

Jesper Koskinen

# **LENTOKONEIDEN BIOPOLTTOAINEIDEN HYÖDYLLISYYS JA KÄYTETTÄVYYS EUROOPASSA**

Kandidaatintyö  
Konetekniikan tiedekunta  
Tarkastaja: Tuomas Salomaa  
Huhtikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Jesper Koskinen: Lentokoneiden biopolttoaineiden hyödyllisyys ja käytettävyys Euroopassa  
(The usability and usefulness of aviation biofuels in Europe)

Kandidaatin työ

Tampereen yliopisto

Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, konetekniikka

Huhtikuu 2022

---

Ilmailusektori aiheuttaa tällä hetkellä noin 2 % kaikista kasvihuonepäästöistä ja se kasvaa voimakkaasti. Ilmailussa lentokoneiden uudelleen kehittäminen on hidasta ja kallista, joten helpoin tapa nopeasti vaikuttaa sen kasvihuonepäästöihin olisi biopolttoaineet, joita voisi käyttää nykyisissä lentokoneissa.

Työ rajataan koskemaan Euroopan aluetta ja drop-in-biopolttoaineita, eli biopolttoaineita, joita voi käyttää suoraan nykyisissä lentokoneissa. Työssä ei tutkita eri biopolttoaineiden tuotantomenetelmiä, eikä niiden kemiallisia ominaisuuksia. Tässä työssä tutkitaan biopolttoaineiden taloudellisuutta, päästövähennyksien potentiaalia ja niiden tuotantopotentiaalia Euroopassa. Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena. Työn alussa käydään läpi lentoliikenteen ja sen hinnan kehitystä, määritellään drop-in-biopolttoaine ja puhutaan sen kestävästä kehityksestä sekä päästövähennysmekanismista. Lisäksi alussa puhutaan myös muista päästöjä vähentävistä polttoaineratkaisusta ilmailussa.

Tämän jälkeen työssä käsitellään tutkimuskysymyksiä aihepiireittäin. Tutkimuksessa huomataan, että biopolttoaineet pystyvät vähentämään kymmeniä prosentteja lennon päästöistä, mutta rajallisen biopolttoainetuotantokapasiteetin takia päästövähennykset jäävät hyvin pieniksi Euroopassa. Euroopassa voidaan tuottaa lähitulevaisuudessa vain noin 1 % ilmailun polttoainekysynnästä.

Biopolttoaineet vaikuttavat ilmailuun todennäköisesti hidastamalla ilmailun kasvunopeutta, koska ne ovat kerosiinia kalliimpi vaihtoehto. Kerosiinin hinta on historiallisesti vaihdellut paljon, joten on epäselvää millainen hintaero niillä tulee olemaan tulevaisuudessa. Päästöoikeudet tulevat nostamaan kerosiinin hintaa tulevaisuudessa. Myös RIN-krediiteillä voidaan saada biopolttoaineet hinnaltaan vastaaviksi kerosiinin kanssa.

Tutkimuksessa huomataan, että biopolttoaineet toimivat, mutta eivät ole yksinään riittävä ratkaisu vähentämään ilmailun kasvihuonepäästöjä. Biopolttoaineita ei pystytä tuottamaan riittäväällä mittakaavalla Euroopassa.

Avainsanat: Lentokone, kestävä kehitys, biopolttoaineet, drop-in-biopolttoaine, drop-in-polttoaine

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

## SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ILMAILU JA BIOPOLTTOAINEET .....	4
2.1 Ilmailun nykytilanne ja tulevaisuudennäkymät .....	4
2.1.1 Lentoliikenteen kehitys .....	4
2.1.2 Ilmailun hinnan kehitys .....	6
2.2 Drop-in-biopolttoaineet .....	7
2.2.1 Drop-in-polttoaineiden hyväksyminen ilmailuun .....	8
2.2.2 Biopolttoainekehityksen haasteet .....	9
2.3 Kestävä kehitys biopolttoaineissa .....	10
2.4 Biopolttoaineiden päästövähennykset .....	10
2.5 Muut päästöjä vähentävät polttoaineratkaisut .....	12
2.5.1 Vedyllä toimivat lentokoneet .....	12
2.5.2 Akkukäyttöiset lentokoneet .....	13
3. BIOPOLTTOAINEIDEN VAIKUTUKSET JA TEHOKKUUS .....	15
3.1 Biopolttoaineiden tuomien päästövähennyksien tehokkuus .....	15
3.1.1 Kasvihuonepäästövähennykset yksittäisillä lennoilla .....	15
3.1.2 Kasvihuonepäästövähennykset koko ilmailusektorilla .....	16
3.2 Biopolttoaineiden kasvattaminen ja valmistaminen Euroopassa .....	17
3.3 Biopolttoaineiden vaikutukset nykyjärjestelmässä .....	19
3.3.1 Huolet biopolttoaineiden käytöstä .....	19
3.3.2 Lufthansan kokemukset biopolttoaineiden käytöstä .....	20
3.4 Biopolttoaineiden hinta ja sen vaikutus ilmailuun .....	20
3.4.1 Biopolttoaineiden ja kerosiinin hinta .....	20
3.4.2 Biopolttoaineiden hinnan vaikutukset ilmailuun .....	22
4. YHTEENVETO .....	25
5. LÄHTEET .....	27
LIITTEET .....	31

# 1. JOHDANTO

Ilmaliikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi on tärkeä kehittää ratkaisuja lentokoneisiin vähentämään niiden päästöjä. Tällä hetkellä ilmailusektorin päästöt ovat noin 2 % ihmisperäisistä kasvihuonepäästöistä (Deane & Pye 2018). Ilmailun määrän katsotaan lisääntyvän tulevaisuudessakin (Cox et al. 2014) Covid-19-pandemian aiheuttaman hidastuksesta huolimatta (Barke et al. 2022), joten kasvihuonepäästöt tulevat lisääntymään jatkossa. Ilmaliikenteestä tulee yhä tärkeämpi osa nyky maailmantaloutta, joten helposti kytkettävä ratkaisu nykyjärjestelmiin olisi hyvin arvokas.

Lentoliikenne on koko historiansa ajan käyttänyt polttoaineena kerosiinia, joka aiheuttaa 77–91 % kaikista ilmailusektorin päästöistä (Barke et al. 2022). Sen vahvuuksia ovat helppo säilytettävyyys maassa ja lentokoneessa, korkea energiatiheys ja hyvä saatavuus. Kerosiinilla on hyvä saatavuus, koska sitä saadaan sivutuotteena valmistettaessa muita öljyalaatuja. Öljy jalostetaan tislaamalla tislaustornissa, jossa eri korkeuksilla tiivistyy eri öljyalaatuja laskevan lämpötilan takia. Täten, kun raakaöljyjä prosessoidaan, saadaan aina kerosiinia.

Ilmailun aiheuttamien kasvihuonekaasujen vähentäminen on hyvin haastavaa, koska suihkumootorit vaativat nestemäistä polttoainetta. Suihkumootoreista voimanlähteenä on siirryttävä pois, jos siirrytään pois perinteisistä nestemäisistä polttoaineista. Lentokoneet voitaisiin suunnitella toimimaan sähköllä, mutta koska kokonaispainon säästäminen on hyvin tärkeää, ei nykyiset akut pääse lähellekään nestemäisen polttoaineen energiatheyttä. Täten ilmailuille helpoin ratkaisu olisi sellainen nestemäinen polttoaine, joka ei saastuta.

Ilmailussa käytetyt biopolttoaineet aiheuttavat 40–80 % vähemmän kasvihuonepäästöjä verrattuna kerosiiniin (Cox et al. 2014; Kousoulidou & Lonza, 2016; Sharma et al. 2021). Vähennykseen vaikuttaa mitkä ovat biopolttoaineen raaka-aineet, millä prosessilla biopolttoaineet ovat valmistettu ja kuinka puhdasta sähköä on käytetty jalostuksessa. Biopolttoaineet halutaan valmistaa mahdollisimman lähellä käyttöpaikkaa, jotta niiden kuljetus aiheuttaisi mahdollisimman vähän päästöjä. Paikallisella raaka-aineilla ja muun muassa sähköntarjonnalla on siis myös suuri merkitys. Toisaalta, jos metsiä kaadetaan biopolttoaineiden kasvattamisen takia, sen

kaikki hyödyt voivat kadota. On siis tärkeää, että biopolttoaineet valmistetaan järkevällä ja kestäväällä tavalla.

Tällä hetkellä biopolttoaineet maksavat monta kertaa enemmän kuin tavallinen kerosiini (Capaz et al. 2020; Sharma et al. 2021; Trejo-Pech et al. 2021; Barke et al. 2022). Nykytuotanto ei kuitenkaan saavuta suuremman tuotannon etuja, joten biopolttoaineiden hinta voisi olla halvempi kuin nykyään (Capaz et al. 2020; Santos & Delina, 2021). Ei ole siis selvää, kuinka paljon hinta eroaisi kerosiinin hinnasta tilanteessa, jossa biopolttoaineita käytettäisiin merkittävästi. On myös otettava huomioon muut biopolttoaineen tuomat edut. Euroopassa tällä hetkellä jopa yli 90 % kerosiinista tuodaan EU:n ulkopuolelta (*Oil and petroleum products - a statistical overview*), joten paikallinen tuotanto parantaisi energiatuotannonsuorityyttä. Lisäksi biopolttoaineisiin käytetyt rahat pysyisivät Euroopassa, kun biopolttoaineet kasvatetaan ja tuotetaan lähellä käyttöpaikkaa.

Tämän työn tavoite on tutkia, kuinka hyviä biopolttoaineet ovat ilmailulle ja arvioidaan, kuinka hyvä ratkaisu ne ovat ilmailulle. Tätä arvioidaan seuraavien tutkimuskysymyksien avulla:

- 1) Kuinka paljon biopolttoaineet todellisuudessa auttavat päästöjen vähennyksessä?
- 2) Voiko biopolttoaineita tuottaa riittävällä mittakaavalla Euroopassa?
- 3) Kuinka kallista biopolttoaineiden käyttö on?
- 4) Kuinka paljon biopolttoaineiden hinta vaikuttaisi ilmailuun?

Työ rajataan koskemaan Euroopan aluetta, ja tässä työssä tarkastellaan biopolttoaineiden taloudellisuutta ja ympäristöystävällisyyttä keskittyen sellaisiin biopolttoaineisiin, jotka voidaan suoraan laittaa kerosiinin sekaan tai korvata kerosiinin kokonaan. Työ ei tarkastele erilaisia biopolttoaineiden tuotantomenetelmiä tai kemiallisia prosesseja.

Käytän tutkimusmenetelmänä pääasiassa kirjallisuustutkimusta. Käytän Andorista aiheeseeni liittyviä avainsanoja ja käytän lähteitä, jotka

- i) liittyvät yleisesti aiheeseeni ja/tai tutkimuskysymyksiini
- ii) ovat mahdollisimman tuoreita tutkimuksia
- iii) ovat vertaisarvioituja tutkimuksia
- iv) on käytettynä lähteenä tutkimukseen, jonka olen jo löytänyt.

Työn toisessa luvussa käsitellään ilmailun kehitystä ja mitä drop-in-polttoaineita on, sekä aiheen teoriallista taustaa aikaisemman kirjallisuuden perusteella. Kolmannessa luvussa käsitellään tutkimuskysymyksiä aihepiireittäin, sekä toisessa luvussa käsiteltyä tietoa ja vastataan sen perusteella tutkimuskysymyksiin. Lisäksi kolmannessa luvussa myös esitellään jonkin verran sellaista teoriaa, joka ei kuulu mihinkään toisen luvun kappaleisiin.

## 2. ILMAILU JA BIOPOLTTOAINEET

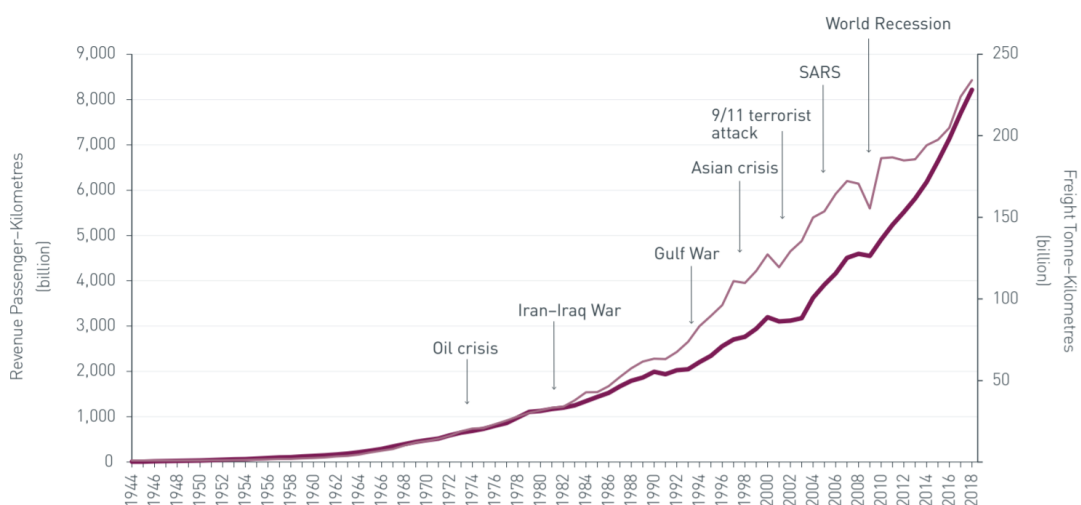
Tässä luvussa taustoitetaan ilmailua ja siihen yhteensopivia biopolttoaineita. Tarkastelussa on erityisesti ilmailun määrän kehittyminen ja sen suhde ilmailun hintaan. Lisäksi luvussa määritellään drop-in-biopolttoaine ja mitä kriteerejä sillä on yhteensopivuuden kannalta sekä mitä kestävä kehitys tarkoittaa biopolttoaineissa.

### 2.1 Ilmailun nykytilanne ja tulevaisuudennäkymät

Ennen Covid-19-pandemiaa ilmailun katsottiin olevan vahvassa kasvussa 5 %:n vuosittaisella kasvuvauhdilla (Schäfer 2016), mutta ilmailun energiatehokkuus on ennustettu kasvavan vain 1 %:n vuodessa (European Environment Agency 2018). Tällainen kasvu tarkoittaisi ilmailun määrän kaksinkertaistumista noin joka 14. vuosi, ja päästöt kaksinkertaistuisivat noin joka 18. vuosi. Näiden ennustusten jälkeen tapahtunut pandemia on kuitenkin vähentänyt ilmailun määrää ja hidastanut sen kasvunopeutta.

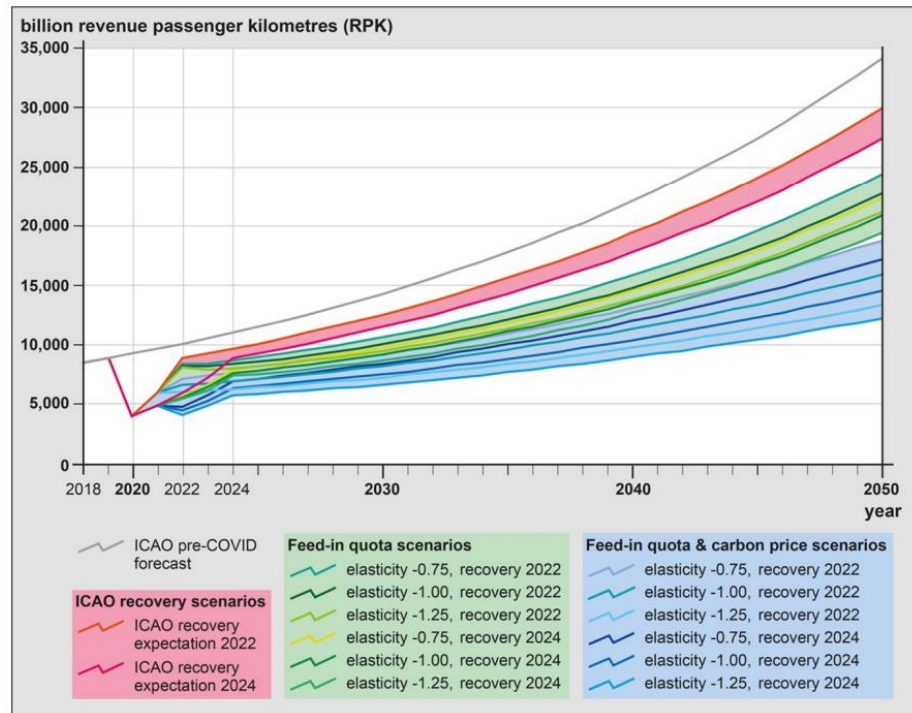
#### 2.1.1 Lentoliikenteen kehitys

Ilmailu on kasvanut viimeiset 50 vuotta melko tasaisesti vallitsevista kriiseistä ja maailmantalouden tilanteista huolimatta. Kuvassa 1 on esitetty ilmailun historiallinen kehitys.



**Kuva 1.** Matkustaja- ja rahtilentojen määrän kehitys ('Aviation benefits' 2019, s.12).

Vuonna 2020 oli kuitenkin Covid-19-pandemian takia 75 % vähemmän lentoja verrattuna vuoteen 2019, jolloin ilmailun määrä oli alimmillaan 30 vuoteen. Kuvasta 2 nähdään, että ilmailun odotetaan kuitenkin toipuvan entiselle tasolle ja kasvavan siitä eteenpäin.



**Kuva 2.** Ilmailun kasvuennusteet eri skenaarioilla (Gössling et al. 2021).

Gössling et al. (2021) tutkivat, miten biokerosiinin käyttövaatimukset, päästöoikeudet ja kysynnän hintajousto vaikuttavat ilmailun kasvuun. Tutkimuksen pessimistisimmässäkin skenaariossa ilmailu tulee toipumaan ja ohittamaan vuoden 2019 tason noin seuraavassa 15 vuodessa. Eurooppalainen lentokonevalmistaja Airbus taas odottaa kasvun olevan pandemian jälkeen 3,9 % vuosittain, mikä vastaisi edellä mainitussa tutkimuksessa skenaariota, jossa ei käytetä päästörajoitusmenetelmiä. Pandemia on hidastanut Airbusin kasvuennusteita, sillä ennen pandemiaa se odotti 4,4 %:n vuosikasvua.

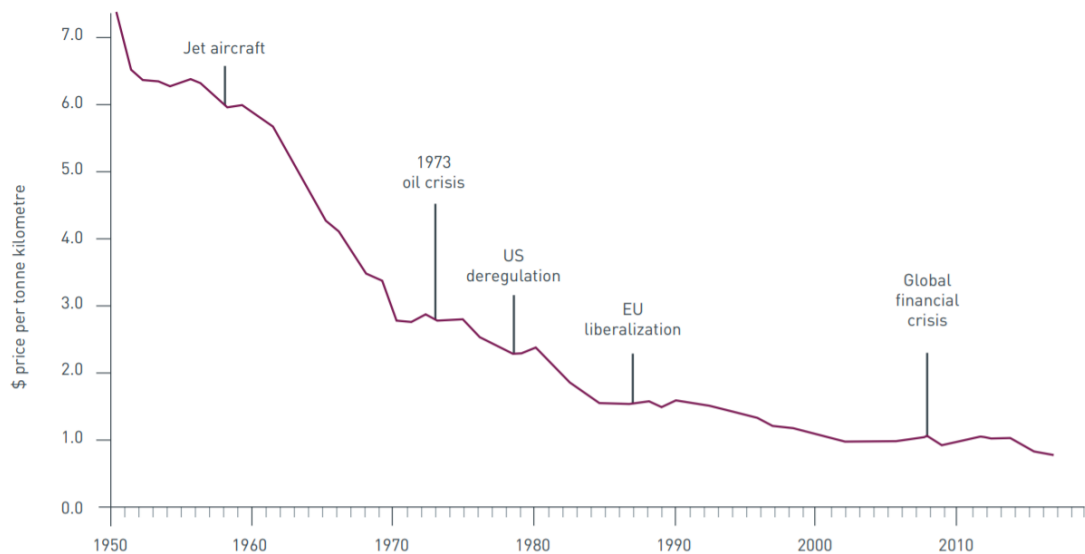
Ilmailun kasvu perustuu pääasiassa keskiluokan vaurastumiseen (Hakim & Merkert, 2016), lisäksi selittäviä tekijöitä ovat teknologian kehittyminen, sen halpeneminen sekä väestönkasvu (Tolga & Gökmen 2021). Esimerkiksi Intiassa ilmailu on hyvin vahvassa kasvussa, koska nämä kaikki kolme tekijää ovat suuria Intiassa. Euroopassa taas kasvu on hitaampaa, koska Euroopan talous on kypsempi, jolloin keskiluokka ei enää vaurastu nopeaa vauhtia sekä Euroopassa väestönkasvu on hidasta.



## 2.1.2 Ilmailun hinnan kehitys

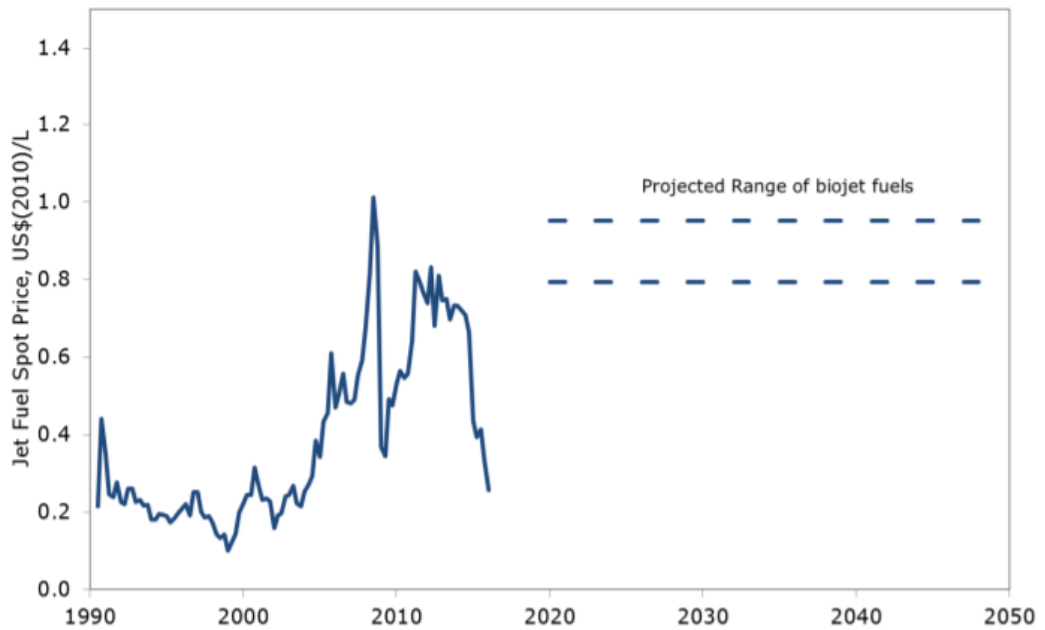
Ilmailun hinta on noin puolittunut viimeisen 30 vuoden aikana, mikä on hidasta verrattuna aikaisempaan muutosnopeuteen. EU Aviation (2019) mukaan samana aikana on kuitenkin lentoreittejä, joiden hinta on merkittävästi laskenut. Esimerkiksi Euroopan sisäinen lento Milanosta Pariisiin on nyt 16 kertaa halvempi kuin 30 vuotta sitten (*EU Aviation: 25 years of reaching new heights* 2019). Kuvassa 3 on esitelty lentoliikenteen hintakehitys.

Evolution of average price of air travel<sup>19</sup>



**Kuva 3.** *Inflaatiokorjattu hintakehitys kuljetettua tuhatta kilogrammaa ja kilometriä kohden ('Aviation benefits' 2019, s.12).*

Syitä ilmailun historialliselle halpenemiselle voidaan ajatella olevan suihkumoottoreiden tehokkuuden paraneminen, teknologian halpeneminen, lakisäädösten muutokset, lentonopeuden hidastaminen ja halpalentoyhtiöiden yleistyminen (*'Aviation benefits' 2019 s.11 –13*). Vuonna 2013 polttoainekulut aiheuttivat noin kolmanneksen lentoyhtiön juoksevista kuluista (Gegg, Budd & Ison, 2014). Kuvasta 4 nähdään, että kerosiinin hinta oli silloin erityisen korkealla ja lähellä biopolttoaineiden hintaa.



**Kuva 4.** Inflaatiokorjattu kerosiinin hintakehitys (Deane and Pye 2016).

Kerosiinin hinta voi pienessäkin ajassa vaihdella suuresti, vuodessa jopa kymmeniä prosentteja. Erityisesti Eurooppa on herkkä kerosiinin hinnan vaihteluille, koska Euroopassa oma tuotanto on suhteellisen pientä (*Oil and petroleum products - a statistical overview*), jolloin Eurooppa on ulkopuolisen öljytuotannon varassa. Kerosiini tuotetaan raakaöljystä, joten sen hinta on myös suoraan riippuvainen raakaöljyn hinnasta. Kleinbergin et al. (2018) mukaan öljynkulutuksessa on hyvin pieni hintajousto, eli öljyä ostetaan sillä hinnalla mitä saadaan. Koska öljyntuotannon määrää on hidasta muuttaa nopeasti, prosentinkin kysynnän nousu voi nostaa merkittävästi öljyn hintaa (Kleinberg et al. 2018). Suuri osa öljyn tuotannosta on valtioilla, joilla ei ole vakaata hallitusta. Tämä johtaa siihen, että markkinoiden öljyntuotanto on riippuvainen myös eri maiden välisistä ja sisäisistä konflikteista. Öljyn hinta on siis riippuvainen myös tuottajamaiden vakaudesta. (*Europe increasingly dependent on risky oil imports*, 2016)

## 2.2 Drop-in-biopolttoaineet

Drop-in-biopolttoaine tarkoittaa ilmailun yhteydessä biopolttoainetta, jonka voi sekoittaa kerosiinin sekaan sellaisenaan, tai korvata kokonaan ilman nykyisiin järjestelmiin tehtäviä merkittäviä muutoksia. Tästä eteenpäin tässä työssä käytetään termiä biopolttoaine, kun puhutaan drop-in-biopolttoaineista. Yhteensopivuus nykyisten

järjestelmien kanssa tarkoittaa, että biopolttoaineiden käyttöönotto on helppoa ja nopeaa. (Santos & Delina 2021) Biopolttoaineet voivat olla siis edullisin vaihtoehto ilmailun polttoainepäästöjen vähentämiseksi, koska sitä käytettäessä ei tarvitse uudelleen suunnitella moottoreita, polttoaineen säilytystä eikä polttoaineen jakelua. Biopolttoaineet eivät välttämättä kuitenkaan ole pitkäaikainen ratkaisu. On mahdollista, että tulevaisuudessa siirrytään käyttämään lentokoneita, jotka on suunniteltu käyttämään aikaisempiin lentokoneisiin yhteensopimatonta polttoainejärjestelmää.

## 2.2.1 Drop-in-polttoaineiden hyväksyminen ilmailuun

Määritelmän perusteella biopolttoaineiden kemiallinen koostumuksen ei tarvitse olla identtistä kerosiinin kanssa, mutta ominaisuuksiltaan sen pitää olla samanlaista. Käyttöön hyväksytyt biopolttoaineet ovat olleet kemialliselta koostumukseltaan hyvin erilaisia verrattuna kerosiiniin (Pires et al. 2018). Kerosiinissa on C10–C16 hiilivetyjä, parafiineja, sykloalkaaneja ja aromaattisia yhdisteitä (Wang et al. 2019). Näitä kaikkia kemiallisia yhdisteitä ei aina löydy biopolttoaineista (Pires et al. 2018). Rumizenin (2021) mukaan kuitenkin ASTM:n (American Society for Testing and Materials) standardi D7566 rajoittaa drop-in-polttoaineiden sekoitussudetta kemiallisen koostumuksen perusteella. Kyseinen standardi määrittää, mitä drop-in-polttoaineita saa käyttää nykyisissä lentokoneissa, ja millä sekoitussuhteella drop-in-polttoaineita saa korkeintaan sekoittaa kerosiiniin. Tämä standardi siis käsittelee yleisesti drop-in-polttoaineita, ei pelkästään biopolttoaineita. Kyseinen standardi on korkeintaan antanut uusille drop-in-polttoaineille 50 % maksimisekoitussuhteen, vaikka kyseinen drop-in-polttoaine olisi kemialliselta koostumukseltaan identtinen kerosiinin kanssa. Standardi voi kuitenkin antaa mahdollisuuden käyttää drop-in-polttoainetta rajoittamatta sekoitussuhdetta sitten kun kyseisen drop-in-polttoaineen käytöstä on tarpeeksi kokemusta, jos se on kemialliselta koostumukseltaan identtinen kerosiinin kanssa. (Rumizen 2021)

Rumizenin (2021) mukaan ASTM standardi D4054 määrittää drop-in-polttoaineiden testausprosessin. Testausprosessi on nelivaiheinen ja koko prosessin läpivieminen voi maksaa miljoonia euroja. Ensimmäisessä ja toisessa vaiheessa testataan drop-in-polttoaineen ominaisuuksia. Kyseisten vaiheiden toteuttaminen maksaa kymmeniä tuhansia euroja. Jos drop-in-polttoaine läpäisee ensimmäiset testit, se voi siirtyä seuraaviin vaiheisiin. Vaiheessa 3 testataan drop-in-polttoainetta erilaisissa osajärjestelmissä. Tähän vaiheeseen kuuluu testaus polttoaineen aiheuttamasta korroosiosta turbiinin kuumissa osissa, polttoainejärjestelmän testaus ja testaaminen

suihkumoottorijäljitelmässä. Vaihe 3 on huomattavasti aikaisempia vaiheita kalliimpi ja voi maksaa jopa 1,5 miljoonaa euroa. Neljännessä vaiheessa testataan polttoainetta oikeassa moottorissa tai mahdollisesti oikeassa lentokoneessa. Viimeisessä vaiheessa yritetään selvittää polttoaineen suorituskykyä, päästöjä ja polttoaineen pitkäaikaista vaikutusta suihkumoottoriin. Viimeinen vaiheen toteuttaminen voi maksaa noin miljoona euroa. (Rumizen 2021)

## 2.2.2 Biopolttoainekehityksen haasteet

Biopolttoaineiden kehittäminen on haastavaa ennen edellä mainittua testausprosessia huomioimattakin. Biopolttoaineisiin parhaan kasvillisuuden löytäminen on työlästä, koska vaihtoehtoja on paljon. Biopolttoaineiden päästöstä osa tulee sen kuljetuksesta, joten niitä on tärkeää tuottaa lähellä loppukäyttöpaikkaa päästöjen minimoimiseksi (Barke et al. 2022). Loppukäyttöpaikka tarkoittaa tässä yhteydessä paikkaa, jossa polttoaine tankataan lentokoneeseen. Biomassa voidaan myös muuttaa biopolttoaineeksi useilla eri menetelmillä, mikä monimutkaistaa parhaan biopolttoaineen selvittämistä. Esimerkiksi ruokajätettä voi muuttaa biopolttoaineeksi ainakin kuudella eri tavalla (Chuck 2016). Tutkimus on siis haastavaa keskittää koko sektorille yhteen menetelmään, koska biopolttoaineeseen sopiva biomassa pitää harkita aluekohtaisesti hallitsevan ilmaston ja kasvillisuuden perusteella. Parhain tuotantomenetelmä on vaikea löytää, koska eri biomassa- ja tuotantovaihtoehtoja on monia. Esimerkiksi tutkimusvaiheessa on haastava selvittää, kuinka paljon suurempi tuotantomäärä ja tehokkaammat tuotantomenetelmät vaikuttaisivat lopputuotteen hintaan. Myös tuotetun biopolttoaineen testaaminen on kallista ja voi vaatia hyvin suuria tuotantomääriä testausta varten (Rumizen 2021).

Hyväksytyjä drop-in-polttoaineita on tällä hetkellä 7, mutta niiden käyttö tällä hetkellä on hyvin pientä. Drop-in-biopolttoaineet kattavat maailmanlaajuisesti vain 0,05 % kaikista käytetyistä ilmailun polttoaineista. Kuitenkin niitä on käytetty yli 250 000 lennolla, joten niiden käytöstä on kokemuksia. Syynä pienelle käyttömäärälle on biopolttoaineiden pieni tuotantomäärä ja kalliimpi hinta. (Santos & Delina 2021) Tuotantomäärän nostaminen merkittävästi on ollut melko hidasta ja merkittävän määrän tuottamiseen voi mennä jopa vuosikymmeniä (Kohlman 2020). Käyttöönottoa hidastaa pieni kysyntä tämänhetkisen korkeamman hinnan takia, ja hinnat pysyvät verrattain korkeina pienen tuotantomäärän takia. Drop-in-biopolttoaineet siis eivät ole saavuttaneet suuremman tuotannon tuomaa hinnan laskua. (Santos & Delina 2021)

## 2.3 Kestävä kehitys biopolttoaineissa

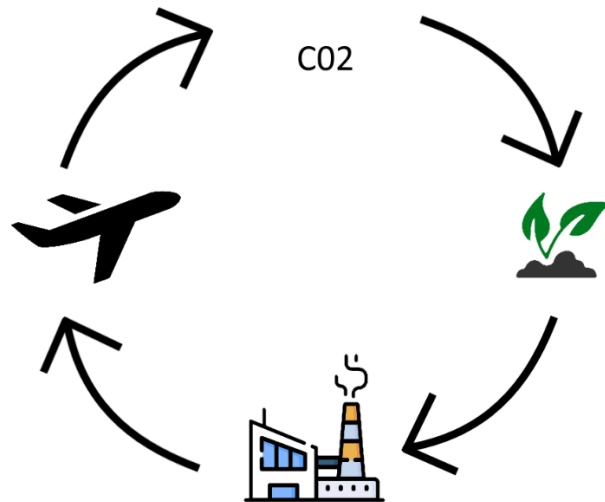
Biopolttoaineet ovat tärkeää tuottaa kestävällä tavalla. Pääasiallinen biopolttoaineiden hyöty on kasvihuonepäästöjen vähennys, mutta huonosti tuotetut biopolttoaineet voivat jopa lisätä kasvihuonepäästöjä perinteisiin polttoaineisiin verrattuna. Esimerkiksi Yhdysvalloissa maissista tuotetun bioetanolin elinkaaripäästöt on tutkittu olevan ainakin neljänneksen tavallisia polttoaineita suurempia (Lark et al. 2022).

Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö (International Civil Aviation Organization, ICAO) huolehtii biopolttoaineiden kestävästä kehityksestä. ICAO on perustanut kasvihuonepäästöjen vähennysohjelman (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA), jonka avulla biopolttoaineet hyväksytään kestäväksi kehitykseen eli SAF:ksi (sustainable airplane fuel). CORSIA:ssa on 12 eri kestävä kehityksen ehtoa, joiden kaikkien pitää täytyä. Ne varmistavat, ettei missään toimitusketjun osassa aiheuteta negatiivisia kokonaisvaikutuksia ekosysteemeille, yhteisöille tai ilmastolle. CORSIA:n kestävä kehityksen ehdot ovat esitely taulukossa 2 (liitteet).

CORSIA:n kriteerit ovat kattavat ja varmistavat korkean laadun kestäville kehitykselle. Samalla se kuitenkin myös rajoittaa mahdollisuuksia kasvattaa biomassaa biopolttoaineisiin, koska pienempi osa esimerkiksi pelloista sopivat sen mukaan biopolttoaineille. Perinteisillä polttoaineilla ei ole samanlaista kestävä kehityksen taetta, mikä voi mahdollistaa kustannuksien pienentämistä hyväksikäyttämällä jotain CORSIA:ssa olevia kestävä kehityksen piirteitä. Esimerkiksi ilmanlaadusta ei tarvitse pitää yhtä hyvää huolta öljyntuotannossa.

## 2.4 Biopolttoaineiden päästövähennykset

Biopolttoaineiden päästövähennykset perustuvat siihen, että biomassan kasvattaminen sitouttaa hiiltä ilmakehästä biomassaan. Kun biopolttoaine poltetaan, ei se voi vapauttaa enempää hiiltä, kuin siihen on sitoutunut. Täten ideaalisessa tilanteessa biopolttoaineiden käyttö ei tuottaisi nettona ollenkaan kasvihuonepäästöjä. Hiilen kierto on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.** Biopolttoaineen hiilen kierto kasvatuksesta ja jalostuksesta käyttöön lentokoneessa.

Biopolttoaineet eivät pääse nollaan nettopäästöissä, koska päästöjä tulee esimerkiksi myös kuljetuksesta ja jalostamisesta. Jalostamisvaihe voi olla tuotantotavasta riippuen sähköenergiaintensiivinen, joten käytetyn sähkön puhtaus voi vaikuttaa merkittävästi biopolttoaineen elinkaaripäästöihin (Cox et al. 2014). Barke et al. (2021) mukaan eräs biopolttoaine pystyy vähentämään 63–89 % elinkaaripäästöjä, mutta nykyisellä eurooppalaisella sähköllä sen päästöt olisivat kasvaneet 2,4 kertaisiksi kerosiiniin verrattuna. Päästövähennyksien kannalta on hyvin tärkeää, että jalostusprosessi tehdään mahdollisimman puhtaalla sähköllä.

Metsien muuttaminen viljelymaaksi biopolttoaineiden raaka-aineiden kasvattamiseksi on myös merkittävä päästöjen lähde, jota ei näy kuvassa 1. Metsien tuhoaminen, etenkin trooppisten metsien, on yksi merkittävimmistä kasvihuonekaasulähteistä (Pendrell et al. 2019). Tästä syystä myös edellisessä kappaleessa mainittu maissista tehdyn bioetanolin päästöt olivat perinteisiä polttoaineita suurempia (Lark et al. 2022). Ilmailussa päästöjen vähennysohjelma CORSIA suojaa tältä päästölähteeltä ainakin osittain. Esimerkiksi on epäselvää, miten CORSIA pystyy estämään seuraavanlaisen tilanteen: biopolttoaineita varten hankitaan viljelymaata, joka oli aikaisemmin eri käytössä. Aikaisempi viljeltävä kasvia on silti kannattavaa viljellä muualla, jonka takia metsiä kaadetaan viljelytilan saamiseksi. Miten voidaan varmistaa, ettei aiheuteta epäsuorasti haittaa ilmastotavoitteille?

Kun lentokoneisiin valmistetaan biopolttoainetta, niin sivutuotteena voi tulla myös muita bioöljytuotteita. Esimerkiksi mikrolevistä valmistettu lentokoneen biopolttoaineen sivutuotteena myös tulee biodieseliä. (Cox et al. 2014) Siis osa tulevista ilmastohyödyistä ei tule suoraan saatavasta lentokoneiden biopolttoaineista, eli sopivaa

biopolttoainetta harkittaessa pitää ottaa myös huomioon kokonaisuudessa tulevat hyödyt.

NASA:n (2017) mukaan biopolttoaineet aiheuttavat 50–70 % vähemmän hiukkaspäästöjä. Näiden hiukkaspäästöjen uskotaan aiheuttavan pilviä suihkumoottorin perään. Kyseiset pilvet itse koostuvat jääkristalleista, ja näiden pilvien vaikutukset ilmakehään uskotaan olevan suurempia, kuin itse kasvihuonepäästöjen. (*NASA Study Confirms Biofuels Reduce Jet Engine Pollution 2017*)

## 2.5 Muut päästöjä vähentävät polttoaineratkaisut

Tässä kappaleessa puhutaan päästöjä vähentävistä polttoaineratkaisuista, jotka vaativat muutoksia lentokoneisiin tai muuhun infrastruktuuriin. Erityisesti tarkastellaan, millaisia muutoksia nämä polttoaineratkaisut vaativat nykyjärjestelmiltä. Esimerkiksi vedyllä ja sähköllä toimivat lentokoneet vaativat muutoksia nykyjärjestelmiin (Santos & Delina 2021), jotka vaikeuttavat ja hidastavat näiden ratkaisujen käyttöönottoa lyhyellä aikavälillä. Santoksen & Delinan (2021) mukaan Airbus yrittää saada vetykoneen kaupalliseen käyttöön vuoteen 2035 mennessä.

### 2.5.1 Vedyllä toimivat lentokoneet

Vedyn hyötyjä polttoaineena on se, että sitä voidaan tuottaa puhtaasti elektrolyysillä ja sähköllä, sekä vetykennoja käytettäessä sillä on jopa 50 %:n hyötysuhde (Khandelwal et al. 2013). Painoon suhteutettuna vastaavassa määrässä nesteytettyä vetyä on 3,5 kertaa enemmän energiaa kuin kerosiinissa. Toisaalta tilavuuteen suhteutettuna energia määrältään vastaava määrä nesteytettyä vetyä vie 3 kertaa enemmän tilaa. Vety pitää nesteyttää jäähdyttämällä se kryogeenisiin lämpötiloihin sen tiheyden kasvattamiseksi (Bravo-Mosquera et al. 2022), joten polttoainesäiliöiden on kestävä korkeita paineita ja niissä on oltava eristystä kryogeenisten lämpötilojen ylläpitämiseksi. Nämä tekijät kasvattavat polttoainesäiliöiden hintaa ja painoa. (Khandelwal et al. 2013) Tällaisia polttoainesäiliöitä ei voi olla lentokoneen siivissä, jossa kerosiinia on perinteisesti säilytetty lentokoneessa, vaan suuret polttoainesäiliöt pitää säilyttää itse lentokoneen rungossa, joka vaikuttaa lentokoneen ulkomuotoon ja siten myös lentokoneen aerodynamiikkaan. (Bravo-Mosquera et al. 2022)

Polttokennoja käytettäessä saadaan suurin vedyn hyötysuhde, joten vetykäyttöiset lentokoneet usein suunnitellaan polttokennoilla toimiviksi. Polttokennoilla saadaan vedystä sähköä, ja siksi lentokoneen työntövoiman on oltava sähköperäinen. (Kramer 2020) Ohivirtausmoottoreissa ja potkuriturbiineissa voidaan käyttää sähköperäistä

voimalähdettä (Bravo-Mosquera et al. 2022). On myös mahdollista käyttää vedyllä toimivaa suihkumoottoria, mutta se pitää suunnitella vedyn ominaisuudet huomioiden (Khandelwal et al. 2013) Perinteisiin suihkumoottoreissa ei voi käyttää vetyä, ilman että niihin tehtäisiin muutoksia. Kramerin (2020) mukaan tällaisessa suihkumoottoriratkaisussa ei tulisi hiilidioksidipäästöjä, mutta typpipäästöjä tulisi. Vetykennoilla toimivat ratkaisut eivät tuottaisi ollenkaan päästöjä (Kramer 2020).

Vety voitaisiin tuottaa paikallisesti lentokentillä, eikä sitä siis olisi pakko kuljettaa pitkiä matkoja. Vetyä voidaan tuottaa tulevaisuudessa kilpailukykyiseen hintaan pienelläkin lentokentällä, jos teknologia halpenee odotetulla tavalla. (Kramer 2020) Tähän vaadittua infrastruktuuria ei ole vielä nykyään lentokentillä, joten niille pitäisi rakentaa tuotanto- ja jakelujärjestelmät. Vetylentokoneet voivat vain toimia lentokentillä, jossa on tarvittava infrastruktuuri, joten ne eivät voi yleistyä suurella mittakaavalla ennen kuin lentokentille on rakennettu tarvittavat asiat (Khandelwal et al. 2013).

## 2.5.2 Akkukäyttöiset lentokoneet

Sähköllä toimivien lentokoneiden suuri ongelma on sähkön säilöminen lennon aikana. Schäferin et al. (2019) mukaan litiumioniakuilla on  $200 \frac{Wh}{kg}$  energiatiheys, joka on vain 1,7 % kerosiinien energiatiheudesta. Lyhyen matkan kaupalliset lennot vaatisivat 750–2 000  $\frac{Wh}{kg}$  energiatiheiden toimiakseen. Nykyiset akut ovat niin painavia, että niillä voidaan kuljettaa enintään 4 matkustajaa 100 km päähän. (Schäfer et al. 2019) Suuren painonsa takia nykyiset akut eivät ole siis teknologialta valmiita ilmailun kaupalliseen käyttöön.

Akkukäyttöisen lentokoneen hyötynä on polttokennoakin parempi hyötysuhde (Thomas 2009). Lentämisestä aiheutuvat kustannukset eivät ole korkeita nykyteknologialla, ja lentämisestä aiheutuu samaa suuruusluokkaa olevat kulut kerosiinien kanssa. Toisaalta akkujen korkean painon vaatisi lentokoneelta nykyistä järeämmät laskutelineet lisäkuorman kestämiseksi. (Schäfer et al. 2019)

Sähköllä toimivat lentokoneet voisivat toimia ohivirtausmoottoreilla tai potkuriturbiineilla, kuten vetykoneet (Schäfer et al. 2019). Sähkökoneita ei voi käyttää suihkumoottoreilla, koska ne toimivat nestemäisillä polttoaineilla. Sähkökone on siis lennonaikana täysin päästötön, koska ohivirtausmoottori eikä potkuriturbiini tuota sähkökäyttöisenä kasvihuonepäästöjä.

Sähkökoneet vaatisivat lentokentiltä kuitenkin latausinfrastruktuuria. Sen pitäisi olla mahdollisimman korkeajännitteistä latausaikojen pienentämiseksi. Nykyteknologialla 6



paikkaisen lentokoneen täysiksi lataamiseen menee jopa 5 tuntia. Latausaikojen ei kuitenkaan odoteta vaikuttavan merkittävästi lentokenttien toimintaan. (Doctor et al. 2022)

## 3. BIOPOLTTOAINEIDEN VAIKUTUKSET JA TEHOKKUUS

Tässä luvussa vastataan kaikkiin tutkimuskysymyksiin käymällä kysymyksiä läpi teemoittain. Pääasiassa luvussa analysoidaan tutkimuskysymyksiä luvun 2 pohjalta, mutta asioita taustoitetaan myös lisää tarpeen mukaan.

### 3.1 Biopolttoaineiden tuomien päästövähennyksien tehokkuus

Tutkimuskysymystä ”Auttavatko biopolttoaineet todellisuudessa kasvihuonepäästöihin?” tarkastellaan tässä työssä kahdella eri näkökulmalla: vähentävätkö biopolttoaineet kasvihuonepäästöjä yksittäisillä lennoilla ja vähentävätkö biopolttoaineet koko ilmailusektorin kasvihuonepäästöjä lähitulevaisuudessa.

#### 3.1.1 Kasvihuonepäästövähennykset yksittäisillä lennoilla

Biopolttoaineet pystyvät kiistatta vähentämään yksittäisen lennon kasvihuonepäästöjä. Ilmailussa käytetyt biopolttoaineet aiheuttavat 40–80 % vähemmän päästöjä verrattuna kerosiiniin (Cox et al. 2014; Kousoulidou & Lonza, 2016; Sharma et al. 2021). Ne eivät kuitenkaan vähennä yhtä paljoa todellisuudessa, koska ASTM standardi D7566 rajoittaa sekoitussuhteen maksimissaan 50 %:iin (Rumizen 2021). Sekoitussuhteen rajoittaminen rajoittaa siis myös saadut ympäristöhyödyt. Kuitenkin on otettava huomioon vähentyneet hiukkaspäästöt, jotka ovat merkittäviä jo 50/50 sekoitussuhteella. Joka tapauksessa standardin D7566 sekoitussuhteen rajoittaminen kemiallisen koostumuksen perusteella voi olla kyseenalaista, koska standardi D4054 huolehtii, että biopolttoaineen käyttö on turvallista sellaisenaan. Sekoitussuhteen rajoittamisen idea on luultavasti varmistaa, että erot perinteiseen biopolttoaineeseen ovat hyvin pienet ja siten minimoidaan turvallisuusriskit. Vaikka standardin D4054 testausprosessi on kallis ja kattava, ei se voine vastata laajuudeltaan vuosia jatkuvaa polttoaineen käyttöä. Siksi on aina pieni mahdollisuus, että todellisessa käytössä ilmenee testausprosessissa huomaamattomia ongelmia.

Todellisuudessa yksittäiseen lentoan saatavat päästövähennykset riippuvat paljon siitä, kuinka hyvin CORSIA-kriteerejä noudatetaan. On kuitenkin syytä uskoa, että

biopolttoaineilla pystytään vähentämään lennon päästöjä muutamalla kymmenellä prosentilla. Toteutuneet päästöt vähenisivät huomattavasti, jos sekoitussuhdetta ei rajoiteta. Toisaalta päästöt voivat jopa lisääntyä, jos esimerkiksi metsiä joudutaan kaatamaan viljelytilan saamiseksi. Huomioitavaa kuitenkin on, että hiukkaspäästöt vähenevät merkittävästi biopolttoaineita käytettäessä pienelläkin sekoitussuhteella.

### 3.1.2 Kasvihuonepäästövähennykset koko ilmailusektorilla

Kun käsitellään kuinka biopolttoaineet vaikuttavat koko ilmailusektoriin, on otettava huomioon sektorin kasvuennustukset, sektorin päästökoostumus lähteittäin ja biopolttoaineiden potentiaali.

Ilmailusektorin päästövähennyksien määrään vaikuttavat seuraavat tekijät:

1. Ilmailusektorilla päästöjä tulee muualtakin, kun itse lennoilta.
2. Ilmailun kasvunopeus.
3. Biopolttoaineiden saatavuus.

Valtaosa ilmailusektorin päästöistä tulevat varsinaisesta lentämisestä, jopa 77–91 %. Muita päästöjä tapahtuu mm. lentokoneiden rakentamisvaiheessa, kuljetuksissa ja lentokenttätoiminnassa. (Barke et al. 2022) Koko lentokentän kattavaa päästövähennyksiä on tutkittu Sharma et al. (2021) toimesta. Siinä tehtiin tapaustutkimuksen biopolttoaineiden vaikutuksesta Memphisin kansainväliselle lentoasemalle. Tutkimuksessa tarkasteltiin vain yhtä biopolttoaineiden valmistusmenetelmistä ja lentokenttää. Sen mukaan Memphisin kansainvälisiä vuotuisia päästöjä voitaisiin vähentää n. 63 %. (Sharma et al. 2021) Samaa suuruusluokkaa oleva vähennys saadaan, kun biopolttoaineiden vähennys (40–80 %) kerrotaan lentokoneiden aiheuttamalla osuudella sektorin kokonaispäästöistä (77–91 %). Tapaustutkimuksen tulos siis vastaa aikaisempaa teoreettista ymmärrystä asiasta, joten on syytä uskoa, että tutkimuksen tulos heijastuu hyvällä todennäköisyydellä koko sektorille. Lentokoneiden biopolttoaineet siis voivat vähentää koko ilmailusektorin päästöjä merkittävästi muista päästölähteistä huolimatta.

Ilmailun kasvu on nopeaa ja luonteeltaan eksponentiaalista, joten ilmailun päästöt voivat nousta verrattuna nykyhetkeen, vaikka biopolttoaineet vähentävät yksittäisten lentojen päästöjä. Esimerkiksi, jos ilmailun kasvu olisi 4 % vuodessa ja biopolttoaineet saataisiin vähentämään 60 % koko ilmailusektorin sen hetkisistä päästöistä, niin menisi n. 13 vuotta, että ilmailun päästöt olisivat nykyhetkeä korkeammat. Todellisuudessa

päästöjen nousu olisi todennäköisesti jopa nopeampaa, koska biopolttoaineiden käyttömäärä ei nouse heti merkittävään määrään. Myös biopolttoaineiden korkeamman hinnan aiheuttama kysynnän lasku vaikuttaa toteutuvaan ilmailualan kasvuun (Gössling et al. 2021). Kuitenkin ilmailun kasvu on niin nopeaa, että ilmailusektorin päästöt tulevat kasvamaan tulevaisuudessakin, toki huomattavasti hillitymmin, jos biopolttoaineita käytetään merkittävästi.

Biopolttoaineiden käyttöä rajoittaa kuinka paljon sitä pystytään tuottamaan. Biopolttoaineiden kestävä kehityksen kriteerit ovat tiukkoja, joten ei ole helppoa kasvattaa tuotantoa merkittävästi, koska kriteerien mukaista viljelytilaa raaka-aineille on rajallisesti. Lisäksi tarjontaa on haasteellista nostaa, koska kysyntä on alhaista korkean hinnan takia. Biopolttoaineiden tuotanto on vähäistä ja kasvu on suhteellisen hidasta, joten koko sektorin kattavat päästövähennykset olisivat pienet (Abrantes et al. 2021).

### **3.2 Biopolttoaineiden kasvattaminen ja valmistaminen Euroopassa**

Vuonna 2018 Euroopan vapaakauppajärjestöön eli EFTA:an (European Free Trade Association) kuuluvat jäsenet käyttivät 55 Mt kerosiinia (Prussi et al. 2019). Ilmailun määrä on suurin piirtein vuoden 2018 tasossa vielä vuoteen 2030 saakka. Ilman Covid-19 pandemiaa vuonna 2030 ilmailun määrä olisi ollut merkittävästi suurempi. (Gössling et al. 2021) Tämän takia tässä työssä käytetään 55 Mt vertailulukuna lähitulevaisuuden kysynnälle.

Biopolttoaineita ei tuoteta pelkästään ilmailuun. Suurin kysyntä biopolttoaineille on tieliikenteessä, mutta lisäksi myös meriliikenteellä on kysyntää biopolttoaineille. (Prussi et al. 2022) Nämä kaikki kilpailevat saatavilla olevista biopolttoaineista, eikä siis koko biopolttoaineisiin sopivaa tuotantoa voi käyttää ilmailun biopolttoaineisiin. Prussi et al. (2019) mukaan biopolttoaineita tuottavat jalostamot ovat tavallisesti optimoitu tuottamaan biopolttoaineita tieliikenteeseen, jolloin jalostamosta voidaan saada noin 15 % osuus ilmailun biopolttoaineisiin. (Prussi et al. 2019) Jos jalostamo optimoidaan tuottamaan ilmailua varten biopolttoaineita, niin voidaan saada huomattavasti korkeampi osuus ilmailuun. Yleisin tuotantomenetelmä ilmailun biopolttoaineille on HEFA. (Prussi et al. 2022) HEFA-menetelmällä voidaan optimoimalla ilmailuun saada korkeintaan 55–60 % osuus jalostamon tuotannosta. Suuremman osuuden saaminen aiheuttaisi jalostamon kokonaistuotannon vähenemistä. Eri tuotantomenetelmällä saadaan eri suuruisia maksimiosuuksia jalostamon tuotannosta, esimerkiksi ATJ-menetelmällä voidaan saada ilmailuun korkeintaan biopolttoainetuotannosta 85 %

osuus. (Prussi et al. 2019) Ilmailun biopolttoaineen nykyinen ja ennustettu tuotantomäärä on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Biopolttoaineiden tuotantomäärät Euroopassa eri vuosina.

<b>Vuosi</b>	<b>2018</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
Määrä (Mtoe)	0,36*	0,55*	2,4
Verrattuna polttoainekulutukseen koronan jälkeisellä 3,9 % vuosikasvulla (%)	0,65	1,1	4,0
Lähde	(Prussi et al. 2019)	Prussi et al. 2019)	Prussi et al. 2022)
*Lähteessä luku ei ole Mtoe vaan Mt. Mtoe tarkoittaa megatonnia öljyvastaavaa määrää. Nämä luvut ovat kuitenkin tässä yhteydessä suuruusluokaltaan vastaavia lukuja (Biofuels annual European union 2021, s. 43–44).			

Euroopassa kaikki tuotettu biomassa vuonna 2030 on arviolta noin 200 Mtoe. Tästä arviolta 10 % olisi sopivaa biopolttoaineiden tuotantoon, eli 20 Mtoe, josta suurin osa menee tieliikenteeseen. (Prussi et al. 2022) Tähän arvioon ei ole lisätty uusia biopolttoainemenetelmiä, kuten biopolttoaineen tuottamista mikrolevistä. Mikrolevät ovat lupaava tuotantomenetelmä, koska niitä voi kasvattaa teollisuushalleissa. Näin ollen mikrolevästä tuotettu biomassa ei kilpaile tilasta muun biomassatuotannon kanssa. Arviolta 1 % vuoden 2018 tasosta voitaisiin kattaa mikrolevien avulla (Prussi et al. 2021).

Ilmailun biopolttoaineiden tuotantomäärät Euroopassa ovat siis lähitulevaisuudessakin suhteellisen pieniä. Vaikka jalostamot optimoitaisiin tuottamaan biopolttoaineita ilmailuun, niin arviolta vuonna 2030 vain vajaa neljännes polttoainekulutuksesta voitaisiin kattaa biopolttoaineilla. Tällainen optimointi ilmailuun on hyvin epätodennäköistä, koska muilla tie- ja meriliikenteellä on samankaltainen tarve saada biopolttoaineita. Jos Eurooppa pystyy antamaan suuremman osuuden biomassatuotannostaan biopolttoaineille, niin suurempi osa polttoainekulutuksesta voitaisiin kattaa biopolttoaineilla. Biomassaa tarvitaan kuitenkin muuhunkin, joten biopolttoaineita ei voi ainakaan tuottaa merkittävästi nykyisiä ennustuksia enempää.

Euroopassa ei siis voida tuottaa riittäväällä mittakaavalla biopolttoaineita, jos halutaan kaiken käytetyn polttoaineen olevan biopolttoainetta. Kuitenkin kysyntä pysyy muutenkin huomattavasti maltillisempana, odotettu kysyntä vastaa suuruudeltaan odotettua tuotantokapasiteettia (Prussi et al. 2022).

### **3.3 Biopolttoaineiden vaikutukset nykyjärjestelmässä**

Tässä kappaleessa kerrotaan, mitä huolia on biopolttoaineiden käytöstä ja niiden käytön kokemuksesta. Biopolttoaineiden hyväksymisprosessissa pyritään varmistamaan, että biopolttoaineet eivät aiheuta negatiivisia vaikutuksia nykyjärjestelmiin. Tämä testausprosessi ei kuitenkaan ole laajuudeltaan ja pituudeltaan täysin vastaava tosielämän olosuhteiden kanssa. Polttoaineiden osalta kriittiset osat nykyjärjestelmästä ovat polttoaineen säilytys maassa ja lentokoneessa, polttoaineen vaikutus moottoriin sekä tankkauskalustoon.

#### **3.3.1 Huolet biopolttoaineiden käytöstä**

Biopolttoaineiden kemiallinen koostumus aiheuttaa huolia sen ominaisuuksien suhteen. Biopolttoaineet voivat olla rikittäviä, toisin kuin perinteinen kerosiini (Wang et al. 2019). Rikittävyys vähentää rikkipäästöjä, mutta se huonontaa polttoaineen voiteluominaisuuksia (Kandaramath et al. 2015). Huono voitelukyky lisää joidenkin osien kulumista. (Lapuerta et al. 2011)

Biopolttoaineissa tyypillisesti pieni happipitoisuus, mikä altistaa biopolttoaineita hapettumiselle (Wang et al. 2019). Hapettuminen huonontaa biopolttoaineen säilyttämiskautta ja voi aiheuttaa ongelmia haurastuttamalla tiivisteitä. Myös aromaattisten yhdisteiden puute biopolttoaineissa on ongelmallista tiivisteille. Aromaattiset yhdisteet turvottavat tiivisteitä, mikä varmistaa, etteivät tiivisteet vuoda. Biopolttoaineet voivat olla kerosiinia vesiliukoisempia, mikä mahdollistaa veden kertymisen polttoaineeseen, joka on haitallista polttoaineen ominaisuuksille. (Chuck 2016)

Tällä hetkellä yllä mainitut ongelmat vältetään rajoittamalla biopolttoaineen sekoitussuhdetta kerosiiniin. Ongelmat voitaisiin ratkaista rajoittamatta sekoitussuhdetta lisäämällä biopolttoaineisiin lisäaineita. (Chuck 2016)

### 3.3.2 Lufthansan kokemukset biopolttoaineiden käytöstä

Martinin (2018) mukaan Lufthansa tutki vuonna 2011 biopolttoaineiden vaikutusta järjestelmiinsä. Lufthansa käytti 800 t HEFA-menetelmällä tuotettua biopolttoainetta ja sekoitussuhteena oli 50 %. Polttoaineen säilytyksessä maalla tutkittiin erityisesti alkaako biopolttoaine eroamaan kerosiinista niiden tiheyseron takia. Tutkimuksessa havaittiin, että ne eivät ala erottumaan kuukausienkaan säilytyksen aikana. Myös mikrobien määrää tutkittiin säilytyksessä, eikä niiden määrässä huomattu mitään normaalista poikkeavaa.

Moottoreissa huomattiin biopolttoainetta kuluvan vähemmän, koska sen energiatiheys on suurempi. Muuten moottorit toimivat odotetusti käytön aikana. Moottorit kuvattiin ennen tutkimusta, tutkimuksen aikana ja tutkimuksen loputtua. Moottoreissa ei havaittu visuaalisesti mitään eroa tavalliseen moottoriin. Biopolttoaineen huomattiin kellertävän joitakin osia, mutta vain Nesteen tuottamissa biopolttoaine-erissä. Kellertymät todettiin johtuvan biopolttoaineen korkeasta rikki- ja vesi- ja hiilipitoisuudesta.

Pumpun siipipyörässä huomattiin tapahtuvan vähemmän kavitaatioita, kun käytettiin biopolttoaineita. Tämä vähentää siipipyörien kulumista, eikä siitä aiheudu haittavaikutuksia. (Martin 2018, s. 729–739) Lufthansan kokemukset olivat positiivisia, eikä biopolttoaineen käytöstä tullut haittavaikutuksia.

## 3.4 Biopolttoaineiden hinta ja sen vaikutus ilmailuun

Tässä kappaleessa verrataan biopolttoaineen hintaa kerosiiniin ja arvioidaan, millaisia vaikutuksia sen hinnalla on ilmailuun. Polttoainekustannukset ovat merkittävä osa lentoyhtiöiden käyttökustannuksista. Vuonna 2013, jolloin kerosiinin hinta oli erityisen korkea, polttoaineen hinta aiheutti 28 % lentoyhtiön juoksevista kuluista (Kousoulidou & Lonza 2016).

### 3.4.1 Biopolttoaineiden ja kerosiinin hinta

Kun biopolttoaineiden hintaa verrataan kerosiinin hintaan, on tärkeä ottaa seuraavat tekijät huomioon kerosiinin hinnasta:

1. Kerosiinin hinta vaihtelee lyhyelläkin aikavälillä.

2. Tulevaisuudessa kerosiinien hintaan tulevat vaikuttamaan päästöoikeuksien hinnat.

Kuvassa 4 on esitelty kerosiinien hinnan muutoksia. Kuvasta nähdään, että biopolttoaineen hinta on nyt samaa suuruusluokkaa, kuin kerosiinien hinta oli 2010-luvun puolivälissä. Toisaalta vuosina 2020–2021 kerosiinien hinta oli pienempi, jonka takia biopolttoaineet olivat monta kertaa vastaavaa määrää kerosiinia kalliimpia (Capaz et al. 2020; Sharma et al. 2021; Trejo-Pech et al. 2021; Barke et al. 2022). Biopolttoaineiden tuotanto on vielä melko pientä, joten suurempi tuotanto voisi laskea biopolttoaineiden hintaa. (Capaz et al. 2020; Santos & Delina 2021)

Vuonna 2013 arvioitiin, että 10 % biopolttoaineisuus aiheuttaisi noin 10 € lisäkulun matkustajalle 1000 km matkaan (Deane & Pye 2018). Vuoden 2020 alussa taas suurin biopolttoainevalmistaja Neste arvio, että 10 % biopolttoaineisuus aiheuttaisi noin 35–45 € lisäkustannuksen matkustajille (Santos & Delina 2021). Vuonna 2013 kerosiinien hinta oli erityisen korkea ja taas vuonna 2020 erityisen alhainen. Lisäksi luvut ovat saatu eri tutkimuksista eri menetelmillä, joten ne eivät ole täysin vertailukelpoisia.

Päästöoikeuksien takia kerosiinien hinnan ajatellaan nousevan tulevaisuudessa. Kuvasta 6 nähdään, että viimeisen kahden vuoden aikana päästöoikeuksien hinta on noussut voimakkaasti Euroopassa. Sitä aikaisemman 10 vuoden aikana päästöoikeuksien hinta oli pysynyt vakaana. Yhden arvion mukaan päästöoikeuksien pitää olla 200 €/t, jotta biopolttoaineet olisivat hinnaltaan suoraan kilpailukykyisiä kerosiinien kanssa (Deane & Pye 2018).



**Kuva 6.** Päästöoikeuksien hintakehitys Euroopan päästökaupassa (*Allowance Price Explorer*).



Biomassaa biopolttoaineisiin voidaan kasvattaa paikallisesti Euroopassa, joten sen hinta saadaan vakaammaksi kuin kerosiinin hinta. Euroopassa käytetystä öljystä ja öljytuotteista yli 90 % tuotetaan Euroopan ulkopuolella (*Oil and petroleum products - a statistical overview*). Eurooppa on siis riippuvainen muiden maiden öljytuotannosta, joten öljyntuotantoon eikä hintaan Eurooppa voi vaikuttaa suuresti. Biopolttoaineiden käyttö voisi siis parantaa polttoaineiden hinnan vakautta Euroopassa.

Biopolttoaineet ovat tällä hetkellä selvästi kerosiinia kalliimpia. Tilanne voi muuttua tulevaisuudessa, jos kerosiinin ja päästöoikeuksien hinnat tulevat nousemaan. Vaikka kyseiset hinnat eivät nousisi, matkustajalle biopolttoaineiden käytöstä tulevat kulut jäävät pieneksi, koska biopolttoaineita voidaan tuottaa vain noin prosentti kokonaiskulutuksesta lähitulevaisuudessa.

### 3.4.2 Biopolttoaineiden hinnan vaikutukset ilmailuun

Biopolttoaineiden käyttöönotossa polttoainekustannukset nousisivat riippumatta siitä, nouseeko myös kerosiinin hinta. Vaikutukset ilmailuun riippuvat seuraavista tekijöistä:

1. Kuinka paljon kuluttajat ovat vapaaehtoisesti valmiita maksamaan puhtaammasta lennosta?
2. Kuinka suuri hintajousto ilmailussa on?
3. Kuinka paljon valtiot ovat valmiita tukemaan ilmailun kustannuksissa?

Berger et al. (2022) tutkivat paljonko kuluttajat ovat valmiita maksamaan lennosta enemmän, jotta sen päästöt vähenisivät. Heidän meta-analyysinsä mukaan Euroopassa tehdyissä kyselyissä kuluttajat olivat valmiita maksamaan keskimäärin 28 euroa enemmän lennosta, josta tulisi vähemmän päästöjä (Berger et al. 2022). Kun tätä lukua vertaa Nesteen arvion, että 10 % biopolttoaineisuus maksaisi kuluttajalle 35–45 €, huomataan kuluttajan olevan valmis maksamaan 6–8 %:n kokonaisbiopolttoaineosuudesta. Tämän arvion mukaan siis kuluttaja on valmis maksamaan suuremmasta osuudesta, kuin Euroopassa on mahdollista tuottaa biopolttoaineita. Berger et al. (2022) tutkimuksessa kyseenalaistetaan kuluttajan valmiutta maksamaan kyseistä summaa, koska kyseinen luku on saatu kyselemällä hypoteettista tilannetta ilman todellisia rahallisia menetyksiä, tutkimuksen mukaan on psykologisesti suuri ero miettiä tilannetta hypoteettisesti vai joutuuko oikeasti maksamaan.

Berger et al. (2022) tutkivat myös sveitsiläisen lentoyhtiön dataa, joka oli tarjonnut mahdollisuuden kompensoida päästöjä itsevalitsemalla määrällä. Kyseisen yhtiön

kohderyhmä oli keski- ja korkeatuloiset, eivätkä halvimpia lentoja etsivät kuluttajat todennäköisesti lentäisi kyseisellä lentoyhtiöllä (Berger et al. 2022). Yli 80 % kaikista matkustajista raportoi hinnan olevan tärkein tekijä valitessa lentoa (Santos & Delina 2021). Vaikka ympäristötietoisuuden on todettu korreloivan tulotason kanssa, vain alle 5 % kyseisen lentoyhtiön asiakkaista valitsi kompensoida lennon päästöjä. Ne, jotka valitsivat kompensoida päästöjä, kompensoivat päästöjänsä keskimäärin vain eurolla. (Berger et al. 2022) Kun katsotaan koko Euroopan markkinoita, kuluttajan valmius maksaa pienemmistä päästöistä olisi vielä pienempi, koska suurin osa kuluttajista ei ole yhtä hyvätuloisia kuin tämän lentoyhtiön asiakkaat. Toisaalta data on vain yhdeltä lentoyhtiöltä, joten sen asiakkaiden käyttäytyminen voi olla erilaista kuin vastaavan tuloluokan muiden eurooppalaisten asiakkaiden käyttäytyminen. Lisäksi valinta maksaa päästöjen vähentämisestä oli yksi vaihtoehto lisäpalveluista lippua ostaessa. On siis mahdollista, että kuluttajat olisivat valmiita maksamaan enemmän päästöjä kompensoivasta lipusta, jos heti lippua valittaessa olisi tarjolla päästöä kompensoimaton lippu ja päästöjä kompensoiva lippu.

Edellä mainittu maksamisvalmius koski siis vain tilannetta, jossa kuluttajalla on vaihtoehto maksaa ylimääräistä päästöjen kompensoinnista. Jos koko ilmailussa biopolttoaineiden käytölle asetetaan vähimmäismäärä ja lippujen hinta nousee yleisesti sen takia, on tilanne toinen. Tällöin tulisi tutkia, kuinka suuri hintajousto ilmailussa on. Hintajousto kuvaa, kuinka paljon kysyntä laskee hinnan noustessa. Bronsin et al. (2002) meta-analyysin mukaan hintajousto ilmailulle on arviolta  $-1,146$  keskihajonnalla  $0,619$ . Tämä tarkoittaa, että jos ilmailun hinnat nousisivat 10 %, niin kysyntä laskisi 11,46 %. Polttoainekustannukset aiheuttavat 24,5 % ilmailun hinnoista (Gössling et al. 2021). Tällöin hintajousto polttoaineiden hinnoille ilmailussa on arviolta  $-0,28077$ , eli jos polttoaineiden hinta nousee 10 %, ilmailun kysyntä laskee 2,8 %.

Kun tutkitaan vaikutusta ilmailuun, on myös huomioitava kuinka nopeasti ilmailumarkkinat kasvavat. Jos ilmailumarkkinat kasvavat tarpeeksi nopeasti, niin ilmailun määrä voi kasvaa hintojennousuista huolimatta. Kuvassa 2 on arvioitu näiden kahden tekijän yhteisvaikutuksia eri skenaarioille. Kuvassa on käytetty kysynnän hinnanjousto, eli arvoa  $-1,146$  käytetään tutkiessa vaikutuksia ilmailun määrään. Kuvasta huomataan, että ilmailun arvioidaan kasvavan tulevaisuudessakin tällä hintajouston arvolla jokaisessa tutkimuksen skenaariossa. Kyseiseen hintajouston arvoon liittyy kuitenkin epävarmuuksia, koska sen keskihajonta on suhteellisen iso, tutkimus on 20 vuotta vanha ja kyseinen arvo on vain yhden tutkimuksen tekemä arvio.

Kyselyn mukaan suurin osa kuluttajista uskoo, että lentoyhtiöiden ja valtioiden pitäisi kuluttajien sijasta maksaa päästöjen vähentämisestä tulevat kulut (Santos & Delina

2021). Kuitenkin valtionkin on saatava rahansa biopolttoaineisiin verorahoista, joten se siirtäisi vain ongelmaa. Yksi valtion keino saada biopolttoaineet myymään markkinaehdoin on käyttää RIN-krediittejä (Sharma et al. 2021). RIN-krediittejä saadaan biopolttoaineiden käytöstä ja niitä voidaan myydä niille, jotka ei itse ole pystyneet käyttämään biopolttoaineita. Jos markkinoille asetetaan vähimmäismäärä biopolttoaineiden käytölle, RIN-krediittien avulla osapuolet, joiden on helppo käyttää biopolttoaineita voivat myydä RIN-krediittejä niille, joiden on vaikea käyttää biopolttoaineita. (US EPA 2015) RIN-krediittejä käytetään Yhdysvalloissa ja erityisesti Kaliforniassa ne ovat toimineet hyvin. Kaliforniassa tuotetaan suurin osa Yhdysvaltojen biopolttoaineista. (Kohlman 2020)

Biopolttoaineiden hinta voi hidastaa ilmaston kasvua. On selvää, etteivät kuluttajat ole valmiita maksamaan vapaaehtoisesti merkittävää määrää ylimääräistä biopolttoaineista. Tarkkaan biopolttoaineiden hinnan vaikutuksen määrään liittyy epävarmuuksia, koska ei ole selvää millainen hintajousto tarkalleen ilmastossa on ja kuinka paljon kerosiini tulee maksamaan tulevaisuudessa. Kuitenkin biopolttoaineista voisi saada markkinaehtoisempia esimerkiksi RIN-krediiteillä. Toisaalta biopolttoaineiden mahdollisia haittavaikutuksia ilmastoon lieventää se, että niitä voidaan tuottaa suhteellisen pieni määrä Euroopassa tulevaisuudessa.

## 4. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvä ratkaisu biopolttoaineet ovat ilmailulle. Tutkimuksessa biopolttoaineiden hyvyttä arvioitiin seuraavien tutkimuskysymyksien avulla:

- 1) Kuinka paljon biopolttoaineet todellisuudessa auttavat päästöjen vähennyksessä?
- 2) Voiko biopolttoaineita tuottaa riittävällä mittakaavalla Euroopassa?
- 3) Kuinka kallista biopolttoaineiden käyttö on?
- 4) Kuinka paljon biopolttoaineiden hinta vaikuttaisi ilmailuun?

Työ rajattiin koskemaan Eurooppaan ja drop-in-biopolttoaineisiin. Työssä ei tarkastella biopolttoaineiden tuotantomenetelmiä, eikä niiden kemiallisia prosesseja. Työssä keskitytään biopolttoaineiden ympäristöystävällisyyteen ja taloudellisuuteen.

Biopolttoaineet voivat vähentää yksittäisen lennon päästöjä kymmenillä prosenteilla. Yksittäisen lennon päästövähennyspotentiaalia pienentää biopolttoaineiden maksimisekoitussuhde 50 %. Lisäksi biopolttoaineiden tuotantomenetelmä ja niiden tuotannossa käytetty energia, kuten sähkö vaikuttavat tuleviin päästövähennyksiin. Koko ilmailusektorilla päästövähennykset ovat Euroopassa kahdesta syystä pienemmät. Biopolttoaineita ei pystytä tuottamaan merkittäviä määriä, vain noin 3 % kokonaispolttoainekulutuksesta lähitulevaisuudessakin. Toiseksi ilmailu myös kasvaa vahvasti, joten ilmailussa päästöt voivat kasvaa biopolttoaineista huolimatta. Biopolttoaineet kuitenkin lieventäisivät kasvihuonekaasupäästöjen kasvua, ja lisäksi ne vähentävät myös ilmailun hiukkaspäästöjä merkittävästi jo pienemmillä sekoitussuhteillakin.

Euroopassa ei ole mahdollisuutta tuottaa riittävällä mittakaavalla biopolttoaineita ilmailuun. Biopolttoainetuotanto on rajallista ja biopolttoaineita tarvitsee ilmailun lisäksi myös auto- ja meriliikenne. Euroopassa ilmailussa käytetään noin 55 Mt polttoainetta vuodessa ja biopolttoaineita voidaan saada lähitulevaisuudessa vasta 0,55 Mt, eli noin 1 % koko kysynnästä. Euroopassa vuonna 2030 biopolttoaineisiin sopivaa biomassaa on noin 20 Mt, josta suurin osa menisi muuhun kuin ilmailun biopolttoaineiden

valmistamiseen. Euroopassa ei siis ole riittävästi biomassaa biopolttoaineiden raaka-aineiksi täyttämään ilmailun polttoainetarvetta.

Biopolttoaineiden käytön kalleus riippuu siitä, kuinka kallista kerosiini on. Kerosiinin hinta on historiallisesti vaihdellut nopeasti melko paljon, jopa kymmeniä prosentteja yhden vuoden aikana. Tällä hetkellä biopolttoaineiden hinta on monta kertaa kerosiinin hintaa korkeampi, mutta vain vähän suurempi kuin kerosiinin hinta oli 2010-luvun puolivälissä. Kerosiinin hinnan voidaan ajatella nousevan näistä hintavaihteluista huolimatta tulevaisuudessa, koska päästöoikeuksien hinta tulee nousemaan tulevaisuudessa. Tällä hetkellä biopolttoaineiden hintaero kerosiiniin aiheuttaisi 10–46 € lisäkustannuksen 1000 kilometrin lentoon, jos biopolttoainetta olisi 10 %:n sekoitussuhteella kerosiinissa.

Ilmailu tulee kasvamaan biopolttoaineista huolimatta, mutta biopolttoaineet tulevat todennäköisesti hidastamaan ilmailun kasvutahtia niiden korkeamman hinnan takia. Biopolttoaineet eivät toimi tällä hetkellä juurikaan markkinaehtoisesti, mutta esimerkiksi RIN-krediiteillä ne voitaisiin saada toimimaan hinnaltaan kilpailukykyisiksi kerosiinin kanssa. Tutkimusten perusteella vaikuttaa siltä, etteivät kuluttajat ole valmiita maksamaan vapaaehtoisesti enemmän puhtaammasta lennosta. Ilmailun hintajoustosta ei kuitenkaan ole paljoa tutkimusta ja on epäselvää, millainen hinta biopolttoaineilla sekä kerosiinilla tulee olemaan tulevaisuudessa, joten on epäselvää, millainen yhteisvaikutus näillä tarkalleen on ilmailulle.

Biopolttoaineet eivät pysty vähentämään ilmailun päästöjä merkittävästi Euroopassa, koska niitä voidaan tuottaa vain hyvin rajallinen määrä tulevaisuudessakin. Biopolttoaineiden avulla Euroopasta kuitenkin saadaan enemmän energiatasempia. Lisäksi, kun raaka-aineita kasvatetaan biopolttoaineisiin, raha pysyy Euroopan sisällä. Euroopassa käytetyistä öljyistä suurin osa tuotetaan sen ulkopuolella, usein maissa, joissa on epävakaa hallitus. Tällöin Eurooppa on myös riippuvainen öljyntuottajamaiden hallintojen mahdollisista epävakauksista.

Jatkotutkimuksissa voitaisiin tutkia, millainen hintajousto ilmailussa tarkalleen on. Tämän avulla voitaisiin arvioida tarkemmin, miten ilmailumarkkina tulee käyttäytymään tulevaisuudessa. Myös jatkotutkimus kerosiinin ja päästöoikeuksien hinnan arviosta tulevaisuudessa voisi selkeyttää, kuinka kilpailukykyisiä biopolttoaineet voisivat olla.

## 5. LÄHTEET

Abrantes, I. *et al.* (2021) 'Sustainable aviation fuels and imminent technologies - CO2 emissions evolution towards 2050', *Journal of Cleaner Production*, 313, p. 127937. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127937.

*Allowance Price Explorer* (no date). Available at: <https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices> (Accessed: 13 April 2022).

'Aviation benefits' [Preprint]. Saatavilla: <https://www.icao.int/sustainability/Documents/AVIATION-BENEFITS-2019-web.pdf> (Luettu: 22.2.2022).

Barke, A. *et al.* (2022) 'Are Sustainable Aviation Fuels a Viable Option for Decarbonizing Air Transport in Europe? An Environmental and Economic Sustainability Assessment', *Applied Sciences*, 12(2), p. 597. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/app12020597>.

'Biofuels annual European union'. Saatavilla: [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual\\_The%20Hague\\_European%20Union\\_06-18-2021.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_The%20Hague_European%20Union_06-18-2021.pdf) (Luettu: 25.3.2022).

Bravo-Mosquera, P., Catalano, F. and Zingg, D. 'Unconventional aircraft for civil aviation: A review of concepts and design methodologies'.

Capaz, R., Guida, E. and Seabra, J. (2020) *Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential*. Saatavilla: <https://onlinelibrary-wiley-com.libproxy.tuni.fi/doi/full/10.1002/bbb.2168> (Luettu: 25.1.2022).

Chuck, C. (2016) *Biofuels for Aviation*. Saatavilla: <https://learning.oreilly.com/library/view/biofuels-for-aviation/9780128032152/xhtml/Preface.xhtml> (Luettu: 3.3.2022).

'CORSA Sustainability Criteria for CORSA Eligible Fuels' (2021), s. 7.

Cox, K. *et al.* (2014) 'Environmental life cycle assessment (LCA) of aviation biofuel from microalgae, *Pongamia pinnata*, and sugarcane molasses', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(4), s. 579–593. doi:10.1002/bbb.1488.

Deane, J.P. and Pye, S. (2018) 'Europe's ambition for biofuels in aviation - A strategic review of challenges and opportunities', *Energy Strategy Reviews*, 20, s. 1–5. doi:10.1016/j.esr.2017.12.008.

Deane, P. and Pye, S. (2016) *Policy Report Biofuels for Aviation: Review and analysis of options for market development*.

Doctor, F. *et al.* 'Modelling the effect of electric aircraft on airport operations and infrastructure', 2022, 2022.

*EU Aviation: 25 years of reaching new heights.* Saatavilla: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/eu-aviation-25-years-reaching-new-heights-0\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/eu-aviation-25-years-reaching-new-heights-0_en) (Luettu: 22.2.2022).

*Europe increasingly dependent on risky oil imports* (2016) *Transport & Environment*. Saatavilla: <https://www.transportenvironment.org/discover/europe-increasingly-dependent-risky-oil-imports/> (Luettu: 27.3.2022).

European Environment Agency (EU body or agency) (2018) *Aviation and shipping: impacts on Europe's environment: TERM 2017: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report*. LU: Publications Office of the European Union. Saatavilla: <https://data.europa.eu/doi/10.2800/4907> (Luettu: 21.2.2022).

Gegg, P., Budd, L. and Ison, S. (2014) 'The market development of aviation biofuel: Drivers and constraints', *Journal of Air Transport Management*, 39, s. 34–40. doi:10.1016/j.jairtraman.2014.03.003.

Gössling, S. *et al.* (2021) 'COVID-19 and pathways to low-carbon air transport until 2050', *Environmental Research Letters*, 16(3), p. 034063. doi:10.1088/1748-9326/abe90b.

Hakim, M.M. and Merkert, R. (2016) 'The causal relationship between air transport and economic growth: Empirical evidence from South Asia', *Journal of Transport Geography*, 56, s. 120–127. doi:10.1016/j.jtrangeo.2016.09.006.

Kandaramath Hari, T., Yaakob, Z. and Binitha, N.N. (2015) 'Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, s. 1234–1244. doi:10.1016/j.rser.2014.10.095.

Khandelwal, B. *et al.* (2013) 'Hydrogen powered aircraft: The future of air transport', *Progress in Aerospace Sciences*, 60, s. 45–59. doi:10.1016/j.paerosci.2012.12.002.

Kleinberg, R.L. *et al.* (2018) 'Tight oil market dynamics: Benchmarks, breakeven points, and inelasticities', *Energy Economics*, 70, s. 70–83. doi:10.1016/j.eneco.2017.11.018.

Kohlman, M. (2020) *As jet fuel market craters, sustainable aviation fuel prepares for takeoff*. Saatavilla: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/blogs/agriculture/092320-as-jet-fuel-market-craters-sustainable-aviation-fuel-prepares-for-takeoff> (Luettu: 24.2.2022).

Kousoulidou, M. and Lonza, L. (2016) 'Biofuels in aviation: Fuel demand and CO2 emissions evolution in Europe toward 2030', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, s. 166–181. doi:10.1016/j.trd.2016.03.018.

Kramer, D. (2020) 'Hydrogen-powered aircraft may be getting a lift', *Physics Today*, 73(12), s. 27–29. doi:10.1063/PT.3.4632.

Lapuerta, M. *et al.* (2011) 'Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines', *Fuel Processing Technology*, 92(12), doi:10.1016/j.fuproc.2011.09.003.

Lark, T.J. *et al.* (2022) 'Environmental outcomes of the US Renewable Fuel Standard', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(9), doi:10.1073/pnas.2101084119.

*NASA Study Confirms Biofuels Reduce Jet Engine Pollution | NASA* (2017). Saatavilla: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-study-confirms-biofuels-reduce-jet-engine-pollution> (Luettu: 9.2.2022).

*Oil and petroleum products - a statistical overview*. Saatavilla: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Oil\\_and\\_petroleum\\_products\\_-\\_a\\_statistical\\_overview](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Oil_and_petroleum_products_-_a_statistical_overview) (Luettu: 13.2.2022).

Pendrill, F. *et al.* (2019) 'Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions', *Global Environmental Change*, 56, s. 1–10. doi:10.1016/j.gloenvcha.2019.03.002.

Pires, A.P.P. *et al.* (2018) 'Chemical Composition and Fuel Properties of Alternative Jet Fuels', *BioResources*, 13(2), s. 2632–2657.

Prussi, M. *et al.* (2021) 'Are algae ready to take off? GHG emission savings of algae-to-kerosene production', *Applied Energy*, 304, p. 117817. doi:10.1016/j.apenergy.2021.117817.

Prussi, M., O'Connell, A. and Lonza, L. (2019) 'Analysis of current aviation biofuel technical production potential in EU28', *Biomass and Bioenergy*, 130, doi:10.1016/j.biombioe.2019.105371.

Prussi, M., Panoutsou, C. and Chiamonti, D. (2022) 'Assessment of the Feedstock Availability for Covering EU Alternative Fuels Demand', *Applied Sciences*, 12(2), s. 740. doi:10.3390/app12020740.

Rumizen, M.A. (2021) 'Qualification of Alternative Jet Fuels', *Frontiers in Energy Research*, 9. Saatavilla: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenrg.2021.760713> (Luettu: 23.2.2022).

Santos, K. and Delina, L. (2021) 'Soaring sustainably: Promoting the uptake of sustainable aviation fuels during and post-pandemic', *Energy Research & Social Science*, 77, p. 102074. doi:10.1016/j.erss.2021.102074.

Schäfer, A.W. (2016) 'Chapter 1 - The Prospects for Biofuels in Aviation', in Chuck, C.J. (ed.) *Biofuels for Aviation*. Academic Press, s. 3–16. doi:10.1016/B978-0-12-804568-8.00001-9.

Schäfer, A.W. *et al.* (2019) 'Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft', *Nature Energy*, 4(2), s. 160–166. doi:http://dx.doi.org.libproxy.tuni.fi/10.1038/s41560-018-0294-x.

Sharma, B.P. *et al.* (2021) 'Economic Analysis of Developing a Sustainable Aviation Fuel Supply Chain Incorporating With Carbon Credits: A Case Study of the Memphis International Airport', *Frontiers in Energy Research*, 9. Saatavilla: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenrg.2021.775389> (Luettu: 10.2.2022).

Thomas, C.E. (2009) 'Fuel cell and battery electric vehicles compared', *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), pp. 6005–6020. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.06.003.

Tolga, T. and Gökmen, N. (2021) 'The Determination of the Factors Affecting Air Transportation Passenger Numbers', *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* [Preprint]. doi:10.15394/ijaaa.2021.1553.



Trejo-Pech, C.O. *et al.* (2021) 'Biofuel Discount Rates and Stochastic Techno-Economic Analysis for a Prospective Pennycress (*Thlaspi arvense* L.) Sustainable Aviation Fuel Supply Chain', *Frontiers in Energy Research*, 9. Saatavilla: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenrg.2021.770479> (Luettu: 9.2.2022).

US EPA, O. (2015) *Renewable Identification Numbers (RINs) under the Renewable Fuel Standard Program*. Saatavilla: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-identification-numbers-rins-under-renewable-fuel-standard> (Luettu: 16.4.2022).

Wang, M. *et al.* (2019) 'Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective', *Progress in Energy and Combustion Science*, 74, s. 31–49. doi:10.1016/j.pecs.2019.04.004.

## LIITTEET

**Taulukko 2.** CORSIA:n kestävän kehityksen ehdot biopolttoaineelle, mukautettu lähteestä ('CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels', 2021 s.1-2)

Teema	Ehto	Kriteerit
1. Kasvihuonekaasut	CORSIA hyväksytyjen biopolttoaineiden pitää vähentää päästöjä elinkaari huomioituna.	Kriteeri 1.1: SAF vähentää ainakin 10 % elinkaarensa aikana päästöjä verrattuna kerosiinin elinkaari-päästöihin
2. Viljelymaan alkuperä	Käytetty viljelymaa ei saa tuhota hiilinieluja.	Kriteeri 2.1: SAF:ia ei valmisteta biomassasta, joka on saatu viljelymaasta, joka on saatu 2008 jälkeen hiilinielun tuhoamisesta.
		Kriteeri 2.2: Jos maankäyttöä on muutettu 2008 jälkeen, lasketaan muutoksesta aiheutuvat päästöt ja verrataan sitä hyötyihin.
3. Vesi	SAF-tuotannon pitää säilyttää tai parantaa veden laatua ja saatavuutta.	Kriteeri 3.1: Toimintatavat asetetaan turvaamaan vedenlaatu.
		Kriteeri 3.2: Toimintatavat tehdään vedenkäytöltään tehokkaiksi ja huolehditaan, ettei pohjavettä kulu

		enemmän kuin sitä tulee luonnollisesti takaisin.
4. Maaperä	SAF-tuotannon pitää säilyttää tai parantaa maaperän laatua.	Kriteeri 4.1: Agrikulttuurin ja metsänhallinta pitää olla hyvää ja jätteet pitää kerätä maaperän laadun säilyttämiseksi/parantamiseksi.
5. Ilmanlaatu	SAF-tuotannon pitää minimoida ilmanlaadun haitat.	Kriteeri 5.1: Ilmansaasteita saa päästää vähän.
6. Luonnonsuojelu	SAF-tuotannon pitää säilyttää biodiversiteetin määrä ja turvata paikalliset ekosysteemit.	Kriteeri 6.1: SAF:ia ei tuoteta biomassasta, joka on saatu suojellulta alueelta, ellei todisteta, ettei sen tuotanto haittaa suojelun syytä.
		Kriteeri 6.2: Biomassaa ei saa tehdä haitallisista vieraslajeista ja vieraslajien leviämistä estetään lajille asiallisella tavalla.
		Kriteeri 6.3: Toiminta toteutetaan niin, että tuotanto ei häiritse suojeltujen alueiden biodiversiteettiä tai ekosysteemejä.
7. Jätteet ja kemikaalit	SAF-tuotannossa jätteet ja kemikaalit pitää käsitellä vastuullisesti.	Kriteeri 7.1: Toiminta toteutetaan niin, että tuotannosta tulevat jätteet ja kemikaalit säilytetään, käsitellään ja hävitetään asiallisesti.
		Kriteeri 7.2: Hyönteismyrkkyjen käyttää

		niin vähän kuin on mahdollista.
8. Ihmisoikeudet	SAF-tuotannon pitää kunnioittaa ihmisoikeuksia sekä työntekijöiden oikeuksia.	Kriteeri 8.1: SAF-tuotanto kunnioittaa ihmisoikeuksia sekä työntekijöiden oikeuksia.
9. Maankäyttöoikeudet	SAF-tuotannon pitää kunnioittaa maankäyttöoikeuksia ja alkuperäiskansan oikeuksia.	Kriteeri 9.1: SAF-tuotanto kunnioittaa maankäyttöoikeuksia ja alkuperäiskansan oikeuksia.
10. Vedenkäyttöoikeudet	SAF-tuotannon pitää kunnioittaa olemassa olevia vedenkäyttöoikeuksia.	Kriteeri 10.1: SAF-tuotanto kunnioittaa olemassa olevia vedenkäyttöoikeuksia.
11. Sosioekonominen asema	SAF-tuotannon pitäisi parantaa köyhien alueiden sosioekonomista asemaa.	Kriteeri 11.1: SAF-tuotanto pyrkii parantamaan köyhillä alueilla sosioekonomista asemaa yhteisöille, joihin SAF-tuotanto vaikuttaa.
12. Ruoka	SAF-tuotannon pitää parantaa ruoan saatavuutta alueilla, jossa siinä on epävarmuutta.	Kriteeri 12.2: SAF-tuotanto pyrkii parantamaan ruoan saatavuutta, joihin SAF-tuotanto vaikuttaa negatiivisesti.