

BIOPOLTTOAINEET JA NIIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Jarkko Saavalainen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2014

Laboratorioalan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) Saavalainen, Jarkko	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 15.05.2014
	Sivumäärä 36	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi Biopolttoaineet ja niiden ympäristövaikutukset		
Koulutusohjelma Laboratorioalan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Salo, Esa		
Toimeksiantaja(t) Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Kemian laboratorio		
Tiivistelmä <p>Euroopan unioni on asettanut tavoitteet uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi 10 %:iin liikenteen energian kulutuksesta kaikissa jäsenmaissa vuoteen 2020 mennessä. Tämän tavoitteen saavuttamisessa tärkeässä osassa ovat biopolttoaineet. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia kirjallisuuslähteiden avulla potentiaalisia biopolttoaineita ja niiden ympäristövaikutuksia. Työssä selvitettiin perustietoja käyttökelpoisimmista biopolttoaineista, kuten toisen sukupolven biodiesel ja biokaasu. Myös ensimmäisen sukupolven biodieselin valmistuksessa sivutuotteena muodostuvan glyserolin jatkojalostusmahdollisuuksia tutkittiin. Biopolttoaineiden ympäristövaikutuksista selvitettiin erilaisia näkökohtia sekä valmistuksen että loppukäytön osalta.</p> <p>Biopolttoaineiden ympäristövaikutuksista on vaikea antaa yksiselitteistä tietoa, sillä paljon riippuu käytetystä raaka-aineista. Tutkimuksen perusteella vaikuttaisi siltä, että liikenteen biopolttoaineista toisen sukupolven biodiesel, biokaasu ja ohraetanoli sekä rypsi-biodiesel (RME) silloin, kun oljet hyötykäytetään energiantuotannossa, ovat kasvihuonekaasupäästöjen kannalta parempia kuin fossiiliset liikennepolttoaineet. Muiden ilmapäästöjen osalta ei bio- ja fossiilisilla liikennepolttoaineilla ole suuria eroja.</p>		
Avainsanat (asiasanat) biopolttoaineet, ympäristövaikutukset, glyseroli, biodiesel, biokaasu		
Muut tiedot		



Author(s) Last, First	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 15052014
	Pages 36	Language Finnish
		Permission for web publication (X)
Title BIOFUELS AND THEIR ENVIRONMENTAL IMPACT		
Degree Programme Degree Programme in Laboratory Sciences		
Tutor(s) Salo, Esa		
Assigned by		
Abstract <p>The use of biofuels in transportation is increasing and promoted in many areas with the aims of reducing greenhouse gas emissions in the transport sector, securing the energy supply. However, a number of recent studies have concluded that large-scale production of biofuels may cause significant environmental and social problems. The purpose of the study was to examine potential biofuels and their environmental impacts. In the thesis the basic information about most suitable biofuels, such as second generation biodiesel and biogas, was analysed. Also new uses of glycerol, the byproduct of the first generation biodiesel, were studied. Environmental impacts of the biofuels were examined from different points of view.</p> <p>It is hard to give any simple results about the environmental impacts of biofuels. Based on the thesis the second generation biodiesel, biogas, barley ethanol and rape seed biodiesel are as good or even better than the fossilfuels if their greenhouse gas emissions are considered. Considering other air pollutants there seems to be no big difference between biofuels and fossil fuels.</p>		
Keywords biofuels, environmental impact, biodiesel, biogas, glycerol		
Miscellaneous		

Sisältö	
1 JOHDANTO	2
2 BtL BIODIESEL	3
3 NExBTL-PROSESSI	4
4 GLYSEROLI	7
4.1 Glyserolin ominaisuudet	7
4.2 Selektiivinen pelkistys	8
4.3 Eetteröinti	9
4.4 Esteröinti	9
4.5 Selektiivinen hapetus	10
4.6 Sementin lisäaineet	11
4.7 Halogenointi	11
4.8 Glyserolin polttaminen	11
5 BIOKAASU	12
5.1 Yleistä biokaasusta	12
5.2 Raaka-aineet	13
5.3 Tuotanto	13
5.4 Biokaasun käyttö	15
6 BIOETANOLI	15
7 PYROLYYSIÖLJY	16
8 BIOPOLTTOAINEIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	17
8.1 Kriteereitä ympäristövaikutusten kannalta	17
8.2 Liikenteen biopolttoaineet ilmastonmuutoksen hillinnän keinona	18
8.3 Ilmastovaikutusten dynamiikka	19
8.4 Liikenteen biopolttoaineiden elinkaaren aikaiset ilmastovaikutukset	21
9 BIOPOLTTOAINEIDEN ENERGIA- JA KASVIHUONEKAASUTASEET	22
9.1 Ilmastonmuutos	24
9.2 Happamoituminen	27
9.3 Pienhiukkaset	28
9.4 Alailmakehän otsoni	29
9.5 Toksisuus	29
9.6 Kokonaisarvioita elinkaaritutkimuksista	30
10 Yhteenveto bioenergian ympäristövaikutuksista	32
LÄHTEET	34

1 JOHDANTO

Kiinnostus biopolttoaineisiin on viime vuosina kasvanut merkittävästi niin Suomessa kuin muulla Euroopassakin. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentäminen nousi EU:n ja sen jäsenmaiden energiapolitiikan keskiöön vuonna 1997 solmitun Kioton sopimuksen myötä. Euroopan Unioni on asettanut tavoitteeksi vuonna 2010 biopolttoaineille 5,75 prosentin osuuden tieliikennekäyttöön myydyistä polttoaineista.

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä liikenteen päästöt ovat merkittävässä roolissa. Vuonna 2006 liikenteen päästöt muodostivat neljänneksen koko maailman energiantuotantoon liittyvistä hiilidioksidipäästöistä. Liikenteessä käytettäviä biopolttoaineita ovat etanoli, jolla pyritään bensiinin korvaamiseen, sekä biodiesel, jota käytetään tavallisen dieselin sijaan. Biokaasulla voidaan puolestaan korvata maakaasun käyttöä liikenteessä ja lämmityksessä.

Biopolttoaineita tehdään erilaisista biomassoista, kuten kasviöljyistä, kasvikuiduista tai jätteistä. Periaatteessa kasvi sitoo kasvaessaan vastaavan määrän hiilidioksidia, joka vapautuu biopolttoaineen käytössä takaisin ilmakehään. Käytännössä kuitenkin biopolttoaineen koko elinkaari kuluttaa energiaa, joka nykyään vielä usein tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Sen lisäksi muutkin päästöt, kuten hiukkaspäästöt tai typen oksidien päästöt, saattavat lisääntyä. Biopolttoaineita on erilaisia, ja ne eroavat toisistaan sekä tuotantotavoiltaan että ympäristövaikutuksiltaan. Päästöjen tutkimusmenetelmät eivät ole vielä ratifioituja, joten päästöjen vertailusta ja siten biopolttoaineiden hyödyistä ja haitoista fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna käydään kovaa kiistelyä.

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoituksena tutustua kirjallisuuslähteiden avulla potentiaalisimpiin biopolttoaineisiin, kuten biodiesel, biokaasu ja etanoli. Ensimmäisen sukupolven biodieselin valmistuksessa syntyy sivutuotteena glyserolia. Sille erilaisia jatkojalostusmahdollisuuksia tutkittiin, koska glyserolin tehokas hyötykäyttö parantaa biodieselin valmistuksen kannattavuutta. Biopolttoaineiden ympäristövaikutuksia oli tarkoituksena selvittää monista eri näkökulmista, kuten ilmastonmuutos, ilmansaasteet ja energiatehokkuus.

2 BtL BIODIESEL

Niin sanottu toisen sukupolven biodiesel on parafiinista seosta, jota voidaan valmistaa kaikentyyppisistä biomassoista kaasuttamalla. Sitä kutsutaan myös valmistusprosessinsa mukaisesti BtL(Biomass to Liquid)-biodieseliksi. Prosessissa biomassoista kaasuttamalla saatava raakakaasu puhdistetaan ja prosessoidaan ultrapuhtaaksi synteetikaasuksi, johon jää kaksi komponenttia ennen polttoainesynteesiä, hiilimonoksidi ja vety. Nämä reagoivat katalysoidussa reaktiossa, jolloin muodostuu bioraakaöljyä. Siitä voidaan edelleen jalostaa biopolttonesteitä, kuten biodieseliä ja bionaftaa. BtL-biodiesel ei sisällä rikkiä, aromaattisia hiilivetyjä eikä muita epäpuhtauksia. Käytettävä biomassa ei vaikuta siitä valmistetun polttonesteen laatuun. BtL-biodieselin valmistus perustuu pääosin samaan teknologiaan kuin kivihiilen tai maakaasun muuttaminen synteetikaasuksi ja edelleen polttonesteeksi. (Soimakallio, Antikainen & Thun 2009. 106–107)

Biomassan kaasutus

Biomassan kaasuttaminen tapahtuu kaasutusreaktorissa hapen läsnäollessa. Kaasuttimesta saadaan ulos kaasuseos (raakasynteetikaasu). Sen pääkomponentteina ovat hiilimonoksidi ja vety. Tämän lisäksi raakakaasussa on hiilidioksidia, vesihöyryä, metaania ja raskaampia hiilivetyjä sekä epäpuhtauksia kuten rikin, typen ja kloorin yhdisteitä. Kaasuttimesta poistuu epäorgaaninen liukenematon tuhka kuten tavallisessa poltossa. Kaasuttimen jälkeen kuuma raakakaasu suodatetaan hiukkasmaisista epäpuhtauksista ja jäädytetään.

Synteetikaasun valmistus

Raakasynteetikaasusta poistetaan hiilidioksidi, rikin ja typen yhdisteet ja muut kaasumaiset epäpuhtaudet. Jäljelle jäävän ultrapuhtaan synteetikaasun (vety ja hiilimonoksidi) suhde säädetään Fischer-Tropsch-prosessin kannalta sopivaksi. Prosessilaitteet ovat vastaavia, joita öljynjalostus- ja kemianteollisuus käyttää sadoissa tuotantolaitoksissa ympäri maailmaa.

Fischer-Tropsch-synteesi

Fischer-Tropsch -synteesi on saksalaisten tutkijoiden Franz Fischerin ja Hans Tropschin 1920-luvulla kehittämä menetelmä, jossa synteetisikaasusta (CO ja vety) valmistetaan pitkäketjuisia hiilivety-yhdisteitä yleisimmin rauta- tai kobolttikatalyyttien avulla (Soimakallio ym. 2009, 108). FT-synteestistä saatu ”synteettinen raakaöljy” voidaan jalostaa lopputuotteiksi nykyisillä jalostamoilla tai integroiduissa jalostusyksiköissä. FT-synteessissä syntyvät tuotteet ovat rikittömiä, typettömiä ja vähäaromaattisia korkealaatuisia polttonesteitä. Mahdollisia tuotteita ovat mm. dieselöljyt, bensiinit, nestekaasut, lentopetroli ja muut öljytuotteet. Tuotteet ovat yhteensopivia nykyisen jakeluverkoston ja ajoneuvojen kanssa.

BtL-laitos (Biomass to Liquid) pystyy konvertoimaan raaka-aineen eli biomassan energiasisällöstä parhaimmillaan yli 50 % polttonesteeseen. Loppuosa muuntuu prosessissa energiaksi, jota voidaan käyttää esimerkiksi sähkötuotantoon sekä kauko- ja prosessilämmöksi. Syntyvien prosessihöyryjen ja -lämpöjen tehokas hyödyntäminen on yksi keskeinen laitoksen suunnittelukriteeri. Jalostusprosessit ovat samoja, joita käytetään raakaöljyn jalostamisessa. Yksikköprosesseja ovat mm. krakkaus, hydraus, tislauk ja alkylointi. Yhtä ainoaa lopputuotetta ei käytännössä voida valmistaa, vaan tuotteessa on eripituisia hiiliketjuja. Nykyään tuotanto painottuu diesel-jakeisiin. FT-bensiinin oktaaniluku on alhainen, joten siihen pitää lisätä oktaaniluvun kohottajaksi esimerkiksi ETBE:tä eli etyyli-tert-butyylieetteriä, joka voidaan valmistaa fossiilisista tai uusiutuvista raaka-aineista (Fischer-Tropsch-menetelmä nd.).

3 NExBTL-PROSESSI

Neste Oil on kehittänyt oman toisen sukupolven biodieselin NExBTL:n. Syksyllä 2011 avattiin Rotterdamissa Hollannissa uusi tuotantolaitos, jonka kapasiteetti on 800 000 tonnia vuodessa. Sen myötä NExBTL-dieselin tuotantokapasiteetti nousee yhteensä kahteen miljoonaan tonniin vuodessa. Neste Oililla on entuudestaan vuonna 2010 käynnistynyt uusiutuvan dieselin laitos Singaporessa sekä vuosina 2007 ja 2009 käyttöön

otetut laitokset Porvoossa. Kaikilla laitoksilla voidaan NExBTL-dieselin lisäksi tuottaa myös NexBTL-lentopolttoainetta (Neste Oil käynnisti Euroopan suurimman uusiutuvan dieselin laitoksen Rotterdamissa 2011).

NExBTL-prosessissa raaka-aineet, kasvis- ja eläinrasvat, ohjataan varastotankeista esikäsitteily-yksikköön, missä ne puhdistetaan. Esikäsitteilyprosessissa käytettävät kemikaalit ovat H_3PO_4 (75 prosenttinen) ja NaOH (50 prosenttinen). Yhdessä veden kanssa nämä muuntavat raaka-aineena olevat rasvat rasvahapoiksi. Saadut rasvahapot vedytetään n-parafiineiksi. Vedytysvaiheessa lämpötila on 330–450 °C ja paine 5 MPa. Katalyytteinä käytetään kaupallisia keskitysleiden rikinpoistokatalyyttejä (Siitonen & Stade 2006).

Koska pelkällä vetykäsitteilyllä ei kasviöljystä saada hyviä kylmäominaisuuksia omaavaa dieselpolttoainetta, täytyy hiilivetyjen seos isomeroida. N-parafiinin molekyyli-rakennetta käsitellään sopivan katalyytin avulla siten, että hiilten kokonaismäärä säilyy suurena ja hiiliketjuun syntyy metyylihaaroja sopiviin paikkoihin. Isomeroinnissa on tärkeää, ettei se mene liian pitkälle, jolloin setaaniluku laskisi haitallisesti. Jätteenä syntyy hapanta jätevettä, jälkimmäisestä vapautuu myös savukaasuja. Tarvittava vety saadaan laitoksen omalta vedyntuotantolinjalta, jossa maakaasua ja polttoainekaasua käytetään vedyn valmistamiseen höyryreformerissa. Seuraavaksi tuote stabiloidaan. Ennen viimeistä varastointia NExBTL-komponentit erotellaan kaasuista ja bensiinikomponenteista, joita prosessissa muodostuu (Siitonen & Stade 2006).

Neste Oilin Porvoon laitoksella syntyy vuodessa biodieseltonnia kohti 72 kg propaania ja 25 kg biobensiiniä. Propaani käytetään vedynvalmistusprosessissa ja biobensiini muualla jalostamossa. Esikäsitteilyvaiheessa syntyvä jätevesi käsitellään jalostamon omassa jätevedenkäsitteily-yksikössä. Jätevettä syntyy raaka-aineen pesussa ja kuivauksessa. Esikäsitteilyssä syntyvä kiinteä jäte kuivataan ja käytetään energiaksi voimalaitoksessa. Kiinteä jäte sisältää rasvaa, vettä, fosforia, typpeä ja metalleja (Fe, Ca ja Mg).

Neste Oil pyrkii siirtymään raaka-aineisiin, jotka eivät kilpaile ruuantuotannon kanssa ja jotka tuotetaan paikallisesti kestäväällä tavalla. Tämä on tavoitteena toteutua vuoteen 2020

mennessä (Neste Oil rakentaa NExBTL-dieseltehtaan Rotterdamiin 2008). Pääraaka-aineena käytettävän palmuöljyn tuotannosta on tuotu esiin useita ongelmakohtia, joista tärkeimpinä metsien hävittäminen plantaasien tieltä sekä monet sosiaaliset ongelmat, kuten siirtotyöläisten olot. Palmuöljyn ohella uusiutuvan dieselin valmistuksessa käytetään tällä hetkellä esimerkiksi Raision tehtaalta tulevaa ylijäämärypsiöljyä sekä elintarviketeollisuuden jäterasvaa. Raaka-aineina käytetään myös palmuöljytuotannon sivutuotteita, joita ovat esimerkiksi steariini ja palmuöljyn rasvahappotisle. (Totuus biopolttoaineista n.d.)

Myös uusia raaka-aineita tutkitaan ja kehitetään koko ajan. Esimerkiksi metsäteollisuuden hakkuutähteistä valmistettavaa biovaa ja leväöljyä voidaan käyttää uusiutuvan dieselin valmistuksessa tulevaisuudessa. Myös muun muassa jätteistä pyritään valmistamaan hiivojen, homeiden ja bakteerien avulla raaka-aineeksi sopivaa mikrobiöljyä. Vuonna 2010 Neste Oil tuotti Suomessa jäteraaka-aineesta jopa 13 000 tonnia (eli n. 16,5 miljoonaa litraa) NexBTL-dieseliä. (Totuus biopolttoaineista n.d.)

Perinteinen dieselpolttoaine sisältää erilaisia hiilivetyjä, aromaattisia yhdisteitä ja parafiineja, kun taas NExBTL on parafiininen polttoaine. NExBTL- biodieselissä yhdistyvät hyvät kylmäominaisuudet ja erittäin korkea setaaniluku (84 - 99). Setaaniluvulla kuvataan dieselpolttoaineen syttymisherkkyttä. Mitä suurempi setaaniluku on, sitä nopeammin polttoaine syttyy ja sitä tehokkaammin se palaa. Edellä mainitut vaikeasti yhdistettävät ominaisuudet mahdollistaa kaksivaiheinen valmistusprosessi, jossa vedytys nostaa setaanilukua ja isomerointi parantaa kylmäominaisuuksia. Autoihin ei myöskään tarvitse tehdä muutoksia, ja NExBTL sopii käytettäväksi nykyaikaisissa dieselmoottoreissa sellaisenaan.

NexBTL:n rikki, typpi ja aromaattisten yhdisteiden pitoisuudet ovat pieniä, eikä se sisällä happea. Se toimii hyvin kylmissä lämpötiloissa, samepiste voidaan säätää isomerointivaiheessa -30 °C:n ja -5 °C:n väliin. Aromaattisten yhdisteiden vähäisyyden ansiosta polttoaine soveltuu ajoneuvojen ohella käyttökohteisiin, joissa altistutaan liuotinhöyryille tai poltetaan tuotetta sisätiloissa, kuten liuottimien ja valopetrolin valmistukseen. Lisäksi säilyvyys on hyvä, mikä mahdollistaa aineen pitkäaikaisen varastoinnin (Siitonen & Stade 2006). NexBTL:n tiheys on tavallista dieseliä pienempi.

4 GLYSEROLI

4.1 Glyserolin ominaisuudet

Valmistettaessa biodiedeliä transesteröimällä (ensimmäisen sukupolven biodiesel) muodostuu sivutuotteena glyserolifaasi, jonka tilavuus on noin 15-20 % biodieselin määrästä. Prosessin taloudellisuuden kannalta glyserolin tehokas jatkojalostus on ensiarvoisen tärkeää.

Glyseroli (1,2,3-propaanitrioli) on väritön ja hajuton viskoosinen neste. Glyseroli on myrkytöntä ja makean makuista. Se on hygroskoopista eli kosteutta sitovaa. Glyseroli liukenee täysin veteen ja alkoholeihin, mutta ei hiilivetyihin. Glyserolin tiheys on 1,261 g/ml, sulamispiste 18,2 °C ja kiehumispiste 290 °C (Pagliano & Rossi 2008, 1). Glyseroli on eräs monikäyttöisimmistä ja arvokkaimmista tunnetuista kemikaaleista. Sillä on yli 1500 tiedettyä käyttökohdetta mm. kosmetiikassa, lääketeollisuudessa ja elintarvikkeissa. Glyseroli on erittäin stabiili normaaleissa säilytysolosuhteissa, se on yhteensopiva monien muiden kemikaalien kanssa, eikä se ole ympäristön kannalta ongelmallinen yhdiste. Glyserolilla on kolme hydrofiilistä alkoholin hydroksyyli ryhmää, mistä johtuu sen liukoisuus veteen ja sen hygroskoopinen luonne. Se on erittäin taipuisa molekyyli, muodostaen sekä intra- että intermolekylaarisia vetysidoksia. Glyserolilla on 126 mahdollista konformeeria. (Pagliano & Rossi 2008, 2.)

Glyserolin vuotuinen käyttö on noin 160 000 tonnia ja sen odotetaan kasvavan noin 2,8 %. Glyserolista menee lääketeollisuuteen, hammastahnoihin ja kosmetiikkaan noin 28 %, tupakkateollisuuteen 15 %, elintarvikkeisiin 13 % ja uretaanien valmistukseen 11 %. Loppuosa käytöstä menee lakkojen, musteiden, liistereiden, synteettisten muovien ja räjähteiden valmistukseen sekä moninasiin teollisiin käyttökohteisiin. Glyserolia käytetään myös kasvavissa määrin korvaamaan propyleeniglykolia. Glyserolin pääasiallinen funktio monissa tapauksissa on toimia kosteuttajana. Glyseroli imee kosteutta ympäristöstään. Tämän ominaisuuden takia sitä lisätään liimoihin ja liistereiin estämään liian nopeaa kuivumista. Glyserolisekoituksia käytetään moninasiin käyttökohteisiin voiteluaineena. Tuhansia tonneja glyserolia käytetään vuosittain pehmentämään monenlaisia materiaaleja, kuten päällysteitä ja tiivisteitä. Pakkausten, erikoispaperien ja regenoitujen

selluloosamateriaalien taipuisuus ja kestävyys saavutetaan glyserolin avulla. Se toimii myös liuottimena, makeuttajana ja säilöntäaineena elintarvikkeissa sekä kantoaineena ja pehmentäjänä kosmetiikassa. Myrkyttömänä aineena glyserolin tehokkuus pehmentävänä ja voitelevana aineena antaa sille laajan soveltuvuuden erityisesti elintarvikkeissa.

Glyseroli on molekulaarinen pohja kaikissa eläin- ja kasvirasvoissa. Sen osuus on keskimäärin noin 10 % rasvojen painosta. Luonnonglyserolia saadaan rasvoista saippuan ja rasvahappojen valmistuksesta sekä biodieselin valmistuksesta transesteröintimenetelmällä. Glyserolia on tavallisesti valmistettu epiklorohydrinistä, jolloin raaka-aineena on fossiilinen öljy. (Pagliano & Rossi 2008, 11.)

4.2 Selektiivinen pelkistys

Pääasiallinen tuote glyserolin pelkistämisessä on 1,2-propaanidioli (propyleeniglykoli). Se on tärkeä kaupallinen kemikaali, jota on perinteisesti valmistettu propyleenioksidista. Sen käyttökohteita ovat mm. jäänestoaineet, jäähdytysnesteet, elintarvikkeet ja kosmetiikka. Toinen tärkeä tuote on 1,3-propaanidioli, joka on tärkeä monomeeri polyesteri kuitujen valmistuksessa. Kumpaakin voidaan valmistaa glyserolin selektiivisellä dehydroksylaatiolla.

Metallikatalysaattorien ja vedyn läsnäollessa glyseroli voidaan hydrata 1,2-propaanidioliksi, 1,3-propaanidioliksi ja etyleeniglykoliksi. Propyleeniglykolin valmistaminen glyserolista hydrogenolyysin avulla on jo kaupallisessa käytössä oleva prosessi. Siinä reaktio suoritetaan kuparikromiittikatalysaattorin avulla 200 °C:ssa, alle 10 baarin paineessa yhdistettynä reaktiiviseen tislaukseen. Prosessissa voidaan saavuttaa jopa 99 %:n saanto ja kustannukset ovat alhaisemmat kuin raakaöljystä valmistettaessa. Prosessissa voidaan käyttää puhdistamatonta raakaglyserolia. Reaktio kulkee välivaiheen kautta, jolloin muodostuu asetolia, joka on myös käyttökelpoinen kemikaali teollisuudessa. (Pagliano & Rossi 2008, 32–35.)

1,3-propaanidiolia valmistetaan perinteisesti raakaöljyjohdannaisista, kuten etyleenioksidista. Vuonna 2003 raportoitiin synteesisimenetelmä 1,3-propaanidiolin valmistamisesta glyserolista selektiivisellä dehydroksyloinnilla. Myös biologiset

pelkistysmenetelmät ovat mahdollisia. Glyseroli toimii lähtöaineena käymisprosessissa, jossa muodostuu 1,3-propaanidiolia. Käymiseen sopivia bakteerikantoja on useista eri ryhmistä. Erityisesti clostridium-bakteeria on tutkittu, ja se vaikuttaa lupaavalta. Menetelmien tehokkuus ei kuitenkaan ole vielä hyvällä tasolla. Biologisten menetelmien etuna on, että niissä voidaan käyttää puhdistamatonta raakaglyserolia. (Pagliano & Rossi 2008, 37–39.)

Raakaglyserolista valmistettua propyleeniglykolia (70 %:a) ja glyserolia (30 %:a) sekoittamalla saadaan jäänestoaine, jonka valmistus onnistuu helposti olemassa olevilla biodiesellaitteistoilla. Tällaisia tuotteita on jo markkinoilla korvaamassa myrkyllisiä etyleeniglykolipohjaisia tuotteita. Propyleeniglykolin etuna on myrkyttömyys. (Pagliano & Rossi 2008, 40–41.)

4.3 Eetteröinti

Kiinnostavat glyserolieetterit ovat yhdisteitä, joita saadaan reaktioista tert-butanolin kanssa, kuten polyglyserolit ja glykosyyliglyseroli. Glyseroli-tert-butyylieettereitä (GTBE) voidaan käyttää lisäaineina dieselissä ja biodieselissä. Tällaiset eetterit parantavat dieselin laatua ja vähentävät haitallisten kaasujen ja hiukkasten muodostumista pakokaasuun. GTBE:t myös parantavat dieselin kylmänkestävyyttä. GTBE:n synteesi tapahtuu happokatalysaattorin avulla 50-150 °C:ssa, glyserolin ja isobutyleenin suhteen ollessa 1:2 tai enemmän. (Pagliano & Rossi 2008, 65–66.)

Polyglyseroli on voimakkaasti haarautunut polyoli. Se on kirkas viskoosinen neste, joka liukenee hyvin veteen ja poolisiin orgaanisiin liuottimiin. Useita polyglyseroleja on kaupallisessa käytössä. Yleisiä käyttökohteita ovat kosmetiikka ja lääketeollisuus.

4.4 Esteröinti

Glyserolin esteröinnillä voidaan valmistaa lukuisia hyödyllisiä tuotteita. Reaktiot voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: esteröinti karboksyylihapoilla, karboksylointi ja nitraus. Glyserolin esteröinnillä karoksyylihapoilla saadaan monoasyyliglyseroleja (MAG) ja diasyyliglyseroleja (DAG). MAGit ovat hyödyllisiä ionittomina pinta-aktiivisina aineina ja

emulgoimisaineina. Sekä MAG- että DAG-yhdisteitä käytetään yleisesti elintarvikkeiden lisäaineina esim meijeri- ja leipomotuotteissa. Ne auttavat huonosti toisiinsa sekoittuvia ainesosia, kuten vesi ja öljy, sekoittumaan. Kosmetiikkateollisuudessa niitä käytetään parantamaan tuotteiden koostumusta. Lisäksi niillä on erinomaiset voitelu- ja pehmenysominaisuudet. (Pagliano & Rossi 2008, 73.)

Glyserolikarbonaatti on väritön poolinen liuos. Myrkyttömänä ja korkean kiehumispisteen omaavana se on käyttökelpoinen liuotin muoveille ja hartseille. Sitä voidaan valmistaa glyserolista ja dimetyylikarbonaatista lipaasien katalysoimalla reaktiolla (Pagliano & Rossi 2008, 78).

Räjähteenä käytettyä nitroglyserolia valmistetaan nitraamalla glyserolia. Sitä käytetään myös sydänlääkkeenä. Glyserolista saadaan nitraamalla myös dinitroglyserolia. Se voidaan muuntaa rengasmaiseksi yhdisteeksi glysidyylinitratiksi, josta edelleen saadaan polymerisoimalla polyglysidyylinitraattia (PGN). Sitä voidaan käyttää räjähteissä, kaasugeneraattoreissa ja pyrotekniikassa. PGN:a valmistetaan tavallisesti kolmiportaisella reaktiolla lähtöaineena epikloorihydriini. Tämä valmistustapa on kuitenkin vaarallinen eikä taloudellisesti sopiva laajamittaiseen tuotantoon. PGN:n valmistamiseen glyserolista on kehitetty turvallinen ja suhteellisen edullinen prosessi, joka soveltuu suurien määrien valmistukseen. (Pagliano & Rossi 2008, 79–81.)

4.5 Selektiivinen hapetus

Glyserolin selektiivisellä hapetuksella saadaan monia kaupallisesti tärkeitä yhdisteitä. Viimeisen vuosikymmenen aikana on tutkittu monia kemiallisia, elektrokemiallisia ja biologisia hapetusmetodeja glyserolijohdannaisten valmistamiseksi. Aiemmin tunnettiin vain biologinen muuntaminen dihydroksiasetoniksi, jota käytetään mm. itseruskettavissa aineissa. Esimerkkinä uusista tuotteista on ihmisen aineenvaihduntatuote glyseriinihappo, jonka valmistus onnistuu kultakatalysaattorin avulla. Elektrokemialliset ja biologiset hapettamismenetelmät mahdollistavat myös glyserolin käyttämisen energian tuottamiseen polttokennoissa. (Pagliano & Rossi 2008, 86–88.)

4.6 Sementin lisäaineet

Puhdas glyseroli antaa hyvän tuloksen sementin puristuskestävyyden parantajana, mutta aikaisemmin sen korkea hinta on ollut esteenä käytölle. Glyserolia on käytetty myös yhdessä kalvonmuodostavien polymeeristen materiaalien kanssa estämään pinnan halkeilua. Niinikään pieniä määriä glyserolia on käytetty seoksissa, joilla parannetaan betonin vedenkestävyyttä. Biodieselin valmistuksessa syntyvä raakaglyseroli sellaisenaan on myös hyvä sementin laadunparantaja, sillä se parantaa sementin puristuskestävyyttä ja muita ominaisuuksia yhtä paljon tai enemmän kuin puhdas glyseroli. Glyserolia raaka tai puhtaassa muodossa voidaan käyttää myös apuaineena sementin jauhatuksessa, jolloin säästetään energiakustannuksissa. (Pagliano & Rossi 2008, 105–107.)

4.7 Halogenointi

Glyserolin halogenointireaktioista on pääasiassa tutkittu 1,3-dikloori-2-propanolin muodostusta. Se on välivaihe epikloorihydriinin synteessissä. Epikloorihydriini on tärkeä kaupallinen kemikaali, sitä käytetään mm. epoksihartsien valmistuksessa.

Epikloorihydriiniä on perinteisesti valmistettu reaktiolla propyleenista ja kloorista.

Epikloorihydriinin valmistaminen glyserolista on orgaanisen hapon katalysoima hydrokloorausprosessi, joka vähentää reilusti jätevesien ja orgaanisten sivutuotteiden muodostumista perinteiseen menetelmään verrattuna. (Pagliano & Rossi 2008, 51.)

4.8 Glyserolin polttaminen

Glyserolilla on melko hyvä lämpöarvo, joten se voidaan polttaa energiaksi tai lämmöksi esim. hakkeen joukossa. Polttamisessa on kuitenkin ongelmia, koska glyseroli on viskoosista, sillä on korkea syttymispiste ja se hajoaa myrkylliseksi akroleiiniksi. Sopivilla laitteistoilla ongelmaton polttaminen on kuitenkin mahdollista.

5 BIOKAASU

5.1 Yleistä biokaasusta

Biokaasu on kaasuseos, jota syntyy orgaanisen aineksen hajotessa hapettomissa olosuhteissa. Hajoaminen tapahtuu mädäntymällä anaerobisten bakteerien avulla. Orgaanisen aineksen anaerobinen hajoaminen on biologinen prosessi, jossa tarvitaan useita bakteeriryhmiä. Haponmuodostajabakteerien erittämät entsyymit hydrolysoivat käsiteltävän massan eli substraatin polymeerit eli hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat yksinkertaisiksi liukoiksi yhdisteiksi, kuten yksinkertaisiksi sokereiksi, ammoniakiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi (Rintala, Lampinen, Luostarinen & Lehtomäki 2002). Hydrolyysituotteet hajoavat happokäymisessä (asidogeneesi) haihtuviksi rasvahapoiksi. Vetyä tuottavat bakteerit hajottavat muodostuneet rasvahapot asetaatiksi, hiilidioksidiksi ja vedyksi (asetogeneesi). Asetogeneesi voi edetä joko dehydrogenaatioreittiä, jolloin muodostuu asetaattia ja vetyä, tai hydrogenaatioreittiä, jolloin muodostuu vain asetaattia. Viimeisessä vaiheessa metanogeenit eli metaaninmuodostajabakteerit tuottavat metaania asetaatista tai vedystä ja hiilidioksidista (Dolfing 1988). Mikäli anaerobisessa hajoamisessa on läsnä sulfaattia, muodostuu lisäksi rikkivetyä eli vetysulfidia (H_2S) sulfaatinpelkistäjäbakteereiden toiminnan seurauksena (Widdel 1988).

Anaerobinen käsittely toteutetaan yleensä joko mesofiilisenä ($30-35^{\circ}C$) tai termofiilisenä ($50-65^{\circ}C$), mutta myös psykrofiilinen käsittely ($<20^{\circ}C$) on mahdollista. Korkeammassa lämpötilassa käsittelyaika on lyhyempi, energiansaanto on suurempi huolimatta suuremmasta lämmitystarpeesta ja materiaali hygienisoituu tehokkaammin (Rintala ym. 2002). Mesofiilisen prosessin etuna on vakaampi toiminta, sillä termofiilinen prosessi on herkempi lämpötilan ja pH:n muutoksille sekä inhibiittorien vaikutuksille.

Käytännössä biokaasu on hyvin samankaltaista kuin fossiilinen maakaasu, joskin metaanin osuus on pienempi. Biokaasun lämpöarvo on hyvä, keskimäärin $6,4 \text{ kWh/m}^3$. Biokaasu sisältää tavallisesti 40–70 % metaania, 30–60 % hiilidioksidia. Biokaasureaktoreissa tuotetussa kaasussa on lisäksi pieniä pitoisuuksia typpeä ja rikkivetyä ja kaatopaikkakaasuissa näiden lisäksi myös pieniä pitoisuuksia kloori- ja fluoriyhdisteitä. Rikkiyhdisteistä aiheutuu biokaasuille tyypillinen epämiellyttävä haju.

Metaani on vapaasti ilmakehään päästessään noin 20 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu. Muodostuvan biokaasun talteenotolla ja hyötykäytöllä voidaan merkittävästi vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä. Kaikki kuiva-aines ei hajoa mädätyksen aikana. Jäljelle jäävä aines eli mädäte on kiinteää tai nestemäistä. Biokaasuprosessi on suljettu, joten mädäte sisältää raaka-aineen alkuperäiset ravinteet, kuten typen ja fosforin, ja on hyvää lannoitetta (Biokaasu n.d.).

5.2 Raaka-aineet

Biokaasun raaka-aineeksi kelpaavat helposti hajoavat orgaaniset yhdisteet, kuten lannat, yhdyskuntien ja elintarviketeollisuudet biojätteet, viemäriletteet ja elintarviketeollisuuden jätevedet ja lietteet sekä kasvibiomassat (lehdet, naatit, kuoret, kokonaiset energiakasvit jne.). Puun sisältämä ligniini hajoaa niin hitaasti, ettei sen mädätys ole järkevää nykytekniikalla. Sen sijaan paperi, josta ligniini on poistettu, voidaan mädättää muun jätteen seassa. Myös biodieselin valmistuksessa muodostuva glyseroli käy muun aineksen seassa mädätykseen. Pienissä laitoksissa lähellä raaka-aineen syntypaikkaa tuotetun biokaasun energiatase on erinomainen, mutta pitkät kuljetusmatkat heikentävät sitä. Jos biokaasua halutaan käyttää ajoneuvopolttoaineena, kaasun puhdistus ja paineistus kuluttavat energiaa ja heikentävät energiatasetta (Biokaasu n.d.).

5.3 Tuotanto

Biokaasun tuottamiseen kontrolloidusti on useita erilaisia teknisiä vaihtoehtoja, kuten biokaasureaktorit tai biokaasun keräys kaatopaikoilta pumppaamalla. Biokaasun tärkeimpiä lähteitä ovat jätevedenpuhdistamojen lietteet, kaatopaikkojen hallittu kaasunkeräys, maatalouden lannat ja helposti hajoavat biomassat sekä elintarviketuotannon sivutuotteet. Biokaasureaktorissa kaasua tuotetaan anaerobisella menetelmällä. Tavallisesti biomassa on reaktorissa lietemuodossa, mutta viime aikoina on otettu käyttöön myös kiinteän syötteen niin kutsutut kuivamädätysreaktorit, joissa kaasua tuottavan biomassan kuiva-aineen osuus on huomattavasti korkeampi kuin perinteisessä lietelaitoksessa. Märkämädätys on nykyisin suosituin biokaasuprosessi.

Reaktorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja melko varmatoimisia. Märkämädätys sopii lietemäisille raaka-aineille, kuten lietelannalle ja elintarviketeollisuuden jätevesille, jotka sisältävät vain vähän kuiva-ainetta. Reaktoriin voidaan lisätä esimerkiksi peltobiomassoja, mikä lisää kaasuntuottoa vaikuttamatta reaktorin kokoon. Kuivamädätys yleistyy maailmalla jatkuvasti. Kuivamädätyksessä mädätettävät ainekset ovat kiinteitä, joten reaktorikin sisältää vähemmän vettä kuin märkämädätyksessä ja on siten kooltaan pienempi. Reaktoreita on monenlaisia panostoisista pienen mittakaavan laitteista suuriin jatkuvatoimisiin. Jatkuvatoimisissa prosesseissa on monesti ongelmia aineksen sekoituksessa ja siten kaasun tuotto ja hajoaminen on epätasaista. Toistaiseksi ainoa todella toimiva jatkuvatoiminen kuivamädätysprosessi on sveitsiläinen Kompogas-prosessi. (Biokaasu n.d.)

Anaerobista käsittelyä pidetään kestäväen kehityksen mukaisen energiatuotantomuodon lisäksi myös ekologisena jätteenkäsittelytapana. Elinkaarianalyysessä tarkastellessa voidaan ottaa huomioon myös muutkin seikat kuin prosessiin kulutettu energia. Kestäväen kehityksen kannalta biokaasun tuotannolla on useita positiivisia vaikutuksia. Usein näiden tarkastelu voi olla esimerkiksi energiataseiden tarkastelun osalta hankalaa.

Monilla maatilakohtaisilla biokaasulaitoksilla mahdollisuus nostaa energiaomavaraisuutta ei ollut alkuperäinen syy biokaasun tuotannon aloittamiseen vaan taustalla vaikuttivat ympäristölliset syyt ja huoli eläinten terveydestä. Alkusysäyksessä auttoi myös se, että jotain oli tehtävä eläinten lannalle. Anaerobisessa kaasutusprosessissa lannan haju vähenee noin 80 - 90 %. Anaerobisen käsittelyn läpikäynyt materiaali on tasalaatuisempaa ja juoksevampaa kuin käsittelemätön liete. Käsitelty liete imeytyy maahan nopeammin hajujen kadotessa nopeasti levityksen jälkeen. Tämä voi parantaa myös maatalouden imagoa hajuhaittojen vähentyessä.

Biokaasuprosessin läpikäynyt lanta on myös erinomaista lannoitetta. Kasvit kykenevät hyödyntämään vaivattomasti sen ravinteita (typpi ja fosfori), sillä anaerobisen prosessin läpikäyneen jäänteen ravinnetasapaino paranee. Lannoituksen hinnan noustessa mahdollisuus käyttää lietettä lannoitteena vaikuttaa varmasti maatalojen kustannuksiin sekä lisää biokaasun myönteisiä puolia. Biokaasuprosessi vähentää myös rikkakasvien siementen ja kasveille haitallisten yhdisteiden määrää. Samalla myös eläinten hyvinvointi

paranee patogeenien vähentyessä. Biokaasun tuotantoon voi liittyä myös haittavaikutuksia. Toiminta voi aiheuttaa paikallisia ympäristöriskejä esimerkiksi prosessissa ilmenneiden häiriöiden vuoksi. Mahdollisia haittoja voivat olla kasvihuonekaasupäästöt, hajuhaitat, ravinnepäästöt sekä hygieniariskit. (Huovari & Rautanen 2008.)

5.4 Biokaasun käyttö

Biokaasun metaanipitoisuus on riittävä käytettäväksi sellaisenaan sähkön- ja lämmöntuotantoon. Biokaasussa oleva kosteus voidaan poistaa vedenerottimien avulla ja mahdollinen rikkivety vesipesulla. Biokaasulla tuotetun energian hyötysuhde vaihtelee sen mukaan käytetäänkö sitä sähkön ja lämmön yhteistuotantoon vai tuotetaanko sillä vain jompaa kumpaa. Pelkässä lämmöntuotannossa päästään 90 %:n hyötysuhteeseen, mutta tuotettaessa vain sähköä jää hyötysuhde 35 %:iin. Yhteistuotannossa hyötysuhde on 85 %, josta sähkön osuus on 35 prosenttiyksikköä ja lämmön osuus 50 prosenttiyksikköä. Jätevedenpuhdistamojen mädättämöissä syntyvä biokaasu käytetään energiana pääasiassa puhdistamojen omissa prosesseissa. Biokaasun jalostusarvo voidaan maksimoida jalostamalla se ajoneuvopolttoaineeksi. Se tapahtuu poistamalla biokaasusta hiilidioksidi ja epäpuhtaudet, kaatopaikkakaasusta myös typpi. Biokaasua voidaan käyttää liikenteessä sekä paineistettuna (CBG, Compressed BioGas) että nesteytettynä (LBG, Liquefied BioGas). Jalostettu biokaasu on kemiallisesti lähes samanlaista kuin jalostettu maakaasu, joissa molemmissa pääyhdiste on metaani, joten molempia voidaan käyttää kaasuautoissa ja niitä voidaan myös sekoittaa.

6 BIOETANOLI

Bioetanoli on etanolia, jota valmistetaan kasvispohjaisista raaka-aineista kuten tärkkelys-, selluloosa- tai sokeripitoisista kasveista polttoaineeksi. Bioetanolia syntyy hapettomissa olosuhteissa hiivojen fermentoidessa sokereita alkoholiksi. Sivutuotteena syntyy hiilidioksidia ja jäljelle jää mäskiksi tai rankiksi kutsuttu kiinteä massa. Bioetanoli on biopolttoaineena uusiutuvaa energiaa, jonka tuottamisessa pyritään hiilidioksidineutraaliuteen. Nykyään suurin osa maailmassa tuotetusta etanolista on

biopohjaista. Etanolia voidaan valmistaa vaihtoehtoisesti hydraamalla fossiilisperäistä eteeniä.

Yleisimpiä bioetanolin raaka-aineita ovat tärkkelyspitoiset viljojen ja maissin jyvät sekä sokeripitoiset sokeriruoko ja -juurikas. Kun etanolia tehdään viljasta, suurta osaa kasvista ei käytetä hyödyksi. Sekä viljan oljet että jyvien kuoret ovat vehnän viljelyn ja etanolin tuotannon sivutuotteita. Oljet ja jyvien kuoret sisältävät paljon selluloosaa, joka on periaatteessa mahdollista muuntaa glukoosiksi ja näin olisi mahdollista lisätä etanolin saantoa viljasta. Yksi vaihtoehto on käyttää jyvien kuoret ja oljet polttoaineena energiantuotannossa. Olkien ottaminen talteen pelloilta lisää tarvittavan lannoituksen määrää ja saattaa muuttaa pellon kosteusolosuhteita, joten asiaa täytyy arvioida myös tältä kannalta. Selluloosa- ja ligniinipitoisten raaka-aineiden hyödyntämistä etanolin tuotannossa tutkitaan paljon ympäri maailmaa. Saannon parantamiseksi avainasemassa ovat tehokkaasti selluloosaa ja hemiselluloosaa pilkkovien entsyymien sekä pentooseja hyödyntävien hiivojen kehitys. Hiilihydraattipitoiset ruoantähteet soveltuvat bioetanolin valmistukseen hyvin ja esim. Suomessa St1 valmistaa bioetanolia elintarviketeollisuuden biojätteestä. Etanoli tislataan ja väkevöidään tämän jälkeen, jotta sitä voidaan käyttää liikennepolttoaineen seoskomponenttina. Lopputuotteena on dehydratoitua, 99,8-tilavuusprosenttista etanolia. Etanolin tislauksen ja väkevöintiprosessit kuluttavat itsessään melko runsaasti energiaa. Bioetanolin sivutuotteena syntyvä mäski voidaan hyödyntää rehuna tai mädättää, jolloin sen sisältämä energia saadaan talteen biokaasuna. Ravinteet jäävät mädätysjäännökseen ja ne voidaan hyödyntää lannoitteena.

7 PYROLYYSIÖLJY

Pyrolyysiöljy on biomassasta kuumentamalla valmistettua polttoainetta. Prosessissa biomassaa kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa 500-600 asteen lämpötilaan, jolloin se höyrystyy. Jäähdyessään kaasut tiivistyvät pyrolyysiöljyksi. Lähinnä puupohjaisia raaka-aineita on tutkittu. Primääripyrolyysiöljy sisältää satoja kemiallisia yhdisteitä, tarkempi koostumus riippuu raaka-aineesta. Pääasiassa se sisältää orgaanisia happoja, aldehydejä, ketoneja, alkoholeja, fenolijohdannaisia, sokereita ja erilaisia muita hiilihydraattien

pilkkoonmismuotteita. Lisäksi öljyssä on merkittävä osa raskaita ligniiniperäisiä molekyylejä. Jalostamattomana se vastaa ominaisuuksiltaan raskasta polttoöljyä.

8 BIOPOLTTOAINEIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

8.1 Kriteereitä ympäristövaikutusten kannalta

Ollakseen kelvollisia vaihtoehtoja perinteisille polttoaineille biopolttoaineiden pitäisi tuottaa nettoenergiahyötyä, olisi oltava ympäristön kannalta haitattomia ja taloudellisesti kilpailukykyisiä eivätkä ne saisi uhata ruuantuotantoa. Jotta biopolttoaineiden tuotanto olisi kestävä kehityksen mukaista, niille ollaan valmistelemassa mm. EU:n toimesta ns. kestävyyskriteereitä. Kestävyttä voidaan tarkastella niin ympäristöllisistä, taloudellisista kuin sosiaalisista näkökulmista, jotka jakautuvat edelleen erilaisiin ulottuvuuksiin. Kestävyden yksiselitteinen mittaaminen on tämän takia lähes mahdotonta ja arviointikin hyvin haastavaa. On olemassa merkittävä riski, ettei biopolttoaineille ole mahdollista luoda sellaisia yksinkertaistettuja kriteereitä, jotka todella takaisivat niiden kestävä tuotannon.

Yksi keskeinen tekijä on biomassan uusiutumisenopeuden ja ilmastonmuutoksen hillinnän tavoiteaikataulun välinen suhde. Mitä hitaammin biomassaa uusiutuu, sitä tehottomampaa on sen käyttö ilmastonmuutoksen hillinnän välineenä. Biopolttoaineiden ilmastovaikutukset riippuvat merkittävästi myös epäsuorista vaikutuksista, joita kilpailu raaka-aineista, tuotantoalasta ja apuhyödykkeistä eri käyttökohteiden välillä aiheuttaa. Pahimmillaan ne voivat johtaa huomattavan negatiivisiin vaikutuksiin, kuten trooppisten sademetsien tuhoutumiseen tai vaihtoehtoisten, päästöintensiivisten raaka-aineiden käyttöönottoon biopolttoaineiden kanssa kilpailevissa käyttökohteissa. Biomassa ja sen tuottamiseen soveltuva maa-ala ovat rajallisia resursseja.

Ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta biomassaa tulisi hyödyntää tavalla, joka tuottaa suurimmat ilmastohyödyt suhteessa asetettuihin tavoitteisiin. Biomassaa voidaan hyödyntää ilmastonmuutoksen hillinnässä eri tavoin: korvaamalla päästöintensiivisiä materiaaleja ja energiaa, kerryttämällä hiiltä ilmakehästä metsiin, maaperään ja puutuotteisiin sekä ylläpitämällä suuria hiilivarastoja, kuten trooppisia sademetsiä ja

suomaita. Nämä keinot ovat keskenään osittain kilpailevia ja niiden tehokkuus riippuu erityisesti saavutettavissa olevista korvaushyödyistä, käytettävän biomassan uusiutumisenopeudesta ja ilmastonmuutoksen hillinnän tavoiteaikataulusta.

Biopolttoaineiden ilmastovaikutukset riippuvat monista tekijöistä, mutta monet muut biopolttoaineiden ympäristövaikutukset tunnetaan vielä huonommin. Periaatteessa biopolttoaineiden raaka-aineiden tuotanto ei ole sen haitallisempaa kuin muu maa- tai metsätaloustuotanto, mutta merkittävä biopolttoaineiden tuotannon lisääminen vaikuttaa vesistöjen, maaperän ja ilman laatuun. Tietyillä alueilla kasvava biopolttoaineiden tuotanto aiheuttaa myös uhan biodiversiteetille ja veden riittävyydelle. Resurssien saatavuuteen vaikuttaa biopolttoaineiden tuotannon lisäksi moni muu tekijä, kuten elintarvike-, metsä-, kemian- ja energiateollisuuden kehitys. Biomassan hyödyntämiseen puolestaan vaikuttavat ilmastotavoitteiden lisäksi mm. energiaomavaraisuuden parantamiskysymykset, öljyriippuvuuden vähentäminen sekä kansan- ja aluetaloudelliset tekijät. Kestävimpien ratkaisujen löytämiseksi biomassan ja maa-alan hyödyntämistä eri käyttökohteissa voidaan optimoida tunnistamalla eri käyttötapojen vaikutuksia kestävyiden eri ulottuvuuksien suhteen.

8.2 Liikenteen biopolttoaineet ilmastonmuutoksen hillinnän keinona

Euroopan unioni on ajanut uusiutuvien liikennepolttoaineiden käytön edistämistä vuodesta 2000 lähtien, jolloin se julkaisi tavoitteensa kasvattaa vaihtoehtoisten polttoaineiden osuutta 20 %:iin liikenteessä käytetyistä polttoaineista vuoteen 2020 mennessä (EC 2000). Aivan näin suuriin tavoitteisiin ei lopulta päädytty, sillä joulukuussa 2008 hyväksytyssä RES-direktiivissä vahvistettiin tavoitteeksi nostaa uusiutuvan energian osuus 10 %:iin energian kokonaiskulutuksesta liikenteessä kaikissa jäsenmaissa vuoteen 2020 mennessä. RES-direktiivin mukaisesti uusiutuvat energialähteet liikenteessä ovat esimerkiksi fossiilisia polttoaineita korvaavat nestemäiset tai kaasumaiset biopolttoaineet sekä sähköautoissa käytettävä uusiutuvista energialähteistä tuotettu sähkö.

Biopolttoaineiden käytön edistämistä perustellaan useilla näkökohdilla, joista ensimmäisenä mainitaan usein juuri liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen. Biopolttoaineiden avulla halutaan myös lisätä Euroopan energiaomavaraisuutta sekä

vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä liikenteessä (EU 2009). Biopolttoaineiden tuotanto on hajautettua, eikä se ole riippuvaista perinteisten fossiilisten energiamuotojen saatavuudesta, joten energiantuotannon epävarmuuden uskotaan vähenevän. Biopolttoaineiden tuotannon ajatellaan myös luovan lisää työpaikkoja erityisesti maaseudulle.

Biopolttoaineiden käytön edistämisen perusteluja on kuitenkin myös kyseenalaistettu. Biopolttoaineiden tuotantoon ja käyttöön voidaan yhdistää useita ongelmia, ja biopolttoaineita on kritisoitu esimerkiksi siitä, että niiden valmistaminen vie maa-alaa ruuaksi tai rehuksi kelpaavien tuotteiden viljelyltä ja aiheuttaa ruuan hinnan nousua.

Euroopan unioni on kehittänyt oman kriteeristönsä biopolttoaineiden kestävyden ja erityisesti niiden ilmastovaikutusten arviointiin. Tämä kriteeristö esitellään RES-direktiivissä yhdessä biopolttoaineiden käytön edistämistavoitteiden kanssa. Kriteeristössä esitetään sanallisia vaatimuksia ja suosituksia biopolttoaineiden ekologiselle ja sosiaaliselle kestävyydelle. Ekologisen kestävyden kriteerit liittyvät esimerkiksi kestäväan maankäyttöön, kun taas sosiaalisen kestävyden kriteerit määrittelevät esimerkiksi työntekijöiden asemaa biopolttoaineiden raaka-aineita tuottavissa maissa. RES-direktiivin liitteessä esitellään lisäksi laskentamenetelmä, jota tulee soveltaa biopolttoaineiden kasvihuonekaasuvaikutusten arviointiin EU:ssa. Jotta tuotettavat biopolttoaineet luettaisiin mukaan EU:n uusiutuvan energian tavoitteisiin, tulee niiden täyttää RES-direktiivin asettamat vaatimukset biopolttoaineiden kasvihuonekaasuvaikutuksille tämän laskentamenetelmän mukaan arvioituna. Eräille biopolttoaineille on myös valmiiksi annettu oletusarvoja niiden kasvihuonekaasuvaikutuksista (EU 2009).

8.3 Ilmastovaikutusten dynamiikka

Ilmastonmuutoksen hillinnän keinoja vertailtaessa tulee kiinnittää huomiota useisiin seikkoihin. Biopolttoaineiden kohdalla tärkeä vaikutus on esimerkiksi prosessiin valituilla raaka-aineilla, joita ovat erilaiset viljelykasvit, metsäbiomassat sekä bioperäiset jättemateriaalit. Biomassoja voidaan käyttää ilmastonmuutoksen hillinnässä eri tavoin: korvaamaan fossiilisia polttoaineita tai muita raaka-aineita tuotantoprosesseissa, pitämään yllä hiilivarastoa (esim. soiden suojeleminen) tai kasvattamaan hiilivarastoa (esim. metsitykset,

pitkäkestoiset puutuotteet) (Soimakallio ym. 2009). Näiden hillintäkeinojen tehokkuus riippuu tarkastellusta aikajänteestä ja ilmastotavoitteiden aikatauluista. Esimerkiksi lyhytkiertoiset peltobiomassat tai nopeasti hajoavat jätejakeet eivät varastoi hiiltä pitkiä aikoja, joten niiden hyödyntämisessä esimerkiksi energiana ei menetetä hiilen varastovaikutuksia. Sen sijaan pitkäkiertoiset metsät, turve ja hitaasti hajoavat jätejakeet (esim. muovi ja ligniini) voivat toimia pitkäaikaisina hiilivarastoina ja niiden varastovaikutusta voidaan hyödyntää ilmastomuutoksen hillinnässä, jollei niiden sisältämää hiiltä vapauteta ilmakehään esimerkiksi polton yhteydessä.

Uusimpien tutkimusten mukaan ilmaston lämpenemisellä voi kuitenkin olla merkittäviä vaikutuksia metsiin (Seppälä, Buck & Katila 2009). Lämpenemisen seurauksena kasvukauden pituus voi alueesta riippuen pidentyä tai lyhentyä ja metsien puulajeissa voi tapahtua muutoksia. Jos ilmasto lämpenee yli 2,5 astetta esiteolliseen aikaan verrattuna, saattaa metsien hiilenvarastointikyky pienentyä tai jopa kadota. Tällöin riskinä on, että metsät muuttuvat hiilinielujen sijaan hiilen lähteiksi. Tämä näkökohta lisää epävarmuutta suunniteltaessa metsien käyttöä ilmastomuutoksen hillinnän välineenä. Puumateriaali voi toimia hiilivarastona myös hyötykäytössä, esimerkiksi rakentamisen raaka-aineena, jolloin se voidaan käyttöään päätyessä hyödyntää vielä energian tuotannossa (Soimakallio ym. 2009). Tällöin puumateriaali toimii ensin hiilivarastona ja sen jälkeen vielä korvaa fossiilisia polttoaineita energiana. Puu voidaan hyödyntää myös suoraan tai jalostettuna korvaamaan fossiilisia polttoaineita, esimerkiksi sähkön ja lämmön tuotannossa tai biopolttoaineiden tuotannossa.

Näitä biomassan eri käyttökohteita vertailtaessa on tärkeää ottaa huomioon aikajänne, jolla ilmastomuutosta pyritään hillitsemään. Kiireellisten ilmastotavoitteiden kannalta yhtenä vaihtoehtoina on käyttää biomassaa tai hitaasti hajoavaa jätettä ensisijaisesti hiilivarastona ja saada näin lisää aikaa vähähiilisempien energiantuotanto- ja liikenneteknologioiden kehittämiseen. Tähän toimintatapaan liittyy kuitenkin epävarmuus hiilivarastojen pysyvyydestä muun muassa ilmaston lämpenemisen aiheuttamien muutosten takia. Toisaalta biomassalla voidaan nopeasti korvata fossiilisia polttoaineita jo nykyisillä tekniikoilla. EU:n määrittelemillä biopolttoaineiden käytön edistämistavoitteilla halutaan biomassaa käyttää juuri fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen, esimerkiksi biopolttoaineiden muodossa.

8.4 Liikenteen biopolttoaineiden elinkaaren aikaiset ilmastovaikutukset

Biopolttoaineen tuotanto alkaa raaka-aineen viljelystä (viljeltävät raaka-aineet) tai raaka-aineen korjuusta ja keräilystä (metsä- tai viljelytähde ja jäte). Raaka-aine kuljetetaan biojalostamoon, jossa biopolttoainetta tuotetaan erilaisten valmistusprosessien avulla. Biopolttoaineen sivutuotteena syntyy myös usein käyttökelpoisia tuotteita. Prosessoinnin jälkeen valmis biopolttoaine menee jakeluun ja se voidaan sekoittaa fossiilisen polttoaineen kanssa käytettäväksi ajoneuvoissa.

Biopolttoaineiden ilmastovaikutukset aiheutuvat edellä kuvatun tuotantoketjun eri vaiheissa syntyvistä kasvihuonekaasupäästöistä sekä mahdollisista raaka-ainetuotannon aiheuttamista muutoksista maankäytössä. Biopolttoaineiden elinkaaren aikana syntyvät kasvihuonekaasupäästöt riippuvat biopolttoaineesta, sen tuotantoon käytetystä raakaaineesta, raaka-aineen tuotantomenetelmästä ja polttoaineen jalostusprosessista. Jos biopolttoaine valmistetaan viljeltävistä biomassoista, syntyy kasvihuonekaasupäästöjä viljelyssä käytettävien lannoitteiden ja torjunta-aineiden valmistuksesta ja käytöstä sekä työkoneiden käytöstä. Päästöjä vapautuu myös viljelymaasta. Jos taas biopolttoaine valmistetaan jätteestä tai metsätähteestä, voidaan päästöjen ajatella syntyvän vasta keräilystä alkaen. Biopolttoaineen prosessoinnin päästöistä suuri osa syntyy ulkopuolisen energian käytöstä biopolttoaineen valmistuksessa, mutta päästöjä syntyy myös prosessissa tarvittavien kemikaalien ja muiden lisäaineiden valmistuksesta ja käytöstä. Lisäksi päästöjä syntyy raaka-aineiden ja välituotteiden kuljetuksista ja varastoinnista sekä valmiiden tuotteiden jakelusta ja käytöstä (Mäkinen, Soimakallio, Paappanen, Pahkala & Mikkola 2006).

Biopolttoaineiden ilmastovaikutukset jaotellaan yleensä kahteen ryhmään, suoriin ja epäsuoriin ilmastovaikutuksiin, joiden raja on kuitenkin hyvin häilyvä. Jako voidaan suorittaa esimerkiksi niin, että ”kiinteästi biopolttoaineketjuun liittyvät” vaikutukset ajatellaan suoriksi ilmastovaikutuksiksi. Näitä ovat esimerkiksi ne ilmastovaikutukset, jotka syntyvät biopolttoaineprosessissa tarvittavan energian ja aputuotteiden tuotannosta ja käytöstä, infrastruktuurin rakentamisesta, raaka-aineiden viljelystä, korjuusta tai keräilystä, kuljetuksista sekä biopolttoaineen prosessoinnista ja käytöstä. Muut biopolttoaineketjun toteuttamisen vaikutukset taas voidaan ajatella epäsuoriksi, ja niihin

vaikuttavat usein erilaiset markkinamekanismit (Soimakallio ym. 2009). Biopolttoaineiden ilmastovaikutusarvioinneissa on keskitytty lähinnä suorien ilmastovaikutusten tutkimiseen, sillä epäsuorat vaikutukset ovat usein määrällisesti huonosti tunnettuja ja niiden epävarmuus voi olla suuri. Biopolttoaineiden käytölle asetetut tavoitteet voivat kuitenkin johtaa suurtuotantoon, jolloin epäsuorien ilmastovaikutusten merkitys voi olla kokonaisilmastovaikutusten kannalta ratkaiseva (JRC 2008).

Suorien ja epäsuorien ilmastovaikutusten lisäksi voidaan puhua myös suorista ja epäsuorista kasvihuonekaasuista (Soimakallio ym. 2009). Yleisemmin biopolttoaineiden elinkaariarvioinneissa huomioitavia kasvihuonekaasupäästöjä ovat hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) ja typpioksiduuli (N₂O), jotka myös mielletään vaikutuksiltaan merkittävimmiksi. Näitä kasvihuonekaasuja voidaan pitää ”suorina kasvihuonekaasuina”, sillä niillä on kyky absorboida maanpinnan lähettämää lämpösäteilyä ja lämmittää sitä kautta ilmakehää. Biopolttoaineiden valmistuksesta vapautuu kuitenkin myös muita päästöjä, kuten typpioksideja (Nox), häkää (CO) ja muita orgaanisia komponentteja, kuten metaania, jotka vaikuttavat kemiallisten reaktioiden kautta alailmakehän otsonin (O₃) muodostumiseen, mikä taas vaikuttaa suoraan ilmastoon. Nämä päästöt ovat siis vaikutuksiltaan ”epäsuoria kasvihuonekaasuja”, ja niiden huomioiminen biopolttoaineiden ilmastovaikutusarvioinneissa on harvinaista. Joissain tapauksissa saattaa kuitenkin olla järkevää huomioida myös joitakin epäsuoria kasvihuonekaasuja, jos niiden vaikutusten voidaan olettaa olevan merkittäviä. Myös poltossa vapautuvilla pienhiukkaspäästöillä voi olla sekä ilmastoa lämmittäviä että viilentäviä vaikutuksia. Pienhiukkasten aiheuttamien vaikutusten arviointi on kuitenkin hyvin epävarmaa.

9 BIOPOLTTOAINEIDEN ENERGIA- JA KASVIHUONEKAASUTASEET

Vaikka biopolttoaineiden raaka-aineena käytetään uusiutuvia raaka-aineita, polttoaineiden koko elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt voivat olla jopa suuremmat kuin fossiilisten polttoaineiden päästöt. VTT:n ja MTT:n tutkimuksissa havaittiin rypsiä valmistetun biodieselin ja ohrasta valmistetun bioetanolin elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen olevan merkittävästi suuremmat kuin fossiilisen dieselin ja bensiinin (Mäkinen ym. 2006). Toisen sukupolven biopolttoaineiden

kasvihuonekaasupäästöt olivat huomattavasti pienemmät. Energiataseet olivat kaikilla tarkastelluilla biopolttoaineilla positiiviset eli polttoaineen energiasisältö oli suurempi kuin tuotantoon kuluva energia, joskin bioetanolin energiapanos/tuotos -suhde oli hyvin lähellä yhtä. Etanolin ja biodieselin tuotantoketjussa energian kulutuksesta suurin osa tapahtuu polttoaineen valmistuksessa ja jakelussa, kun taas kasvihuonekaasupäästöistä suurempi osuus aiheutuu raaka-aineen tuotannossa. Raaka-aineen tuotannon osalta suurimmat energian kuluttajat ovat lannoitteiden valmistus ja siementen kuivaus.

Kasvihuonekaasupäästöistä suurimman osan ohraetanolin ja RME:n tuotannossa muodostavat lannoitteiden valmistus ja lannoituksesta johtuvat maaperän dityppioksidipäästöt. Mikäli ohran ja rypsin oljet käytetään polttoaineena korvaamaan turpeen polttoa ja mikäli rypsirouhe tai rankki käytetään eläinten rehuna ja näistä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset huomioidaan, pienenevät etanolin ja RME:n tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt huomattavasti. (Mäkinen ym. 2006.)

Ulkomaisissa tutkimuksissa viljaetanolin ja RME:n energia ja kasvihuonekaasutaseet ovat suotuisimmat. Tämän johtuu mm. suuremmasta satotasosta, pienemmästä lannoitteiden käyttömäärästä, uusiutuvien energianlähteiden käytöstä prosessissa sekä eroavaisuuksista lähtöarvoissa mm. N₂O-päästöjen osalta. Ruotsissa biokaasun osalta on tehdyssä elinkaaritutkimuksessa laskettiin biokaasun tuotantoon kuluvan 15–50 % biokaasun energiasisällöstä riippuen raaka-aineesta ja jalostusasteesta sekä reaktoritekniikasta (Berglund & Börjesson 2006). Suurin energianpanos suhteessa tuotokseen oli biokaasunurmella moottoripolttoaineeksi jalostettuna, kun taas pienin elintarviketeollisuuden jätteillä. Tutkimuksessa oli oletettu, että maatilatason biokaasureaktorissa ei ole käytössä lämmönvaihtimia, minkä vuoksi maatilatason reaktorin lämmön kulutus on kaksi kertaa suurempi kuin keskitetyssä biokaasulaitoksessa.

Kasvihuonekaasuista Berglund ja Börjesson (2006) tarkastelivat vain hiilidioksidia. Biokaasun hiilidioksidipäästöt ovat noin 7–28 kg/GJ biokaasua riippuen raaka-aineesta, jalostusasteesta sekä reaktoritekniikasta. Dieselin ja bensiinin tuotannon ja käytön kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 80 kg CO₂-ekv./GJ, joten biokaasulla voidaan vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä. (Berglund & Börjesson 2006.)

Biokaasun tuotanto lannasta vähentää kasvihuonekaasupäästöjä myös epäsuorasti. Perinteinen lannan varastointimenetelmä aiheuttaa suuria metaani- ja ammoniakkipäästöjä. Anaerobisella käsittelyllä ja biokaasun talteenotolla voidaan vähentää sianlannan metaanipäästöjä noin 50 % eli 1,6 kg/tonni lantaa (Sommer, Møller & Petersen 2001) ja ammoniakkipäästöjä noin 80 % eli 100 g/tonni sianlantaa (Nicholson, Webb & Moore 2002). Lannan biokaasutusjäännöksen levitys pellolle lisää kuitenkin levityksen aikaisia ammoniakkipäästöjä, mutta vähentää dityppioksidipäästöjä verrattuna käsittelemättömään lantaan (Petersen 1999). Anaerobinen käsittely vähentää lannan levityksen yhteydessä tapahtuvia dityppioksidipäästöjä 40 grammasta 25 grammaan/tonni lantaa (Sonesson 1996).

9.1 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutoksella tarkoitetaan ihmisen toiminnan seurauksena voimistunutta kasvihuoneilmiötä. Ilmastonmuutosta aiheuttavat varsinaiset kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), dityppioksidi (N_2O), F-kaasut (HFC- ja PCF-yhdisteet), rikkiheksafluoridi (SF_6) ja halogenoidut hiilivedyt (lähinnä CFC- ja HCFC-yhdisteet). Välillisiä kasvihuonekaasuja ovat haihtuvat hiilivedyt (VOC), typen oksidit (NO_x) ja hiilimonoksidi, sillä ne muodostavat otsonia (O_3). Hiilidioksidia pidetään merkittävimpanä ilmastonmuutosta voimistavana tekijänä. Hiilidioksidin merkittävin päästölähde on fossiilisten polttoaineiden käyttö. Bioenergian käyttö ei lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta edellyttäen, että uutta biomassaa kasvaa yhtä paljon kuin sitä käytetään. Näin ollen biopolttoaineiden poltossa vapautuvaa hiilidioksidia ei oteta mukaan elinkaariarvioinneissa laskettaessa biopolttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjä. Kuitenkin elinkaariajattelun periaatteiden mukaan biopolttoaineiden käytön ilmastonmuutosvaikutusta tulee tarkastella ottaen huomioon koko elinkaariaketjun aikaiset kasvihuonekaasupäästöt. Tällöin tarkasteltavaksi tulevat mm. peltoenergian tuotannon aikaiset, bioenergian viljelyssä käytettävien lannoitteiden valmistuksessa aiheutuvat ja maatalous- ja metsäkoneiden sekä kuljetusten aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt.

VTT:n ja MTT:n tutkimuksessa (Mäkinen ym. 2006) ohrasta valmistetun etanolin kasvihuonekaasupäästöt perinteiseen kyntöön perustuvalla viljelyllä ovat 105 kg CO_2 - ekv./GJ polttoainetta, kun olkea ei hyödynnetä energiana. Samaa suuruusluokkaa ovat

myös rypsiä valmistetun biodieselin (RME) kasviuonekaasupäästöt. Rypsiä valmistetun biodieselin (RME) ja ohrasta valmistetun bioetanolin elinkaariset kasviuonekaasupäästöt ovat noin 20 % suuremmat kuin fossiilisten dieselin ja bensiinin tuotannon ja käytön kasviuonekaasupäästöt. Tutkimuksen perusteella ruokohelpipohjaisen Fischer- Tropsch –dieselin kasviuonekaasupäästöt olivat vain noin kolmasosa fossiilisten vertailupolttoaineiden tuotannon kasviuonekaasupäästöistä ja hakkuutähdepohjaisen Fischer-Tropsch-dieselin noin viidesosa. Etanolin ja biodieselin elinkaariketjuissa lannoitteiden valmistuksen ja maaperän N₂O-päästöt aiheuttavat merkittävää epävarmuutta tuloksiin (Mäkinen ym. 2006).

VTT:n ja MTT:n tutkimuksen mukaan, jos ohran olki voitaisiin korjata joka toinen vuosi talteen ja hyödyntää turpeen korvaamiseen sähkön ja/tai lämmön tuotannossa ja tästä saatava hyöty kasviuonekaasujen päästöjen vähentymisessä laskettaisiin ohraetanolin hyväksi, alentuisivat ohraetanolin tuotannon oletuskertoimilla lasketut kasviuonekaasupäästöt perinteiseen kyntöön perustuvalla viljelyllä 28 kg CO₂-ekv./GJ polttoainetta eli noin 70–80 %. Vastaava alenema RME:lle rypsin korren hyötykäytön seurauksena olisi noin 100 %. Ulkomaisissa tutkimuksissa viljaetanolin ja biodieselin kasviuonekaasutaseet ovat suotuisammat kuin VTT:n ja MTT:n tutkimuksessa. Esimerkiksi Concawen, EU:n, JRC: n ja EUCAR:n tutkimuksessa vehnäetanolin ja biodieselin (RME) koko elinkaariketjujen kasviuonekaasupäästöt ovat keskimäärin noin puolet Mäkisen ja muiden. esittämistä arvoista. Tutkimuksen mukaan perinteisesti valmistettujen bioetanolin ja biodieselin kasviuonekaasupäästöt riippuvat voimakkaasti tuotantoprosessista ja sivutuotteiden käytöstä. Samoin kuin Mäkisen ja muiden (2006) tutkimuksessa suurin epävarmuus liittyy maatalouden N₂O-päästöihin.

Ruotsalaisen tutkimuksen (Bernesson, Nilsson & Hansson 2006) mukaan kasviuonekaasupäästöt ovat vain noin 30 % Mäkisen ym. (2006) ohraetanolille laskemista arvoista, kun rehuruuheella korvataan soijarehua ja olkia ei hyödynnetä. Ero johtunee noin 40–70 % suuremmasta satotasosta, pienemmästä lannoitteiden käyttömäärästä, uusiutuvien energianlähteiden käytöstä prosessissa sekä eroavaisuuksista lähtöarvoissa mm. N₂O-päästöjen osalta (Tuomisto 2006). Tan, Culaba ja Purvis (2004) tutkivat kookosöljystä valmistettavan biodieselin elinkaaren aikaisia kasviuonekaasupäästöjä verrattuna fossiilisen dieselin päästöihin. Biodieselin nettokasviuonekaasuvähennys oli

77–104 g/MJ. Suuri vähenemä johtui suuresta raaka-aineresurssista (paljon biomassajäännöstä) ja kookospalmujen perinteisten viljelymenetelmien vähäisestä energiantarpeesta. Toisaalta perinteisten viljelymenetelmien tuotto on alhainen, mikä rajoittaa kookosbiodieselin tuotantopotentiaalia.

Mäkisen ja muiden (2006) tutkimuksessa on oletettu, että energian tuotantoon tulevat pellot ovat kesantopeltoja. Tehdyllä oletuksella ei ole ratkaisevaa merkitystä, jos käytetään jo olemassa olevia peltoja, koska viljelyn aiheuttama ympäristökuormitus kohdennetaan viljeltävälle kasville riippumatta siitä, käytetäänkö se energiantuotantoon tai esimerkiksi rehuksi.

EU:n komissio (EC 2006) on koonnut eurooppalaisissa tutkimuksissa saatuja kasvihuonekaasuvähennyksiä verrattuna vastaaviin fossiilisiin polttoaineisiin bioetanolia sokerijuurikkaasta ja viljasta sekä biodieseliä rapsista valmistettaessa.

Kasvihuonekaasuvähennys korvattaessa vastaavia fossiilisia polttoaineita on kerätyn aineiston perusteella keskimäärin 20–60 % viljaetanolille ja rapsibiodieselille.

Saksalaisen energia- ja ympäristötutkimusinstituutti (IFEU 2004) on analysoinut noin 60 elinaariarviointiin perustuvaa liikenteen biopolttaineiden energia- ja kasvihuonekaasututkimusta. Analysoidun aineiston perusteella saavutetaan energia- ja kasvihuonekaasusäästöjä sekä vehnästä valmistetun etanolin että rapsista valmistetun biodieselin (RME) tapauksessa. Tulosten keskinäinen hajonta on kuitenkin erittäin suuri.

Biokaasun tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin viljaetanolin ja öljykasveista valmistetun biodieselin. Esimerkiksi Helsingin yliopistolla tehdyn selvityksen (Tuomisto 2006) mukaan peltobiokaasun (nurmi ja ruokohelpi) kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 23–42 % fossiilisen bensiinin tai dieselin päästöistä. Vastaavasti lannasta, elintarviketeollisuuden jätteistä ja orgaanisesta yhdyskuntajätteestä valmistetun biokaasun kasvihuonekaasupäästöt ovat vain noin 13–23 % fossiilisen bensiinin tai dieselin päästöistä. Tuomiston (2006) tutkimus on tehty noudattaen samoja periaatteita oletusten ja rajausten suhteen kuin Mäkisen ja muiden (2006) tutkimus.

9.2 Happamoituminen

Happamoitumisella tarkoitetaan maaperän ja vesistöjen heikentynyttä kykyä puskuroida happamoittavaa laskeumaa. Happamoituminen on haitallista monille kasveille ja erityisesti vesieliöille. Lisäksi happamissa olosuhteissa monien haitallisten aineiden, erityisesti raskasmetallien, liukoisuus lisääntyy. Happamoittava laskeuma aiheuttaa myös korroosio- ja muita materiaali vaikutuksia rakennetuille pinnoille. Tärkeimmät happamoittavat yhdisteet ovat rikkidioksidi (SO_2), typen oksidit (NO_x) ja ammoniakki (NH_3). Suomessa rikin päästöt ovat pääosin peräisin fossiilisia polttoaineita käyttävistä voimalaitoksista. Bioenergian elinkaariketjuissa rikkipäästöjen merkitys on vähäinen. Typen oksideja syntyy kaikessa poltossa polttoaineen ja palamisilman sisältämästä tpeestä. Suurin osa typen oksidien päästöistä on peräisin liikenteestä ja työkoneista. Bioenergian elinkaariketjuissa typen oksideja muodostuu kaikissa vaiheissa lähinnä kuljetusten ja työkoneiden päästöinä sekä käyttövaiheessa bioenergian polton seurauksena. Ammoniakista suurin osa tulee maataloudesta. Se aiheuttaa Suomen ammoniakkipäästöistä 97 %. Ammoniakkipäästöjen kannalta on olennaista, mistä raaka-aineista ja millä tavoin bioenergia tuotetaan.

Suomessa liikenteen käyttämät bensiini ja diesel ovat nykyisin rikkittömiä. Lähi-tulevaisuudessa myös työkonepolttoaineet muuttuvat rikkittömiksi. Siksi liikenteen biopolttoaineiden käytöstä aiheutuvat rikkipäästöt eivät juuri eroa fossiilisten liikennepolttoaineiden rikkipäästöistä. Fossiilisten polttoaineiden jalostus kuitenkin aiheuttaa rikkidioksidipäästöjä ilmaan, vaikkakin Suomessa jalostuksen rikkipäästöjä on saatu vähennettyä merkittävästi.

Useiden tutkimusten perusteella liikenteen biopolttoaineet näyttäisivät lisäävän sekä käytön että koko elinkaaren aikaisia NO_x -päästöjä ilmaan verrattuna fossiilisiin liikennepolttoaineisiin (BABFO 2001; Hu ym. 2004; Sheehan ym. 2004). Toisaalta biodieselin on myös raportoitu vähentävän NO_x -päästöjä verrattuna fossiiliseen dieseliin (EC 2006). Käytön aikaisia NO_x -päästöjä voidaan vähentää teknisin keinoin. Lisäksi käytön aikaiset päästöt tulevat vähenemään tulevaisuudessa lainsäädännön vaatimusten ja autokannan uusiutumisen myötä. Täten tulevaisuuden autokannassa NO_x -päästöt ovat suhteellisen alhaiset, eikä biopolttoaineiden käytön aikaisten päästöjen arvioida

merkittävästi eroavan fossiilisten päästöistä. Polttoaineen jalostus aiheuttaa NO_x-päästöjä ilmaan, jotka ovat kuitenkin vähäisiä verrattuna liikenteen ja työkoneiden eli liikennepolttoaineiden aiheuttamiin päästöihin. Neste Oilin ympäristöraporttien mukaan jalostamoiden vuoden 2005 NO_x-päästöt olivat yhteensä noin 3 100 tonnia, joka on noin 4 % liikenteen päästöistä (Neste Oil 2005a, 2005b).

9.3 Pienhiukkaset

Pienhiukkasia pääsee ilmaan suoraan erilaisista lähteistä kuten polttoprosesseista (primääriset pienhiukkaset). Niitä muodostuu myös ilmassa kaasumaisista yhdisteistä kuten VOC-yhdisteistä, typen ja rikin oksideista ja ammoniakista (sekundääriset pienhiukkaset). Pienhiukkasten haitalliset vaikutukset kohdistuvat ensisijaisesti ihmisiin. Ilman hiukkasmaisten saasteiden pitoisuudet ovat yhteydessä hengityselinten sekä sydän- ja verenkiertoelimistön sairauksiin.

Liikenteen biopolttoaineiden pienhiukkaspäästöistä on erityisesti elinkaaren aikaista tutkimustietoa vielä melko vähän (Quirin, Gärtner, Pehnt & Reinhardt 2004). Tutkimusten perusteella etanoli aiheuttaa vähemmän pienhiukkaspäästöjä verrattuna fossiilisiin liikennepolttoaineisiin, mutta biodieselin osalta on raportoitu sekä positiivisia, negatiivisia että ei vaikutusta -tuloksia (EC 2006). BABFOn (2001) mukaan biodiesel vähentää pienhiukkaspäästöjä verrattuna fossiiliseen dieseliin 20–39 %. Biodieselin käytön aikaisten pienhiukkaspäästöjen suhde verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin riippuu rasiuksesta. Alhaisessa rasiuksessa biodieselin päästöt saattavat olla suuremmat kuin fossiilisten, mutta suuremmissa rasiuksissa biodieselin pienhiukkaspäästöt ovat alhaisemmat tai samaa tasoa kuin fossiilisilla polttoaineilla (Krahl, Bünger, Munack, Bahadir, Schröder, Stein & Dutz 2003). Tulevaisuuden ajoneuvokannan hiukkaspäästöihin pätee sama kuin NO_x- ja VOC-päästöjenkin kohdalla. EU:n tiukkenevien pakokaasumääräysten ansiosta myös dieselajoneuvot joudutaan varustamaan pakokaasujen jälkikäsitteilytekniikoilla, ja päästöt tulevat olemaan hyvin alhaiset.

9.4 Alailmakehän otsoni

Alailmakehässä otsonia muodostuu kemiallisissa reaktioissa typen oksideista, hiilimonoksidista ja hiilivedyistä auringonvalon vaikutuksesta. Korkeat alailmakehän otsonipitoisuudet ovat terveydelle vaarallisia. Otsoni myös heikentää puiden ja viljelykasvien kasvua. Tieliikenne on typen oksidien ja VOC-yhdisteiden tärkeimpiä lähteitä.

Liikenteen biopolttoaineiden vaikutuksista alailmakehän otsonin muodostumista aiheuttaviin päästöihin on ristiriitaista tietoa. BABFOn (2001) mukaan biodieselin VOC päästöt ovat 55 % alhaisemmat ja bioetanolin (E85) 45 % alhaisemmat kuin bensiinin. Hun ja muiden 2004 mukaan bioetanolia käyttävän auton elinkaaren aikaiset alailmakehän otsonin prekursoreina toimivat HC- ja CO-päästöt ovat pienemmät kuin bensiiniautojen, mutta NO_x -päästöt suuremmat. Sheehanin ja muiden (2004) tutkimuksen mukaan puolestaan maissietanolin elinkaaren aikaiset sekä NO_x- että CO-päästöt ovat suuremmat, mutta hiilivetypäästöt ovat pienemmät kuin bensiinin.

9.5 Toksisuus

Elinkaariarvioinnissa toksisia vaikutuksia arvioidaan eliöiden (ekotoksisuus) ja ihmisten kannalta. Toksisten vaikutusten arviointi on vielä hankala elinkaariarvioinnin alue. Siinä joudutaan tekemään monia yksinkertaistuksia esimerkiksi perinteiseen riskinarviointiin verrattuna. Bioenergian elinkaariuketjuissa toksisuusvaikutuksia syntyy lähinnä energiaraaka-aineen tuotannossa. Peltoenergian viljelyssä ympäristöön levitetään tarkoituksellisesti haitallisia torjunta-aineita. Lisäksi metsätalouden maan muokkaustoimenpiteet voivat lisätä haitallisten aineiden (esim. elohopea) huuhtoutumista metsämaasta vesistöihin aiheuttaen ekotoksisuusvaikutuksia. Toisaalta polttoaineen jalostuksen, varastoinnin ja käytön aikaiset toksiset vaikutukset saattavat olla alhaisempia kuin fossiilisten polttoaineiden. Esimerkiksi öljynjalostukseen ja fossiilisten polttonesteiden varastointiin ja jakeluun liittyy haihtuvien hiilivetyjen kuten bentseenin päästöjä, joita biopolttoaineiden elinkaariuketjuissa voidaan välttää.

Fu, Chan ja Minns (2003) toteavat, että etanolin elinkaaren kokonaiskarsinogeenisten aineiden päästöt ovat suhteellisen alhaisia. Kriittistä on torjunta-aineiden käyttö raaka-aineen tuotantovaiheessa. Jos etanolin raaka-aine on pelloilla tuotettua, ovat karsinogeenisten aineiden päästöt koko elinkaaren aikana suuremmat kuin bensiinin. Jos etanolin tuotantoon puolestaan käytetään jättemateriaaleja, kuten jätepuuta tai maatalouden jätteitä, ei karsinogeenisissä päästöissä ole eroa bensiiniin verrattuna. Sekä viljellystä biomassasta että jättemateriaalista tuotetun bioetanolin todettiin aiheuttavan vähemmän raskasmetallipäästöjä kuin bensiinin. Toksisuus kaloille puolestaan oli jätepaperietanolilla alhaisempi kuin raakapuuetanolilla. Rypsin viljelyn ekotoksisuusvaikutukset näyttävät olevan huomattavasti suuremmat kuin vehnän, kauran ja ohran viljelyn vaikutukset. Tämä johtuu rypsilä käytettävien torjunta-aineiden merkittävästi suuremmasta ominaishaitallisuudesta.

Liikenteen biopolttoaineiden käytön aikaisista toksisten aineiden päästöistä, kuten PAH-yhdisteistä, bentseenistä ja butadieenista on vain vähän tietoa saataville, mutta todennäköisesti niiden päästöt ovat liikenteen biopolttoaineilla alhaisemmat kuin fossiilisilla liikennepolttoaineilla (Krahl ym. 2003; EC 2006). Biodieselin mutageenisuuden on myös todettu olevan alhaisempi kuin fossiilisten polttoaineiden (Krahl ym. 2003).

9.6 Kokonaisarvioita elinkaaritutkimuksista

Elinkaariarviointitutkimuksissa on pääsääntöisesti todettu, että peltobiomassasta valmistettujen liikenteen biopolttoaineiden energia- ja kasvihuonekaasutaseet ovat edullisia verrattuna fossiilisiin liikenteen polttoaineisiin, vaikkakin eräissä tutkimuksissa on päädytty jopa päinvastaisiin johtopäätöksiin (Quirin ym. 2004). Peltobiomassat ovat pääsääntöisesti huonompia happamoitumisen, rehevöitymisen ja N₂O päästöjen suhteen kuin fossiiliset polttoaineet. Peltoenergian osalta merkittävin vaihe ympäristökuormituksen aiheuttajana on viljan viljely, jossa tärkeimpinä tekijöinä ovat lannoitteiden käyttö, maaperästä vapautuvat päästöt ja koneiden energiankulutus (Bernesson ym. 2006).

Euroopan komissio on arvioinut Euroopan unionin bioenergiastrategian vaikutuksia (EC 2006). Arvion mukaan bioenergian tuotannon riski on, että kasvihuonekaasuvähenemässä saavutettavat globaalit hyödyt häviävät paikallisille ympäristöhaitoille, kuten

biodiversiteettivaikutuksille, maan laadun heikkenemiselle, lisääntyvälle veden käytölle, ja lisääntyvälle pestisidien käytölle. Toisaalta tietyillä alueilla energiakasvien viljely saattaa auttaa ylläpitämään maatalousmaa tuotannossa, mikä voi estää tulvia ja maanvyörymiä, ja suojella tärkeitä elinympäristöjä.

Liikenteen osalta myös biopolttoaineita käytettäessä ajoneuvojen pakokaasupäästöjen on täytettävä EURO-päästörajoitteet. Nykyisten liikenteen biopolttoaineiden ympäristövaikutusten ei katsota juurikaan poikkeavan fossiilisten polttoaineiden vaikutuksista (EC 2006). Kun etanolia sekoitetaan bensiinin kanssa, kasvaa sen höyrynpaine, minkä takia sen ilman laatua heikentävät päästöt eivät välttämättä ole alhaisemmat kuin bensiinin (Beer & Grant 2007). Etanolin käyttö aiheuttaa vähemmän partikkelipäästöjä, mutta sen saattaa olla vaikea täyttää vaatimuksia VOC-päästöjen osalta. Biodiesel vähentää CO-päästöjä, mutta partikkelien, NO_x:ien ja hiilivetyjen osalta on raportoitu sekä positiivisia, negatiivisia että neutraaleja tuloksia. Synteettisen dieselin odotetaan vähentävän ilmapäästöjä hyvien palamisominaisuuksiensa, rikittömyyden ja aromaattisten yhdisteiden puuttumisen vuoksi.

Resurssien, mm. tuottavan maan pinta-alan, ollessa rajallisia, saattaa olla ympäristön kannalta kannattavampaa käyttää peltobiomassaa energian tuotannon sijaan materiaaliraaka-aineena. Dornburg, Lewandowski ja Patel (2004) tarkastelivat biopolymeerien energian käyttöä, kasvihuonekaasuvähennemää ja maankäyttöä bioenergian vastaaviin vaikutuksiin 11 elinkaaritutkimukseen pohjautuen. Biopolymeerien kasvihuonekaasujen ja energiankulutuksen vähenemä oli kaikissa tutkimuksissa suurempi kuin bioenergian, kun otettiin sivutuotteiden hyödyntäminen mukaan tarkasteluun. Maapallon väestön lisääntyessä ja elintason noustessa kilpailu kasviproteiinista kiihtyy, ja erityisesti tämän raaka-aineen riittävyys muuhun kuin ravinnoksi lienee tulevaisuudessa rajoitettua. Näyttäisikin siltä, että liikenteen biopolttoaineiden raaka-aineena kannattaisi käyttää erilaisia selluloosapohjaisia materiaaleja tai jättemateriaaleja peltobiomassan sijaan (Hill, Nelson, Tilman, Polasky & Tiffany 2006).

10 Yhteenveto bioenergian ympäristövaikutuksista

Bioenergian elinkaariketjuilla on monia ympäristövaikutuksia. Toisaalta biopolttoaineet vähentävät päästöjä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, mutta toisaalta ne saattavat lisätä kuormitusta. Osa vaikutuksista on vielä selvittämättä. Esimerkiksi biokaasua voidaan valmistaa monista materiaaleista, ja lopullinen ympäristökuormitus riippuu raaka-aineesta. Toisaalta peltoenergian ympäristövaikutukset riippuvat muun muassa viljelymenetelmistä. Esimerkiksi suorakylvön rehevöittävät ja eroosiota aiheuttavat vaikutukset ovat pienemmät kuin tavanomaisen viljelyn.

Biopolttoaineiden elinkaariset ympäristövaikutukset muodostuvat pääasiassa biomassan tuotannossa ja biopolttoaineen käyttövaiheessa. Biopolttoaineen valmistus on vähemmän merkityksellinen ja kuljetusten ympäristövaikutukset riippuvat siitä, millä välineellä kuljetukset tapahtuvat. Pitkäkään laivamatka suurissa kuljetusyksiköissä ei biopolttoaineyksikköä kohti aiheuta yleensä suuria ympäristövaikutuksia, mutta mikäli polttoainetta kuljetetaan pienehköissä yksiköissä maanteitse, voi tämän vaiheen merkitys ilmastonmuutoksen ja muiden ilmapäästöjen suhteen nousta olennaiseksi.

Peltobiomassan tuotannossa nousevat tärkeimmiksi ympäristövaikutusluokiksi ilmastonmuutos, rehevöityminen, maaperän tuottokyky ja eroosio sekä toksisuus. Näiden osalta viljelymenetelmä ja bioenergiakasvi vaikuttavat merkittävästi vaikutuksen suuruuteen. Metsäbiomassan tuotannossa luonnon monimuotoisuus, maaperän tuottokyky ja eroosio sekä rehevöityminen ovat tärkeimpiä ympäristövaikutusluokkia. Käyttövaiheessa päästöt ilmaan ja tätä kautta vesistöjen ja myös maaympäristön rehevöityminen ovat olennaisia ympäristövaikutuksia. Ilmastonmuutos ja kokonaisenergiatase ovat elinkaaren kokonaisuuden kannalta ratkaisevia.

Liikenteen biopolttoaineista toisen sukupolven biodiesel, biokaasu ja ohraetanoli sekä rypsi-biodiesel (RME) silloin, kun oljet hyötykäytetään energiantuotannossa, ovat kasvihuonekaasupäästöjen kannalta parempia kuin fossiiliset liikennepolttoaineet. Sen sijaan jos olkia ei hyötykäytetä, ovat ohraetanolin ja rypsi-biodieselin (RME) elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt suuremmat kuin bensiinin ja dieselin. Muiden ilmapäästöjen osalta ei bio- ja fossiilisilla liikennepolttoaineilla ole suuria eroja, sillä samat EURO-

päästönormit koskevat molempia. Biopolttoaineiden vaikutukset ravinteiden huuhtoutumiseen, luonnon monimuotoisuuden vähenemiseen ja maaperän tuottokyvyn heikkenemiseen ovat suuremmat kuin fossiilisten polttoaineiden.

LÄHTEET

BABFO (British Association for Bio Fuels and Oils). 2001. Green fuels challenge – submission for biodiesel and bioethanol.

Beer, T. & Grant, T. 2007. Life-cycle analysis emissions from fuel ethanol and blends in Australian heavy and light vehicles. *Journal of Cleaner Production* 15: 833-837.

Bernesson, S., Nilsson, D. & Hansson, P.-A. 2006. A limited LCA comparing large- and small-scale production of ethanol for heavy engines under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy* 30, 2006. 46–57.

Berglund, M. & Börjesson, P. 2006. Environmental systems analysis of biogas systems Part I: Fuel-cycle emissions. *Biomass and Bioenergy* 30 (2006) 469-485.

Biokaasu n.d. Tietopaketti Biesto Oy:n sivustolla. Viitattu 20.2.2012.
http://www.bioste.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=2&Itemid=10.

Dolfing, J. 1988: *Acetogenensis*. Teoksessa *Biology of Anaerobic Microorganisms*. Toim. Zehnder, A.J.B. John Wiley & Sons, Inc.

Dornburg, V., Lewandowski, I. & Patel. M. 2004. Comparing the land requirements, energy saving, and greenhouse gas emissions reductions of biobased polymers and bioenergy. *Journal of Industrial Ecology* 7(3-4): 93-116.

EC 2000. Green Book - Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply. COM(2000) 769 final. Brussels 29.11.2000. EC

EC (European Commission). 2006. Annex to the communication from the commission. An EU strategy for biofuels. Impact assessment. Commission staff working document. COM(2006) 34 final. Brussels 8.2.2006. SEC(2006) 142.

EU 2009. Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. 2008/0016 (COD). Brussels 26.3.2009. EU

Fischer-Tropsch-menetelmä. n.d. Tietopaketti Biesto Oy:n sivustolla. Viitattu 15.3.2012.
http://www.bioste.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=14.

Fu, G.Z., Chan, A.W. & Minns, D.E. 2003. Life cycle assessment of bio-ethanol derived from cellulose. *Int J LCA* 8(3): 137-141.

Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S. & Tiffany, D. 2006. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *PNAS* 103(30): 11206-11210.

Hu, Z., Pu, G., Fang, F. & Wang, C. 2004. Economics, environment and energy life cycle assessment of automobiles fueled by bio-ethanol blends in China. *Renewable Energy* 29(2004): 2183-2192.

Huovari, N. & Rautanen, J. 2008. Biokaasulaitosten energiatase maatalojen biomassoista hyödyntävissä laitoksissa. Motiva Oy.

IFEU (Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg). 2004. CO₂ mitigation through biofuels in the transport sector. Status and perspectives. Main report. Heidelberg, Germany

JRC 2008. Biofuels in the European Context: Facts and Uncertainties. European Commission Joint Research Centre.

Krahl, J., Bünger, J., Munack, A., Bahadir, M., Schröder, O., Stein, H. & Dutz. 2003. Biodiesel and Swedish low sulfur diesel fuel as ecologically compatible fuels in modern diesel engines. *Fresenius Environmental Bulletin* 12(6): 640-647.

Mäkinen, T., Sipilä, K. & Nylund, N. 2005. Liikenteen biopolttoaineiden tuotanto- ja käyttömahdollisuudet Suomessa. Taustaselvitys. VTT, Espoo. VTT Tiedotteita 2288.

Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. VTT Tiedotteita.

Yhteinen ympäristömme 2005. Porvoon tuotantolaitosten ympäristöraportti. Neste Oil. 2005a.

Ympäristömme. Naantalin erikoistuotejalostamon yhteiskuntaraportti. Neste Oil. 2005b.

Neste Oil rakentaa NExBTL-dieseltehtaan Rotterdamiin. Toim. Kammonen, O. Pörssitiedote 13.6.2008. Neste Oil Oyj. Viitattu 12.12.2011.
<http://www.nesteoil.fi/default.asp?path=35;52;88;100;592;9661;10464>

Neste Oil käynnisti Euroopan suurimman uusiutuvan dieselin laitoksen Rotterdammassa. Toim. Maula, H. Pörssitiedote 20.9.2011. Neste Oil Oyj. Viitattu 20.1.2012.
<http://www.nesteoil.fi/default.asp?path=35;52;88;100;592;16765;18121>

Nicholson R.J., Webb J. & Moore A. 2002. A review of the environmental effects of different livestock manure storage systems, and a suggested procedure for assigning environmental ratings. *Biosystems Engineering* 2002 (81) 363-377.

Pagliari, M. & Rossi, M. 2008. The future of glycerol: new uses of versatile raw material. Cambridge: Royal Society of Chemistry.

Petersen S. 1999. Nitrous oxide emissions from manure and inorganic fertilisers applied to spring barley. *Journal of Environmental Quality* 1999, 28: 1610-1618.

Quirin, M., Gärtner, S.O., Pehnt, M. & Reinhardt, G.A. 2004. CO2 mitigation through biofuels in the transport sector. Status and perspectives. Main report. IFEU. Heidelberg.

Rintala, J., Lampinen, A., Luostarinen, S. & Lehtomäki, A. 2002. Biokaasusta uusiutuvaa energiaa maataloilla. Jyväskylän yliopisto. Bio- ja ympäristötieteiden laitos.

Seppälä, R., Buck, A. & Katila, P. 2009. Adaptation of Forests and People to Climate Change - A Global Assessment Report. IUFRO World Series Volume 22. Helsinki.

Siitonen, J. & S. Stade (2006). Nesteen biodieselprosessi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kemiantekniikan osasto. Teknillisen kemian laboratorio.

Sheehan, J., Aden, A., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Walsh, M. & Nelson, R. 2004. Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol. *Journal of Industrial Ecology* 7(3-4): 117-146.

Soimakallio S., Antikainen R., Thun R. 2009. Assessing the sustainability of biofuels from evolving technologies –Finnish approach. VTT:n Tiedotteita – Research notes 2482. VTT.

Sommer, S.G., Møller, H.B. & Petersen, S.O. 2001. The reduction of greenhouse gases from manure and organic waste using digestion and biogas production. DJF-rapport nr 31, Husdyrbrug, Danish Institute of Agricultural Sciences. Tjele, Denmark.

Sonesson, U. 1996. The ORWARE simulation model – compost and transport submodels. Report 215, Dept. of Agricultural Engineering, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.

Tan, R.R., Culaba, A.B. & Purvis, M.R.I. 2004. Carbon balance implications of coconut biodiesel utilization in the Philippine automotive transport sector. *Biomass and Bioenergy* 26(2004): 579–585.

Totuus biopolttoaineista. n.d. Tietopaketti Neste Oil Oy:n sivustolla. Viitattu 13.1.2012. www.nesteoil.fi, vastuullisuus, totuus biopolttoaineista.

Tuomisto, H. 2006. Peltobiokaasu liikenteen biopolttoainevaihtoehtona energia-, kasvihuonekaasu- ja ravinnetaseiden kannalta. Pro gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto, Soveltavan biologian laitos. Agroekologia. Helsinki

Widdel, F. 1988. Microbiology and ecology of sulfate- and sulfur-reducing bacteria. Teoksessa *Biology of Anaerobic Microorganisms*. Toim. Zehnder, A.J.B. John Wiley & Sons, Inc.