, Pirkanmaalla, Satakunnassa ja Kaakkois-Suomessa. Selvästi edellisistä pienemmät vilja-alat olivat Etelä- ja Pohjois-Savossa sekä Keski-Suomessa ja Pohjois-Karjalassa.

3.1.1.2 Etanolitehtaan sijoituspaikan arviointia

Maakuntakohtaisten vilja-alojen perusteella suurimmat peltokeskittymät sijaitsevat siis Varsinais-Suomessa ja Etelä-Pohjanmaalla. Tämän perusteella tarkasteltiin tarkemmin oljen ja ruokohelven saatavuutta Koskenkorvan ja Loimaan ympäristössä. Myös esim. Säkylä voisi olla sopiva sijoituspaikkakunta etanolitehtaalle. Tarkastelu tehtiin 50 km:n ja 100 km:n säteellä paikkakunnista. Tarkastelussa arvioitiin viljalla oleva kokonaispinta-ala, ylimääräisen oljen määrä, kesantopeltojen määrä ja ruokohelven määrä, jos sitä kasvatetaan kesantopelloilla. Tarkastelu tehtiin kuntakohtaisten tietojen perusteella.

Koskenkorvan ympäristössä oleva oljen ja helven määrä esitetään taulukossa 2. Etanolitehtaan vuosittaiseksi raaka-ainetarpeeksi on alustavasti valittu 160 000 t_{ka} . Tämä on likimäärin sama kuin 50 km:n etäisyydellä on yhteensä olkipotentiaalia. 100 km:n etäisyydellä Koskenkorvasta teoreettinen olkipotentiaali on noin 331 000 t_{ka} , joten käyttöletuksella noin puolet kaikesta oljesta 100 km:n etäisyydellä tulisi kerätä tehtaan raaka-aineeksi.

Taulukko 2. Oljen ja kesantopelloilla viljeltävän ruokohelven maksimipotentiaali Koskenkorvan ympäristössä.

	Viljalla, ha	Kesanto, ha	Olki, t_{ka}	Helpi, t_{ka}	Helpi+Olki, t_{ka}
0–50 km	101 000	12 900	161 830	58 100	219 930
50–100 km	106 000	19 000	169 600	85 600	255 200
0–100 km	207 000	31 900	331 440	143 700	475 140

Viljelijöiden halukkuus luopua oljesta voi vaihdella. Olki tuo vähämultaisille maille kaivattua orgaanista ainetta. Koskenkorvan ympäristössä maat eivät ole

kaikkein karuimpia. Oljella on myös jonkinlainen lannoitearvo, jonka perusteella viljelijä voi vaatia korvausta oljesta. Toisaalta nurmen perustamisessa ja suorakylvössä viljelijälle on etua siitä, että joku kerää oljen pois. Vuosittain uudistettava nurmiala on kuitenkin pieni verrattuna kokonaisvilja-alaan: 50 km:n säteellä vain noin 6 000 ha (12 000 t_{ka}) ja 50–100 km:n etäisyydellä 13 400 ha (26 800 t_{ka}). Ei ole olemassa yksikäsitteistä vastausta siihen, kuinka suuri osuus oljesta voidaan käytännössä kerätä. Yhtenä maksimiarviona voidaan pitää, että olkea kerätään samalta lohkolta joka toinen vuosi, jolloin puolet teoreettisesta olkipotentiaalista on käytössä.

Mikäli kesantopelloilla aletaan viljellä ruokohelpeä, etanolitehtaalle toimitettavan raaka-aineen määrä lisääntyy. Käytettäessä 100 km:n hankintasädettä etanolitehtaan raaka-aineen tarve täyttyy, kun 34 % kaikesta oljesta kerätään ja 34 %:lla kesantopelloista viljellään ruokohelpeä. Tämä olisi realistisin tapa hoitaa etanolitehtaan raaka-aineen saanti. Tässä tilanteessa olkea käytetään 111 600 t_{ka} ja helpeä 48 400 t_{ka} . Seinäjoen voimalaitos pystyy käyttämään kiinteänä polttoaineena helpeä noin 11 400 ha:n suuruisen viljelyalan, 51 300 t_{ka} . Tämä vaatisi noin kolmanneksen kesantoalasta ruokohelven viljelyyn, jolloin yksi kolmasosa kesannosta jäisi vielä varalle. Toisaalta ruokohelpiraaka-ainetta voi syntyä myös viljelijöiden siirtyessä viljan viljelystä helven viljelyyn.

Loimaan ympäristössä oleva oljen ja helven määrä esitetään taulukossa 3. Viidenkymmenen kilometrin etäisyydellä Loimaalta on oljen maksimipotentiaali 243 500 t_{ka} ja kesantopelloilla viljeltävän helven 95 700 t_{ka} . Jos oletettu raaka-ainetarve bioetanolitehtaassa, 160 000 t_{ka} katetaan pelkästään oljella, on noin 66 % kaikesta oljesta kerättävä. Jos helpi otetaan mukaan, on oljen korjuuaste ja kesantopeltojen käyttö noin 47 %. 50 km:n hankintasäde on pienehkö etanolitehtaan raaka-aineen saatavuuden turvaamiseksi.

Taulukko 3. Oljen ja kesantopelloilla viljeltävän ruokohelven maksimipotentiaali Loimaan ympäristössä.

	Viljalla, ha	Kesanto, ha	Olki, t_{ka}	Helpi, t_{ka}	Helpi+Olki, t_{ka}
0–50 km	152 200	21 300	243 500	95 700	339 200
0–100 km	399 500	58 300	639 100	262 400	901 500

100 km:n etäisyydellä Loimaalta on runsaasti raaka-ainetta: olkea 639 100 t_{ka} ja helpeä 262 400 t_{ka}. Raaka-ainetarpeen kattaminen pelkästään oljella merkitsee sitä, että noin neljäsosa kaikesta oljesta on kerättävä. Jos myös ruokohelpi otetaan mukaan, on oljen korjuuaste ja kesantopeltojen käyttö noin 18 %. Tässä tilanteessa olkea käytetään 113 400 t_{ka} ja helpeä 46 600 t_{ka}. Loimaan ympäristössä olevat voimalaitokset pystyvät käyttämään ruokohelpeä noin 10 600 ha alalta (47 700 t_{ka}), mikä on noin kuudesosa kesantoalasta 100 km:n etäisyydellä Loimaalta.

3.1.2 Korjuuajankohta

Ohra puidaan mm. elintarvikesektoria varten viljan käytön kannalta parhaaseen ajankohtaan. Suomessa ohran puinti ajoittuu näin ollen normaalisti elokuun keskivaiheille. Nykyisin Suomessa viljeltyä ruokohelpeä käytetään vastaavasti teollisesti lähinnä sähkön ja lämmön tuottamiseksi. Tällöin biomassan korjuu ajoittuu huhti–toukokuulle. Lignoselluloosapohjaisen bioetanolivalmistuksen kannalta nämä korjuuajankohdat eivät välttämättä ole ne kaikkein optimaalisimmat, joten tutkimme AGROETA-projektissa sadonkorjuuajankohdan merkitystä raaka-aineen koostumukseen. Bioetanolituoton kannalta maksimoinnin kohteita ovat hiilihydraattien (tärkeimpänä selluloosan) massasaanto per hehtaari, ligniinipitoisuuden ja piipitoisuuden minimointi sekä yleinen tekninen soveltuvuus bioetanoliprosessiin.

3.1.2.1 Ohran olki

Ohran kasvua ja oljen laadun kehitystä seurattiin ottamalla seuraavat kuusi näyttettä (tarkat päivämäärät taulukossa 4):

1. kesäkuun loppu (noin 20 % ohrista tähkällä)
2. heinäkuun alku (ohra täydellä tähkällä)
3. keskikesä
4. heinäkuun loppupuolisko (ohra maito- tai taikinatuulentunut)
5. elokuun alku (ohra keltatuulentunut)
6. elokuun keskivaihe (kasvusto leikkuupuintivalmis).

Ennen laatuanalyysijä tähkä (jyvät) ja olki erotettiin mahdollisuuksien mukaan toisistaan. Ensimmäisessä näytteenotossa kehittyvä tähkä oli osassa näytettä vielä piilossa lehtitupen sisässä. Taulukossa 4 esitetään ohran kokonaissadon, olkisadon ja oljen laatu-tekijöiden kehitys loppukesän aikana. Kokonaissadon kasvu toisen näytteenoton (täysi tähkintä) jälkeen johtui yksinomaan tähkänpainon (jyvien) kasvusta. Korjuuseen mennessä biomassasato kasvoi yli kaksinkertaiseksi. Vastaavasti olkisato hieman pieneni, koska ohra käyttää korteen ennen tähkintää tilapäisesti varastoituneet yhteyttämistuotteet jyväsadon kasvattamiseen. Vaikka keskikesä 2006 oli kuiva, se ei näkynyt sadossa, koska ohran kasvupaikka oli hikevä eikä ohra kärsinyt vedenpuutteesta.

Koko kasvuston (tähkä, olki ja lehdet) yhteenlaskettu sato per hehtaari (hehtaarisato) kasvoi aina heinäkuun loppuun – elokuun alkuun asti. Sato oli tällöin suurimmillaan $8,1 \pm 0,3 t_{ka}/ha$ vuonna 2005 ja $10,7 \pm 0,6 t_{ka}/ha$ vuonna 2006 (ks. taulukko 4). Tähkän osuus kokonaissadoista oli siis vuonna 2005 noin 64 ja vuonna 2006 noin 69 %. Oljesta oli selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä noin 48, 25 ja 7 % vuonna 2005 sekä vuonna 2006 vastaavasti noin 44, 25 ja 8 %. Kahden viimeisen näytteenoton välillä kasvuston hehtaarisato pieneni noin 10 %. Tämä johtui lähinnä kasvuston hengityksestä ja lehtien varisemisesta. Oljen kosteusprosentti oli esim. vuoden 2006 näytteissä nro 5 ja 6 noin 37 ja 21 %.

Taulukossa 4 esitetään yksittäisten olkikomponenttien hehtaarisatojen kehittyminen kesän aikana. Taulukosta nähdään, että oljen kannalta merkittävin kasvuvaihe on heti kesän alussa. Koko kasvuston biomassa hehtaaria kohden kasvoi kuitenkin, kuten yllä mainittiin, ainakin vielä kuukauden, eli heinäkuun loppuun – elokuun alkuun. Heinäkuussa ohrakasvuston biomassa kasvoi siis sitä mukaa, kun tähkän paino kasvoi eli, kun jyvät kasvoivat varastoiden tärkkelystä ja valkuaisaineita. Vuoden 2005 sadossa ligniinin määrä lisääntyi ja tuhkan määrä väheni ohran kasvun myötä. Vuonna 2006 ligniinin ja tuhkan määrä ei juuri muuttunut ennen sadonkorjuuta. Piin (Si) pitoisuus tuleentuneessa oljessa oli $10,3 \text{ mg/kg ka}$ (vuonna 2006). Oljen liukoisten sokerien (glukoosin, fruktoosin, sakkaroosin, fruktaanien) määrä väheni nopeasti ohran tähkälletulon jälkeen, kun jyvät alkoivat kasvaa.

Taulukko 4. Ohran korjuu eri kehitysvaiheissa vuosina 2005 ja 2006. Kokonais-sato, selluloosasato, hemiselluloosasato, ligniinisato kg/ha kuiva-ainetta. Tuhka ja sokerit (glukoosi, fruktoosi, sakkaroosi) kg/ha.

Korjuu NRO	Korjuupäivämäärä	Ohran bio-massa ^a	Ohran olki + lehti massa ^a	Selluloosa	Hemiselluloosa	Ligniini	Tuhka	Gluukoosi	Fruktoosi	Sakkaroosi
2005										
1	27.6.2005	3696b	2825b	869	533	113	247	88	105	165
2	4.7.2005	4650b	3340a	1129	557	141	252	100	145	238
3	18.7.2005	7466a	2927ab	1193	601	192	206	49	109	67
4	26.7.2005	8104a	2505bc	1141	634	178	148	22	28	
5	1.8.2005	7656a	2228c	1071	553	163	134	10		
6	8.8.2005	7696a	2174c	1112	515	174	104	10		
2006										
3	12.7.2006	6966b	3641a	1215	688	253	273	146	233	249
4	20.7.2006	8862ab	3344a	1279	661	245	266	88	166	140
5	1.8.2006	10720a	3274a	1443	825	254	287	22	35	
6	7.8.2006	9851a	2995a	1321	756	218	271	14	22	

^a) Keskiarvojen tilastollisesti merkitsevät erot on testattu Tukey-Kramer-testillä ja merkitty eri kirjaimin.

Pohdimme myös sitä mahdollisuutta, että bioetanolituoton kannalta olkisadon voisi ehkä korjata talteen jo keskikesällä, mikä mahdollistaisi korjuun kahdesti kesässä. Ohran versominen korjuun jälkeen on kuitenkin hyvin vähäistä, joten päädyimme tässä työssä yhteen korjuu-aikaan. Tämä tapahtuisi normaalin jyväpuinnin yhteydessä, jolloin olkea voisi ympäristönäkökulmasta käsitellä sivuvirtana. Viljakasvien olkisato ei myöskään ole kovin suuri verrattuna esimerkiksi ruokohelven biomassasatoon.

Kesällä 2006 tutkittiin näytteen 6 (leikkuupuintivalmis ohra) avulla myös oljen eri osien massaa ja sängen pituuden vaikutusta olkisaantoon (ks. taulukko 5). Tuloksista nähdään, että olki on tyveltä kosteampi mutta myös tiheämpi. Jos sängen pituudeksi jätetään sadonkorjuussa esim. 15 cm, menetetään noin 27 % potentiaalisesta olkisadosta.

Taulukko 5. Ohran oljen jaottelu 5 cm:n pituisiin osiin vuonna 2006. Oljen osien kuivapaino ja osuus koko oljesta. Näytteen koko on 50 ohrayksilöä ja tulokset ovat viiden toiston keskiarvoja.

Olkinäyte cm	Näytteen kuivapaino, g	Näytteen painosuus koko oljesta, %	Kumulatiivinen painosuus koko oljesta, %	Näytteen kuiva-ainepitoisuus, %	Näytteen kuivapaino/cm olkea
65–	2,96	6,5	100,0	89,7	0,59
60–65	2,35	5,1	93,5	87,1	0,47
55–60	2,39	5,2	88,4	83,5	0,48
50–55	3,09	6,8	83,2	77,3	0,62
45–50	2,98	6,5	76,4	70,2	0,60
40–45	3,08	6,7	69,9	64,8	0,62
35–40	3,11	6,8	63,2	60,5	0,62
30–35	3,08	6,7	56,4	55,9	0,62
25–30	3,32	7,3	49,6	52,3	0,66
20–25	3,49	7,6	42,4	50,9	0,70
15–20	3,53	7,7	34,7	50,3	0,71
10–15	3,83	8,4	27,0	48,3	0,77
5–10	4,04	8,8	18,6	46,2	0,81
0–5	4,48	9,8	9,8	45,2	0,90

Ohran puinnin yhteydessä vuonna 2006 mitattiin leikkuupuimurista tulleen oljen määrä ja ohran sängin pituus. Lohkojen (viisi kpl) keskimääräinen sänginpituus oli 8,5 cm ja olkisato 2,8 t_{ka}/ha. Tämä oli noin 10 % vähemmän kuin näytteenottoon perustunut potentiaalinen olkisato.

3.1.2.2 Ruokohelpi

Ruokohelpikasvusto on heterogeenisempää kuin esimerkiksi ohrakasvusto, sillä siinä on samaan aikaan eri-ikäisiä versoja. Uusia versoja syntyy lähinnä kevät-kesällä ja syksyllä. Kevätversoista noin kolmannes tekee kukinnon (röyhyn), joka ylittää jopa 1,75–2 m:n korkeuteen. Osa versoista jää kasvullisiksi, korkeintaan noin metrin mittaisiksi. Tämän vuoksi myös korjattavan biomassan laatu vaihtelee enemmän kuin esimerkiksi oljella.

Tässä tutkimuksessa ruokohelpeä korjattiin eri kehitysvaiheissa olevista kasvustoista vuonna 2005 ja 2006. Viimeinen näyte otettiin keväällä 2007. Tutkimuksessa käytetyn ruokohelpimateriaalin kehitysvaihe eri näytteenottokertoina oli seuraava:

Kehitysvaihe:

- Koe 702
1. Siemenen kypsyttyä
 2. Siemenen kypsymisestä n.3 kk
 3. Keväällä kuloheinänä
- Koe 703
1. 20 % kasveista röyhy näkyvissä, kesäkuu
 2. Kukinnan alussa
 3. Kukinnan lopussa
 4. Siemenen kypsyttyä
 5. Siemenen kypsymisestä n. 1 kk
 6. Siemenen kypsymisestä n. 2 kk
 7. Siemenen kypsymisestä n. 3 kk
 8. Kasvusto kellastunut
 9. Keväällä kuloheinänä.

Vuonna 2005 ruokohelven suurin biomassasato ($11 \pm 0,4$ t_{ka}/ha) saatiin kehitysvaiheessa 4 ruokohelven siemenen kypsyttyä (ks. taulukko 6). Koska seuraavassa näytteenotossa 16.11. sadon määrä oli vain 7,5 t_{ka}/ha, päätettiin vuonna 2006 tutkia tarkemmin ruokohelven myöhäisiä syyssatoja. Seuraavana vuonna suurin sato ($11 \pm 0,5$ t_{ka}/ha) saatiinkin noin 1 kk siemenen kypsymisestä, minkä jälkeen sadot selvästi pienivät. Vuonna 2006 selluloosan suhteellinen osuus sadossa lisääntyi kevääseen saakka, jolloin pitoisuus oli $47,7 \pm 1,1$ % kuiva-aineesta. Lokakuun näytteenotosta (kehitysvaihe 7, pitoisuus 44,9 %) lähtien muutokset selluloosapitoisuudessa eivät olleet enää tilastollisesti merkitseviä. Myös mitatut hemiselluloosa- ja ligniinipitoisuudet olivat suurempia myöhäissyksyllä ja kevätsadossa kuin aikaisemmissä näytteenotoissa. Kokeessa 703 kevätsadon hemiselluloosapitoisuus vaihteli välillä 25,1–28,3 %_{ka}. ja kokeessa 702 välillä 29,5–31,9 %_{ka}. Tämän vuoksi biomassasadon pieneneminen syksyn ja talven aikana ei vaikuttanut yhtä paljon kuitukomponenttien hehtaarisäntöön.

Taulukko 6. Ruokohelven kuiva-ainesato sekä selluloosan, hemiselluloosan, ligniinin, tuhkan, ja sokerien (glukoosin, fruktoosin ja sakkaroosin) ja piin (Si) määrä (kg/ha) eri kehitysvaiheissa vuosina 2005–2006 ja 2006–2007.

Kehitys- vaihe	Korjuu- päivämäärä	Ruokohelven							Sakka- roosi	Si
		biomassa kg/ha ^{a)}	Sellu- loosa	Hemi- selluloosa	Ligniini	Tuhka	Glukoosi	Fruk- toosi		
Koe 703										
1	22.6.2005	5762a	2079	1415	243		128	134	43	
2	5.7.2005	7627a	3091	1861	486		133	147	68	
3	14.7.2005	9894b	4054	2404	777		218	250	100	
4	3.8.2005	11083b	4433	2546	934	778	214	280	256	
7	16.11.2005	7550a	3269	2084	716	590	60	69	0	
9	2.5.2006	7510a	3263	1885	699	864	26	10	0	276
1	22.6.2006	6661a								
2	5.7.2006	8151ab								
3	19.7.2006	9407bc								
4	31.7.2006	9867bc	3523	2319	737	708	216	284	261	
5	30.8.2006	11084c	3888	2380	795	680	183	289	125	
6	27.9.2006	8914ac	3581	1807	813	568	195	303	72	
7	26.10.2006	8476a	3808	2134	852	492	131	202	0	
8	11.12.2006	7260a	3295	2042	699	425	47	46	0	151
9	4.4.2007	5762a	2746	1628	563	322	23	8	0	101
Koe 702										
4	3.8.2005	8205a	3094	2154	521		177	230	70	
7	17.11.2005	6665a	2647	2043	553		67	84	0	
9	2.5.2006	4165b	1700	1326	382	251	18	9	0	98
4	31.7.2006	7707a								
7	26.10.2006	5605b								
9	4.4.2007	4154c	1822	1225	364	224	22	22	0	80

^{a)} Keskiarvojen tilastollisesti merkitsevät erot on testattu Tukey-Kramer-testillä ja merkitty eri kirjaimin.

Liukoisten sokerien yhteismäärä kiloina oli suurin heinä–elokuun vaihteessa siemenen kypsyttyä ja alkoi sen jälkeen pienentyä. Sakkaroosia ei tavattu enää myöhäissyksyn eikä kevään näytteissä. Tuhkapitoisuus ei suuresti muuttunut kasvukauden aikana. Aikaisempien tutkimusten mukaan kevät sadon tuhkapitoisuus on pienempi kuin vihreänä korjattujen kasvien. Myös tässä tutkimuksessa saatiin vastaavia tuloksia vuonna 2006. Kevätnäytteissä 2.5.2006 (kehitysvaihe 9/2005) havaittu poikkeuksellisen suuri tuhkapitoisuus (11,5 %) johtui mahdollisesti Loimijoen tulvavedestä, joka virtasi keväällä 2006 kokeen yli tuoden mukanaan irtonaista maa-ainesta.

Piin määrä alkuaineena mitattuna oli keväällä korjatussa materiaalissa 2,36 % 2.5.2006 ja 1,93 % 4.4.2007 (koe 702). Kokeessa 703 vastaavat luvut olivat 3,68 ja 1,75 %. Kasveissa pii on silikaattina, jonka määrä saadaan kertomalla piipitoisuudet luvulla 2,1394. Biomassan kuiva-ainepitoisuus oli kesän ja syksyn aikana 17–50 %. Sään vaikutus kuiva-ainepitoisuuteen oli suuri. Keväällä biomassan kuiva-ainepitoisuus oli 84–91 %.

3.1.3 Logistiikka

Raaka-aineen korjuutekniikka, varastointi ja kuljetus tehtaalle ovat keskeisiä tekijöitä tutkitussa tuotantoketjussa. AGROETA- tai BIOSYS-projekteissa ei syvennytty logistiikka-aihepiiriin, mutta seuraavassa on muutama yleinen huomio aiheesta. Aiheesta on äskettäin julkaistu yhteenvetoartikkeli, joka tarkastelee asiaa Yhdysvaltojen näkökulmasta (Hess *et al.*, 2007).

Oljen ja ruokohelven korjuuseen on olemassa erilaisia ratkaisuja. Tavallisimmin olkea korjataan paalaamalla se puinnin jälkeen joko pyörö- tai suurkantipaaleihin varastointia varten. Ruokohelven korjuuketju muodostuu niitosta, karhotuksesta, paalauksesta ja kuljetuksesta varastoon. Olki- ja ruokohelpipaalit sisältävät paljon ilmaa, joka lisää kuljetettavan ja varastoitavan raaka-aineen tilavuutta. Todennäköisin varastointiratkaisu olisi sellainen, jossa tehtaalle tuotaisiin vain lähiviikkojen tarve ja loput materiaalista odottaisi viljelijöiden luona. Eri raaka-aineiden käyttö samassa tehtaassa (olki ja ruokohelpi) mahdollistaisi myös sen, että ruokohelpeä käytettäisiin enemmän keväällä sekä kesällä ja vastaavasti olkea enemmän syksyllä ja talvella.

Biomassan varastointia happamana säilörehuna ja sen soveltuvuutta bioetanoli-tuotantoketjun logistiikkaan pitäisi myös tutkia, sillä tehtaalla raaka-aineen pH:ta lasketaan joka tapauksessa ennen esikäsittelyä. AIV-käsittely parantaa raaka-aineen säilyvyyttä, mutta se voisi myös vaikuttaa positiivisesti lignoselluloosamatriisin olomuotoon entsyymikäsittelyä silmällä pitäen.

3.1.4 Hinta tehtaan portilla

3.1.4.1 Oljen korjuun ja kuljetuksen kustannukset

Oljen korjuun kustannukset on esitetty taulukossa 7. Korjuu on oletettu tehtävän pyöröpaaleina. Paalit on sidottu narulla tai verkolla. Korjuuvaiheen kustannukset ovat noin 29,5 €/t_{ka}. Viljelijälle on oletettu maksettavan oljen lannoitearvon mukainen korvaus, joksi on arvioitu 6,7 €/t_{ka} (Nikolaisen, 1998). Kaukokuljetuksen kustannus 10–100 km matkalla on 9,3–23,5 €/t_{ka}. Kokonaiskustannukset etanoli-tehtaalla ovat 45,5–59,7 €/t_{ka}. Olettamalla oljen hankintasäteeksi 100 km ja siihen liittyväksi keskimääräiseksi kuljetusmatkaksi 50 km ovat kokonaiskustannukset 52,3 €/t_{ka}.

Taulukko 7. Oljen korjuun ja kuljetuksen kustannukset.

Korjuu pyöröpaaleina ja peittäminen pellonreunavarastoihin	
- Karhottaminen	2,8 /t _{ka}
- Paalaus	17,1 /t _{ka}
- Siirto pellon reunaan	3,2 /t _{ka}
- Peittäminen	6,4 /t _{ka}
Yhteensä	29,5 /t_{ka}
Lannoitearvon mukainen korvaus oljesta viljelijälle	
- Kustannus 6,7 /t _{ka}	
Kaukokuljetus etanoli-tehtaalle	Oljen hinta etanoli-tehtaalla
10 km 9,3 /t _{ka}	10 km 45,5 /t _{ka}
25 km 12,0 /t _{ka}	25 km 48,2 /t _{ka}
50 km 16,1 /t _{ka}	50 km 52,3 /t _{ka}
75 km 19,9 /t _{ka}	75 km 56,2 /t _{ka}
100 km 23,5 /t _{ka}	100 km 59,7 /t _{ka}

3.1.4.2 Ruokohelven korjuun ja kuljetuksen kustannukset

Ruokohelven viljelyn ja korjuun kustannukset pellonreunaan saakka ovat 124,2 €/t_{ka}, mikä on lähes nelinkertainen oljen kustannuksiin verrattuna (taulukko 8; Pahkala *et al.*, 2005). Helven kokonaiskustannukset 10–100 km kuljetusmatkalla on 133,5–147,7 €/t_{ka}. Helven saamat maataloustuet ovat esimerkiksi C1-tukialueella Koskenkorvan ympäristössä 127,8 €/t_{ka} (575 €/ha). Vähentämällä korjuu- ja kuljetuskustannuksista maataloustuet muodostuu helven laskennalliseksi hinnaksi etanoli-tehtaalla 10–100 km kuljetusmatkoilla 5,7–20,0 €/t_{ka}, ja 50

km matkalla 12,5 €/t_{ka} (taulukko 5). Tämä toteutuu siis vain, jos maataloustuet otetaan huomioon.

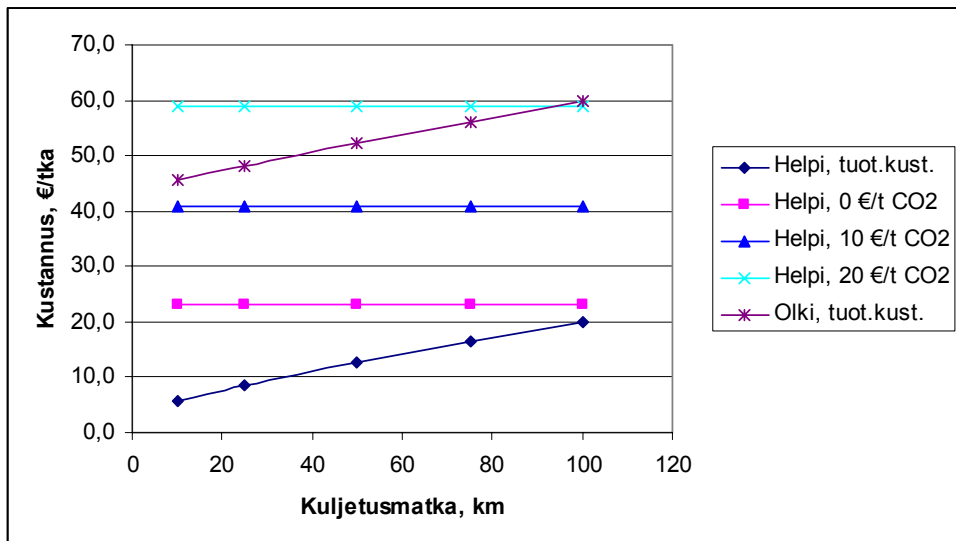
Edellä esitetyissä kustannuksissa ei ole otettu huomioon helven kilpailevaa käyttöä kiinteänä polttoaineena. Kiinteänä polttoaineena helvestä pystytään maksamaan enemmän kuin edellä on esitetty laskennalliseksi hinnaksi etanolilaitoksella. Jyväskylän Rauhalahden voimalaitokselle tehdyssä case-tarkastelussa tarkasteltiin helven rajahintaa, kun otetaan huomioon päästökauppa ja helvellä korvataan turvetta (julkaisematon tulos). Sähkön tuotannon tukea ei ole mukana laskelmissa. Päästöoikeuden hinnoilla 0–20 €/tCO₂ saatiin helven rajahinnaksi 7,9–15,5 €/MWh valmista polttoainetta. Jos etanolitehdas joutuu maksamaan vastavan hinnan, ovat helpiraaka-aineen kustannukset kuvan 3 mukaiset (edellä esitetyistä rajahinnoista, on vähennetty murskauksen kustannus 3 €/MWh, paalattu kokonaisuena). Verrattaessa helven hintaa kiinteän polttoaineen hintaan päästökauppatilanteessa, on hinta etanolitehtaalla oletettu olevan riippumaton kuljetusmatkasta eli viljelijän tulos riippuu kuljetusmatkasta.

Helven hinta etanolitehtaalla riippuu tarkastelutavasta. Minimihinta 50 km:n kuljetusmatkalla on 12,5 €/t_{ka} (taulukko 8, kuva 3). Tästä hinnasta viljelijä ei saa voittoa, joten hinta on epärealistisen alhainen. Jos helvestä maksetaan kiinteänä polttoaineena turpeeseen verrattava hinta ilman päästökaupan huomioimista, on helven hinta etanolitehtaalla 23 €/t_{ka} (kuva 3). Päästöhinnoilla 10 ja 20 €/t CO₂ muodostuu helven hinnoiksi 41 ja 59 €/t_{ka}. Tulkintatavasta riippuen on helven hinta etanolitehtaalla 50 km kuljetusmatkalla siis 12,5–59 €/t_{ka}.

Kuvassa 3 esitetään myös oljen tuotannon kustannukset etanolilaitokselle. Kustannukset ovat 45–60 €/tka 10–100 km:n kuljetusmatkalla, mikä on keskimäärin enemmän kuin helvellä. Kuvan 3 perusteella voidaan myös arvioida, että olki on kilpailukykyinen helven kanssa kiinteänä polttoaineena vasta, kun päästöoikeuden hinta on yli 10 €/t.

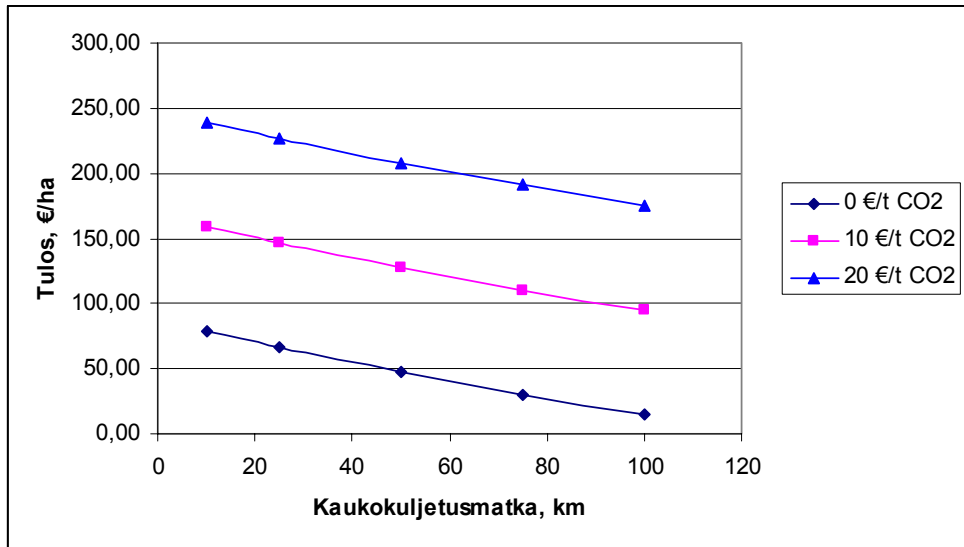
Taulukko 8. Ruokohelven korjuun ja kuljetuksen kustannukset sekä maataloustuet.

Korjuu pyöröpaaleina ja peittäminen pellonreunavarastoihin - Kustannus 124,2 /t _{ka} (559 /ha)		
Kaukokuljetus etanolitehtaalle		
10 km 9,3 /t _{ka}		
25 km 12,0 /t _{ka}		
50 km 16,1 /t _{ka}		
75 km 19,9 /t _{ka}		
100 km 23,5 /t _{ka}		
Korjuu ja kaukokuljetus	Maataloustuet (C1 tukialue)	Helven hinta etanolitehtaalla Korjuu + kuljetustuet
10 km 133,5 /t _{ka}	127,8 /t _{ka} (575 /ha)	10 km 5,7 /t _{ka}
25 km 136,2 /t _{ka}		25 km 8,4 /t _{ka}
50 km 140,3 /t _{ka}		50 km 12,5 /t _{ka}
75 km 144,2 /t _{ka}		75 km 16,4 /t _{ka}
100 km 147,7 /t _{ka}		100 km 20,0 /t _{ka}



Kuva 3. Ruokohelven tuotantokustannukset etanolitehtaalle, helven hinta, kun se on sidottu kiinteään polttoaineen hintaan päästökauppatilanteessa, ja oljen tuotannon kustannukset etanolitehtaalle.

Kuvassa 4 esitetään viljelijän helven viljelystä saama taloudellinen tulos, kun helven hinta etanolitehtaalla määräytyy kiinteään polttoaineen mukaan päästökauppatilanteessa.



Kuva 4. Helven viljelyn taloudellinen tulos.

3.2 Prosessi

3.2.1 Etanolin valmistus selluloosasta

Etanolin teollinen valmistus selluloosapitoisesta materiaalista ei ole uusi asia. Jo esim. perinteisellä happohydrolyysiin perustuvalla tekniikalla tuotettuja sokereita on käytetty etanoliksi mm. Venäjällä vielä 1990-luvun jälkipuoliskolla. Ruotsissa Domsjö Fabriker Örnköldsvikissä tuottaa etanolia sulfiittimassatehtaansa sivuvirrasta. Lignoselluloosaeetanolin on kuitenkin kokemassa uuden tulemisen, sillä ensimmäiset tätä reittiä demonstroivat tuotantolaitokset ovat jo toiminnassa. Esimerkkinä mainittakoon Kanadassa toimivan Iogen-nimisen yrityksen olkea käyttävä demonstraatiolaitos. Vuosien 2009–2011 aikana Yhdysvaltoihin nousee ainakin kuusi uutta demonstraatiolaitosta. Pieni demonstraatiolaitos toimii jo nyt myös Espanjassa ja Tanskassa. Lisäksi uusia laitoksia suunnitellaan myös mm. Hollantiin, Japaniin ja Ruotsiin.

Raaka-ainepohja näissä laitoksissa vaihtelee maa- ja aluekohtaisesti. Suosituimpia raaka-aineita Yhdysvalloissa ovat olki, maissinviljelyn korjuujäte (”corn stover”) ja erilaiset energiaheinät. Suurin potentiaali vastaavasti esim. Brasiliassa-

sa on sokeriruokoteollisuuden sivuvirroissa (bagassi). Myös puu ja puunjalostuksen sivuvirrat ovat tutkimuksen kohteena.

3.2.2 Valitut osaprosessit

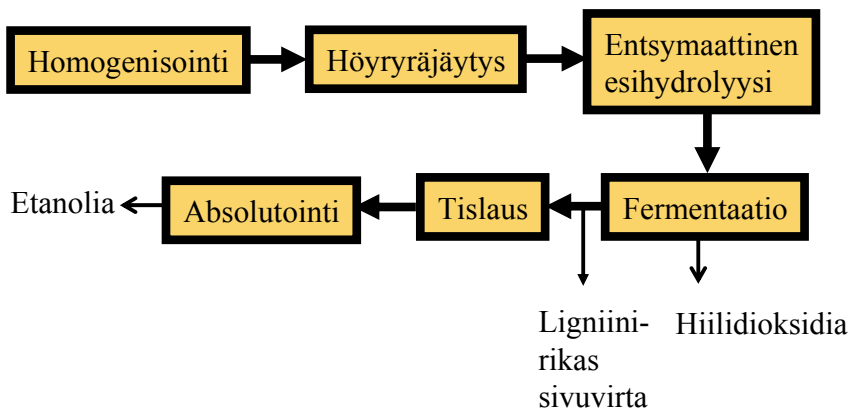
Lignoselluloosamateriaalin konvertointi etanoliksi voidaan toteuttaa eri tuotantokonsepteja (prosessikokonaisuuksia) soveltamalla. Käymisprosessia soveltavat konseptit koostuvat tyypillisesti seuraavista päävaiheista:

- materiaalin paloittelu, pilkkominen tai jauhatus (esim. hakkeeksi, silpuksi tai jauheeksi)
- selluloosan ja hemiselluloosan pilkkominen sokereiksi
- sokereiden konvertointi etanoliksi (eli käyminen)
- etanolin erotus muusta materiaalista ja sen viimeistely myyntiä varten.

Erilaisia uusia teknologioita ja konsepteja kehitetään jatkuvasti. Valitsimme tähän työhön prosessikokonaisuuden, jonka teknologiat (osaprosessit) edustavat nykyistä parasta osaamistasoa ja riittävää teknologista kypsyyttä globaalissa perspektiivissä. Valitut teknologiat ovat siis olemassa (sovellettavissa), mutta joitakin niistä on testattu vasta laajamittaista tuotantoa pienemmässä mittakaavassa (koetehdas), joten niiden teknologiseen kypsyyteen liittyy avoimia kysymyksiä. VTT:n laboratoriossa voitiin kuitenkin käytännössä testata valittujen teknologioiden toimivuutta tämän projektin raaka-aineilla ja näin tuottaa tietoa alustavien kannattavuuslaskelmien tekoon.

Prosessissa syntyvät sivuvirrat on myös huomioitava. Merkittävä osa alkuperäisestä raaka-aineesta päätyy nimittäin näihin. Valitsemassamme konseptissa suurin osa sivuvirroista muutetaan energiaksi, josta suurin osa palautuu etanolitehtaan käyttöön. Vaikka näin toimiva etanolitehdas on omavarainen energian suhteen, voidaan katsoa tällaisen konseptin tuottavan oljesta ja/tai ruokohelvestä kahta päätuotetta: etanolia ja energiaa (sähkön ja lämmön muodossa).

Valitut osaprosessit ja päämassavirrat esitetään kuvassa 5.



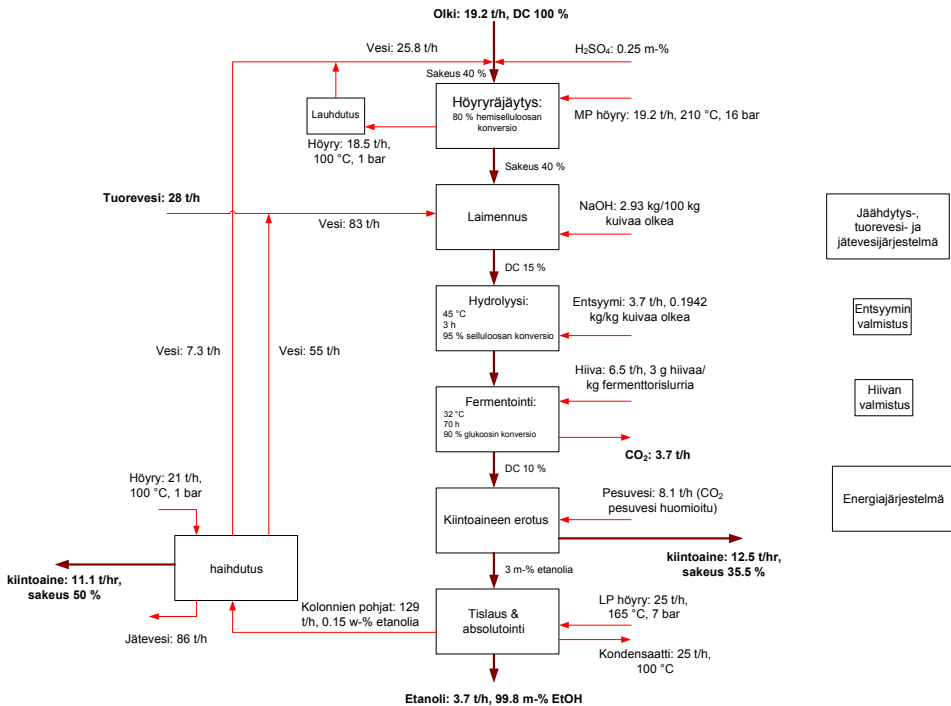
Kuva 5. Pelkistetty kaavakuva selluloosa-etanolitehtaasta.

3.2.3 Kokonaisprosessin massatase

Kuvassa 6 on esitetty kokonaisprosessin massatase. Tehtaan vuotuinen raaka-ainetarve on 160 000 tonnia (kuivapaino). Tästä saadaan laboratoriotulosten perustella noin 31 000 t puhdasta (99,8 massaprosenttia) etanolia. Saanto raaka-aineesta olisi tällöin noin 19 massaprosenttia. Seuraavassa kommentteja kustakin osaprosessista lyhyesti:

- Kuvan 6 massatase perustuu ohran oljella tehtyihin kokeisiin. Ruokohelpi käyttäytyi hyvin samankaltaisesti. Olki- ja helpinäytteet olivat peräisin MTT:n koepelloilta Jokioisista.
- Materiaali silputtiin noin 3 cm pituiseksi silpuksi.
- Höyryräjäytykset happokatalyytin kera tehtiin Lundin yliopistossa Ruotsissa tai KCL:ssä. Energiatasetta laskettaessa höyryn ja energian kulutuksen arviointi perustui suhteellisen pienestä koetehdasmittakaavan laitteesta kirjallisuudessa raportoituun tietoon (Zimbardi *et al.*, 2002).
- Höyryräjäytetty massa jäähdytettiin 45 °C:seen ja laimennettiin 15 massaprosenttiin. Lisäksi höyryräjäytetyn massan happamuus säädettiin arvoon pH 5 käyttäen natriumhydroksidia. Esihydrolyysi tehtiin kaupallisilla entsyymeillä käyttäen verraten suurta entsyymiannosta, joka laboratoriokeissa oli riittävä selluloosan ja hemiselluloosan tehokkaaseen hydrolyysiin.

- Entsyymaattinen hydrolyysi jatkui fermentorissa, johon oli lisätty VTT:n omaa hiivakantaa. Kyseisen hiivakannan on osoitettu konvertoivan myös viisihiilisiä sokereita etanoliksi. Käytännön kokeissa tavoitettaa (27 %) ei kuitenkaan saavutettu. Ennen hiivalisäystä seos oli jäädytetty lämpötilaan 32 °C. Happamuutta ei säädetty fermentorissa.
- Laimea etanoliliuos erotettiin kiintoainefraktiosta.
- Tislausta ja absolutointia ei testattu laboratorioissa, vaan näiden vaiheiden arvioinnissa sovellettiin olemassa olevia malleja.



Kuva 6. Hypoteettisen selluloosa-etanolitehtaan massatase. Hydrolyysilaatikoissa mainitusta konversiosta merkittävä osa tapahtuu vasta fermentoinnin aikana.

3.2.4 Sivuvirtaratkaisut

Energiataseen kannalta merkittäviä sivuvirtoja syntyy kahdessa kohdassa: i) fermentoinnin jälkeen, kun osa kiintoaineesta erotetaan sentrifugoimalla ja suodattamalla, sekä ii) tislauksen pohjatuotteena eli alitteena. Nämä sivuvirrat sisältävät paljon ligniiniä mutta myös soluja, hydrolysoitumatta jääneitä hiilihydraatteja ja ravinneainejäämiä. Näistä fermentoinnin jälkeen erotettava materiaali on selkeästi merkittävämpi tekijä energiataseen kannalta. Alustavissa kokeissa tällä virralle saatiin seuraavat tunnusluvut:

- Materiaalin kuiva-ainepitoisuus oli 23,5 massaprosenttia. Haihtuvien aineiden osuus kuiva-aineessa oli 63,3 massaprosenttia. Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa (550 °C) oli vastaavasti 9,5 massaprosenttia.
- Tuhkattoman kuiva-aineen lämpöarvo oli 24,2 MJ/kg. Käytännössä tutkitun materiaalin lämpöarvo saapumistilassa oli 3,0 MJ/kg.

Hypoteettisessa tehtaassa molemmat sivuvirrat oletettiin poltettavan sähkön ja lämmön tuottamiseksi. Kuivauksen taso ennen polttoa on hyvin keskeinen optimoinnin kohde. Prosesseissa syntynyttä jätevedettä käsitellään seuraavassa kohdassa.

3.2.5 Tehtaan energiatase

Etanolin valmistusprosessin energiantarpeen arvioimiseksi laadittiin energiatase, jossa määritettiin prosessin sähkö-, lämpö- ja jäähdytysenergiantarpeet. Energiatase laadittiin kokonaisprosessille, joka kattaa etanolin valmistukseen vaadittavat prosessivaiheet sekä lisäksi valmistusprosessissa syntyvän jäteveden käsittelyn. Jäteveden käsittelyyn ja jätevedessä olevan kuiva-aineen erotukseen valittiin menetelmäksi monivaihehaidutus. Energiaintensiivisiä prosessivaiheita ovat ennen kaikkea raaka-aineen esikäsittelyyn käytettävä höyryräjäytys, etanolin erotukseen käytettävä tislauksen ja prosessissa syntyvän jäteveden käsittely haiduttamalla. Energiataseessa ei huomioitu etanolin valmistusprosessin yhteydessä syntyvän kuiva-aineen hyödyntämistä lämpö- ja sähköenergian tuotannossa (edellinen kohta). Taulukossa 9 esitetään käyttöhyödykkeiden kulutus, joka samalla muodostaa tuotantoprosessille energiataseen.

Taulukko 9. Hypoteettisen selluloosa-etanolitehtaan optimoitu energiatase (huom. kannattavuuslaskelmissa sovellettiin hieman erilaista (ei-optimoitua) laskentaa).

Osaprosessit joissa lämmitys / jäähdytys toteutetaan käyttöhyödykkeiden avulla	Lämpöenergian kulutus (kW / lämpötilassa)	Jäähdytysenergian kulutus (kW / lämpötilassa)
Höyryräjäytys	14500 / 200 °C	-
Lämmönvaihdin ennen fermentaatiota	-	1700 / 32 °C
Fermentaatio	-	1100 / 32 °C
Lämmönvaihdin ennen tislausta ja absoluointia	3700 / 75 °C	-
Tislaus ja absoluointi	9000 / 130 °C	9800 / 35 °C
Jäteveden käsittely (haihdutus)	7400 / 90 °C	21300 / 48 °C
Lämmönvaihdin (jäteveden jäähdytys)	-	1700 / 30 °C
Yhteenveto energiankulutuksesta		
Lämpöenergian talteenotto (kW)	13 000	
Lämpöenergian kulutus (kW)	34 600	
Jäähdytysenergian kulutus (kW)	35 600	
Sähköenergian kulutus (kW)	2 500	
Yhteenlaskettu sähkö- ja lämpöenergian kulutus (kW)	37 100	

Energiataseessa on energiaoptimoinnin avulla huomioitu suurin mahdollinen lämpöenergian talteenotto prosessissa olevien prosessivaiheiden välillä, mikä mahdollistaa pienimmän mahdollisen käyttöhyödykkeiden kulutuksen. Prosessivaiheita ja lämmönvaihtimia, joiden lämmitys- ja jäähdytystarve on kokonaisuudessaan toteutettu prosessin sisäisillä kytkennöillä, ei ole sisällytetty taulukkoon.

3.3 Talous

3.3.1 Laitoksen mitoitus ja investointimenot

Massataseen pohjalta suunniteltiin eri laitteiden koko. Laitoksen investointi on taulukon 10 mukainen. Taulukossa investointikustannukset on jaettu prosessin eri osastoille. Kohta "muut" koostuu prosessilaitteista, joita ei mitoitettu, sekä etanolin varastosäiliöistä. Menot sisältävät laitekustannukset sekä niiden asennuksen ja tarvittavien rakennuksien rakennuskulut. Suurin epävarmuus investoinneissa on laitoksen osissa, joita ei ole mitoitettu ja laskettu tarkemmin. Niitä ovat haihduttamo, energian-, entsyymien- ja hiivantuotanto. Laskennan epätarkkuus on lopuksi huomioitu varauksessa, joka on 20 %.

Taulukko 10. Hypoteettisen selluloosa-etanolitehtaan investointimenot.

Osasto	Laitekustannus (1000 €)
Höyryräjäytys	3600
Hydrolyysi	2780
Fermentointi	7300
Kiintoaineen erotus	10200
Tislaus & absoluointi	5600
Haihdutus	14000
Energian tuotanto	20000
Entsyymien tuotanto	10000
Hiivan kasvatusta	9800
muut	8500
Yhteensä (k€)	92000
Varaus (%)	20 %
Investointikustannus (k€)	110000

3.3.2 Tuotantokulut ja kannattavuus

Seuraavaksi arvioitiin tuotantoon liittyvät kulut. Perustapauksena käytettiin tapausta, jossa

- raaka-aineen hinta on 52.5 €/t_{ka}
- etanolin saanto raaka-aineesta oli laboratoriossa saavutettu taso, 19 massaprosenttia (hypoteettinen tehdas tuottaisi siis 38 930 m³ etanolia vuodessa)
- entsyymien hinta ja syöttömäärä perustuivat kaupallisesti saatavien (toukokuu 2007) entsyymien tehokkuuteen ja niiden arvioituun hintaan, 250 €/t etanolia.
- Huom: tuotantokuluissa sovellettu energiatase poikkeaa hieman kohdassa 3.2.5 esitetystä taseesta. Taulukon 9 arvot edustavat pitkälle optimoitua tilannetta, kun taas tuotantokuluja arvioitaessa sovellettiin lähtötilanteen varovaisempia arvoja.

Tuotantokulut esitetään taulukossa 11.

Taulukko 11. Hypoteettisen selluloosa-etanolitehtaan tuotantokulut.

	Hinta	Yksikkö	Kustannus 1000 €/vuosi	€/l etanolia	%
olki	52.5	€/t dry	8400	0.22	39
sähkö	45	€/MWh	1126	0.03	5
prosessivesi	0.8	€/t	324	0.01	2
jäähdytysvesi	0.03	€/t	406	0.01	2
jätevesi	1.4	€/t	1005	0.03	5
Entsyymiraaka-aineet	250.00	€/t etanolia	7689	0.20	36
Muut	35.58	€/t etanolia	1094	0.03	5
Muuttuvat kustannukset			20000	0.51	93
Kiinteät kustannukset			1400	0.04	7
Käyttökustannukset			21400	0.55	100

Merkittävin kustannustekijä on raaka-aine, joka vastaa noin 39 %:a kaikista tuotantokuluista. Myös entsyymeihin liittyvät kustannukset ovat merkittävät (noin 36 %). Perustapauksemme mukaan suoriksi tuotantokuluiksi muodostuisi arviolta noin 0,55 €/litra etanolia. Usein tuotantokuluihin lisätään myös investointiin liittyvien kulujen merkitys. Tämä merkitys arvioitiin kertomalla investointimenot (110 miljoona euroa) valitulla annuiteettikertoimella (10 v ja 10 %), jolloin laskettiin investointimenon vuotuiseksi arvoksi noin 18 miljoonaa euroa. Tästä saatiin investointimenon kustannustekijä 0,46 €/litra etanolia. Yhteenlasketut tuotantokustannukset ovat siis noin 1 €/litra.

Investoinnin kannattavuus voidaan arvioida myös nykyarvolaskelmiin perustavilla menetelmillä. Päädyimme laskemaan investoinnin sisäisen korkokannan (Internal Rate of Return, tai IRR). IRR-menetelmän tuloksena saadaan se korkokanta, jonka mukaan diskontattuna investointi on minimissään kannattava. Mitä suurempi sisäinen korko, sitä parempi investointi (yleensä yritykset eivät investoi, jos sisäinen korkokanta on alle 10 %). Arvioinnissa sovellettiin seuraavia lähtötietoja:

- rakennusvaihe 2 v
- käyttöikä 10 v.
- Käynnistys tapahtuu kolmantena vuotena siten, että kolmantena vuotena laitoksen kapasiteetista on käytössä 75 % ja siitä eteenpäin 100 %.
- Laitos voi olla käynnissä n. 8 300 h/vuosi, eli maksimikäyttöaste on 95 % (kannattavuuslaskennan 100 % tarkoittaa tätä 8 300 h:a/vuosi).

- Laitoksen kapasiteetti perusaannolla oli siis noin 31 000 t etanolia/vuosi, eli noin 39 000 m³/vuosi.
- Etanolin myyntihinta on 0,5 €/l.

Yhteenvedo kannattavuuslaskelmista on taulukossa 12. Tällaisella tuotantomäärällä, etanolin myyntihinnalla ja prosessin käyttökustannustasolla kassavirta on koko laitoksen käyttöajan negatiivinen, eli myynnistä ei saada yhtään voittoa ja investointia ei pystytä maksamaan takaisin.

Taulukko 12. Hypoteettisen selluloosa-etanolitehtaan kannattavuuslaskelmat.

vuosi	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Hankintameno (%)	30	70	0	0	0	0	0	0	0	0
Hankintameno (k€)	33026	77060	0	0	0	0	0	0	0	0
Käyttöaste (%)	0	0	75	100	100	100	100	100	100	100
Liikevaihto (k€)	0	0	14600	19467	19467	19467	19467	19467	19467	19467
Käyttökustannus (k€)	0	0	16050	21400	21400	21400	21400	21400	21400	21400
Kassavirta (k€)	-33026	-77060	-1450	-1933	-1933	-1933	-1933	-1933	-1933	-1933

3.3.3 Kannattavuuden herkkyyshanalyysi

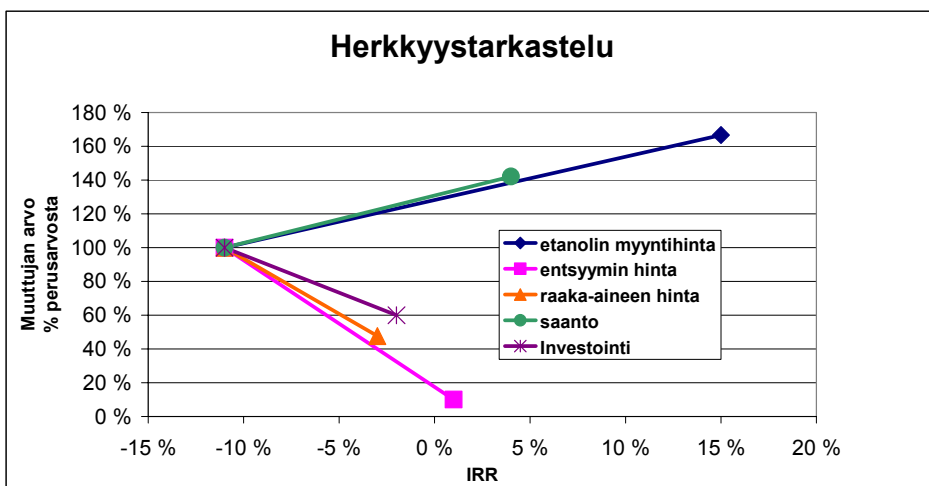
Valitsimme lopuksi muutaman kannattavuuteen todennäköisesti merkittävästi vaikuttavan parametrin ja tarkastelimme niiden vaikutusta (nk. herkkyyttä). Valitut parametrit olivat:

- Raaka-aineen hinta eli suurin kustannustekijä tuotantokustannusarvioinnissa. Tarkastelussa raaka-aineen hintaa lasketaan arvosta 52,5 €/t arvoon 25 €/t.
- Entsyymikustannus, toiseksi suurin kustannustekijä, suuria panostuksia kehitystyöhön eritoten Yhdysvalloissa, mutta tulokset eivät vielä ole tutkijoiden käsissä. Myös esikäsitteilytekniikoiden kehittyminen ja tehostuminen voi johtaa merkittäviin säästöihin entsyymien tarpeessa ja siten kustannuksissa. Tarkastelussa entsyymikustannusta lasketaan arvosta 250 €/t etanolia arvoon 25 €/t etanolia.
- Etanolin saanto raaka-aineesta, potentiaali jopa 27 massaprosenttia, jos myös viisihiiliset sokerit päätyvät kokonaisuudessaan etanoliksi ja prosessia muilta osin pystytään vielä optimoimaan, nyt vain noin 19 massaprosenttia. Tarkastelussa etanolin saantona on 19–27 %.

- Etanolin hinta voi nousta jo pelkän kysynnän kasvun myötä, lisäksi siihen voidaan myös vaikuttaa esim. veroteknisin keinoin. Tarkastelussa etanolin hintana on 0,75–1,25 €/l.
- Investointiin voidaan saada tukea. Tarkastelussa arvioitiin tilanne, jossa tuki koskisi 40 %:a koko investointimenosta eli investointimenot olisivat vain noin 67 miljoonaa euroa.

Kassavirran ollessa negatiivinen sisäistä korkokantaa ei voida laskea, ja siitä syystä etanolin myyntihinnan perusarvoksi herkkyysanalyysissä valittiin 0,75 €/l. Tällöin myyntitulot ovat jo positiiviset ja investointia voidaan kuolettaa. Tässä ”perustapauksessa” investoinnin sisäinen korkokanta on -11 %.

Kuvassa 7 esitetään yhteenveto herkkyysanalyysistä. Sen vaaka-akselilla on herkkyysanalyysin vertailuparametrin IRR-arvo ja pystyakselilla muutetun parametrin arvo suhteessa perusarvoon (100 % on muuttujan perusarvo). Muutetun parametrin vaikutuksen laitoksen tuottoon näkee siis vaaka-akselilla siitä, miten paljon IRR paranee tehtäessä edellä kuvattu muutos.



Kuva 7. Investoinnin herkkyysanalyysi. Eri arvojen ääriarvot kuvaajassa ovat seuraavat: raaka-aineen hinta 25–52,5 €/t; entsyymikulut 25–250 €/t etanolia; saanto 19–27 massaprosenttia; etanolin myyntihinta 0,75–1,25 €/litra; ja investointituen suuruus 0–40 %.

Herkkyyssanalyyseistä voidaan todeta, että kaikki neljä valittua tekijää vaikuttavat merkittävästi investoinnin kannattavuuteen. Vain etanolin myyntihinnan reipas nostaminen vei IRR-arvon yli 10 %:iin. Erilaiset yhteisvaikutusyhdistelmät voivat parhaimmillaan tehdä investoinnista kiinnostavan. Kuvasta nähdään myös, että vaikka investoinnille saataisiin 40 % investointituki, ei se edelleenkään ilman muita vaikutuksia muuttaisi investointia kannattavaksi.

3.4 Ilmastovaikutukset

3.4.1 Oljen korjuu

Olkietanolin raaka-ainepotentiaali koostuu oljista, jotka nykyisellään kynnetään peltoon. Kuivikkeena käytettävän oljen ohjautuminen etanolin valmistukseen nähtiin epätodennäköiseksi korvaavien kuivikkeiden kustannusten takia, minkä takia kuivikkeen korvaamisen vaikutuksia ei ole tässä tarkastelussa huomioitu. Oljen korjuu pelloilta voi vaikuttaa pellon kasvihuonekaasutaseeseen sekä typpioksiduulin (N_2O) että hiilidioksidin (CO_2) osalta monimutkaisten prosessien seurauksena. Vaikutusten suuruusluokka ja suunta ovat verrattain huonosti tunnettuja, sillä viljelysmaan typpioksiduulipäästöihin ja hiilitaseeseen vaikuttaa hyvin moni tekijä, kuten maaperän laatu, lämpötila, sademäärä, lannoitusmäärä ja viljelykäytäntö.

Useiden mittausten (mm. Malhi *et al.*, 2006; Malhi ja Lemke, 2007; Gregorich *et al.*, 2005/2007) mukaan pellon N_2O -päästöt pienenevät, kun olki korjataan pois. Yksinkertaistettuna tämä perustuu pienempään yhtäkkiseen typpilisäykseen pellossa kynnön jälkeen. Tutkimuksissa on yleensä kuitenkin esitetty päästöt peltopinta-alaa kohden laskettuina. Ravinteiden poistuminen ja maan ominaisuuksien muuttuminen oljen korjuun mukana saattaa kuitenkin pienentää saatavaa jyvä- ja olkisatoa jopa niin paljon, että satoa kohden laskettuna N_2O -päästöt saattavat kasvaa verrattuna tilanteeseen, jossa olki kynnetään peltoon. Satotason pienentymistä on mahdollista kompensoida lisäämällä lannoitusmäärää, mutta tällöin lannoituksen valmistuksesta ja käytöstä syntyvät päästöt ovat puolestaan suurempia. Lisääntynyt typpilannoitus lisää selvästi pellon N_2O -päästöjä.

Peltojen N_2O -päästöön vaikuttaa voimakkaasti esimerkiksi sademäärä ja sen ajallinen jakautuminen mm. lannoitukseen nähden. On myös muistettava, että N_2O -

päästön edustava mittaaminen pellolta on hankalaa ja mittausten yleistettävyys siten epävarmaa. Joidenkin mittausten perusteella N₂O-päästön voisi päätellä kasvavan myös pellon pinta-alaa kohden laskettuna, kun olki korjataan pois.

Suuri osa oljen sisältämästä hiilestä on vapautunut hiilidioksidina oljen lahotessa maaperässä jo vuoden kuluttua kyntämisestä. Osa kasvijätteen hiilestä siirtyy kuitenkin humukseen. Myös humuskerros hajoaa hitaasti, joten maahan kertyvän hiilen määrä on hankala arvioida ja hitaan hajoamisen takia maahan lopulta kertynyt hiilimäärä riippuu myös tarkasteluajasta. Olkien korjuu näyttäisi kuitenkin pienentävän maan hiilivarastoa sadan vuoden tai sitä lyhyemmällä tarkasteluajalla. Mitä lyhyempi tarkastelujakso, sitä suurempi on oljen korjuusta aiheutuva hiilivaraston pieneneminen viljelyalaa kohden. Se hiilimäärä, mikä olisi olkien kyntämistilanteessa sitoutunut maaperään tarkastelujakson aikana, tulee huomioida kun vastaava hiilimäärä vapautuu hiilidioksidina olkietanolia poltettaessa.

On todennäköistä, että oljen korjuu pienentää jonkin verran pellostä syntyviä typpioksiduulipäästöjä, satotasoa ja maaperään sitoutuvan hiilen määrää. Arvioitaessa oljen korjuun vaikutuksia kokonaiskasvihuonekaasutaseeseen edellä mainitut tekijät saattavat epävarmuudet huomioiden yhdessä joko pienentää tai kasvattaa kasvihuonekaasupäästöjä. On kuitenkin todennäköistä, että oljen korjuun vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin on vähäinen verrattaessa esimerkiksi muuten viljelystä syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin.

3.4.2 Kuljetukset, jalostus ja jakelu

Etanoliprosessissa etanolisaanto on noin viidennes prosessiin syötetystä oljen kuiva-ainemäärästä. Sivuvirtoina syntyy kiintoainetta, joka voidaan esimerkiksi polttaa etanolin prosessoinnissa tarvittavaksi energiaksi. Koska syntyvän kiintoaineen määrä on etanolisaantoon verrattuna suuri ja lämpöarvo suhteellisen korkea, on prosessi energiataloudellisesti yliomavarainen. Kiintoainesivuvirta voidaan hyödyntää esimerkiksi prosessihöyryn tuottamiseen, mikäli sille on tarvetta tai siitä voidaan tuottaa sähköä. Suotuisimmillaan etanolin prosessoinnin kasvihuonekaasutase on silloin, kun kaikki ylijäämäkiintoaine hyödynnetään energiaksi, joka korvaa päästöintensiivisiä polttoaineita sähkön ja/tai lämmön tuotannossa. Tällöin etanolin prosessoinnin kokonaiskasvihuonekaasupäästöt korvaushyötyineen tuotettua etanolimäärää kohden voivat olla jopa negatiiviset.

Syötettävän raaka-aineen ja höyryn lisäksi etanolin valmistusprosessissa käytetään merkittävästi myös mm. entsyymejä ja hiivaa. Hiiva kasvatetaan tehtaalla, ja sen energiankulutus on verrattain pieni. Entsyymien osalta epävarmuudet ovat suurempia, ja niiden tuotanto voi vaikuttaa hieman energia- ja päästötaseisiin.

Oljen kuljetusten sekä etanolin jakelun ja annostelun vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin on tyypillisesti vähäinen verrattuna lopputuotteella korvattavien fossiilisten polttoaineiden kokonaispäästöihin.

3.4.3 Kokonaisvaikutukset

Mikäli olki- tai ruokohelpietanolin prosessoinnissa syntyvä kiintoaine hyödynnetään kokonaisuudessaan energiaksi, ovat olki- tai ruokohelpietanolin tuotannon ja käytön kasvihuonekaasupäästöt korvaushyötyineen kokonaisuudessaan todennäköisesti hyvin vähäiset tai jopa negatiiviset verrattuna bensiinin tuotannon ja käytön päästöihin. Tulosta tarkasteltaessa on syytä huomioda, että etanolin saanto prosessissa on verrattain alhainen ja noin neljä viidesosaa oljen kuiva-aineesta hyödynnetään prosessissa käytettäväksi energiaksi ja myytäväksi sähköksi. Korvaushyötyineen kulutettua biohiiltä kohden olki- tai ruokohelpietanoli ja sen sivutuotteena syntyvä kiintoaine vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä todennäköisesti luokkaa 20–40 %. Esimerkiksi tekemällä ruokohelvestä Fischer-Tropsch-dieseliä metsäteollisuuden yhteyteen integroidussa konseptissa, jossa tarvittavan raaka-aineen määrä minimoidaan, on biohiiltä kohden saavutettava vähenemä kasvihuonekaasupäästöissä fossiilista dieseliä korvattaessa todennäköisesti suurempi kuin korvattaessa ruokohelpietanolilla bensiiniä. Vielä suurempi päästövähennys kulutettua biohiiltä kohden saavutetaan korvaamalla päästöintensiivisiä polttoaineita sähkön ja/tai lämmön tuotannossa.

Edellä esitetyt arviot olki- ja ruokohelpietanolin kasvihuonekaasutaseista perustuvat VTT:llä syksyllä 2007 tehtyihin alustaviin arvioihin. Laskelmia tullaan todennäköisesti tarkentamaan vuoden 2008 alkupuolella.

4. Yhteenveto

Tässä tiedotteessa raportoidaan tuloksia kahdesta tutkimusprojektista. Projektien taustaksi suunniteltiin hypoteettinen tehdas, jossa 160 000 tonnista olkea tai olkea ja ruokohelpeä tuotettaisiin noin 31 000 tonnia etanolia. Tämäntyyppisen prosessikonseptin kuten monen muunkin biomassaa käyttävän tehtaan kokoa rajaa raaka-aineen saatavuus tehtaan läheisyydessä. Suomen oloissa valitsemamme kokoluokka edustaa suurin piirtein vallitsevaa ylärajaa tehtaalle, joka korsibiomassasta valmistaisi etanolia. Valittua tehdasmallia soveltaen tehtiin alustavia arvioita tuotannon teknisestä kypsytydestä, investoinnin kannattavuudesta sekä tuotannon ilmastovaikutuksista. Arvio tehtiin sitä taustaa vasten, että tehdas sijoittuisi Suomeen ja soveltaisi kotimaisia raaka-aineita. Tuotantoketjun vahvuudet, heikkoudet, riskit ja mahdollisuudet on koottu oheisen yhteenvetoon.

Vahvuuksia:

- Teknologia etanolin valmistamiseksi korsibiomassoista on olemassa, joskin eri prosessivaiheiden optimointia tarvitaan ja teknologian kehitystarve on merkittävä
- Bioetanolille on kysyntää Euroopassa, todennäköisesti myös Suomessa.
- Tuotanto loisi uuden maataloudesta alkavan jalostusketjun häiritsemättä elintarvikesektorin jalostusketjuja.
- Suunnitellun tehtaan tuotanto alentaisi hieman Suomen öljyriippuvuutta, koska tuotettu bioetanol korvaisi öljypohjaisen bensiinin käyttöä. Vaikutus olisi tosin hyvin pieni (vähentäisi bensiinin käyttöä noin prosentin) [bensiinin kulutus Suomessa vuonna 2005 oli noin 1,9 miljoonaa tonnia (Sipilä ja Mäkinen, 2006), hypoteettisen etanolilaitoksen kapasiteetti noin 31 000 tonnia eli noin 20 000 toe, joka vastaa noin prosenttia bensiinikulutuksesta].
- Bensiinin korvaaminen olki- tai ruokohelpietanolilla vähentäisi myös hyvin todennäköisesti kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi suhteessa korvattuun polttoainemäärään.

Heikkouksia:

- Huolimatta siitä, että raaka-aineita on saatavilla Suomessa (tai niiden tuotantoa voitaisiin lisätä ruokohelven tapauksessa), ei materiaalia ole järkevällä säteellä riittävästi isomman tehtaan pyörittämiseen (hypoteettisen tehtaamme laitospitiisi rajata 160 000 tonniin raaka-ainetta/vuosi).
- Kaikkien tarvittavien teknologioiden toimivuutta täydessä teollisessa mittakaavassa ei vielä ole osoitettu.
- Käyttämillämme oletusarvoilla normaalissa markkinataloudessa (ts. tilanteessa ilman mahdollisia investointitukia tai tuotantokuluihin ja lopputuotteen hintaan vaikuttavia tukitoimia) investointi ei olisi kannattava, koska
 - tuotantolaitoksen investointimenot ovat suhteellisen suuret ("kaksinkertaiset" verrattuna suurin piirtein samansuuruiseen jyvä-etanolatehtaaseen), ja
 - vaikka laitos käyttäisi halvempaa raaka-ainetta (verrattuna esim. vehnän ja ohran jyviin), niin muut suorat tuotantokulut ovat vielä jyvä-etanolireitin kuluja selvästi suuremmat.

Mahdollisuuksia:

- Teknologioita voidaan vielä parantaa. Niihin liittyvä maailmanlaajuisen kehitystyö on tällä hetkellä ekstensiivistä.
- Tehtaassa valmistetusta sokeriliemestä ja muista raaka-ainefraktioista (esim. ligniini) voidaan tulevaisuudessa tehdä myös muita tuotteita, joiden arvo on etanolin tai energian arvoa korkeampi tai joiden tuottama liikevaihto toisi tarvittavan lisän investoinnin kannattavuuslaskelmiin. Nyt suurin sivuvirta menee energian tuottoon, mikä on alhaisen jalostusarvon ratkaisu.

Riskejä:

- Etanolin kysyntä voi laskea poliittisten ja verotuksellisten syiden takia.
- Kasvava öljyn hinta ja biomassan muun käytön lisääntyminen (esim. muun bioenergian tuotanto) voivat nostaa raaka-aineen hintaa entisestään.

Bioetanolin valmistus lignoselluloosaraaka-aineista on jo tänä päivänä todellisuutta. Asetettujen kovien biopolttoainetavoitteiden ja niiden tueksi allokoitujen tutkimusrahojen siivittämänä tulee selluloosa-etanolituotantoketjun perustuva globaali liiketoiminta kasvamaan merkittävästi lähivuosina. Ratkaisumalleja tulee maailmanlaajuisesti olemaan monia (monia raaka-ainelähteitä, erilaisia prosessikonsepteja, integrointimahdollisuudet muuhun teollisuuteen, jne.). Keskeisiä kysymyksiä ovat:

- Raaka-aineen riittävyys ja saatavuus riittävän alhaiseen hintaan.
- Uudet tuotantokonseptit ja kehittyvät teknologiat, jotka merkittäväällä tavalla vähentävät investointimenoja ja tuotantokuluja.
- Mahdolliset muut tuotteet, joita voidaan valmistaa samasta raaka-aineesta hyödyntämällä prosessin sivuvirtoja (esim. ligniinistä ennen polttoa).
- Tuotantoketjun (well-to-wheel) ympäristövaikutusten huomioiminen kehitystyössä.

Lähdeluettelo

Anon. 2006. *World Energy Outlook 2006*. International Energy Agency, OECD/IEA. S. 385–387.

Gregorich, E. G., Rochette, P., VandenBygaart, A. J. ja Angers, D. A. 2005/2007. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Research* **83**:1, s. 53–72. Korjaus: *Soil and Tillage Research* **94**:1(2007), s. 262–263.

Hess, J. R., Wright, C. T. ja Kenney, K. L. 2007. Cellulosic biomass feedstocks and logistics for ethanol production. *Biofuels, Bioproduction & Biorefining* **1**, s. 181–190.

Malhi, S. S., Lemke, R., Wang, Z. H. ja Chhabra, B. S. 2006. Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. *Soil and Tillage Research* **90**:1–2, s. 171–183.

Malhi, S. S. ja Lemke, R. 2007. Tillage, crop residue and N fertilizer effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality and nitrous oxide gas emissions in a second 4-yr rotation cycle. *Soil and Tillage Research*. Painossa.
doi:10.1016/j.still.2007.06.011

Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. ja Mikkola, H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. Espoo: *VTT Tiedotteita* **2357**. 134 s. + liitt. 19 s.

Nikolaisen, L. (toim.) 1998. *Straw for energy production – Technology, environment and economy*. Raportti. Centre for Biomass Technology, Kööpenhamina, Tanska. 53 s.

Pahkala, K., Iso-lahti, M., Partala, A., Suokannas, A., Kirkkari, A.-M., Peltonen, M., Sahramaa, M., Lindh, T., Paappanen, T., Kallio, E. ja Flyktman, M. 2005. *Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotantoa varten*. 2. korjattu painos. Maa- ja elintarviketalous **1**, s. 26.

Sipilä, K. ja Mäkinen, T. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen Suomessa. Työryhmän mietintö. *KTM Julkaisuja* **11**. 132 s.

Soimakallio, S., Mäkinen, T., Paappanen, T., Ekholm, T., Pahkala, K. ja Mikkola, H. 2007a. Greenhouse Gas Balances for Biomass-Based Transportation Fuels and Agrobiomass in Finland. *Proceedings of 15th European Biomass Conference & Exhibition from Research to Market deployment*, ICC Berlin 7–11.5.2007. 6 s.

Soimakallio, S., Mäkinen, T. ja Ekholm, T. 2007b. Greenhouse Gas Balances of Transportation Biofuels in Finland – Dealing with the Uncertainties. *Presentation in International Energy Workshop 2007*, Stanford University, Yhdysvallat 25.–27.6.2007.

Zimbardi, F., Ricci, E. ja Braccio, G. 2002. Technoeconomic study on steam explosion application in biomass processing. *Applied Biochemistry and Biotechnology – Part A. Enzyme Engineering and Biotechnology* **98–100**, s. 89–99.

Tekijä(t) von Weymarn, Niklas (toim.)		
Nimeke Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista		
Tiivistelmä Etanolia tuotetaan maailmalla huomattavia määriä. Pääosa liikennekäyttöön päätyvästä etanolista tuotetaan Brasiliassa ja Yhdysvalloissa käyttäen pääraaka-aineena joko sokeriruo'osta saatua sokeria (sakkaroosia) tai maissin ja muiden viljalajien jyvistä saatua tärkkelystä. Suomessa liikennepolttoainekäyttöön tarkoitettua etanolia tuotetaan tällä hetkellä vain yhdessä (pienessä) laitoksessa. Tässä tiedotteessa raportoidaan tutkimuksesta, jonka tavoitteena oli soveltaen nykyistä parasta tietämystä arvioida, miten maatalouden korsibiomassoihin pohjautuva bioetanoli tuotantomalli soveltuisi teknisesti, taloudellisesti ja ilmastovaikutustensa kannalta Suomen olosuhteisiin. Arvion pohjaksi suunniteltiin hypoteettinen tuotantolaitos, joka vuodessa 160 000 tonnista raaka-ainetta (olkea ja/tai ruokohelpeä) tuottaisi noin 31 000 tonnia etanolia. Korsibiomassan riittävyys järkevän kokoiseksi arvioidulla korjuualueella rajaisi siis tehdaskoon Suomessa suurin piirtein tähän kokoluokkaan. Etanolin ohella laitos tuottaisi myös sähkö- ja lämpöenergiaa, josta merkittävä osa palautuisi etanolilaitoksen käyttöön. Laitoksen investointimenoksi arvioitiin noin 110 miljoonaa euroa. Etanolin tuotantokuluiksi arvioitiin vastaavasti noin 1 €/litra etanolia. Tämä luku sisältää sekä suorat tuotantokulut että investoinnin kuoletuksen. Arviomme mukaan hypoteettisen laitoksen investointimeno ja tuotantokulut olisivat noin kaksinkertaiset verrattuna vastaavankokoiseen, viljan jyviä raaka-aineenaan käyttävään bioetanolilaitokseen. Investointi tämällyyppiseen, tässä tutkimuksessa sovelletuilla lähtöarvoilla toimivaan tuotantolaitokseen ei siis tämän alustavan arvion mukaan olisi kannattavaa. Prosessikonsepteja ja teknologiaa kehittämällä selluloosapohjaisen bioetanoli tuoton kannattavuus on todennäköisesti kuitenkin mahdollista saavuttaa. Jatkokehitystyön keskeisiä tavoitteita ovat i) sellaisen konseptien löytäminen, jotka perustuvat huomattavasti halvempien raaka-aineiden käyttöön, ii) entsyymikulujen alentaminen tai vaihtoehtoisten hydrolyysiratkaisujen kehittäminen, iii) etanolisaannon parantaminen, iv) investointimenojen alentaminen ja/tai v) arvokkaampien sivutuotteiden identifiointi (esim. ligniinille, joka nykyisissä konsepteissa menee kokonaisuudessaan polttoon).		
ISBN 978-951-38-6968-7 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinnumero 21885-1.1
Julkaisuaika Marraskuu 2007	Kieli Suomi	Sivuja 44 s.
Projektin nimi AGROETA		Toimeksiantaja(t) Tekesin ClimBus-teknologiaohjelma, VTT, MTT, yritykset
Avainsanat biomass, biofuels, alcohols, bioethanol, cellulosic materials, straw, reed canary grass, conversion, hydrolysis, biorefineries, modelling, investments		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 http://www.vtt.fi

Julkaisu on saatavana

VTT
PL 1000
02044 VTT
Puh. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

Publikationen distribueras av

VTT
PB 1000
02044 VTT
Tel. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

This publication is available from

VTT
P.O. Box 1000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 20 722 4520
<http://www.vtt.fi>
