

LAPPEENRANNAN–LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

**LENTOLIIKENTEEN
KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN**

Reducing greenhouse gas emissions in aviation

Työn tarkastaja: Apulaisprofessori, TkT Ville Uusitalo

Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Elisa Uusitalo

Lappeenrannassa 12.1.2020

Artturi Kalliomäki

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Artturi Kalliomäki

Lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen

Kandidaatintyö

2019

46 sivua, 8 taulukkoa, 4 kuvaa ja 2 liitettä

Työn tarkastaja: Apulaisprofessori, TkT Ville Uusitalo

Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Elisa Uusitalo

Hakusanat: Lentoliikenne, kasvihuonekaasupäästöt, CO₂

Keywords: Aviation, greenhouse gas emissions, CO₂

Tämän työn tavoite on selvittää, millä keinoilla lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää. Tarkastelusta on rajattu pois siivettömät ja sotilaalliset ilma-alukset. Aiheen ymmärtämiseksi selvitetään lentokoneiden päästöjen määrää globaalilla tasolla ja tarkastellaan päästöjen vaikutuksia ilmakehään ja ilmaston lämpenemiseen.

Lentoliikenteen päästöjä voidaan vähentää monella eri tavalla. Lentoliikenteellä on suuri rooli taloudessa, siksi on tärkeää ymmärtää eri vaihtoehtojen hyvät ja huonot puolet. Välittömiä päästövähennyksiä voidaan saada käyttämällä energiatehokkaampia moottoreita, hienosäätämällä koneiden aerodynamiikkaa ja vähentämällä lentämistä.

Biomassapohjaisia polttoaineita käyttämällä voidaan saada aikaan huomattavan suuret kasvihuonekaasujen vähennykset. Tämä edellyttää, että biopolttoaineiden tuotanto on vastuullista. Siirtymällä fossiilisista polttoaineista sähkö- tai vetykäyttöisiin lentokoneisiin voidaan lentämisestä saada melkein päästötöntä. Sähkö- ja vetykäyttöisten lentokoneiden käyttö vaatisi uutta konekalustoa ja muutoksia polttoaineen jakeluun. Uusiutuvien polttoaineiden käyttö onnistuu tiettyinä pitoisuuksina nykyisissä koneissa. Voi kuitenkin kestää vuosikymmeniä, ennen kuin lentoliikenteen muutokset ja päästövähennykset konkretisoituvat.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	4
1 JOHDANTO	5
2 LENTOLIIKENTEEEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT.....	7
2.1 Kaupallisen lentoliikenteen päästöt.....	7
2.2 Lentoliikenteen päästöjen kehitys tulevaisuudessa	10
2.3 Lentoliikenteen nykyinen sääntely.....	13
3 ENERGIATEHOKKUUTTA LENTOLIIKENTEESEEN	17
3.1 Lentoliikenteen kehitysaskeleet kohti vähäpäästöisyyttä.....	17
3.2 Konetyypin ja mallin vaikutus päästöihin.....	18
4 BIOPOLTTOAINEET LENTOLIIKENTEESSÄ.....	20
4.1 Biopolttoaineiden soveltuvuus	20
4.2 Biopolttoaineiden mahdollisuudet tulevaisuudessa	24
5 TULEVAISUUDEN ENERGIANMUODOT	26
5.1 Sähkölentokoneet	26
5.2 Muut vaihtoehdot	28
5.2.1 Vety	28
5.2.2 Synteettiset polttoaineet.....	29
6 CASE TENERIFFAN LENTOMATKAN PÄÄSTÖT JA NIIDEN VÄHENTÄMISMAHDOLLISUUDET	31
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	35
8 YHTEENVETO.....	39
LÄHTEET	41

LIITTEET

Liite 1. Case – vertailun laskentakaavat

Liite 2. Case – vertailun tulokset

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

ASTM	American society of testing and measurement
EU	Euroopan Unioni
KHK	Kasvihuonekaasu
ICAO	International Civil Aviation Organization, Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö
IATA	Kansainvälinen ilmakuljetusliitto, lentoyhtiöiden oma etu- ja yhteistyöjärjestö
CAEP	Ilmailua ja ympäristönsuojelua käsittelevä ICAO:n alainen komitea
SYKE	Suomen Ympäristökeskus
EASA	Euroopan lentoturvallisuusvirasto, European Aviation Safety Agency
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli
SRES	Kasvihuonekaasuskenaario, Special Report on Emissions Scenarios

Yksiköt

MJ	megajoule
MT	million tonnes

Alkuaineet ja yhdisteet

CH ₄	metaani
CO ₂	hiilidioksidi
NO _x	typen oksidi
SO ₂	rikkidioksidi
SO _x	rikin oksidi

1 JOHDANTO

Pariisin ilmastopimus vuodelta 2015 edellyttää, että maapallon keskilämpötilan nousu pidetään alle kahdessa asteessa esiteolliseen aikaan verrattuna. Lisäksi edellytetään toimia, joilla lämpeneminen saadaan pidettyä alle 1,5 asteessa (Ympäristöministeriö 2018). Ilmaston lämpeneminen aiheutuu suurimmaksi osaksi ihmiskunnan modernin elämäntyylin ja siihen liittyvän kulutuksen aiheuttamista päästöistä. Lentoliikenteen osuus on noin 2,5 % maailmanlaajuisista ihmisen toiminnasta aiheutuvista hiilidioksidin suorista päästöistä. (SYKE 2019.)

Lentoliikenteestä syntyy hiilidioksidin lisäksi muitakin päästöjä, esimerkiksi typen ja rikin oksideja, palamattomia hiilivetyjä, pienhiukkasia ja vesihöyryä. Kun kaikki lentoliikenteen päästöt otetaan huomioon, on lentoliikenteen päästöjen osuus ilmakehän lämpenemiseen arvioitu noin neljäksi prosentiksi. Hiilidioksidi on kuitenkin lentoliikenteen päästöistä vielä tällä hetkellä ainoa, jonka määriä ja vaikutuksia ilmakehässä pystytään varmuudella arvioimaan. (SYKE 2019.)

Kansainvälinen ilmakuljetusliitto (International air transport association, IATA) ennakoii lentoliikenteen lähes kaksinkertaistuvan vajaan 20 vuodessa. IATA arvioi, että lentomatkustajia on jopa 8,2 miljardia vuonna 2037 (Moottori 2019). Lentoliikenteen määrän kasvu tulee näkymään kasvavina päästöjen määrinä. Lentoliikenteen päästöt eivät kuitenkaan kasva samaa tahtia lentoliikenteen kanssa, koska uusi teknologia hillitsee päästöjä. Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ja Suomen itsenäisyyden juhlarahaston (Sitra) tutkimuksen perusteella lentoliikenteen päästöt kasvavat noin kolme prosenttia jokaista lentoliikenteen viiden prosentin vuotuista kasvua kohden. (SYKE 2019.)

Esimerkiksi Euroopassa lentojen määrä vuonna 2005 oli noin 8,89 miljoonaa. Vuonna 2017 lentojen määrä Euroopassa on kasvanut jo yli 9,6 miljoonaan vuotuisen lentoon. Matkustajamäärät edellä mainituilla lennoilla ovat kasvaneet noin 50 % vuodesta 2005. Koneiden koko on kasvanut ja matkustajatilaa hyödynnetään tehokkaammin. Lisäksi kasvua on edesauttanut lentolippujen hintojen aleneminen halpalentoyhtiöiden tultua markkinoille

ja kilpailun kovennuttua. Vuonna 2040 odotetaan Euroopan lentokenttien asiakasmäärän olevan jo 13,6 miljoonan tasolla. (EASA, 2019, 7 – 18.)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on löytää mahdollisia ratkaisuja lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen hiilidioksidin osalta. Työssä keskitytään hiilidioksidiin, koska muiden päästöjen vaikutuksista ei ole vielä tarpeeksi tutkimustietoa. Työn kohteena ovat kaupallisen lentoliikenteen päästöt, mutta työn ulkopuolelle jätetään sotilasilmailu, siivettömät ilma-alukset ja yksityislentokoneet.

Työssä käydään läpi lentoliikenteen tulevaisuuden päästötavoitteita ja keinoja tavoitteisiin pääsemiseksi. Työn tutkimuskysymyksinä ovat seuraavat: 1. Minkälaisilla keinoilla voidaan vähentää lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä? 2. Mikä näiden keinojen merkitys on kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä? Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta sekä case-tarkastelua. Kirjallisuuskatsauksella saadaan näkemys lentoalan päästöjen kokonaisuudesta ja keinoista niiden vähentämiseen. Case-tarkastelussa vertaillaan eri keinojen hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaalia.

Teoriaosassa selvitetään lentoliikenteen päästöjen määrä ja koostumus, sekä niiden osuus globaalilla tasolla. Teoriaosassa käsitellään myös lentoliikenteen nykyistä sääntelyä niin lainsäädännön kuin kuluttajavaikutuksen näkökulmasta. Teoriaosuuden jälkeen käsitellään lentokoneiden mallin ja iän vaikutusta kokonaispäästöihin sekä lentokoneiden tulevaisuutta. Tämän jälkeen tunnistetaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen ratkaisuja uusiutuvista polttoaineista vaihtoehtoisiin energianmuotoihin.

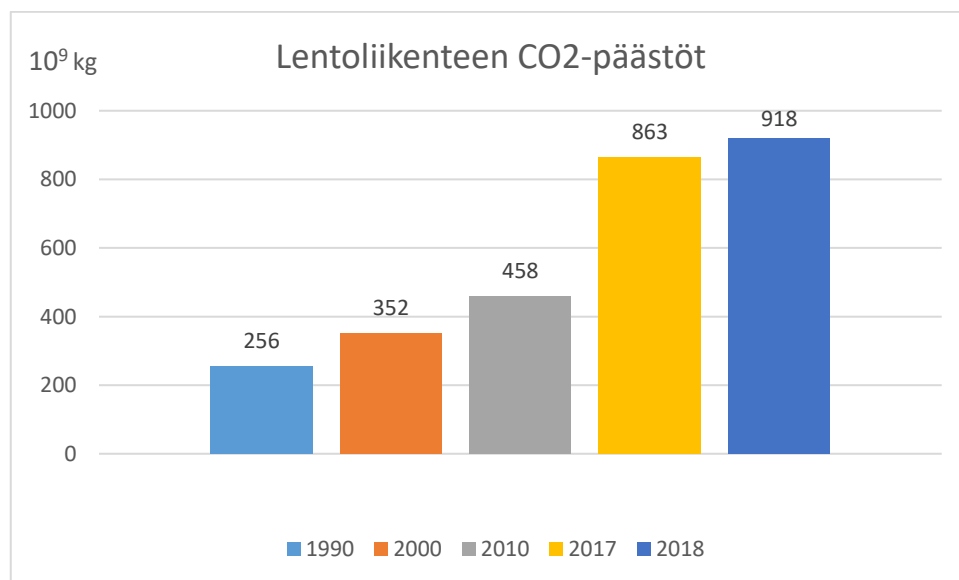
Empiirisessä osassa todennetaan päästöjen vähennysmahdollisuudet case-tarkastelussa. Lähitulevaisuudessa lentoliikenteessä oletettavien muutosten vaikutusta mallinnetaan lomalennolla Helsinki –Vantaan lentokentältä Teneriffalle. Lopuksi tehdään päätelmät siitä, kuinka hyvin päästöjen vähentämiseen tähtäävillä keinoilla päästään toivottuun lopputulokseen ja miten ne vaikuttavat lentomatkailuun.

2 LENTOLIIKENTEEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT

2.1 Kaupallisen lentoliikenteen päästöt

Lentoliikenteellä on suuri taloudellinen merkitys, se tarjoaa maailmanlaajuisesti yli 65 miljoonaa työpaikkaa, joista noin 10 miljoonaa palvelee suoraan lentoliikennettä. Loput työpaikat linkittyvät alaan esimerkiksi matkailun kautta. Lentomatkailu tuottaa vuosittain noin 630 miljardia euroa, ja se on sijalla 20, jos sitä verrataan valtioiden bruttokansantuotteisiin. (ATAG 2019.) Lentoliikenteen taloudellinen vaikutus usealle maalle on huomattavan suuri, mikä pitää poliittisissa päätöksissä huomioida.

Lentoliikenteen päästöt ovat noin 2-3 % kaikista energiankulutuksen hiilidioksidipäästöistä. Lentoliikenteen hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2017 IATA:n arvion mukaan 863 miljoonaa tonnia. Vuonna 2018 päästöt olivat nousseet jo 905 miljoonaan tonniin. Lentoliikenteen päästöt ovat vuositasolla kasvaneet huomattavasti. Kuvassa yksi esitetään kuinka paljon CO₂ – päästöt ovat vuoden 1990 alusta lähtien kasvaneet. (Brandon Graver et al. 2019, 1-2.)



Kuva 1. Lentoliikenteen historialliset päästöt. (EASA 2019, ICAO 2016, ENVI 2015)

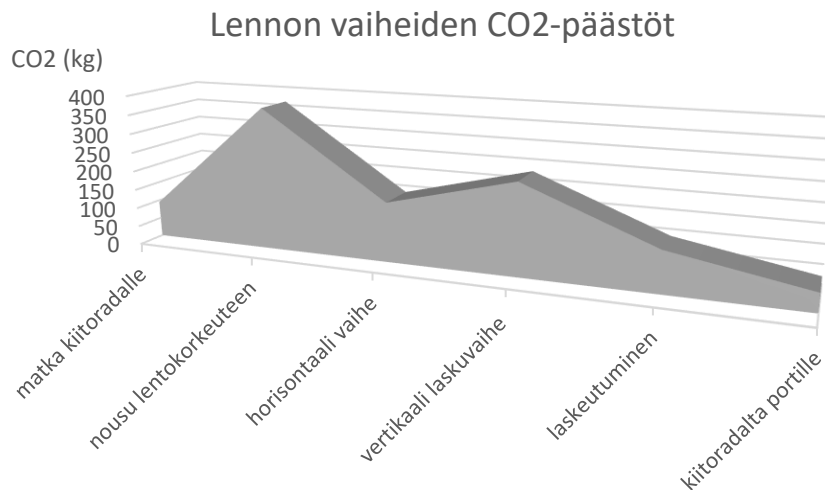
Lentoliikenteen päästöjen vaikutukset ilmaston lämpenemiseen esitetään kuvassa kaksi säteilypakotteen RF avulla, tehona pinta-alaan nähden. Päästöjen vaikutukset ovat arvioita,

jotka perustuvat hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n laskelmiin. Säteilypakote kuvaa positiivisena (kuvassa punaisena) ilmastoa lämmittävää vaikutusta ja negatiivisena (kuvassa vihreänä) ilmastoa viilentävää vaikutusta. Päästöjen yhteisvaikutus on positiivinen. Päästöjen vaikutukset perustuvat IPCC:n arvioihin vuodelta 2005 ja laskelmissa todettiin, kuinka vähän tunnemme muiden päästöjen kuin hiilidioksidin vaikutuksia ilmakehään. (Robert Sausen et al, 2005, 1-3.)



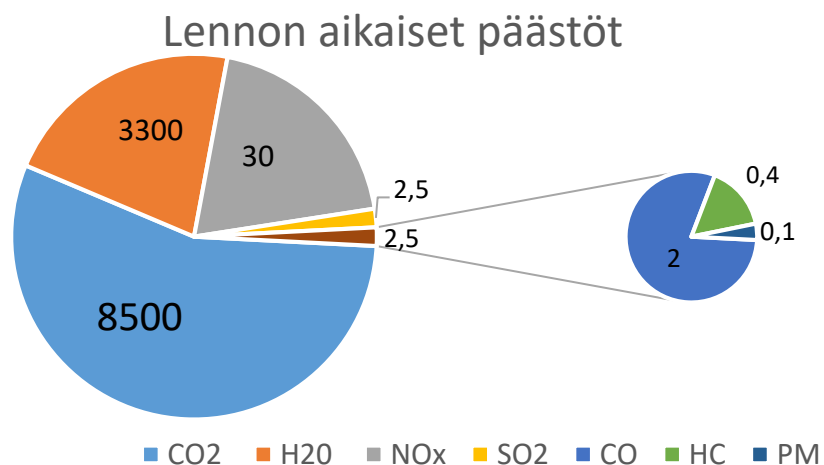
Kuva 2. Lentoliikenteen päästöjen arvioidut vaikutukset ilmakehässä säteilypakotteella laskettuna (IPCC).

Lentokoneiden päästöt muuttavat ilmakehän koostumusta, lisäävät pilvisyyttä ja muokkaavat luonnollisia pilviä. Suurin osa (noin 86 %) lentoliikenteen päästöistä syntyy itse lennon aikana ilmakehän troposfääriin, kuten kuva kolme lennonvaiheiden päästöosuuksista esittää. Kokonaisuudessaan näiden päästöjen yhteisvaikutuksen on arvioitu kasvattavan ilmaston lämpenemistä. Hiilidioksidin vaikutuksista ilmaston lämpenemiseen voidaan olla varmoja, mutta muista lentoliikenteen päästöjen todellisista vaikutuksista ilmakehässä tarvitaan vielä paljon tutkimustietoa. (ICAO 2016, 97.)



Kuva 3. Lento matkasta aiheutuvat CO₂-päästöt eri lennonvaiheissa (ICAO 2016).

IATA arvioi, että tunnin kestävän lennon aikana lentokone kuluttaa kerosiinia keskimäärin noin 2700 kg. Matkan aikana moottorit imevät kylmää ilmaa läpi noin 850 000 kg. Tästä syntyy kuumaa ilmaa noin 130 000 kg ja 772 700 kg kylmää ilmaa. Kuuma ilma sisältää hiilidioksidia 8500 kg, vesihöyryä 3300 kg, typenoksideja 30 kg ja muutamia kiloja muita aineita. (EASA 2019, 22.) Tunnin kestävästä lennosta aiheutuvat päästöt esitetään tarkemmin kuvassa neljä. Näistä päästöistä 14 % aiheutuu kiitoradalla liikkumisesta ja 76 % aiheutuu itse lentämisestä, suurin osa nousuvaiheesta. (EASA 2019, 52.)



Kuva 4. Yhden tunnin kestävän lennon aiheuttamat päästöt kilogrammoina. (EASA, 2019).

Noin 80 % lentämisen päästöistä syntyy yli 1500 km lentomatkoilta. Lentoliikenteen päästöjen vähentämisen yhtenä ongelmana on, ettei pitkän matkan lennoille ole kilpailukykyisiä vaihtoehtoisia matkustustapoja. (ATAG 2019.)

2.2 Lentoliikenteen päästöjen kehitys tulevaisuudessa

Lentoliikenteen päästöjen odotetaan kasvavan lentoliikenteen kasvun myötä. Laskelmat päästöjen tulevasta määrästä vaihtelevat suuresti. Kuitenkin kaikkein valoisimmatkin arviot päätyvät lopputulokseen, että energiatehokkaammat lentokoneet ja vaihtoehtoiset polttoaineet eivät riitä siihen, että lentomäärien tasaisesta kasvusta aiheutuva päästöjen nousu saataisiin kuriin seuraavien vuosikymmenten aikana. Euroopassa ennakoidaan vuoden 2040 hiilidioksidipäästöiksi 198 miljoonaa tonnia, eli kasvua tulisi 21 % nykyisestä 163 miljoonasta tonnista. (EASA 2019, 22.)

Manchesterin yliopistossa toteutettiin vuonna 2010 tutkimus, jossa arvioitiin lentoliikenteen tulevaisuuden näkymiä vuoteen 2100 asti hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin päästökehitysraporttien IPCC/SRES pohjalta. Tutkimuksessa hyödynnettiin lentoliikenteen kasvuarvioita, teknologian kehitystä, tietoja lentokoneiden polttoaineen kulutuksesta ja reittilennoista ja näitä vertailtiin vuosituhannen alun vuositason muutoksiin. Tulevaisuuden arviot vuoden 2010 tutkimuksen pohjalta ovat edelleen käyttökelpoisia.

Tutkimus esittelee useita mahdollisia kehityskulkuja, joista tässä työssä käsitellään niistä neljää. Nämä neljä vaihtoehtoa huomioivat eri tavoin väestönkasvun, bruttokansantuotteen kasvun, politiikan muutokset ja teknologian kehityksen. Vaihtoehtoiset näkymät on nimetty A1, A2, B1 ja B2. A1 ja B1 perustuvat lentoliikenteen kasvuun, ja A2 ja B2 puolestaan vähenevään lentoliikenteeseen. Päätelmät on esitetty taulukossa yksi, jossa on laskettu polttoaineen kulutus vuositasolla ja hiilidioksidipäästöt teragrammoissa vuodessa ja näitä on vertailtu vielä maailmanlaajuisiin arvioihin liikenteen kokonaispäästöistä.

Manchesterin yliopiston tutkimuksessa arvioitiin vuoden 2020 perustasoksi CO₂ päästöissä 1062 miljoonaa tonnia. Iatan arvion mukaan vuoden 2018 päästöt olivat jo 905 miljoonaa tonnia. Vuonna 2010 tehdyn arvion toteutuminen edellyttää yli kahdeksan prosentin

lentoliikenteen kasvua 2019 ja 2020 -vuosille, mikä on mahdollisuuksien rajoissa. (Bethan Owen et al. 2010, 1-3.)

Tutkimuksen oletuksessa A1 arvioidaan myönteisesti lentoliikenteen tulevaisuutta, luottaen teknologian kehitykseen. Arvio perustuu lentokoneiden polttoainekulutuksen tehokkuuden parantumiseen noin 1 % vuositahtilla vuoteen 2050 asti. Kuitenkin IPCC:n arvioiden mukaan tehokkuuden kasvu hidastuu vuoden 2020 jälkeen. Tutkimustuloksissa kyseisen näkymän polttoaineen kulutus ja hiilidioksidipäästöt ovat suurimmat. Tämä johtuu siitä, ettei vuosittainen 1 %:n parannus energiatehokkuudessa riitä estämään lentoliikenteen kasvusta aiheutuvia päästöjä. A1-oletuksessa liikenteen päästöjen osuus kasvaa, verrattaessa IPCC:n malliin ja lentoliikenteen osuus liikenteen päästöistä kasvaa selkeästi. (Bethan Owen et al. 2010, 1-3.)

Oletus A2 ennakoi, että lentokoneiden energiatehokkuus kasvaa vain noin 0,2 % vuositasolla, perustuen kansainvälisen yhteistyön ja kaupankäynnin hiipumisen mahdollisuuteen. Tästä seuraisi, että polttoainetehokkuus kasvaisi vuoden 2000 tasosta vain 30 % vuoteen 2050 mennessä. A2:ssa liikenteen päästöjen osuus pienenee verrattuna IPCC:n malliin, mutta lentoliikenteen päästöjen osuus kaikista liikenteen päästöistä kasvaa hieman. (Bethan Owen et al. 2010, 1-3.)

Oletus B1 on hyvin lähellä A1:stä. B1 ennakoi, että polttoainetehokkuus kasvaa 1 %:n vuositahtia vuoteen 2050 asti, jonka jälkeen kasvu jatkuisi 1,3 %:n vuosivauhdilla. B1:ssä polttoainetehokkuuden teknologia ja lentoyhtiöiden investoinnit kehittyvät myönteisesti ja toteutuessaan oletus antaisi lentoliikenteelle selkeästi alimmat päästöarvot. B1:ssä liikenteen päästöt kasvavat todella paljon tulevaisuudessa, mutta lentoliikenteen osuus päästöjen määrästä ei muutu. (Bethan Owen et al. 2010, 1-3.)

Oletus B2 ennakoi lentoliikenteen keskittyvän hitaasti kohti mannertenvälistä liikennettä. Mannerten sisäinen liikkuminen toteutettaisiin suureksi osaksi muilla liikennevälineillä. B2 käsittelee tulevaisuuden mahdollisuutta, jossa ympäristöpolitiikan toteutus jää alueelliselle tasolle. Polttoainetehokkuuden oletetaan kasvavan 1 %:n vuosivauhdilla vuoteen 2030 asti, sen jälkeen kasvu laskisi 0,6 %:iin. B2:ssa liikenteen kokonaispäästöt pienevät IPCC:n

malliin verrattaessa, mutta lentoliikenteen osuus liikenteen päästöistä kasvaa hieman. (Bethan Owen et al. 2010, 1-3.)

Manchesterin yliopiston neljän erilaisen mallin lopputuloksien erot ovat huomattavat. Eroihin vaikuttavat ympäristöpolitiikka, energiatehokkuuden kehitys ja uuden teknologian käyttöönotto, sekä lentämisen kasvun näkymät. Näistä johtuen voivat vuoden 2100 lentoliikenteen hiilidioksidipäästöt olla mitä vain 1186:n ja 5067:n miljoonan tonnin väliltä. (Bethan Owen et al. 2010, 1-3.)

Manchesterin yliopiston tutkimuksessa läpikäytiin myös yksi todella optimistinen vaihtoehto, jossa huomioitiin vain edellä mainittujen neljän oletuksen parhaat puolet. Tämän B1ACARE -oletuksen hiilidioksidipäästöiksi vuodelle 2100 saatiin 723 miljoonaa tonnia. Lentoliikenteen päästöjen tulevaisuus riippuu todella paljon käytännön teoista niin politiikassa kuin yksilötasolla ja teknologian kehityksestä. (Bethan Owen et al. 2010, 1-3.)

Taulukko 1. Päästöjen kehitys tulevaisuudessa neljän eri mallin mukaan. (Bethan Owen et al. 2010.)

vuosi/skenaario	polttoaine kulutus (MMT)	CO ₂ (MMT)	IPCC/SRES CO ₂ (MMT)	liikenteen päästöjen osuus SRES:tä	arvio liikenteen päästöistä (MMT)	lentoliikenteen päästöjen osuus liikenteestä (%)
2020	336	1062	58 701			
2050 A1	766	2418	58 701	28 %	16 284	15 %
2050 A2	469	1481	60 472	15 %	9 148	16 %
2050 B1	426	1345	42 887	25 %	10 785	12 %
2050 B2	435	1373	41 194	24 %	9 861	14 %
2100 A1	1605	5067	48 020	43 %	20 773	24 %
2100 A2	956	3018	105 991	12 %	12 803	24 %
2100 B1	375	1186	19 053	51 %	9656	12 %
2100 B2	565	1783	50 689	20 %	9951	18 %

Oletus B2, joka ennakoi, että ympäristöpolitiikassa ei pystytä määrittelemään yhteisiä tavoitteita tai jos tavoitteita saadaan, niitä ei toteuteta, vaikuttaa tällä hetkellä epätodennäköiseltä. Nykyään yli sata Kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAO:n jäsenmaata on antanut suunnitelman hiilidioksidin vähentämisestä. ICAO vaatii Kansainvälisen lentoliikenteen päästöjärjestelmän CORSIA:n kautta jäsenmailtaan kansainvälisiä lentoja operoivien lentoyhtiöiden hiilidioksidipäästöistä raportteja vuosilta 2019 – 2035.

Teknologialla on suuri vaikutus tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen määrään. Kasvuennusteiden polttoainetehokkuutta on vaikea arvioida. Tällä hetkellä lentokoneiteollisuudessa on paljon suuria yrityksiä ja kilpailua, mikä edesauttaa tasaisen kasvun mahdollisuutta. Yhdysvalloissa esimerkiksi Nasa kehittää tällä hetkellä vähäpäästöisempiä lentokoneita ja yhtiön tavoitteena on vähentää nykyisiä päästöjä 15 %:lla. Myös yhteiseurooppalainen Airbus ja yhdysvaltalainen Boeing kilpailevat polttoainetehokkaampien koneiden valmistuksesta.

Myös lentokoneiden polttoaineita kehitetään. Tavoitteena on korvata fossiilisia polttoaineita ympäristölle ystävällisemmillä biopolttoaineilla. Esimerkiksi butanolipohjainen biopolttoaine alkaa 2020-luvun aikana vallata etanolipohjaisten polttoaineiden markkinaosuutta. Se on etanolipohjaisia polttoaineita selkeästi energiatehokkaampi ja näin ollen kasvattaa koneiden energiatehokkuutta. (Tahir Hikmet Karakoc et al. 2018, 9.)

2.3 Lentoliikenteen nykyinen sääntely

Lentoliikenteen päästöjen sääntelyn tarve on tiedostettu pitkään. Sääntelyä ei kuitenkaan ole toteutettu valtiojohtoisesti kansainvälisellä tasolla, vaan siitä vastaa yleisen hyväksynnän saanut Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO.

Lentopolttoaineiden verottaminen on esillä useassa sääntelyä koskevassa raportissa. Vuonna 1944 ICAO:n tekemä Chicagon yleissopimus esti saapuvan lentoliikenteen polttoaineiden verottamisen, mikä hankaloittaa suuresti lentokerosiinien verottamista. Lentoyhtiöiden ei tarvitse maksaa polttoaineesta valmisteveroa, vaikka lentopolttoaineita voisi valtio verottaa kaikilta lähteviltä lentokoneilta. Tässä ongelmana on mahdollisuus, että kotimaan verollisen

kerosiinien käyttöä minimoitaisiin tankkaamalla lentokoneet täyteen ulkomailla. Tällaiseen tilanteeseen joutuminen ei hyödyttäisi päästöjen alentamista. (TE 2019, 1-2.)

Koska teknologiaa (lentokoneiden energiatehokkuus / siipien kantokyky) ja vaihtoehtoisia polttoaineita kehittämällä ei ole saatu riittäviä tuloksia, on turvauduttu päästökauppaan. Siinä hiilidioksidipäästöille on asetettu hinta. Vuosina 2013 – 2020 arviolta 193,4 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöt on saatu hyvitettyä EU:n päästökauppajärjestelmästä rahoittamalla muiden alojen päästövähennyksiä. (EASA 2019, 9.)

Vuoden 2016 syyskuussa järjestettiin ICAO:n 39. kokoontuminen Pariisiin ilmastopimuksen tavoitteiden mahdollistamiseksi lentoliikenteen osalta. Yksi kokoontumisen isoista onnistumisista oli päätös päästöhyvitysjärjestelmä CORSIAN käyttöönotosta. 81 valtiota lupautui alusta asti vapaaehtoisesti ottamaan osaa uuteen päästöjärjestelmään. Yhdessä nämä 81 valtiota vastaavat noin 76 prosentista kaikesta kansainvälisestä lentämisestä. Päästöjärjestelmä käynnistyy vuonna 2021 vapaaehtoisten maiden osalta. (ICAO CORSIA 2019, State Pairs.)

Lentoliikenteen tavoittelema hiilineutraalisuus toteutetaan lähitulevaisuudessa ostamalla päästöoikeuksia markkinoilta. Kaikkien ICAON jäsenvaltioiden kansainvälisiä lentoja operoivien lentoyhtiöiden, riippumatta kuuluuko CORSIA:n alle vai ei, on raportoitava vuosittain ICAO:lle kansainvälisten lentojensa hiilidioksidipäästöt vuosilta 2019 – 2035. Lentoyhtiöiden vuosittaiset päästöraportit on tarkastutettava ulkopuolisella sääntöjen mukaisella todentajalla ennen palautusta. Lentoyhtiöt arvioivat CO₂ - päästöt kulutetun polttoainemäärän mukaan ja ICAO arvioi tietojen perusteella kansainvälisen tason päästöt ja lentoliikenteen kasvukertoimen. (ICAO CORSIA 2019, Implementation Elements.)

Kansainvälisiä lentoja operoivien lentoyhtiöiden raportointivelvoite alkoi vuoden 2019 alusta. Vuosien 2019 ja 2020 tuloksista saadaan tulevaisuudelle vertailuarvo. Vertailuarvoihin perustuva vuonna 2021 alkava hyvitysjärjestelmä koskee CORSIA:an ilmoittautuneiden ICAO:n alaisten maiden lentoyhtiöiden kansainvälisiä reittilentoja. Eri lento-operaattorien hyvitysmäärät lasketaan saadusta vertailuarvosta ja hyvitys suoritetaan ostamalla muiden alojen päästövähennyshankkeiden päästöyksiköitä hiilimarkkinoilta. (Trafi CORSIA 2019.)

Valtiot ja yksityisomistuksessa olevat lentokentät voivat myös tehdä omia päätöksiä lentoliikenteen päästöjen vähentämiseksi. Lentoyhtiöt eivät ole olleet halukkaita osallistumaan biopolttoaineiden käytöstä aiheutuviin maksuihin, joten useat valtiot ja lentokentät ovat alkaneet harkita ja toteuttaa omia säädöksiään. Esimerkkinä valtioiden vaikutuksesta lentoliikenteen päästöihin on Norjan valtio, joka vaatii vuoden 2020 alusta, että Norjan alueen lentokenttiä käyttävissä lentokoneissa on oltava vähintään 0,5 % uusiutuvaa polttoainetta. Monet maat ovat ottaneet lentolippujen verotuksen käyttöön. Ruotsi otti lentoveron käyttöön vuonna 2018. Ranska esitteli kesällä 2019 suunnittelewansa lentolipuille veroa ja Suomessa eduskuntaan on menossa aiheesta aloite. Myös Kaliforniassa on saatu lainsäädännöllä kerosiin ja biokerosiin hintaero pieneksi (Sähköposti 2019a). Paras ja lähes ainoa vero-ohjauskeino lentoliikenteen ympäristöongelmien vähentämiseksi on lentovero. Näin katsovat professorit Esko Linnakangas ja Leila Juanto Lentoveron ylös nousu -kirjassaan. (Esko Linnakangas & Leila Juanto 2018, 125.)

Niskakangas arvioi, että kansalaisaloitteessa esitetty 3-40 euron suuruinen lentomatkan pituuden mukaan määräytyvä vero, ei ole tehokas lentämisen vähentäjä, mutta se on alku. Niskakangas mielestä lentovero pitäisi saada maailmanlaajuisesti voimaan ja sitä pitäisi pikkuhiljaa nostaa lentämisen hillitsemiseksi. Lentovero on käytössä useissa Euroopan maissa esimerkiksi Britanniassa, Saksassa ja Ruotsissa. Veron toteuttamista koko EU:n alueella vaikeuttaa Niskakangas mukaan se, että EU:ssa päätös edellyttää yksimielisyyttä. Suomessa on ollut lentovero 90-luvulla, mutta siitä on Niskakangas mukaan luovuttu kansalaisten vastustuksen vuoksi. (Yle Radio Suomen Päivä -lähetys 1.11.2019.)

Lentoliikenteen polttoaineesta ei makseta veroa. Se merkitsee kotimaiselle kaupalliselle lentoliikenteelle vuosittain noin 60–65 miljoonan euron veroetua. Henkilökuljetusten alennettu 10 %:n arvonlisävero merkitsee Suomessa noin 250 miljoonan euron verotukea kaikissa liikennemuodoissa. (Esko Linnakangas & Leila Juanto, 108.)

Kansainvälisen liikenteen vapautus polttoaineverosta ja ulkomaanmatkojen arvonlisäverovapaus ovat kansainvälisten sopimusten mukaisia, niiden arvo lento- ja laivaliikenteelle on vuosittain (staattisilla laskelmilla) useita satoja miljoonia euroja, ehkä miljardiluokkaa. Polttoaine on myös lentoliikenteen suurimpia

menoeriä. Esimerkiksi Finnairin vuoden 2017 kuluista polttoaineet olivat suurin kuluerä, 19 % kun henkilöstökulut olivat 17 %. (Esko Linnakangas & Leila Juanto, 108.)

3 ENERGIATEHOKKUUTTA LENTOLIIKENTEeseen

3.1 Lentoliikenteen kehitysaskeleet kohti vähäpäästöisyyttä

1930-luvulla lentoliikenne yleistyi, kun kansainvälinen reittiliikenne alkoi. Vuonna 1930 lentoliikenne kuljetti noin 6000 ihmistä. Vuonna 1938 lentoliikenteen kasvu oli ylittänyt miljoonan ihmisen rajan (Finavia 1930, 2019). Toisen maailmansodan vaikutukset lentokoneisiin olivat suuria ja koneet kehittyivät paljon. Koneet olivat kuitenkin raskaita kokoonsa nähden. Vuosikymmenien aikana lentokoneet ovat kehittyneet selkeästi isommiksi, hiljaisemmiksi ja vähäpäästöisemmiksi. Vasta viime vuosina lentokonevalmistajat ovat saaneet teknologian niin moottori kuin lentokoneiden kanto ominaisuuksien osalta tasolle, jossa lentokoneiden päästöjä saadaan pienennettyä useita kymmeniä prosentteja.

Lentoliikenteen nopean kehityksen ja parhaan teknologian hankkimisen esteenä ovat lentokoneiden kallis hinta sekä pitkä käyttöikä. Lentokoneet maksavat yleisesti yli sata miljoonaa euroa ja käyttöikä arvioidaan useaksi vuosikymmeneksi. Euroopassa lentoyhtiöiden laivueiden keski-ikä pysyi stabiilina pitkään noin 10,3 vuodessa, mutta viimeisen viiden vuoden ajalta se on kasvanut noin puolella vuodella 10,8 vuoden keskiarvoon (EASA 2019, 17). Keski-ikästä voidaan päätellä, että uusien mallien energiaystävällisyys realisoituu vasta noin vuosikymmenen jälkeen mallin saapumisesta markkinoille.

Uudet markkinoiden parhaimman energiatehokkuuden omaavat koneet kasvattavat aina suosiotaan. Viime vuosina kevyet komposiittirunkoiset Airbus A350- ja Boeingin 737-laivueet ovat olleet suosiossa energiatehokkuuden ja uusien elektronisten toimintojen myötä. Tosin Boeingin tekniset ongelmat ovat olleet malliston kanssa suuria. Yleisesti alan toimijat ovat kehittäneet lentokoneita viimeisten vuosikymmenien aikana kevyemmiksi, siipiä kantavammiksi ja moottoreita energiatehokkaammiksi. Polttoaineen hinnan ollessa noin kolmasosa lento-operaattorien kokonaiskustannuksista, ei ole ihme, että säästeliäämmin polttoainetta kuluttaville koneille on markkinoilla kysyntää. (Langston Lee 2019, 39 – 41.)

Lentoliikenteen reittien optimoinnin vaikutus matkan pituuteen on suuri. Reittejä optimoidaan sallituissa rajoissa sääolojen perusteella. Vallitsevat sääolot vaikuttavat paljon niin lentoreittiin kuin tankattavaan polttoaineen määrään. Lentokoneiden reittien optimointi tietokoneilla on yleistynyt. Esimerkiksi A350-koneissa on mahdollisuus ottaa käyttöön lentäjää auttava tietokoneohjelma PACE, joka auttaa reittien valinnassa ja energiansäästössä. Ohjelman avulla lennolla säästetään niin polttoaineessa kuin ajassa, mikä näkyy myös vähentyvinä päästöinä. (Finnair 2019.)

Lentoliikenteen reittien optimoinnin lisäksi tällä hetkellä Airbus kokeilee mahdollisuutta pienentää päästöjä lentämällä jonossa kahdella koneella. Ajatuksena on, että pitkän matkan koneet lentäisivät peräkkäin ja jälkimmäinen kone hyötyisi edellä lentävän koneen aiheuttamista jättöpyörteistä. Tällöin perässä lentävä kone saisi jättöpyörteistä lisää nostetta, mikä vähentäisi polttoaineen kulutusta. Tekniikka & Talous -lehden uutisen haastateltavan Airbusin Upnextin johtajan Sandra Bour Schaefferin mukaan tulokset osoittavat, että Pariisin ja New Yorkin välisillä tyypillisillä transatlanttisilla lennoilla voidaan saavuttaa 5-10 prosentin kokonaissäästö polttoaineenkulutuksessa. Schaeffer toivoo myös, että käytäntö saataisiin käyttöön jo 2020-luvun puolivälissä. (Tekniikka & Talous 2019a.)

3.2 Konetyypin ja mallin vaikutus päästöihin

Lentokoneiden nopean kehityksen seurauksena jo 10 vuotta vanhat mallit voivat vaikuttaa saastuttavilta verrattuna uusinta teknologiaa omaavan seuraavan sukupolven koneisiin. Vanhoja malleja on mahdollista päivittää, joten lentokoneiden hautausmaat eivät täyty aina uuden mallin tullessa markkinoille. Vanhempiin malleihin voi asentaa uuden energiatehokkaan moottorin tai sen aerodynamiikkaa voidaan parantaa muutoksilla. Muutoksista saatu hyöty voi olla Moottori lehden arvion mukaan jopa 15 – 20 %:n tasolla. (Moottori 2019.)

Konetyypillä on suuri vaikutus polttoaineen kulutukseen ja täten aiheutuviin päästöihin. Lentoreitin suunnittelu on tärkeää polttoaineen säästämiseksi. Esimerkkinä Airbusin uusimman sukupolven A350-kone, joka on suunniteltu pitkille matkoille. Nousun aikana polttoaineen kulutus on huomattavan suurta, mistä johtuu lyhyiden matkojen suuret polttoaineen kulutusarvot. Pitkillä matkoilla A350 voi päästä polttoaineen kulutuksessa noin

2,39 litraan sadalla kilometrillä matkustajaa kohden laskettuna (YLE 2018). Lyhyemmillä matkoilla koneen polttoaineen kulutus nousee 3 – 5 litraan sadalla kilometrillä matkan pituudesta riippuen. (Moottori 2019.)

Lentokonemallin vaikutusta päästöjen määrän on vertailtu taulukossa kaksi. Vertailussa pohjana on reittimatka Helsinki – Vantaan lentokentältä Lissaboniin. Reittilennon pituus on noin 3370 km ja Finnair lentää kyseistä matkaa saman valmistajan neljällä eri konemallilla. Koneiden polttoaineen kulutus on saatu Finnairin päästölaskurin tiedoista ja päästöt on laskettu polttoaineen kulutuksesta Finavian päästöarvioilla. Taulukon laskentakaavat löytyvät liitteestä yksi. Taulukosta nähdään, miten eri lentokonemallit eroavat päästöiltään saman pituisella matkalla. Kyseisten neljän koneen vertailusta voidaan todeta, että optimaalinen kone lennolle Helsingistä Lissaboniin on Airbus A321-231, kunhan kysyntä riittää täyttämään kaikki koneen paikat. Taulukosta huomataan selkeät erot niin kulutuksen kuin aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen suhteen, vaikka jokaisella koneella yhtä kauan matkassa kestääkin.

Taulukko 2. Neljän lentokoneen kulutus ja päästöt 3370km matkalla Helsinki – Vantaa - Lissabon. (Finnair päästölaskuri)

Lentokoneen malli	kulutus (l) per 100km per matkustaja	Matkustajamäärä	CO ₂ – päästöt per matkustaja (kg)	Lentonopeus (km/h)
Airbus A319-112	3,78	144	11,94	840
Airbus A320-214	2,81	174	8,88	840
Airbus A321-211	2,73	209	8,63	840
Airbus A321-231	2,36	209	7,46	840

4 BIOPOLTTOAINEET LENTOLIIKENTEESSÄ

Lentopetroli valmistetaan perinteisesti raakaöljystä, hiilestä, maakaasusta, öljyhiiekasta tai öljyliuskeesta. Kyseinen valmistusprosessi on runsaasti energiaa kuluttava, eivätkä kyseiset valmistuksen raaka-aineet ole uusiutuvia. Muita keinoja valmistaa lentokoneisiin polttoainetta on useita. Lentokoneisiin voidaan valmistaa uusiutuvia polttoaineita, kuten esimerkiksi biomassaa Fischer-Tropsch (FT) prosessin kautta. Vaihtoehtona on myös valmistaa polttoainetta alkoholista. (Tahir Hikmet Karakoc et al. 2018, 30-31.)

4.1 Biopolttoaineiden soveltuvuus

Biopolttoaineita pidetään tällä hetkellä ainoana vaihtoehtona alentaa fossiilisten polttoaineiden päästöjä seuraavien vuosikymmenien aikana. ICAO:n vuoden 2015 perustasoon perustuva CAEP-malli arvioi, että vuonna 2020 vaihtoehtoisten polttoaineiden osuus voisi olla 2,6 % polttoaineen kokonaiskulutuksesta (Greg G. Fleming & Ivan De Lépinay 2019). IEA puolestaan ennustaa biopolttoaineiden kattavan liikenteen polttoaineista 4-6 % vuonna 2030 (Tahir Hikmet Karakoc et al. 2018, 45). Suomessa Liikenne- ja viestintäministeriö esitti 2013 tavoitteeksi, että biokerosiinin osuus nousee 26:een %:iin vuoteen 2050 mennessä. (Merja Kyllönen et al. 2013.)

Kansainvälisen energiajärjestö IEA:n arvion perusteella lentoliikenteessä kuitenkin kulutettiin vuonna 2018 noin 15 miljoonaa litraa biopolttoaineita, mikä vastaa alle 0,1 % polttoaineiden kokonaiskulutuksesta (Pharoah Le Feuvre, 2019). Uusiutuvan lentopolttoaineen käyttö on tällä hetkellä vähäistä, eikä käyttö tule huomattavasti kasvamaan tulevien vuosien aikana, koska maailmanlaajuinen jakelujärjestelmä puuttuu. Maailmalla on tällä hetkellä vain muutamia kymmeniä lentokenttiä, joilla on valmius nyt tai lähivuosina tarjota biokerosiinia lentoyhtiöille. Uusiutuvien polttoaineiden rooli lentoliikenteen päästöjen vähentämisessä on tulevaisuudessa suuri, mutta niistä saatavien hyötyjen toteutuminen voi kestää vielä useita vuosikymmeniä, koska uusiutuvien polttoaineiden määrät pysyvät lähitulevaisuudessa vielä matalina. Biopolttoaineita pidetäänkin merkittävänä konkreettisena vaihtoehtona päästöjen vähentämisessä lähitulevaisuudessa, joten poliittinen paine biopolttoaineiden suosimiseksi kasvaa päätösten teossa. (EASA 2019, 8.)

Lentopolttoaineiden kansainvälisiä standardeja laativa Standardisointijärjestö ASTM on hyväksynyt kuusi tapaa valmistaa nykyiseen lentopetroliin lisättävää biopohjaista polttoainetta. Nämä kuusi tekniikkaa ja niiden vaikutukset päästöihin on listattu taulukkoon kolme. Tällä hetkellä näistä tekniikoista ainoastaan vetykäsitellyt rasvahapot eli HEFA on valmis valmistuksen ja tekniikan osalta. ASTM käsittelee jatkuvasti uusia ehdotuksia eri tekniikoille. Päästöjen vähentäminen riippuu paljolti myös biopolttoaineen tuotannossa käytetystä tekniikasta, kuten taulukosta kolme nähdään. (Mark D.Staples et al. 2018.)

Taulukko 3. Kuusi ASTM:n hyväksymää biopolttoaineiden valmistustapaa ja niiden vertailu kerosiiniin (EASA 2019, 42)

Biopolttoaineen valmistustapa	Miten toimii	suurin sallittu lisäys suhde kerosiiniin	valmistuksen raaka-aineet esimerkiksi
HEFA	raaka-aineet muunnetaan vedyllä biodieseliksi → voidaan erotella käyttökelpoiseksi lentoliikenteelle	50 %	kasviöljyt, käytetyt ruokaöljyt
FT-SPK	Biomassa muunnetaan synteettiseksi kaasuksi → biopohjainen polttoaine	50 %	Biomassa
FT-SPK/A	FT-SPK:n kaltainen valmistustapa, jossa prosessi perustuu aromaattien alkylointiin	50 %	Biomassa
HFS-SIP	Sokerit muunnetaan hiilivedyiksi mikrobisesti	10 %	Sokerijuurikas, sokeriruoko
ATJ-SPK	Alkoholit muunnetaan hiilivedyiksi	50 %	isobutanoli
Co-processing	esim. biojätteen lisäämistä öljytisleidien välituotteisiin	5 %	Biojäte

Taulukossa kolme esitetyt kuusi hyväksytyä biopolttoaineiden valmistustapaa sallivat korkeintaan 50 %:n sekoitussuhteen nykyiseen lentokerosiiniin. Taulukossa neljä on esitetty, miten eri biopolttoaineiden raaka-aineet EU-direktiivien mukaan vähentävät kasvihuonekaasuja verrattuna öljypohjaiseen polttoaineeseen. Direktiivin laskelmissa ei ole huomioitu maankäytön muutoksesta aiheutuvia nettopäästöjä. Taulukossa viisi on esitetty lentopolttoaineen erilaisia valmistustapoja, niille sopivia raaka-aineita ja vertailtu valmistustapojen hiilidioksidipäästöjä keskiarvoina.

Esimerkiksi HEFA-tekniikalla voidaan saavuttaa tunnin kestävän lennon CO₂-päästöissä lasku nykyisestä 8500 kilogrammasta 4760 kilogrammaan, kun biopolttoaine valmistetaan ruoan tuotannon jäteöljystä ja sekoitetaan 50/50 suhteella lentokerosiinin kanssa. Lentomatkojen päästöt laskisivat jopa 44 %, jos HEFA-menetelmällä valmistetun polttoaineen tuotanto riittäisi vastaamaan maailmanlaajuiseen kysyntään. Jos lentoliikenteen polttoaineen kulutus jatkaa nykyistä kasvua lentoliikenteen kasvaessa, biopolttoaineet eivät tarjoa pitkäaikaista ratkaisua kasvavien päästöjen ongelmaan. Biopolttoaineilla voidaan kuitenkin saada lisäaikaa muiden puhtaampien tekniikoiden kehitykseen.

Taulukko 4. Biopolttoaineiden raaka-aineen vaikutus päästöihin. (EU 2018, 147-149 & Jeongwoo Han et al, 449 – 455.)

Biopolttoaineen raaka-aine	Käytetty tekniikka	Tyypillinen prosentuaalinen säästö KHK-päästöissä verrattaessa öljypohjaiseen polttoaineeseen
Ruoan tuotannon jäteöljy	Vetykäsittely valmistetaan biodieseliä	88 %
Maissi	Etanolista valmistetaan biokerosiinia	89%
Sokeriruoko	FTJ menetelmällä biokerosiinia	70 %
Palmuöljy	HEFA, valmistetaan biodieseliä	32- 51 % (Arvo riippuu valmistustavasta)

Taulukko 5. Lentopolttoaineen erilaisia valmistustapoja ja niiden vertailua (NREL, 60 – 64.)

	Valmistustapa	Valmistuksen raaka- aine	Keskiarvoinen hiilijalanjälki	Keskiarvoinen CO2 vähennys prosentteina verrattuna Jet A1 - lentopolttoaineeseen (85 kg CO2/GJ)
Alkoholeista lentopolttoainetta (Alcohol-to-Jet, ALJ)	Etanoli	Maissi, puu, sokerijuurikas, lännehirssi	38 kg CO2/GJ	55,29 %
	N-butanoli	Maissi, vehnän olki, puu		
	Isobutanoli	puu - ja maissipelletit		
Öljyistä lentopolttoainetta (Oil-to-Jet, OTJ)	Vetykäsittely	Soijapapu, levä, ruokaöljy, palmun rapsin ja kitupellavan siemenet	39 kg CO2/GJ	54,12 %
	katalyyttinen vesikäsittely (catalytic hydrothermolysis)	Leväbiomassa, soijapapu, meijerijäte		
	Pyrolyysi	Maissipelletit, puu		
Kaasusta lentopolttoainetta (Gas-to-Jet, GTJ)	Fisher – Tropsh	Hiili, hiili + biomassa, puu, maissipelletti	17 kg CO2/GJ	80 %
	Kaasu käyminen (gas fermentation)	Puu, kotitalousjäte		
Sokereista lentopolttoainetta (Sugar-to-Jet, STJ)	Katalyyttinen vesifaasi	Maissipelletit, puu	15 kg CO2/GJ	82,35 %
	2,5- tai 5dimetyylifuraani	Fruktoosit		
	Sokerin käyminen	Sokeriruoko, puu vehnän olki		

EU:lla on mahdollisuus kasvattaa biopohjaisten polttoaineiden valmistusta, mutta kasvun pitäisi tapahtua nopeasti. Lentoyhtiöt eivät itse asioita helpolla muuta, koska biopolttoaine nostaa kustannuksia ja yhtenäinen kansainvälinen lainsäädäntö, joka edellyttäisi biopolttoaineiden käyttöä puuttuu. Viime aikoina Euroopassa on kuitenkin tapahtunut edistystä liikenteen biopolttoaineiden käytössä. Tämän ovat mahdollistaneet yksittäisten valtioiden poliittiset päätökset ja teollinen kehitys. Lentoliikenteessä muutokset eivät vielä kuitenkaan ole toteutuneet. (EASA 2019, 10.)

4.2 Biopolttoaineiden mahdollisuudet tulevaisuudessa

Lentoliikenne on yksi energiaa kuluttavien alojen kokonaisuudesta, joita kaikkia yhdistää kasvava tarve uusiutuvien polttoaineiden käyttöön. Mark D. Staples et al. arvioivat, että lentoliikenteen päästöjen vähentämiseen 15 prosentilla vuoteen 2050 mennessä tarvitaan vuosittain noin 60 uutta biojalostamo. Tämä tarkoittaisi noin 10,75 miljardin euron investointeja vuositasolla. (Mark D. Staples et al. 2018.)

Kuten taulukoissa neljä ja viisi esiteltiin, on biopolttoaineilla mahdollisuus laskea lentämisestä aiheutuvia päästöjä huomattavasti. Kuitenkin raaka-aineet, joista biopolttoaineet tehdään, on valmistettava vastuullisesti. Ongelmaksi voi syntyä biopolttoaineiden valmistus halvimmista, hyvin saatavilla olevista ja heikoimmin nettopäästöjä vähentävistä raaka-aineista, kuten vastuuttomasti tuotetusta palmuöljystä. Jos biopolttoaineen käyttöä lentoliikenteessä ohjataan maailmanlaajuisesti säädöksillä, on mahdollista, että osa lentoyhtiöistä ostaa halvinta mahdollista biopolttoainetta välittämättä aiheutuvista päästöistä.

Mark D. Staples et al. viittaavat vanhempiin vertaisarvioituihin töihin, jotka osoittavat, että päästöjen vähentäminen on tehokkaampaa, kun vähäinen bioenergia ja jätteet hyödynnetään tieliikenteessä ja sähkön tai lämmön tuotannossa sen sijaan, että niitä hyödynnettäisiin lentoliikenteen polttoaineissa (Mark D. Staples et al. 2018, 347). Puumaisen biomassan osalta tutkimukset osoittavat, että sen käyttö on optimaalisinta sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Mark D. Staples et al. 2017 työssä, joka kuului viitattujen töiden joukkoon, huomautetaan kuitenkin, että huomioon otetuista polttoaineista mikään ei ole sopiva lentoliikenteelle. Mark D. Staples et al. toisaalta osoittavat biomassakäyttöisen

sähkön ja lämmön yhteistuotannon maksimoivan kasvihuonekaasujen päästövähennykset lopullisen bioenergian yksikköä kohti, kun bioenergian saatavuus on alhainen. Jos biomassaa on runsaasti tarjolla, sillä kannattaa korvata myös raskaampia polttoaineita päästöjen vähentämiseksi. (Mark D. Staples et al. 2017, 6-8.)

Nesteen Uusiutuvat tuotteet - liiketoiminta-alueen kehitysjohtaja Andreas Teirin mukaan biopolttoaineilla voidaan saavuttaa jopa 80 %:n vähennys hiilidioksidipäästöissä fossiiliseen polttoaineeseen verrattuna. Uusiutuvan kerosiinin hinta on kuitenkin moninkertainen verrattuna kerosiiniin, mikä hidastaa muutosta (MT 2018). Onkin todennäköistä, että biopolttoaineiden käyttö ei tule lentoliikenteessä lähitulevaisuudessa kasvamaan nopeasti, mutta biopolttoaineiden käytön kasvu tulee näkymään muilla aloilla päästöjen vähenemisenä.

5 TULEVAISUUDEN ENERGIANMUODOT

Lentokoneiden tulevaisuudesta on useita toisistaan erilaisia mahdollisuuksia, mutta alan menneisyyteen perustuen voidaan tehdä muutama johtopäätös. Vielä useita vuosikymmeniä lentokoneet tulevat käyttämään polttomoottoreita, joissa poltetaan kerosiinia, biopolttoaineita tai niiden yhdistelmää. Vuosisadan puolivälin jälkeen asiat voivat alkaa muuttumaan. Mahdollisuuksina lentämisen tulevaisuudessa pidetään niin sähköä, vetyä, synteettisiä polttoaineita kuin hybridikoneitakin.

Lyhyellä aikavälillä alaa ei muuteta koneiden arvon ja pitkän käyttöiän seurauksena. Asiat tulevat muuttumaan hitaasti ja eri teknologioiden käyttövarmuuden todentaminen vie aikaa. Eri vaihtoehtoissa on myös paljon ongelmia ratkottavaksi niin teknologian kuin käytännönkin osalta. Useat yhtiöt kuitenkin kehittelevät teknologiaa ja alalta löytyy huomattava määrä tieteellistä kirjallisuutta.

5.1 Sähkölentokoneet

Biopolttoaineilla voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä. Myös käytettäessä hybridikoneita, joissa on sähkön lisäksi polttomoottori, päästöt vähenevät ja energiatehoa voidaan teknisin ratkaisuin lisätä. Lennonaikaiset päästöt on kuitenkin mahdollista nollata vain sähkölentokoneilla. Sähkölentokoneiden työntövoima tuotetaan sähköenergiasta, joten lennon aikana päästöjä ei aiheudu (Albert R. Gnadt et al. 2019, 1-2). Akuilla toimivilla lentokoneilla päästöt syntyvät maan tasalla, eikä nykyisistä troposfääriä muuttavista päästöistä tarvitse huolehtia. Jos lentokoneiden sähkö tuotetaan puhtaasti uusiutuvalla energialla, voisi lentoliikenne olla miltei päästötön.

Sähkölentokoneilla lennetään jo, mutta teknologian on kehityttävä vielä paljon, ennekuin sähkölentokoneita saadaan reittilennoille. Sähkölentokoneiden suurimmat ongelmat ovat akkujen varauskyky ja paino. Akkujen paino pysyy samana lennonaikana, joten lentokoneen energiankulutus pysyy korkeana lennon loppuun saakka. Nestemäinen polttoaine sen sijaan vähenee lentomatkan edetessä ja samalla lentokoneen energiantarve pienenee matkan loppua kohti. Akkujen paino edellyttäisi, että niistä saadaan suuri teho. Nykyiset akut eivät kuitenkaan vielä lähimainkaan pärjää kerosiinille tehovertailussa. Yhdestä akkukilosta

saadaan tehoa noin yksi megajoule, kun kilosta kerosiinia irtoaa tehoa noin 43-kertainen määrä. (Albert R. Gnadt et al. 2019, 1-3.)

Maailmassa on kehitteillä 170 sähkölentokonetta, arvioi konsulttiyritys Roland Berger (Tivi 2019). Sähkölentokoneita kehitetään kansalliseen ja lyhyen matkan liikenteeseen. Pitkän matkan sähkölentokoneiden kehittämiseen on vähemmän kiinnostusta useista syistä. Ensinnäkin pienempien koneiden suunnittelu on halvempaa ja taloudelliset riskit pienemmät. Toiseksi pienemmillä lentokoneilla on alhaisempi teho ja hukkalämpö, joten ne tarvitsevat vähemmän jäähdytysjärjestelmiä. Kolmanneksi on kannattavampaa siirtyä sähkölentokoneisiin pienten lentokoneiden polttomoottoreista, joissa on selkeästi alempi terminen hyötysuhde verrattuna suurten lentokoneiden turbomoottoreihin. (Albert R. Gnadt et al. 2019, 5.)

Sähkölentokoneiden ennakoidaan tulevan matkustajaliikenteeseen 2020-luvun puolivälin jälkeen ja 2030- ja 2040-luvuilla ne arkipäiväistyvät. Ensimmäisenä yleistyvät kaupunkiliikenteeseen tulevat sähköiset lentotaksit, sen jälkeen kansallisen liikenteen sähkölentokoneet. Optimaalinen matka sähkölentokoneille on 800-1000 kilometriä, arvioi Helsingin sähkölentokoneyhdistyksen puheenjohtaja Janne Vasama Ylen Ykkösaamussa. (Ylen Ykkösaamu 15.11.2019.)

Sähkölentokoneiden käyttö kansallisesti ja lyhyillä alle 1000 kilometrin matkoilla vähentäisi päästöjä mahdollisesti useilla kymmenillä prosenteilla. Euroopan sisäisistä lennoista 93 % on alle 800 kilometrin lentoja. Lentämisen suurimmat kuluerät ovat polttoaine ja moottorin huollot, sähkölentokoneilla nämä kustannukset ovat vain 1/10 -osa siitä, mitä polttomoottorikoneilla, sanoo Helsingin sähkölentoyhdistyksen puheenjohtaja Janne Vasama. (Ylen Ykkösaamu 15.11.2019.)

Norjassa on mahdollisesti jo vuonna 2025 kansallisia lentoja liikennöiviä sähkölentokoneita, ennakoit Tekniikka & Talous -lehti. Norjan tavoitteena on sisäisen lentoliikenteen täydellinen sähköistäminen vuoteen 2040 mennessä. Myös Finavian teknisen johtajan Henri Hanssonin mukaan sähkölentokoneilla on tulevaisuudessa suuri rooli lentoliikenteen kokonaispäästöjen vähentämisessä (Tekniikka & Talous 2019b). Finavian Hansson kertoi Ylen haastattelussa,

että Pohjoismaissa on perustettu sisäinen verkosto kehittämään sähköistä lentoliikennettä. (Ylen Ykkösaamu 15.11.2019.)

Kehitteillä olevien kymmenien sähkölentokoneiden parhaan tekniikan kehittämisestä kilpailevat lukuisat startup -yritykset. Esimerkiksi Yhdysvalloissa Los Angelesissa Wright One -niminen sähkölentokone kykenee mahdollisesti lähivuosina lentämään 450 km:n matkan kuljettaen 150 matkustajaa (Albert R. Gnadt et al. 2019, 5). Toinen mielenkiintoinen hanke on Airbusin, Rolls-Roycen ja Siemensin yhteistyössä suunnittelema Hybrid-Electric E-Fan X -sähkölentokone. Kyseisen lentokoneen oletetaan saavan testilentonsa jo vuonna 2020. (EASA 2019, 38-39.)

Kesällä israelilainen Eviation esitteli Pariisissa järjestetyssä ilmailunäytöksessä sähkölentokone Alicen. Alice pystyy lentämään yhdellä latauksella jopa tuhat kilometriä ja kyytiin mahtuu kerrallaan yhdeksän asiakasta. Kuitenkin valtaosa lentoliikenteen päästöistä aiheutuu yli 1000 kilometrin matkoilta, joiden sähköistäminen on hankalaa. Eviation on saanut jo useita kymmeniä tilauksia koneelleen (Tekniikka & Talous 2019b). Tulevaisuudessa sähkölentokoneet tulevat valtaamaan Alicen tavoin jopa tuhannen kilometrin reittilentoja, mutta täytyy muistaa, ettei sähköllä matkustaminen täysin päästötöntä ole. Akkujen valmistus ja lataus aiheuttaa päästöjä, mutta päästöjä ei aiheutuisi enää sähkölentokoneiden lennon aikana.

5.2 Muut vaihtoehdot

5.2.1 Vety

Vedyllä lentämisen teoriaa tutkittiin jo 1930-luvulla ja ensimmäiset lennot tehtiin 1950-luvulla. Vedyllä tehtiin paljon tutkimusta ja testilentoja vielä 80-luvulle asti. Vaikka tutkimukset eivät ole pitkään aikaan edenneet, pidetään vetyä yhä yhtenä tulevaisuuden lentopolttoaineena. Vedyllä lentäminen edellyttää nykyisten lentokoneiden muokkaamista sekä uuden jakelujärjestelmän rakentamista. Vetykoneita voitaisiin saada käyttöön aikaisintaan vuoden 2040 jälkeen. (Dries Verstraete 2013, 1-3.)

Sergio Ramos Pereira et al. tutkimukset vedyllä lentämisestä osoittavat, että pitkän matkan lennoilla energiankulutus laskee 8-25 % ja kasvihuonekaasupäästöt vähenevät noin 17 % verrattuna nykyisin käytössä olevaan kerosiiniin. Tutkimuksen antamat arviot kasvihuonekaasujen vähennyspotentiaaleihin riippuvat vedyn valmistustavasta. Kun nestemäinen vety valmistetaan uusiutuvan energian avulla vedestä niin se olisi arvion mukaan jopa 51-60 % ympäristöystävällisempää verrattuna nykyisin käytössä olevaan lentokerosiiniin. (Sergio Ramos Pereira et al 2014,1-2 ja 8-9.)

Vedyn päästöt riippuvat sen valmistustavasta. Esimerkiksi Suomessa kemianteollisuuden sivutuotteena syntyy huomattavat määrät vetyä, jota voisi käyttää liikenteessä. Vetyä voidaan valmistaa vedestä, vedyn irrottaminen vedestä vaatii kuitenkin enemmän energiaa kuin vedystä saatava liike-energia antaa. Vedyn valmistus pitäisi siis perustua uusiutuvaan energiaan ja teollisuuden sivuprosesseihin ympäristöhyödyn maksimoimiseksi. Vety lentämisen lennonaikaiset päästöt koostuisivat vesihöyrystä, jonka lämmityspotentialista ilmakehään tarvitaan vielä tutkimustietoa.

5.2.2 Synteettiset polttoaineet

Synteettiset eli keinotekoisesti valmistetut polttoaineet ovat tulevaisuudessa merkittävä mahdollisuus luoda lentoliikenteelle päästötöntä energiaa. Synteettiset polttoaineet perustuvat hiilivetyjen tuotantoon. Hiilivetyjen hiiltä saadaan ilman hiilidioksidista ja vetyä vedestä. Kyseinen prosessi on kuitenkin runsaasti energiaa kuluttava ja kallis. TE:n (Transport & Environment) tutkimuksessa laskettiin, että vuonna 2050 Euroopassa tuotettavasta uusiutuvasta energiasta tarvittaisiin 95 % synteettisen polttoaineen tuotantolinjaan, jotta polttoaineen määrä riittäisi lentoliikenteen tarpeisiin. Synteettisen polttoaineen valmistuskustannukset ovat noin 3-6 kertaa suuremmat kuin kerosiinin. (EASA 2019,41-42.)

Lentoliikenne, laivaliikenne ja raskaat kuljetukset tarvitsevat jatkuvasti enemmän energiaa sisältäviä polttoaineita. Synteettiset polttoaineet olisivat vastaus energiaongelmaan: enemmän energiaa painokiloa kohden sisältävillä polttoaineella päästäisiin pidemmälle. Synteettisille polttoaineille sopivat nykyiset kerosiinin jakelulinjat ja lentokoneet, kun taas vety edellyttäisi niiden muuttamista.

Yli 2000 kilometrin matkoille ei sähkölentokoneiden teknologia vielä riitä, mutta synteettiset polttoaineet olisivat ratkaisu biopolttoaineiden rinnalle päästöjen vähentämisessä pitkiltä matkoilta. Synteettiset polttoaineet vähentäisivät selkeästi päästöjä ja sopisivat kiertotalouteen. (Daniel H. König 2015, 1-2, 7-8.)

Synteettisiä polttoaineita tutkitaan paljon. Suomessakin on ollut esillä synteettisten polttoaineiden pilottilaitos, jonka avulla voitaisiin ennakoida tulevien laitosten kannattavuutta ja tuotantomääriä. Maailmalla on jo monta synteettisten polttoaineiden pilottilaitosta, joista voisi ottaa mallia. Wärtsilän liiketoiminnan kehityksestä vastaava Matti Rautkivi arvioi YLE:n haastattelussa synteettisten polttoaineiden nousevan merkittävään asemaan noin 10 vuoden aikana. (YLE-uutiset 10.6. 2019.)

6 CASE TENERIFFAN LENTOMATKAN PÄÄSTÖT JA NIIDEN VÄHENTÄMISMAHDOLLISUUDET

Case-harjoituksessa selvitetään mahdollisuuksia vähentää lentomat kustamisen kasvihuonekaasuja esimerkin avulla. Esimerkkinä on lentomatka Suomen vilkkaimmalta lentokentältä Helsinki – Vantaalta suomalaisten suosimaan lomakohteeseen Teneriffalle. Lentokoneeksi valittiin Airbusin A321, koska Finnair käyttää kyseistä mallia Teneriffan lennoilla (Finnair päästölaskuri). Tarkastelussa huomioidaan myös koneen valinnan merkitys pitkällä matkalla ja lisäksi verrataan kahden eri lentokoneen tekniikan merkitystä päästöihin.

Case-vertailu perustuu Finnairin päästölaskuriin ja Finnairin käytössä olevaan laivastoon ja tässä työssä kerättyihin tietoihin. Finnairin päästölaskuri perustuu lennoilla kulutetun polttoaineen keskiarvoihin ja näistä arvoista lasketaan hiilidioksidipäästöt Euroopan komission ilmoittamalla päästökertoimella. Case-vertailun lähtötilanne on esitetty alla olevassa taulukossa kuusi.

Taulukko 6. Case-vertailun lähtötilanne (Finnair päästölaskuri, EU 2018, 147-149)

Lentopetrolin päästökerroin (t CO ₂ / t polttoainetta)	3,15
ruokajäteöljyn päästökerroin (t CO ₂ / t polttoainetta) Arvioitu lentopetrolin arvosta taulukon 4 vähennysprosentilla	0,378
palmuöljyn päästökerroin (t CO ₂ / t polttoainetta) Arvioitu lentopetrolin arvosta taulukon 4 vähennysprosentilla	1,54-2,14 (ei sisällä maankäytön muutosta)
Finnairin päästölaskurin ilmoittamat päästöt	2,1kg/100km/matkustaja

Vertailussa käytetään vuonna 2019 valmistettua Airbusin A321- lentokonetta. Sen polttoaine on kerosiini, matkustajamääräksi on valittu 199, mikä vastaa koneen 95 %:n täyttöastetta ja lentomatkan pituus Teneriffalle on 4750 kilometriä. Airbusin A321-konetta verrataan saman malliseen, mutta vanhempaan vuonna 1999 valmistettuun koneeseen. Lisäksi selvitetään, miten päästöihin vaikuttaa, jos kerosiiniin yhdistetään biopolttoainetta. Sähkölentoja ei tarkastella, koska ne eivät sovellu pitkälle matkalle nykytekniikalla. Koko

vuoden lentojen päästöt on laskettu oletuksella, että lentokoneella tehdään kolme päivittäistä lentoa Helsingin ja Teneriffan välillä.

Polttoaineen hinnan on arvioitu olevan 33 % lentolippujen hinnasta. Biopolttoaineiden hinnan on ruokajätteestä valmistettuna arvioitu olevan EASA:n tietojen mukaisesti 1,6-kertainen ja palmuöljystä valmistettuna puolitoista-kertainen kerosiiniin verrattuna (EASA 2019, 44). Vertailulentojen hinta on saatu valitsemalla halvimmat lennot Finnairin hintakalenterista kyseiselle matkalle. Biopolttoaineiden vertailulentoissa on valittu kerosiiniin ja biopolttoaineen suhteeksi nykyinen enimmäissuhde 50 / 50. Biopolttoaineiden päästöarvoina on käytetty kappaleessa 4.1 esitettyjä arvoja. Biopolttoaineen massa arvioitiin Lufthansan testilentojen tuloksien perusteella. Polttoaineen kulutus laskee Lufthansan mukaan noin 1 %:n biopolttoaineita käytettäessä verrattaessa kerosiiniin. (Neste 2019, tuotteet ja palvelut.)

Tuloksia vertailtaessa on myös huomioitava, että biopolttoaineiden laskenta perustuu biomassan prosessin elinkaareen eikä laskennassa ole huomioitu maankäytön vaikutusta lopputulokseen. Ruoan tuotannon jäteöljystä valmistettuun polttoaineeseen maankäytöllä ei ole huomattavaa merkitystä, mutta palmuöljyn prosessiin merkitys voi olla suuri.

Biokerosiinin valmistustapa tulee kuitenkin selvästi esiin päästöjen määrässä. Kun biokerosiini valmistetaan ruoantuotannon jäteöljyistä, voidaan lennolla vähentää jopa 33 % enemmän päästöjä, kuin jos raaka-aineena olisi palmuöljy. Toinen huomioitava kohta on taulukossa seitsemän esitetty EASA:n tunnin pituisen matkan perusteella arvioidut päästöt, joiden muutoksia eri vaihtoehdoissa ei pystytty laskemaan vähäisen tutkimustiedon seurauksena. Kuitenkin biopolttoaineiden lennonaikaisista päästöistä on saatu tuloksia päästöjen vähenemisestä vain rikkidioksidin ja noen suhteen, mikä johtuu polttoaineyhdistelmän rikki- ja aromaattisen pitoisuuksien pienentymisestä. (Marina Kousoulidou & Laura Lonza 2016, 170.) Voidaan siis olettaa, etteivät taulukossa seitsemän esitetty matkan arvioidut päästöt muutu kuin SO₂ osalta.

Taulukko 7. Yhdestä kilogrammasta Jet-A1:sta aiheutuvat päästöt Airbus A321 lentokoneella (EASA 2019,22)

Yhdiste	Päästökerroin (kg)	Helsinki – Teneriffa lennosta aiheutuvat päästöt (4745km – 18 216kg polttoainetta) (kg)	Biopolttoaineiden käytön vaikutus lennon aikaisiin päästöihin
CO ₂	3,15	57 380,4	Pieni tai ei vaikutusta
H ₂ O	1,22	22 223,52	Pieni tai ei vaikutusta
NO _x	0,011	200,376	Pieni tai ei vaikutusta
SO ₂	0,0009265	16,88	SO ₂ päästöt vähenevät
CO	0,0007412	13,5	Pieni tai ei vaikutusta
HC	0,0001482	2,7	Pieni tai ei vaikutusta
PM	0,000037	0,7	Pieni tai ei vaikutusta

Case-vertailun tulokset on esitetty taulukossa kahdeksan ja liitteestä kaksi löytyy käytetyt laskuyhtälöt. Tulokset osoittavat, että matkan aikana hiilidioksidipäästöissä on suuria eroja, kun otetaan huomioon biopolttoaineiden elinkaari. Kuten taulukosta seitsemän käy ilmi, ei biopolttoaineiden käytöllä ole suurta vaikutusta lennon aikana aiheutuviin päästöihin, mutta elinkaarinäkökulmasta erot ovat suuret.

Vertailu osoittaa, että teknologian kehityksellä on merkittävä rooli päästöjen vähentämisessä. Vanhempien lentokonemallien polttoaineen kulutus on noin 28,5 % suurempi kuin uusimpien mallien. Kun verrataan koneiden matkustajakohtaisia päästöjä, ne ovat vanhemmissa malleissa lähes 100 kg matkustajaa kohti suuremmat kuin uudemmissa malleissa yhtä pitkällä lennolla. Mitä pidemmälle matkattaisiin sitä suuremmaksi kyseinen ero muuttuisi. Lentoyhtiöt eivät kuitenkaan hinnoitele lentoja polttoaineen kulutuksen ja

siitä aiheutuvien päästöjen mukaan yksittäisillä reiteillä, vaan molempiin lentokoneisiin lippu maksaisi samalta matkalta saman verran. Tulosten perusteella olisi suositeltavaa nykyaikaistaa vanhemmat suuremman kulutuksen omaavat lentokoneet. Nykyaikaistaminen tarkoittaisi lentokoneen aerodynamiikan sekä moottorien energiatehokkuuden lisäämistä uusimman saatavilla olevan teknologian avulla. Tällä saadaan huomattavia eroja polttoaineen kulutuksessa, kuten taulukon kahdeksan käytettävän polttoaineen vertailusta vanhemman ja uudemman vuosimallin välillä nähdään.

Taulukko 8. Lennon aikaiset päästöt ja lippujen hinnat laskelmiin perustuen matkalta Helsingistä Teneriffalle

Lentokoneen vuosimalli	2019	1999 - 2009	2019	2019
Käytettävä polttoaine	Jet A1	Jet A1	Jet A1 + Ruontuotannon jäteöljystä valmistettu biopolttoaine 50/50 suhde	Jet A1 + Palmuöljystä valmistettu biopolttoaine 50/50 suhde
Polttoaineen kulutus (kg) (ei sisällä valmistuksessa aiheutuvia päästöjä)	18 216	23 420	18 034	18 034
CO ₂ – päästöt lennolta (kg)	57 380, 4	73 773	31 811,68	42 320,9 – 47 717,53
CO ₂ – päästöt koko vuoden lennoilta (tonnia)	62 831,54	80 781,44	34 833,79	46 341,39
CO ₂ – päästöt/matkustaja/lento (kg)	288,34	370,72	159,86	212,66 - 239,79
lentomatkan hinta / matkustaja	387€	387€	421.45€	415,06€

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lentoliikenne on voimakkaassa kasvussa ja kasvun seurauksena päästöt voivat kaksinkertaistua nykyisestä vuoteen 2050 mennessä. Lentoliikenteen kasvun ja kasvavien päästöjen hallitsemiseen on keinoja, mutta kasvavia päästöjä ei tulla teknologialla tai vaihtoehtoisilla polttoaineilla saamaan hallintaan vielä seuraavan vuosikymmenen aikana. Teknologian sekä vaihtoehtoisten polttoaineiden tueksi tarvitaan vahvaa valtiojohtoista sääntelyä.

Päästövähennyksien lisäksi ja niiden toteuttamiseksi tarvitaan luotettavaa tieteellistä tutkimusta lentoliikenteen päästöistä, niiden määrästä ja vaikutuksista ilmakehään. Päästöjen vaikutuksia on tutkittu vuosikymmeniä, mutta vain hiilidioksidin vaikutuksesta ilmaston lämpenemiseen on varmaa näyttöä. Esimerkiksi lentokoneiden jättövanan vaikutuksista ilmaston lämpenemiseen ei vielä tiedetä, vaan sen suhteen ollaan arvelujen varassa. Varmaa on, että osa lentoliikenteen päästöistä vaikuttaa ilmakehään viilentävästi, mutta päästöjen kokonaisvaikutus on ilmakehää lämmittävä. Päästöjen tutkimusta on jatkettava, jotta voidaan varmistaa, että niiden vähentämiseksi tehtävät toimet kohdistuvat oikeisiin asioihin ja ovat tehokkaita.

Lentoliikenteessä on 2010-luvulla hyvitetty päästöjä ostamalla päästöoikeuksia ja tuettu näin päästöjen vähentämistä muilla aloilla. Lentoliikenteen omaa päästöjärjestelmää CORSIAa, otetaan parhaillaan käyttöön. Sen tavoite on velvoittaa järjestelmässä mukana olevat yhtiöt raportoimaan hiilidioksidipäästönsä ja hyvittämään päästöjen kasvu. Päästöjen hyvitys alkaa vuonna 2021.

Lentoliikenteen oma päästöjärjestelmä on herättänyt paljon toiveita. Pitää kuitenkin muistaa, että järjestelmän toimiminen edellyttää luotettavaa päästöjen raportointia ja sen lisäksi aloja, joilta päästövähennyksiä voidaan ostaa. CORSIAN kaltainen päästöjärjestelmä olisi toimivampi, jos se olisi maailmanlaajuinen ja jos ostettujen päästövähennyksien kompensointi voitaisiin luotettavasti todistaa.

Päästökaupalla on ostettu päästöoikeuksia aloilta, joilla päästöjä on voitu vähentää, mutta kaupalla ei välttämättä ole ollut minkäänlaista merkitystä lentoliikenteen omiin päästöihin. Lentoliikenteen omien päästöjen vähentämisen kannalta suuri merkitys on päästöoikeuksien

hinnalla. Kun hinta nousee, lentoyhtiö joutuu punnitsemaan, kumpi on kannattavampaa, pienentää omia päästöjä vai ostaa päästöoikeuksia. Päästöoikeuksien hinnan nosto voi johtaa päästöjen vähenemiseen, mutta se voi myös houkutella yhtiöitä vilppiin päästömäärien raportoinnissa.

Lentoliikenteen päästöjä pystytään vähentämään monella eri tavalla, esimerkiksi suosimalla uusiutuvia polttoaineita, kiristämällä päästörajoja vuosittain, kehittämällä moottoreita ja muuta tekniikkaa ja optimoimalla lentoreitit. Viimeisen vuosikymmenen aikana lentokoneiden moottorien energiatehokkuutta sekä siipien kantokykyä parantamalla on polttoainetehokkuutta saatu parannettua noin 25 %. Monilla lentoyhtiöillä on kuitenkin edelleen käytössä lentokoneiden vanhempia, suurempipäästöisiä malleja taloudellisista syistä. Toivottavaa olisi, että lentoyhtiöt päivittäisivät mahdollisimman nopeasti lentokalustonsa, vaikka investoinnit olisivatkin suuria. Tähän kannustaa sekin, että uusimmat ja energiatehokkaimmat lentokoneet pääsevät kulutuksessa per matkustaja jo henkilöautojen tasolle ja säästävät selkeästi enemmän polttoainetta verrattuna vanhempiin malleihin.

Uusitivilla polttoaineilla on mahdollista vähentää lentoliikenteen päästöjä. On kuitenkin kyseenalaistettu, onko uusiutuvia polttoaineita kannattavaa käyttää lentoliikenteessä vai saadaanko niistä suurempi hyöty esimerkiksi energiantuotannossa. Mark D. Staplesin tutkimuksessa viitattiin vanhempiin tutkimuksiin, jotka osoittavat, että vähäisen bioenergian ja jätteiden hyödyntäminen tieliikenteessä ja sähkön- tai lämmöntuotannossa on taloudellisempaa verrattuna näiden hyödyntämiseen lentoliikenteen polttoaineissa (Mark D. Staples et al. 2018, 347). Toisaalta energiantuotantoon on paljon erilaisia vaihtoehtoja polttoaineeksi, kuten puuhake, jota ei lentoliikenteen polttoaineena voida käyttää. Biopolttoaineiden käyttöä lentoliikenteessä voidaan puoltaa selkeillä päästövähennyksillä, joita ei ole mahdollista saada pitkille lennoille muulla tekniikalla.

Jos lentoliikenteen edellytetään sääntelyn kautta maailmanlaajuisesti lisäävän biokerosiinin käyttöä, voi seurauksena olla halvimman uusiutuvan polttoaineen suosiminen. Suurimmat päästöhyödyt saadaan kuitenkin kalliimmilla valmistusmenetelmillä tai raaka-aineilla. Kestävän uusiutuvan polttoaineen tuottamisessa valtioiden tuella onkin merkittävä rooli,

jotta välttyttäisiin esimerkiksi siltä, että biokerosiinia valmistetaan kestäättömästä palmuöljystä, jonka kasvattamiseen on vallattu alueita sademetsistä.

Tämän työn perusteella suurin potentiaali päästöjen vähentämisessä lyhyillä matkoilla on sähkölentokoneilla. Sähkölentokoneiden ennakoitaan yleistyvän jo seuraavilla vuosikymmenillä merkittävästi. Kaupunkiliikenteessä lentotakseja nähtäneen jo lähivuosina. Varsinkin ruuhkaisissa suurkaupungeissa ne voivat nopeuttaa matkantekoa huomattavasti. Norja tähtää sisäisen lentoliikenteen sähköistämiseen vuoteen 2040 mennessä ja pohjoismaat tekevät yhteistyötä sähköisen lentoliikenteen edistämiseksi. Sähkölentokoneiden voi olettaa yleistyvän myös Euroopan sisäisessä liikenteessä, koska valtaosa on alle 800 kilometrin lentoja ja se on optimaalinen matka sähkölentokoneelle.

Lentämisen kustannukset ovat sähkölentokoneilla murto-osa siitä, mitä polttomoottorikoneilla. Sähkölentokoneita on kehitteillä satamäärin, mutta kuinka moni päätyy matkustajaliikenteeseen, on pitkälti kiinni siitä, täyttävätkö ne vaativat turvallisuuskriteerit ja saavat tyyppihyväksynnän. Turvallisuus on lentoliikenteessä ykkösprioriteetti ja sen ylläpitäminen edellyttää lentoyhtiöltä vakavaraisuutta.

Sähkölentokoneiden akut vaativat vielä runsaasti kehitystä. Nykyään akku voi painaa jopa yli puolet koneen painosta. Myös akkujen kapasiteetissa on toivomisen varaa. Lentoliikenteen ohella akkuja kehitetään myös autoihin, julkiseen liikenteeseen, erilaisiin koneisiin ja laitteisiin, minkä seurauksena akkumineraalien kysyntä kasvaa. Akkumineraalien riittävyys voi hankaloittaa sähköisen liikenteen kehitystä, vaikka mineraaleja kierrätettäisiin. Sähköön käyttö myös kasvaa liikenteen ohella teollisuudessa ilmastotavoitteiden myötä. Yhteiskunnan näin suuri riippuvuus yhdestä energiamuodosta ei myöskään välttämättä ole hyväksi.

Suurin osa lentoliikenteen päästöistä aiheutuu pitkän matkan lennoilta, mutta nykyisten kerosiinia käyttävien lentokoneiden huonoin hyötysuhde on lyhyillä matkoilla. Pitkien matkojen koneet, kuten Airbus A350, pääsevät polttoainekulutuksessa jopa 2,39 litraan per matkustaja 100 kilometrin matkalta, kun taas lyhyellä matkalla Airbus A350:n kulutus nousee 3-5 l/hlö/100km (Moottori 2019). Pitkän matkan koneiden tehokkuutta voidaan vielä parantaa useita kymmeniä prosentteja reittien optimoinnilla sekä mahdollisesti jonossa lentämisellä. Lentoliikenteessä on myös mahdollista siirtyä esimerkiksi vedyllä toimiviin

lentokoneisiin, mutta muutos tarkoittaisi suuria muutoksia lentokoneisiin ja lentokenttien polttoaineen jakeluun. Todennäköistä on, ettei lentoliikenteen pitkän matkan lentokoneita tulla vaihtamaan kerosiinista vuosikymmeniin, vaan lentokoneiden polttoaineen kulutusta parannetaan lähtökohtaisesti teknisillä muutoksilla.

Kuluttajien kasvava ympäristötietoisuus ja muiden alojen ympäristöteot aiheuttavat painetta lentoalan muutoksille. Jo nyt on paljon ihmisiä, jotka lentämisen sijaan valitsevat maata pitkin matkustamisen. Moni on myös valmis maksamaan lentoveroa ja vaatii sitä toteutettavaksi myös kansallisesti ja kansainvälisesti. Kansalaisaktiivisuus pakottaa lentoyhtiöitä myös ilmastotekoihin.

Case – tarkastelussa tuli ilmi selkeät erot lentokoneiden välillä polttoaineen kulutuksessa sekä täten lennon aikana aiheutuissa päästöissä. Suuremman kulutuksen omaavia lentokoneita käytetään lentoliikenteessä todella paljon ja vain marginaali käytetyistä koneista omaa uusinta teknologiaa olevat energiatehokkaat moottorit tai aerodynamiikan. Myöskään lentokoneiden kulutus ei käy ilmi lentoliikenteen matkojen hinnoittelussa. Sama matka Helsingistä Teneriffalle maksaa kuluttajalle saman verran oli sitten koneen kulutus 23 420 kg tai 18 216 kg kerosiinia. Toisaalta pienempi päästöt biokerosiinia omaavat lentomatkat taas ovat matkustajalle kalliimpia verrattuna kerosiinilla matkustamiseen.

Lentoliikenteen tulevien muutoksien pitää tapahtua maailmanlaajuisesti ja perustua luotettavaan tietoon, jotta päästötavoitteisiin päästään, samalla kun liikenne jatkuvasti kasvaa. Lentoliikenteen suuri taloudellinen merkitys ja vaikutus kuluttajiin hidastaa alan muutosta ja vaikeuttaa muutoksien toteuttamista yhtäaikaaisesti ympäri maailmaa. Päästökaupalla ja biopolttoaineilla saadaan lentoliikenteelle aikaa kehittää niin sähkö- kuin vetylentokoneita ja mahdollisia muita energiavaihtoehtoja kuten synteettisiä polttoaineita.

8 YHTEENVETO

Lentoliikenteen osuus on noin 2,5 % maailmanlaajuisista energiaan liittyvistä hiilidioksidin suorista päästöistä. Lentoliikenteen polttoaineena pääosin toimiva lentopetroli valmistetaan perinteisesti raakaöljystä, hiilestä, maakaasusta, öljyhiekasta tai öljyliuskeesta. Kyseinen valmistusprosessi kuluttaa runsaasti energiaa, eivätkä kyseiset valmistuksen raaka-aineet ole uusiutuvia. Kerosiinin palamisreaktio aiheuttaa lennon aikana typen ja rikin oksideja, palamattomia hiilivetyjä, pienhiukkasia, hiilidioksidia sekä vesihöyryä. Kun kaikki lentoliikenteen päästöt otetaan huomioon, on lentoliikenteen päästöjen osuus ilmakehän lämpenemiseen positiivinen ja arvioitu noin neljäksi prosentiksi.

Lentoliikenteellä on iso taloudellinen merkitys ja sitä on pidetty sääntelyltä suojassa vuosikymmeniä. Lentoyhtiöiden ei tarvitse maksaa polttoaineesta valmisteveroa, vaikka lentopolttoaineita voisi verottaa kaikilta lähteviltä lentokoneilta. Maailmanlaajuinen sääntely keskittyy vielä lähivuosina lentoliikenteen päästöjen kompensoimiseen muilta aloilta. Päästöhyvitysjärjestelmä CORSIA käynnistyy vuonna 2021 ja CORSIAN lisäksi kaikkien ICAON jäsenvaltioiden kansainvälisiä lentoja operoivien lentoyhtiöiden tulee raportoida vuosittain ICAO:lle kansainvälisten lentojensa hiilidioksidipäästöt vuosilta 2019 – 2035. Järjestelmä edellyttää, että hiilidioksidipäästöt eivät kasva, joten jos mukana olevat lentoyhtiöt noudattavat järjestelmää, se voi lisätä mm biopolttoaineiden käyttöä.

EU:lla on mahdollisuus kasvattaa biopohjaisten polttoaineiden valmistusta, mutta kasvun pitäisi tapahtua nopeasti. Lentoyhtiöt eivät itse asioita muuta, koska biopolttoaine nostaa kustannuksia ja yhtenäinen kansainvälinen lainsäädäntö, joka edellyttäisi biopolttoaineiden käyttöä, puuttuu. Viime aikoina Euroopassa on kuitenkin tapahtunut edistystä liikenteen biopolttoaineiden käytössä, tämän ovat mahdollistaneet yksittäisten valtioiden poliittiset päätökset ja teollinen kehitys. Lentoliikenteessä muutokset eivät vielä kuitenkaan ole toteutuneet.

Lentoliikenteen nopean kehityksen ja parhaan teknologian hankkimisen esteenä ovat lentokoneiden kallis hinta sekä pitkä käyttöikä. Yleisesti alan toimijat ovat kehittäneet lentokoneita viimeisten vuosikymmenien aikana kevyemmiksi, siipiä kantavimmiksi sekä

moottoreita energiatehokkaimmiksi. Polttoaineen hinnan aiheuttaessa noin kolmasosan lento-operaattorien kokonaiskustannuksista, ei ole ihme, että polttoainekulutukseltaan kehittyneimmille koneille on markkinoilla kysyntää.

Vielä useita vuosikymmeniä lentokoneet tulevat käyttämään polttomoottoreita, joissa poltetaan kerosiinia, biopolttoaineita tai niiden yhdistelmää. Vuosisadan puolivälin jälkeen asiat voivat alkaa muuttumaan. Optimaalinen matka sähkölentokoneille on 800-1000 kilometriä ja sähkölentokoneet tulevat yleistymään ensin kaupunkiliikenteessä ja sitten kansallisessa liikenteessä. Sähkölentokoneiden ennakoitaan yleistyvän myös Euroopan sisäisillä lennoilla, koska valtaosa lentomatkoista on alle 800 kilometriä.

LÄHTEET

Albert R. Gnadl et al. 2019. Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. [verkkojulkaisu] Julkaistu 7.2.2019. [Viitattu 20.10.2019]. Saatavissa:

<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0376042118301179>

ATAG 2019, FACTS AND FIGURES. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.11.2019]. Saatavilla:

<https://www.atag.org/facts-figures.html>

Brandon Graver et al. 2019. CO₂ emissions from commercial aviation, 2018. [verkkojulkaisu]. Julkaistu 2019. [Viitattu 29.10.2019]

Saatavissa: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercial-aviation-2018_20190918.pdf

Bethan Owen et al. 2010. Flying into the Future: Aviation Emissions Scenarios to 2050. [verkkojulkaisu] Julkaistu 2010. [Viitattu 29.10.2019]. Saatavissa:

<https://pubs-ac-s-org.ezproxy.cc.lut.fi/doi/pdf/10.1021/es902530z>

Daniel H. König 2015, Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO₂ and H₂. [Pdf]. Julkaistu 24.9.2015. [Viitattu 12.11.2019]. Saatavilla:

<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0360544215011767>

Directive (EU) 2018/2001, (EU 2018), On the promotion of the use of energy from renewable sources. [verkkodokumentti] Julkaistu 11.12.2018. [Viitattu 4.11.2019]. Saatavissa:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>

Dries Verstraete 2013. Long range transport aircraft using hydrogen fuel. [Pdf]. Julkaistu 2.10.2013. [Viitattu 12.11.2019]. Saatavilla:

<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S036031991302212X?via%3Dihub>

EASA 2019, European Aviation Safety Agency. European Aviation Environmental Report 2019. [verkkodokumentti]. [Viitattu 17.10.2019]. Saatavissa:

https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

ENVI 2015. Emission Reduction Targets for International Aviation and Shipping. [pdf].

[viitattu 31.10.2019] Saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/sahkolentokone-alicen-kantomatka-1000-km-finavian-tekeminen-johtaja-uskon-etta-suomessa-tayssahkoinen-matkustajalentokone-lentaa-kotimaan-reiteilla-aikaisintaan-2030-luvun-lopulla/d6f54c58-584a-43cf-a571-fbe39062f107>

EPA 2014. United states environmental protection agency. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. [Pdf] Julkaistu 2011, muokattu 4.8.2014. [Viitattu 14.11.2019]. Saatavilla:

https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf

Esko Linnakangas & Leila Juanto 2018. Lentoveron ylösnousu. [Kirja]. Julkaistu 2018. [Viitattu 6.11.2019]

EU 2018, Euroopan Unionin komissio. [Pdf]. Julkaistu 31.12.2018. [Viitattu 14.11.2019].

Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R2066&from=EN>

Finavia 2019. Lentoliikenne ja ilmasto. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.1.2019] Saatavilla:

<https://finavia.fi/fi/lentoliikenne-ja-ilmasto>

Finavia 1930, 2019. Suomalaisen lentämisen historia. [Artikkeli]. Julkaistu 26.9.2019.

[Viitattu 2.1.2019] Saatavilla: <https://www.finavia.fi/fi/uutishuone/2017/suomalaisen-lentamisen-historia-1930-luku-bremerin-sankarimatkat-ja-ilmavoimat>

Finnair 2019. [Verkkouutinen] Julkaistu 29.06.2018. [Viitattu 5.11.2019.] Saatavilla:

<https://bluewings.finnair.com/perspective/good-news-from-the-flight-deck/>

Finnair päästölaskuri. [Verkkosivu]. [Viitattu 13.11.2019]. Saatavilla:

<https://www.finnair.com/fi/fi/emissions-calculator>

Gregg G. Fleming & Ivan De Lépinay 2019. Environmental trends in aviation to 2050.

[PDF] [Viitattu 5.11.2019]. Saatavilla: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg17-23.pdf

ICAO CORSIA 2019. [Verkkosivu]. [Viitattu 31.10.2019].

Saatavilla: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>

International Civil Aviation Organization, (ICAO 2016). On Board A Sustainable Future.

[PDF]. Julkaistu 2016. [Viitattu 17.10.2019]. Saatavissa:

<https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>

Jeongwoo Han et al, 2013. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels. [Pdf]. Julkaistu

7.8.2013. [Viitattu 21.11.2019.] Saatavilla: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0960852413012297>

Langston Lee 2019, Old and new. [E-kirja]. Julkaistu 2019. [Viitattu 28.10.2019] Saatavilla:

<https://search-proquest-com.ezproxy.cc.lut.fi/docview/2236186209/fulltextPDF/8C2116F52AEA4791PQ/1?accountid=27292>

Lisa Marie Meier, 2019. Energy transition for the global aviation industry – a review of alternative aircraft propulsion. [Maisteri työ]. Julkaistu 2019. [Viitattu 15.10.2019] Saatavissa:

<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159505/Meier%202019%20Energy%20transition%20for%20the%20global%20aviation%20industry%20-%20a%20review%20of%20alternative%20aircraft%20propulsion.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Marina Kousoulidou & Laura Lonza 2016. Biofuels in aviation: Fuel demand and CO₂ emissions evolution in Europe toward 2030. [Pdf]. Julkaistu 9.8.2016. [Viitattu 18.11.2019].

Saatavilla: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S1361920915300092>

Mark D. Staples et al. 2018. Aviation CO₂ emissions reductions from the use of alternative jet fuels. Julkaistu 2018. [Viitattu 26.10.2018]. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0301421517308224>

Mark D. Staples et al. 2017. The limits of bioenergy for mitigating global life-cycle greenhouse gas emissions from fossil fuels. [Pdf]. Julkaistu 13.1.2017. [Viitattu 11.1.2020].

Saatavilla: <https://www.nature.com/articles/nenergy2016202>

Merja Kyllönen et al. 2013. Tulevaisuuden käyttövoimat liikenteessä. Julkaistu 2013.

[Viitattu 26.10.2019]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-342-8>

MT 2018, maaseudun tulevaisuus. Lentoliikenteen biopolttoaineiden yleistymistä jarruttaa kallis hinta – Finnair odottaa saatavuuden paranevan muutaman vuoden kuluttua.

[Verkkouutinen]. Julkaistu 13.10.2018. [Viitattu 5.11.2019] Saatavissa:

<https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/ymparisto/artikkeli-1.315177>

Neste 2019. Lentopolttoneste JET A-1. [Verkkosivu]. [Viitattu 17.11.2019]. Saatavilla:

<https://www.neste.fi/lentopolttoneste-jet-a1>

NREL 2016, (National Renewable Energy Laboratory). Review of Biojet Fuel Conversion Technologies. [Verkkójulkaisu]. Julkaistu kesäkuussa 2016. [Viitattu 21.11.2019].

Saatavilla: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66291.pdf>

Pharoah Le Feuvre, 2019. [Verkkosivu]. Julkaistu 18.3.2019. [Viitattu 6.11.2019].

Saatavilla: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/march/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off.html>

Robert Sausen et al, 2005. Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). [PDF]. Julkaistu 6.01.2005. [Viitattu 13.11.2019]. Saatavilla: ocserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/schweiz/09412948/v14n4/s13.pdf?expires=1573659656&id=0000&titleid=1292&checksum=7EACCAB762C3FA10E81C484BC946A767

Sergio Ramos Pereira et al 2014. Can hydrogen or natural gas be alternatives for aviation? - A life cycle assessment. [Pdf] Julkaistu 19.7.2014. [Viitattu 12.11.2019.] Saatavilla: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0360319914018898>

Suomen Ympäristökeskus, (SYKE) 2019. Lentämisen päästöt kasvavat – tekninen kehitys ja kompensatiot eivät riitä päästöjen vähentämiseen. [Tiedote]. Julkaistu 15.1.2019. [Viitattu 17.10.2019]. Saatavissa: [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Lentamisen_paastot_kasvavat_tekninen_ke\(48975\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Lentamisen_paastot_kasvavat_tekninen_ke(48975))

Sustainability report 2018, Finnair 2018. [verkkodokumentti] Julkaistu 15.2.2019. [Viitattu 17.10.2019] Saatavissa: <https://company.finnair.com/resource/blob/1353302/a5d7eae9c5038a568a614004cb56f1fb/finnair-sustainability-report-2018-data.pdf>

Sähköposti 2019a, [Haastattelu]. Haastattelija: Marja Ala-Kokko, haastateltavana: Neste Oy:n uusiutuvan lentopolttoaineen kehityspäällikkö Virpi Kröger. Haastattelu tapahtui tammikuussa 2019.

Tahir Hikmet Karakoc et al. 2018. Advances in sustainable aviation. [E-kirja]. [Viitattu 30.10.2019]. Saatavilla: <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/book/10.1007%2F978-3-319-67134-5#about>

TE 2019, Transport & Environment. Taxing aviation fuel in Europe. [Verkkosivu].

[Viitattu 31.10.2019] Saatavilla:

https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_02_Taxing_kerosene_intra_EU.pdf

Tekniikka & Talous 2019a. [Uutinen] Julkaistu 19.11.2019. [Viitattu 19.11.2019].

Saatavilla:

<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/airbus-kokeilee-hanhien-konstia-perakanaa-lentamisen-pitaisi-saastaa-rutkasti-lopoa/c81a9d53-a54f-4ffe-87bb-c57af79db8fe>

Tekniikka & Talous 2019b. [Uutinen] Julkaistu 29.7.2019. [Viitattu 10.11.2019]. Saatavilla:

<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/sahkolentokone-alicen-kantomatka-1000-km-finavian-tekninen-johtaja-uskon-etta-suomessa-tayssahkoinen-matkustajalentokone-lentaa-kotimaan-reiteilla-aikaisintaan-2030-luvun-lopulla/d6f54c58-584a-43cf-a571-fbe39062f107>

Tivi 2019. Uusi sähkölentokone lentää jo yli 1000 kilometriä. [Verkkouutinen]. Julkaistu

26.7.2019. [Viitattu 19.11.2019]. Saatavilla:

<https://www.tivi.fi/uutiset/uusi-sahkolentokone-lentaa-jo-yli-1000-kilometria/4b18d86f-ff2e-4250-b92f-aa132f35a4cb>

Trafi CORSIA, 2019. [Verkkosivu.] [Viitattu 31.10.2019]. Saatavilla:

<https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/corsia>

YLE 2019. [Verkkouutinen]. Julkaistu 10.6.2019. [Viitattu 12.11.2019]. Saatavilla:

<https://yle.fi/uutiset/3-10818795>

Yle Radio 1:n Ykkösaamu 15.1.2019. [Radiohaastattelu] Julkaistu 15.1.2019.

Ympäristöministeriö 2018. Pariisin ilmastopimus. [Verkkouutinen]. Julkaistu

29.11.2018. [Viitattu 13.11.2019]. Saatavilla: [https://www.ym.fi/fi-](https://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Pariisin_ilmastosopimus)

[FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Pariisin_ilmastosopimus](https://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Pariisin_ilmastosopimus)

Finnairin päästölaskurin kaavat

Peruslaskelmat:

Matkustajat = Kaikki matkustajat

Matkustaja KG = Matkustajan + käsimatkatavaran paino lähtöselvitysjärjestelmän mukaan
(lapsi = 35 kg, nainen = 70 kg, mies = 88 kg, sylilapsi = 0 kg) + ruumaan menevän
matkatavaran todellinen paino

Rahti KG = Rahdin paino + Postin paino

Matka = Gckm (Great Circle -matka)

Lisälaskelmat:

Polttoainekulutus per matkustaja = (Polttoainekulutus / (Matkustaja KG + Rahti KG)) *
100

Polttoainekulutus per matkustaja per 100 km = (polttoainekulutus_matkustaja / Matka) *
100

CO₂ per matkustaja = Polttoainekulutus/matkustaja * 3.15

CO₂ per matkustaja g/km = (CO₂/matkustaja * 1,000) / Matka

RTK = Revenue Ton Kilometer

Taulukko 6. Case-vertailun lähtötilanteen laskelmat

Lentopetrolin päästökerroin (t CO ₂ / t polttoainetta)	3,15
ruokajäteöljyn päästökerroin (t CO ₂ / t polttoainetta)	Lentopetrolin päästökerroin * biopolttoaineen päästöt = 3,15 * (1 - 0,88) = 0,378
palmuöljyn päästökerroin (t CO ₂ / t polttoainetta)	Lentopetrolin päästökerroin * biopolttoaineen päästöt = 3,15 * (1 - 0,32 tai 1 - 0,51) = 2,14 tai 1,54
Finnairin päästölaskurin ilmoittamat päästöt	2,1kg/100km/matkustaja

Taulukko 8. Lentokoneiden päästöt ja lippujen hintojen laskelmat

	Vaihtoehto 1 Jet A1	Vaihtoehto 2 Jet A1	Vaihtoehto 1 Jet A1 + Biokerosiini (Ruokajäte)	Vaihtoehto 1 Jet A1 + Biokerosiini (Palmuöljy)
Polttoaineen kulutus (kg) (Finnairin päästölaskuri)	18 216	23 420	18 034	18 034
CO ₂ – päästöt lennolta (kg) (Polttoaineen kulutus * päästökerroin)	18 216 kg * 3,15 = 57 380, 4	23420kg * 3,15 = 73 773	kerosiinin päästöt + biokerosiinin päästöt 18 034/2* 3,15 + 18 034/2 * 0,378 =31 811,68	kerosiinin päästöt + biokerosiinin päästöt 18 034/2* 3,15 + 18 034/2 * 1,54 tai 2,14 = 42 320,9 – 47 717,53
CO ₂ – päästöt koko vuoden lennoilta (tonnia) (CO ₂ – päästöt * matkojen määrä vuodessa)	57 380, 4kg *3matkaa per päivä * 365 = 62 831,54 t	73 773 kg *3matkaa per päivä * 365 = 80 781,44 t	31 811,68 kg *3matkaa per päivä * 365 = 34 833,79 t	42 320,9 kg *3matkaa per päivä * 365 = 46 341,39 t
CO ₂ – päästöt/matkustaja/lento (kg)	57 380, 4 / 199 matkustajaa = 288,34	73 773/ 199 matkustajaa = 370,72	31 811,68/ 199 matkustajaa = 159,86	42 320,9 tai 47 717,53 / 199 matkustajaa = 212,66-239,79
lentomatkan hinta / matkustaja (Finnairin hintakalenteri) Polttoaineen hinta = 1/3 * kokonaishinta = 127,70€ keroiinille	387€	387€	255,43€ + 63,85€ (kerosiini)+ 102,17€(bio) = 421,45€	255,43€ + 63,85€ + 95,78€ = 415,06€