

Eetu Heiskanen

BIOPOLTTOAINEIDEN VAIKUTUS LENTOKONEEN OMINAISUUKSIIN JA JÄRJESTELMIIN

Kandidaatintyö
Konetekniikan tiedekunta
Tarkastaja: Jussi Aaltonen
Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Eetu Heiskanen: Biopolttoaineiden vaikutus lentokoneen ominaisuuksiin ja järjestelmiin
(Impact of Biojet fuels on Aircraft Features and Systems)

Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Joulukuu 2021

Lentoliikenteen määrä kasvaa jatkuvasti, eikä nykyisten öljypolttoaineiden käyttö energialähteenä ole kestävä. Lentoliikenteestä aiheutuvat päästöt ovat herättäneet tarpeen uusiutuvista luonnonvaroista tuotetuille polttoaineille. Yksi mahdollinen ratkaisu tähän on biopolttoaineet. Biopolttoaineiden avulla voidaan vähentää merkittävästi lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjä. Niiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta lentokoneisiin ja niiden järjestelmiin on kuitenkin tutkittava ennen käyttöönottoa.

Tämä kandidaatintyö käsittelee Fischer Tropsch (FT)- ja HEFA-biopolttoaineiden ominaisuuksia ja niiden vaikutuksia lentokoneen järjestelmiin. Työssä selvitetään ja tunnistetaan biopolttoaineiden aiheuttamat haasteet moottoriin ja polttoainejärjestelmään. Työn tarkoitus on tutkia ratkaisuja haasteisiin ja määrittää järjestelmiltä ja polttoaineilta vaadittavaa kehitystä kohti täysin synteettistä biolentopolttoainetta. Tutkimuksessa käytetty menetelmä on kirjallisuusselvitys.

Tutkimuksen mukaan FT- ja HEFA-biolentopolttoaineet sopivat 50 %:n sekoitussuhteella perinteisiin lentokoneiden moottoreihin ilman tarvittavia lisämuutoksia. Myös 50 %:n drop-in-polttoaineiden vaikutukset moottoriin ja polttoainejärjestelmään ovat hyvin samankaltaisia kuin tavanomaisten Jet A -ja Jet A-1 -polttoaineiden. Tekniset haasteet alkavat, kun seossuhde ylittää 50 tilavuusprosentin rajan.

Teknisiä haasteita tutkimuksen mukaan ovat biopolttoaineen ja tiivisteiden yhteensopivuusongelma sekä voitelukyvyyn puute. Yhteensopivuusongelma voidaan ratkaista bentsyylialkoholipitoisilla lisäaineilla tai vaihtamalla nitrilikumitiivisteet fluorihilitiivisteisiin. Tiivisteiden vaihtaminen on käytännössä mahdoton toteuttaa, joten lisäaineratkaisu on kannattavin vaihtoehto. Lisäaineiden vaikutus moottoriin ja polttoainejärjestelmään on kuitenkin selvittävä ennen niiden käyttöä.

Lisäksi haasteiksi tunnistetaan polttoaineisiin yleisesti liittyvä mikrobikontaminaatio sekä polttoainejärjestelmän vaurioituminen peroksidien takia. Nämäkin haasteet voidaan ratkaista lisäaineiden avulla. Myös moottoreiden ja polttoaineen laadun testaus luokitellaan haasteeksi, sillä biopolttoaineiden tarkka ja pitkäaikainen vaikutus moottoriin ja polttoainejärjestelmään on vielä tuntematon. Vaikutuksia voidaan arvioida erilaisten mallien, mallinnusten ja tutkimuksista kertyvän kokemuksen avulla.

Ilmailualalla pyritään siis kehittämään biopolttoainetta eikä järjestelmiä. Uusien järjestelmien kehittäminen ja muokkaaminen sopiviksi olemassa oleviin lentokoneisiin olisi liian kallista verrattuna polttoaineen tämänhetkisiin hyötyihin. Lisäksi ilmailualan vaatimukset ja standardit ovat haastavia, mikä osaltaan vaikeuttaa kehitystä kohti täysin synteettistä polttoainetta. Täysin synteettinen biopolttoaine on kuitenkin mahdollista kehittää, mutta se vaatii lisätutkimusta.

Avainsanat: Lentokone, vaihtoehtoinen lentopolttoaine, biolentopolttoaine, haasteet järjestelmiin, HEFA, Fischer Tropsch, drop-in-polttoaine.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. BIOPOLTTOAINEET LENTOKONEISSA	3
2.1 SEKOITEPOLTTOAINE.....	3
2.2 VALMISTUSMENETELMÄT	4
2.2.1 Fischer Tropsch-menetelmä.....	4
2.2.2 HEFA-menetelmä.....	5
2.3 VAATIMUKSET JA HYVÄKSYMISPROSESSI	7
3. BIOPOLTTOAINEEN VAIKUTUS JA TEKNISET HAASTEET.....	9
3.1 VAIKUTUS LENTOKONEEN OMINAISUUKSIIN YLEISESTI	9
3.2 BIOLENTOPOLTTOAINEEN JÄRJESTELMIIN AIHEUTTAMAT HAASTEET.....	10
3.2.1 Moottori	10
3.2.2 Polttoainejärjestelmä	11
4. BIOLENTOPOLTTOAINEILTA JA JÄRJESTELMILTÄ VAADITTAVA KEHITYS	14
4.1 NYKYISTEN JÄRJESTELMIEN KEHITYS.....	14
4.2 POLTTOAINEEN KEHITYS	15
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	17
LÄHTEET.....	19
LIITTEET	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATJ	Alcohol to Jet on alkoholin muuntamisprosessi polttoaineeksi
ASTM	American Society for Testing and Materials on kansainvälinen teknisten standardien järjestö
MOD	Ministry of Defence on Britannian puolustusministeriö
BtL	Biomass to Liquid, biomassan muuttamisprosessi nestemäiseksi polttoaineeksi
FT	Fischer Tropsch -prosessilla tuotettu biopolttoaine
FT-SPK	Fischer Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene
FRL	Fuel Readiness Level eli polttoainevalmiustaso kuvaa polttoaineen tuotannon edistymistä kohti kaupallistamista.
HRJ	Hydroprocessed Renewable Jet fuels eli vetykäsitellyt uusiutuvat lentopolttoaineet
HEFA	Hydrotreated Esters of Fatty Acids eli vetykäsitellyt esterit ja rasvahapot
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene eli synteettinen parafiininen kerosiini
TET	Turbine Entry Temperature eli turbiinin sisääntulolämpötilan arvo

1. JOHDANTO

Lentopolttoaineen kulutus on kasvanut vuoden 1980 jälkeen 2,1 % vuodessa ja kaksinkertaistunut 33 vuoden välein. Maailman lentoliikenteen kysynnän ennustetaan kasvavan noin 5 % vuodessa seuraavien vuosikymmenten aikana. Yhden kilogramman polttaminen lentopetrolia tuottaa noin 3,2 kg hiilidioksidia, joka on yleisin kasvihuonekaasu. (Schäfer 2016) Nämä päästöt tapahtuvat ilmakehän yläkerroksissa, jolloin niistä aiheutuva kasvihuoneilmiö on vieläkin voimakkaampi kuin maanpinnalla (Barbosa 2017).

Lentoliikenne riippuu paljon fossiilisesta lentopetrolista, koska se sisältää suuren määrän kemiallista energiaa tilavuus- ja painoyksikköä kohti. Ne ovat tärkeitä muuttujia, jotka vaikuttavat suoraan lentokoneen hyötykuorman määrään ja kantamaan. Nämä polttoaineilta toivotut ominaisuudet edellyttävät vähäistä tilan käyttöä ja siten helpottavat myös polttoaineen varastointia. (Schäfer 2016)

Ilmailualan sitoutuminen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen ja öljyn hinnan nousu ovat kuitenkin herättäneet tarpeen uusiutuville ja kohtuuhintaisille energialähteille. Suihkumoottoreita ei voida korvata esimerkiksi sähköllä, joten siirtyminen biopolttoaineisiin on kannattava vaihtoehto. On useita muitakin mahdollisuuksia vähentää lentoliikenteen energiantensiteettiä, mutta ne eivät yksistään riitä vakauttamaan tai vähentämään tarpeeksi kasvihuone-, rikki-, noki- ja hiukkaspäästöjä. (Chuck 2016; Barbosa 2017)

Biopolttoaineet tarjoavat hyvän mahdollisuuden päästöjen pienentämiselle. Jos biolentopolttoaineen raaka-aineiden viljelyyn ei tarvita maankäytön muutoksia, kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää elinkaaren aikana 70–90 %. (Schäfer 2016) Biopohjaisten lentopolttoaineiden nykyinen saatavuus on kuitenkin rajallinen ja niiden kustannukset ovat edelleen korkeammat kuin öljypohjaisten lentopolttoaineiden. Se johtuu pääasiassa tuotantoprosessien tekniikan epäkypsyydestä ja pienimuotoisesta tuotannosta. Jotta biolentopolttoaineet olisivat keskipitkällä aikavälillä kilpailukykyisiä fossiilisten polttoaineiden kanssa, ilmailuala etsii ympäristöystävällisiä ja taloudellisesti toteuttamiskelpoisia ratkaisuja. (Barbosa 2017)

Biopolttoaineiden kehittäminen ja tutkiminen on tärkeää, koska niiden avulla voidaan vähentää merkittävästi lentoliikenteestä aiheutuvia päästöjä. Biopolttoaineiden aktiivikäyttöön ottaminen vaatii vielä paljon tutkimusta ja tuotekehitystä, koska sen täytyy sulautua suoraan nykyisiin järjestelmiin (Hari et al. 2015). Nykyään biopolttoaineita voidaan käyttää kaupallisesti enintään 50 %:n seossuhteilla tavanomaisen lentopolttoaineen kanssa

(Bergthorson & Thomson 2015). Nykyisiä biopolttoaineita ja järjestelmiä on kehitettävä, jotta voitaisiin käyttää suurempia seossuhteita ja maksimoida ilmastovaikutukset.

Työssä tutkitaan yleisesti biolentopolttoaineiden vaikutusta lentokoneen ominaisuuksiin ja järjestelmiin. Tarkemmin käsitellään moottoriin ja polttoainejärjestelmään aiheutuneet haasteet. Työn tavoitteena on selvittää biopolttoaineiden vaikutuksia, soveltuvuutta sekä haasteita lentokoneissa. Lisäksi työn tavoitteena on selvittää biolentopolttoaineilta ja järjestelmiltä vaadittavaa kehitystä kohti suurempia seossuhteita ja siten hiilineutraalimpaa tulevaisuutta.

Tutkimuskysymyksiä ovat:

1. Miten biopolttoaineet vaikuttavat lentokoneen ominaisuuksiin?
2. Biopolttoaineen aiheuttamat haasteet lentokoneen polttoainejärjestelmään ja moottoriin?
3. Minkälaista kehitystä tai muutoksia pitää tapahtua polttoaineissa tai järjestelmissä, jotta biolentopolttoaineella on tulevaisuutta?

Työ rajataan koskemaan jo osittain tuotannossa olevia biomassapohjaisia HEFA (hydroprocessed esters and fatty acids) ja Fischer Tropsch -polttoaineita. Biopolttoaineen ominaisuuksia ja vaatimuksia verrataan perinteisiin lentopolttoaineisiin eli Jet A ja Jet A-1:seen. Biopolttoaineista aiheutuneet haasteet rajataan koskemaan polttoainejärjestelmää ja moottoria. Työssä tutkitaan biopolttoaineita konetekniikan näkökulmasta, joten siinä ei käsitellä biopolttoaineiden rakennetta eikä rakenteen vaikutuksia. Työssä ei käsitellä myöskään raaka-aineiden tai jalostamoinfrastruktuurin vaikutusta biopolttoaineiden tulevaisuuteen.

Tässä työssä käytettävä tutkimusmenetelmä on kirjallisuusselvitys. Työssä käytettyjen kirjallisuusaineistojen hakemiseen on käytetty pääosin Andor-tietokantaa.

Kandidaatintyö etenee siten, että toisessa luvussa käsitellään sekoitepolttoaineita, niiden valmistusmenetelmiä sekä vaatimuksia ja hyväksyntäprosessia. Kolmannessa luvussa tunnistetaan biolentopolttoaineiden vaikutus lentokoneen ominaisuuksiin yleisellä tasolla. Lisäksi kolmannessa luvussa tunnistetaan biolentopolttoaineiden aiheuttamat haasteet moottoriin ja polttoainejärjestelmään. Neljännessä luvussa käsitellään biopolttoaineilta ja järjestelmiltä vaadittavaa kehitystä, jotta ne olisivat kilpailukykyisiä fossiilisten polttoaineiden kanssa. Viidennessä luvussa tehdään yhteenveto ja johtopäätökset.

2. BIOPOLTTOAINEET LENTOKONEISSA

Tässä luvussa käsitellään biolentopolttoaineita yleisestä näkökulmasta. Luvussa käsitellään sekoitepolttoaineita, valmistusmenetelmiä ja niille asetettuja vaatimuksia sekä standardeja.

2.1 Sekoitepolttoaine

Lentokoneteollisuudessa ollaan yksimielisiä siitä, että uusiutuvien biolentopolttoaineiden on oltava yhteensopivia tavanomaisten lentopolttoaineiden, Jet A-1:n ja Jet A:n, kanssa (Hari et al. 2015; Bergthorson & Thomson 2015). Tällaisia polttoaineita kutsutaan sekoitepolttoaineiksi tai drop-in-polttoaineiksi. Drop-in-polttoaineet voidaan sekoittaa tavanomaiseen lentopetroltiin tietyllä prosenttiosuudella. Ne voivat käyttää olemassa olevaa polttoaineen jakelujärjestelmää, eivätkä ne vaadi suuria muutoksia lentokoneiden moottoreihin tai polttoainejärjestelmiin. (Rötger 2016) Siten valmistajien ei tarvitse suunnitella moottoreita tai lentokoneita uudelleen. Myöskään polttoaineen toimittajien tai lentoasemien ei tarvitse rakentaa uusia polttoaineen jakelujärjestelmiä (Abrantes et al. 2021). Toinen merkittävä syy drop-in-polttoaineiden käytölle on ilmailualan yhdenmukaisuus. Ilmailualalla on teknisiä etuja drop-in-polttoaineiden käytössä, koska olemassa olevat lentokoneet, moottorit ja polttoainevaatimukset ovat hyvin yhdenmukaisia (Noh et al. 2016).

Polttoaineen on pystyttävä käyttämään nykyisiä jakelujärjestelmiä, koska rinnakkaisen infrastruktuurin rakentaminen olisi kohtuuttoman kallista (Rötger 2016). Drop-in-laatu on siten olennainen vaihtoehto nykyisille lentopolttoaineille tulevina vuosikymmeninä. Teknisten standardien järjestö ASTM (American Society for Testing and Materials) on luonut standardin D7566 vaihtoehtoisten lentopolttoaineiden sertifiointiseksi. (Rötger 2016) Kaikkien vaihtoehtoisten lentopolttoaineiden sertifiointin ja pätevyyksien tulee noudattaa ASTM Internationalin määrittämiä vaatimuksia. Tällä hetkellä on sertifioitu seitsemän eri drop-in-polttoaineiden tuotantomenetelmää. Tuotantomenetelmistä HEFA, FT (Fischer Tropsch) ja ATJ (alcohol to jet) ovat ainoat tuotantoprosessit, joita polttoaineen valmistajat aikovat tuottaa keskipitkällä aikavälillä. (Abrantes et al. 2021) Työssä käsiteltävien FT- ja HEFA-polttoaineiden ennustetut tuotantomäärät ovat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tämänhetkinen ja ennustetut tuotantomäärät vaihtoehtoisille biopolttoaineille, muokattu lähteestä (Abrantes et al. 2021).

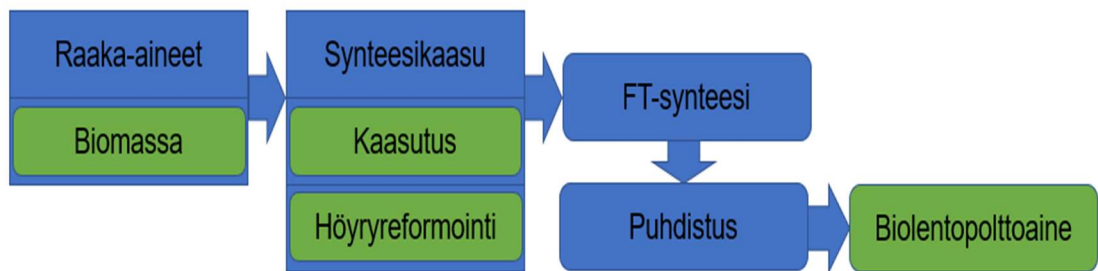
Vuosi	Valmistusmenetelmä	
	HEFA (10 ⁶ t)	FT (10 ⁶ t)
2020	1,53	0,03
2022	6,68	0,16
2024	7,46	0,30
2026	7,47	0,30
2028	7,47	0,30
2030	7,47	0,45

Taulukosta 1 voidaan havaita, että vaihtoehtoisten biopolttoaineiden tuotantomäärien ennustetaan kasvavan lähivuosina merkittävästi. Se johtuu öljyn hinnan noususta sekä ilmailualan sitoutumisesta kasvihuonepäästöjen vähentämiseen ja siten todellisesta vaihtoehtoisten lentopolttoaineiden tarpeesta.

2.2 Valmistusmenetelmät

2.2.1 Fischer Tropsch-menetelmä

Biomassan muuntaminen nestemäiseksi eli BtL (biomass to liquid) -hiilivety-polttoaineeksi sisältää seuraavat vaiheet: biomassan esikäsittelyn, kaasutuksen, synteetikaa-sun puhdistamisen, Fischer Tropsch -synteetin ja lopuksi vetykäsittelyn (Hari et al. 2015). ASTM:n sertifioimaa BtL-prosessilla tuotettua biopolttoainetta kutsutaan myös Fischer Tropsch -syntetisoiduksi parafiiniseksi kerosiiniksi (FT-SPK) (Barbosa 2017). Biomassapohjaiset Fischer Tropsch -polttoaineet sertifioitiin vuonna 2009. Tämä kemiallinen prosessi muuttaa lignoselluloosapitoiset raaka-aineet synteetikaa-suksi (CO ja H₂), joka puhdistuksen jälkeen muutetaan nestemäiseksi polttoaineeksi Fischer Tropsch -synteetillä. (Hari et al. 2015; Schäfer 2016) Prosessi on esitetty lohkokaaaviona kuvassa 1.



Kuva 1. FT-biopolttoaineiden valmistusprosessi, muokattu lähteestä (Barbosa 2017 s 5).

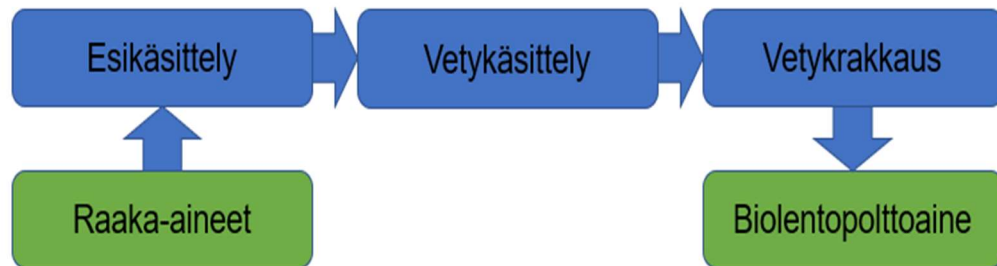
Synteesikaasun tuottamiseen käytetään laajaa valikoimaa biomassapohjaisia raaka-aineita, kuten maatalous-, yhdyskunta- ja biotuoteteollisuuden jätteitä (Hari et al. 2015; Abrantes et al. 2021). FT-polttoaineet ovat puhtaasti palavia ja niille ominaista ovat myrkyttömyys, pienet typpioksidipäästöt, korkea setaaniluku, pienemmät hiukkaspäästöt sekä alhainen rikki- ja aromaattisten hiilivetyjen pitoisuus. FT-polttoaineiden ominaisuudet eivät johdu käytetyn raaka-aineen luonteesta vaan erot polttoaineominaisuuksissa johtuvat pääasiassa käyttöolosuhteista. (Hari et al. 2015)

2.2.2 HEFA-menetelmä

Hydratut kasviöljyt eli HRJ (Hydroprocessed renewable jet fuels) tai nykyisin HEFA on sertifioitu vuonna 2011 (Schäfer 2016). HEFA-parafiinipolttoaineet ovat kiehumisalueeltaan ja kemialliselta koostumukseltaan hyvin samankaltaisia kuin FT-polttoaineet. Siten niiden kehityksessä pystyttiin hyödyntämään FT-polttoainetta varten kehitettyjä tietoja. Arviointi- ja hyväksymisprosessin puolivälissä HRJ-polttoaineet nimettiin uudelleen HEFA:ksi. HEFA kuvaa paremmin raaka-ainetta ja synteettisen seoskomponentin valmistusprosessia kuin HRJ. (Wilson et al. 2013)

HEFA valmistetaan vetykäsittelemällä eläin- ja kasviöljyt parafiineiksi ja hydroisomeroimalla nämä parafiinit kerosiinien kiehumisalueella oleviksi hiilivedyiksi (Wilson et al. 2013). Happisidosten ja tyydyttymättömien hiilidosten takia on välttämätöntä suorittaa hapenpoisto- ja hydrausvaiheet tyydyttyneen hiilivety-polttoaineen tuottamiseksi (Abrantes et al. 2021). Raaka-aineiksi prosessiin kelpaavat luonnosta saatavat bioöljyt, eläinrasvat ja erilaiset kierrätetyt öljyt, kuten jäterasvat (Hari et al. 2015; Chuck 2016; Abrantes et al. 2021). HEFA-polttoaineita valmistetaan siis poistamalla näistä raaka-aineista

happea vedyn avulla. Tärkeimmät sivutuotteet ovat vesi ja propaani (Hari et al. 2015). Prosessi on esitetty lohkokaaaviona kuvassa 2.



Kuva 2. HEFA-polttoaineiden valmistusprosessi, muokattu lähteestä (Barbosa 2017 s 5).

Polttoainetta voidaan tuottaa nykyisellä jalostamoinfrastruktuurilla, jolloin sillä on korkea polttoainevalmiustaso FRL (fuel readiness level) ja kaupallisesti saatavilla oleva muuntamistekniikka (Abrantes et al. 2021). Hydrojalostetut uusiutuvat lentopolttoaineet ovat suurienergisiä biopolttoaineita, joita voidaan mahdollisesti käyttää polttoaineena myös ilman sekoittamista (Hari et al. 2015).

Yksi vetyjalostettujen uusiutuvien polttoaineiden tärkeimmistä eduista on kasvihuonekaasupäästöjen, kuten hiilimonoksidin (CO), hiilivetyjen (HC), typen oksidien (NOx) ja hiukkaspäästöjen (PM) väheneminen. Polttoaineet eivät sisällä aromaattisia hiilivetyjä tai rikkiä, ja niillä on korkea setaaniluku, korkea lämpöstabiilisuus sekä alhaiset pakokaasupäästöt. Nämä polttoaineet ovat myös vakaita varastoida, ja ne kestävät hyvin mikrobien kasvua. (Hari et al. 2015)

HEFA- ja FT-johdettuja polttoaineita kutsutaan myös synteettisiksi parafiinipetroleiksi (SPK). Ne koostuvat suora- ja haaraketjuisista parafiinimolekyyleistä (Bergthorson & Thomson 2015), ja niillä on jatkuva kiehumisalue sekä hiilijakauma kuten tavanomaisissa polttoaineissa (Wilson et al. 2013). Lisäksi kaikki näiden synteettisten hiilivetyjen komponentit löytyvät myös tavanomaisista polttoaineista. Siten nämä seoskomponentit voidaan sisällyttää olemassa oleviin polttoainevaatimuksiin. (Wilson et al. 2013) SPK-polttoaineita voidaan sekoittaa Jet A- tai Jet A-1 -öljypolttoaineisiin jopa 50 tilavuusprosenttia ASTM D7566-standardin mukaisesti (Hari et al. 2015; Bergthorson & Thomson 2015). Taulukossa 1 on yhteenveto FT- ja HEFA-biolentopolttoaineista. Seuraavassa luvussa käsitellään enemmän biopolttoaineille asetettuja vaatimuksia ja standardeja.

Taulukko 2. Yhteenveto biopolttoaineista, muokattu lähteestä Abrantes et al. (2021)

Valmistusprosessi	Lyhenne	Raaka-aineet	sekoitussuhde (%)	FRL* (1–9)
Fischer-Tropsch-syntetisoitu parafiininen kerosiini	FT-SPK	Biomassa	50	7
Vetykäsittelyt esterit ja rasvahapot	HEFA-SPK	Bio-öljyt, eläinrasvat, jäteöljyt	50	9

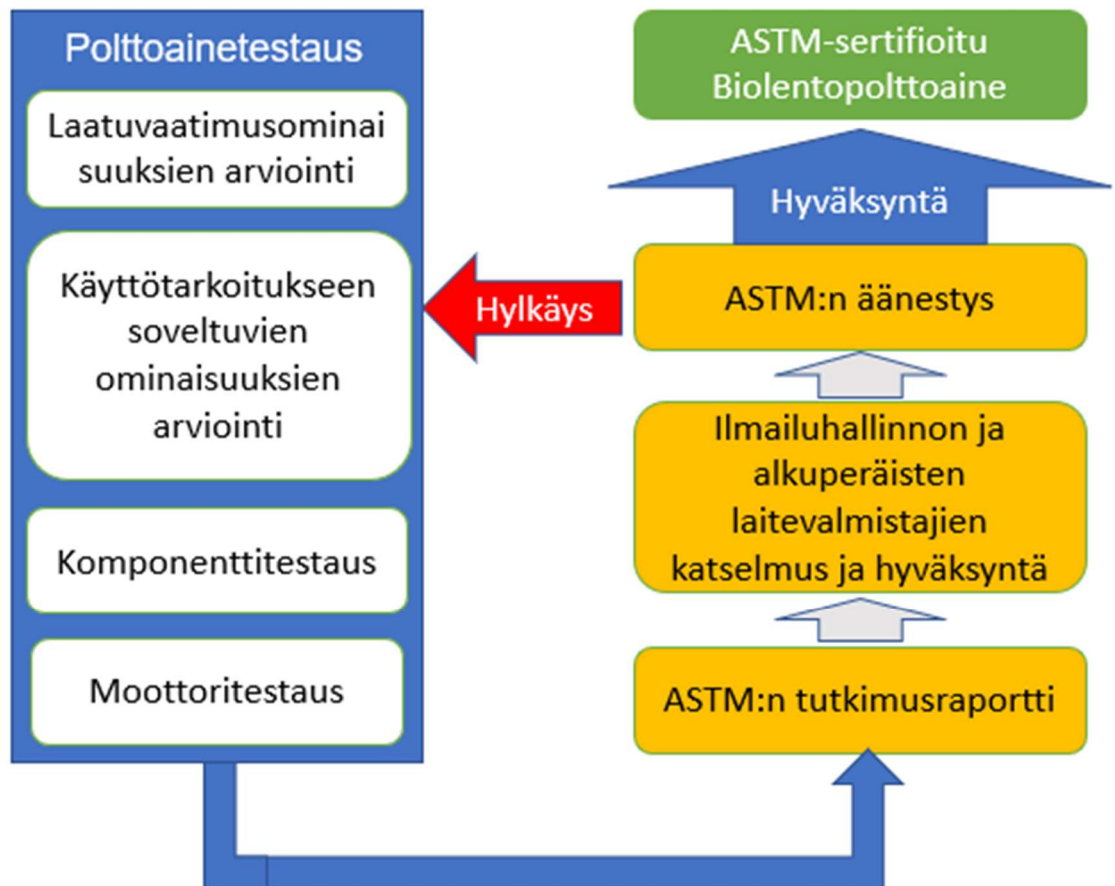
*Fuel Readiness Level (FRL) eli polttoainevalmiustaso kuvaa polttoaineen tuotannon edistymistä kohti kaupallistamista. Polttoainevalmiustason selite ja taulukko on liitteessä 1.

2.3 Vaatimukset ja hyväksymisprosessi

Biopolttoaineiden hyväksyminen perinteisen lentopolttoaineen sekoituskomponentteina on pitkä ja vaativa prosessi. Tarvitaan mittavia tutkimuksia, jotta voidaan varmistaa moottorin hyväksyttävä suorituskyky sekä polttoaineen yhteensopivuus järjestelmien kanssa. Lisäksi on varmistettava polttoaineen asianmukainen suorituskyvyn säilyminen varastoinnin aikana ja kaikissa muissakin lentokoneen käyttöympäristöissä. Suihkumoottoreiden polttoainevaatimukset määräytyvät ASTM:n ja brittiläisen MOD:n mukaan. MOD eli Ministry of Defence on Britannian puolustusministeriö. ASTM D1655 -standardit ja MOD Defence -standardi 91–91 ovat kaikkien lentopolttoaineiden ohjaavia eritelmiä. Ne ovat yleisiä polttoainestandardeja ja perustuvat laajaan kokemukseen polttoainetuotannon tavanomaisista lähteistä kuten raakaöljystä. (Wilson et al. 2013)

Fyysiset ja tekniset vaatimukset, jotka vaihtoehtoisen biopolttoaineen on täytettävä, ovat olennaisilta osin samat kuin Jet A:n (Rötger 2016). Kun polttoaine on sertifioitu vaihtoehtoisia polttoaineita koskevan ASTM D7566 -standardin mukaisesti, sitä pidetään sertifioituna lentopolttoaineena. Siten se täyttää myös yleisen lentopolttoainestandardin ASTM D1655, ja sitä voidaan käyttää sekoitusrajoituksia noudattaen samalla tavalla kuin perinteistä lentopolttoainetta. (Rötger 2016) Ehdokaspolttoaineiden fysikaaliskemialliset ja laitteistojen yhteensopivuusvaatimukset rajoittavat niiden käytön 50 %:n sekoituksiin olemassa olevissa lentokonemoottoreissa (Wilson et al. 2013). Uuden lentopolttoaineen on läpäistävä testit myös ASTM D4054 -standardikäytännön mukaisesti (Vozka 2019). ASTM D4054 on standardikäytäntö uusien lentopolttoaineiden ja lisäaineiden pätevöintiin ja hyväksymiseen (Lapuerta et al. 2016).

Polttoainehyväksyntäprosessi maksaa miljoonia euroja ja voi kestää vuosia, koska näiden polttoaineiden tarkka vaikutus moottoriin on vielä tuntematon. Polttoaineen valmistaja on vaarassa jäädä saamatta ASTM-sertifikaattia huomattavien taloudellisten ja ajallisten investointien jälkeen. Se haittaa merkittävästi kaupallisten vaihtoehtoisten lentopolttoaineiden kehittämistä. (Vozka et al. 2019) ASTM-hyväksymisprosessi on esitetty kuvassa 1.



Kuva 3. ASTM:n polttoainehyväksyntäprosessi, muokattu lähteestä (Barbosa 2017 s 4).

Hyväksymisprosessista nähdään, että uusien polttoaineseosten arviointiin osallistuvat myös alkuperäiset lentokonevalmistajat sekä komponentti- ja järjestelmätoimittajat. Näiden organisaatioiden on oltava varmoja, että niiden laitteissa käytettävät polttoaineet toimivat asianmukaisesti ja noudattavat laitteiden suunnittelumäärittämiä (Wilson et al. 2013).

3. BIOPOLTTOAINEEN VAIKUTUS JA TEKNISET HAASTEET

Tässä luvussa käsitellään yleisesti drop-in-biolentopolttoaineiden vaikutusta lentokoneen järjestelmiin ja ominaisuuksiin. Tarkemmin luvussa käsitellään biopolttoaineiden aiheuttamat haasteet moottoriin ja polttoainejärjestelmään.

3.1 Vaikutus lentokoneen ominaisuuksiin yleisesti

FT-SPK ja HEFA ovat suhteellisen pienitiheyksistä polttoainetta verrattuna tavanomaiseen suihkupolttoaineeseen (Yang et al. 2019). Tämä johtuu aromaattisten hiilivetyjen puutteesta näissä komponenteissa. Siten sekoituskomponenttien lisääminen lentopetroliin pienentää lopullista tiheyttä (Vozka et al. 2019).

Mazlan et al. (2015) tekemän tutkimuksen mukaan tiheyden vaikutuksen arviointi polttoaineen kulutukseen osoitti, että moottorin kuluttama polttoaineen määrä kasvaa polttoaineen tiheyden kasvaessa. Biopolttoaineilla käyvän moottorin simuloinnista selviää, että polttoainetta kuluu vähemmän kuin käytettäessä moottoria tiheämmällä Jet A -polttoaineella. Simulointi suoritettiin siten, että turbiinin sisääntulolämpötilan arvo TET (turbine entry temperature) asetettiin vakioksi kaikentyyppisille polttoaineille. Siten polttoainesuuttimen on ruiskutettava suurempi massa tiheämpää Jet A -polttoainetta saman sisääntulolämpötilan saavuttamiseksi. Pienitiheyksistä biopolttoainetta on ruiskutettava pienempi massamäärä, jolloin polttoainetta kuluu vähemmän. Synteettisen parafiinisen petrolin tiheys on noin 7,7 % pienempi kuin Jet A -polttoaineen. Tutkimuksesta saatiin selville, että SPK:lla käyvä moottori kuluttaa noin 2,3 % vähemmän polttoainetta kuin Jet A:lla käyvä moottori. (Mazlan et al. 2015)

Vaikka biolentopolttoaineella on hiilivetyjä muistuttava koostumus, niillä on kaksi selkeää etua, jotka ovat sen uusiutuva raaka-aine ja rikitön luonne. Molemmat edut johtavat merkittäviin ympäristöhyötyihin. (Wang et al. 2019) Lisäksi biopolttoaineiden aromaattisten pitoisuuksien väheneminen verrattuna Jet A:han selittävät, miksi biopolttoaineiden palamisteho ja päästöt paranevat (Bergthorson & Thomson 2015). Biolentopolttoaineiden pienempi aromaattisten hiilivetyjen pitoisuus parantaa palamista, koska huonompaan palamistehokkuuteen vaikuttavat hiilidioksidi, palamattomat hiilivety- ja nokipäästöt ovat vähentyneet (Barbosa 2017). Myös SPK-polttoaineiden 2–2,5 % korkeampi vetypitoisuus suhteessa Jet A:han paransi niiden palamisominaisuuksia. Se ilmenee typpioksidimäärän merkittävänä 15–19 %:n vähenemisenä (Lokesh et al. 2015).

Bergthorsonin ja Thomsonin (2015) mukaan matalan lämpötilan sytytystutkimukset osoittavat, että HEFA-polttoaineet syttyvät helpommin kuin Jet A -polttoaineet. Se johtuu niiden korkeammasta setaaniluvusta (Hari et al. 2015) ja hiilivetyketjun suuremmasta haarautumisesta. Suurempi haarautuminen johtaa alhaiseen reaktiivisuuteen alhaisessa lämpötilassa, jolloin polttoaine syttyy helpommin (Bergthorson & Thomson 2015). Tämä on hyödyllistä moottorin kylmäkäynnistyksessä sekä uudelleensytytyksessä, jos moottori sammuu lennon aikana (Bergthorson & Thomson 2015). Lisäksi Jet A:ta parempien kylmävirtausominaisuuksiensa sekä alemman jäätymispisteen ansiosta HEFA:t sopivat hyvin myös korkeammille lennoille. (Wilson et al. 2013; Hari et al. 2015)

Mazlan et al. (2015) PYTHIA-tietokoneohjelmalla saadut tulokset osoittavat, että HEFA-polttoaineet tuottavat 0,09–0,012 % enemmän työntövoimaa kuin Jet A -polttoaine. Moottorin suorituskyky paranee lähes lineaarisesti biopolttoaineen osuuden kasvaessa seoksessa. Siten suurin työntövoima tuotetaan 100-prosenttisellä biopolttoaineella. (Mazlan et al. 2015) Hari et al. (2015) mukaan FT-polttoaineet puolestaan tuottavat pienemmän energiatihedyyden vuoksi alhaisemman tehon ja heikomman polttoainetalouden. (Hari et al. 2015)

3.2 Biolentopolttoaineen järjestelmiin aiheuttamat haasteet

3.2.1 Moottori

HEFA-lentopolttoaineet sopivat 50 %:n sekoitussuhteella perinteisiin lentokoneiden moottoreihin ilman tarvittavia lisämuutoksia (Hari et al. 2015). Fischer Tropsch-menetelmä tuottaa hiilivety-molekyylejä, joissa ei ole happipitoisuutta. Se johtaa erinomaiseen yhteensopivuuteen olemassa olevien moottoreiden ja polttoaineen syöttöjärjestelmien kanssa (Bergthorson & Thomson 2015). Lisäksi FT- ja HEFA-polttoaineiden palamisominaisuudet ovat hyvin samankaltaisia kuin perinteisillä öljypolttoaineilla. Siten biopolttoaineiden palamisen mallinnus voidaan toteuttaa lentopetrolia vastaavalla määrällä sijaiskomponentteja. Bergthorsonin ja Thomsonin (2015) mukaan moottorin rappeutumista tai epätavallisia hajuja ei ole raportoitu testattaessa moottoreita biopolttoaineilla. Lisäksi bioseosten liekin etenemisnopeuksien todetaan olevan hyvin samankaltaisia kuin perinteisissä Jet A -polttoaineissa. (Bergthorson & Thomson 2015) Selkeitä pelkästään moottoriin aiheutuvia haasteita ei siis ole raportoitu, koska polttoaineiden ominaisuudet ovat hyvin samankaltaiset.

Yksi haaste on kuitenkin moottoreiden ja polttoaineen laadun testaus (Hari et al. 2015). Biopolttoaineiden tarkka vaikutus moottoriin ja polttoainejärjestelmään on vielä tuntematon (Vozka et al. 2019). Tämä edellyttää kattavia moottoreiden ja lentokoneiden sertifiointikokeita, jotka ovat suhteellisen kalliita toteuttaa (Dorrington 2016).

Toinen haaste biolentopolttoaineissa on voitelukyvyyn puuttuminen. Voitelukyky mittaa polttoaineen kykyä vähentää moottorin komponenttien kulumista (Yang et al. 2019). Aromattisten aineiden ja rikin puute ovat hyviä ominaisuuksia biopolttoaineissa, koska ne vähentävät polttoaineen tuottamia noki- ja rikkikaasuja. Rikkilajien puute kuitenkin vähentää polttoaineen voitelukykyä ja lyhentää polttoaineella voideltavien osien, kuten polttoainepumppujen ja polttoainesuuttimien käyttöikä. (Graham et al. 2006)

Lentopolttoaineen voitelevuus liittyy polaarisiin pinta-aktiivisiin yhdisteisiin. (Hari et al. 2015) Pinta-aktiiviset yhdisteet voitelevat rajakerroksia, mikä vähentää kulumista. Pinta-aktiivisissa yhdisteissä on yleensä heteroatomeja, kuten happea ja rikkiä. FT-polttoaineet menettävät luontaisen voitelukykyä, koska heteroatomit eliminoituvat vetykäsittelyssä. (Repetto et al. 2016) Vetykäsittelystä johtuva hapen ja rikin täydellinen puuttuminen vähentävät myös HEFA-polttoaineen voitelua (Hari et al. 2015). Polttoaineiden heikkoa voitelukykyä voidaan parantaa sekoittamalla niitä tavanomaiseen lentopolttoaineeseen tai vaihtoehtoisesti käyttämällä lisäaineita (Hari et al. 2015).

Lisäksi biopolttoaineilla on suhteellisen huono hapettumiskestävyys verrattuna perinteisiin lentopolttoaineisiin (Yang 2019). Vetykäsittely poistaa luonnossa esiintyvät antioksidantit polttoaineista, jotka suojaavat sitä peroksidien vaikutuksilta. Hapettumisesta aiheutuvat peroksidit voivat vaurioittaa kemiallisesti polttoainejärjestelmien tiivisteitä. Siten irronneet kumit ja hiukkaset johtavat kertymiin moottorissa ja voivat lisäksi tukkia polttoainesuodattimet. Sen vuoksi antioksidantit ovat pakollisia ja niitä on lisättävä FT- ja HEFA-prosesseilla tuotettuihin polttoaineisiin. (Repetto et al. 2016).

3.2.2 Polttoainejärjestelmä

Mikrobikontaminaatio eli mikrobien leviäminen on ollut ilmailupolttoaineen ongelma 1950-luvulta lähtien. Kaikki lentopolttoaineet sisältävät hiilivetyjä, typpeä, rikkiä, fosforia ja hapettuja orgaanisia yhdisteitä. Nämä molekyylit tarjoavat välttämättömiä ravintoaineita mikro-organismien eli bakteerien ja sienten kasvulle. Mikro-organismien kasvu tuottaa bakteerikalvoja ja voi tuottaa syövyttäviä sivutuotteita. Polttoaine steriloidaan jalostamossa korkeassa lämpötilassa, mutta mikro-organismit voivat päästä polttoaineeseen heti, kun se on kosketuksissa ilman ja veden kanssa. (Repetto et al. 2016)

Polttoaineen hajoamisen ja bioaktiivisten aineiden tuotannon lisäksi biomassan ja biokalvon kertyminen voi johtaa polttoaineen virtauksen rajoittumiseen ja suodattimien tukkeutumiseen. Lisäksi ne voivat aiheuttaa liikkuvien osien, kuten venttiilien ja pumppujen toimintahäiriöitä. (Repetto et al. 2016) Mikrobikontaminaatio on uhka lentoturvallisuudelle myös mikrobiologisesti vaikuttavan korroosion ja polttoaineen pilaantumisen takia (Hu et al. 2020).

Metaboliitti on mikä tahansa yhdiste, joka osallistuu aineenvaihduntaan tai on aineenvaihduntatuote. Repetto et al. (2016) mukaan mikrobien tuottamat metaboliitit sisältävät heikkoja orgaanisia happoja. Hapot voivat reagoida polttoaineen epäorgaanisten suolojen kuten kloridien, nitraattien, nitriittien tai sulfaattien kanssa muodostaen voimakkaita epäorgaanisia happoja. Nämä hapot voivat edistää korroosiota polttoainejärjestelmässä. Lisäksi metaboliitit voivat vaikuttaa negatiivisesti metalleihin ja metalliseoksiin sekä heikentävät ja liuottavat suojaavia pinnoitteita. Epäorgaanisia happoja ovat kloorivety-, rikki- ja typpihapot. (Repetto et al. 2016)

Toinen haaste biolentopolttoaineissa tiivistemateriaalin ja polttoaineen yhteensopivuusongelma ja siitä mahdollisesti aiheutuvat polttoainevuodot. HEFA- ja FT-polttoaineet sisältävät hyvin vähän tai eivät ollenkaan aromaattisia hiilivetyjä. Se on hyväksi ympäristölle (Lokesh et al. 2015), mutta aromaattisen hiilivetyjen puute aiheuttaa nitriilikumitiivisteiden kuivumista, kutistumista ja siten mahdollisia polttoainevuotoja (Bergthorson & Thomson 2015; Repetto et al. 2016). Siksi ASTM määrittelee, että kaupallisessa käytössä lentopolttoaineiden on sisällettävä vähintään 8 tilavuusprosenttia aromaattisia aineita (Lokesh et al. 2015; Bergthorson & Thomson 2015; Repetto et al. 2016). Tämä määräys rajoittaa drop-in-polttoaineen seossuhteen 50 %:iin. Luvussa 3.2 tunnistetut haasteet on esitetty yhteenvetona taulukossa 3.

Seossuhdetta rajoittavien haasteiden nykyinen ratkaisu on sekoittaa synteettisiä kero-siineja öljypohjaiseen polttoaineeseen. Täten varmistetaan voitelukyvyyn ja aromaattisen pitoisuuden vähimmäismäärän eli 8 tilavuusprosentin säilyminen. Sekoittaminen vähentää kuitenkin monia täyssynteettisen polttoaineen etuja, sillä aromaattisten aineiden lisääminen lisää myös palamisen yhteydessä syntyvää noen määrää, ei toivottua vesiliukoisuutta ja sekoittamiskustannuksia (Repetto et al. 2016).

Taulukko 3. Yhteenveto järjestelmiin aiheutuneista haasteista.

Haaste	Tiivisteiden ja biopolttoaineen yhteensopivuusongelma	Heikko voitelukyky	Mikrobikontaminaatio ja mikrobeista aiheutuva korrosio	Peroksidien aiheuttamat vauriot	Laadun testaus ja pitkäaikaiset vaikutukset
Haasteen aiheuttaja	Materiaaliyhteensopivuuden puute, mikä johtuu aromaattisten hiilivetyjen puutteesta	Pinta-aktiivisten yhdisteiden puute	Mikrobien leviäminen polttoainejärjestelmiin sekä mikrobien tuottamat metaboliitit	Vetykäsittelystä johtuva antioksidanttien puute	Testaaminen on kallista ja pitkäaikaisia vaikutuksia ei ole keretty tutkia
Haasteen merkittävyys ja vaikutus seossuhteeseen	Merkittävä haaste ja rajoittaa seossuhdetta	Merkittävä haaste ja rajoittaa seossuhdetta	Melko merkittävä, mutta ei rajoita seossuhdetta	Ei merkittävä eikä rajoita seossuhdetta	Melko merkittävä, mutta ei rajoita seossuhdetta
Nykyinen ratkaisu	Sekoitepolttoaineet	Sekoitepolttoaineet sekä lisäaineet	Biosideja sisältävät lisäaineet	Antioksidantteja sisältävät lisäaineet	Standardit ja sertifiointit. Pitkäaikaisista vaikutuksista ei tutkimustietoa
Lähteet	(Lokesh et al. 2015) (Repetto et al. 2016) (Blakey et al. 2011)	(Hari et al. 2015) (Yang 2019) (Repetto et al. 2016)	(Hu et al. 2020) (Repetto et al. 2016)	(Repetto et al. 2016)	(Hari et al. 2015) (Vozka et al. 2019) (Dorrington 2016)

4. BIOLENTOPOLTTOAINEILTA JA JÄRJESTELMILTÄ VAADITTAVA KEHITYS

Drop-in-polttoaineiden käyttö tarjoaa välittömän ratkaisun synteettisen polttoaineen yhteensopivuusongelmaan sekä voiteluaineiden puutteeseen. Pidemmän aikavälin tavoite on kuitenkin käyttää suurempia seossuhteita ja lopulta täysin synteettistä eli 100-prosenttista biopolttoainetta. Se edellyttää edellisessä luvussa tunnistettujen sekoitussuhdetta rajoittavien haasteiden huomioimista ja ratkaisemista. Tässä luvussa käsitellään ratkaisuja edellisen luvun haasteisiin sekä suurempien seossuhteiden mahdollistamiseksi.

4.1 Nykyisten järjestelmien kehitys

Moottoria ei olla halukkaita kehittämään ja muokkaamaan, sillä se on liian kallista verrattuna siitä saatavaan hyötyyn. Helpompi on kehittää polttoainetta ja sen ominaisuuksia järjestelmiin sopiviksi. Kuitenkin moottorin toiminnan mallintamista ja siten biopolttoaineiden vaikutusten arvioimista voidaan kehittää. Blakey et al. (2011) mukaan on otettava käyttöön malleja, joiden avulla polttokammion suorituskyky voidaan määrittää polttoaineen kemiallisen koostumuksen perusteella. On ymmärrettävä paremmin, kuinka iso- ja normaaliparafiinien sekä syklisten parafiinien suhde polttoaineessa vaikuttavat palamistehoon, moottorin toimintaan ja materiaalien yhteensopivuuteen. Lisäksi on pystyttävä arvioimaan aromaattisten hiilivetyjen ja niiden molekyyliainemassojen vaikutuksia järjestelmien suorituskykyyn. (Blakey et al. 2011)

Blakey et al. (2011) mukaan, jos aromaattisten hiilivetyjen pitoisuus on liian alhainen niin polttoainejärjestelmän ja moottorin ikääntyvät tiivisteet voivat vuotaa (Blakey et al. 2011). Jotta vältetään tämä ongelma tiivisteiden ja biopolttoaineen välillä, lentopolttoaineiden on sisällettävä vähintään 8 tilavuusprosenttia aromaattisia hiilivetyjä. Yhteensopivuusongelma ratkaistaan sekoitepolttoaineiden avulla, mutta se vähentää biopolttoaineista saatavia hyötyjä ja rajoittaa sekoitussuhdetta.

Biolentopolttoaineiden yhteensopivuus tiivisteiden kanssa riippuu polttoainesisällön lisäksi myös erilaisista O-rengasmateriaaleista. Tämän takia on alettu etsimään vaihtoehtoisia materiaalia nitrilikumitiivisteille. Viimeaikainen tutkimus on osoittanut, että fluo-

riihi- ja fluorisilikonikumien ominaisuudet biopolttoaineiden kanssa ovat nitrilikumia parempia. Nämä vaihtoehtoiset materiaalit eivät ole niin herkkiä polttoaineen koostumuksen muutoksille. (Dorrington 2016) Lisäksi aromaattisten aineiden vaikutus niihin on paljon pienempi (Yang et al. 2019). Niiden ongelmana on kuitenkin se, että tiivisteet pitäisi vaihtaa olemassa olevien ilma-alusten polttoainejärjestelmiin ennen uusien biopolttoainesekoitusten käyttöönottoa. (Dorrington 2016)

4.2 Polttoaineen kehitys

Repetto et al. (2016) mukaan täysin synteettistä eli 100-prosenttista drop-in-polttoainetta ei todennäköisesti kehitetä lähitulevaisuudessa. Erilaisia lisäaineratkaisuja tutkitaan, jotta käyttöön saataisiin suurempia seossuhteita. Lisäaineet ovat kustannustehokas tapa parantaa biopolttoaineiden ominaisuuksia, kun otetaan huomioon, että monet lisäaineista ovat jo valmiiksi pakollisia tavanomaisissa polttoaineissa. (Repetto et al. 2016) Lisäaineiden avulla voidaan ratkaista moni kappaleessa 3.2 tunnistetusta haasteesta.

Yksi lisäaineilla ratkaistava haaste on voitelukyky. Parhaimmat voiteluvaikutukset saavutetaan polaarisia ryhmiä sisältävillä yhdisteillä. Polaarinen ryhmä tarttuu metallipintaan muodostaen ohuen kerroksen lisäainetta pinnoille, jolloin haluttu voiteluvaikutus syntyy. Polaarisen luonteensa vuoksi näillä lisäaineilla voi kuitenkin olla haitallisia vaikutuksia lentokentän suodatusjärjestelmiin sekä polttoaineen ja veden erotusominaisuuksiin. (Repetto et al. 2016) Sen takia tarvitaan huomattavasti enemmän tutkimustyötä biolentopolttoaineiden voitelukyvyyn tutkimiseksi. Voitelukyvyyn tutkiminen on tärkeää, jotta voidaan siirtyä kohti täysin synteettisiä biolentopolttoaineita. (Yang et al. 2019)

Myös mikrobien leviäminen polttoainejärjestelmiin sekä mikrobien tuottamat metaboliitit voidaan estää lisäaineiden avulla. Mikrobien torjunnassa käytetään biosidia. Biosidi on kemiallinen aine, joka tuhoaa, poistaa tai tekee toimintakyvyttömäksi ei-toivottuja organismeja. Repetto et al. (2016) mukaan biosidit estävät erittäin tehokkaasti mikrobien kasvua lentopolttoaineissa. Rungas biokalvo voi kuitenkin estää biosidin pääsyn syvällä eläviin mikrobeihin, jolloin biosidit eivät pääse tuhoamaan niitä. Tässä tapauksessa säiliö on tyhjennettävä manuaalisesti. Lisäksi ihmisen altistuminen väkeville kantaliuoksille laimennusprosessin aikana voi aiheuttaa syövyttäviä palovammoja, kosketusihottumaa ja allergista herkistymistä. (Repetto et al. 2016)

Kolmas lisäaineilla ratkaistava haaste on hapettumisesta aiheutuvien peroksidien torjuminen antioksidanteilla. Antioksidantti on aine, joka estää tai hidastaa hapettumista. Repetto et al. 2016 mukaan antioksidantteja lisätään parantamaan polttoaineen säilyvyyttä.

Lisäksi niiden avulla pystytään estämään peroksidien, liukenevien kumien sekä hapeusreaktioista aiheutuvien liukenemattomien hiukkasten muodostumista. (Repetto et al. 2016)

Myös polttoaineen ja tiivisteiden yhteensopivuusongelma on mahdollista ratkaista lisäainneiden avulla. Repetto et al. 2016 mukaan synteettiset polttoaineet, joihin on sekoitettu 1, 0,75 tai 0,5 tilavuusprosenttia bentsyylialkoholia, ovat osoittaneet öljypolttoaineita vastaavan kyvyn ylläpitää tiivisteitä. Sillä voitaisiin estää mahdollisesti aiheutuvat polttoainevuodot kustannustehokkaasti. Vaikutukset lentokoneiden polttoainejärjestelmiin ja moottoreihin on kuitenkin tutkittava ja mitattava ennen kuin lisäainetta voidaan käyttää. (Repetto et al. 2016)

Bergthorsonin ja Thomsonin mukaan (2015) ei näytä olevan mitään teknistä syytä, joka estäisi synteettisiä ja biopohjaisia polttoaineita korvaamasta 100-prosenttisesti öljypolttoaineita. Kustannukset ovat todennäköisesti kriittinen tekijä, joka rajoittaa biopolttoainneiden aktiivikäyttöön ottamista. (Bergthorson & Thomson 2015)

Myös Dorringtonin (2016) mukaan olisi mahdollista kehittää täysin synteettinen biolentopolttoaine, jota pidetään käyttötarkoitukseen soveltuvana ASTM D4054 -standardin mukaisesti. Tämä edellyttäisi kuitenkin kattavia moottorien ja lentokoneiden sertifiointikoikeita sekä tarvetta ottaa lentokentille käyttöön erilliset polttoaineen syöttöjärjestelmät. Uusien järjestelmien käyttöönottoaminen on kuitenkin liian kallista. Tämän takia teollisuuden pääpaino on ollut viime vuosina sekoitusratkaisujen kehittämisessä. (Dorrington 2016)

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää biopolttoaineiden vaikutuksia sekä teknisiä haasteita lentokoneen järjestelmiin. Lisäksi työn tavoitteena oli selvittää biolentopolttoaineilta ja järjestelmiltä vaadittavaa kehitystä kohti 100-prosenttista biopolttoainetta. Kandidaatintyössä tehtävä teoreettinen tutkimus toteutettiin kirjallisuusselvityksenä. Työn tavoitteet saavutettiin hyvin ja kirjallisuudesta löytyi kaikkiin tutkimuskysymyksiin vastauksia.

Tutkimuksesta voidaan päätellä, että ilmailualalla pyritään kehittämään biopolttoainetta eikä lentokoneen järjestelmiä. Uusien järjestelmien kehittäminen ja muokkaaminen sopiviksi olemassa oleviin lentokoneisiin on liian kallista verrattuna biopolttoaineen hyötyihin. Järkevämpää on kehittää polttoaineet nykyisiin järjestelmiin sopiviksi.

Drop-in-biolentopolttoaineen ominaisuudet sekä vaikutus moottoriin ja polttoainejärjestelmään 50 tilavuusprosentin sekoitussuhteella ovat hyvin samankaltaisia kuin Jet A tai Jet A-1 -polttoaineiden. Kirjallisuudesta selviää, että biolentopolttoaineesta aiheutuvat päästöt pienenevät, sillä polttoaineet on valmistettu uusiutuvista raaka-aineista, eivätkä ne sisällä rikkiä. HEFA-polttoaineen tiheys on pienempi, jolloin polttoainetehokkuus paranee ja kulutus pienenee. HEFA-polttoaine syttyy helpommin ja sen kylmävirtausominaisuudet ovat paremmat, jolloin se sopii paremmin korkeammille lennoille. Lisäksi HEFA tuottaa tavanomaista polttoainetta enemmän työntövoimaa, jolloin tehokkuus paranee. FT-polttoaineella on puolestaan alhaisempi energiatiheys, jolloin se tuottaa vähemmän tehoa ja sillä on huonompi polttoainetehokkuus. Ainakin HEFA-biolentopolttoaineella on Jet A -tai Jet A-1 -polttoaineita paremmat ominaisuudet ja siten hyvät näkymät tulevaisuuden polttoaineena.

Tutkimuksen mukaan 50 %:n seossuhde ei aiheuta teknisiä haasteita moottorille eikä polttoainejärjestelmälle. Haasteet alkavat, kun seossuhde ylittää 50 tilavuusprosenttia. Tutkimuksessa löytyi kaksi seossuhdetta rajoittavaa tekijää: polttoaineen ja tiivisteiden välinen yhteensopivuusongelma sekä voitelukyvyyn puute. Lisäksi tunnistettiin polttoaineisiin yleisesti liittyvä mikrobikontaminaatio sekä vetykäsittelystä johtuva antioksidanttien puute. Myös moottoreiden ja polttoaineiden laadun testaus luokitellaan haasteeksi, sillä biopolttoaineiden tarkka ja pitkäaikainen vaikutus moottoriin ja polttoainejärjestelmään on vielä tuntematon.

Viimeinen tutkimuskysymys käsittelee ratkaisuja esille tulleisiin haasteisiin. Voitelukyvyyn puute, mikrobikontaminaatio sekä peroksidien syntyminen voidaan ratkaista lisäaineilla. Voitelukyvyyn puute voidaan ratkaista lisäämällä polttoaineeseen voitelukykyä lisääviä polaarisia yhdisteitä. Mikrobikontaminaatio voidaan estää biosidien avulla ja peroksidien syntyminen voidaan estää lisäämällä antioksidantteja. Laatua ja pitkäaikaisvaikutuksia voidaan testata ja arvioida erilaisten mallinnusten, mallien sekä testauksesta kertyvän kokemuksen avulla.

Sekoitussuhdetta eniten rajoittava biopolttoaineen ja nykyisten nitriliikumitiivisteiden yhteensopivuusongelma voidaan ratkaista vaihtamalla tiivisteiden materiaali esimerkiksi fluorihiili- ja fluorisilikonikumiksi. Tiivisteiden vaihtaminen olemassa oleviin polttoainejärjestelmiin olisi suuri ja kallis operaatio ja siten käytännössä mahdoton toteuttaa. Siksi yhteensopivuusongelmaan tutkitaan mahdollista lisäaineratkaisua. Bentsyylialkoholin on osoitettu ylläpitävän tiivisteitä samalla tavalla kuin aromaattisia hiilivetyjä sisältävien polttoaineiden. Lisäaineratkaisu olisi helppo toteuttaa, mutta sen vaikutus moottoriin ja polttoainejärjestelmään on kuitenkin tutkittava ennen sen käyttöä.

Ilmailuala pyrkii siis panostamaan sekoitepolttoaineisiin, mutta täysin synteettisen biopolttoaineen mahdollisuutta tutkitaan. Täysin synteettinen biopolttoaine on teknisesti mahdollista kehittää, koska sen järjestelmiin aiheuttamat haasteet voidaan ratkaista pääosin lisäaineiden avulla. Kehittäminen vaatii kuitenkin paljon sertifiointeja ja tutkimuksia. Jotta biopolttoaineilla olisi tulevaisuutta, lisäaineratkaisujen tutkimiseen ja kehittämiseen on panostettava enemmän. Lisäaineiden tarkka vaikutus järjestelmiin on tutkittava ennen niiden käyttöä. Jatkotutkimuksena voitaisiinkin selvittää lisäaineiden vaikutuksia moottoriin ja polttoainejärjestelmään, ja mahdollistavatko lisäaineet täysin synteettisen biolentopolttoaineen kehittämisen. Lisäaineiden tarkempi tutkiminen olisi tärkeää, koska niiden avulla voidaan ratkaista lähes kaikki järjestelmiin aiheutuneet haasteet.

Työ on selventävä tutkimus biolentopolttoaineen aiheuttamista haasteista moottoriin ja polttoainejärjestelmään. Lisäksi työssä on tutkittu mahdollisia ratkaisuja näihin haasteisiin. Työn tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi tutkimuksessa, jossa kohteena on jokin muu biopolttoainetta käyttävä ajoneuvo.

Tutkimuksen tuloksiin on syytä suhtautua kriittisesti, sillä siihen on käytetty melko pientä määrää lähteitä, ja siten joitakin oleellisia tietoja on voinut jäädä havaitsematta. Työ on rajattu koskemaan kahta yleisintä FT- ja HEFA-polttoainetta, joten tietoja ei voida yleistää koskemaan kaikkia biopolttoaineita. Lisäksi työssä on käytetty pääosin 5–10 vuotta vanhoja lähteitä nopeasti kehittyvän alan tutkimiseen, jolloin uusimmat havainnot jäävät huomioimatta.

LÄHTEET

Abrantes, I., Ferreira, A.F., Silva, A. & Costa, M. (2021). Sustainable aviation fuels and imminent technologies - CO2 emissions evolution towards 2050. *Journal of cleaner production*. [Online] Elsevier. 313127937–.

Blakey, S., Rye & L. Wilson, C.W. (2011). Aviation gas turbine alternative fuels: A review. *Proceedings of the Combustion Institute*. [Online] Elsevier. 33 (2), 2863–2885.

Barbosa, F. (2017) "Biojet Fuel - A Tool for a Sustainable Aviation Industry - A Technical Assessment," SAE Technical Paper 2017-36-0142, <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.4271/2017-36-0142>.

Bergthorson, J. M. & Thomson, M. J. (2015.) A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their impact on existing and future engines. *Renewable & sustainable energy reviews*. [Online] Elsevier. 421393–1417.

Chuck, C. J. (2016). *Biofuels for aviation: feedstocks, technology and implementation*. London: Academic Press. <https://learning.oreilly.com/library/view/biofuels-for-aviation/9780128032152/xhtml/chp011.xhtml#st0020>

Dorrington, G. E. (2016). *Certification and Performance: What Is Needed from an Aviation Fuel?* In *Biofuels for Aviation*. Academic Press. 35–44.

Graham, J. L., Striebich, R. C., Myers, K. J., Minus, D. K., & Harrison, W. E. (2006). Swelling of nitrile rubber by selected aromatics blended in a synthetic jet fuel. *Energy & fuels*, 20(2), 759-765.

Hari, K. T., Yaakob, Z. & Binitha, N. N. (2015). Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities, and challenges. *Renewable & sustainable energy reviews*. [Online] Elsevier. 421234–1244.

Lewis, K. C. (2010). *Commercial aviation alternative fuels initiative*.

Lokesh, K. et al. (2015). Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance. *Biomass & bioenergy*. [Online] Elsevier. 7726–44.

Mazlan, N. M., Savill, M. & Kiporous, T. (2015). Effects of biofuels properties on aircraft engine performance. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*. [Online] Proquest. 87 (5), 437–442.

Noh, H.M., Benito, A. & Alonso, G. (2016). Study of the current incentive rules and mechanisms to promote biofuel use in the EU and their possible application to the civil aviation sector Transport. *Res. Transport Environ*. Elsevier. 46, 298–316.

Lapuerta, M., & Canoira, L. (2016). The suitability of Fatty Acid Methyl Esters (FAME) as blending agents in Jet A-1. In *Biofuels for Aviation*. Academic Press. 47–84

Repetto, S. L., Costello, J. F., & Parmenter, D. (2016). Current and potential aviation additives for higher biofuel blends in Jet A-1. In *Biofuels for Aviation*. Academic Press. 261-275.

Rötger, T. (2016). *On Board a Sustainable Future, ICAO environmental report 2016, aviation and climate*. 2016. Environment Branch of the International Civil Aviation Organization (ICAO). Viitattu 21.10.2021 <http://www.icao.int/environmentalprotection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>.

Schäfer, A. W. (2016). The Prospects for Biofuels in Aviation. In *Biofuels for Aviation*. Academic Press. 3–16

Vozka, P., Vrtiška, D., Šimáček, P. & Kilaz, G. (2019). Impact of Alternative Fuel Blending Components on Fuel Composition and Properties in Blends with Jet A. *Energy & fuels*. [Online] ACS publications. 33 (4), 3275–3289.

Yang, J., Xin, Z., Corscadden, K., & Niu, H. (2019). An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. *Fuel*, 237, 916-936.

Wang, M., Dewil, R., Maniatis, K., Wheeldon, J., Tan, T., Baeyens, J., & Fang, Y. (2019). Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*, 74, 31–49.

Wilson, G. R., Edwards T., Corporan, E. & Freerks, R.L. (2013). Certification of Alternative Aviation Fuels and Blend Components. *Energy & fuels*. [Online] ACS publications. 27 (2), 962–966.

LIITTEET

Liite 1. Polttoaineen valmiustasotaulukko lähteestä (Lewis 2010 s 11).

Fuel Readiness Level Scale				
FRL	Description	Exit Criteria		
1	Basic Principles	Feedstock / Process Observed / Reported		
2	Concept Formulated	Feedstock / Complete Process identified.		
3	Proof of Concept	Basic Fuel Properties Validated at Lab Scale		0.13 US gal. (500 ml)
4.1 4.2	Preliminary Technical Evaluation	System Perf. & Integration Studies Entry Criteria/Specification Properties		10 US gal. (37.8 L)
5	Process Validation	Scaling from Laboratory to Pilot plant		80 US gal. (302.8 L) to 225,000 US gal. (851,718 L)
6	Full-Scale Technical Evaluation	Fuel Properties, Rig and Engine Testing		80 US gal. (302.8 L) to 225,000 US gal. (851,718 L)
7	Fuel Approval	Fuel Class/Type Listed in Int'l Fuel Standards		
8	Commercialization	Commercial Purchase Agreements		
9	Production Capability Established	Full Scale Plant Operational		
Legend:		R & D	Certification/ Qualification	Business & Economics