

OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

## **Uusiutuvat lentopolttoaineet**

Petri Liste

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Heinäkuu 2016



OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# UUSIUTUVAT LENTOPOLTTOAINEET

Petri Liste

Ohjaaja: Juha Ahola

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Heinäkuu 2016

# TIIVISTELMÄ

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Prosessitekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Liste, Petri		Työn ohjaaja yliopistolla Ahola J, tohtori	
Työn nimi Uusiutuvat lentopolttoaineet			
Opintosuunta Kemiantekniikka	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Heinäkuu 2016	Sivumäärä 29
Tiivistelmä			
<p>Työn tarkoituksena oli tarkastella uusiutuvista resursseista valmistettavien lentopolttoaineiden nykytilannetta ja tulevaisuutta. Lisäksi tarkastelun kohteena olivat tavanomaiset, biopohjaiset liikennepolttoaineet sekä niiden valmistaminen. Myös tavanomaisten liikennepolttoaineiden soveltuvuutta ilmailuun tarkasteltiin ominaisuuksien sekä ympäristövaikutusten näkökulmasta. Tarkastelussa otettiin huomioon monia Aspekteja, kuten raaka-ainevarannot, valmistettavuus ja soveltuvuus käyttöön nykyisellä teknologiolla.</p> <p>Polttoaineiden käyttö on noussut tarkastelun aiheeksi maailmanlaajuisesti fossiilisten luonnonvarojen vähentymisen ja maa- sekä ilmailuliikenteen kasvamisen myötä. Nyky-yhteiskunnassa ilmailu on kasvavissa määrin suosituin liikkumismenetelmä, etenkin mantereiden välillä liikuttaessa. Näin ollen myös lentopolttoaineiden kulutus kasvaa jatkuvasti. Luonnonvarojen riittämättömyys on ajanut yhteiskunnan tilanteeseen, missä on välttämätöntä kehittää uusia polttoaine vaihtoehtoja. Biopohjaiset polttoaineet ovat verrattain uusi, kasvava tieteenala. Uusia ratkaisuja ja ideoita syntyy siis jatkuvasti.</p>			

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Oulussa vuonna 2016 Oulun yliopiston prosessitekniikan osastolle. Haluaisin kiittää kemiantekniikan tohtoria Juha Aholaa mielenkiintoisesta aiheesta, sekä työn ohjaamisesta.

Oulussa, 23.7.2016

Petri Liste

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO .....	7
2 LENTOPOLTTOAINEET .....	8
2.1 Yleistä .....	8
2.2 Lentobensiinit.....	8
2.3 Lentopetrolit.....	9
3 BIOPOHJAISET LIIKENNepOLTTOAINEET.....	11
3.1 Yleisesti.....	11
3.2 Valmistus.....	12
3.2.1 Bioetanoli.....	12
3.2.2 Biodiesel .....	14
3.2.3 Muut Biopolttoaineet.....	16
3.3 Ilmailu .....	18
4 UUSIUTUVAT LENTOPOLTTOAINEET .....	19
4.1 Yleistä .....	19
4.2 Valmistus.....	19
4.2.1 Vetykäsittelyt uusiutuvat lentopolttoaineet .....	20
4.2.2 Fischer-Tropsch kerosiini .....	20
4.3 Tulevaisuus .....	21
5 YHTEENVETO .....	24
6 LÄHTEET.....	25

LIITTEET:

Liite 1. Biobutanolin valmistus

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

CSTR	Jatkuvatoiminen reaktori (Continuous Stirred Tank Reactor)
EMP	Embden-Meyerhof-Parnas
FT	Fischer-Tropsch
HVO	Vetykäsitelty kasviöljy (Hydrotreated vegetableoil)
LHV	Matalin lämpöarvo (Lowest Heat Value)
M	Moolimassa
MON	Moottorioktaani-luku (Motor Octane Number)
$\rho$	tiheys

# 1 JOHDANTO

Lähes kaikki polttoaineet valmistetaan tällä hetkellä fossiilista resursseista. Tämä aiheuttaa varojen nopeaa vähenemistä ja lisäksi fossiilisten polttoaineiden polttaminen aiheuttaa suuria määriä ympäristöpäästöjä. Ilmailuliikenne on lisääntynyt kasvavaa vauhtia viime vuosina. Tämä on aiheuttanut vaihtoehtoisten lentopolttoaineiden tutkimisen ja kehittämisen kasvua. Tässä työssä tarkastellaan tämän hetkisten biopohjaisten liikennepolttoaineiden soveltuvuutta ilmailuun, sekä muita vaihtoehtoisia lentopolttoaineita.

Lentopolttoaineteollisuuden uudistaminen on todella tärkeässä osassa fossiilisten luonnonvarojen nopean vähenemisen hidastamisessa. Uusiutuvista varoista valmistetut polttoaineet takaavat kestävä pohjan polttoaineteollisuudelle, koska raaka-ainetta on jatkuvasti saatavilla. Lisäksi niiden polttaminen vähentää ympäristökuormaa. Työn tarkoituksena on selvittää, voidaanko tämän hetkisiä biopolttoaineita hyödyntää ilmailussa joko sellaisenaan tai seoksena. Lisäksi työssä tarkastellaan muita uusiutuvista resursseista valmistettavia lentopolttoaineita sekä niiden tulevaisuutta mahdollisina tavanomaisten lentopolttoaineiden korvaajina. Lopuksi työssä pohditaan lentopolttoaineiden tulevaisuutta ja mahdollisia parannuksia nykyisiin valmistusmenetelmiin sekä mahdollisia uusia innovaatioita.

## 2 LENTOPOLTTOAINEET

### 2.1 Yleistä

Ilmailu- ja maaliikennepolttoaineet kuluttavat noin puolet maailman maaöljytuotannosta ja ovat osallisena noin 60 %:ssa kaikista kasvihuonepäästöistä. Ilmailun on ennustettu kasvavan nopeasti lähitulevaisuudessa ja ilmailussa käytettävä polttoaine on pääosin valmistettu maaöljystä. (Kannaiyan ja Sadr 2014) Viime aikoina ilmailuteollisuus on saanut runsaasti julkista huomiota. Tarkkailun kohteena ovat erityisesti varsin runsaat päästöt ilmastoon, sekä niiden vaikutus ilmaston muutokseen. (Rye ym. 2009)

Ilmailussa olosuhteet vaihtelevat todella rajusti lyhyessä ajassa. Tästä syystä lentopolttoaineilta vaaditaan ominaisuuksia, mitä muilta liikennepolttoaineilta ei vaadita. Tärkeimmät ja ilmeisimmät suurten korkeusvaihteluiden aiheuttamat vaatimukset kohdistuvat energiatiheyteen ja virtausominaisuuksiin. Myös lämpö stabiilisuus on tärkeässä osassa tarkasteltaessa lentopolttoaineita. (Rye ym. 2009) Muita muuttujia ovat muun muassa lämpölaajenemisen lämpökerroin, pintajännitys, ominaislämpö, lämmönjohtokyky, höyrystymisen entalpia, eristevakio, sähkönjohtokyky, pienin mahdollinen syttymisenergia, spontaani syttyminen, turpoamiskerroin sekä kaasuihin ja veteen liukenevuus. (Wilson ym. 2013) Lentopolttoaineet voidaan jakaa lentobensiineihin ja lentopetroleihin. Taulukossa 1 on vertailtu lentopolttoaineiden ja tavallisten liikennepolttoaineiden ominaisuuksia.

### 2.2 Lentobensiinit

Lentobensiinejä käytetään polttoaineena ilmailussa, pienkoneiden bensiinimoottoreissa. Lentobensiiniä käyttäviä moottorityyppejä ovat mäntä- ja wankelmoottori. Lentobensiini poikkeaa muista bensiinilaaduista oktaani- ja stabiilisuusvaatimustensa vuoksi. Keskiluokkaisten bensiinien MON vaihtelee tavallisesti 86 ja 88 välillä, kun taas lentobensiineiltä vaaditaan MON, joka on 98 ja 100 välillä. (Gaughan 1995) Ilmailussa käytettäviä lentobensiinilaatuja on kolme: Avgas 80 (lyijytön), Avgas 100LL (vähälyijyinen) ja Avgas 100 (lyijypitoinen). (Balicki ym. 2010)



Vähemmän oktaanivaatimuksia omaava tavallinen moottoribensiini on useiden komponenttien seos. Näitä komponentteja ovat muun muassa butaani, neitseellinen- ja uusioöljyjae, keskiraskas ja raskas nafta, isomeraatit, vetykrakit, alkylaetit, eetterit sekä alkoholit. Lentobensiinin koostumus on suurempien oktaani- ja stabiilisuusvaatimustensa vuoksi erilainen, kuin tavallisilla bensiineillä. Lentobensiini on isopentaanin, alkylaatin, toluenin ja tetraetyylilyijyn seos. (Gaughan 1995)

Oktaaniluvun nostamiseen käytetään erilaisia lisäaineita. Tavallisissa bensiinilaaduissa käytetään oktaaniluvun nostamiseen muun muassa bentseeniä, toluenia, ksyleeniä ja etanolia. Lentobensiinin MON-luku ilman lisäaineita on noin 90-93. Edellä mainituilla lisäaineilla MON saadaan nostettua vain 92-95 tasolle. Näin ollen muissa bensiinilaaduissa käytettävät lisäaineet eivät ole tarpeeksi tehokkaita nostamaan MON-lukua lentobensiinin vaatimalle tasolle. (Gaughan 1995) Lentobensiineissä käytetäänkin yleisesti tetraetyylilyijyä lisäaineena, vaikka se onkin myrkyllistä. (Balicki ym. 2010)

### **2.3 Lentopetrolit**

Lentopetrolia käyttävät suurempien ilma-alusten turbiini- ja suihkumoottorit. Lentopetroli on bensiiniä raskaampaa ja sen kemiallinen koostumus ja ominaisuudet poikkeavat bensiinistä. Se koostuu pääosin hiilivety-yhdisteistä ja sisältää lisäksi lukuisia eri kemikaaliyhdisteitä. Lisäksi lentopetrolit sisältävät pieniä määriä trimeeri happoa, joka vähentää polttoaineen kuluttavuutta ja parantaa erottuvuutta vedestä. Nämä ominaisuudet helpottavat polttoaineen varastointia ja parantavat polttoaineelle tärkeitä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi lämpö-stabiilisuutta. (Eckert 1971) Lämpö-stabiilisuuden lisäksi lentopetroleilta vaadittuja ominaisuuksia ovat muun muassa lämpöarvo, savuamispiste, valaisevuuskerroin, aromaattisten yhdisteiden osuus, räjähdysherkkyys, viskositeetti ja jäätymispiste. (Narayanasmamy ym. 2015)

Lentopetrolilaatuja on lukuisia erilaisia, mutta yleisesti käytössä on vain muutama laatu. Eniten käytetyt laadut ovat Jet A, Jet A-1, JP-8 ja Jet-B. Jet A on maailmanlaajuisesti eniten käytetty laatu matkustajakoneissa. Jet A-1 on ominaisuuksiltaan hyvin pitkälti Jet A:ta vastaava petrolilaatu. Suurin eroavaisuus näiden laatuojen välillä on jäätymispisteessä. Jet A:n jäätymispiste on  $-40^{\circ}\text{C}$ , kun taas Jet A-1:llä se on  $-47^{\circ}\text{C}$ . JP-8 on lähinnä sotilaskäyttöön tarkoitettu petrolilaatu. Se on koostumukseltaan kuin Jet A-1, mutta siihen on lisätty aineita varastointia varten, tyydyttämään tarpeita sotilaskäyttöön.

On kuitenkin tutkittu, että lisäaineilla ei ole merkitystä polttoaineen reaktiivisuuteen, eikä Jet A:n ja JP-8:n syttymisviiveessä ole juurikaan eroa missään olosuhteissa. (Narayanasmvamy ym. 2015) Neljäs mainittu yleisessä käytössä oleva lentopetrolilaatu, Jet-B, on tarkoitettu käytettäväksi erittäin kylmissä olosuhteissa. Se sisältää jakeita naftasta ja kerosiinista täyttämään vaatimukset äärimmäisissä olosuhteissa käytettäväksi. Tärkein näistä vaatimuksista on jäätymispiste, joka on Jet-B laadulla -50°C. (Choo ym. 2009) Taulukossa 1 on vertailtu lentopolttoaineiden ja tavallisten liikennepolttoaineiden ominaisuuksia.

Taulukko 1. Lentopolttoaineiden ja liikenne polttoaineiden ominaisuuksia (Mukaiillen Narayanasmvamy ym. 2015)

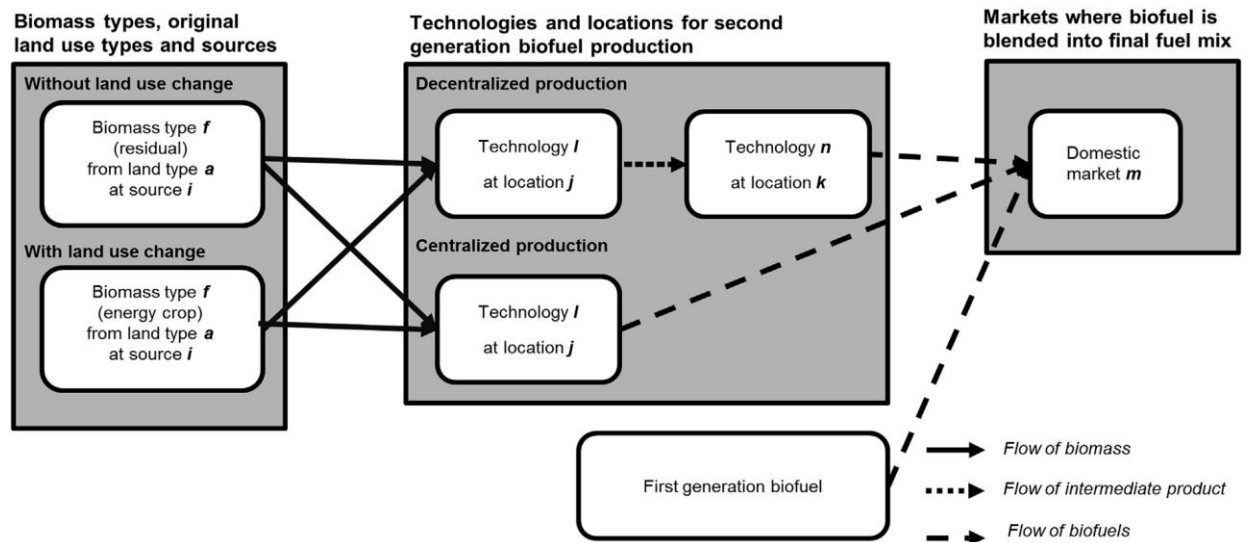
<i>Muuttuja</i>	<i>Lentobensiini</i>	<i>Lentopetroli</i>	<i>Diesel</i>	<i>FT polttoaine</i>
<i>MJ/kg</i>	43,4	43,2	42,7	44,2
<i>Hiilten lkm</i>	4-12	8-16	9-23	-
<i>Yleisin hiilivetyrakenne</i>	$C_{6,9}H_{13,5}$	$C_{11}H_{21}$	$C_{16}H_{28}$	-
$\rho$ (kg/l)	0,735	0,775-0,840	0,850	0,736
<i>M (g/mol)</i>	96,3	153	220	163
<i>Setaaniluku</i>	-	42	40-55	61

## 3 BIPOHJAISET LIIKENNEPOLTTOAINEET

### 3.1 Yleisesti

Lähes kaikki uusiutuvat energianlähteet tähtäävät sähkömarkkinoille, vaikka polttoaineilla on huomattavasti suuremmat markkinat. Maailman energiamarkkinat voidaan jakaa kahteen sektoriin, sähkö- ja polttoaine sektoreihin. Nykyisistä energiamarkkinoista 33% kuuluu sähkösektoriin ja 67% polttoainesektoriin. (Schenk ym. 2008) Ympäristövaikutukset ja fossiilisten polttoainevarojen rajallisuus ovat kannustaneet biopolttoaineiden tutkimiseen ja kehitykseen. Ollakseen kilpailukykyinen vaihtoehto fossiilisille polttoaineille, täytyy biopolttoaineiden tarjota nettoenergian kasvua, vähentää ympäristöhaittoja, olla taloudellisesti vertailukelpoinen sekä olla tuotettavissa massatuotantona vaikuttamatta elintarviketeollisuuteen. (Hill ym. 2006)

Tällä hetkellä on olemassa kahden tyyppisiä biopolttoaineita, ensimmäisen- ja toisen sukupolven. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden valmistukseen käytetään maatalouden viljakasveja, kuten esimerkiksi maissia ja sokeriruokoa. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineita voidaan siis hyödyntää elintarviketeollisuudessa. Tämä ruuan ja teollisuuden vastakkainasettelu voi johtaa yhteiskunnallisiin konflikteihin, kuten elintarvikkeiden hinnan nousuun ja turvattomuuteen. Lisäksi ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden tuottaminen voi aiheuttaa muutoksia maankäytössä, mikä voi aiheuttaa metsien vähentymistä. Toisen sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineena käytetään metsä- ja maatalousteollisuuden jätettä sekä lyhyen kierron metsäsatoa ja monivuotisia ruohokasveja. Toisen sukupolven biopolttoaineet tuottavat vähemmän kasvihuone päästöjä, kuin ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet ja koska raaka-aineena käytetään ylijäämä biomassaa, ei maankäytön kanssa tule ongelmia. (Hombach ym. 2016) Kuvassa 1 on esitetty toisen sukupolven biopolttoaineen hyödyntämisketju.



Kuva 1. Toisen sukupolven biopolttoaineiden hyödyntämisketju. (Hombach ym. 2016)

Tunnetuimmat tällä hetkellä käytössä olevat biopolttoaineet ovat bioetanoli ja biodiesel. Näiden lisäksi valmistetaan myös muun muassa biometaania ja -butanolia, synteetikaasua sekä Fischer-Tropsch-polttoaineita. Vaikka biopolttoaineilla on runsaasti todistettuja positiivisia vaikutuksia ympäristöön fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna, niiden valmistusprosessit ovat liian kehittymättömiä. Biopolttoaineilla on valtavasti potentiaalia raaka-aineen saatavuuden ja monimuotoisuuden ansiosta. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden valmistusprosesseissa tätä potentiaalia ei kuitenkaan täysin voitu hyödyntää, koska valmistuksessa on tiettyjä taloudellisia ja ympäristöllisiä rajoitteita. Toisen sukupolven biopolttoaineilla on kuitenkin edellytykset päästä näiden rajoitteiden yli. (Schenk ym. 2008)

## 3.2 Valmistus

Tällä hetkellä on olemassa lukuisia biopohjaisia polttoaineita. Polttoaineen laatu ja ominaisuudet määräytyvät käyttötarkoituksen mukaan. Koska käyttötarkoitus asettaa kullekin laadulle erilaiset vaatimukset, on myös eri laatujen valmistusprosesseissa eroja.

### 3.2.1 Bioetanoli

Bioetanoli on nestemäinen polttoaine, jonka valmistuksessa voidaan käyttää useita eri biomassaa raaka-aineita ja muutosprosesseja. Biomassan käyttö raaka-aineena vähentää sekä öljyn kulutusta, että ympäristöpäästöjä. Bioetanolilla on korkeampi oktaanipitoisuus, selkeämmät leimahtamisrajat, nopeampi syttymisnopeus ja korkeampi höyrystymislämpö, kuin bensiinillä. Bioetanolin valmistuksen suurin haaste tällä

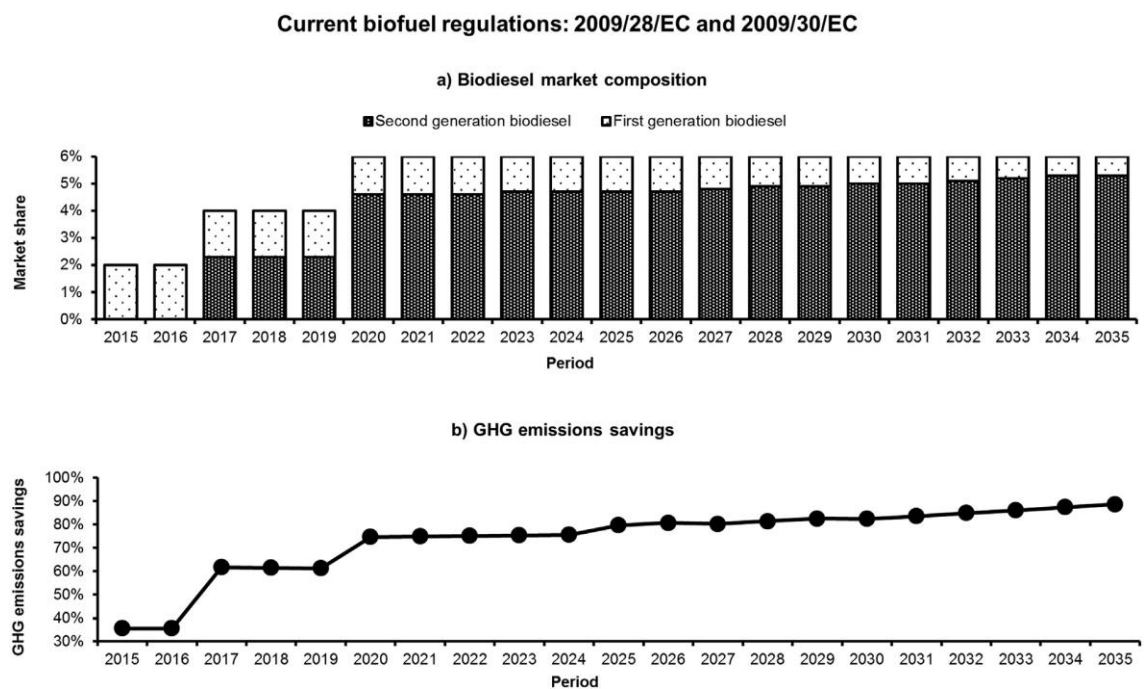
hetkellä on raaka-aineiden saannissa. Yleisesti käytössä olevien raaka-aineiden saanti voi vaihdella kausittain ja maanosittain. Lignoselluloosapitoinen biomassa on potentiaalisin raaka-aine bioetanolin valmistukseen, mutta tämä menetelmä on vielä kehitysvaiheessa. (Balat ym. 2007)

Bioetanolia valmistetaan käymisprosessilla sokereista. Raaka-aineina käytetään yleisesti sokeri- ja tärkkelyspitoisia kasveja, kuten rypäleitä, hedelmiä, viljaa ja perunaa. Lignoselluloosan käyttäminen raaka-aineena on kuitenkin yleistymässä. Lignoselluloosasan muuttaminen sokereiksi on paljon haasteellisempaa, kuin esimerkiksi yleisesti bioetanolin raaka-aineena käytettävän tärkkelyksen. Lignoselluloosa vaatii aluksi esikäsittelyn, joka suoritetaan normaalisti hapolla tai emäksellä. Muita vaihtoehtoja ovat muun muassa biologinen esikäsittely ja AFEX-käsittely. Esikäsittelyllä biomassan rakennetta muutetaan, jotta biomassan sisältämät hiilihydraatti polymeerit ovat helpommin muunnettavissa yksinkertaisiksi sokereiksi käymisprosessia varten. Esikäsittelyn jälkeen biomassa jatkaa hydrolyysiprosessiin. Hydrolyysivaiheessa biomassasta erotetaan ligniini ja selluloosan sekä hemiselluloosan sisältämät polymeerit pilkotaan monosakkarideiksi. Eniten käytetty menetelmä on kaksivaiheinen happohydrolyysi, missä voidaan käyttää joko väkevää- tai laimeaa happoa. Kaksi vaihetta tarvitaan, koska hemiselluloosan maksimisaanto on alemmassa lämpötilassa kuin selluloosan. Hydrolyysin jälkeen on käymisvaihe, missä sokereista valmistetaan mikro-organismien avulla. Koska hydrolyysin tuotteena syntyy muitakin monosakkarideja kuin glukoosia, käymisprosessissa täytyy käyttää useita mikro-organismeja saannon maksimoinniksi. Käymisprosessin jälkeen etanoli irrotetaan muista ainesosista kaksiosaisella prosessilla. Ensiksi käymisprosessin liuos tislataan jonka jälkeen 37% etanoli väkevöidään rikastuskolonnissa. (Balat ym. 2007)

Bioetanolia voidaan valmistaa myös termokemiallisilla menetelmillä. Tällä hetkellä on olemassa kaksi menetelmää, jotka käyttävät termokemia. Molemmissa menetelmissä biomassa kaasutetaan synteetikaasuksi, jonka jälkeen kaasut muutetaan bioetanoliksi. Ensimmäisessä menetelmässä biokaasu syötetään kuplina käymisastiaan, missä mikro-organismit muuttavat synteetikaasun etanoliksi. Toinen menetelmä ei käytä lainkaan mikro-organismeja, vaan synteetikaasu syötetään katalyyttejä sisältävään reaktoriin, missä kaasut muuttuvat etanoliksi. Nämä menetelmät eivät kuitenkaan ole toistaiseksi osoittautuneet kustannustehokkaiksi vaihtoehdoiksi. (Balat ym. 2007)

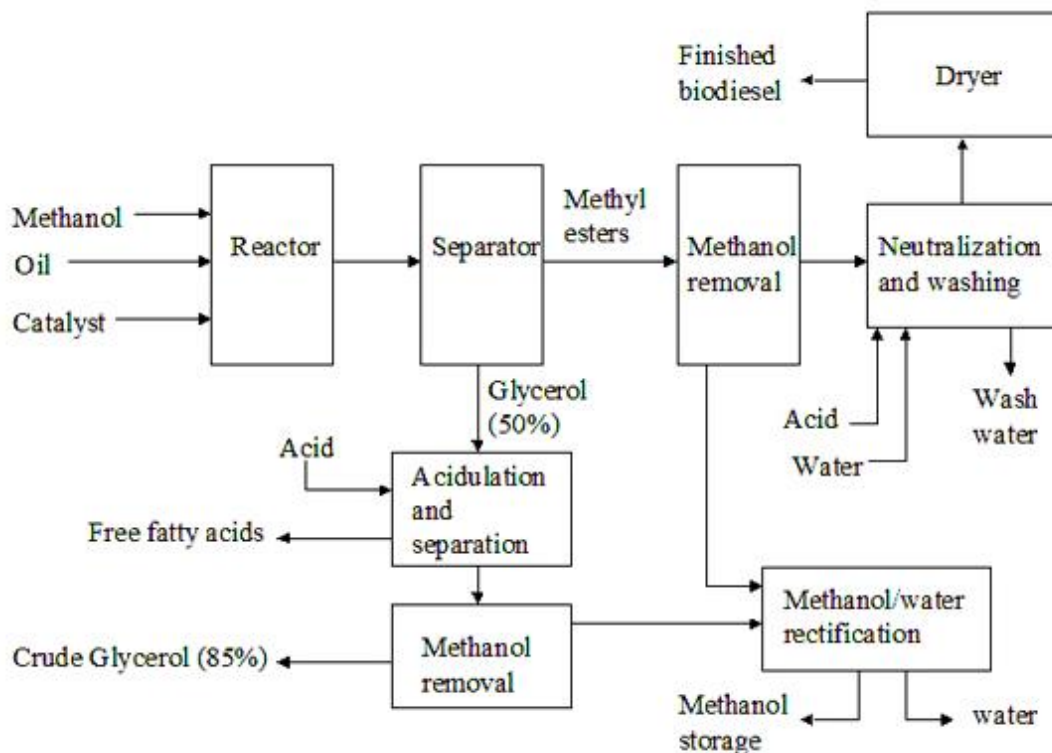
### 3.2.2 Biodiesel

Biodiesel on vaihtoehtoinen polttoaine dieselmoottoreille. Sitä valmistetaan kemiallisesti kasviöljyn tai eläinrasvojen ja alkoholin avulla. Tämän hetkiselällä tuotannon tasolla biodiesel tarvitsee avustusta voidakseen kilpailla öljypohjaisen dieselin kanssa. Taloudellisten haasteiden lisäksi myös kysyntä on liian suurta tarpeiden tyydyttämiseen. Jos kaikki Yhdysvaltojen kasviöljyt ja eläinrasvat käytettäisiin biodieselin valmistukseen, täyttäisi se vain 14 % tarpeista. Vaikka öljypohjaista dieseliä ei vielä voidakaan täysin korvata, on biodieselillä lukuisia syitä, miksi biodieselin valmistuksen kehittämistä kannattaa jatkaa. Näitä syitä ovat muun muassa kasviöljyjen ja eläinrasvojen markkinoiden kasvu, eri maiden tuonti öljystä riippuvuuden vähentäminen, ympäristön hiilidioksidipäästöjen vähentäminen sekä hiilimonoksidi- ja pienhiukkaspäästöjen vähentäminen. Biodiesel koostuu monoalkyyliesteereistä, jotka valmistetaan transesteröinti prosessilla katalyytin avulla. Biodieselin valmistusprosessia on kehitetty, jotta raaka-aineena voitaisiin käyttää korkea rasvahappopitoisesta jätettä, kuten käytettyä ravintolarasvaa. (Gerpen 2005) Kuvassa 2 on kuvattu ennuste biodieselin raaka-aineen käytön kehityksestä ja sen vaikutuksesta kasvihuonepäästöihin.



Kuva 2. Biodieselin raaka-aineen käytön kehitys ja sen vaikutus ympäristöön.

Tavanomaisessa biodieselin valmistusprosessissa raaka-aineena käytettävä öljy, alkoholi ja katalyytti syötetään reaktoriin, missä ne ovat noin yhden tunnin 60°C lämpötilassa. Pienissä tuotantolaitoksissa käytetään panostoimista reaktoria, mutta suuremman mittaluokan tehtaissa käytössä ovat jatkuvatoimiset CSTR reaktorit. Tässä systeemissä reaktio voidaan suorittaa kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä CSTR vaiheessa noin 80% alkoholista ja katalyytistä syötetään öljyn sekaan, jonka jälkeen liuksesta poistetaan glyseroli ennen toista vaihetta. Toisessa vaiheessa lisätään puuttuvat 20% alkoholista ja katalyytistä. Tällä kaksivaiheisella reaktiolla saavutetaan parempi saanto pienemmällä määrällä alkoholia. Reaktorien jälkeen on glyserolin erotusprosessi. Glyserolin erottaminen liuksesta on yleensä helppo ja nopea prosessi. Erotusprosessissa poistuva glyseroli on noin 50% vahvuista. Seos sisältää lisäksi metanolia, katalyyttiä ja saippuaa. Seokseen lisätään happoa, jolla saadaan saippuat pilkottua vapaiksi rasvahapoiksi ja suoloiksi. Vapaat rasvahapot eivät liukene glyseroliin ja ne nousevat kevyempänä seoksen pinnalle, mistä ne voidaan ottaa talteen ja myydä eteenpäin. Jäljellä olevasta liuksesta poistetaan metanoli haihdutusprosessilla. Glyseroli on tämän vaiheen jälkeen noin 85% vahvuista ja se voidaan myydä glyserolin jalostukseen. Glyserolin erotusprosessin jälkeen metyyliesteriliuos neutraloidaan ja syötetään metanolin erotusprosessiin. Kun seoksesta on poistettu metanoli, lisätään siihen happoa, jotta jäljellä olevat katalyytit ja saippuat saadaan poistettua. Happo ja katalyytit sekä saippuat muodostavat reagoidessaan vesiliukoisia yhdisteitä. Seos syötetään pesuvaiheeseen, missä vesi poistaa kaikki jäljellä olevat katalyytit, saippuat ja suolat sekä glyserolin ja metanolin. Pesuvaiheen jälkeen biodiesel kuivataan, jonka jälkeen se on valmis myyntiin. (Gerpen 2005) Biodieselin valmistus on kuvattu yksinkertaistetulla kaaviolla kuvassa 3.



Kuva 3. Biodieselin valmistus (Gerpen 2005)

### 3.2.3 Muut Biopolttoaineet

Bioetanolin ja biodieselin lisäksi on olemassa myös muita uusiutuvista varoista valmistettavia polttoaineita. Näiden polttoaineiden valmistus on kuitenkin toistaiseksi verrattain vähäistä verrattuna bioetanolin ja -dieselin valmistukseen. Näihin polttoaineisiin kuuluvat muun muassa Fischer-Tropsch- polttoaineet, biobutanoli, biometaani ja synteetikaasut. (Hari ym. 2014)

Biopohjaisia polttoaineita ja kemikaaleja voidaan valmistaa korkealaatuisesta synteetikaasusta, joka sisältää pääsääntöisesti vetyä ja hiilimonoksidia. Yleisin tapa biopohjaisen synteetikaasun valmistuksessa on kaasuttaa biomassaa sekä biojätettä. Energiatohokkainta ja kannattavinta synteetikaasun valmistaminen on silloin, kun synteetikaasun valmistusprosessi on integroitu esimerkiksi maatalous- ja metsäteollisuuslaitokseen tai kemikaalitehtaaseen.

Kaasutus on vanha, termokemiallinen konversioprosessi, missä biomassan kemiallista rakennetta muutetaan korkeassa lämpötilassa ilman, hapen, hiilidioksidin tai näiden yhdistelmän avulla. Kaasuttimen lämpötila vaihtelee kaasutintyyppin mukaan välillä 500-900°C. Kaasutintyyppit voidaan jakaa apuaineen, lämpötilan, paineen, virtausdynamiikan



tai lämmönsyötön mukaan. (Göransson ym. 2010) Taulukossa 2 on esitetty synteetikaasun koostumus ainesosittain.

Taulukko 2. Synteetikaasun koostumus (Mukaiillen Göransson ym. 2010)

AINESOSA	PITOISUUS
H <sub>2</sub>	40
CO	25
CO <sub>2</sub>	21
CH <sub>4</sub>	10
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2,5
N <sub>2</sub>	1,5
H <sub>2</sub> /CO	1,6

Fischer Tropsch- polttoaineiden valmistuksessa synteetikaasu muutetaan hiilivedyksi ja vedeksi katalyyttien avulla reaktorissa. Katalyyttinä käytetään yleensä kahdeksannen pääryhmän metalleja, kuten rauta, koboltti, rutenium ja nikkeli. Valmistusreaktio on voimakkaasti eksoterminen, joten lämmön talteenotto on tärkeimmistä asioista prosessin tuottavuuden kannalta. Reaktorin olosuhteet vaihtelevat reaktorityypistä riippuen. Tavanomaisessa reaktorissa lämpötila on tavallisesti 330-400°C ja paine 1-100bar. Lietereaktorissa maltillisemmat olosuhteet riittävät. Lietereaktorissa lämpötila on tavallisesti 180-280°C ja paine 5-50bar. (Clarkson ym. 2012)

Biobutanolin valmistusprosessin alku on samanlainen kuin bioetanolin valmistuksessa. Biomassa esikäsitellään, jonka jälkeen polymeeri hiilihydraatit pilkotaan monosakkarideiksi hydrolyysiprosessissa. Hydrolyysissä syntynyt glukoosi otetaan talteen PTS-tekniikalla ja muutetaan pyruvaatiksi EMP metaboliapolkua pitkin. Tämän jälkeen pyruvaatti käsitellään monivaiheisessa prosessissa ja tuotteeksi saadaan etanolia, butanolia, asetaattia, asetonia ja butyraattia. Tästä seoksesta butanoli otetaan talteen. Biobutanolin valmistamiseen liittyy muutamia ongelmakohtia. Valmistettu butanoli on myrkyllistä valmistusprosessissa käytettäville mikrobeille. Lisäksi valmistusprosessin sivutuotteita syntyy verrattain paljon ja näin ollen butanolin saanto jää varsin pieneksi. (Ezeji ym. 2007) Biobutanolin valmistus on kuvattu liitteessä 1.

### 3.3 Ilmailu

Ilmailussa käytettäviä, vaihtoehtoisia polttoaineita voidaan valmistaa elintarviketeollisuuteen kelpaamattomista ruokakasveista, bio- ja yhdyskuntajätteestä ja levästä. Perinteisille lentopolttoaineille kehitetään jatkuvasti korvaavia, biopohjaisia polttoaineita. Tällä hetkellä maaliikenne käytössä olevista biopohjaisista polttoaineista ainoastaan Fischer Tropsch polttoaineet käyvät ilmailuun sellaisenaan. Heikomman energiatiheytensä vuoksi niitä voidaan kuitenkin tällä hetkellä käyttää ainoastaan osana seosta. Nestemäisen vedyn tai metaanin käyttö tuottaisi enemmän energiaa tavanomaisiin ilmailussa käytettäviin polttoaineisiin verrattuna. Nestemäisen vedyn varastointi on kuitenkin ongelmallista. Nestemäinen metaani taas tuottaa palaessaan metaania, mikä on kasvihuonekaasu. Bioalkoholit eivät myöskään sovellu ilmailukäyttöön. Niillä on korkea haihtuvuus, matala leimahtamispiste ja huono energiatiheys. Nestekaasujen ja bioalkoholien käyttö vaatisi lisäksi moottorien uudelleensuunnittelua, koska niitä ei voida käyttää tavanomaisilla ilma-alusten moottoreilla. Biodiesel ei sen sijaan vaatisi moottorien modifiointia, mutta sen energiatiheys on liian pieni lentopetrolin korvaamiseen. Lisäksi biodieselin biohajoavuus aiheuttaa biologista kasvua varastoinnin aikana. Tämä heikentää biodieselin stabiilisuutta. (Hari ym. 2014)

## 4 UUSIUTUVAT LENTOPOLTTOAINEET

### 4.1 Yleistä

Lentoliikenne on keskeisessä roolissa tämän hetkisen modernin maailman jokapäiväisessä elämässä. Lentoliikenne lisääntyy koko ajan, eteenkin maailmanlaajuisten sosiaalisten yhteyksien ja kehittyvän markkina- ja taloustoiminnan seurauksena. Ilmailussa käytetään pääsääntöisesti fossiilisia polttoaineita. Fossiilisten polttoaineiden varannot ovat kuitenkin rajalliset ja loppuvat aikanaan. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden hinnat muuttuvat päivä päivältä epävakammiksi. Näin ollen, on ensisijaisen tärkeää tutkia, kehittää ja teollistaa vaihtoehtoisia, uusiutuvista raaka-aineista valmistettuja polttoaineita ilmailuun. Tällä hetkellä kehityksen pääpaino on biopohjaisissa lentopetroleissa, koska lentopetrolien kulutus on huomattavasti suurempaa kuin muiden käytössä olevien lentopolttoaineiden. (Hari ym. 2014) Taulukossa 3 on kuvattu lentopetrolin, lentobensiinin ja biopohjaisen polttoaineen ilmanpäästökertoimet.

Taulukko 3. Eri polttoainelaatujen päästökertoimet. (Mukaiillen Balicki ym. 2010)

<b>Polttoainelaatulaatu</b>	<b>Päästökerroin [kgCO<sub>2</sub>/kg]</b>
Lentobensiini	3.10
Lentopetroli	3,15
Biopolttoaine	0

### 4.2 Valmistus

Tavanomaisille ilmailupolttoaineille ei ole olemassa korvaajaa, mikä valmistettaisiin täysin biopohjaisesti. Tutkimustyötä tehdään jatkuvasti, jotta fossiilisten polttoaineiden käyttöä saataisi vähennettyä ilmailussa. Tällä hetkellä on olemassa kaksi sertifioitua, biopohjaista polttoainetta, joita käytetään osana tavanomaisia lentopetroleita. Nämä ovat HVO ja Fischer-Tropsch kerosiini. (Sandquist ja Güell 2012)

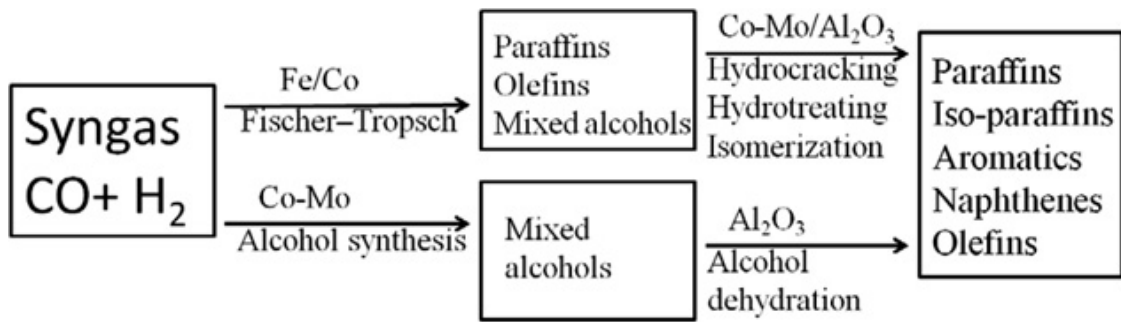
#### 4.2.1 Vetykäsiteltyt uusiutuvat lentopolttoaineet

Vetykäsiteltyä kasviöljyä, eli HVO:ta voidaan käyttää osana tavanomaista lentopetrolia. HVO:n osuus saa kuitenkin olla korkeintaan 50% seoksesta. HVO koostuu lähes täysin hiilivedyistä ja on ominaisuuksiltaan todella lähellä yleisesti käytössä olevia lentopetroleja. (Sandquist ja Güell 2012) Vaikka ASTM:n (The American Society for Testing and Materials) vuonna 2011 tekemän määräyksen mukaan HVO:n maksimipitoisuus lentopolttoaineessa on 50%, voidaan sitä käyttää jopa suoraan puhtaana polttoaineena. Lisäksi HVO soveltuu tämän hetkisiin ilma-alusten moottoreihin ilman moottorien muokkausta. Hyvien virtausominaisuuksiensa ansiosta HVO soveltuu myös suuriin korkeuksiin. (Hari ym. 2014)

HVO valmistetaan samantyyllisellä kemiallisella prosessilla kuin tavanomaiset lentopolttoaineet. Aluksi öljyt puhdistetaan ja sen jälkeen pilkotaan lyhytketjuisemmiksi, poistamalla öljyistä happimolekyylit ja käsittelemällä tämän jälkeen vedyllä. Näin olefiinit saadaan muutettua parafiineiksi, joiden hiilivetyketjujen pituudet ovat dieselin vaihteluvälillä. Seuraavassa reaktiossa diesel-parafiineja isomerisoidaan ja pilkotaan parafiineiksi, joiden hiilten lukumäärä on lentopetrolien vaihteluvälillä.

#### 4.2.2 Fischer-Tropsch kerosiini

FT polttoaineiden valmistaminen ilmailuun ei poikkea mitenkään maaliikennekäyttöön tarkoitetun polttoaineen valmistuksesta. Uusiutuvat FT polttoaineet ovat korkealaatuisia polttoaineita, joita voidaan valmistaa useasta eri raaka-aineesta. Ne eivät ole myrkyllisiä ja niiden ympäristöpäästöt ovat todella vähäisiä. FT polttoaineita käytetään ilmailussa sekoitettuna tavanomaisten lentopetrolien kanssa, jotta ominaisuudet saadaan pidettyä vaaditulla tasolla. (Hari ym. 2014) FT polttoaineita olisi kaikkein energiatehokkainta valmistaa pelkästään maatalous-, yhdyskunta- ja biotuoteteollisuuden jätteestä. (Sandquist ja Güell 2012) Synteesikaasun muuttaminen biopohjaiseksi lentopolttoaineeksi on esitetty yksinkertaistettuun kaavioon kuvassa 4.



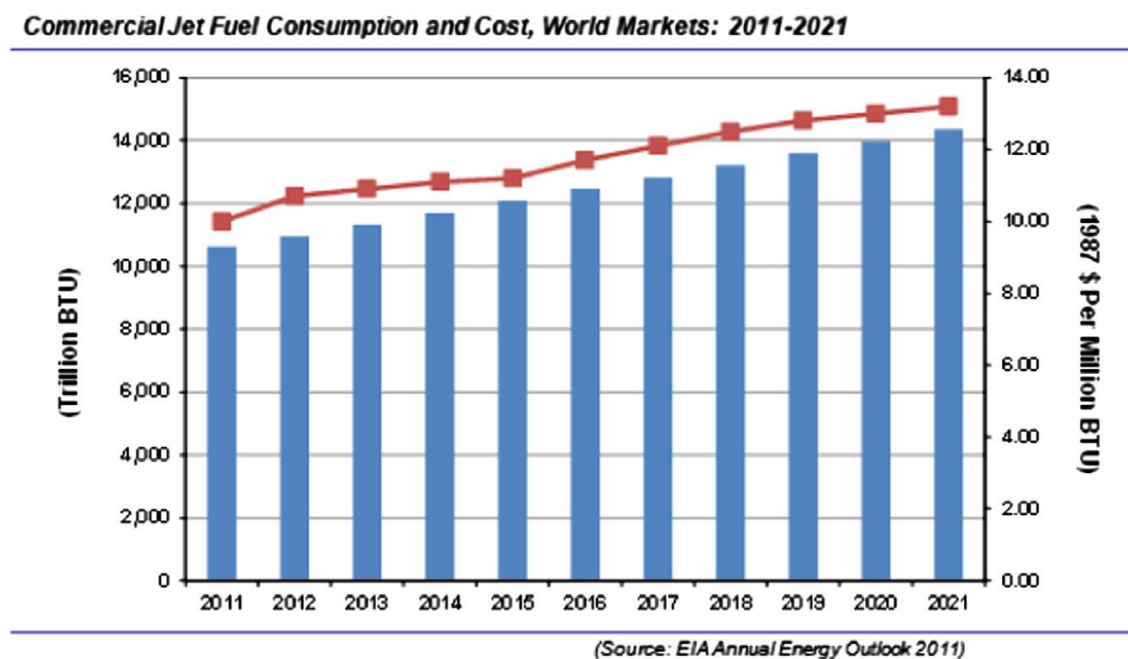
Kuva 4. Synteesikaasun muuttaminen biopohjaiseksi lentopolttoaineeksi. (Yan ym. 2012)

FT polttoaineiden valmistaminen biomassasta tulee todennäköisesti yleistymään fossiilisten polttoainevarojen vähentyessä. Tavallisesti biomassaa kaasutetaan synteesikaasuksi, mistä valmistetaan biopolttoainetta FT prosessilla. (Hari ym. 2014) Kaasutukseen käytetään yleisesti EF- tai nestepeti kaasutinta. EF-kaasutin on energiatehokkaampi vaihtoehto ja sillä saadaan tuotettua myös parempilaatuista synteesikaasua. EF-kaasuttimen ongelmakohta on kuitenkin biomassan syöttö kaasuttimeen. Nestepetikaasuttimessa ei ole suurempia haasteita biomassan syötössä. Se ei kuitenkaan ole yhtä tehokas valmistusmenetelmä ja tuote ei ole yhtä korkealaatuista kuin EF-kaasuttimen tuote. Kaasutusprosessin jälkeen synteesikaasusta täytyy puhdistaa epäpuhtaudet, kuten ei halutut orgaaniset sivutuotteet, epäorgaaniset ainekset ja pöly. Puhdistuksessa käytetään sykloneja, suodattimia ja pesureita. (Sandquist ja Güell 2012) Puhdistuksen jälkeen kaasu muutetaan FT polttoaineeksi katalyyttisellä FT prosessilla, kuten maaliikennekäyttöön valmistettavat FT dieselit. (Hari ym. 2014) Tällä hetkellä FT-polttoaineiden valmistus on melko kallista, mutta raaka-aineen saatavuus ja raaka-aineen halpa hinta tekevät siitä kilpailukykyisen vaihtoehdon ilmailussa käytettäväksi polttoaineeksi. (Sandquist ja Güell 2012)

### 4.3 Tulevaisuus

Ilmailuteollisuus on tehnyt selväksi, että se ainoastaan etsii ja kehittää pysyviä biopohjaisia polttoaineita korvaamaan fossiilisista varoista valmistettuja, tavanomaisia lentopolttoaineita. Näin se pyrkii välttämään tekemästä samoja virheitä, mitä maaliikennekäyttöön valmistetut, ensimmäisen sukupolven liikennepolttoaineiden kanssa tehtiin. (Sandquist ja Güell 2012) Biopohjaisten polttoaineiden valmistaminen ja kaupallistaminen vaikuttaa ympäristöön ja yhteiskuntaan maailmanlaajuisesti. Tällä hetkellä kuitenkin teknologian kehityksen riittämättömyys hidastaa biopohjaisten

lentopolttoaineiden kaupallistumista. Korvaavien lentopolttoaineiden kehityksessä tulee ottaa huomioon kolme ehdotonta seikkaa: ruoka-polttoaine vastakkainasettelu täytyy minimoida, ympäristön kuormituksen täytyy olla mahdollisimman pieni ja teknologian tulee mahdollistaa kestävä vaihtoehdoisen polttoaineen valmistus järkevin kustannuksin. (Hari ym. 2014) Kuvassa 5 on esitetty lentopetrolin kulutuksen ja hinnan muutos.



Kuva 5. Lentopetrolin hinnan ja kulutuksen kehitys. (Hari ym. 2014)

HVO:n valmistuksessa käytetään samankaltaisia raaka-aineita kuin ensimmäisen sukupolven biodieselin valmistuksessa, joten resurssiperäisiin seikkoihin ja niiden ympäristövaikutuksiin on kiinnitettävä huomiota. (Sandquist ja Güell 2012) Öljypitoisista kasveista ja leivistä valmistetaan tällä hetkellä rasvahappo metyyliestereistä liikennepolttoaineiksi. Näitä polttoaineita ei kuitenkaan voida käyttää ilmailussa, koska niiden ominaisuudet poikkeavat ilmailuun käytettävistä polttoaineista. Samoista raaka-aineista voidaan valmistaa eri prosessilla HVO:ta. HVO:n valmistaminen suuremmissa mittakaavassa vaatii paljon maankäyttöä raaka-aine viljelmiin. Tällä hetkellä HVO:n valmistus on todella marginaalista ja sitä käytetään vain pieniä määriä osana lentopolttoaineseoksia. Tämä tarkoittaa, että jos HVO:ta alettaisiin valmistaa suuria määriä, vaatisi se vielä paljon enemmän maankäyttöä. (Sandquist ja Güell 2012)

FT-polttoaineiden käyttö ilmailussa olisi ympäristön kannalta todella suotavaa. Monipuoliset raaka-ainevarannot ja palamisen puhtaus ovat todella positiivisia seikkoja tarkastellessa eri polttoaineiden ympäristövaikutuksia. Ongelmana ovat kuitenkin huono energiatiheys ja puutteet ominaisuuksissa. (Hari ym. 2014) Teknologiaa kehittämällä FT-dieselin osuutta lentopolttoaineseoksessa voitaisiin lisätä. Tämä ainakin hidastaisi fossiilisten polttoainevarantojen ehtymistä.

Biopohjaisten alkoholien ja nestemäisten biokaasujen käyttö ilmailussa vaatisi moottoreiden rakenteen ja teknologian muuttamista. Bioalkoholien käyttäminen on huonon energiatiheyden vuoksi joka tapauksessa haasteellista. Nestemäisten kaasujen, eteenkin nestemäisen vedyn käyttö olisi energiatiheyden ja palamispuhtauden vuoksi varsin varteenotettava vaihtoehto. Lisäksi vetyä voidaan tuottaa lukuisista raaka-aineista. Kehitystyö on kuitenkin pahasti kesken ja tämän hetkisiä ongelmakohtia ovat moottoritekniikan lisäksi nestemäisen kaasun varastointi teknologian riittämätön kehitys. (Hari ym. 2014)

Tällä hetkellä biopohjaisten polttoaineiden käyttö sekä maa- että ilmaliikenteessä on hyvin pitkälti pelkästään imagokysymys. Tavanomaisten polttoaineiden valmistaminen on paljon halvempaa ja teknologia on kehittyneempää. Tulevaisuudessa kuitenkin fossiiliset polttoaineet loppuvat väijäämättä, jos kulutus lisääntyy kuten viime vuosina.

## 5 YHTEENVETO

Ilmailu lisääntyy maailmanlaajuisesti koko ajan. Tällä hetkellä käytössä olevat lentopolttoaineet valmistetaan pääsääntöisesti fossiilista raaka-aineista. Tämä tarkoittaa, että fossiiliset raaka-ainevarannot hupenevat kasvavalla nopeudella. Vaihtoehtoisten polttoaineiden kehittäminen on ensisijaisessa asemassa fossiilisten raaka-aineressurssien loppumisen estämiseksi. Biopohjaisten polttoaineiden kehittämisellä voidaan myös vähentää sekä maa- että ilmailuliikenteen ympäristöpäästöjä.

Tällä hetkellä kestävää teknologiaa vaihtoehtoisten ilmailupolttoaineiden valmistamiseen ei ole olemassa. Vaikka HVO:ta voidaan käyttää jopa suoraan polttoaineena tavanomaisen lentopetrolin tilalla, on valmistusprosessi vielä liian vähän kehittynyt. FT polttoaineilla ei voida myöskään korvata lentopetroleja, vaikka valmistusprosessi on olemassa. Tämä johtuu FT polttoaineiden liian huonosta energiatiheudesta. Muita vaihtoehtoja ei ole ilman moottorien uudelleensuunnittelua.

Tavanomaisten lentopolttoaineiden käyttö tulee väistämättä vähenemään ajan kuluessa. Tämä ajaa vaihtoehtoisten polttoaineiden kehitystä eteenpäin ja pakottaa tutkimaan ja kehittämään jatkuvasti uusia teknologisia ratkaisuja, sekä mahdollisten kilpailevien polttoaineiden ominaisuuksia. Jos HVO:n ja FT-polttoaineiden valmistusprosesseja ja ominaisuuksia ei saada muutettua ilmailun vaatimalle tasolle, tarkoittaa se moottoreiden rakenteen uudelleen suunnittelua ja uusien mahdollisten polttoaineiden suunnittelun tehostamista sekä kaupallistamista.



## 6 LÄHTEET

M. Balat, H. Balat, C. Öz, 2007. Progress In Bioethanol Processing [verkkodokumentti] Turkki: Sila Science & Energy Unlimited Company, University Mahallesi, 61000 Trabzon. Saatavissa:

<http://www.sciencedirect.com.pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S0360128507000706> [viitattu 12.7.2016]

W. Balicki, A. Irzycki, K. Snopkiewicz, 2010. COMPARISON THE PISTON AIR ENGINE PERFORMANCE WITH AVIATION GASOLINE (AVGAS) OR THE E-85 ECOLOGICAL FUEL SUPPLY [verkkodokumentti]. Poland: Institute of Aviation, Propulsion Department. Saatavissa:

<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ5-0031-0012> [viitattu 2.5.2016]

Y. M. Choo, S. F. Cheng, A. N. Ma, Y. Basiron, 2009. Aviation Fuel Composition [verkkodokumentti] USA: Patent Application Publication, Birch Stewart Kolasch & Birch Po Box 747 Falls Church. Saatavissa:

<https://www.google.fi/patents/EP1969098A1?cl=en&dq=aviation+fuel+composition&hl=fi&sa=X&sqi=2&pjif=1&ved=0ahUKEwjw7DlkOvNAhXTbZoKHZo4Co8Q6AEIKzAC> [viitattu 16.6.2016]

J. S. Clarkson, T. D. Gamlin, L. T. Hardy, 2012. Fischer Tropsch Process [verkkodokumentti]. USA: Bp Exploration Operating Company Limited, Davy Process Technology Limited. Saatavissa: <https://www.google.com/patents/US8329765> [viitattu 16.7.2016]

G. W. Eckert, 1971. Jet Fuel Composition [verkkodokumentti]. USA: United States Patent, a Corporation of Delaware, New York. Saatavissa: <https://www.google.com/patents/US3561936> [viitattu 2.5.2016]

T. C. Ezeji, N. Qureshi, H.P. Blaschek, 2007. Bioproduction of butanol from biomass: from genes to bioreactors [verkkodokumentti] USA: University of Illinois, Biotechnology & Bioengineering Group, Department of Food Science & Human Nutrition, 1207 West Gregory Drive, Urbana, IL 61801. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S0958166907000511> [viitattu 20.7.2016]

R. G. Gaughan, 1995. Unleaded Aviation Gasoline [verkkodokumentti]. USA: United States Patent, Piscataway, New Jersey. Saatavissa: <https://www.google.com/patents/US5470358> [viitattu 16.4.2016]

J. V. Gerpen, 2005. Biodiesel Processing and Production [verkkodokumentti]. USA: University of Idaho, Moscow, ID 83844. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S0378382004001924> [viitattu 15.7.2016]

K. Göransson, U. Söderlind, J. He, W. Zhang, 2010. Review of syngas production via biomass DFBGs [verkkodokumentti]. Ruotsi: Department of Natural Sciences, Engineering and Mathematics, Mid Sweden University, SE-871 88 Härnösand. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S1364032110003199> [viitattu 16.7.2016]

T. K. Hari, Z. Yaakob, N. N. Binitha, 2014. Aviation Biofuel from Renewable Resources: Routes, opportunities and Challenges [verkkodokumentti]. Malesia: Department of Chemical and Process Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi43600. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S1364032114009204> [viitattu 15.7.2016]

J. Hill, E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky, D. Tiffany, 2006. Environmental, Economic, and Energetic Costs and Benefits of Biodiesel and Ethanol Biofuels [verkkodokumentti] USA: Departments of Ecology, Evolution, and Behavior and Applied Economics, University of Minnesota. Saatavissa: <http://www.pnas.org.pc124152.oulu.fi:8080/content/103/30/11206.full.pdf> [viitattu 5.7.2016]

L. E. Hombach, C. Cambero, T. Sowlati, G. Walther, 2016. Optimal design of supply chains for second generation biofuels incorporating European biofuel regulations [verkkodokumentti] Germany: Lehrstuhl für Operations Management, RWTH Aachen University. Saatavissa:

<http://www.sciencedirect.com.pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S0959652616305790> [viitattu 1.7.2016]

K. Kannaiyan, Reza Sadr, 2014. Experimental investigation of spray characteristics of alternative aviation fuels [verkkodokumentti]. Qatar: Texas A&M University at Qatar. Saatavissa:

<http://www.sciencedirect.com.pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S0196890414008383> [viitattu 29.3.2016]. 10s.

K. Narayanasvamy, H. Pitsch, P. Pepiot, 2015. A Component Library Framework for Deriving Kinetic Mechanisms for Multi-Component Fuel Surrogates: Application for Jetfuel Surrogates [verkkodokumentti]. India: Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras. Saatavissa:

<http://www.sciencedirect.com.pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S0010218015004563> [viitattu 20.5.2016]

L. Rye, S. Blakey, C. W. Wilson, 2009. Sustainability of supply or the planet: a review of potential drop-in alternative aviation fuels [verkkodokumentti]. UK: Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield. Saatavissa:

<http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2010/EE/B918197K#!divAbstract> [viitattu 29.3.2016]. 11s.

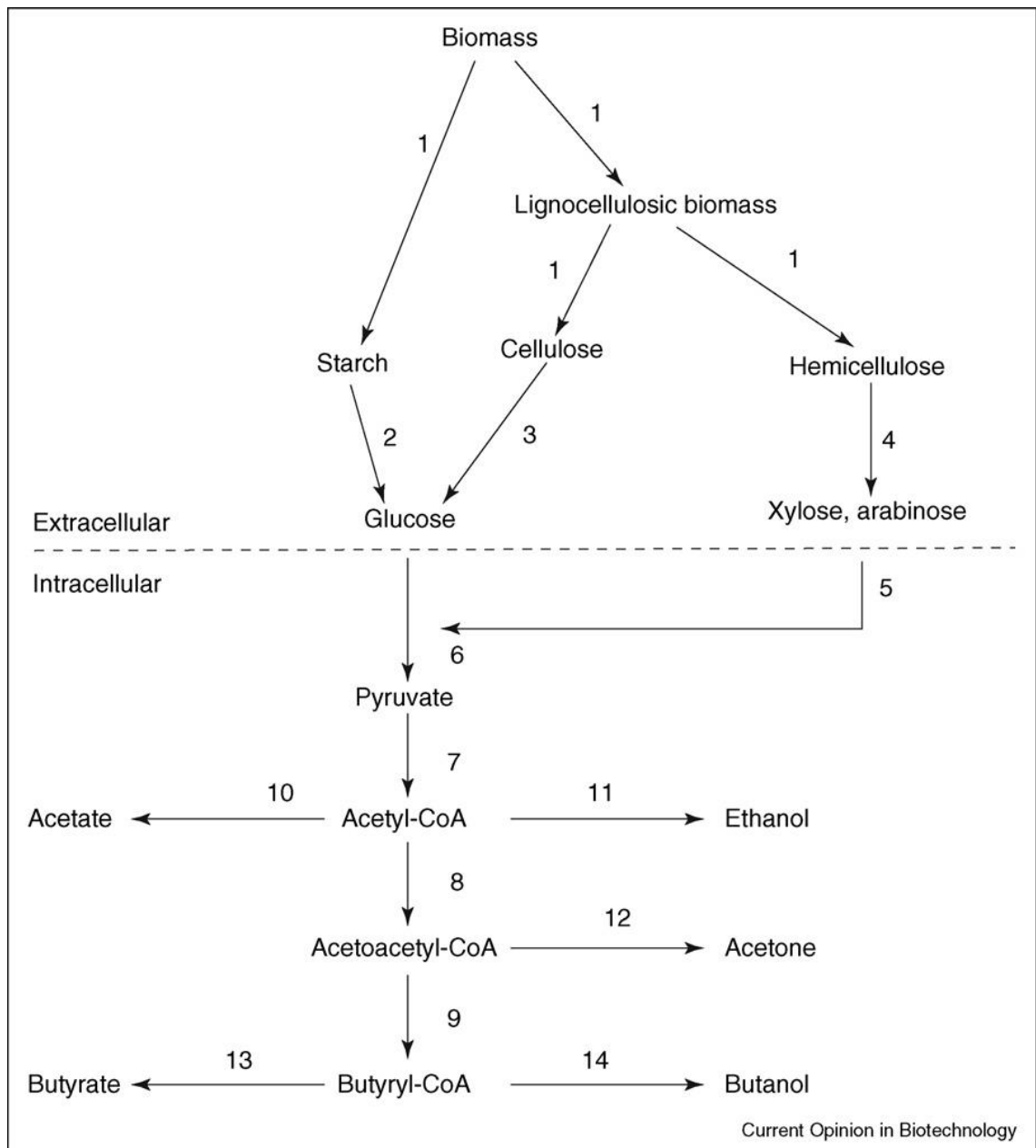
J. Sandquist, B.M. Güell, 2012. Overview of Biofuels for Aviation [verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2012/10/192.pdf> [viitattu 16.7.2016]

P. M. Schenk, S. R. Thomas-Hall, E. Stephans, U. C. Marx, J. H. Mussnug, C. Posten, O. Kruse, B. Hankamer, 2008. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production [verkkodokumentti] Australia: Institute for Molecular Bioscience, University of Queensland, St. Lucia, Queensland 4072. Saatavissa: <http://link.springer.com.pc124152.oulu.fi:8080/article/10.1007/s12155-008-9008-8> [viitattu 10.7.2016]

V. Singh, D. K. Chaudhary, I. Mani, P. K. Dhar, 2016. Recent advances and challenges of the use of cyanobacteria towards the production of biofuels [verkkodokumentti] Ranska: Synth-Bio Group, Institute of Systems and Synthetic Biology, Université d'Évry Val d'Essonne. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/pc124152.oulu.fi:8080/science/article/pii/S136403211601295?np=y> [viitattu 12.7.2016]

G. R. Wilson, Tim Edwards, Edwin Corporan, Robert L. Freerks, 2013. Certification of Alternative Aviation Fuels and Blend Components [verkkodokumentti]. USA: Southwest Research Institute. Saatavissa: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef301888b> [viitattu 2.4.2016]

Q. Yan, F. Yu, J. Liu, J. Street, J. Gao, Z. Cai, J. Zhang, 2012. Catalytic conversion wood syngas to synthetic aviation turbine fuels over a multifunctional catalyst [verkkodokumentti]. USA: Department of Agricultural and Biological Engineering, Mississippi State University.



Kuva 6. Biobutanolin valmistus (Ezeji ym. 2007)