

Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet

Mahdollisuudet, vaatimukset ja kehitysnäkymät

Riku Huhta

Antti Heininen

Jorma Mäntynen

Markus Pajarre

Elina Haapanen

Sisällysluettelo

1	Johdanto	8
1.1	Tausta.....	8
1.2	Työn tavoitteet ja menetelmät.....	8
2	Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet	9
2.1	Historiasta nykyhetkeen	9
2.2	Kestävät lentopolttoaineet	11
2.3	Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden ilmastovaikutukset	12
2.3.1	Hiilidioksidipäästöt	12
2.3.2	Muut päästöt	13
2.3.3	Suorat ja epäsuorat maankäytön vaikutukset	13
2.3.4	Kestävien lentopolttoaineiden kestävyyskriteerit	13
2.3.5	Nostoja eri biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden kasvihuonepäästöistä	15
3	Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet ja kasvihuonekaasupäästöjen vähennystoimet	16
3.1	Kansainväliset toimet	16
3.2	Euroopan Unionin toimet	16
3.2.1	ReFuelEU Aviation -asetus.....	17
3.2.2	Uusiutuvan energian direktiivi.....	18
3.2.3	Euroopan Unionin päästökauppa	19
3.2.4	EU taksonomia	20
3.3	Kansalliset toimet	21
3.3.1	Nostoja eri valtioiden toimista	21
3.3.2	Suomen toimet.....	23
3.4	Lentoyhtiöallianssien toimet.....	24
4	Lentoliikenteen polttoaineiden sertifiointi	25
4.1	Vaatimukset kestäville lentopolttoaineille	25
4.2	Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden sertifioidut tuotantoprosessit	28
4.3	Potentiaalisimmat biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotantoprosessit	31
4.4	100-prosenttisen kestävän lentopolttoaineen käyttäminen lentokalustossa	32
4.4.1	100-prosenttinen kestävä lentopolttoaine aromaattisilla hiilivedyillä ja ilman niitä.....	32
4.4.2	Testilennot 100-prosenttisellä kestävällä lentopolttoaineella	37
5	Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotanto	38
5.1	Lentoliikenteen biopolttoaineiden raaka-aineet	38
5.2	Raaka-aineiden saatavuus	39
5.3	Kestävien lentopolttoaineiden tuotantokapasiteetti.....	41
5.3.1	Kokonaisvolyyymien ennusteet.....	41
5.3.2	Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden rooli	42
5.4	Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotanto Suomessa	46
5.4.1	Toimijakenttä	46
5.4.2	Havainnot kestävien lentopolttoaineiden tuotannosta.....	48
6	Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden käyttö lentoliikenteessä	51
6.1	Käytön nykytilanne ja kasvuennusteet.....	51
6.2	Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden jakelu.....	54

6.3	Kestävien lentopolttoaineiden hinnat	58
6.4	Lentoyhtiöt ja kestävät lentopolttoaineet Suomessa	59
6.5	Lentoasemat ja kestävät lentopolttoaineet Suomessa	62
7	Johtopäätökset	65
7.1	Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tulevaisuus	65
7.2	Kestävät lentopolttoaineet ja liikennejärjestelmä	69
	Lähdeluettelo	74

<p>Julkaisun nimi Biopohjaiset kestävänt lentopolttoaineet</p>			
<p>Tekijät Riku Huhta, Antti Heininen, Jorma Mäntynen, Markus Pajarre & Elina Haapanen</p>			
<p>Toimeksiantaja ja asettamispäivämäärä Liikenne- ja viestintävirasto Traficom,</p>			
<p>Julkaisusarjan nimi ja numero Traficomn tutkimuksia ja selvityksiä</p>		<p>ISSN(verkkajulkaisu) 2669-8781 ISBN(verkkajulkaisu) 978-952-311-885-0</p>	
<p>Asiasanat Biopohjainen kestävä lentopolttoaine, kestävä lentopolttoaine, uusiutuva lentopolttoaine, biomassa, kestävyys, lentoliikenne, liikennejärjestelmä</p>			
<p>Tiivistelmä Selvityksen tavoitteena on kuvata biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden käyttöä lentämisessä, sen edellytyksiä, mahdollisuuksia, vaatimuksia ja kehitysnäkymiä. Biopohjaiset kestävänt lentopolttoaineet ovat osa kestäviä lentopolttoaineita, ja ne valmistetaan käytetystä paistorasvasta, eläinrasvoista, syömäkelvottomista energiakasveista, maa- ja metsätalouden tähteistä, yhdyskuntajätteen bio-osuudesta ja levistä. Näille polttoaineille on määritetty kestävyyskriteerit, ja ne eivät saa kilpailla mm. ruuantuotannon kanssa. Ne voivat vähentää merkittävästi lentoliikenteen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä ja muita lentoliikenteen päästöjä. Biopohjaiset kestävänt lentopolttoaineet soveltuvat sekoitettuna fossiiliseen lentopetrolin nykyiseen kalustoon ja infrastruktuuriin. Lentoalalla arvioidaan parhaillaan 100-prosenttisen kestävänt lentopolttoaineen käytön mahdollisuuksia.</p> <p>Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden kehityksen eturintamassa ovat Eurooppa ja Yhdysvallat. Keskeisiä toimia näiden lentopolttoaineiden tuotantoon ja käyttöön kannustamisessa ovat globaalisti CORSIA-järjestelmä, Yhdysvalloissa verohyvitykset ja Euroopassa Uusiutuvan energian direktiivi, ReFuelEU Aviation -asetus eli EU:n lentoasemien jakeluvelvoite, Euroopan Unionin päästökauppa ja EU taksonomia. Myös useat valtiot ja osavaltiot kannustavat eri tavoin kestävien lentopolttoaineiden käyttöön.</p> <p>Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden ohella tarvitaan myös synteettisten lentopolttoaineiden kehitystä. Pelkästään Euroopassa tarvitaan yli sata uutta kestävien lentopolttoaineiden tuotantolaitosta, jotta ReFuelEU Aviation -asetuksen velvoitteet voidaan saavuttaa. Tähän päivään mennessä julkaistut investoinnit sijoittuvat pääosin Suomen ulkopuolelle. Kysyntä biopohjaisille kestäville lentopolttoaineille on kasvussa velvoitteiden ja vapaaehtoisien kysynnän seurauksena. Kestävien lentopolttoaineiden hintojen ennustetaan pysyvän vielä pitkään nykyisiä lentopolttoaineita suurempana. Lentoyhtiöt ja lentoasemat näkevät kestävien lentopolttoaineiden käytön tärkeänä päästövähennyskeinona ja imagoetikijänä. Biopohjaisilla kestäville lentopolttoaineilla on ennusteiden mukaan seuraavien vuosikymmenten aikana tärkeä rooli erityisesti pitkämatkaisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä.</p> <p>Suomessa tuotettujen biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden volyymit jäävät arvioiden mukaan melko pieniksi, sillä globaalit markkinat, logistiset ratkaisut ja raaka-aineiden saatavuus ohjaavat tuotantoa keskeisiin kansainvälisiin logistisiin solmuihin. Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden sijaan synteettiset lentopolttoaineet voivat skaalautua Suomessa enemmän. Suomalaiset toimijat näkevät tärkeänä, että myös Suomessa olisi kestävien lentopolttoaineiden tuotantoa. Tämä parantaisi energiaomavaraisuutta nestemäisissä polttoaineissa, ja olisi kestävänt kehityksen mukaista tuottaa lentopolttoaineita lähellä jakelua.</p>			
<p>Yhteyshenkilö Jari Pöntinen</p>	<p>Raportin kieli Suomi</p>	<p>Luottamuksellisuus Julkinen</p>	<p>Kokonaissivumäärä 75</p>
<p>Jakaja</p>	<p>Kustantaja Liikenne- ja viestintävirasto Traficom</p>		

Publikation Biobaserade hållbara flygbränslen			
Författare Riku Huhta, Antti Heininen, Jorma Mäntynen, Markus Pajarre & Elina Haapanen			
Tillsatt av och datum Transport- och kommunikationsverket Traficom			
Publikationsseriens namn och nummer Traficoms forskningsrapporter och utredningar		ISSN (webbpublikation) 2669-8781 ISBN (webbpublikation) 978-952-311-885-0	
Ämnesord Biobaserat hållbart flygbränsle, hållbart flygbränsle, förnybart flygbränsle, biomassa, hållbarhet, flygtrafik, transportsystem			
Sammandrag <p>Målet med utredningen är att beskriva användningen av biobaserade hållbara flygbränslen inom flygtrafik samt möjligheterna med och förutsättningarna, kraven och utvecklingsutsikterna för den. Biobaserade hållbara flygbränslen är en del av hållbara flygbränslen. De tillverkas av återvunnet stekfett, animaliskt fett, oätliga energiväxter, rester från jord- och skogsbruk, bioandelen i kommunalt avfall samt alger. För dessa bränslen har fastställts hållbarhetskriterier och de får inte konkurrera med till exempel matproduktionen. De kan minska koldioxidutsläppen och andra utsläpp från flygtrafik betydligt. Biobaserade hållbara flygbränslen lämpar sig för den nuvarande materielen och infrastrukturen när de blandas med fossilt flygpetroleum. Inom flygbranschen bedöms för tillfället möjligheter att använda flygbränslen som är 100 procent hållbara.</p> <p>Europa och USA ligger i täten för utvecklingen av biobaserade hållbara flygbränslen. Centrala åtgärder för att främja produktionen och användningen av dessa flygbränslen är det globala CORSIA-systemet, skatterabatter i USA samt direktivet om förnybar energi, förordningen ReFuelEU Aviation, det vill säga EU:s distributionsskyldighet för flygplatser, EU:s system för handel med utsläppsätter och EU-taxonomin i Europa. Många stater och delstater uppmuntrar också på olika sätt aktörer inom branschen att använda hållbara flygbränslen.</p> <p>Utöver biobaserade hållbara flygbränslen behövs också utveckling av syntetiska flygbränslen. Bara i Europa behövs över hundra nya produktionsanläggningar för hållbara flygbränslen för att skyldigheterna enligt förordningen ReFuelEU Aviation ska kunna uppfyllas. De investeringar som hittills har publicerats riktas i regel utanför Finland. Efterfrågan på biobaserade hållbara flygbränslen ökar på grund av skyldigheterna och ökningen av frivillig efterfrågan. Priserna på hållbara flygbränslen förutspås hålla sig på en högre nivå än priserna på de nuvarande flygbränslen ännu en lång tid. Flygbolag och flygplatser anser att användningen av hållbara flygbränslen är ett viktigt sätt att minska utsläppen samt en viktig imagefaktor. Enligt prognoser har biobaserade hållbara flygbränslen en viktig roll under de kommande årtiondena i synnerhet i minskningen av koldioxidutsläppen från långdistansflyg.</p> <p>Mängden biobaserade hållbara flygbränslen som produceras i Finland förblir enligt prognoser ganska liten, eftersom den globala marknaden, logistiska lösningar och tillgången till råvaror styr produktionen till centrala internationella knutpunkter. I stället för biobaserade hållbara flygbränslen kan syntetiska biobränslen skalas mer i Finland. Finländska aktörer anser att det är viktigt att hållbara flygbränslen också produceras i Finland. Detta skulle förbättra självförsörjningen inom energiproduktionen i fråga om flytande bränslen och motsvara principen för hållbar utveckling att producera flygbränslen nära distributionsplatsen.</p>			
Kontaktperson Jari Pöntinen	Språk Finska	Sekretessgrad Offentlig	Sidoantal 71
Distribution		Förlag Transport- och kommunikationsverket Traficom	

Title of publication Bio-based sustainable aviation fuels			
Author(s) Riku Huhta, Antti Heininen, Jorma Mäntynen, Markus Pajarre & Elina Haapanen			
Commissioned by, date Finnish Transport and Communications Agency Traficom			
Publication series and number Traficom Research Reports		ISSN (online) 2669-8781 ISBN (online) 978-952-311-885-0	
Keywords Bio-based sustainable aviation fuel, sustainable aviation fuel, renewable aviation fuel, biomass, sustainability, air transport, transport system			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this report is to provide information on the use of bio-based sustainable aviation fuels and their preconditions, potential, requirements and development prospects. Bio-based sustainable aviation fuels are a subset of sustainable aviation fuels, which are manufactured out of used cooking fat, animal fat, inedible energy plants, agricultural and forestry waste, municipal biowaste and algae. These fuels are subject to set sustainability criteria, and they are not allowed to compete with food production, for example. They have the potential to significantly reduce the carbon dioxide emissions and other emissions generated by air transport. When mixed with fossil jet fuel, bio-based sustainable aviation fuels are compatible with existing aircraft and infrastructure. The possibilities of using 100% sustainable aviation fuel is currently being assessed in the aviation industry.</p> <p>When it comes to the development of bio-based sustainable aviation fuels, Europe and the United States are at the forefront. Key measures for encouraging the development and use of these aviation fuels include the global CORSIA system, tax credits in the United States and the Renewable Energy Directive, the ReFuelEU Aviation Regulation, meaning the supply obligation of EU airports, EU Emissions Trading System and the EU taxonomy in Europe. Many individual countries and states also encourage the use of sustainable aviation fuels in various ways.</p> <p>Bio-based sustainable aviation fuels need to be supplemented through the development of synthetic aviation fuels as well. Ensuring compliance with the ReFuelEU Aviation Regulation will require the establishment of over a hundred new sustainable aviation fuel production facilities in Europe alone. The investments announced in relation to this so far have been made primarily outside of Finland. The demand for bio-based sustainable aviation fuels is rising as a result of obligations and voluntary demand. According to forecasts, the prices of bio-based sustainable aviation fuels will remain higher than those of current aviation fuels for a long time to come. Airlines and airports see the use of sustainable aviation fuels as an important emissions reduction measure and image factor. According to forecasts, bio-based sustainable aviation fuels will play a major role especially in the reduction of carbon dioxide emissions from long-distance air transport in the coming decades.</p> <p>According to estimates, the volumes of bio-based sustainable aviation fuels produced in Finland will remain quite small, as the global market, logistical solutions and the availability of raw materials steer production to take place at important international hubs. Instead of bio-based sustainable aviation fuels, synthetic aviation fuels could scale better in Finland. Finnish operators consider it important for the production of sustainable aviation fuels to take place in Finland as well. This would improve Finland's energy self-sufficiency in liquid fuels, in addition to which producing aviation fuels close to where they are distributed would be in line with sustainable development principles.</p>			
Contact person Jari Pöntinen	Language Finnish	Confidence status Public	Pages, total 71
Distributed by		Published by Finnish Transport and Communications Agency Traficom	

Alkusanat

Tämän selvityksen tavoitteena oli kartoittaa biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden käyttöä lentämisessä, sen edellytyksiä, mahdollisuuksia, vaatimuksia ja kehitysnäkymiä Suomessa. Tarkastelua tehtiin sääntelyn, kaluston, tarjonnan, kysynnän ja infrastruktuurin näkökulmista.

Selvityksen toteuttivat Elina Haapanen, Antti Heininen, Riku Huhta, Jorma Mäntynen ja Markus Pajarre Destia oy:stä. Selvityksen ohjausryhmässä toimivat Heidi Auvinen, Jukka Hannola, Jarno Ilme, Kirsti Laurila, Jari Pöntinen ja Asta Tuominen Traficomista sekä projektiryhmässä Heidi Auvinen, Kirsti Laurila, Katja Lohko-Soner, Jari Lyytinen sekä Samuli Vuokila Traficomista.

Helsingissä, 1. marraskuuta 2023

Jarno Ilme
Ylijohtaja, verkostojohtaja
Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

Käsitteet

Biomassa = Maataloudesta, metsätaloudesta ja niihin liittyviltä tuotannonaloilta peräisin olevien biologista alkuperää olevien tuotteiden, jätteiden ja tähteiden biohajoavat osat sekä biologista alkuperää olevien jätteiden, teollisuus- ja yhdyskuntajätteet mukaan lukien, biohajoavat osat.

Biopolttoaineet = Liikenteessä käytettäviä polttoaineita, kuten biodiesel ja bioetanol, jotka tuotetaan biomassasta.

Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet = Nestemäisiä lentopolttoaineita, jotka valmistetaan käytetystä paistorasvasta, eläinrasvoista, syömäkelvottomista energiakasveista, maa- ja metsätalouden tähteistä, biopohjaisista yhdyskuntajätteistä ja levistä. Polttoaineille on määritetty kestävyyskriteerit, ja ne eivät saa kilpailla mm. ruuantuotannon kanssa.

Synteettiset lentopolttoaineet = Nestemäisiä lentopolttoaineita, jotka valmistetaan uusiutuvan sähkön avulla vedestä ja hiilidioksidista erinäisin menetelmin. Synonyymeinä sähköpolttoaineet, e-polttoaineet, Power-to-Liquid (PtL)-polttoaineet sekä uusiutuvat nestemäiset liikennepolttoaineet ei-biologisista lähteistä.

Kierrätetyt hiilipitoiset lentopolttoaineet = Nestemäisiä lentopolttoaineita, jotka valmistetaan uusiutumaton alkuperää olevista nestemäisistä tai kiinteistä jätevirroista tai uusiutumaton alkuperää olevista, jätteiden käsittelystä peräisin olevasta kaasusta ja pakokaasusta, joita syntyy teollisuuslaitosten tuotantoprosessin väistämättömänä ja tahattomana seurauksena. Esimerkkinä yhdyskuntajätteen ei-biopohjainen osuus, kuten kierrättämiskelvoton muovi.

Kestävät lentopolttoaineet (eng. Sustainable Aviation Fuels, SAF) = Kattotermi fossiiliselle lentopetrolille vaihtoehtoisille biopohjaisille, synteettisille tai kierrätetyille hiilipitoisille lentopolttoaineille, joille on määritetty kestävyyskriteerit.

Drop-in = Termillä viitataan lentopolttoaineisiin, jotka ovat täysin yhteensopivia nykyisen moottoritekniikan ja jakeluinfrastruktuurin kanssa.

Sekoitussuhde = Toistaiseksi kestäviä lentopolttoaineita on saanut käyttää lentokoneissa vain sekoitettuna fossiiliseen lentopetroliin. Sekoitussuhde tarkoittaa tätä kestävien lentopolttoaineiden osuutta tilavuudesta suhteessa fossiiliseen lentopetroliin.

Alan terminologia ei ole vielä täysin vakiintunutta. On siis mahdollista, että edellä kuvattuja termejä käytetään muissa julkaisuissa tässä esitetystä poikkeavissa merkityksissä.

1 Johdanto

1.1 Tausta

Kansainvälinen ilmaliikenne on palautumassa nopeasti koronapandemian aiheuttamasta kysyntäshokista. Kansainvälinen ilmakuljetusliitto IATA on arvioinut, että koronapandemiaa edeltäneisiin matkustajamääriin palataan globaalisti jo vuonna 2024, ja matkustajamäärän ennakoidaan kasvavan tästä edelleen.

Vaikka lentokoneet ovat kehittyneet polttoainetaloudellisuuden näkökulmasta huomattavasti viime vuosikymmeninä, on lentoliikenteen määrä kasvanut suhteessa vielä enemmän. Lentoliikennealan etujärjestö ATAG:n mukaan lentokoneiden tuottamat CO₂-päästöt tonnakilometriä kohden olivat vuonna 2019 jopa 54 % pienemmät kuin vuonna 1990. Samalla aikavälillä lentosuoritteiden määrä oli kuitenkin yli nelinkertaistunut 246 miljardista tonnakilometristä 1066:een, eli lentoliikenteen CO₂-päästöt ovat kaksinkertaistuneet konekaluston kehityksestä huolimatta. (ATAG, 2021a)

Lentoliikenteen suorien hiilidioksidipäästöjen osuus oli vuonna 2022 noin 2 % maailman hiilidioksidipäästöistä. Tonneina tämä oli noin 800 Mt CO₂, joka on noin 80 % pandemiaa edeltävien aikojen tilanteesta. Tilastokeskuksen ennakoaineiston mukaan Suomen kotimaan lentoliikenteen hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2022 noin 0,12 Mt CO₂-ekv ja ulkomaan lentoliikenteen 1,6 Mt CO₂-ekv. (Tilastokeskus, 2023b) Suorien hiilidioksidipäästöjen lisäksi lentämisestä aiheutuvista muista päästöistä seuraa ilmastovaikutusta, jonka suuruus on tuoreimpien tietojen valossa vähintäänkin kaksinkertainen suoriin hiilidioksidipäästöihin verrattuna.

Lentoalan tehokkaimpia päästövähennyskeinoja ovat kestävien lentopolttoaineiden osuuden kasvattaminen sekä lentämisen vähentäminen. Kestäviä lentopolttoaineita valmistetaan tällä hetkellä biopohjaisista raaka-aineista. Tässä selvityksessä kuvataan biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden nykytilaa ja tulevaisuutta.

1.2 Työn tavoitteet ja menetelmät

Selvityksen tavoitteena on kuvata biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden käyttöä lentämisessä, sen edellytyksiä, mahdollisuuksia, vaatimuksia ja kehitysnäkymiä erityisesti Euroopassa ja Suomessa. Työssä kuvataan kestävien lentopolttoaineiden roolia lentoliikenteen päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa sekä siihen liittyviä mahdollisuuksia ja haasteita. Työ avaa näkymää biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden sertifiointiin, tuotantoon ja kysyntään sekä arvioi markkinoiden kehittymistä.

Selvitys painottuu biopohjaisiin kestäviin lentopolttoaineisiin, mutta tarkastelee niitä koko kestävien lentopolttoaineiden ja muiden energiavaihtoehtojen viitekehyksessä. Kestäviin lentopolttoaineisiin luokitellaan myös synteettiset ja kierrätetyt hiilidioksidipitoiset lentopolttoaineet. Synteettisiä lentopolttoaineita on tarkasteltu Traficom in vetylentämisen selvityksessä, sillä ne liittyvät olennaisesti vetyperusteisiin tuotantoprosesseihin (Traficom, 2022b). Tässä työssä näitä käsitellään tarvittavilta osin, mutta pääfokus on biopohjaisissa vaihtoehdoissa.

Työhön on haastateltu useita lento- ja polttoainealan toimijoita sekä tehty laaja kirjallisuuskatsaus. Työ on tehty tiiviissä yhteistyössä Traficom in asiantuntijoiden kanssa.

2 Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet

Luvun keskeinen sisältö

- Lentoalalla vältetään termin ”biopolttoaineet” käyttämistä, sillä termi kuvaa myös sellaisia polttoaineita, joita ei luokitella kestäviksi lentopolttoaineiksi.
- Selvityksessä bioperäisistä kestävästi tuotetuista raaka-aineista valmistettuja lentopolttoaineita kuvataan termillä biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet. Monissa lähteissä termistä käytetään myös nimitystä ”uusiutuvat lentopolttoaineet”.
- Kestävät lentopolttoaineet koostuvat biopohjaisista, synteettisistä ja kierrätetyistä hiilipitoisista lentopolttoaineista.
- Euroopan Unionilla ja Kansainvälisellä siviili-ilmailujärjestö ICAO:lla on käytössään kestävyyskriteerit kestäville lentopolttoaineille.
- Kestävät lentopolttoaineet ovat kansainvälisen ilmailun keskeisimpiä keinoja vähentää lentämisestä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä ja muita aiheutuvia päästöjä.
- Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden CO₂-päästöjen vähennykset vaihtelevat huomattavasti riippuen käytettävästä prosessista.
- Suorat ja epäsuorat maankäytön vaikutukset ovat tärkeä osa kestävien lentopolttoaineiden kestävyden tarkastelua.

2.1 Historiasta nykyhetkeen

Biopolttoaineiden käyttö kaupallisessa lentoliikenteessä on melko uutta, kun verrataan koko lentoliikenteen historian pituuteen. Ensimmäinen kaupallinen lento biopolttoaineilla toteutettiin vuonna 2008 Virgin Atlantin lennolla. Tällä lennolla ns. ensimmäisen sukupolven biopolttoainetta sekoitettiin fossiiliseen lentopetroltiin (Boeing, 2008). Sittemmin biopolttoaineiden kehitys on kiihtynyt, raaka-ainevalikoima laajentunut ja kestävyyskriteerit kiristyneet.

Myös terminologiaa on uudistettu vastaamaan uusia vaatimuksia. Terminologia ei ole täysin vakiintunutta, mutta lentoalalla vältetään pääsääntöisesti termin ”biopolttoaine” käyttämistä, sillä alun perin biopolttoaineita valmistettiin korvaamaan fossiilisia polttoaineita tieliikenteessä. Näistä käytetään usein termiä ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet. Esimerkkejä näistä ovat mm. biodiesel ja bioetanoli. Niitä valmistetaan viljelykasveista, kuten sokeriruo’osta, maissinjyvistä, palmuöljystä, rypsiä ja soijaöljystä, joita voidaan tyypillisesti käyttää myös ihmisten ja eläinten ravintona.

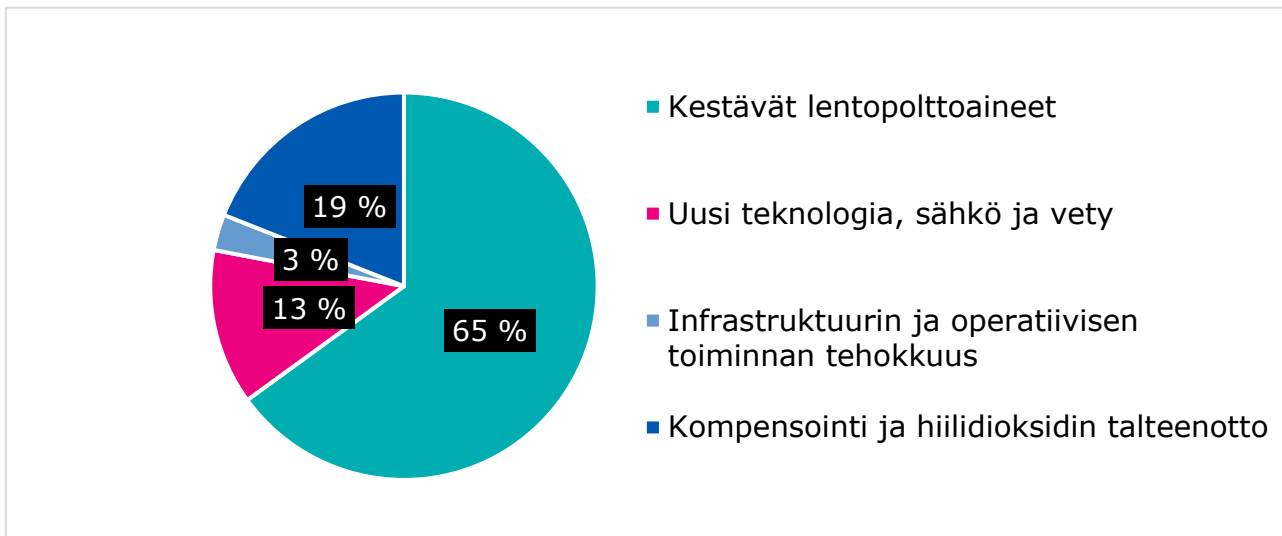
Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden tuotanto voi johtaa epäsuotuisiin maankäytön muutoksiin, vedenkäyttöön kasvuun ja ruuan hinnan kohoamiseen. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineista voidaan jalostaa myös lentopolttoaineita. Tällaista polttoainetta käytettiin Virgin Atlantin ensilennolla (Boeing, 2008), mutta nykyisin tämä lentopolttoaine ei täyttäisi kestävyyskriteerejä.

Alalla käytetään yleisesti termiä ”kestävät lentopolttoaineet”. Suomalaisessa kirjallisuudessa on monesti käytetty myös termiä ”uusiutuvat lentopolttoaineet”. Tämä termi ei kuitenkaan yksiselitteisesti kuvaa biomassasta tuotettavia lentopolttoaineita, ja se voidaan sekoittaa myös ensimmäisen sukupolven biopolttoaineisiin. Näistä syistä selvityksessä käytetään termiä biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet.

Kestäviksi lentopolttoaineiksi hyväksytään vain ne polttoaineet, joiden voidaan osoittaa täyttävän vahvat kestävä kehityksen vaatimukset ja standardit. Kansainvälinen ilmakuljetusliitto IATA linjasi vuonna 2021, että ilmakuljetusala tähtää hiilidioksidipäästöissä

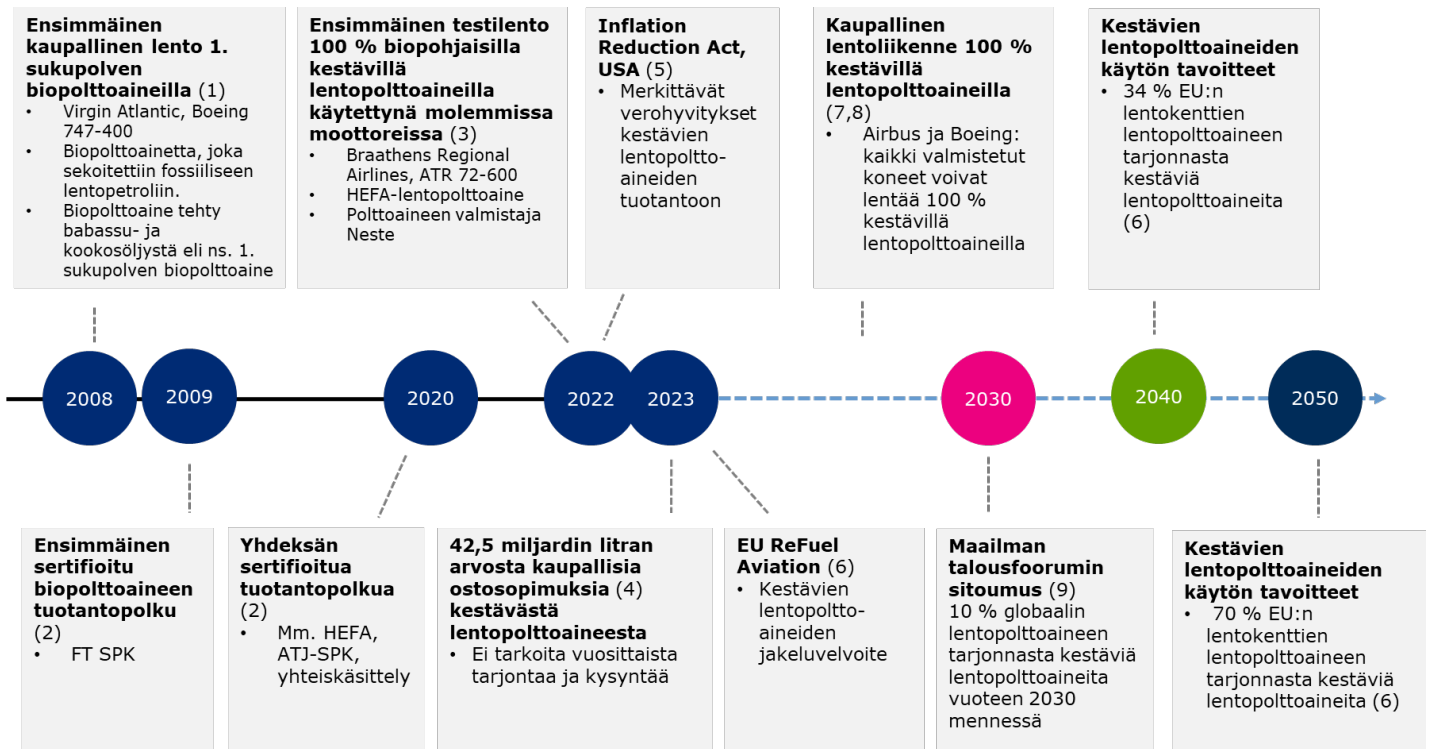
nettonollaan vuoteen 2050 mennessä, mikä on tavoitteena linjassa Pariisin ilmastopöytäkirjan kanssa. Kestävien lentopolttoaineiden rooli on keskeinen tämän tavoitteen saavuttamisessa (kuva 1). Kestävien lentopolttoaineiden markkinat ovat kuitenkin edelleen alkeelliset, ja niiden osuus kaikesta lentopolttoaineen kulutuksesta oli vuonna 2022 alle prosentin.

Markkinoiden kehityksen kiihdyttämiseksi kestäviä lentopolttoaineita koskevaa sääntelyä on kehitetty kansainvälisesti, EU-tasolla ja paikoin myös kansallisesti. Tämän myötä kestävien lentopolttoaineiden tuotanto ja kysyntä ovat kasvamassa, mutta jo nyt on selvää, että kyse on hyvin haasteellisesta tavoitteesta, jonka toteuttamiseksi vaaditaan laajaa yhteistyötä ja merkittävää kehitystä markkinoilla.



Kuva 1. IATA:n strategia nettonollapäästöihin vuoteen 2050 mennessä. Kestävien lentopolttoaineiden osuus tavoitteesta on 65 %. (IATA, 2023)

Kuvassa 2 on havainnollistettu muutamia lentoliikenteen biopolttoaineisiin ja kestäviin lentopolttoaineisiin liittyviä virstanpylväitä aina ensilennosta tulevaisuuden arvioihin.



Kuva 2. Keskeisiä tapahtumia ja tavoitteita lentoliikenteen biopolttoaineiden ja kestävien lentopolttoaineiden osalta. 1) (Boeing, 2008) 2) (CAAFI, 2023) 3) (Neste, 2022) 4) (ICAO, 2023b) 5) (Stillwater Associates, 2022) 6) (Euroopan komissio, 2023c) 7) (Boeing, 2023) 8) (Airbus, 2023) 9) (World Economic Forum, 2023)

2.2 Kestävät lentopolttoaineet

Kestävällä lentopolttoaineella on tyypillisesti kolme ominaisuutta (EASA, 2023a):

- 1. Kestävyys:** Polttoaineiden tuotannossa käytetään vähähiilisiä raaka-aineita, joita voidaan tuottaa jatkuvasti ja toistuvasti taloudellisesti, sosiaalisesti ja ekologisesti kestäväällä tavalla. Raaka-aineiden käyttö säilyttää ekologisen tasapainon välttämällä luonnonvarojen ehtymisen eikä kilpaile ruuantuotannon, maankäytön ja vedenkäytön kanssa.
- 2. Vaihtoehtoiset raaka-aineet fossiiliselle lentopolttoaineelle:** Öljyn, hiilen ja maakaasun sijaan raaka-aineina käytetään mm. paistorasvoja, kasviöljyjä, maa- ja metsätalouden sivuvirtoja, yhdyskuntajätteitä tai vihreää vetyä ja sähköä.
- 3. Sääntelyn mukainen lentopolttoaine:** Lentopolttoaine, joka täyttää kaikki tekniset vaatimukset, jotta sitä voidaan käyttää turvallisesti kaupallisessa lentoliikenteessä. Tällä hetkellä kestäviä lentopolttoaineita saa käyttää vain sekoitettuna määritellyllä suhteella fossiiliseen lentopetroltiin.

Kestävillä lentopolttoaineilla käsitetään pääsääntöisesti kolme erilaista polttoainetyyppiä: biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet, synteettiset lentopolttoaineet sekä kierrätetyt hiilipitoiset lentopolttoaineet (kuva 3). Kestäviksi lentopolttoaineiksi ei käsitetä ensimmäisen sukupolven biopolttoaineita edellä mainituista syistä. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden nykytilaa ja kehitysnäkymiä.

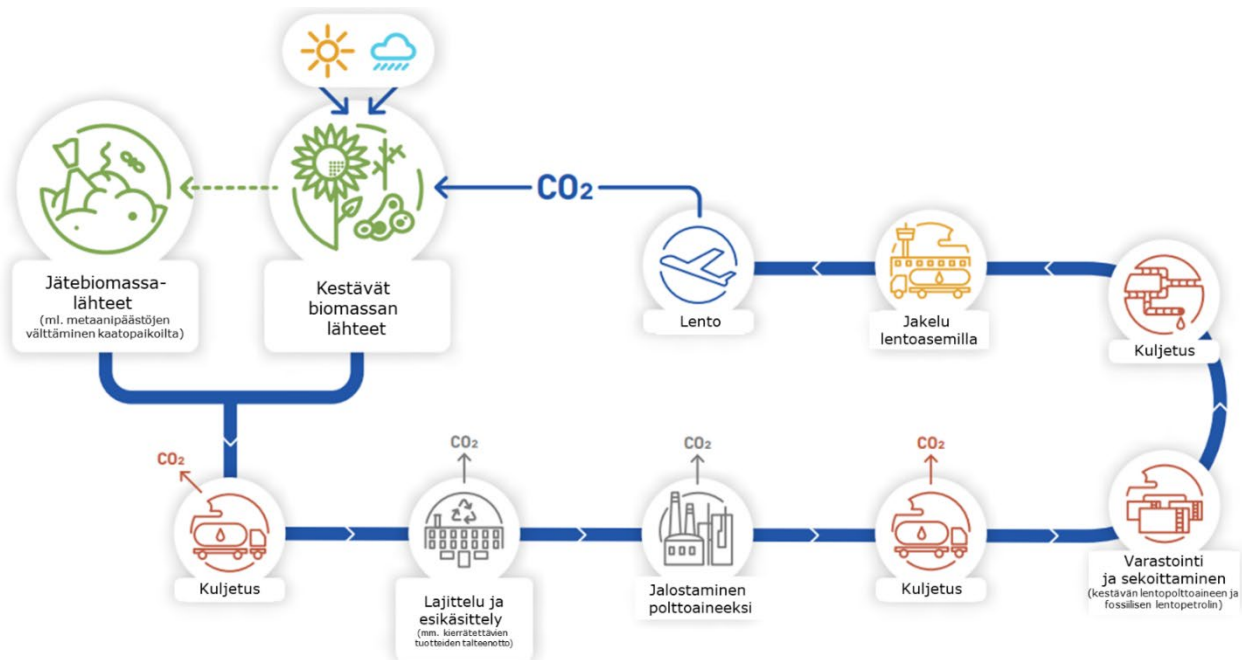


Kuva 3. Kestävien lentopolttoaineiden määritelmä. Mukailten (Euroopan komissio, 2023c).

2.3 Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden ilmastovaikutukset

2.3.1 Hiilidioksidipäästöt

Poltettaessa biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet tuottavat saman verran hiilidioksidipäästöjä kuin fossiilinen lentopetroli. Erot hiilidioksidipäästöissä syntyvät itse tuotantoprosessissa. Teoriassa biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet ovat hiilineutraaleja, sillä hiilidioksidi kiertää läpi biopolttoaineiden elinkaaren: biomassan kasvuvaiheessa kasvit sitovat itseensä suunnilleen saman verran hiilidioksidia kuin sitä vapautuu polttomootorissa poltettaessa. Mutta on huomioitava, että lentopolttoaineiden tuotantovaiheessa syntyy hiilidioksidipäästöjä mm. raaka-aineiden hankinnan, jalostamisen ja kuljettamisen aikana. Nämä tekijät huomioidaan kompleksisessa elinkaariarvioinnissa (Life Cycle Assessment, LCA), joka huomioi suuren määrän erilaisia muuttujia. Biopolttoaineen tuotantoprosessia on havainnollistettu ohessa kuvassa 4.



Kuva 4. Biopohjaisen kestävän lentopolttoaineen valmistusprosessi, suomennettu lähteestä: (Air Transport Action Group, 2023).

2.3.2 Muut päästöt

Lentoliikenne vaikuttaa ilmastoon myös typen oksidien, vesihöyryn sekä sulfaatti- ja nokipartikkelien vapautuessa korkealla ilmakehässä. Nämä päästöt ovat ilmastovaikutuksiltaan vähintään yhtä suuret kuin lentoliikenteen hiilidioksidipäästöt. Polttoaineet, joissa on korkea aromaattisten aineiden pitoisuus, aiheuttavat suurempia hiukkaspäästöjä, koska aromaattiset aineet palavat hitaammin kuin muut hiilivedyt.

Tyypillisesti biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotantoprosessi johtaa hyvin mataliin sulfaattipitoisuuksiin ja aromaattisten aineiden pitoisuuksiin, jotka vaikuttavat osaltaan pienhiukkaspäästöjen määrään (PM). Kun kestävää lentopolttoainetta on sekoitettu lentopetroltiin, on pienhiukkaspäästöjen määrä matkalentokorkeuksissa vähentynyt 50–97 % fossiiliseen lentopetroltiin verraten (EASA, 2023a). Suurimmat vähennykset havaitaan matalilla moottoritehoilla eli tyypillisesti kun lentokone rullaa kiitotiellä. Kestävällä lentopolttoaineella voidaan parantaa siis myös lentokenttäympäristöjen ilmanlaatua.

Palaessaan kestävät lentopolttoaineet tuottavat myös vähemmän nokea ja jääpitoisuuksia, erään tutkimuksen mukaan 50–70 % vähemmän, johtuen pienemmistä aromaattisten aineiden pitoisuuksista (Voigt C, Kleine J, Sauer D. et al, 2021). Tästä seuraa, että tiivistymisvanojen ominaisuudet muuttuvat ja tuottavat vähemmän ilmastovaikutusta. Tähän tulokseen päädyttiin myös toisessa tutkimuksessa (Narciso, M.; de Sousa, J.M.M., 2021).

2.3.3 Suorat ja epäsuorat maankäytön vaikutukset

Maankäytön muutokset ovat olennainen osa biopohjaisten lentopolttoaineiden tarkastelua. Suoria maankäytön muutoksia (eng. Direct land use changes (DLUC)) syntyy, kun viljelymaata muutetaan biopolttoaineiden raaka-aineen kasvatukseen. Tämän vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin huomioidaan edellisessä luvussa mainitussa elinkaariarvioinnissa (LCA).

Epäsuoria maankäytön muutoksia (Indirect land use change (ILUC)) syntyy, kun biopohjaisten polttoaineiden kysynnän kasvu johtaa biopolttoaineiden viljelyalueiden laajentamiseen, jolloin esimerkiksi suuria hiilivarastoja, kuten metsiä, raivataan viljelyalueeksi. Tästä seuraa metsäkatoa ja hiilinielujen pienenemistä, sillä metsät varastoivat suuret määrät hiilidioksidia itseensä ja maaperään.

ILUC-vaikutuksia arvioidaan kompleksisella mallinnuksella ja arvojen vaihteluväli on suuri. Tutkimusten mukaan biodiversiteetiltään monimuotoisten maa-alueiden, kuten sademetsien ja soiden muuttaminen biopolttoaineiden raaka-aineiden viljelymaaksi voi vapauttaa satoja kertoja enemmän hiilidioksidia kuin mitä kasvatettava biomassa voi vähentää vuosittain. Tämä on keskeinen syy sille, että ReFuelEU Aviation -ehdotuksessa ruoka- ja viljelykasvit eivät ole sallittuja biopolttoaineiden valmistukseen. (EASA, 2023a)

2.3.4 Kestävien lentopolttoaineiden kestävyyskriteerit

Kestävät lentopolttoaineet on sertifioitu kestävä kehityksen sertifiointijärjestelmissä (Sustainability Certification Schemes, SCS) Euroopan Unionin tasolla uusiutuvan energian direktiivissä ja globaalisti kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAOn kansainvälisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen kasvun hyvittämiseen velvoittavan järjestelmän CORSIA-kehityksessä (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Koska kestävien lentopolttoaineiden kasvihuonekaasupäästöt ovat palaessaan samaa luokkaa kuin fossiilisella lentopetrolilla, on tärkeää tarkastella polttoainetuotannon elinkaaren aikaisia päästöjä. Elinkaaritarkastelu sisältää kaikkien tuotannon vaiheiden kasvihuonekaasupäästöt. Kestävyyskriteerit on esitetty taulukossa 1. (EASA, 2023a)

Taulukko 1. Kestävien lentopolttoaineiden käytössä olevat kestävyyskriteeristöt. (EASA, 2023a)

Järjestelmä	Kestävyyskriteeristö
Uusiutuvan energian direktiivi (RED II), (2018), 29 artikla	<p>Kasvihuonekaasujen (KHK) vähennykset: Biopolttoaineiden KHK-päästöjen tulee olla elinkaaripäästöiltään pienemmät kuin fossiilisen polttoaineen, jonka ne korvaavat (fossiilisen polttoaineen vertailuluku = 94 g CO_{2e}/MJ)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Biopolttoaineet: vähintään 50 % pienemmät kasvihuonekaasupäästöt laitoksilla, jotka on tehty ennen 5.10.2015, 60 % laitoksilla, jotka on rakennettu tämän jälkeen ja 65 % pienemmät laitoksilla, jotka avataan vuoden 2021 jälkeen. • Synteettiset ja kierrätetyt hiilipitoiset polttoaineet: vähintään 70 % pienemmät kasvihuonekaasupäästöt. <p>Maankäytön muutokset: biopolttoaineiden raaka-aineita ei saa hankkia suuren biodiversiteetin tai hiilivaraston alueilta (mm. suojellut metsät, monimuotoiset niityt, kosteikot ja suot). Muut raportointivelvollisuuden piiriin kuuluvat kestävän kehityksen kysymykset on määritelty hallintosäännöissä ja ne voidaan kattaa sertifiointijärjestelmillä vapaaehtoiselta pohjalta. ReFuelEU Aviation jakeluveto kiristää edelleen RED II -kriteerejä ja sallii vain raaka-aineet, jotka on listattu liitteessä IX.</p>
CORSIA kestävyyskriteeristö CORSIA-soveltuville polttoaineille (kolmas versio, marraskuu 2022)	<p>Kasvihuonekaasujen vähennykset: CORSIA-kelpoisen polttoaineen / kestävän lentopolttoaineen tulee vähentää KHK-päästöjä vähintään 10 % verrattuna fossiiliseen polttoaineeseen (fossiilisen polttoaineen vertailuluku = 89 g CO_{2e}/MJ).</p> <p>Hiilivarastot: CORSIA-kelpoista polttoainetta / kestävää lentopolttoainetta ei saa tehdä biomassasta, joka on saatu maa-alueilta, jotka on muutettu 1.1.2008 jälkeen, jotka olivat ennen aarniometsää, kosteikkoa tai suota ja/tai myötävaikuttaa aarniometsien, kosteikkojen tai soiden hiilivarannon hajoamiseen.</p> <p>1.1.2024 jälkeen tuotettujen polttoaine-erien tulee täyttää myös kriteerit 14 eri teemasta, jotka jakautuvat hiilidioksidin vähentämisen teemoihin, ympäristöteemoihin ja sosioekonomisiin teemoihin. Tarkemmat kuvaukset löytyvät ICAO:n verkkosivuilta.</p>

Kuten taulukosta 1 havaitaan, on järjestelmien kestävyyskriteereissä eroja. Euroopan Unionilla on huomattavasti tiukemmat kriteerit mm. kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksille ja maankäytön muutoksille. Myös fossiilisen polttoaineen vertailuluku on suurempi kuin CORSIA-järjestelmässä. Nopeasti kasvavaan kysyntään ja kehittyvään markkinaan liittyy huoli siitä, että globaaleille markkinoille voi ilmaantua puutteellisen kestävyysvarmuuden takia monen laatuista kestävästä lentopolttoainetta. Tämä on riski mm. lentoyhtiöiden kestävyysraportoinnille.

2.3.5 Nostaja eri biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden kasvihuonepäästöistä

Suorien ja epäsuorien päästövaikutusten havainnollistamiseksi taulukossa 2 on esitetty nostoja CORSIA-soveltuvien polttoaineiden elinkaaripäästöistä (LCA) ja epäsuorista maankäytön vaikutuksista (ILUC). Osa polttoaineista voi jopa lisätä kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna fossiiliseen lentopetroltiin, ja osa puolestaan tuottaa negatiiviset kasvihuonekaasupäästöt eli prosessin aikana sitoutuu enemmän hiilidioksidia kuin mitä fossiilisen lentopolttoaineen tuotannosta ja käytöstä aiheutuu. Oheisen taulukon 2 yli 100 % päästövähennykset kuvastavat tätä tilannetta.

Esimerkiksi HEFA-polttoaineet (vetykäsittellyt rasvahapot) eivät aiheuta epäsuoria maankäytön vaikutuksia, sillä kyse on jätevirroista. Eläinrasvasta tehtävä polttoaine tuottaa 75 % ja käytetyistä paistorasvoista tehty polttoaine 84 % pienemmät hiilidioksidipäästöt kuin fossiilisen lentopolttoaineen käyttö. Vastaavasti maissiviljasta ATJ-menetelmällä (isobutanolin konversio lentopetroliksi) tehtävä polttoaine tuottaa hiilidioksidipäästöjä sekä elinkaarensa aikana että aiheutuvien epäsuorien maankäyttövaikutusten myötä. Tällainen polttoaine vähentää 12 % hiilidioksidipäästöjä fossiiliseen lentopolttoaineeseen verrattuna. Fossiiliselle lentopolttoaineelle käytettävä vertailuarvo on CORSIA-järjestelmässä 89 gCO₂e/MJ. (ICAO, 2023c)

Taulukko 2. Esimerkkejä biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden päästövähennyksistä. Huom! Nykyisin kestävää lentopolttoainetta on sekoitettava fossiilisen lentopetrolin sekaan. LCA- ja ILUC-arvot on määritetty CORSIA-järjestelmässä. (ICAO, 2023c)

Tuotantoprosessi	Alue	Polttoaineen raaka-aine	LCA gCO ₂ e/MJ	ILUC-arvo gCO ₂ e/MJ	Yhteensä (gCO ₂ e/MJ)	CO ₂ -ekv muutos vrt. fossiilinen
Fischer-Tropsch (FT)	Maailma	Maatalouden sivuvirrat	7,70	0,00	7,70	-91 %
	Maailma	Kiinteä yhdyskuntajäte	5,20	0,00	5,20	-94 %
	EU	Miscanthus	10,40	-22,00	-11,60	-113 %
Vetykäsittellyt rasvahapot (HEFA)	Maailma	Eläinrasva	22,50	0,00	22,50	-75 %
	Maailma	Käytetty paistorasva	13,90	0,00	13,90	-84 %
	Maailma	Rypsiöljy	47,40	26,10	73,50	-17 %
	Intia	Jatropha öljy	46,90	-48,10	-1,20	-101 %
Isobutanolin konversio lentopetroliksi (ATJ)	USA	Maissin vilja	55,80	22,10	77,90	-12 %
	USA	Miscanthus	43,40	-54,10	-10,70	-112 %
Etanolin konversio lentopetroliksi (ETJ)	Maailma	Metsäjätteet	24,90	0,00	24,90	-72 %
Synteettiset isoparafiinit (SIP)	EU	Sokerijuurikas	32,40	20,20	52,60	-41 %

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotantoprosesseja kuvataan tarkemmin luvussa 5.

3 Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet ja kasvihuonekaasupäästöjen vähennystoimet

Luvun keskeinen sisältö

- Kansainvälisellä tasolla CORSIA-järjestelmä kannustaa kestävien lentopolttoaineiden käyttöön.
- EU:n työkaluja kestävien lentopolttoaineiden käytön ja tuotannon kannustamiseen ovat uusiutuvan energian direktiivi, vuonna 2025 käynnistyvä ReFuelEU Aviation -asetuksen mukainen jakeluvelvoite, EU:n päästökauppa sekä EU taksonomia.
- Yhdysvalloissa Inflation Reduction Act tarjoaa merkittäviä taloudellisia tukia kestävien lentopolttoaineiden käyttöön ja tuotantoon. Myös monet osavaltiot ovat ottaneet käyttöön vastaavia käytäntöjä.
- Euroopassa useat maat ovat asettaneet kansallisia lentoliikenteen jakeluvelvoitteita. Suomessa ei ole käytössä kansallista jakeluvelvoitetta lentoliikenteelle. Nykytiedon mukaan ReFuelEU Aviation -asetuksen mukainen jakeluvelvoite tulee syrjäyttämään kansalliset jakeluvelvoitteet.
- Oneworld-lentoyhtiöallianssin tavoitteena on, että vuoteen 2030 mennessä 10 % allianssin polttoainekulutuksesta olisi kestävää lentopolttoainetta.

3.1 Kansainväliset toimet

Kansainvälisesti kehitystä ohjaa kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAO:n jäsenvaltioiden kansainvälisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen kasvun hyvittämiseen velvoittava järjestelmä, CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Järjestelmän myötä ilmailu on ensimmäinen ala, jolle on asetettu maailmanlaajuinen markkinaehtoinen päästöjärjestelmä. CORSIA:n avulla pyritään kansainvälisen lentoliikenteen hiilineutraaliin kasvuun.

CORSIA antaa lentoyhtiöille mahdollisuuden vähentää hyvittämisvaatimuksiaan käyttämällä CORSIA-kelpoisia polttoaineita, joihin kuuluvat CORSIA:n kestävät lentopolttoaineet ja CORSIA:n lentopolttoaineet, joiden hiilidioksidipäästöt ovat vähäisempiä (eng. Lower Carbon Aviation Fuels, LCAF). Jotta ne voivat olla CORSIA-kelpoisia, tulee niiden vähentää elinkaari päästöjä 10 %:lla verrattuna fossiiliseen lentopetroltiin. LCAF voi ICAO:n mukaan toimia kestävien lentopolttoaineiden rinnalla täydentävänä toimenpiteenä, joka auttaa vähentämään lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjä elinkaaren aikana.

ICAO:n määritelmän mukaan kestävä lentopolttoaine on "uusiutuva tai jätteestä johdettu lentopolttoaine, joka täyttää ICAO:n "Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)" mukaiset kestävyyskriteerit". CORSIA-järjestelmä ei suoraan velvoita käyttämään kestäviä lentopolttoaineita, mutta käytännössä järjestelmä kannustaa taloudellisesti tähän.

3.2 Euroopan Unionin toimet

Lentoliikenne aiheuttaa EU-alueella 3,8 % kaikista CO₂-päästöistä. Kun huomioidaan myös muut lentoliikenteen päästöt, kuten typen oksidit (NO_x), palamattomat hiilivedyt (HC), hiilimonoksidi eli häkä (CO), vesihöyry, rikin oksidit (SO_x) sekä hiukkaset, voi lentoliikenteen

ilmastoa lämmittävä vaikutus vähintään tuplaantua. Euroopan vihreän kehityksen ohjelman mukaisesti liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä tulee vähentää 90 % vuoteen 2050 mennessä (vuoden 1990-tasosta). EU:n kaksi tärkeintä työkalua päästötavoitteiden saavuttamiselle lentoliikenteessä ovat EU:n päästökauppa ja ReFuelEU Aviation. (Euroopan Unioni, 2023)

3.2.1 **ReFuelEU Aviation -asetus**

ReFuelEU Aviation -asetus on hyväksytty kaikissa tarvittavissa EU:n päätöksentekokoelimityksissä, ja se julkaistaan loppuvuodesta 2023. Sitä sovelletaan 1. tammikuuta 2024 alkaen. Sen artikloja 4, 5, 6, 8 ja 10 sovelletaan kuitenkin vasta 1. tammikuuta 2025 alkaen. (Eurooppa-neuvosto, 2023) Uuden lainsäädännön tullessa voimaan, polttoaineen toimittajia vaaditaan sekoittamaan kestäviä lentopolttoaineita lentopetroliin yhä suurempia määriä vuodesta 2025 alkaen. Toimenpiteen ennustetaan vähentävän lentokoneiden hiilidioksidipäästöjä noin kahdella kolmasosalla vuoteen 2050 mennessä verrattuna "ei toimia" -skenaarioon ja tuovan ilmasto- ja ilmanlaatuetauja vähentämällä myös muita kuin hiilidioksidipäästöjä. (Euroopan komissio, 2023c)

Asetus on siis käytännössä jakeluvelvoite, jossa on kaksi merkittävää seikkaa. Jakeluvelvoite kohdistetaan lentopolttoaineen jakelijoihin, ei lentoyhtiöihin. Tällöin vaikutus kohdistuu kaikkiin EU:n lentoasemilta lähteviin lentoihin. Toisekseen velvoite perustuu kestävän lentopolttoaineen määriin, ei hiilidioksidipäästöjen vähentämisen intensiteettiin kestävien lentopolttoaineiden käytön seurauksena.

Asetus velvoittaa toimijoita seuraavasti (Euroopan komissio, 2023c):

- **Lentopolttoaineen jakelijat** veloitetaan toimittamaan vähimmäisosuus kestävästä lentopolttoainetta EU:n lentoasemille, alkaen 2 % kaikesta toimitetusta polttoaineesta vuoteen 2025 mennessä ja 70 % vuoteen 2050 mennessä. Lentopolttoaineseoksen on sisällettävä vähimmäisosuuden synteettistä polttoaineita, joiden osuus kasvaa ajan myötä.
- **Lentotoiminnan harjoittajille** asetetaan tankkausvelvoite, jonka mukaan EU:n lentoasemalla tankatun lentopolttoaineen vuotuisen määrän on oltava vähintään 90 prosenttia vuotuisesta tarvitusta lentopolttoaineesta. Lentoyhtiöt saavat siis käytännössä tankata vain lennolle tarpeellisen määrän polttoainetta. Tällä pyritään välttämään ns. "tankkerointia" eli sitä tilannetta, jossa lentoyhtiöt kuljettavat ylimääräistä lentopolttoainetta välttääkseen tankkauksen määränpäässä lentoasemalla, jossa lentopolttoaine voi olla kalliimpaa. Tankkerointi voi kasvattaa hiilidioksidipäästöjä.
- **Lentoasemat** varmistavat, että niiden tankkausinfrastruktuuri on käytettävissä ja soveltuva kestävien lentopolttoaineiden jakelulle.
- **Polttoaineen toimittajia ja lentotoiminnan harjoittajia** veloitetaan kestävien lentopolttoaineiden jakelun ja käytön tiedonkeruuseen ja raportointiin, joiden avulla voidaan seurata uuden asetuksen vaikutuksia EU:n lentoliikenteen harjoittajien ja alustojen kilpailukykyyn.

Jakeluvelvoite kattaa biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet, kierrätetyt hiilipitoiset lentopolttoaineet ja synteettiset lentopolttoaineet uusiutuvan energian direktiivin kestävyys- ja päästövähennyskriteerien mukaisesti 70 %:iin saakka. Soveltamisalan ulkopuolelle jäävät ravinto- ja rehuksveista tuotetut lentopolttoaineet sekä vähähiiliset lentopolttoaineet, mukaan

lukien vähähiilinen vety. (Euroopan komissio, 2023c) ReFuelEU Aviation -asetuksen mukaiset sekoitussuhteet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. ReFuelEU Aviation -asetuksen mukaiset sekoitussuhteet. (Euroopan parlamentti, 2023b)

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Kestävän lentopolttoaineen osuus toimitetusta polttoaineesta	2 %	6 %	20 %	34 %	42 %	70 %
josta synteettisten tai sähköstä tuotettujen polttoaineiden osatavoite:	-	1,2 %	5 %	10 %	15 %	35 %

Velvoitteet koskevat lentopolttoaineen käyttöä vähintään 800 000 matkustajan tai sadantuhannen rahtitonin EU-lentoasemilla eli Suomessa velvoite koskee vain Helsinki-Vantaan lentoasemaa. (Valtioneuvosto, 2023)

Käyttöön otetaan myös kestäviä lentopolttoaineita käyttävien lentotoiminnan harjoittajien ympäristötehokkuutta koskeva EU:n merkintäjärjestelmä, jonka avulla kuluttajat voivat tehdä tietoon perustuvia valintoja ja tukea ympäristöystävällisempää lentoliikennettä. Asetus sisältää myös säännöt toimivaltaisista viranomaisista, jotka jäsenmaiden on nimettävä valvomaan uuden asetuksen täytäntöönpanoa, sekä sakkoja koskevat säännöt. (Eurooppa-neuvosto, 2023)

Päästövähennysten lisäksi jakelovelvoitteella pyritään parantamaan EU:n energiavarmuutta, lisäämään tuotantokapasiteettia ja tuomaan uusia työpaikkoja. (Euroopan komissio, 2023c). Energiavarmuuden kysymykset ovat ajankohtaisia, kun EU on irrottautumassa Venäjän fossiilisesta energiasta ja pyrkii omavaraistamaan energiantuotantoaan.

3.2.2 Uusiutuvan energian direktiivi

ReFuelEU Aviation -asetuksessa määritellyt kestävät lentopolttoaineet ovat linjassa EU:n Uusiutuvan energian direktiivin kanssa (eng. Renewable Energy Directive, RED). Tällä hetkellä voimassa oleva direktiivi RED II on vuodelta 2018. Direktiiviä ollaan uudistamassa. RED III -direktiivimuutos tulee voimaan vuoden 2023 aikana. RED III-direktiivimuutoksessa uusiutuvan energian osuuden vuoden 2030 tavoite ollaan nostamassa 42,5 prosenttiin nykyisestä 32 prosentista eli lähes kaksinkertaiseksi verrattuna uusiutuvan energian nykyiseen osuuteen EU:ssa. Pyrkimyksenä on edelleen nostaa uusiutuvien energialähteiden osuus 45 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. (Euroopan komissio, 2023a)

Lentoliikenne mukana liikennesektorin tavoitteissa

RED III-direktiivimuutoksessa liikennesektorin tavoite koskee jatkossa tieliikenteen lisäksi myös meri- ja lentoliikennettä. Liikennesektorilla jäsenvaltiot voivat tulevaisuudessa valita joko kasvihuonekaasuintensiteetin vähenemään tai uusiutuvan energian osuuteen perustuvan tavoitteen väliltä. Liikenteeseen jaeltujen polttoaineiden ja sähkön kasvihuonekaasuintensiteetin tulisi vähentyä vähintään 14,5 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Uusiutuvan energian osuuteen perustuvassa mallissa osuus tulee nostaa 29 prosenttiin vuonna 2030. (Valtioneuvosto, 2023)

Kehittyneille biopolttoaineille sekä uusiutuvaan vetyyn perustuvilla sähköpolttoaineilla asetetaan yhteinen 5,5 prosentin tavoite, jossa muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutuvien polttoaineiden osuuden on oltava vähintään 1 prosentti. (Valtioneuvosto, 2023)

3.2.3 Euroopan Unionin päästökauppa

EU:n päästökauppajärjestelmä (EU ETS) perustettiin vuonna 2005 edistämään kasviuonekaasupäästöjen vähentämistä kustannustehokkaalla ja taloudellisella tavalla. Sillä rajoitetaan energiaintensiivisen teollisuuden, energiantuottajien ja ilma-alusten käyttäjien kasviuonekaasupäästöjen määrää. Päästöoikeudet rajoitetaan EU:n vahvistamalle enimmäistasolle, ja yritykset joko saavat tai ostavat yksittäisiä oikeuksia. Enimmäistaso alenee ajan mittaan siten, että päästöjen määrä vähenee asteittain. (Euroopan komissio, 2023b)

Lentoliikenne on tullut osaksi päästökauppaa vuonna 2012. Lentoliikenteen osalta päästökauppa koskee kaikkia Euroopan talousalueen lentoasemilta lähteviä ja niille saapuvia lentoja, jollei niitä ole erityisin perustein rajattu päästökaupan soveltamisalan ulkopuolelle.

Vuoden 2027 alkuun asti päästökauppa koskee Euroopan talousalueen sisäisiä lentoja sekä Sveitsiin ja Isoon-Britanniaan lähteviä lentoja. Vuonna 2026 komissio tulee arvioimaan ICAO:n CORSIA-järjestelmää nähdäkseen, saavuttaako se Pariisin ilmastopimuksen tavoitteet. Mikäli tavoitteisiin ei arvion perusteella päästä, komissio tekee lainsäädäntöehdotuksen, joka voisi laajentaa EU:n päästökaupan soveltamisalaa kaikkiin Euroopan talousalueelta lähteviin lentoihin. (Euroopan komissio, 2023b)

Päästökauppaa ohjataan EU:n päästökauppadirektiivillä. Uusin päästökauppadirektiivi (2023/959 ja 2023/958) tuli voimaan kesäkuussa 2023 ja se muuttaa alkuperäistä 2003/87 päästökauppadirektiiviä. Uudella direktiivillä vastataan EU:n päästövähennystavoitteiden kiristymiseen. Päästövähennystavoite kiristyy aiemmasta 55 prosentista 62 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon. Lentoyhtiöille luodaan myös uusi järjestelmä, jonka avulla voidaan seurata, raportoida ja todentaa ilmailun muita kuin hiilidioksidipäästöjä ja ilmastovaikutuksia, jotka muodostavat jopa kaksi kolmasosaa ilmailun kokonaisilmastovaikutuksista. (Euroopan komissio, 2023b)

Lentoliikenteessä jo käytössä olevaa päästökauppaa tehostetaan 1.1.2024 alkaen. Päästökaupan ilmastovaikuttavuutta lisätään poistamalla asteittain päästöoikeuksien ilmaisjako ja vähentämällä päästöoikeuksien kokonaismäärää. Lentoliikenteessä ilmaisjako loppuu kokonaan vuonna 2026. Tällä hetkellä 82 % lentoliikenteen päästöoikeuksista jaetaan maksutta. Tämä määrä on riittänyt normaaleina vuosina kuittaamaan vain vähän alle puolet lentoliikenteen hiilidioksidipäästöistä. Lentoliikenteen päästöoikeudet eivät ole yleensä riittäneet kattamaan kaikkia lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjä, vaan ilma-alusten käyttäjät ovat ostaneet lisäksi päästöoikeuksia huutokaupoista, muilta ilma-alusten käyttäjiltä sekä yleisen päästökaupan piiriin kuuluvilta laitoksilta. (Euroopan komissio, 2023b)

Päästökauppaan lisätään kestävien lentopolttoaineiden käytön tukimekanismi, jonka tarkoituksena on lisätä kestävien lentopolttoaineiden käyttöä ja päästövähennyksiä kaventamalla fossiilisen ja kestävä polttoaineen hintaeroa 1.1.2024-31.12.2030. Tähän tarkoitukseen varataan enintään 20 miljoonaa päästöoikeutta. Jäsenvaltioiden on jaettava varatut päästöoikeudet siten, että niillä voidaan kattaa osittain tai kokonaan fossiilisen lentopetrolin käytön ja kestävien lentopolttoaineiden käytön välinen hintaero. Esimerkiksi niillä lentoasemilla, jotka eivät ole riittävän suuria, jotta ne voitaisiin määritellä EU:n lentoasemiksi, 100 prosenttia hintaerosta tulisi kattaa päästöoikeuksilla. Kaupalliset ilma-alusten käyttäjät voivat vuosittain hakea jaettavia päästöoikeuksia. (Euroopan komissio, 2023b)

3.2.4 EU taksonomia

Euroopan vihreän kehityksen ohjelman tavoitteiden saavuttaminen vaatii 700 miljardin euron vuotuiset lisäinvestoinnit, joista valtaosa muodostuu yksityisistä investoinneista. Jotta haasteeseen voidaan vastata, on rahoituksen ohjautettava kestäviin projekteihin ja toimiin. Tämän saavuttamiseksi tarvitaan yhteinen kieli ja selkeä määritelmä siitä, mikä on "kestävää". Siksi EU:ssa on laadittu kestävä taloudellisen toiminnan luokitusjärjestelmä eli "EU-taksonomia". Taksonomia luo perustan sille, millaisia taloudellisia investointeja voi kutsua kestäviksi. Tarkoituksena on lisätä sijoituskohteiden läpinäkyvyyttä ja ohjata rahoitusta kestäväan liiketoimintaan. (EU C/2023/3850 final)

Taksonomiaan on ehdotettu vuonna 2023 muutoksia, joista osa käsittelee lentoliikenteen osalta lentokonevalmistajia sekä lentoyhtiöitä (EU C/2023/3850 final). Komissio päätti sisällyttää lentoalan toimet enimmäkseen "siirtymätoimiin", koska niillä on vaikutuksia ilmastonmuutoksen hillitsemiseen. Muutosten oletetaan tulevan pääosin voimaan 1.1.2024 alkaen. Aiemmin taksonomiassa on lentoliikenteen osalta huomioitu vain lentoasemat (EU 2021/2139, ajantasaiskooste).

Uudet kriteerit keskittyvät kannustamaan

- päästöttömien teknologioiden kehittämiseen
- aikaisempia lentokonemalleja korvaavien uusimman sukupolven lentokoneiden valmistukseen ja käyttöönottoon, mikä edistää laivaston uusiutumista luokkansa parhaimmilla polttoainetehokkailla lentokoneilla
- lisäämään kestävien lentopolttoaineiden käyttöä.

Kriteerit voivat auttaa vähentämään ilmailun kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi ennen kuin nollapäästöiset teknologiat tulevat markkinoille ja niistä tulee taloudellisesti kannattavia vaihtoehtoja. Kriteereitä tarkastellaan säännöllisesti joka kolmas vuosi, kuten kaikkia taksonomia-asetuksen siirtymätoimintoja.

Yksinkertaistaen asetusehdotusta, **ilma-alusten valmistus tai korjaus** voidaan tulkita kestäväksi toiminnaksi, mikäli joku alla olevista toteutuu¹:

- Ilma-alukset eivät tuota lainkaan suoria (pakokaasujen) hiilidioksidipäästöjä.
- 31.12.2027 asti: ilma-alukset tuottavat valmistuksen / korjauksen jälkeen 1,5–11 % (riippuen lentoonlähtömassasta) vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin ICAO:n standardin tyyppiraja vaatii, ja joita rajoitetaan korvaussuhteella sen varmistamiseksi, että toimitus ei lisää lentokaluston maailmanlaajuista määrää.
- 1.1.2028–31.12.2032 aikana: b-kohdan ehtojen täyttämisen lisäksi ilma-alusten tulee olla sertifioitu operoitavaksi 100-prosenttisellä kestäväällä lentopolttoaineella. Tällä hetkellä suurin sallittu sekoitussuhde on 50 %, useille kestäville lentopolttoaineille selvästi tätäkin matalampi.

Matkustajien ja tavaroiden lentokuljetusten osalta toiminta voidaan tulkita kestäväksi, mikäli joku alla olevista toteutuu²:

- Lento operoidaan käyttäen ilma-alusta, joka ei tuota lainkaan suoria (pakokaasujen) hiilidioksidipäästöjä.

¹ Taksonomia-asetuksen jakso 3.21

² Taksonomia-asetuksen jakso 6.19

- b) 31.12.2029 saakka: lento operoidaan käyttäen ilma-alusta, joka on otettu käyttöön ennen asetuksen voimaantuloa, ja joka täyttää ilma-alusten valmistuksen tai korjauksen (edellä) kriteerin b tai c.
- c) 31.12.2029 saakka: lento operoidaan käyttäen ilma-alusta, joka on otettu käyttöön asetuksen voimaantulon jälkeen ja joka täyttää ilma-alusten valmistuksen tai korjauksen (edellä) kriteerin b tai c, ja näiden lisäksi käytöstä myös poistetaan pysyvästi jokin toinen ilma-alus, joka täyttää asetuksessa mainitut neljä teknistä kriteeriä.
- d) 1.1.2030 alkaen: lento operoidaan käyttäen ilma-alusta, joka täyttää yllä kuvatun kriteerin b tai c (riippuen aluksen käyttöönottohetkestä), ja lisäksi lennon operointiin käytetystä polttoaineesta tulee olla kestäviä lentopolttoaineita vähintään 15 % + 2 %-yksikköä per kuluneiden vuosien määrä 2030 alusta lukien.
- e) Lento operoidaan siten, että operointiin käytetystä lentopolttoaineesta kestäviä lentopolttoaineita on 5 % + 2 %-yksikköä per kuluneiden vuosien määrä vuodesta 2022 lukien
 - Ehdon e perusteella kestäväntä lentopolttoainetta osuuden tulisi siis esimerkiksi vuonna 2030 olla vähintään $5\% + (2030 - 2022) \cdot 2\% = 21\%$.

Kestävien lentopolttoaineiden käyttövaatimus lasketaan vaatimusten mukaisen ilma-aluksen käyttämän lentopolttoaineen ja laivaston tasolla käytetyn kestäväntä lentopolttoaineen kokonaismäärän perusteella (EU C/2023/3850 final). EU taksonomiassa esitetyt kestäväntä lentopolttoaineiden vaatimukset ovat ReFuelEU Aviation -asetusta vaativampia.

Taksonomian ja asetusten vaatimuserot ovat herättäneet alalla keskustelua, sillä epäilyksenä on, ettei kestäviä lentopolttoaineita ole saatavilla taksonomian edellyttämiä määriä kilpailukykyiseen hintaan. Toisaalta voidaan nähdä, että ReFuelEU Aviation asettaa vain minimivaatimukset kestäville lentopolttoaineille, ja taksonomia ohjaa vielä tavoitteellisempiin toimiin.

3.3 Kansalliset toimet

3.3.1 Nostaja eri valtioiden toimista

Useat maat ovat ottaneet käyttöön kansallisen kestäväntä lentopolttoaineiden jakeluelvoitteen tai muutoin tukevat siirtymää kestäviin lentopolttoaineisiin. Seuraavaksi on kuvattu muutamia näistä. Nykytiedon mukaan ReFuelEU Aviation -asetuksen jakeluelvoite tulee syrjäyttämään EU:n jäsenvaltioiden kansalliset velvoitteet.

Yhdysvallat ja Inflation Reduction Act

Koko maailman teknologisen siirtymän markkinoihin merkittävästi vaikuttava Yhdysvaltain Inflation Reduction Act (IRA) hyväksyttiin vuonna 2022. Se on sääntelykokonaisuus, joka pyrkii houkuttelemaan investointeja Yhdysvaltoihin sekä tarjoaa verohyvityksiä ja muita taloudellisia kannustimia päästöjen vähentämiseen monilla sektoreilla. Ohjelmassa kestävät lentopolttoaineet, jotka vähentävät elinkaarensa aikana hiilidioksidipäästöjä yli 50 %:lla verrattuna fossiiliseen lentopetroltiin, ovat oikeutettuja verohyvityksiin. Verohyvitysten suuruus on ensi alkuun 1,25 dollaria gallonalta³, ja hyvitys voi nousta 0,01 dollaria gallonalta jokaiselta

³ 1 US-gallona = n. 3,785 litraa

yli 50 %:n ylittävältä prosenttiyksiköltä, korkeintaan 1,75 dollariin gallonalta asti (The White House, 2021).

Jo ennen IRA:n hyväksymistä, Joe Bidenin hallinto asetti tavoitteeksi tuottaa Yhdysvalloissa yli 11 miljardia litraa kestäviä lentopolttoaineita vuodessa vuoteen 2030 mennessä. Tämä vastaa noin 10 % Yhdysvaltojen lentoliikenteen kysynnästä. Tavoitteen saavuttaminen vaatii kymmenien miljardien investointeja, joita valtio tukee yli 4 miljardilla dollarilla. (The White House, 2021).

Myös jotkut Yhdysvaltojen osavaltiot tarjoavat verohyvityksiä. Illinoisin osavaltio on tarjonnut vuodesta 2023 alkaen 1,5 \$/gallona verohyvitystä kestävästä lentopolttoaineesta, joka on tankattu osavaltiossa. Tämänkin verohyvityksen edellytyksenä on 50 % päästövähennys (Illinois Department of Revenue, 2023). Washingtonin osavaltio kaavailee samankaltaista ratkaisua (Voegele, 2023). Kalifornian osavaltio asetti vuonna 2022 tavoitteeksi, että osavaltiossa tankatusta polttoaineesta 20 % on kestävää lentopolttoainetta vuoteen 2030 mennessä. Keskeisenä keinona tähän on osavaltion Low Carbon Fuel Standard, jonka tavoitteena on vähentää liikenteestä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Järjestelmä päivitettiin vuonna 2019 sisältämään myös kestävät lentopolttoaineet (Kalifornian osavaltio, 2022).

EU:n vastineeksi IRA:lle voidaan nähdä Green Deal Industrial Plan, jonka tavoitteena on edistää vähähiilisen teollisuuden kehitystä Euroopassa. Tämän yhteydessä on laitettu vireille Net-Zero Industry Act ja Critical Raw Materials Act. Suurin ero Yhdysvaltojen ja EU:n välillä on, että Yhdysvalloissa pääkeinona on tarjota verohelpotuksia, kun taas EU:ssa painotus on velkarahoitetuissa varoissa. (Euroopan Parlamentti, 2023b) Keskustelua ja analyysyjä näiden keinojen mahdollisista lyhyen ja pitkän tähtäimen vaikutuksista on runsaasti, eikä yksimielisiä näkemyksiä eri lähestymistapojen paremmuudesta ole. Haastatellut toimijat esittivät kuitenkin huolensa IRA:n mahdollisista kilpailukykyvaikutuksista Eurooppaan ja edelleen Suomeen lentoliikenteen ja lentopolttoainetuotannon näkökulmasta.

Ruotsi

Ruotsin hallitus on ottanut käyttöön lentopolttoaineen päästövähennysvelvoitteen vuodesta 2021 alkaen, jonka tarkoituksena on kannustaa kestävien lentopolttoaineiden käyttöön. Velvoite koskee polttoaineen jakelijoita ja velvoittaa vähentämään myytävän lentopolttoaineen hiilidioksidipäästöjä vuosittain kasvavalla määrällä, jotka on esitetty alla olevassa taulukossa 4. Lähtötaso vuonna 2021 oli 0,8 %. Mandaatti ei koske Ruotsin puolustusvoimien toimintaa. Ruotsin hallitus päätti vuonna 2023 leikata dieselin jakelovelvoitetta, mutta lentoliikenteessä velvoite on toistaiseksi säilynyt ennallaan. (Energimyndigheten, 2023)

Taulukko 4. Ruotsin lentoliikenteen päästövähennysvelvoite. (Energimyndigheten, 2023)

Vuosi	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
CO ₂ -päästövähennys	2,6 %	3,5 %	4,5 %	7,2 %	10,8 %	15,3 %	20,7 %	27 %

Norja

Norjan valtio otti ensimmäisenä maana maailmassa käyttöön lain velvoittaman kestävästä lentopolttoaineesta 0,5 % tulee olla vuosittain kestävää lentopolttoainetta. Polttoainetta voidaan myydä millä tahansa lentoasemalla, kunhan kokonaismäärä täyttyy. Velvoite koskee

kotimaista ja kansainvälistä lentoliikennettä, mutta ei Norjan puolustusvoimien lentoliikennettä. Vuosina 2020 ja 2021 myytiin kunakin vuonna noin 2,5 miljoonaa litraa kestäviä lentopolttoaineita velvoitteen täyttämiseksi. Valtaosa näistä polttoaineista oli HEFA-menetelmällä valmistettua. Mandaatti on arvioitu menestykseksi, ja tällä hetkellä arvioidaan sen nostamista 2 %:iin. Norjassa seurataan tarkasti EU:n jakeluelvoitetta, ja parhaillaan arvioidaan miten se vaikuttaa Norjan päätöksiin. (Det Kongelige Samferdselsdepartement, 2022)

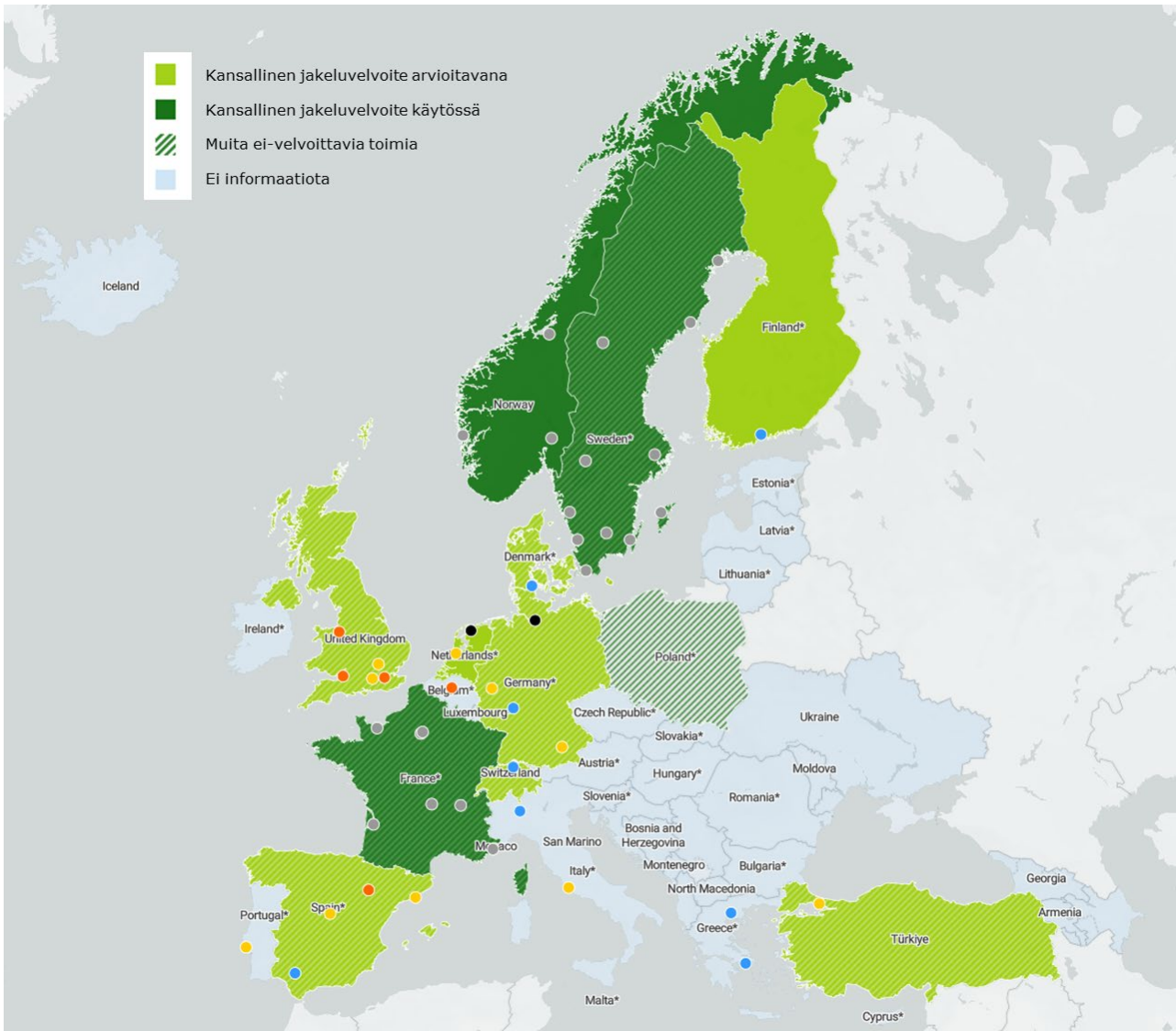
3.3.2 Suomen toimet

Suomen edellisen hallituksen hallitusohjelman mukaan Suomessa tulitisiin edistämään raskaan liikenteen ja lentoliikenteen siirtymää kestävien biopolttoaineiden käyttöön. Hallitusohjelman mukaan Suomessa tavoiteltiin lentoliikenteessä jakeluelvoitteen avulla 30 prosentin osuutta kestäville biopolttoaineille vuonna 2030. Tämä tavoite ei ole edistynyt mm. koronapandemian ja Venäjän hyökkäyssodan seurauksien myötä. Kansallisen jakeluelvoitteen vaikutuksia on tarkasteltu Valtioneuvoston selvityksessä vuonna 2020. (Valtioneuvosto, 2019)

Suomen nykyisen hallituksen hallitusohjelmassa ei ole linjattu suoraan lentoliikenteen päästöihin liittyvistä seikoista. Ohjelman mukaisesti *”Suomessa laaditaan kansallinen lentoliikennestrategia, jossa linjataan Suomen lentoliikenteen toimintaedellytysten ja kilpailukykyyn vahvistamisesta muuttuneessa maailmassa...Edistetään lentoliikenteen sähköistymistä.”* (Valtioneuvosto, 2023). Hallitusohjelmassa tavoitellaan merkittävää vetytalouden kehittymistä Suomessa, millä voisi olla vaikutuksia myös kestävien lentopolttoaineiden valmistukseen.

Suomi on sitoutunut ICAO:n ja EU:n tavoitteisiin lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Suomella ei ole ollut näistä tavoitteista erillisiä numeerisia kansallisia tavoitteita, mutta fossiilittoman liikenteen tiekarttatyössä arvioitiin mahdollisuudet vähentää kotimaan ja Suomesta lähtevän kansainvälisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjä. Valtioneuvoston periaatepäätöksen lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä (Valtioneuvosto, 2021) toimenpiteiden toteuttamisen kautta valtioneuvoston tavoitteena on vähentää kotimaan ja Suomesta lähtevän kansainvälisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjä vuoden 2018 tasosta laskettuna 15 prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja 50 prosenttia vuoteen 2045 mennessä. Kotimaan lentoliikenteen tulisi olla päästötöntä vuonna 2045. Tällöin arvioitiin, että tavoitteen saavuttaminen edellyttää kestävien lentopolttoaineiden jakeluelvoitteen käyttöönottoa. 2025 voimaan astuva ReFuelEU Aviation -asetus ei mahdollista nykytiedon valossa päällekkäisiä, kansallisia jakeluelvoitteita.

Kuvassa 5 on esitetty kansallisten jakeluelvoitteiden tilanne Euroopassa. Ajantasaiset tiedot kansallista toimista Euroopassa on löydettävissä Eurocontrolin sivuilta. (Eurocontrol, 2023)



Kuva 5. Kestävien lentopolttoaineiden kansalliset mandaatit. Kuvakaappaus elokuulta 2023. (Eurocontrol, 2023)

3.4 Lentoyhtiöallianssien toimet

Suomalaiset toimijat pitävät tärkeänä lentoyhtiöallianssien roolia lentoalan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Allianssitoiminnassa lentoyhtiöt tekevät keskenään yhteistyötä esimerkiksi reittiverkoston osalta. Lentoliikenteessä on kolme suurta lentoallianssia: oneworld, SkyTeam ja Star Alliance sekä muutamia pienempiä alliansseja. Kolmen suuren lentoyhtiöallianssin yhteistyöverkko on maailmanlaajuinen, kattaen lentoyhtiöt laajalti eri maanosista.

Lentoyhtiöallianssit ovat tehneet omia suunnitelmiaan, joilla tähdätään maailmanlaajuisesti kestävämpään lentoliikenteeseen. Alliansseista oneworld on ilmoittanut lokakuussa 2021, että 10 % koko allianssin polttoainekulutuksesta olisi kestävää lentopolttoainetta vuoteen 2030 mennessä. Huomioitavaa on, että lentoyhtiöallianssin asettamat tavoitteet saattavat olla suurempia kuin lentoyhtiöiden itsensä asettamat tavoitteet. Oneworld-allianssin vuoden 2030 tavoite kestävästä lentopolttoaineesta on myös selvästi korkeampi kuin RefuelEU Aviation -asetuksen tavoite (6 %). Sekä Sky Team että Star Alliance ovat maininneet kestävästä lentopolttoaineesta osana koko allianssin laajuisia kestävyystavoitteita mutta kumpikaan ei ole julkisesti tiedottanut tavoitteiden yksityiskohdista, vuosista tai määristä.

4 Lentoliikenteen polttoaineiden sertifiointi

Luvun keskeinen sisältö

- Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet ovat energiasisällöltään hyvin samankaltaisia fossiilisen lentopetrolin kanssa.
- Lentoliikenteen turvallisuuden varmistamiseksi lentokoneet on sertifioitu operoimaan vain määritellyillä lentopolttoaineilla.
- Kestäviä lentopolttoaineita tulee sekoittaa fossiiliseen lentopetroliin, jotta lentopolttoaineen vaatimukset voidaan täyttää.
- Tällä hetkellä kestäville lentopolttoaineille on hyväksytty yhdeksän erilaista kestävien lentopolttoaineiden tuotantoprosessia, joissa on kuvattu myös vaadittu sekoitussuhde.
- Potentiaalisimpia eli suurimman skaalautuvuuden tuotantopolkuja ovat jo käytössä oleva HEFA (vetykäsittelyt rasvahapot) sekä lähitulevaisuudessa AtJ (alkoholin konversio synteettiseksi parafiiniseksi kerosiiniksi) ja FT (biomassan kaasutus ja Fischer-Tropsch).
- 100-prosenttisen kestäväntä lentopolttoaineen käyttäminen vaatii uutta sille soveltuvaa kalustoa tai nykyisen kaluston modifikaatioita. Airbus ja Boeing ovat tuomassa markkinoille tälle soveltuvaa kalustoa vuoteen 2030 mennessä.

4.1 Vaatimukset kestäville lentopolttoaineille

Lentokoneissa käytettävien polttoaineiden tulee olla sertifioituja ja täyttää tietyjen standardien mukaiset laatuvaatimukset. Euroopassa käytetään yleisimmin Jet A-1 -luokan fossiilisia lentopolttoaineita, jotka on määritetty yhdysvaltalaisen ASTM-organisaation D1655-standardissa ("Standard Specification for Aviation Turbine Fuels"). Myös muita standardeja on olemassa – esimerkiksi Venäjällä on oma GOST 10227 -standardinsa erityisen kylmiin oloihin sopivalle lentopolttoaineelle. (ASTM, 2023a)

Teknisesti biopohjaisen kestäväntä lentopolttoaineen tulee täyttää samat kriteerit kuin fossiilisen lentopolttoaineen (Jet A/A-1). Tämä tarkoittaa suorituskykyistä polttoainetta, joka kestänee monenlaiset käyttöolosuhteet. Taulukossa 5 on kuvattu lentopolttoaineen vaatimuksia:

Taulukko 5. Jet A/A-1 teknisiä vaatimuksia. (Air Transport Action Group, 2023)

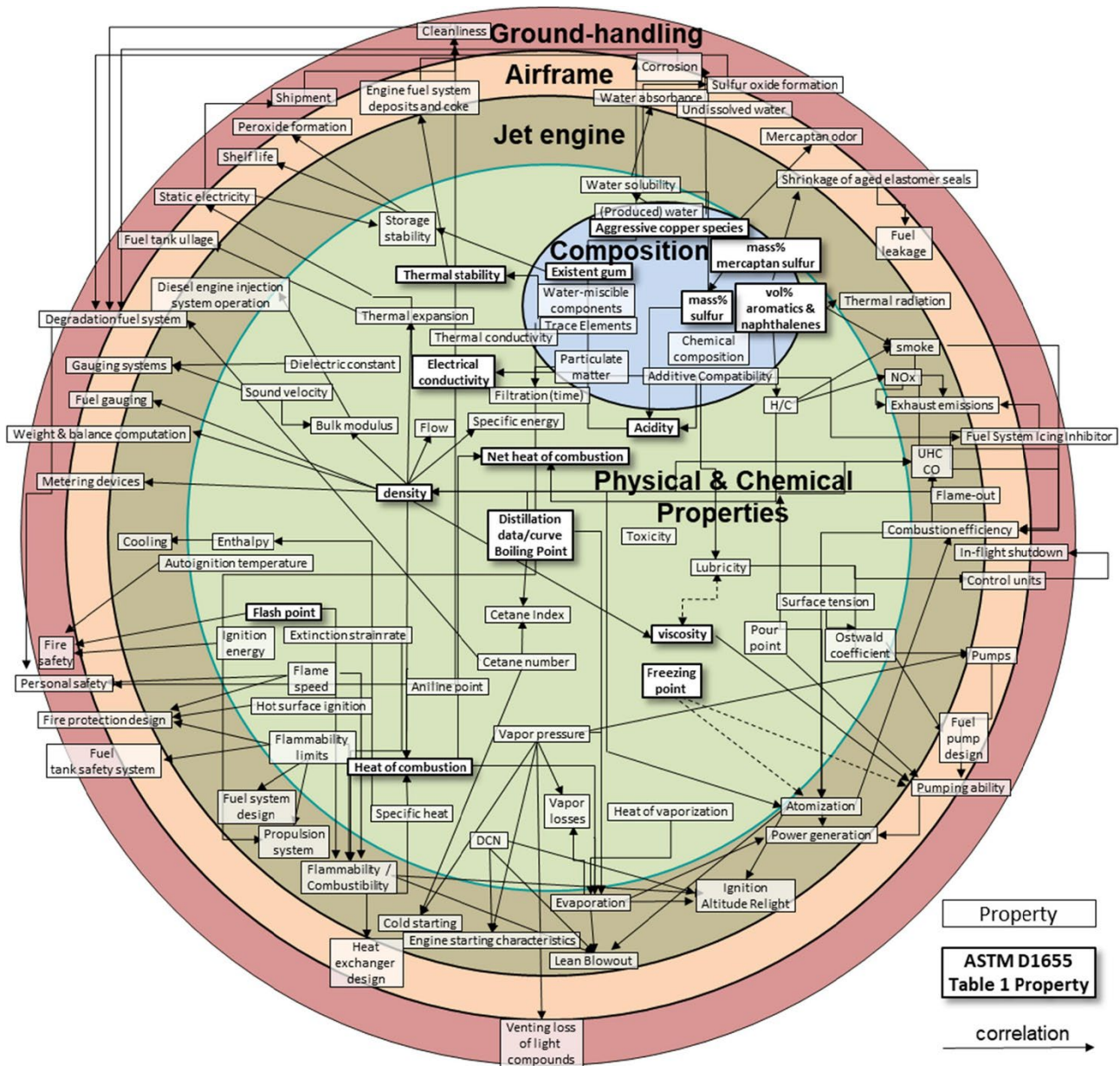
Kriteeri	Selite	Jet A-1 määrittely
Leimahduspiste	Lämpötila, jossa polttoaine syttyy moottorissa ja aiheuttaa palamisen	min 38 °C
Jäätymispiste	Lämpötila, jossa polttoaine jäätyisi	-47 °C
Palamislämpö	Energiamäärä, mikä vapautuu palamisen aikana	min 42,8 MJ/kg
Viskositeetti	Nesteen paksuus ja kyky virrata	max 8 000 mm ² /s
Rikki pitoisuus	Rikin määrä polttoaineessa	0,3 miljoonasosaa
Tiheys	Polttoaineen paino per litra	775–840 kg/m ³

Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet ovat painoon nähden energiatiheämpiä, mutta tilavuuteen nähden fossiilinen lentopetroli on hieman tiheämpää. Erot ovat kuitenkin prosentuaalisesti varsin pieniä. Muutamia esimerkkejä on havainnollistettu taulukossa 6.

Taulukko 6. Eräiden biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden energiasisällöt verrattuna fossiiliseen lentopetroliin. (EU Direktiivi 2018/2001)

Polttoaine	Energiasisältö painon mukaan	Energiasisältö tilavuuden mukaan
Fossiilinen lentopetroli	43,1 MJ/kg	34,7 MJ/l
Vetykäsitelty (lämpökemiallisesti vedyllä käsitelty) biomassasta peräisin oleva öljy, jota käytetään korvaamaan lentopetroli	44 MJ/kg	34 MJ/l
Yhteisesti käsitelty (käsitellään jalostamossa yhtä aikaa fossiilisten polttoaineiden kanssa) biomassasta tai pyrolysoidusta biomassasta peräisin oleva öljy, jota käytetään korvaamaan lentopetroli	44 MJ/kg	33 MJ/l
Fischer–Tropsch-lentopetroli (biomassasta valmistettu synteettinen hiilivety tai synteettinen hiilivetyseos, jota käytetään korvaamaan lentopetroli)	44 MJ/kg	33 MJ/l

Kokonaisuutena lentopolttoaineiden eri ominaisuuksien väliset riippuvuudet ja vaikutusketjut ovat huomattavan monimutkaisia. EU:n rahoittamassa JETSCREEN-hankkeessa on muodostettu oheinen englanninkielinen kuva 6 havainnollistamaan näitä vaikutusketjuja.



Kuva 6. Lentopolttoaineiden ominaisuuksien riippuvuuksia ja vaikutusketjuja. Kuva havainnollistaa teeman kompleksisuutta, mikä heijastuu myös kestävien lentopolttoaineiden sertifiointiin. (Euroopan komissio, 2020)

Lentopolttoaineita koskevat standardit ovat velvoittavia myös siksi, että lentokoneiden tyyppihyväksynnässä yhtenä ehtona on tiettyjen standardien mukaisten lentopolttoaineiden käyttö. Lentokoneella ei siis saa lentää, mikäli siihen on tankattu muunlaista kuin tyyppihyväksynnän dokumenteissa mainittua polttoainetta. Näin varmistetaan osaltaan lentoliikenteen turvallisuus. Esimerkiksi Airbus A320 -lentokone on tyyppihyväksytty operoitavaksi 10–15 eri standardin mukaisilla polttoaineilla, riippuen koneessa käytettävien moottoreiden tyypistä (EASA, 2023b).

Jos kestävä lentopolttoaine on sellaisenaan tai sekoitteena jonkin lentokoneen tyyppihyväksyntätodistuksessa mainitun polttoainestandardin mukaista, sitä saa käyttää lentokoneessa. Mikäli sen sijaan haluttaisiin kehittää täysin uusi standardi kestäville lentopolttoaineille, edellyttäisi tämän uuden standardin mukaisten polttoaineiden käyttö sen sijaan tyyppihyväksynnän päivytystä kaikille lentokonemalleille, joissa näitä uusia polttoaineita haluttaisiin käyttää.

Edellä kuvattujen syiden vuoksi lentoliikenteeseen tarkoitettujen kestävien lentopolttoaineiden kehittäminen on monimutkainen prosessi. Tätä varten ASTM on kehittänyt uudet standardit – ASTM D4054 uusien lentopolttoaineiden arviointiprosessia varten (”Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives”) ja ASTM D7566 uusien lentopolttoaineiden hyväksyntää varten (”Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons”). (ASTM, 2023b; ASTM, 2022)

D7566-standardin mukaan hyväksytyjen kestävien lentopolttoaineiden ja niiden tuotantomenetelmien tulkitaan vertautuvan D1655-standardin mukaisiin fossiilisiin polttoaineisiin. Raportin kirjoittamisen aikaan yhtäkään täysin biopohjaista lentopolttoainetta ei kuitenkaan ole hyväksytty lentoliikennekäyttöön, vaan biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita tulee sekoittaa fossiiliseen lentopetroltiin vaihtelevissa suhteissa. Tällä varmistetaan lentoliikenteen turvallisuus, ja tämän taustasyihin perehdytään työn myöhemmissä luvuissa.

Kuvan 7 vaihe 2 eli ASTM D4054, uusien lentopolttoaineiden hyväksyntäprosessi lentoliikennekäyttöön etenee yksinkertaistaen seuraavasti:

1. Ensimmäinen seulonta – tutkitaan polttoaineen teknisiä ja kemiallisia ominaisuuksia sekä arvioidaan sen soveltuvuutta lentoliikennekäyttöön.
2. Jatkotestaus – tutkitaan, soveltuuko polttoaine käytettäväksi lentokoneen moottorissa
3. Yhdysvaltain ilmailuviranomainen FAA arvioi aiempien vaiheiden tulokset ja tämän jälkeen ASTM päättää, täyttääkö polttoaine D4054-standardin vaatimukset. Päätös tehdään äänestämällä ja äänestystuloksen tulee olla yksimielinen.



Kuva 7. Kestävän lentopolttoaineen sertifiointi: muokattu lähteestä (CAAFI, 2023).

Jos D7566-standardin mukaisesti hyväksytty lentopolttoaine tulisi hyväksyttävä uudelleen, noudatetaan uudessa hyväksynnässä suoraan D1655-standardin ehtoja. Tämä näkyy myös seuraavan alaluvun taulukossa sertifioiduista tuotantoprosesseista.

4.2 Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden sertifioidut tuotantoprosessit

D7566- tai D1655-standardien mukaisina on hyväksytty yhteensä yhdeksän erilaista kestävien lentopolttoaineiden tuotantoprosessia määriteltyine sekoitussuhteineen. Näitä on kuvattu tarkemmin taulukossa 7. Ensimmäisen sarake kuvaa sitä, mistä kohdasta standardia tuotantoprosessi löytyy. Teknologian kypsyysaste on alan arvio teknologian kypsyydestä, numeron yhdeksän ollessa täysin teknologisesti valmis tuote ja numeron yksi laboratoriotuote.

Taulukko 7. D7566- tai D1655-standardien mukaisina on hyväksytty yhteensä yhdeksän erilaista kestävien lentopolttoaineiden tuotantoprosessia määritellyine sekoitussuhteineen. (CAAFI, 2023)

ASTM D7566	Prosessi	Hyväksymis-aika	Sekoitus-suhteen maksimi	Raaka-aineet	Teknoloo-gian kypsyys-aste
Liite A1	Fischer-Tropsch (FT) synteettinen parafiininen kerosiini (FT SPK)	2009	50 %	Selluloosapitoinen biomassa ja kiinteä yhdyskuntajäte	7–8
Liite A2	Vetykäsitellyt rasvahapot (HEFA SPK)	2011	50 %	Lipidit (kuten öljyt ja rasvat)	8–9
Liite A3	Fermentoitujen sokerien käsittely isoparafiiniseksi kerosiiniksi (HFS-SIP)	2014	10 %	Sokerit	7–8 tai 5
Liite A4	Fischer-Tropsch (FT) synteettinen parafiininen kerosiini (FT SPK) aromaateilla (FT-SPK/A)	2015	50 %	Selluloosapitoinen biomassa ja kiinteä yhdyskuntajäte	6–7
Liite A5	Alkoholin konversio synteettiseksi parafiiniseksi kerosiiniksi (ATJ-SPK)	2016 isobutanoli, 2018 etanoli	50 %	Etanoli ja isobutanoli, joita voidaan tehdä tärkkelyksestä, sokereista, selluloosapitoisesta biomassasta, fermentaation jätekaasuista	7–8
Liite A6	Katalyyttinen hydrotermolyysi (CHJ)	2019	50 %	Lipidit (kuten öljyt ja rasvat)	6
Liite A7	Synteettinen parafiininen kerosiini vetykäsitellyistä hiilivedyistä ja rasvahapoista (HHC-SPK or HC-HEFA-SPK)	2020	10 %	Biopohjaiset hiilivedyt (tällä hetkellä tehdään vain levästä), rasvahappoesterit, vapaat rasvahapot	5

ASTM D1655	Prosessi	Hyväksymisaika	Sekoitusuhteen maksimi	Raaka-aineet	Teknologi an kypsyyssaste
Liite A1	Rasvojen yhteiskäsittely perinteisessä öljynjalostamossa	2018	5 %	Lipidit (kasviöljyt ja eläinrasvat)	-
Liite A2	Fischer-Tropsch-hiilivetyjen yhteiskäsittely perinteisessä jalostamossa	2020	5 %	Fischer-Tropsch bioraaka-öljy (jalostamaton hiilivetytuote FT-reaktorista)	-

Tällä hetkellä ASTM D4054 päteväntiprosessissa on useita polttoaineita. Ajantasaisen listan näistä voi löytää CAAFI:n verkkosivuilta, joka on ASTM:ää tukeva sertifiointiorganisaatio. Vuoden 2023 aikana odotetaan vielä tuoreinta hyväksyntää lisättävälle liitteelle A8, jonka on toimittanut Swedish Biofuels AB. Uuden lentopolttoaineen tuotantoprosessin nimi on ATJ-SKA eli liitteen 5 kaltainen alkoholin konversio synteettiseksi parafiiniseksi kerosiiniksi, mutta polttoaineeseen lisätään aromaattisia aineita. Tuotantoprosessissa voidaan käyttää useita raaka-aineita ja tuotanto sisältää myös aromaattisten aineiden tuotannon, minkä määrää voidaan varioida. Sekoitussuhde tulee olemaan ensi alkuun 50 %, mutta tavoitteena on 100 % käyttö. (Cision, 2023)

Oleellinen näkökulma kestävien lentopolttoaineiden sertifiointiin on polttoaineen laatu. Lentopolttoaineen tulee olla tasalaatuista eikä polttoaineen laatu saa muuttua esimerkiksi kuljetuksen aikana. Nesteen mukaan ASTM D1655-standardi ei ota kantaa polttoaineiden tuotannon laadunvalvontaan tai käsittelyyn tuotannon jälkeen, mutta näihin tarkoituksiin on olemassa muita standardeja, kuten ICAO 9977, EI/JIG Standard 1530, JIG 1, JIG 2, API 1543, API 1595 sekä ATA-103. Neste myös toteaa, että tuotetusta kestävästä lentopolttoaineesta otetaan näytteitä tuotanto- ja toimitusketjun eri vaiheissa, ja että näytteiden tutkitaan olevan ASTM D1655-standardin mukaisia sertifioidun testauslaitosten toimesta. (Neste, 2019). Lentopolttoaineiden tuotanto- ja toimitusketju ei kuitenkaan ole viranomaisten sertifiointin piirissä, toisin kuin useat muut lentoliikenteen toiminnot.

4.3 Potentiaalisimmat biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotantoprosessit

Seuraavaksi on esitelty kolme potentiaalisinta tuotantoprosessia, joiden on arvioitu kirjallisuuden ja toimijahaastattelujen perusteella olevan keskeisiä menetelmiä tulevaisuuden lentopolttoaineiden valmistuksessa.

Vetykäsitteltyt rasvahapot (HEFA)

Biopohjaisista kestävänt lentopolttoaineen tuotantoprosesseista selvästi kypsintä teknologiaa edustaa HEFA. Tällä hetkellä prosessin pääraaka-aineita ovat käytetyt paistorasvat sekä eläinrasvat. Potentiaalia on myös uudenaissa varta vasten lentopolttoaineiden tuotantoa varten kasvatetuissa kasveissa, kuten jathropa ja camelina. Näitä öljyrikkaita kasveja voidaan viljellä peittokasveina eli muun tuotannon välillä. Viljelyyn ei siis tarvita uutta maata, vaan nykyisen viljelyalan käytön intensiteettiä pystytään kasvattamaan. Potentiaalia näiden kasvien viljelylle on erityisesti Amerikan mantereilla. (EASA, 2023a)

Prosessissa raaka-aine konvertoidaan vedyn avulla hapen irrottamiseksi, josta saadaan hiilivetypolttoaineen komponentteja. Prosessi on sama kuin uusiutuvan dieselin (HVO) valmistuksessa, mutta sisältää lisäksi isomeroituvaiheen, joka alentaa polttoaineen jäätymispistettä.

HEFA:n tuotanto on kaikista biopohjaisista kestävästä lentopolttoaineista energiatehokkainta (76 % energian konversion hyötysuhde) (Johnson Matthey, 2020). HEFA on tällä hetkellä ainoa kaupallisen lentoliikenteen käytössä oleva biopohjainen kestävä lentopolttoaine. Kestävien raaka-aineiden saatavuus on kuitenkin rajallista ja HEFA-polttoaineista kilpailevat myös muut sektorit, kuten tieliikenne.

Alkoholin konversio synteettiseksi parafiiniseksi kerosiiniksi (AtJ)

AtJ-menetelmä muuttaa alkoholit lentopolttoaineeksi hyödyntäen seuraavia reaktioita: dehydraatio, oligomeroituminen, hydraus, isomerointi ja tislauk. Alkoholi voidaan tuottaa

perinteisesti fermentoimalla sokeri- ja tärkkelyskasveja (esim. maissi, sokeriruoko, vehnä) tai kehittynein menetelmin fermentoimalla prosessoituja lignoselluloosapitoisia raaka-aineita (maa- ja metsätalouden sivuvirrat) (EASA, 2022). Erityisesti jälkimmäisenä mainituissa on suuri ja kestävä skaalautumispotentiaali. Tuotantomenetelmällä tehtyjä kestäviä lentopolttoaineita odotetaan markkinoille lähivuosina.

Biomassan kaasutus ja Fischer-Tropsch (FT)

Prosessissa biokaasua, tai joissain tapauksissa synteettistä kaasua, saadaan raaka-aineen kaasutuksesta ja käsittelystä Fischer-Tropsch-reaktorissa. Prosessissa voidaan hyödyntää samankaltaisia raaka-aineita kuin AtJ-prosessissa, mutta myös kiinteää yhdyskuntajätettä. Menetelmän tuotanto- ja päästövähennyspotentiaali on suuri, mutta se ei ole vielä kaupallisella tasolla EU:ssa. Prosessissa syntyy monia tuotteita, kuten teollisuusbensiniä, bensiiniä, dieseliä ja lentopetrolia sekä muita arvokkaita sivutuotteita. (AFRY, 2020; EASA, 2023a)

4.4 100-prosenttisen kestävä lentopolttoaineen käyttäminen lentokalustossa

4.4.1 100-prosenttinen kestävä lentopolttoaine aromaattisilla hiilivedyillä ja ilman niitä

Kestävien lentopolttoaineiden sääntely ei vielä salli 100-prosenttisen kestävä lentopolttoaineen käyttöä kaupallisessa lentoliikenteessä. Tällä hetkellä ei ole olemassa kestävä Jet A/A-1-lentopolttoainetta, vaan kyse on kestävästä sekoitekomponentista, joka on sekoitettava määritellyllä suhteella fossiilisen Jet A/A-1-polttoainekomponentin kanssa. Kun tämä sekoite tehdään, on kyse Jet A/A-1 polttoaineesta. Kaikki tässä luvussa mainitut sertifioidut tuotantoprosessit ja niiden tuottamat kestävät sekoitekomponentit (HEFA-SPK, FT-SKA yms.) ovat sekoitettuna fossiiliseen lentopetroltiin samankaltaista tuotetta kuin Jet A/A-1 lentopolttoaine. Korkein sallittu kestävien lentopolttoaineiden sekoitussuhde on tällä hetkellä 50 %. (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022)

Fossiilinen lentopetroli sisältää aromaattisia hiilivetyjä, sillä raakaöljy, josta polttoaine valmistetaan, sisältää näitä aineita. Nykyisin valmistettavissa kestävässä lentopolttoaineissa on vähän tai ei lainkaan aromaattisia hiilivetyjä. Lentopolttoainestandardit asettavat aromaattisten aineiden enimmäismääräksi 25 tilavuusprosenttia ja vähimmäismääräksi kahdeksan prosenttia. Kestäviä lentopolttoaineita sekoitetaan tällä hetkellä fossiilisen lentopetrolin kanssa, jotta tämä minimiraja saavutetaan. (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022)

Kahdeksan prosentin vähimmäisvaatimusta aromaattisten aineiden pitoisuudelle sovelletaan turvallisuussyistä; kun nykyisen kaluston polttoainejärjestelmän elastomeeritiivisteet altistuvat aromaattisille hiilivedyille, ne turpoavat. Jos polttoainejärjestelmässä ei ole aromaattisia aineita sisältävää polttoainetta, elastomeeritiivisteet kutistuvat takaisin alkuperäisiin mittoihinsa. Koska tiivisteet ovat muotoutuneet turvonneeseen muotoonsa, voi tästä kutistumisesta seurata polttoainevuotoja. Polttoainevuoto on aina vakava vaaratilanne liikenneilmailussa. Samasta syystä pitkäaikaisessa varastoinnissa lentokoneita ei saa seisottaa polttoainesäiliöt täysin tyhjänä. (Traficom, 2023)

Sama ilmiö seuraa, jos nykyisen kaltaisessa polttoainejärjestelmässä käytetään 100-prosentista kestävä lentopolttoainetta, joka ei sisällä aromaattisia aineita. Tällöin on olemassa riski polttoainevuodoille. Tämän on yksi syistä, minkä vuoksi yli 50 % kestävien lentopolttoaineiden sekoitussuhteet vaativat lentokoneiden erillistä sertifiointia niiden käyttöön. (Traficom, 2023)

Airbusin näkemykset tulevaisuudesta

Airbusin tuoreimpien arvioiden mukaan elastomeeritiivisteet ovat kuitenkin vain pieni osa ongelmaa. Lentokonevalmistajan mukaan tiivisteet voidaan vaihtaa nykyisiin koneisiin melko helposti ilman suurempia teknisiä ongelmia. Jos alalla halutaan käyttää 100-prosenttisiä kestäviä lentopolttoaineita, jotka eivät sisällä aromaattisia hiilivetyjä, myös muita tärkeitä näkökohtia, kuten polttoaineen mittausjärjestelmän tarkkuus, moottorin ja apuvoimalaitteen toimintakyky ja uudelleenkäynnistyskyky, on tarkasteltava huolellisesti, ja ne edellyttävät mahdollisesti muutoksia lentokoneeseen. (Airbus, 2023)

Airbus arvioi parhaillaan tarvittavia muutoksia tutkimusprojektien puitteissa. Kaikki mahdolliset muutokset on sertifioitava EASA:n vaatimusten mukaisesti. Tällä hetkellä muutuskustannuksille ei ole olemassa kustannusarviota, sillä teknisen toteutuksen määrittäminen on vielä kesken. (Airbus, 2023)




Airbus tekee yhteistyötä lentoalan ja kestävien lentopolttoaineiden tuottajien kanssa mahdollistaakseen ennen tämän vuosikymmenen loppua 100-prosenttisen kestävästä lentopolttoaineesta, joka sisältää aromaattisia aineita, käytön koko lentävässä laivastossa ilman muutoksia. Tällöin olisi kyse 100-prosenttisestä drop-in kestävästä lentopolttoaineesta. Kaikki olemassa oleva kalusto ja infrastruktuuri pystyisi käyttämään 100-prosenttistä kestävästä lentopolttoainetta, mikäli se sisältää aromaattisia aineita. (Airbus, 2023)










































Samaan aikaan Airbus tutkii tutkimusprojektien puitteissa teknistä ja taloudellista toteutettavuutta mahdollistaa uusien lentokoneiden käyttöä 100-prosenttisellä kestäväällä lentopolttoaineella ilman aromaattisia aineita. Jos Airbus muuttaa ja sertifioi tuotteitaan yhteensopiviksi 100-prosenttisen kestävästä lentopolttoaineesta, joka ei sisällä aromaattisia aineita, ne pysyvät sertifioituina toimimaan myös nykyisillä aromaattisilla lentopolttoaineilla. Tällaiset sertifioidut ilma-alukset vaatisivat oman jakelu- ja varastointi-infrastruktuurinsa. (Airbus, 2023)

Säätelyn näkökulma

Drop-in-termillä ei viitata vain siihen, että polttoaine sopii sellaisenaan tiettyyn moottoriin tai ilma-alukseen, vaan kyse on säätelyn näkökulmasta koko laivaston ja infrastruktuurin laajuudesta yhteensopivuudesta. Tulevaisuudessa on mahdollista, että otettaisiin käyttöön kaksi erilaista järjestelmää. Toinen järjestelmä nojaisi nykyiseen Jet A/A-1-säätelyyn, jolloin kaikki tuotettavat kestävät lentopolttoaineet tai niiden sekoitteet olisivat säätelyn mukaisia; käytännössä ne sisältäisivät vähintään 8 % aromaattisia aineita. Toinen järjestelmä puolestaan olisi joustavampi, ja sallisi myös vähäaromaattiset lentopolttoaineet. Taulukossa 8 ja selitteissä on havainnollistettu tätä käyttäen CAAFI:n punaiset ja vihreät omenat -vertausta. Punaisella omenalla viitataan Jet A/A-1-standardien mukaiseen lentopolttoaineeseen ja vihreällä vähäaromaattisiin lentopolttoaineisiin. Keltaisella banaanilla viitataan tuotteeseen, joka ei täytä 100-prosenttisena käytettynä Jet A/A-1-standardeja. (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022)



Taulukko 8. 100-prosenttisten kestävien lentopolttoaineiden drop-in ominaisuuksien erojen kuvaus. Muokattu lähteestä: (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022), TBD = arvioitavana

Tuotantoprosessit, jotka voivat tuottaa 100-prosenttistä tuotetta, joka on:				
	Identtinen Jet A/A-1-lentopolttoaineen kanssa – laivaston ja infran laajuinen yhteensopivuus.			
	Lähes samanlainen kuin Jet A/A-1-lentopolttoaine mutta ei identtinen – ei laivaston ja infran laajuista yhteensopivuutta.			
	Ei mitään Jet A/A-1-lentopolttoaineen kaltaista – ei käyttökelpoista lentopolttoainetta			

Tuotantoprosessi	Sertifioitu	Sekoiteraja	Tulevaisuuden 100% Drop-In
FT-SPK		50 % 	EI 
HEFA-SPK		50 % 	EI 
HFS-SIP		10 % 	EI 
FT-SKA		50 % 	KYLLÄ 
ATJ-SPK		50 % 	EI  ja 
CHJ		50 % 	KYLLÄ 
HHC-SPK		10 % 	EI 
ATJ-SKA		50 % 	KYLLÄ 
HEFA-SKA		50 % 	KYLLÄ 
HDO-SAK		25 % 	EI 
CPK-0		50 % 	TBD  tai 
HTL		50 % 	KYLLÄ 
HFP-HEFA-SPK		15-30 % (TBD) 	EI 


Keskeinen havainto on, että sekoitteena kaikkien tuotantoprosessien tuotteet voivat olla fossiilisen lentopetrolin (Jet A/A-1) kanssa identtistä lentopolttoainetta. Esimerkiksi HFS-SIP ei soveltuisi lentopetroliksi sellaisenaan (keltainen banaani), vaan sitä pitää sekoittaa toisen kestäväntä lentopolttoaineen kanssa, jotta standardien vaatimukset täyttyvät. 100-prosenttisena käytettynä vain osa prosesseista tuottaa käyttökelpoisia ja drop-in-vaihtoehtoja. Näitä ovat mm. lähiaikoina hyväksyttävä ATJ-SKA, joka sisältää aromaattisia aineita. Drop-in-vaatimus erottaa "punaiset omenat vihreistä" ja vaikuttaa moniin eri tekijöihin, joita on kuvattu taulukossa 9. (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022)

Taulukko 9. 100-prosenttisten kestävien lentopolttoaineiden erot. Muokattu lähteestä: (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022)

	100-prosenttinen kestävä drop-in lentopolttoaine, joka sisältää aromaattisia aineita  Identtinen Jet A/A-1-lentopolttoaineen kanssa	100-prosenttinen kestävä lentopolttoaine, ei drop-in, joka ei sisällä aromaattisia aineita  Lähes samanlainen kuin Jet A/A-1-lentopolttoaine mutta ei identtinen
Koostumus	Täysin soveltuva lentopetroli (Jet A/A-1), mm. vähintään 8 % aromaattisia aineita	Lentopetrolin (Jet A/A-1) kaltainen lentopolttoaine, mm. pienemmät aromaattisten aineiden pitoisuudet
Soveltuvuus	Laivastonlaajuinen drop-in	Vain nimetyt lentokoneet/moottorit
Esimerkit tuotantoprosesseista	CHJ (D7566 liite A6), FT-SKA (D7566 liite A4), tulevaisuus: ATJ-SKA, HEFA-SKA, sekoitekomponenttien sekoittaminen	FT-SPK (D7566 liite A1) HEFA-SPK (D7566 liite A2) ATJ-SPK (D7566 liite A5) tietyt tyypit
Sertifiointi	ASTM D7566	Tarve uudelle standardille
Infrastruktuuri	Ei vaikutuksia	Vaaditaan erillinen toimitusketju/käsittely/varastointi

Tulevaisuuden kannalta on siis vielä avoinna, millaista on 100-prosenttisen ei-drop-in-polttoaineiden käyttö (vihreä omena). Regulaation näkökulmasta fossiilisen lentopetrolin kanssa täysin identtiset kestävät drop-in lentopolttoaineet ovat ”helpompi” vaihtoehto. Ilmastovaikutusten näkökulmasta kestävät polttoaineet, jotka eivät sisällä aromaattisia aineita, ovat parempi vaihtoehto. (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022). Vaihtoehtojen mahdollisuuksia ja haasteita on kuvattu taulukossa 10.

Taulukko 10. Drop-in ja ei-drop-in kestävien lentopolttoaineiden analyysi. (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022)

	100-prosenttinen kestävä drop-in lentopolttoaine, joka sisältää aromaattisia aineita 	100-prosenttinen kestävä lentopolttoaine, ei drop-in, joka ei sisällä aromaattisia aineita 
Mahdollisuudet	<ul style="list-style-type: none"> Täyttää polttoainestandardien vaatimukset Sopii nykyiseen kalustoon ja infraan 	<ul style="list-style-type: none"> Pienemmät pienhiukkaspäästöt ja tätä kautta pienemmät ilmastovaikutukset, koska ei aromaattisia aineita Polttamisen kannalta suurempi energiasisältö Saatavuus
Haasteet	<ul style="list-style-type: none"> Suuremmat ilmastovaikutukset, koska 	<ul style="list-style-type: none"> Ei täytä sellaisenaan polttoainestandardeja

<ul style="list-style-type: none">• polttoaine sisältää aromaattisia aineita• Moni tuotantoprosesseista vielä sertifioidumatta	<ul style="list-style-type: none">• Yhteensopiva vain osan kalustosta kanssa• Tarvitaan erillinen infrastruktuuri• Tarvitaan uusi standardi• Väärää polttoainetta voi mennä väärään lentokoneeseen – turvallisuusriski, ”vrt. bensiiniä dieselautoon”
---	--

ASTM:n työryhmät valmistelevat parhaillaan sääntelyä sekä 100-prosenttisille kestäville drop-in-lentopolttoaineille, että kestäville lentopolttoaineille, jotka eivät ole drop-in-polttoaineita. (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022)

Pohdittavana on siis kaksi päävaihtoehtoa

1. Sallitaan 100-prosenttiset ei-drop-in-polttoaineet ja tehdään tarvittavat toimet infran, regulaation ja lentokaluston osalta, jotta tämä mahdollistuu.
2. Sallitaan vain 100-prosenttiset drop-in-polttoaineet ja hyväksytään se seikka, että ilmastovaikutukset ovat vaihtoehtoa suuremmat.

ASTM arvioi myös muita vaihtoehtoja (Gurhan Andac, Stephen Kramer, 2022)

- Pysytään drop-in-vaihtoehdossa, mutta parannetaan polttoaineen ominaisuuksia verrattuna fossiiliseen lentopetrolisiin: ~8 % aromaattisia aineita vs. ~17 % fossiilisessa lentopetrolissa nykyään. Mahdollisuus jopa pienempään prosenttiin, jos todellinen turvallinen raja saadaan määritettyä. Lisäksi voidaan poistaa/rajoittaa tietyntyyppiset aromaattiset aineet (esim. ei/vähän naftaleeneja).
- Tuetaan uusia tuotantoprosesseja, jotka eivät sisällä aromaattisia aineita, mutta jotka voisivat olla 100-prosenttisenä drop-in-soveltuvia. Tällä hetkellä yksi tuotantopolku arvioitavana.
- Tuetaan katalyyttiparannuksia, jotka mahdollistaisivat parafiinit ja aromaattiset aineet jo hyväksytyissä tuotantoprosesseissa – esim. HEFA → HEFA-SKA, joka on jo kehitteillä.

Riippumatta valinnoista, kestävillä lentopolttoaineilla voidaan vähentää merkittävästi lentoliikenteen ilmastovaikutusta. Valinnoissa on huomioitava turvallisuuden näkökulmat sekä tarvittava uusi infrastruktuuri ja standardit.

ReFuelEU Aviation -asetuksen minimivaatimus nousee yli nykyisen 50 % sekoitussuhteen maksimin vuonna 2050, joten siihen mennessä asiat on sääntelyssä ratkaistava. Yksi vaihtoehto on, että nykyinen laivasto jatkaa 50 % sekoitussuhteen käyttämistä, ja vain osa uudesta kalustosta käyttää 100-prosenttistä kestävästä lentopolttoainetta. Tällöin 70 % osuus kokonaiskulutuksesta voidaan saavuttaa, vaikka osa koneista joutuisi yhä käyttämään 50 % fossiilista polttoainetta.

4.4.2 Testilennot 100-prosenttisellä kestäväällä lentopolttoaineella

100-prosenttisellä kestäväällä lentopolttoaineella on tehty maailmalla jo monia testilentoja. Testilentojen olosuhteet vaihtelevat, sillä osassa testilentoja 100-prosenttista kestävää lentopolttoainetta on käytetty vain toisessa moottorissa, osassa useammassa moottoreissa. Pilotoinnilla pyritään tutkimaan kuinka polttoainejärjestelmä ja moottorit toimivat vähäaromaattisilla lentopolttoaineilla erilaisissa olosuhteissa. Testien tavoitteena on löytää ratkaisut turvalliseen liikennöintiin 100-prosenttisillä kestäväillä lentopolttoaineilla.

Airbus on testannut useita lentokoneitaan 100-prosenttisillä kestäväillä lentopolttoaineilla. Näitä koelentoja ja niihin liittyviä tietoja on kuvattu oheisessa kuvassa 8. Testeissä on käytetty HEFA-lentopolttoaineita.

	A319neo	A350	A380
Projektin nimi	Volcan	ECLIF3	MSN001 future tech testbed
Ensilento	Lokakuu 2021	Marraskuu 2021	Maaliskuu 2022
Moottori	CFM LEAP-1A	Trent XWB	Trent 900
Polttoaineen valmistaja	TotalEnergies	Neste	TotalEnergies
Kumppanit	Safran, ONERA, the French Ministry of Transports, Dassault Aviation	Rolls-Royce, DLR, NRC Canada, University of Manchester	Rolls-Royce, Pratt & Whitney

Kuva 8. Esimerkkejä Airbusin tekemistä koelentoista 100-prosenttisillä kestäväillä lentopolttoaineilla. Kuva Airbus.

Marraskuussa 2022 Airbus ja The Royal Airforce testasivat 100-prosenttista kestävää lentopolttoainetta molemmissa A330MRTT-lentokoneen moottoreissa (Airbus, 2022). Käytettävä polttoaine oli HEFA-lentopolttoainetta. Virgin Atlantin ja Rolls Roycen tavoitteena on lentää maailman ensimmäinen lento Atlantin yli 100-prosenttisellä kestäväällä lentopolttoaineella marraskuussa 2023. Lennolla tullaan käyttämään kestävän lentopolttoaineen sekoitetta, josta 88 % on HEFA-lentopolttoainetta ja 12 % on synteettistä aromaattista kerosiinia (SAK). Tämän sekoitteen avulla saadaan 12 % aromaattisten hiilivetyjen pitoisuus. (Virgin Atlantic, 2023)

Myös alueellisella lentokoneella tehtiin Braathensin ja Nesteen yhteistyössä vuonna 2022 ATR 72-600 prototyyppillä koelento, joka käytti toisessa moottorissa 100-prosenttista HEFA-lentopolttoainetta ja toisessa 50 % sekoitetta. Tavoitteena on, että konetyyppi saataisiin sertifioitua 100-prosenttiselle kestäväälle lentopolttoaineelle vuoteen 2025 mennessä. Tämä olisi konetyyppi, joka siis sallisi vähäaromaattiset kestävät lentopolttoaineet. (Neste, 2022)

5 Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotanto

Luvun keskeinen sisältö

- Biopolttoaineiden raaka-aineet jaetaan neljään eri sukupolveen. Kestävillä lentopolttoaineille soveltuvia ovat toisen, kolmannen ja neljännen sukupolven raaka-aineet.
- HEFA-polttoaineiden raaka-aineiden, käytetty paistorasva ja eläinrasva, saatavuus on melko rajallista. Uudet peittokasvit tulevat laajentamaan raaka-ainepoolia.
- AtJ- ja FT-polttoaineet ovat huomattavasti skaalautuvampia. Niitä voidaan valmistaa maa- ja metsätalouden sivuvirroista sekä yhdyskuntajätteen bio-osuudesta.
- EU:ssa on tutkimusten mukaan todennäköisesti riittävästi kestävästi tuotettavaa biomassaa lentoalan tarpeisiin.
- Suurimmat skaalautumisen haasteet liittyvät tuotantolaitosten ja toimitusketjujen puutteeseen sekä raaka-aineiden kaupallistamiseen ja hintoihin.
- Tuotannon ennustetaan kasvavan merkittävästi veloitteiden seurauksena.
- Suomalaisista toimijoista Neste, St1 ja UPM joko tuottavat tai suunnittelevat tuottavansa biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita. Vain Neste tuottaa tällä hetkellä kestäviä lentopolttoaineita Suomessa.

5.1 Lentoliikenteen biopolttoaineiden raaka-aineet

Lentämisen biopolttoaineita voidaan valmistaa laajasta kirjosta raaka-aineita. Liikenteen biopolttoaineet voidaan jakaa neljään eri sukupolveen, joista muutamia on kuvattu taulukossa 11. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineita ei luokitella kestäviin lentopolttoaineisiin, sillä niistä valmistetut polttoaineet kilpailevat mm. ruuantuotannon kanssa samoista maa-alueista.

Taulukko 11. Biopolttoaineiden raaka-aineiden sukupolvet. (Doliente SS, Narayan A, Tapia JFD, Samsatli NJ, Zhao Y and Samsatli S, 2020)

Sukupolvi	Biopolttoaineiden raaka-aineet	Kommentti
1.	<p>Syömiskelpoiset raaka-aineet</p> <ul style="list-style-type: none"> • öljysiemenkasvit: camelina, öljypalmu, rapsi, soijapapu, auringonkukka, salicornia • sokeri ja tärkkelyspitoiset kasvit: maissi, vehnä, sokeriruoko, sokerijuurikas 	Käytössä vain tieliikenteessä, ei lentoliikenteessä.
2.	<p>Syömäkeltottomat raaka-aineet</p> <ul style="list-style-type: none"> • ruoka- ja yhdyskuntajätteet: käytetty paistorasva, eläinrasvat, kiinteän yhdyskuntajätteen biogeeninen jae • öljysiementen energiakasvit: jatropha, risiini • ruohoenergiakasvit: ruoho, miscanthus, napier ruohopuu • energiakasvit: poppeli, paju, eukalyptus • maa- ja metsätalouden tähteet: maissiruoko, sokeriruoko, bagassi, puunkorjuu-/jalostusjätteet 	Ruoka- ja yhdyskuntajätteistä valmistetut polttoaineet ovat EU-regulaatiossa "biopolttoaineita" ja muut listalla olevat "kehittyneitä biopolttoaineita". Kehittyneillä biopolttoaineilla on suuri skaalautuvuus.
3.	Levät, kuten mikrolevät	Tulevaisuuden raaka-aineita, joilla on suuri skaalautuvuus.

4.	Geneettisesti muokatut organismit <ul style="list-style-type: none"> • mikrolevät, bakteerit, sienet, hiivat 	Pidemmän aikavälin mahdollisuus, joilla on suuri skaalautuvuus.
----	---	---

Ensimmäisen sukupolven raaka-aineisiin kuuluvat syötävät viljelykasvit. Nämä raaka-aineet vaativat usein paljon vettä ja lannoitteita ja ne kilpailevat maankäytöstä, vedestä ja energiasta ruuantuotannon kanssa. Maavarojen niukkuuden kiertämiseksi metsämaita on kaadettu tuotantomaiden laajentamiseksi metsäkadon ja biodiversiteetin heikkenemisen kustannuksella. Mm. öljypalmun viljely on yhdistetty näihin haitallisiin seurauksiin. (Doliente SS, Narayan A, Tapia JFD, Samsatli NJ, Zhao Y and Samsatli S, 2020)

Toisen sukupolven raaka-aineet ovat ei-syötäviä ja voivat ratkaista ”ruoka vs. polttoaine” -dilemman. Ne voidaan jakaa kahteen pääryhmään: energiakasvit ja jätebiomassa. Nämä raaka-aineet ovat öljy- tai sokeririkkaita. Energiakasvien laaja saatavuus ja matala kilpailu käytöstä ovat eduksi, mutta valmistusprosessit ovat kalliita ja osin kehittymättömiä. Jätebiomassan hyödyntäminen puolestaan voi mahdollistaa laajasti kiertotalouden kehittymisen. Toisen sukupolven jakeet ovat hyvin potentiaalisia lentoliikenteen biopolttoaineiden tuotannolle. (Doliente SS, Narayan A, Tapia JFD, Samsatli NJ, Zhao Y and Samsatli S, 2020)

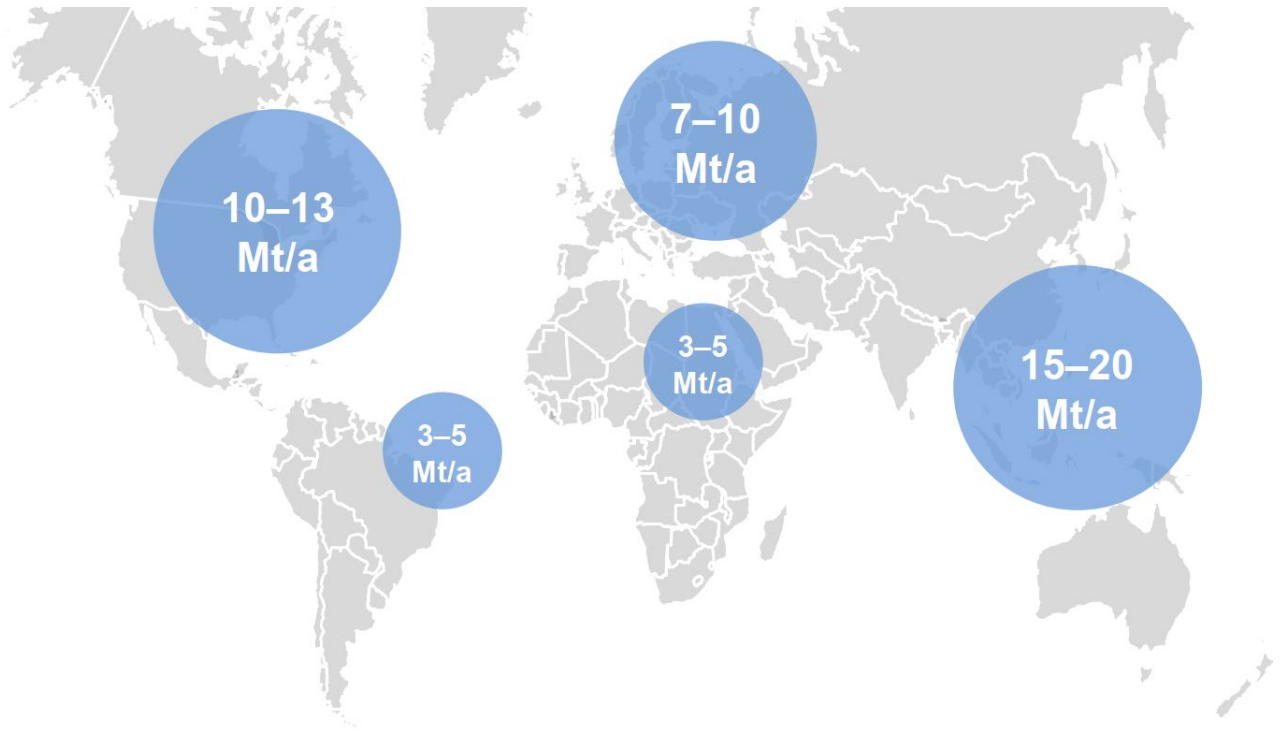
Kolmannen sukupolven raaka-aineiksi luokitellaan levät, jotka ovat suuren mielenkiinnon kohteena siksi, että niillä ei ole mitään ravintoarvoja, ne tuottavat paljon biomassaa, eivät vaadi maa-alaa ja ovat melko edullisia valmistaa. Ne voivat kasvaa myös saastuneessa vedessä. Mikrolevät ovat levätyyppi, joihin lentopolttoainevalmistajien mielenkiinto erityisesti kohdistuu. (Doliente SS, Narayan A, Tapia JFD, Samsatli NJ, Zhao Y and Samsatli S, 2020)

Neljättä sukupolvea edustavat geneettisesti modifioidut organismit, kuten mikrolevät, bakteerit, sienet, hiivat yms., jotka voisivat tuottaa luonnollisia kasveja enemmän öljyä tai sokeria. Nämä vaativat kuitenkin merkittävästi lisätutkimusta. (Doliente SS, Narayan A, Tapia JFD, Samsatli NJ, Zhao Y and Samsatli S, 2020)

5.2 Raaka-aineiden saatavuus

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden skaalautuvuudelle on olennaista, että kestävästi tuotettuja raaka-aineita on riittävästi saatavilla. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineiden saatavuus on rajallista eikä niistä jalosteta lentoliikenteen biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita. Tutkimustietoa raaka-aineiden riittävydestä on runsaasti, ja luvut vaihtelevat lähteittäin, joten seuraavassa esitetyt luvut kuvaavat suuruusluokkia.

Toisen sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineista käytetty paistorasva ja eläinrasvat ovat olennainen osa nykyisiä lentoliikenteen biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita. Näistä valmistettuja polttoaineita kutsutaan HEFA-lentopolttoaineiksi. Suomalainen Neste on jo pitkään tuottanut biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita näistä raaka-aineista. Nesteen arvion mukaan jäte- ja jäännösöljyjen sekä rasvojen saatavuus olisi globaalisti vuonna 2030 noin 40 Mt/a. Kuvassa 9 on esitetty raaka-aineiden maantieteellinen jakautuminen. (Neste, 2023)



Kuva 9. Jäte- ja jäännösöljyjen sekä rasvojen saatavuus 2030 mantereittain. (Neste, 2023)

Käytetyn paistorasvan ja eläinrasvan saatavuus on toimijoiden arvioiden mukaan rajallista, ja siksi polttoainevalmistajat tutkivat aktiivisesti uusia raaka-aineita ja tuotantotapoja. Suurempi skaalautuvuus on arvioiden mukaan saavutettavissa muissa toisen sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineissa, kuten energiakasveissa, yhdyskuntajätteen bio-osuudessa ja maa- ja metsätalouden sivuvirroissa.

Toisen sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineista on tehty EU-alueella paljon tutkimusta. 2022 julkaistu tutkimus pyrki arvioimaan, onko Euroopassa riittävästi kestävästi tuotettavaa biomassaa tieliikenteen, lentoliikenteen ja meriliikenteen tarpeisiin, jos vuoden 2030 tavoitteisiin halutaan päästä. Tutkimuksen mukaan näiden sektorien kysyntä kestävästi tuotetuille biopohjaisille polttoaineille olisi 20–33 Mtoe, josta lentoliikenteen osuus olisi noin 2,39 Mtoe eli noin 2,3 Mt kestäviä lentopolttoaineita. Tieliikenteen osuus on liikennemuodoista suurin. Tutkimuksessa korostetaan, että vaikka käytettäisiin hyvin konservatiivisia arvioita raaka-aineiden saatavuudesta, raaka-aineiden riittävyys tuskin on pullonkaula. Muut haasteet, kuten raaka-aineiden hinta, hintojen volatiliteetti, olemassa olevat logistiset rakenteet yms. ovat kriittisempiä tekijöitä. (Prussi;Panoutsou;& Chiaramonti, 2022)

Toinen vastaava selvitys tarkasteli Uusiutuvan Energian Direktiivin mukaisia raaka-aineita ja niiden riittävyyttä EU:n ja UK:n alueella. Tarkastelussa olivat maatalouden, metsien ja jäteperäisten raaka-aineiden riittävyys. Arviot riittävyydestä ovat hyvin konservatiivisia, ja selvityksessä ei huomioitu leväpohjaisten polttoaineiden potentiaalia. On siis todennäköistä, että luvut voivat olla taulukossa 12 esitettyjä suurempia. (Imperial Consultants, 2021)

Tutkimuksesta voidaan huomata, että vuoden 2030 tavoitteiden saavuttamiseksi ei ole esteitä raaka-aineiden saatavuuden näkökulmasta. Raaka-aineet riittänevät myös 2050 tavoitteisiin, mutta tämä edellyttää, että synteettisten polttoaineiden tuotantoa saadaan skaalattua ylöspäin. Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden valmistukseen on siis riittävästi raaka-aineita – keskeisempää on saada nämä raaka-aineet hyötykäyttöön. (Imperial Consultants, 2021)

Taulukko 12 Arviot biomassan ja liikenteen käyttöön soveltuvan kestävän biomassan saatavuudesta EU:n ja UK:n alueilla. Taulukossa on kuvattu koko liikennesektorille jäävä osuus – lentoliikenteen osuus tästä riippuu mm. poliittisista toimenpiteistä. (Imperial Consultants, 2021)

Tarkasteltava tekijä	2030	2050
Biopolttoaineille soveltuvaa biomassaa EU:n ja UK:n alueella	208–344 Mtoe ⁴ eli 520–860 Mt	215–366 Mtoe eli 539–915 Mt
Liikenteelle jäävä osuus, kun muut käyttäjät vähennetty ja huomioitu biomassan tuonti EU:n ja UK:n ulkopuolelta. (Tuonnille käytetty arvoja 49 Mtoe vuonna 2030 ja 56 Mtoe vuonna 2050)	126–262 Mtoe	101–252 Mtoe
Biomassasta saatava kehittynyt tai jättepohjainen biopolttoaine energiamääränä (Huom! Kaikkien liikennemuotojen)	46–97 Mtoe	71–176 Mtoe

EU:n Destination 2050 -tiekartassa arvioidaan, että hiilineutraaliuden saavuttamiseksi EU-alueella biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tarve olisi 13 Mt vuonna 2050. Tämä arvio pitää sisällään sen, että synteettiset polttoaineet ovat relevantti osa polttoainevalikoimaa vuonna 2050. 13 Mt biopohjaista kestävästä lentopolttoainetta vaatisi arviolta 24 Mt biopohjaisia raaka-aineita, mikä tarkoittaa energiasisällöltään karkeasti 1 eksajoulea eli 2,8 petawattituntia. Riippuen biomassan saatavuuden arvioista, vaatisi tämä 4–12 % EU-alueella saatavilla olevasta biomassasta. Tämän arvioidaan riittävän, kun huomioidaan muut biopolttoaineita käyttävät sektorit. (NLR, 2021)

Mikäli lentoliikenne jatkaa kasvuaan ja synteettisiä lentopolttoaineita ei saada riittävästi markkinoille, voi biomassan tarve kasvaa. Tällöin kestävästi tuotetun biomassan saatavuudessa voidaan nähdä suurempia haasteita.

5.3 Kestävien lentopolttoaineiden tuotantokapasiteetti

5.3.1 Kokonaisvolyymien ennusteet

Tällä hetkellä tuotettavista ja myytävistä kestävästä lentopolttoaineista lähes kaikki ovat biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita, erityisesti HEFA-polttoaineita. Synteettisten polttoaineiden roolin arvioidaan kasvavan 2030-luvulle tultaessa. Vuonna 2019 fossiilista lentopetrolia kului globaalisti yhteensä noin 363 miljardia litraa⁵ eli noin 290 Mt (Statista, 2022). Samana vuonna lentopetrolin kulutus Suomessa oli noin 1,2 miljardia litraa, ja vuonna 2022 noin 0,75 miljardia litraa (Tilastokeskus, 2023a).

Kestävien lentopolttoaineiden tuotantovolyymi on vielä varsin marginaalinen, mutta sen on ennustettu kasvavan tulevaisuudessa merkittävästi. International Air Transport Association (IATA) arvion mukaan vuonna 2022 kestävien lentopolttoaineiden tuotanto oli 300–450 miljoonaa litraa. Tämä on noin 200 % nousu vuoteen 2021 verrattuna, joten jo nyt on havaittavissa merkittävää kasvua (IATA, 2022). Toisaalta kansainvälisesti kestävien

⁴ Megaöljykvivalenttitonnia. Yksi öljykvivalenttitonni tarkoittaa 41,868 GJ vastaavaa energiamäärää

⁵ Lentopolttoaineissa 1 000 litraa = 0,8 tonnia. Eli 1 mrd. litraa = 0,8 Mt

lentopolttoaineiden tuotanto on tähän asti ollut vähäisempää kuin pelkän Suomen lentopetrolin kokonaiskulutus.

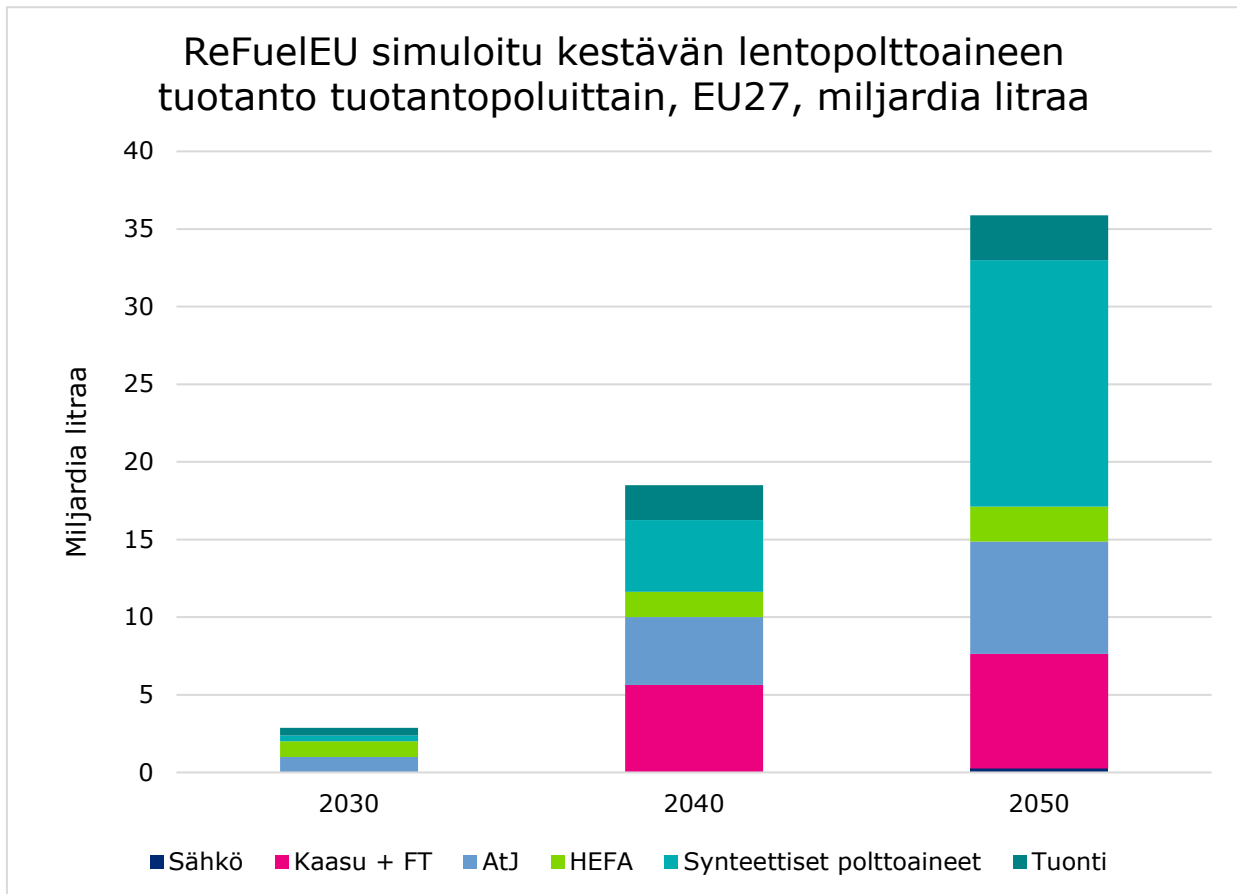
Valtaosa tämänhetkisistä arvioista johtaa kestävien lentopolttoaineiden kysynnän ja tätä kautta tuotannon tarpeet päästövähennystavoitteista. Esimerkiksi EU-alueella ReFuelEU Aviation -asetuksen mukaisia velvoitetasoja on käytetty useiden arvioiden teossa. Taulukossa 13 on havainnollistettu muutamien lähteiden arvioita kestävien lentopolttoaineiden kulutuksesta vuosina 2030 ja 2050 EU-alueella, Yhdysvalloissa ja globaalisti. Arvioissa on suurta vaihtelua, mikä johtuu pääosin kysynnän kasvun ennusteiden vaihtelusta.

Taulukko 13. Kestävien lentopolttoaineiden tuotantovolyymien arviot 2030 ja 2050.

Alue	2030	2050	Lähde
EU	2,9 mrd. litraa	34,6 mrd. litraa	EASA / ReFuelEU Aviation
EU	3,75 mrd. litraa	40 mrd. litraa	Destination 2050 EU
USA	11,4 mrd. litraa	132,5 mrd. litraa	US Department of Energy
Globaali	30 mrd. litraa	500 mrd. litraa	IATA Net Zero Roadmap
Globaali	13,6 mrd. litraa	-	ICAO Stocktaking
EU + USA	10,2 mrd. litraa	30,3 mrd. litraa	S&P Global SAF-analyysi
EU + UK	4,9 mrd. litraa	49 mrd. litraa	SkyNRG

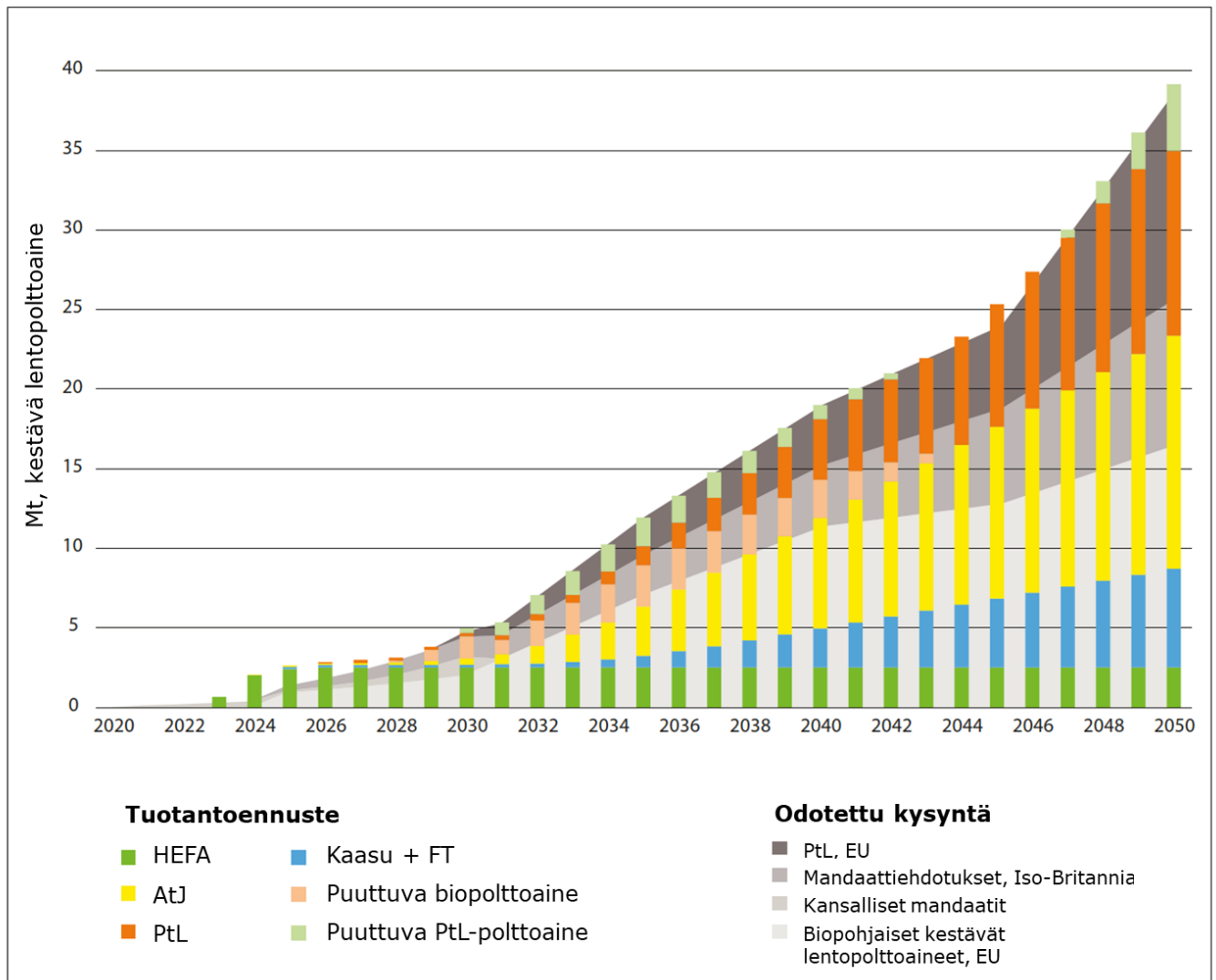
5.3.2 Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden rooli

Ennen ReFuelEU Aviation -asetuksen tuoreinta päivitystä, kestäväntuotannon tarjontaa mallinnettiin tuotantopoluittain. Tulokset on esitetty kuvassa 10. Esitetyt luvut ovat uusimpien vaatimusten mukaan todennäköisesti hieman korkeampia, koska esim. vuoden 2050 tavoite nousi 63 prosentista 70 prosenttiin. Arvion mukaan synteettisillä polttoaineilla on n. 44 % osuus vuonna 2050 ja biopohjaisilla kestäville lentopolttoaineilla (HEFA, AtJ, Kaasutus+FT) 47 %. EU:ssa kestävien polttoaineiden kokonaistarjonnasta noin puolet olisi siis vuonna 2050 biopohjaisia polttoaineita. Synteettisten polttoaineiden rooli kokonaisuudesta kasvaa ajan kuluessa. (EASA, 2022)



Kuva 10. ReFuelEU Aviation -asetuksen velvoitteen mukainen simuloitu kestävän lentopolttoaineen tuotanto tuotantopoluittain, EU27, miljardia litraa. (EASA, 2022)

SkyNRG on arvioinut kestävien lentopolttoaineiden markkinoita Yhdysvaltojen, EU:n ja Iso-Britannian näkökulmasta. Iso-Britannia kaavailee samankaltaista jakelovelvoitetta kuin EU. Markkina-arviossa on huomioitu tämä, ReFuelEU Aviation -asetus sekä kansalliset jakelovelvoitteet, ja peilattu näitä eri polttoaineiden tuotantokapasiteettiin. Tuotantoa ei ole rajoitettu vain vastaamaan velvoitteisiin, vaan analyysissä arvioidaan todellista tuotantovolyymiä huomioiden raaka-aineiden saatavuus ja muut tuotannon rajoitteet. Kuvassa 11 nähdään, että seuraavien vuosikymmenten aikana tuotanto harvoin ylittää kysyntää, vaan suurin haaste on saada tuotanto pysymään kysynnän kasvun tahdissa. (SkyNRG, 2023)



Kuva 11. Kestävien lentopolttoaineiden tuotanto- ja veloitteiden mukainen kysyntäennuste EU:n ja UK:n alueella. (SkyNRG, 2023)

2020-luku Euroopassa

HEFA-lentopolttoaineet ovat avainasemassa 2020-luvun tavoitteiden saavuttamisessa, sillä se on ainoa kaupallisesti laajasti käytössä oleva tuotantoprosessi (SkyNRG, 2023). Lentoliikenteen kannalta haasteena on, että samojen tuotantoyksiköiden tuotteita käyttää myös tieliikenne. HEFA-laitokset voivat nimittäin tuottaa myös uusiutuvaa dieseliä, jonka ohella syntyy uusiutuvaa naftaa ja kevyitä jakeita. HEFA-menetelmä tunnetaan tieliikenteessä HVO-termillä (Hydrotreated Vegetable Oils).

Lentopolttoaineiden tuotanto HEFA-laitoksilla edellyttää tarkempaa lopputuotetislausta ja polttoaineet tarvitsevat myös erinomaiset kylmäominaisuudet, jotka saavutetaan erillisellä isomeroityksiköllä. HEFA-lentopolttoaineiden tuotanto vaatii siis lisäinvestointeja, ja tuotantokustannusten on arvioitu olevan vähintään 20 % korkeammat kuin uusiutuvan dieselin tuotannossa (AFRY, 2020).

Yhdysvaltain markkinoilla valtaosa HEFA-tuotannosta menee tieliikenteen käyttöön ja sama ilmiö on nähtävissä myös Euroopassa. Tuotantoa voidaan säätää tuottamaan enemmän lentopolttoaineita, mutta tämä vaatii investointeja, ja ilman tukia myyntituotot jäävät todennäköisesti pienemmiksi. Haastateltujen toimijoiden arvioiden mukaan tällä hetkellä HEFA-

lentopolttoaineiden tuotanto kuitenkin riittää vastaamaan velvoitteisiin, ja 2020-luvulla on jopa todennäköistä, että tuotantomäärät ylittävät kysynnän. Tilanne kuitenkin muuttuu 2030-luvulle tultaessa. Kuvaa 11 tarkasteltaessa on huomioitava, että Euroopassa myös vapaaehtoinen kysyntä on kovassa kasvussa sekä useilla lentoyhtiöillä ja alliansseilla on omat, velvoitteita suuremmat tavoitteensa kestävien lentopolttoaineiden käytöstä. Kysyntää analysoidaan tarkemmin seuraavassa luvussa.

Euroopassa on tällä hetkellä toiminnassa tai suunnitteilla 23 kestäväntuotantolaitosta. Näistä valtaosa on HEFA-tuotantolaitoksia, mutta myös AtJ, Kaasu + FT sekä PtL (Power to Liquid) -tuotantopolut ovat yleistymässä (SkyNRG, 2023). Uusiin teknologioihin nojaavat tuotantolaitokset ovat tärkeitä todistamaan teknologian kyvykkyyden kaupallisessa mittakaavassa. Arvioiden mukaan tämä tuotantokapasiteetti riittää vastaamaan kysyntään ainakin vuoteen 2028 asti. Euroopassa on arvioiden mukaan tarpeeksi HEFA-tuotantokapasiteettia täyttämään vuoden 2030 tavoitteen, mutta tehtaiden tuotantoa tulisi ohjata enemmän lentopolttoaineiden valmistukseen (SkyNRG, 2023).

2030-luku Euroopassa

Vuoden 2028 jälkeen kestävien lentopolttoaineiden mandaatteihin vastaaminen edellyttäisi uusien tuotantolaitosten julkaisuja, ilmoituksia HEFA-laitoksilta suuremmasta lentopolttoaineen tuotannon osuudesta tai kestävien lentopolttoaineiden tuontia, sillä tällä hetkellä tiedossa oleva Euroopan tuotantokapasiteetti ei niihin enää riitä. Tuonti ei kuitenkaan ole välttämättä mahdollista, sillä kestävien lentopolttoaineiden kysyntä kasvaa usealla mantereella. (SkyNRG, 2023)

HEFA-tuotantolaitoksissa uudenlaiset energiakasvit voivat kasvattaa tuotantokapasiteettia, mutta näiden tuotanto painottunee haastattelujen perusteella otollisen kasvun ympäristöihin, kuten Yhdysvaltoihin, Etelä-Amerikkaan ja Aasian eteläisiin osiin. Toimijoiden arvioiden mukaan käytetyissä kasvirasvoissa ja eläinrasvoissa kilpailu kiristyy ja tuotantovolyymit ovat rajalliset.

Tällä vuosikymmenellä erityisesti AtJ-tuotantopolun arvioidaan yleistyvän (SkyNRG, 2023). Tuotantoprosessissa käytettäisiin selluloosapitoisia raaka-aineita tai bioperäistä kiinteää yhdyskuntajätettä, joita ei tällä hetkellä hyödynnetä merkittävästi. Kuten raaka-aineluvussa todettiin, on näissä raaka-aineissa valtava potentiaali, mutta haasteet liittyvät mm. raaka-aineiden kaupallistamiseen.

Pilottilaitoksia tulisi saada mahdollisimman pian käyttöön, sillä uusien tuotantopolkujen kohdalla laboratoriosta kaupalliseen tehdastuotantoon voi kestää yli 10 vuotta. Taustatyö 2030-luvun tuotantolaitoksille on siis tehtävä jo 2020-luvulla.

2040- ja 2050 luvut Euroopassa

AtJ-polttoaineiden kasvun lisäksi myös kaasu + FT-tuotantolaitosten oletetaan yleistyvän ja hyödyntävän samankaltaisia raaka-aineita (SkyNRG, 2023). Paikoin tuotantovolyymit voivat jopa ylittää mandaattien vaatimat määrät, mutta todennäköisesti vapaaehtoinen kysyntä varmistaa, että kaikki tuotettavat polttoaineet myydään.

Näillä vuosikymmenillä myös PtL-lentopolttoaineiden eli synteettisten lentopolttoaineiden rooli kasvaa merkittävästi ja näitä tuotantolaitoksia rakennetaan kiihtyvällä tahdilla. Arvioiden mukaan mandaattien vaatimusten täyttäminen vaatii n. 40 Mt kestävien lentopolttoaineiden tuotantoa vuonna 2050 – tästä noin puolet on biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita. (EASA, 2022)

5.4 Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotanto Suomessa

5.4.1 Toimijakenttä

Neste

Neste on ainoa Suomessa kestäviä lentopolttoaineita tuottava toimija. Yhtiö valmistaa tuotantolaitoksissaan kestäviä polttoaineita sekä tie- että lentoliikenteen asiakkaille sekä uusiutuvia raaka-aineita polymeerien ja kemikaalien tuotantoon. Nesteen Suomen jalostamo sijaitsee Porvoossa. Vuonna 2024 yhtiön globaali HEFA-teknologiaan perustuvan kestäväntä lentopolttoaineen tuotantokapasiteetti kasvaa yhteensä 1,5 miljoonaa tonniin. Nesteen kestäväntä lentopolttoaineen raaka-aineina käytetään uusiutuvaa alkuperää olevia jäte- ja tähderaaka-aineita, kuten käytettyä paistorasvaa ja elintarviketeollisuuden eläinrasvajätettä.

Porvoon jalostamolla on mahdollisuus tuottaa edelleen 0,1 Mt uusiutuvaa lentopolttoainetta, vuonna 2023 laajennetulla Singaporen jalostamolla 1 Mt ja Rotterdamin jalostamolla vuonna 2024 loppuun saatettavien muutostöiden myötä yhteensä 0,5 Mt vuodessa. Vuoteen 2026 mennessä Nesteen vuotuinen kestäväntä lentopolttoaineen tuotannon mahdollisuus kasvaa Rotterdamin jalostamon laajentamiseen tehtävän investoinnin myötä globaalisti 2,2 Mt:iin vuodessa. Neste pyrkii jatkuvasti laajentamaan uusiutuvien tuotteidensa raaka-ainevalikoimaa ja tutkii mm. heikkolaatuisempia jäte- ja tähderaaka-aineita sekä metsäteollisuuden ja maatalouden jätteitä ja tähteitä, leviä sekä muun muassa uudentyypisiin vastuullisiin viljelymenetelmiin perustuvia kasviperäisiä raaka-aineita mahdollisina tulevaisuuden vaihtoehtoina. Nesteen arvion mukaan kestävien lentopolttoaineiden kysyntä olisi globaalisti 15 Mt vuonna 2030. (Neste, 2023)

Neste käynnisti syksyllä 2022 strategisen selvityksen Porvoon jalostamon siirtymästä uusiutuvien ja kiertotaloustuotteiden tuotantoon sekä raakaöljyyn perustuvan jalostuksen lopettamisesta 2030-luvun puolivälissä. Siirtymä toteutettaisiin vaiheittain, alkaen uusiutuvien ja kiertotalousraaka-aineiden sekä fossiilisten raaka-aineiden yhteisprosessoinnista. Myöhemmässä vaiheessa olemassa olevat jalostamoyksiköt muutettaisiin pysyvästi uuteen käyttöön. Pitkän aikavälin tuotantokapasiteetti uusiutuvista ja kierrätetyistä raaka-aineista valmistetuille tuotteille olisi 2–4 miljoonaa tonnia vuodessa. Neste on panostanut viime vuosina myös nesteytetyn jätemuovin käsittelyyn, ja vihreän vedyn tuotantoa kaavaillaan alkavaksi Porvoossa vuonna 2026. (Neste, 2023)

Neste tutkii aktiivisesti uusia tuotantoteknologioita, kuten AtJ- ja kaasu + FT-prosesseja, sekä raaka-aineita, kuten uudentyypisiin vastuullisiin viljelymenetelmiin perustuvia kasviöljyjä, leviä ja yhdyskuntajätettä. Uudentyypisten vastuullisten viljelymenetelmien etuna on, että kasviöljyjä voidaan tuottaa lisää menetelmillä, jotka maksimoivat kasvihuonekaasujen vähenemän ja hiilen sitomisen samalla kun edistetään maaperän terveyttä ja biologista monimuotoisuutta. Epäsuoran maankäytön muutoksen (ILUC) riski on minimoitu, koska menetelmät eivät edellytä olemassa olevan viljelyn korvaamista, eivätkä siten lisää viljelymaan kysyntää muualla. Maatalousmaata voidaan käyttää esimerkiksi öljykasvien viljelyyn normaalin kasvukauden ulkopuolella, kun pääkasvisato on viljelymaalta korjattu tai satokasveja voidaan viljellä laidunmaalla karjanpidon rinnalla. (Neste, 2023)

HEFA on tuotantoprosessina tällä hetkellä kustannuksiltaan ja hyötysuhteeltaan paras vaihtoehto uusiutuvien lentopolttoaineiden tuotantoon. Kaasu + FT-tuotantoprosessi on kallista, mutta niiden myötä raaka-ainepohjaa voidaan laajentaa uudentyypisiin raaka-aineisiin. AtJ-tuotantopolussa voidaan hyödyntää laajemmin lignoselluloosapitoisia raaka-aineita. Nesteen arvion mukaan synteettisten lentopolttoaineiden rooli tulee kasvamaan pitkällä aikavälillä, sillä biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotantoa rajoittavat

lopulta raaka-aineet. Yhtiö tutkii aktiivisesti synteettisten polttoaineiden tuotantoa ja käyttöä. (Neste, 2023)

UPM

UPM tuottaa vuosittain Lappeenrannassa vuonna 2015 perustetulla biojalostamollaan noin 0,13 Mt mäntyöljypohjaista dieseliä ja naftaa, joiden loppukäyttäjät ovat tieliikenne ja petrokemianteollisuus. Lappeenrannassa ei tuoteta lentopolttoaineita eikä tuotannosta ole suunnitelmia. Yhtiö suunnittelee uuden biopolttoainelaitoksen rakentamista Rotterdamiin, jonka tuotantokapasiteetti olisi 0,5 Mt vuodessa. Laitoksella tuotettaisiin myös lentopolttoaineita, joiden osuus kokonaiskapasiteetista on vielä määrittämättä. Investointipäätöstä ei ole vielä tehty, joten tehdas olisi käytössä aikaisintaan vuosikymmenen jälkipuoliskolla.

Rotterdamian tuotantolaitos käyttäisi vetykäsittelyyn perustuvaa tuotantoprosessia lentopolttoaineiden valmistukseen. Raaka-aineiden valikoima koostuisi useista eri lähteistä, kuten UPM:lle luontaisesti sopivista metsäteollisuuden sivuvirroista sekä peittokasveista ja muista kestävästä maankäyttökonsepteista. Metsäteollisuuden sivuvirrat ovat merkittävässä roolissa, mutta myös peittokasveissa nähdään potentiaalia. Yhtiöllä on tällä hetkellä kokeilussa erilaisten maanpeittokasvien viljely Uruguayssa, jota viljellään pääsatokasvin kasvukauden ulkopuolella. Tämä on eduksi myös paikallisille maanviljelijöille, sillä pellot tuottavat ympäri vuoden myytävää biomassaa: kesällä ruuantuotannon tarpeisiin, talvisin biopolttoaineiden tai muiden biopohjaisten tuotteiden tuotantoon. Peittokasvit myös parantavat maaperän laatua. Uruguayssa tuotetut raaka-aineet laivattaisiin Rotterdamian tuotantolaitokseen. UPM ei tutki tällä hetkellä aktiivisesti leväpohjaisia polttoaineita. (UPM, 2023)

UPM näkee suuren potentiaalisen metsäteollisuuden sivuvirroissa, ja on siksi panostamassa myös nestemäisten lentopolttoaineiden valmistukseen. Yhtiö pyrkii siihen, että raaka-aine käytettäisiin optimaalisella tavalla jalostettavampiin tuotteisiin, kuten nestemäisiin polttoaineisiin tai raaka-aineeksi esimerkiksi petrokemian tuotteisiin. (UPM, 2023)

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden ohella UPM pitää potentiaalisina synteettisiä polttoaineita, sillä yhtiön tuotantolaitoksista on saatavilla paljon bioperäistä hiilidioksidia. Tämä yhdistettynä uusiutuvan sähkön saatavuuteen luo edellytyksiä kotimaiselle tuotannolle. Tuotantomäärät vaativat kuitenkin valtavasti sähköä sekä edellyttävät mm. hiilidioksidin talteenoton teknologioiden kehitystä. (UPM, 2023)

St1

St1:n Göteborgin jalostamoalueelle on suunniteltu käynnistyvän uusi biojalostamo vuoden 2023 lopussa. Biojalostamon vuosikapasiteetti on 200 000 tonnia uusiutuvien polttoaineiden tuotantoa. Se on suunniteltu optimoimaan uusiutuvan dieselin ja kestävästä lentopolttoaineen tuotantoa. Tuotannossa käytetään monenlaisia raaka-aineita, mukaan lukien mäntyöljy.

St1:llä on strateginen kumppanuus ruotsalaisen SCA:n kanssa, joka on maan suurin metsäteollisuusyritys. St1 ja SCA ovat perustaneet yhteisyrityksen kehittääkseen mahdollisuutta investoida biojalostamoon, joka tuottaisi kehittyneitä biopolttoaineita kiinteistä metsätähteistä. Ympäristöluvan perusteella tuotantovolyymi olisi 0,3 Mt vuodessa ja tuotantolaitos sijoittuisi Östrandiin, Ruotsiin.

Vattenfall ja St1 toteuttavat yhdessä toteutettavuustutkimuksen tavoitteenaan kehittää fossiilivapaa arvoketju sähköpolttoaineiden tuotantoon merituulen avulla. Vattenfall pyrkii kehittämään merellä tuulivoimaan perustuvan vedyn syöttöinfrastruktuurin Ruotsin länsirannikolle, ja St1 aikoo tuottaa miljoona kuutiometriä sähköpolttoaineita, jotka

suunnataan ensisijaisesti kestäväan lentopolttoaineeseen käyttämällä tätä fossiilivapaata vetyä.

5.4.2 Havainnot kestävien lentopolttoaineiden tuotannosta

Seuraavassa on kuvailtu Suomen näkökulmasta biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tulevaisuuden näkökulmia sekä tehty nostoja Ruotsin tilanteesta. Arviot perustuvat toimijahaastatteluihin sekä asiantuntija-arvioihin.

Suomen raaka-ainevarannot ja polttoaineiden tuotanto

HEFA-lentopolttoaineiden raaka-aineita on Suomessa tarjolla hyvin marginaaliset määrät, alle 20 000 tonnia (AFRY, 2020). Suomen kasvuolosuhteet eivät myöskään ole otollisia esim. peittokasvien viljelyyn. Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden valmistukseen voisi kuitenkin käyttää metsäteollisuuden sivuvirtoja, joita syntyy runsaasti sellu- ja sahateollisuudessa. Tällä hetkellä raaka-aineet menevät pääosin sähkön tai lämmöntuotantoon. Yhteensä noin 22 miljoonaa kuutiometriä suomalaisista metsistä saatavaa biomassaa menee nykyään energiantuotantoon. Tästä määrästä voitaisiin tuottaa arviolta noin 2 Mt erilaisia biopolttoaineita (AFRY, 2021). Myös maatalouden sivuvirroissa ja yhdyskuntajätteessä on potentiaalia polttoainetuotannolle.

Raaka-aineiden saatavuus on kuitenkin vain yksi osa kokonaisuutta. Suomessa tuotettujen biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotannolle ei ole toimijoiden arvioiden mukaan merkittäviä edellytyksiä, sillä globaalit markkinat, logistiset ratkaisut ja lopulta myös raaka-aineiden saatavuus ohjaavat tuotantoa keskeisiin kansainvälisiin logistisiin solmuihin. Ei ole kuitenkaan poissuljettua, etteikö myös Suomi voisi olla potentiaalinen kohde investoinneille, sillä tulevaisuudessa polttoaineiden kuljettaminen kaukaa ei välttämättä ole mielekäästä. Synteettisten lentopolttoaineiden tuotanto nähdään Suomessa alustavasti potentiaalisempana, sillä Suomessa investoidaan merkittäviä määriä puhtaaseen energiaan sekä vetyteollisuuteen, ja saatavilla on paljon bioperäistä hiilidioksidia.

Kestävästi tuotetusta biomassasta kilpailevat yhä useammat toimialat

Biomassasta jalostettavia jakeita tarvitsevia toimialoja ovat mm. lento-, meri- ja tieliikenne, energiateollisuus, kemianteollisuus ja monet uudentyyppiset kiertotalousyritykset. Tällä hetkellä liikenteessä kaikki toimialat tarvitsevat biopohjaisia polttoaineita, mutta tulevaisuudessa sähköistymiskehitys voi vähentää näiden tarvetta ainakin tieliikenteessä. Meri- ja lentoliikenteessä tarve nestemäisille polttoaineille säilyy merkittävänä.

Suomessa tuotetaan tällä hetkellä paljon energiaa polttamalla biomassaa. Sähköntuotantoon on olemassa kuitenkin muitakin keinoja, joiden yleistymisen vähentäisi biomassan polttamisen tarvetta. Suomen kehittyvästä vetyteollisuudesta syntyvä hukkalämpö voi auttaa korvaamaan biomassalla tapahtuvaa lämmöntuotantoa, kun prosessissa syntyvä hukkalämpö voidaan hyödyntää mm. kaukolämpönä. Tulevaisuudessa voisi olla mahdollista käyttää yhä suurempi osuus puupohjaisesta biomassasta polttoaineiden valmistukseen. Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet kilpailevat raaka-aineista myös kemianteollisuuden kanssa, sillä tälläkin sektorilla haetaan kestävämpiä ratkaisuja korvaamaan fossiilisia tuotteita.

Politiikan ennustettavuus parantaa investointiedellytyksiä

Tieliikenteen jakeluvuorituksen katsotaan yleisesti edistäneen biopolttoaineiden tuotannon kehittymistä Suomessa. Biopolttoaineiden sääntely luo pohjan markkinan pysyvyydelle ja tavoitetasolle. Sääntely tarjoaa ennustettavuutta ja luottamusta siihen, että vuosikymmeniä eteenpäin katsoville investoinneille on perusteita. Useasti vaihteleva politiikka vaikeuttaa

liiketoiminnan ennakoitavuutta ja investointipäätösten tekemistä. Kansallisiin jakeluvuotteisiin tai kannustimiin suhtaudutaan pääosin positiivisesti, ja niiden katsotaan edistävän paikallisempaa tuotantoa. ReFuelEU Aviation -asetuksen jakeluvuotetta pidetään tärkeänä kestävien lentopolttoaineiden tuotannon kehitykselle Euroopassa.

Ruotsissa useampia investointeja kestäviin lentopolttoaineisiin

Ruotsissa Transportstyrelsenin tuoreen selvityksen mukaan useat toimijat suunnittelevat investointeja Ruotsiin (taulukko 14). Selvitys painotti tätä selvitystä enemmän investointeja ja niiden mahdollisuuksia Ruotsissa, mutta työn johtopäätökset ovat samankaltaisia kuin Suomessa toteutettujen haastattelujen. Ruotsin raportissa ei ole tunnistettu St1:n mahdollista investointia Ruotsin Östrandiin. Ruotsissa on suunnitteilla Suomea huomattavasti enemmän investointeja nimenomaan kestävien lentopolttoaineiden valmistukseen.

Toimijat korostavat useita tuotannon käynnistämisen kannalta tärkeitä edellytyksiä, kuten pitkän tähtäimen pelisääntöjä, kestäväen lentopolttoaineen ja fossiilisen lentopetrolin hintaeron kaventamista sekä pääoman saatavuutta ja liiketoimintamalleja, jotka mahdollistavat tuotantolaitosten perustamisen. Toimijat korostavat sujuvia lupaprosesseja sekä julkisen sektorin vuoropuhelua ja oikeaa osaamista. Uusiutuvan sähkön saatavuus nähdään tärkeänä, samoin rahoituksen saatavuus EU:n innovaatorahastosta ja Ruotsin teollisuudelta. (Transportstyrelsen, 2023)

Alan toimijat huomauttavat, että ReFuelEU Aviation -asetuksen mukainen jakeluvuote, joka alkaa vuonna 2025, on heille tärkeä suurtuotannon käynnistämiseksi. Ruotsilla on tunnistettu etuja raaka-aineiden saatavuuden sekä kestäväen ja luotettavan energiansaannin suhteen. Kestävien lentopolttoaineiden tuotannon Ruotsissa nähdään edistävän maan ja Euroopan huoltovarmuutta. Ruotsin bensiinin ja dieselin jakeluvuotteen alentamisen ei katsota vaikuttaneen kestävien lentopolttoaineiden tuotantosuunnitelmiin. ReFuelEU Aviation -asetus mahdollistaa arvioiden mukaan huomattavasti suuremmat markkinat kuin nykyinen Ruotsin lentopolttoaineen jakeluvuote. (Transportstyrelsen, 2023)

Taulukko 14. Julkisuudessa esillä olleet investointisuunnitelmat kestäviin lentopolttoaineisiin. (Transportstyrelsen, 2023)

Toimijat	Raaka-aine	Teknologia	Sijainti	Tuotantovolyymi	Rahoittajat	Aikataulu
Swedish Biofuels, COWI	Vihreä etanoli	ATJ	Brista ja kaksi muuta sijaintia	400 000 tonnia	Euroopan komissio	Ensimmäinen toimitus 2025
Vattenfall, SAS, Shell, Lanzatech (Hy Skies)	Fossiiliton sähkö, hiilidioksidi, vesi	ATJ	Forsmark	Jopa 90 000 tonnia	EU:n innovaatorahasto 80 milj. kr, Klimatklivet 145 milj. kr	Tuotanto käynnistyy 2027
Uniper och Sasol ecoFT	Biomassa	FT	Långselle	80 000 tonnia	261 milj. kr hakemus Ruotsin	Tuotanto käynnistyy 2026

(Sky Fuel H2)					energiavirasto lle	
Växjö Energi, Södra, KLM Royal Dutch Airlines, SkyNRG, RISE Research Institutes of Sweden och 2030-sekretariat	Metsätalouden jätteet	FT	Växjö	20 000 tonnia	Ruotsin energiaviraston tuki	Tehtaan käyttöönotto 2026
Preem, SAS	Sivuvirrat metsistä ja muista lähteistä	HEFA	Göteborg	400 000–480 000 tonnia		Suunniteltu käyttöönotto on vuoden 2027 toisella puoliskolla

6 Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden käyttö lentoliikenteessä

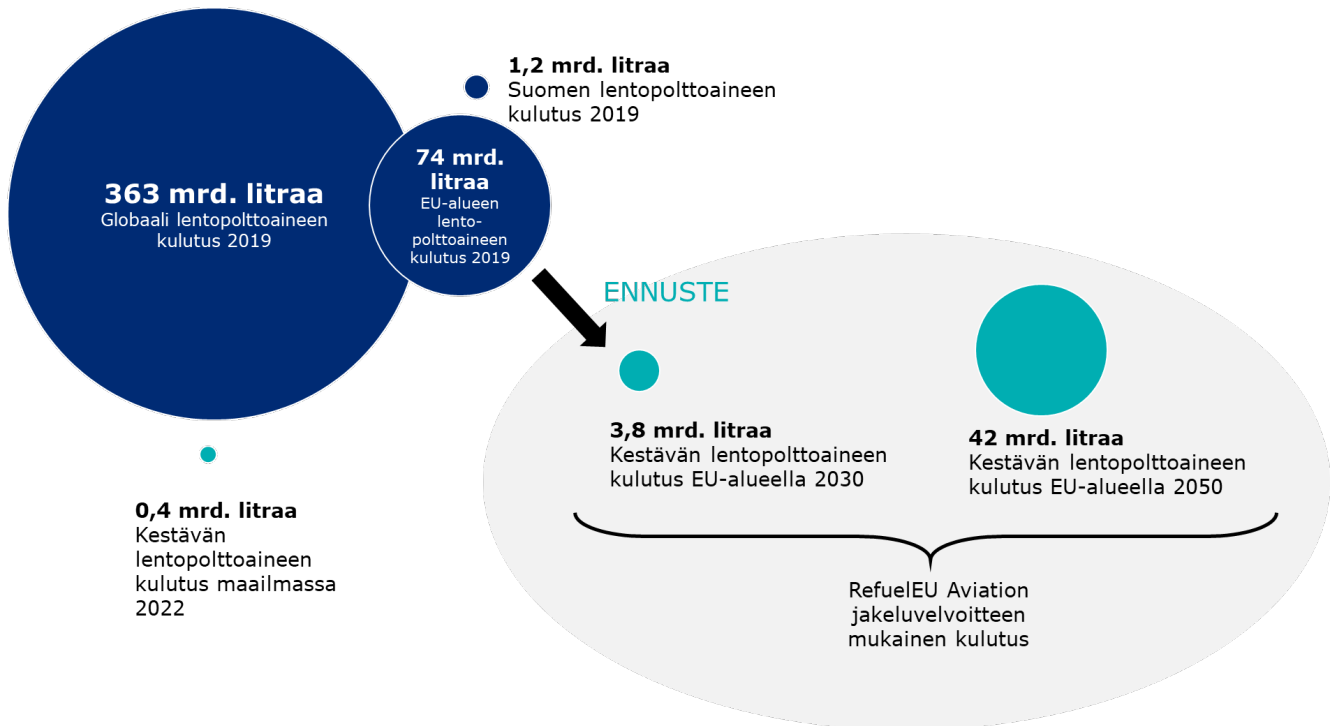
Luvun keskeinen sisältö

- Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden käyttö on kasvamassa voimakkaasti velvoitteiden ja vapaaehtoisen kysynnän kasvun myötä.
- Maailmassa noin 100 lentoasemaa jakelee kestäviä lentopolttoaineita. Suomessa ainoastaan Helsinki-Vantaalla jaellaan kestävää lentopolttoainetta sisältävää polttoainesekoitetta.
- Kestävien lentopolttoaineiden hinta tulee olemaan nykyistä fossiilista lentopetrolin hintaa kalliimpi vielä pitkään, ellei pysyvästikin.
- Lentoyhtiöt näkevät kestävät lentopolttoaineet hyvin tärkeänä keinona vähentää toimintansa päästöjä.
- Lentoasemilla ei vaadita investointeja tankkausinfraan, ellei lentoala ala hyödyntää 100-prosenttista kestävää lentopolttoainetta. Tämä vaatisi todennäköisesti nykyisen infran rinnalle uuden infrastruktuurin ja logistiikan.

6.1 Käytön nykytilanne ja kasvuennusteet

Vuonna 2022 maailmassa käytettiin 300–450 miljoonaa litraa kestäviä lentopolttoaineita, joista kaikki oli biopohjaista kestävää lentopolttoainetta (EASA, 2022). Globaalisti lentopolttoainetta kului vuonna 2019 noin 363 miljardia litraa, joten kestävien lentopolttoaineiden osuus on marginaalinen, noin 0,1 % kansainvälisen lentoliikenteen polttoaineen kulutuksesta. Tällä hetkellä kaikki kaupallisesti tuotettu kestävä lentopolttoaine menee kaupaksi.

Kuvassa 12 on havainnollistettu lentopolttoaineen kulutusta globaalisti, EU:ssa ja Suomessa. Samassa kuvassa on myös nostettu esille raportin tekijöiden karkea arvio siitä, millainen olisi ReFuelEU Aviation -asetuksen velvoitteiden mukainen kestävä lentopolttoaineen kulutus vuosina 2030 ja 2050. Oletuksena on, että vuonna 2030 EU-alueella käytetään 62 mrd. litraa lentopolttoainetta ja 2050 noin 60 mrd. litraa. Selvä on, että murros kohti kestäviä lentopolttoaineita vaatii merkittäviä toimia kaikilta lentoalan toimijoilta.



Kuva 12. Suuruusluokkien havainnollistaminen. Globaali kulutus (Statista, 2022), EU-alueen ja kestävien lentopolttoaineiden globaali kulutus (EASA, 2022), Suomen kulutus (Tilastokeskus, 2023a).

Velvoitteet ja vapaaehtoinen kysyntä

Kirjallisuuden ja toimijahaastattelujen perusteella pääajureita kestävien lentopolttoaineiden kehitykselle ovat useiden maiden/talouselueiden kestävien lentopolttoaineiden käytön velvoitteet, joiden muodostamaa kysyntää arvioitiin edellä ja myös tuotantoluvussa. Näiden velvoitteiden päälle syntyy vapaaehtoista kysyntää, jolla tarkoitetaan sellaista kysyntää, joka syntyy velvoittavan kysynnän päälle yritysten tai yksilöiden kysynnästä. Esimerkki tällaisesta voi olla lentoliikennettä käyttävän yrityksen tavoite vähentää päästöjään, minkä seurauksena yritys ostaa kestäviä lentopolttoaineita joko polttoainevalmistajalta suoraan tai lentoyhtiöltä.

NOSTO: Vapaaehtoinen kestävä lentopolttoaineen ostaminen

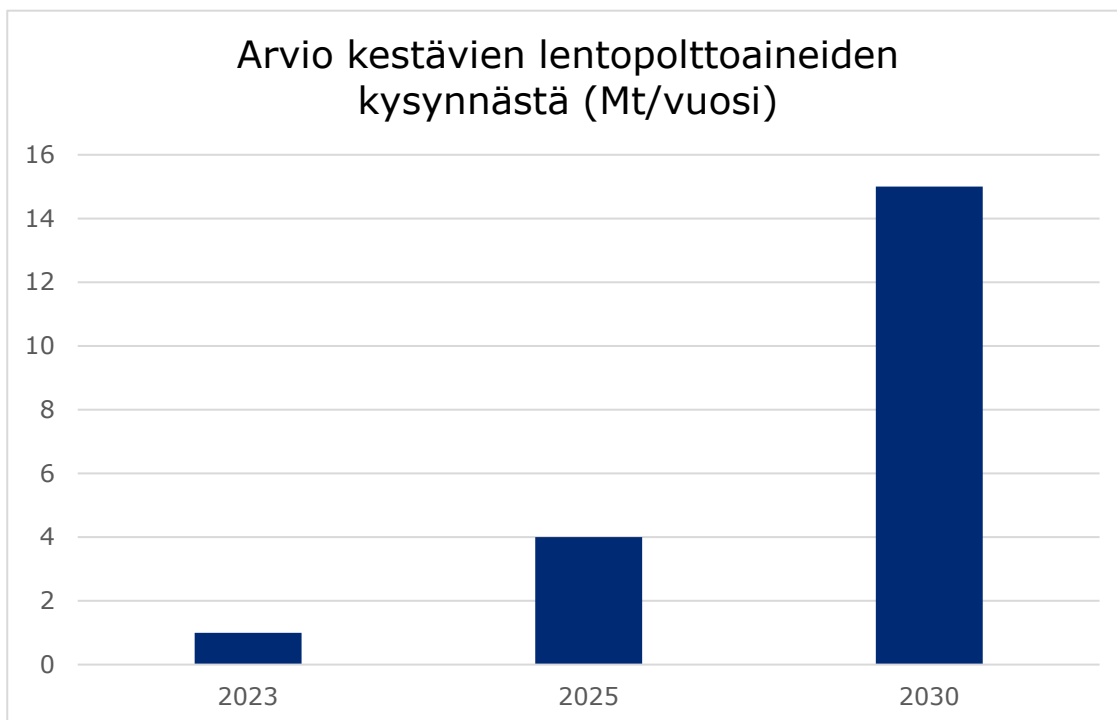
Boston Consulting Group on ostanut Nesteeltä kestävää lentopolttoainetta toimitettavaksi lentoyhtiöille SAS ja Finnair, joita BCG käyttää liikematkustuksessaan. Tällä tavalla BCG vähentää yrityksen toiminnasta aiheutuvia päästöjä. Tällaiset vapaaehtoiset kestävä lentopolttoaineen ostot voivat yleistyä, koska yrityksillä on myös omia päästövähennystavoitteitaan (Neste, 2023). Vapaaehtoisen kysynnän määrästä ei ole toistaiseksi tehty tarkempia arvioita.



Velvoitteista muodostuvan kysynnän ennustaminen on melko lineaarista, mutta vapaaehtoisen kysynnän arviointi on haastavampaa. Vapaaehtoisen kysynnän kasvulle on kuitenkin tunnistettavissa signaaleja. Erityisesti globaalit suuryritykset ovat alkaneet kiinnittää huomiota toimintansa ilmastovaikutuksiin ja asettaneet paikoin kunnianhimoisia päästövähennystavoitteita. Yritykset, joilla ei ole hiilineutraaliuden tietoa, ovat harvassa. Kansainvälisyys ja kaupankäynti edellyttävät yritysten työntekijöiltä lentoliikenteen käyttämistä, mistä voi syntyä suurikin osa yrityksen hiilidioksidipäästöistä. Lentojen käyttöä on voitu vähentää, mutta tämän ohella kestävänt lentopolttoaineet ovat tällä hetkellä ainoa relevantti vaihtoehto toiminnan päästöjen vähentämiseen.

Myös kuluttajien vapaaehtoinen kysyntä voi kasvaa, ja monet lentoyhtiöt tarjoavat tänä päivänä mahdollisuuden ostaa kestävänt lentopolttoainetta lennolleen, mikä maksaa usein ylimääräistä. Osana Haaga-Heliassa suoritettua loppuyötä toteutettiin suomalaisille kohdistettu kuluttajakysely vuonna 2022, johon vastasi 1 000 henkilöä. 79 % vastaajista oli samaa mieltä siitä, että kestävänt lentopolttoaineet ovat tärkeä keino vähentää lentämisen hiilidioksidipäästöjä. 81 % vastaajista olisi valmis maksamaan enemmän kestävänt lentopolttoaineen käytöstä; keskimääräisesti 44 € enemmän 200 € maksavalta lennolta. 80 % vastaajista toivoi, että lentoyhtiöt käyttäisivät enemmän kestäviä lentopolttoaineita, vaikka se nostaisi kustannuksia. (Stenius, J., 2023) Kyselyn perusteella ainakin Suomessa kuluttajat olisivat valmiita maksamaan enemmän kestävänt lentopolttoaineen käytöstä. Mutta kuten loppuyössä todetaan, vain harva tekee näin käytännössä tänä päivänä.

Neste on arvioinut kesällä 2023, että kestävien lentopolttoaineiden kysyntä on kiihtymässä globaalisti (kuva 13). Vuonna 2025 kestävänt lentopolttoaineen kysynnän ennustetaan olevan koko maailmassa n. 4 Mt eli 5 mrd. litraa, ja vuonna 2030 15 Mt eli lähes 19 mrd. litraa.



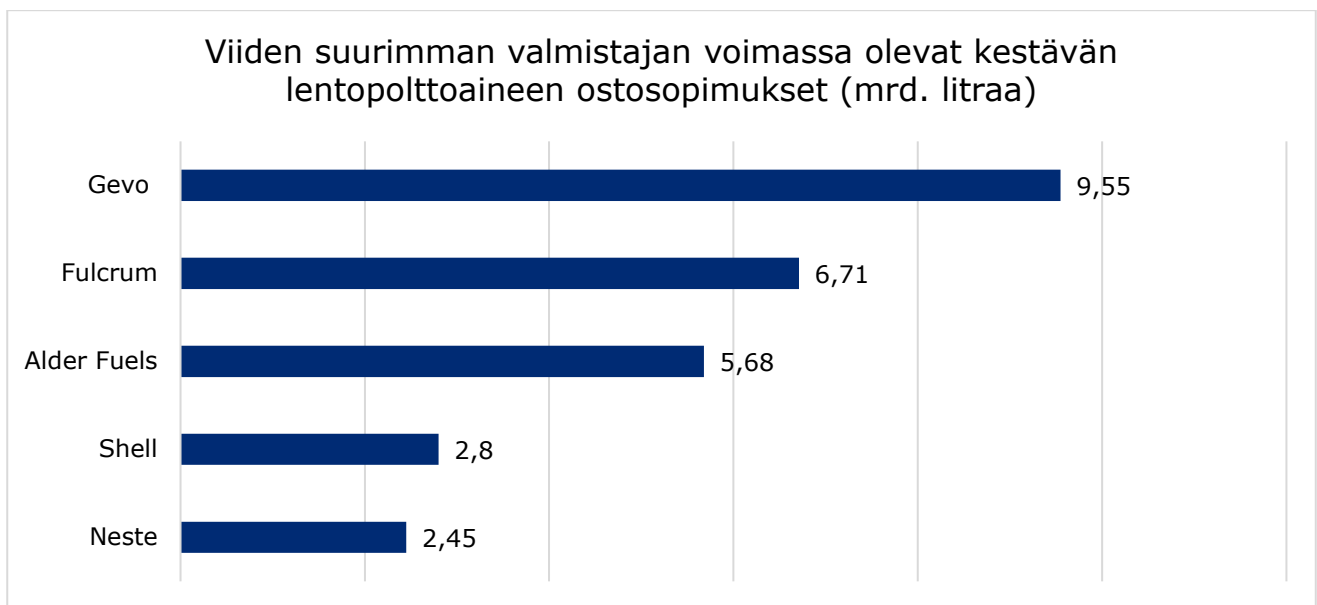
Kuva 13. Kestävien lentopolttoaineiden kysynnän näkymät vuoteen 2030. (Neste, 2023)

Kysynnän kasvutrendi näkyy mm. julkisissa ostosopimuksissa kestävien lentopolttoaineen myyjien ja ostajien välillä. Vuonna 2019 julkaistiin vain neljä ostosopimusta, kun vuonna 2022

vastaava luku oli jo 42. Maailmassa on raportin kirjoittamishetkellä tehty yhteensä noin 42,5 miljardin litran edestä ostosopimuksia kestävästä lentopolttoaineesta. Luku sisältää kuitenkin historiatietoja sekä sopimuksia usean vuoden päähän.

Sopimukset kuvaavat kuitenkin melko huonosti markkinan nykytilaa. Sopimuksia tekevät nykyisten tuottajien lisäksi jakelijat ja tulevat tuottajat, jotka eivät välttämättä ole tehneet edes lopullisia investointipäätöksiä tuotantolaitostensa rakentamisesta. Tilastoissa on korkealla esimerkiksi startup-toimijoita, jotka hakevat ostosopimuksia rahoituksen turvaamiseksi. (Kauppalehti, 2023)

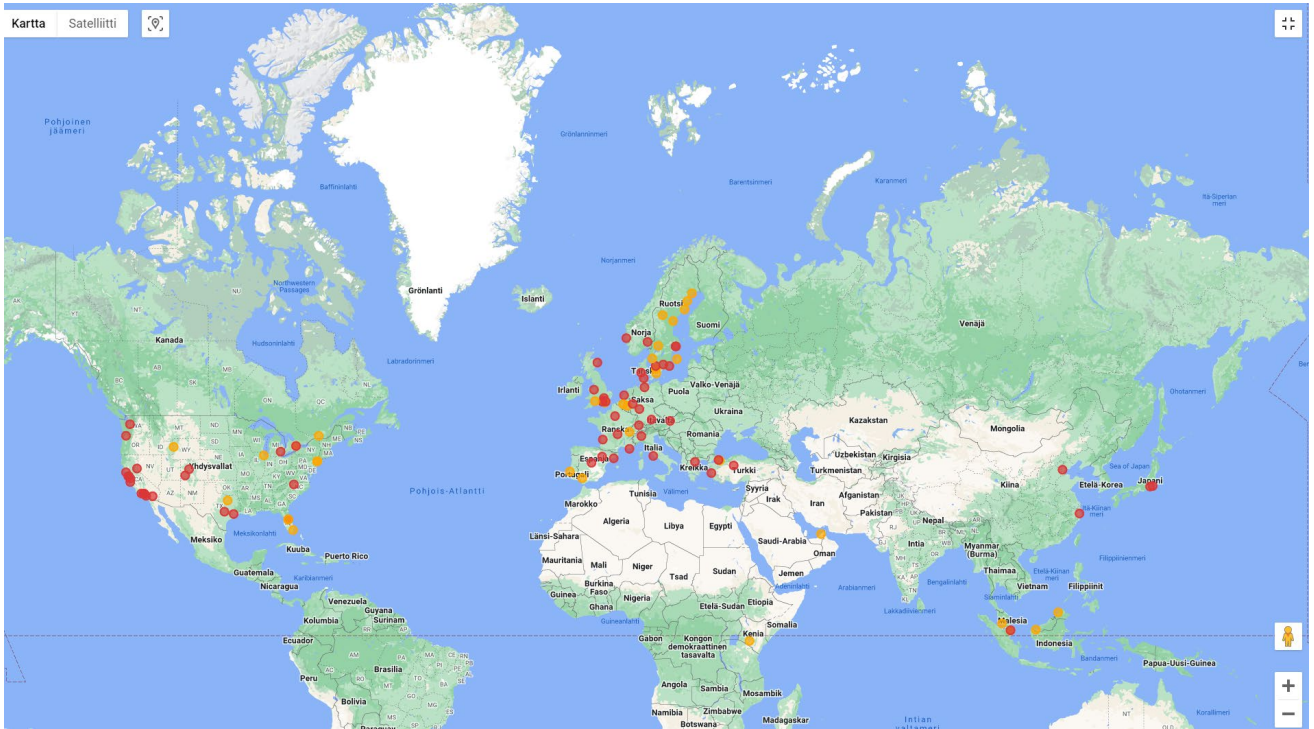
Kuvassa 14 on esitetty viiden suurimman valmistajan voimassa olevat ostosopimukset. Gevolla sopimukset ovat keskimäärin 5–7-vuotisia, Nesteellä 1–3-vuotisia (poikkeuksena 8-vuotinen sopimus Air France-KLM:n kanssa ja 5-vuotinen sopimus DHL:n kanssa) ja Fulcrumilla kaikki sopimukset ovat 10-vuotisia. Gevo, Fulcrum ja Alder Fuels ovat yhdysvaltalaisia yrityksiä, Shell isobritannialainen ja Neste suomalainen. (ICAO, 2023b)



Kuva 14. Kestävien lentopolttoaineiden ostosopimukset. (ICAO, 2023b)

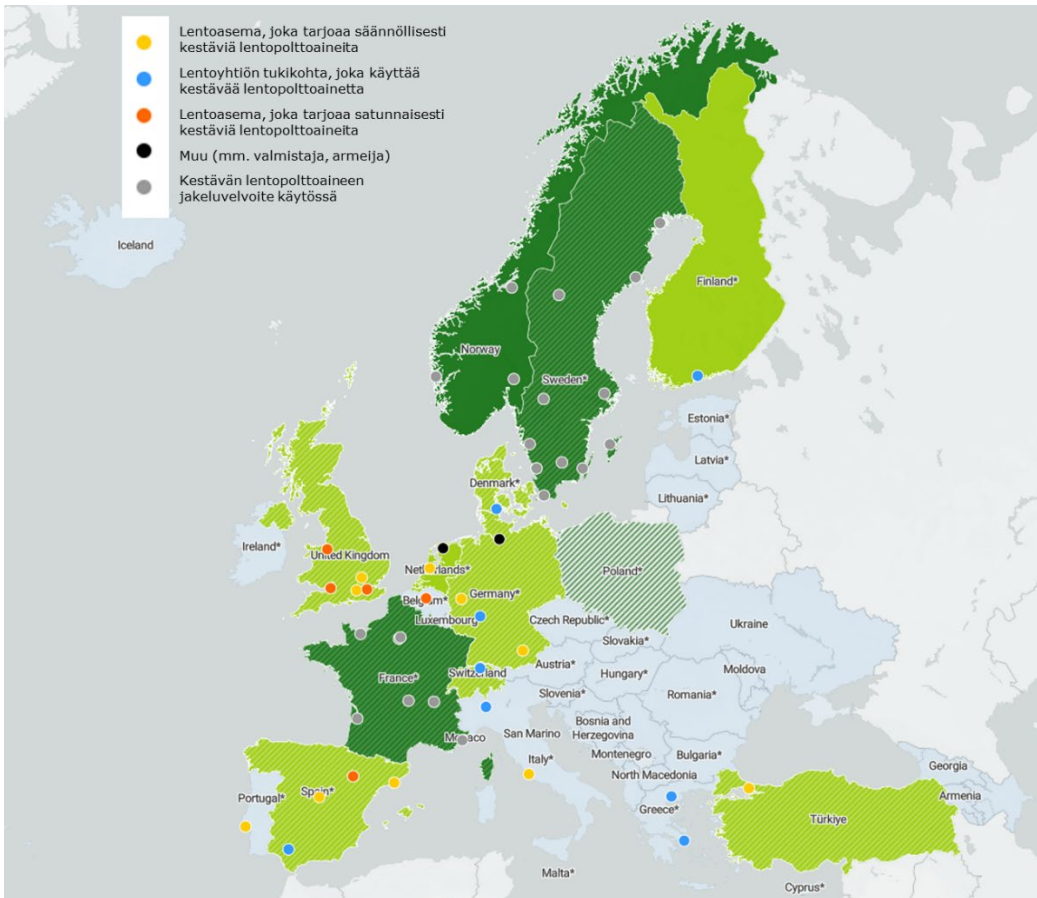
6.2 Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden jakelu

ICAO:n mukaan tällä hetkellä noin 100 lentoasemaa maailmassa jakelee kestäviä lentopolttoaineita (kuva 15). Kaikki myyntiin tuleva kestävä lentopolttoaine käytetään eli kysyntä ylittää tarjonnan ja näin odotetaan olevan myös jatkossa. ICAO ylläpitää verkkosivuillaan tilannekuvaa kestäviä lentopolttoaineita tarjoavista lentoasemista. Lista ei ole täydellinen, sillä mm. Helsinki-Vantaan lentoasema ei näy kartalla.



Kuva 15. Kuvakaappaus kestävien lentopolttoaineen jakeluverkostosta 31.8.2023. Huom! Helsinki-Vantaa puuttuu listalta. (ICAO, 2023a)

Euroopassa tilannekuvaa kestävien lentopolttoaineiden jakelusta ylläpitää Eurocontrol. Syksyn 2023 tilanne on esitetty kuvassa 16.



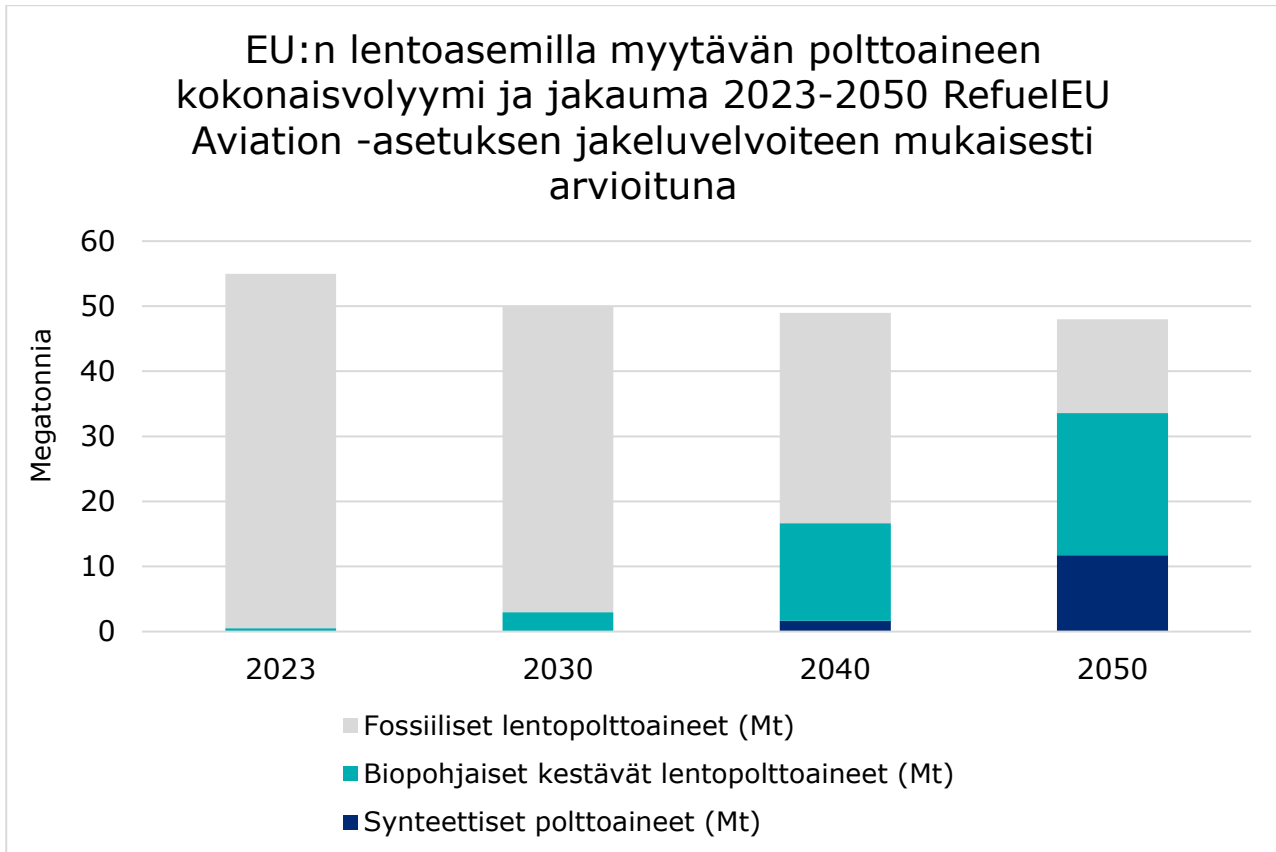
Kuva 16. Kestävien lentopolttoaineita jakelevat lentoasemat Euroopassa. (Eurocontrol, 2023)



Vapaaehtoinen kestävä lentopolttoaineen käyttö

Ruotsissa Trollhättan-Vänersborgin lentoasema tarjoaa vain kestävää lentopolttoainetta sisältävää polttoaineseosta kaikkien lentokoneiden tankkauksiin. Lentoasema on ensimmäinen maailmassa, joka käyttää ainoastaan kestävää lentopolttoainetta sisältävää polttoaineseosta. (Västflyg, 2023)

Kestävien lentopolttoaineiden jakelumääriä EU:n lentoasemilla voidaan arvioida ReFuelEU Aviation -asetuksen ja sen mukaisten prosentuaalisten velvoiteosuuksien perusteella. Tämä tarkastelu ei huomioi vapaaehtoista kysyntää eikä ota edellisten lukujen tapaan huomioon esim. Iso-Britannian mahdollista jakeluelvoitetta. Kuvassa 17 on oletettu useiden raporttien tavoin, että polttoaineen kokonaiskulutuksessa nähdään loivaa laskua vuoteen 2050. Tämä on seurasta ilma-alusten tehokkuuden parantumisesta ja kysynnän hallinnasta.



Kuva 17. EU:n lentoasemilla myytävän polttoaineen kokonaisvolyymi ja jakauma 2023-2050 RefuelEU Aviation -asetuksen jakeluvälvoiteen mukaisesti arvioituna.

ReFuelEU Aviation -asetuksen velvoitteiden täytyessä EU:n lentoasemilla jaeltaisiin vuonna 2050 n. 22 Mt biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita. Todellinen määrä voi olla tätäkin suurempi, mikäli lentopolttoaineen kokonaiskulutus kasvaa. Mielenkiintoista on, että tämä luku on huomattavasti suurempi kuin Destination 2050 -tiekartassa arvioitu biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tarve, 13 Mt (NLR, 2021). Tämä 13 Mt polttoainemäärän ennakoitiin vaativan 4–12 % EU:n kestävästi tuotettavasta biomassasta. Luvun lähes tuplaantuessa velvoitteen myötä lentoliikenne voi vaatia esitettyä enemmän biopohjaisia kestäviä lentopolttoaineita tai kysyntää on täytettävä tuonnilla.

Koska ReFuelEU Aviation -asetuksen mukainen velvoite on jakeluvälvoite eikä sekoitevelvoite, on polttoaineenjakeilijoilla joustonvaraa missä kestävää lentopolttoainetta jaellaan. Sekoitevelvoitteessa jokaisessa jaellussa polttoainelitrassa olisi oltava velvoitteen osoittama määrä uusiutuvaa lentopolttoainetta. Jakeluvälvoitteessa riittää, että jakelijat jakelevat vuositasolla velvoitteen osoittaman määrän kestäviä lentopolttoaineita kaikesta myymästään lentopolttoaineesta.

Näin ollen jakeluvälvoite voidaan täyttää tarjoamalla kestäviä lentopolttoaineita vain keskeisillä lentoasemilla. ReFuelEU Aviation -asetus koskee kaikkia yli 800 000 vuosittaisen matkustajan lentoasemia, mutta velvoitteen täyttämiseen voidaan päästä tankkaamalla valtaosa polttoaineista yksittäisillä, suurilla lentoasemilla. Haastatteluissa nousi esille, että kestävien lentopolttoaineiden jakelu painottunee erityisesti niiden lentoasemien läheisyyteen, joiden ympäristöön on myös sijoittunut kestävien lentopolttoaineiden tuotantoa.

6.3 Kestävien lentopolttoaineiden hinnat

Tällä hetkellä fossiilinen lentopetroli maksaa maailmanmarkkinoilla noin 600 € tonnilta eli noin 0,5 €/litra. Litrahintaan vaikuttaa mm. maailman öljymarkkinoiden tila. Kestävät lentopolttoaineet puolestaan maksavat 1,5–6-kertaisesti eli noin 0,7 €/l – 3,0 €/l. (EASA, 2023a) Hinnalla on luonnollisesti vaikutuksia kestävien lentopolttoaineiden yleistymiseen, minkä seurauksena mm. Yhdysvalloissa on tarjottu verohyvityksiä kestävien lentopolttoaineiden käyttöön.

Kestävien lentopolttoaineiden hintoihin vaikuttavat lukuisat tekijät niin tuotannon kuin kysynnän puolella. Tällä hetkellä kysyntäpaine on kasvamassa ja huoli on, että tuotantovolyymit eivät pysy perässä. Tällöin hintataso voi todennäköisemmin pysyä korkeammalla ja pidempään. Kestävien lentopolttoaineiden kustannuksiin vaikuttavat useat tekijät, joiden koonti on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden hintaan vaikuttavia tekijöitä ja asiantuntija-arvio kehityksestä.

Tekijä	Arvio kehityksestä
Raaka-aineiden saatavuus ja hinta	Biotalouden kasvu voi parantaa raaka-aineiden saatavuutta ja sääntely kannustaa hyödyntämään resursseja tehokkaammin.
Epävarmuus kysynnästä	Tulee todennäköisesti hälvenemään, kun sääntely ja vapaaehtoinen kysyntä kasvattavat kestävien lentopolttoaineiden kysyntää.
Tuotantoprosessien teknologinen kypsyys	HEFA on teknologisesti hyvin kypsää teknologiaa ja tarjontapalettia täydentävät lähitulevaisuudessa skaalautuvat FT sekä AtJ-tuotantoprosessit.
Tuotantokustannusten epävarmuus	Uudet tuotantolaitokset vaativat merkittäviä investointeja. Laitoksiin tarvitaan sekä yksityistä että julkista rahoitusta. Uusimpien tuotantoprosessien hiominen vaatii myös aikaa. Mitä enemmän uusia tuotantolinjoja saadaan käyntiin, sitä pienemmäksi epävarmuudet muodostuvat.
Hiilen hinnoittelu	Fossiilisten polttoaineiden hinnan nousu voi kannustaa kehittämään kestävämpiä tuotantopolkuja, mikä voi skaalata tuotantoa ja alentaa kustannuksia.
Kilpailu muiden liikennemuotojen kanssa	Erityisesti HEFA-polttoaineista kilpailevat niin tie- kuin lentoliikenne. Tieliikenteen polttoaineiden valmistaminen on edullisempaa kuin lentopolttoaineiden. Tieliikenteen sähköistymiskehitys voi olla eduksi lentopolttoaineiden tuotannolle.
Julkiset tuet	Joissakin maissa kestävät lentopolttoaineet saavat merkittäviä julkisia tukia, mikä alentaa niiden tuotannon ja tätä kautta käytön kustannuksia. Siirtymävaiheessa tuet ovat perusteltuja, mutta julkinen tuki tuskin on pitkän aikavälin ratkaisu.

Poikkeuksellisen monien epävarmuustekijöiden vuoksi hintaennusteiden tekeminen on hyvin haastavaa. ICAO ja Eurocontrol ovat tehneet omat arvionsa kestävien lentopolttoaineiden tulevaisuuden hinnasta, jotka on esitetty taulukossa 16. Vuoden 2030 arvioitu hintataso perustuu pitkälti HEFA-polttoaineisiin, jotka ovat tällä hetkellä edullisimpia biopohjaisista kestävästä lentopolttoaineista. Vuonna 2050 hintaennusteissa nähdään jopa nousua, mikä perustuu kysynnän merkittävään kasvuun.

Taulukko 16 Kestävien lentopolttoaineiden hintakehityksen arviot. (Philippe A. Bonnefoy, 2022), (Eurocontrol, 2022)

Arvion tekijä	2030	2050
ICAO	0,63–0,73 €/l	0,75–1,2 €/l
Eurocontrol	Arvio vuodelle 2025: 0,75 €/l - 1,1 €/l (kestävien lentopolttoaineiden osuus polttoaineista 4–10 %)	0,8 €/l - 1,1 €/l (kestävien lentopolttoaineiden osuus polttoaineista 50–88 %)

Kestävän lentopolttoaineen käytön vaikutukset lentolippujen hintoihin

Polttoaineen hinnan osuus lentoyhtiön operatiivista kuluista vaihtelee 10–30 % välillä. Hinnan nousulla on siis matalakatteisella alalla hyvin todennäköisesti vaikutuksia lentolippujen hintoihin. ICAO:n arvioiden mukaan keskimääräinen lentolipun hinta oli 140–160 dollaria vuonna 2020. Tällaisen lipun hinta nousisi kestävien lentopolttoaineiden käytön skenaariosta riippuen 3–14 \$ vuonna 2030 ja 13–38 \$ vuonna 2050. Korkein hinnannousun arvio perustuu skenaarioon, jossa 100 % käytettävästä lentopolttoaineesta korvataan kestäville lentopolttoaineilla jo vuodesta 2040 alkaen. (Philippe A. Bonnefoy, 2022)

6.4 Lentoyhtiöt ja kestävät lentopolttoaineet Suomessa

Lentoyhtiöiden näkökulmasta on huomattava etu, että kestävät lentopolttoaineet soveltuvat sekoitettuna fossiiliseen lentopetrolisiin kaikkiin käytössä oleviin lentokoneisiin. Näin lentoyhtiöt voivat vähentää hiilidioksidipäästöjään ja muita päästöjään jo nykyisellä kalustolla, sillä lentokoneiden käyttöikä on usein 20–30 vuotta tai enemmänkin. 2020-luvulla hankitussa kalustossa on teknistä käyttöikää pitkälle 2040-luvun puolelle.

Finnair

Vuonna 2023 Finnair käyttää vähintään 1 200 tonnia (alle 0,2 % koko polttoaineenkulutuksesta) kestävästä lentopolttoainetta, mikä vastaa 630 lentoa Helsingin ja Tukholman välillä. Osan tästä määrästä, 750 tonnia, yhtiö on ostanut Nesteeltä ja se on ollut toistaiseksi suurin yksittäinen kestävästä lentopolttoaineen hankintaerä. Tästä 500 tonnia on jo allokoitu kaikille lipputyypeille: jokaista Finnairin ja Norran liikennöimää lentolippua kohden yhtiö käyttää pienen summan kestävästä lentopolttoaineen ostamiseen. Tällä hetkellä kestävästä lentopolttoaineeseen käytettävä määrä on noin 0,20 € lentolippua kohden, mikä sisältyy lipun hintaan. Tämä tieto näkyy asiakkaalle itse lipulla. (Finnair, 2023)

Jäljelle jäävä 250 tonnia on varattu vapaaehtoisiin ostoihin. Finnair tarjoaa kaikille asiakkailleen mahdollisuutta ostaa kestävästä lentopolttoainetta. Tämän lisäksi yritysasiakkaille on tarjolla erillinen palvelu, jossa asiakas saa todistuksen liikematkustukseen liittyvistä hiilidioksidipäästöjen vähennyksestä kestävästä lentopolttoaineen käytön kautta. Yritykset ovat osoittaneet kasvavaa kiinnostusta mahdollisuutta kohtaan. Viime vuonna 2022 yhtiön asiakkaat ostivat vapaaehtoisesti 629 tonnia kestävästä lentopolttoainetta. Tänä vuonna tämä määrä tulee kasvamaan. (Finnair, 2023)

Edellä mainitun 750 tonnin lisäksi yhtiö käyttää erilaisten käyttövelvoitteiden kautta 450 tonnia kestävästä lentopolttoainesta lennoillaan. Käyttövelvoitteita on käytössä mm. Ruotsissa, Norjassa ja Ranskassa. (Finnair, 2023)

Päästövähennystavoitteet ja keinot

Finnair tavoittelee lentämisen hiilineutraaliutta vuoteen 2045 mennessä. Finnair sitoutui huhtikuussa 2022 tekemään yhteistyötä Science Based Targets -aloitteen (SBTi) kanssa saattaakseen päästötavoitteidensa Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaisiksi. SBTi edellyttää, että lentoyhtiöt vähentävät päästöjä omalla toiminnallaan, joten se ei huomioi toimialan ulkopuolisia päästöhyvityksiä tai muita markkinapohjaisia mekanismeja, kuten päästökauppajärjestelmää. SBTi:n vaatimusten mukaisesti yhtiö keskittyy siis vähentämään lentokoneidensa suoria päästöjä. Tämä edellyttää merkittäviä toimenpiteitä Finnairin lentokoneistonsa uudistamiseksi, toiminnan tehostamiseksi ja uusiutuvien lentopolttoaineiden käytön lisäämiseksi. (Finnair, 2023)

Yhtiön mukaan kestävästä lentopolttoainesta tulevat olemaan uuden lentokoneteknologian rinnalla merkittävin lentoliikenteen todellisia päästöjä vähentävä toimi. Finnair on mukana oneworld-allianssin pyrkimyksessä tankata 10 % uusiutuvaa lentopolttoainetta vuonna 2030. Tämä tulee olemaan haastavaa ja lentoyhtiöt eivät yksin pysty sen toteutumista varmistamaan, vaan tarvitaan laajaa sidosryhmäyhteistyötä niin rahoittajien, poliittisten päättäjien, teknologioiden kehittäjien, tuottajien ja loppukäyttäjien välillä. (Finnair, 2023)

Lentoyhtiölle ei ole sinänsä väliä, millä menetelmällä lentopolttoaineet on valmistettu. Tärkeää on, että polttoaine on valmistettu kestävästi ja yleisesti kestäviksi luokitelluista raaka-aineista, polttoainetta on saatavilla ja että sen hinta on kilpailukykyinen. Yhtiö näkee, että kestävästä lentopolttoainesta tullaan tarvitsemaan suuret määrät. Monimuotoisen raaka-ainepohjan hyödyntäminen vaatii monipuolista teknologioiden hyödyntämistä. (Finnair, 2023)

Haasteet

Finnairin arvion mukaan kestävästä lentopolttoaineesta kysyntä tulee kasvamaan mm. vuonna 2025 alkavan EU:n käyttövelvoitteen ja monien yritysten ja yhteisöjen vapaaehtoisten ilmastotavoitteiden kautta. Iso kysymys hinnanmuodostuksen kannalta tulee olemaan uusiutuvan polttoaineen tuotantoon tarvittavien raaka-aineiden saatavuus ja riittävyys, uusiutuvan energian hinta sekä tuotantoteknologioiden kypsyminen. (Finnair, 2023)

Kestävä lentopolttoaine on edelleen 2–5 kertaa kalliimpaa kuin fossiilinen lentopetroli. Eri sidosryhmien mahdollisuuksia tämän ns. preemion rahoitukseen tulisi parantaa esimerkiksi luomalla kansainvälinen standardi, jolla luodaan pelisäännöt kestävien polttoaineiden päästövähennysten jakamiselle, raportoinnille ja myymiselle. Näin helpotettaisiin myös korkean preemion kustannusten jakamista. Tällä hetkellä tähän liittyviä järjestelmiä luonnostele useampi erillinen yhteisö, joilla on erilaisia näkökulmia aiheeseen (coSAFA, WEF SAFc, RSB Book & Claim). Nopeasti kasvavaan kysyntään ja kehittyvään markkinaan liittyy huoli siitä, että globaaleille markkinoille voi ilmaantua puutteellisen kestävyysvarmennuksen takia monen laatuista kestävästä lentopolttoainesta. RefuelEU Aviation -asetus vastaa kuitenkin harmonisoitujen pelisääntöjen ja kestävyyskriteerien avulla tähän EU:n osalta. (Finnair, 2023)

Havainnot sääntelystä

Finnairin mukaan päästökauppalainsäädäntö mahdollistaa kestävästä lentopolttoaineesta käytön raportoinnin nollapäästöisenä. Lainsäädäntö ei kuitenkaan tällä hetkellä näytä olevan linjassa RefuelEU Aviation -asetuksen sisältävien kestävyyskriteerien kanssa eikä päästökauppalainsäädäntö sisällä yksiselitteisiä määräyksiä nollapäästöisen kestävästä

lentopolttoaineen määrittämiseksi. Nykyisellään on tulkittavissa, että ETS mahdollistaa laajemman raaka-ainepohjan kuin mitä RefuelEU Aviation -asetus sallii. (Finnair, 2023)

Yhtiön mukaan on tärkeää, että lentoliikenne lisätään EU taksonomian piiriin. Toimiala on pääomaintensiivinen ja riippuvainen ulkopuolisesta rahoituksesta. Lentoyhtiöiden eurooppalainen edunvalvontajärjestö A4E on arvioinut, että eurooppalaiset lentoyhtiöt tarvitsevat yhteensä n. 820 miljardia euroa teknologiseen siirtymään, jotta yhtiöt saavuttaisivat kollektiivisesti asettamansa hiilineutraaliustavoitteen vuoteen 2050 mennessä. Rahoitusta tarvitaan mm. sekä laivaston uusimiseen että uuden teknologian ja kestäväen lentopolttoaineen hankkimiseen. Siirtymä on mahdollinen ainoastaan, jos sektorilla on pääsy kohtuuhintaiseen julkiseen ja yksityiseen rahoitukseen. (Finnair, 2023)

Taksonomiassa lentoliikenteelle esitettyjen kriteerien yhtiö arvioi olevan varsin kunnianhimoisia, ellei jopa epärealistisia. Kestäväen lentopolttoaineen käytölle asetetut kriteerit eivät ole linjassa RefuelEU Aviation -asetuksen käyttövelvoitteen kanssa. Ei ole nähtävissä, että kestävää lentopolttoainetta olisi lähivuosina saatavilla kilpailukykyiseen hintaan esitettyjen kriteerien edellyttämässä määrin. Lisäksi kyseenalaistetaan, ettei lentoyhtiön laivasto saisi kasvaa. Merkityksellistä tulisi olla päästöjen vähentäminen, ei lentoliikenteen kasvun rajoittaminen. (Finnair, 2023)

Finnair pitää tärkeänä, että sekä EU:n että kansallisella tasolla tehdään toimia ns. vihreän siirtymän mahdollistamiseksi. EU-tasolla kestäväen lentopolttoaineiden kehittäminen tulisi lisätä NZIA:n (Net Zero Industry Act) strategisten nettonolla-teknologioita listaavaan liitteeseen. Lisäksi EU-tasolla tulisi Green Deal Industry Planin puitteissa kehittää uskottava kestävien lentopolttoaineiden insentiivijärjestelmä, joka vetäisi vertoja USAn:n IRA:n tukimekanismille. (Finnair, 2023)

Keinot kestävien lentopolttoaineiden käytön edistämiseksi

Lentoyhtiöt voivat pyrkiä tekemään tulevaisuuteen luotaavia ostosopimuksia tuotannon käynnistämisen varmistamiseksi. Oneworld-allianssi on erittäin aktiivinen parantamaan lentämisen kestävyttä, niin sosiaalisen kuin ympäristövastuun osalla. Allianssin jäsenet tekevät yhteistyötä löytääkseen hyviä ostosopimuksia kestävien lentopolttoaineiden toimittajien kanssa ympäri maailmaa. Näistä kaksi ensimmäistä konkretisoitunutta sopimusta ovat Aemetiksen ja Gevon kanssa. Yhteisostoilla ja osaamisen jakamisella Finnair pyrkii löytämään ne paikat maailmalta, joissa on potentiaalia tankata, nostaa tuotantokapasiteettia ja tarjota kilpailukykyinen hinta. Tällä hetkellä kilpailukykyiseen hintaan vaikuttaa erittäin paljon paikallisten yhteisöjen halu tukea ja kannustaa vihreää energiasiirtymää. Tuotannon ja käytön tukijärjestelmät voivat vaikuttaa kestäväen polttoaineen hintaan siten, että vapaaehtoisien kestävien polttoaineiden kysyntä kohdistuu EU-alueen ulkopuolelle. (Finnair, 2023)

Näkemykset Suomen markkinasta

Yhtiö toivoo löytävänsä mahdollisuuden lisätä kestävien polttoaineiden tankkausta myös kotikentällään Helsinki-Vantaalla. Yhtiö pitää tavoiteltavana, että Suomessa olisi jatkossa kestävien lentopolttoaineiden tuotantoa, ja että investoinnit synteettisen polttoaineen tuotantoon Suomessa suuntautuisivat myös synteettisten lentopolttoaineiden tuotantoon. Kotimainen tuotanto vähentäisi myös polttoaineen elinkaaripäästöjä. (Finnair, 2023)

Finnairin arvion mukaan kestävien lentopolttoaineiden käytön tukemisella erityisesti lentoyhtiöiden hub-lentoasemilla tulee olemaan vaikutus yhtiöiden keskinäiseen kilpailuasetelmaan ja tasapuolisiin toimintaedellytyksiin. Finnairilla on moneen muuhun

eurooppalaiseen lentoyhtiöön verrattuna suuremmat kustannukset syrjäisistä markkinoista ja pidemmistä EU:n sisäisistä lennoista johtuen. Yhtiö pitää tärkeänä, että lentoliikenteen päästökaupan huutokauppatulot kierrätetään takaisin lentoliikennesektorille esim. kestävän lentopolttoaineen käytön lisäämiseksi kattamalla sen hintaeroa fossiiliseen polttoaineeseen Helsinki-Vantaan lentoasemalla tehdyistä kestävästä lentopolttoaineen hankinnoista. (Finnair, 2023)

Päästökaupan ilmaisten päästöoikeuksien jako päättyy kokonaan vuonna 2026. Suomen valtion lentoliikenteen huutokauppatulojen arvioidaan karkeasti voivan tuolloin olla jopa 45 MEUR. Samaan aikaa Suomen lentoliikenteelle (käytännössä Finnair) päästökaupasta aiheutuva vuosittainen kulu arvioidaan olevan yli 100 MEUR. (Finnair, 2023).

AirBaltic ja SAS

AirBalticin Suomen tukikohta sijaitsee Tampere-Pirkkalan lentoasemalla, joista yhtiö tarjoaa suoria lentoja keskeisiin Euroopan hubeihin. AirBaltic on tarjonnut toukokuusta 2023 lähtien matkustajilleen mahdollisuuden lisätä vapaaehtoisesti pienen määrän, noin kilon, kestäväää lentopolttoainetta lennoilleen. Yhtiön mukaan yksi kilo SAF-polttoainetta tuottaa jopa 80 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä verrattuna samaan määrään fossiilisia polttoaineita. Kestävän lentopolttoaineen oston voi tehdä lentolipun varauksen yhteydessä. Tämän hinta per henkilö per lento on economy-luokassa 2,99 euroa ja bisnesluokassa 4,99 euroa. Yhtiö ostaa lentopolttoaineen 12 kuukauden kuluessa varauksesta. (AirBaltic, 2023)

SAS lentää suoria lentoja Helsinki-Vantaalta Tukholmaan. Yritys tarjoaa yritysasiakkailleen mahdollisuuden ostaa haluamansa määrän kestäväää lentopolttoainetta, riippuen yrityksen omista päästövähennystavoitteista. SAS:n asiakkaista, logistiikkayritys DSV oli ensimmäinen tanskalainen yritys, joka on sitoutunut ostamaan kaikille vuoden 2023 yrityslennoilleen kestäväää lentopolttoainetta. (SAS, 2023)

6.5 Lentoasemat ja kestävät lentopolttoaineet Suomessa

Suomen lentoasemista vain Helsinki-Vantaalla tarjotaan kestävään lentopolttoaineen sekoitetta. Suomessa lentoasemien lentopolttoaineiden jakeluvalmiudesta vastaavat polttoaineyhtiöt, joilla on jakeluaseman lupa- ja hallintarooli. Suomessa lentoasemilla ei ole roolia lentopolttoaineen toimitusketjussa lukuun ottamatta sitä, että lentoasemat vuokraavat maa-alueet öljy-yhtiöiden paikallisia varastoja varten ja sallivat turvallisuussäätöjen mukaisesti tehtävät lentokoneiden tankkaukset alueellaan. (Finavia, 2023)

Polttoaineyhtiöt solmivat jakelusopimukset lentoyhtiöiden kanssa. Tankkaus tapahtuu lentoasemilla polttoaineautoilla, jotka tankataan lentoasemilla sijaitsevista polttoaineyhtiöiden lentopolttoainevarastoista. Helsinki-Vantaan lentoasemalla on kolme lentopolttoaineen jakelijaa: Neste, AirBP ja Shell. Verkostolentoasemilla lentopolttoaineiden jakelusta vastaavat Neste, Shell, AirBP sekä JoenService. (Finavia, 2023)

Lentoasemilla voidaan hyödyntää olemassa olevaa lentopolttoaineen jakelujärjestelmää kestävien lentopolttoaineiden jakeluun, kunhan sekoitussuhde on vaatimusten mukainen. 100-prosenttista kestäväää lentopolttoainetta ei vielä jaella, sillä sille sertifioituja lentokoneita ei vielä ole olemassa. Finavian mukaan on mahdollista, että 100-prosenttinen kestävä lentopolttoaine voi vaatia uuden jakeluinfrastruktuurin, mutta tämä riippuu lopulta lentoalan päätöksistä. Tulevaisuudessa myös vety ja sähkö vaatisivat uutta infrastruktuuria, joten infra saattaa vaihdella lentoasemittain käyttötarkoituksen mukaan. Riippumatta käyttövoimasta, investointitarve lentokoneiden tarvitsemaan sähkö- ja vetyinfraan voi suurimmilla lentoasemilla olla miljoonia per lentoasema. (Finavia, 2023)

Tuleva ReFuelEU Aviation -asetus velvoittaa lentopolttoaineen jakelijoita ja lentoyhtiöitä raportoimaan kestävien lentopolttoaineiden käytöstä. Lentoasemien kohdalla todetaan, että niiden on edesautettava toimenpiteitä, jotta polttoaineyhtiöt voivat toimittaa lentoyhtiöille asetuksen mukaisesti kestäviä lentopolttoaineita. Asetusteksti viittaa tilanteisiin, joissa polttoaineen jakelu- ja tankkausinfra on lentoaseman hallinnoima, mikä on tilanne monilla eurooppalaisilla lentoasemilla. Finavia ei kuitenkaan vastaa teknisesti lentopolttoaineiden jakelusta, vaan vastuu on polttoaineyhtiöillä. (Finavia, 2023)

Osana ReFuelEU Aviation -asetusta on tulossa ns. joustomekanismi (flexibility mechanism), joka tämän hetken ymmärryksen mukaan voisi johtaa väliaikaisesti tilanteeseen, jossa esimerkiksi Helsinki-Vantaalla ei tarvitsisi tankata kestäviä lentopolttoaineita lainkaan. Joustomekanismin vuoksi vaadittu kestävä lentopolttoaineen osuus voitaisiin jaella suurimmilla Euroopan lentoasemilla, jolloin sitä ei välttämättä päätyisi keskisuurille ja pienille lentoasemille ollenkaan (Neste, 2023).

Finavian arvion mukaan markkinat säätelevät optimaaliset tankkauspaikat, jolloin siellä missä kestäviä lentopolttoaineita on halvin tuottaa, siellä ne myös todennäköisesti jaellaan (Finavia, 2023). Tämä voisi myös vähentää kustannuseroa kestävien ja fossiilisten aineiden välillä, ja edistäisi kestävien lentopolttoaineiden käyttöä. Esimerkiksi Rotterdamiin on keskittymässä suuri määrä biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotantoa, joten merkittävä osuus jakeluvaiheesta voitaneen tankata esimerkiksi Schipholin lentoasemalla.

Joustomekanismi vaikuttaisi lentoasemien mahdollisuuteen pienentää lentoaseman Scope 3 -päästöjä eli muiden lentoliikenteen arvoketjussa toimivien osapuolten päästöjä. Neste on ehdottanut ratkaisuksi liikennöintimaksujen modulointia. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että enemmän saastuttavat yhtiöt maksaisivat suurempia liikennöintimaksuja kuin vähemmän saastuttavat. Tämä kannustaisi lentoyhtiöitä käyttämään kestävää lentopolttoainetta, jolloin myös lentoasemien raportoimat nousun, rullauksen ja laskun aikaiset Scope 3 -päästöt pienenisivät. Rullausajat ja käytetty lentopolttoaineen laatu vaikuttavat merkittävästi myös paikalliseen ilmanlaatuun. Lentoasemamaksujen mukauttaminen yleistä etua koskevissa asioissa, mukaan lukien ympäristökysymykset, on sallittu lentoasemamaksuista annetussa direktiivissä 2009/12/EY. (Neste, 2023)

Liikennöintimaksujen modulaatio ei välttämättä lisäisi lentoasemayhtiön taloudellista taakkaa, koska liikennöintimaksut maksavat lentoyhtiöt. Siksi sitä voidaan pitää "saastuttaja maksaa" -mekanismina. (Neste, 2023) Modulaatio voisi kannustaa laajentaman kestävien lentopolttoaineiden käyttöä kaikenkokoisilla lentoasemilla Suomessa. Modulaatiomaksut ovat käytössä Ruotsissa Arlandan ja Göteborgin lentoasemilla.



Modulaatiomaksut Ruotsissa

Swedavialla on käytössä lentokone-/moottorityyppiin ja kestävä lentopolttoaineen prosenttiosuuteen perustuva modulaatiomaksu, joka on varattu lennoille, jotka saapuvat tai lähtevät Arlandasta tai Göteborgista. Osuus lasketaan kyseisen lennon suorittamiseen tarvittavalla matkapolttoainemäärällä. Swedavia käyttää uusiutuvan lentopolttoaineen prosenttiosuutta laskeakseen laskunousu-syklin (LTO) päästövähennyksen, jolloin tätä pidetään Scope 3 -päästövähennyksenä Swedavian vastuullisuusraportoinnissa. (Swedavia, 2023)

Finavian mukaan maksujen modulointi edellyttäisi merkittävää lisäraportointia lentoyhtiöltä lentoasemalle ja lisäksi liikennemaksujen monimutkaisuutta, koska maksut olisi tasapainotettava käyttäjien kesken, jotta kyse ei olisi ei-sallitusta haittamaksusta. EU Refuel Aviation astuu voimaan jo 2025 alusta lukien, eikä modulaatiolla tällöin enää saavutettane merkittävää vaikutusta kestävien lentopolttoaineiden käyttömääriin. (Finavia, 2023)

Suomalaiset toimijat pitävät kuitenkin tärkeänä, että myös Suomessa olisi mahdollista tankata kestäviä lentopolttoaineita. Vaikka Suomen markkinat ovat pienet, olisi kestävä kehityksen mukaista tuottaa kestävät lentopolttoaineet mahdollisimman lähellä jakelua. Tämä pienentäisi myös lentopolttoaineiden toimitusketjun päästöjä. Vaikka kestävien lentopolttoaineiden jakelu nostaa lentopolttoaineen keskikustannusta lentoasemalla ja vähentää näin lentoaseman kilpailukykyä, olisi imagonäkökulmasta hyödyllistä, että lentoasemalla voidaan tankata kestävää lentopolttoainetta. (Finavia, 2023)

7 Johtopäätökset

Luvun keskeinen sisältö

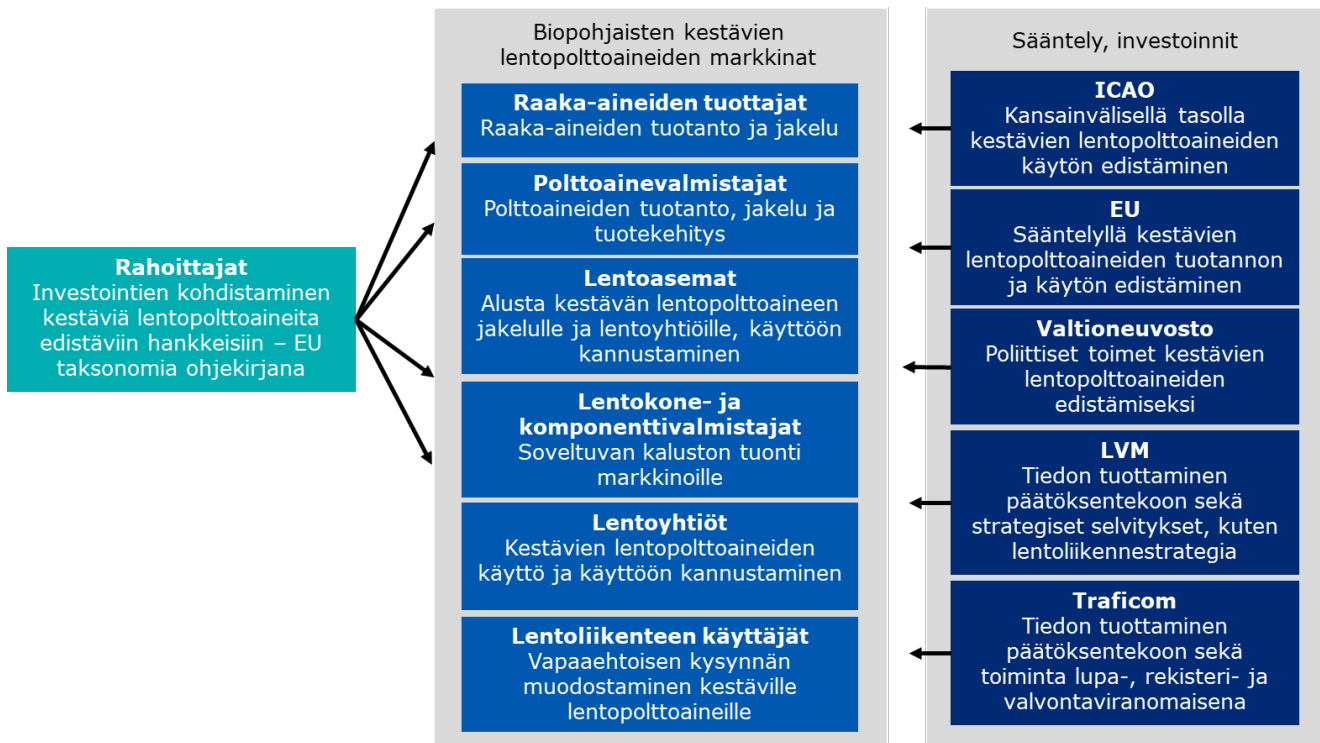
- Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden rooli kasvaa lentoalan päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi.
- Kehitys vaatii toimialat ylittävää yhteistyötä julkisen sektorin ja yksityisen sektorin välillä.
- Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden raaka-aineet eivät todennäköisesti ole pulonkaulana
- Pelkästään Euroopassa tarvitaan yli 100 uutta kestävien lentopolttoaineiden tuotantolaitosta ReFuelEU Aviation -asetuksen tavoitteiden täyttämiseksi.
- Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet ovat tärkeä ratkaisu siirtymävaiheessa puhtaampiin käyttövoimiin. Synteettisten lentopolttoaineiden rooli kasvaa ajan myötä, sillä niiden tuotantoa eivät ensisijaisesti rajoita raaka-aineet.

Tässä luvussa esitetyt johtopäätökset perustuvat kirjallisuuteen, toimijahaastatteluihin ja raportin kirjoittajien pohdintoihin.

7.1 Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tulevaisuus

Markkinaa kasvatettava laajassa yhteistyössä

Lentoalan eri instanssien tavoitteiden sekä toimijahaastattelujen perusteella biopohjaisilla kestäville lentopolttoaineille tulee olemaan merkittävä rooli kansainvälisessä siviili-ilmailussa lyhyellä ja pitkällä tähtäimellä. Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet ovat tällä hetkellä tehokas ja nopea keino vähentää lentoliikenteestä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä ja ilmastovaikutusta. Niiden käyttöönotto vaatii kuitenkin hyvin laajaa yhteistyötä polttoainevalmistajien, lentokone- ja komponenttivalmistajien, lentoyhtiöiden, lentoasemien, rahoittajien ja julkisten organisaatioiden välillä. Oheisessa kuvassa 18 on esitetty eri toimijoiden roolit biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistämisen näkökulmasta.



Kuva 18. Keskeiset toimijat ja roolit biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden edistämiseksi.

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden raaka-aineet eivät todennäköisesti ole pullonkaula

Euroopassa on tutkimusten mukaan lentoliikenteen tarpeisiin riittävästi bioraaka-aineita, kuten metsä- ja maatalouden sivuvirtoja, yhdyskuntajätettä sekä käytettyjä paisto- ja eläinrasvoja, joilla voidaan todennäköisesti vastata vuoden 2050 tavoitteisiin. Lentoliikenne tarvitsee EU-alueella ainakin 4–12 % saatavilla olevasta kestävästi tuotetusta biomassasta (NLR, 2021). Tämä on arvioiden mukaan realistinen tavoite. Raaka-aineiden riittävyys ei siis välttämättä asetu haasteeksi, vaan se, saadaanko raaka-aineita tuotantoa ja jakelua kaupallistettua ja skaalattua kestäväällä tavalla. Haasteena on myös kiristyvä kilpailu raaka-aineista, minkä seurauksena raaka-aineita tuodaan hyvin todennäköisesti myös muilta markkina-alueilta.

Tuotantolaitoksia tarvitaan huomattavat määrät

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden tuotantomäärien tulee kasvaa merkittävästi, jotta tavoitteisiin päästään. Pelkästään Euroopassa tarvitaan yli 200 uutta tuotantolaitosta vuoteen 2050 mennessä, jotta kysyntään voidaan vastata (SkyNRG, 2023). Uusien tuotantopolkujen kulku laboratoriosta kaupallisesti skaalautuvaan tuotantoon voi kuitenkin kestää 10–20 vuotta, joten nopeita toimia tarvitaan. Tämän vuoksi on äärimmäisen tärkeää, että investoinneille on selkeä näkymä ja ne saavat rahoitusta. EU:ssa ReFuelEU Aviation -asetuksella ja taksonomialla pyritään luomaan edellytyksiä tuotantolaitosten rakentamiselle.

Säätely ja kansainvälisen kilpailun näkökulma

Työn aikaisissa haastatteluissa nousi esille kansainvälinen säätely- ja investointikenttä ja sen epätasapaino. ReFuel Aviation -asetusta pidetään hyvänä avauksena, mutta sekään ei suoraan ratkaise kansainvälistä kysymystä. Tämän lisäksi käytössä on kansainvälinen CORSIA-järjestelmä, joka ei kuitenkaan käytännössä velvoita vähentämään lentämisen hiilidioksidipäästöjä, mutta toki kannustaa taloudellisesti siihen.

Huolta herättävät Yhdysvaltain merkittävät tuet kestävien lentopolttoaineiden tuotantoon ja käyttöön. Tämä voi vääristää markkina-asetelmaa nykyisessä toimintaympäristössä ja voi pahimmillaan ohjata tuotantoa pois Euroopasta. Tämän lisäksi Lähi-Idässä on omat pelisääntönsä, ja Aasian markkinassa kansalliset tuet voivat myös näytellä merkittävää roolia. Paljon odotuksia ladataan Euroopan omalle teollisuuden investointiohjelmalle, Green Industry Planille.

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden rooli kansainvälisissä päästövähennystavoitteissa

IATA:n arvion mukaan ilmailualan vuoden 2050 hiilineutraaliustavoitteesta 65 % voidaan saavuttaa kestäville lentopolttoaineilla. IATA ei erottele biopohjaisten ja synteettisten kestävien lentopolttoaineiden osuuksia, mutta työssä kerättyjen tietojen perusteella voidaan olettaa, että synteettisten lentopolttoaineiden osuus on biopohjaisia suurempi. IATA:n arvioissa lentoliikenne jatkaisi kasvuaan ja kestävien lentopolttoaineiden tarve olisi 449 mrd. litraa eli noin 65 % kaikesta lentopolttoaineen tarpeesta. IATA:n skenaariossa lentoliikenne siis tuplaantuisi nykyisestäään, sillä vuonna 2019 globaali lentoliikenne käytti yhteensä 363 mrd. litraa lentopolttoainetta. (IATA, 2023)

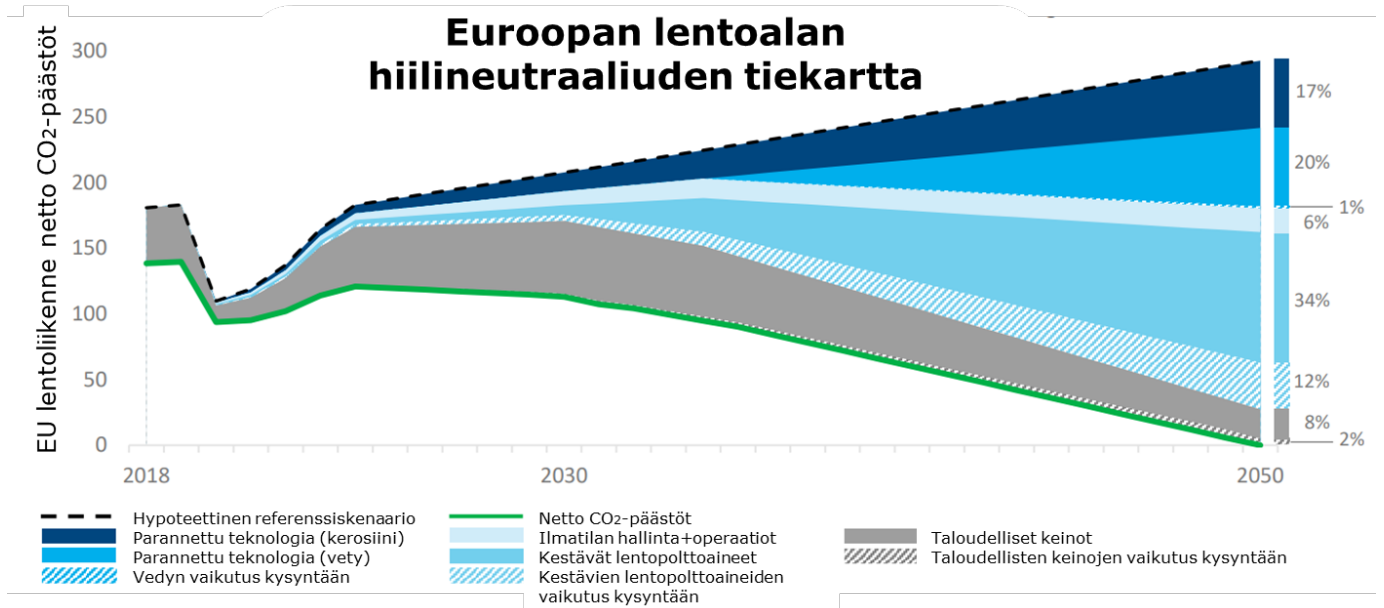
Air Transport Action Group:n valmistelemassa kansainvälisen lentoliikenteen Waypoint 2050-hiilineutraaliustavoitteessa kestävien lentopolttoaineiden rooli päästövähennyksissä vaihtelee 53 % ja 71 % välillä (ATAG, 2021b). Raportti ei erottele biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden osuutta.

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden rooli Euroopan päästövähennystavoitteissa

Euroopassa lentoalan päästövähennystavoitteet eivät nojaa yhtä merkittävästi kestäviin lentopolttoaineisiin kuin globaaleissa tiekartoissa. Euroopan lentoalalla on yhteinen tavoite nimeltä Destination 2050 (Kuva 19). Tavoitteen keskeisiä toimia ovat kestävien lentopolttoaineiden, vedyn ja energiatehokkaamman kaluston kehitys. Tavoite sisältää myös oletuksen siitä, että vaihtoehtoiset polttoaineet nostavat lentämisen hintaa, mikä vähentää lentämisen kysyntää. (NLR, 2021)

Tavoite ei erottele biopohjaisten ja synteettisten lentopolttoaineiden osuuksia, mutta kuten EASA on arvioinut, biopohjaisten lentopolttoaineiden osuus kestävästä lentopolttoaineista voisi olla noin 50 % vuonna 2050 EU:n lentoasemilla. Hyödyntäen tätä tietoa, biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden osuus kaikista Euroopan lentoliikenteen hiilidioksidipäästövähennyksistä voisi olla arviolta 15–20 %. (NLR, 2021)

Destination 2050 raportissa vedyllä on muiden toimijoiden tiekarttoja suurempi rooli päästöjen vähennyksessä, mikä selittänee kestävien lentopolttoaineiden pienehkön osuuden verrattuna muihin vastaaviin tiekarttoihin. Poikkeuksellisesti raportti ottaa myös kantaa kysynnän vähenemiseen lentoliikenteen kustannusten nousun myötä.



Kuva 19. Euroopan lentoalan hiilineutraaliuden tiekartta. (NLR, 2021)

Eurocontrollin vastaavassa dokumentissa kestäville lentopolttoaineilla on skenaariosta riippuen 34–56 % osuus päästövähennystavoitteissa. Raportti ei erottele biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden osuutta eikä ota kantaa kysynnän vähenemiseen. (Eurocontrol, 2022).

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden analyysi

Biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden nykytilaa ja tulevaisuutta on analysoitu taulukossa 17 erityisesti Euroopan näkökulmasta.

Taulukko 17. Kestävien lentopolttoaineiden SWOT-analyysi.

Vahvuudet	Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> + Tällä hetkellä lentämisen vähentämisen ohella tehokkain keino vähentää nykyisenkaltaisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjä ja muita päästöjä. + Tuotantovolyymit ovat kasvaneet viime vuosina. + Sopivat sekoitettuna fossiiliseen lentopetroltiin nykyiseen kalustoon ja infrastruktuuriin. + Erinomaiset ominaisuudet lentopolttoaineena. + Teollisuuden laajuinen tahtotila edistää biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden käyttöä. 	<ul style="list-style-type: none"> – Hinta on huomattavasti fossiilista lentopetrolia suurempi. – Tällä hetkellä melko heikko saatavuus. – Raaka-aineiden kaupallistaminen vasta käynnissä ja tuotantokapasiteetti vähäistä. – Lentopolttoaineiden tuotanto kilpailee raaka-aineista muiden liikennemuotojen, energiantuotannon ja kemianteollisuuden kanssa. – Raaka-aineiden kestävyys varmistaminen: standardoitujen tuotantopolkujen ja kestävyyskriteerien kehitys onneksi käynnissä.

Mahdollisuudet	Uhat
Δ Yksi merkittävimmistä keinoista tulevina vuosikymmeninä vähentää lentoalan hiilidioksidipäästöjä. <i>Taulukko jatkuu seuraavalla sivulla</i>	▽ Lentoala luottaa siihen, että kestävät lentopolttoaineet ovat ainoa keino päästövähennyskysymyksessä, ja jättävät muut toimet vähemmälle.
Δ Erityisesti vähäaromaattisilla lentopolttoaineilla voidaan vähentää myös muita ilmastovaikutuksia merkittävästi.	▽ Syntyy kaksi järjestelmää aromaattisille kestäville lentopolttoaineille ja vähäaromaattisille lentopolttoaineille – turvallisuusriskit kasvavat.
Δ 100-prosenttisen kestävän lentopolttoaineen käyttö tulevaisuuden lentokalustossa.	▽ Tuotantopolkujen moninaisuus vaikeuttaa markkinan kehittymistä.
Δ Pitkän aikavälin ratkaisu, mikäli vetykalustoa ei saadakaan markkinoille.	▽ Tuotanto keskittyy Euroopan ulkopuolelle, mikä nostaa logistisia kustannuksia EU:n näkökulmasta. ▽ Polttoaineita tuotetaan epäkestävistä lähteistä ja valvonta vaikeutuu.

7.2 Kestävät lentopolttoaineet ja liikennejärjestelmä

Lentoliikenne ja muut liikennemuodot – miten käyttövoimat jakautuvat

Lentoala on meriliikenteen ohella yksi vaikeimmista aloista muuttaa vähäpäästöiseksi. Haasteena on, että lentoliikenne kilpailee vaihtoehtoisissa polttoaineissa samoista raaka-aineista meri- ja tieliikenteen kanssa. Sähköistyminen on sekä energiatehokkuuden että päästövähennyksien kannalta paras vaihtoehto, mutta pitkämatkaista lentoliikennettä on kuitenkin hyvin vaikeaa, ellei mahdotonta sähköistää. Tämän vuoksi biopohjaisten ja synteettisten polttoaineiden tuotantoa voisi olla kannattavaa kohdistaa lento- ja meriliikenteeseen.

Meriliikenteessä ammoniakki tai metanoli voi osoittautua kaupallisesti skaalautuvaksi käyttövoimaksi, jolloin rajallisia biopohjaisia polttoaineita voitaisiin kohdistaa enemmän lentoliikenteelle. Kevyen ja raskaan tieliikenteen sähköistyminen vapauttaisi myös tuotantokapasiteettia lentoliikenteen biopohjaisille kestäville lentopolttoaineille.

Lentoliikenne – mikä käyttövoima pitkällä tähtäimellä

Lentoliikenteessä akkusähköä rajoittavat kantama, kapasiteetti ja akkujen käyttöikä, vetyä haastava käsiteltävyys ja uuden infran sekä kaluston tarve, ja kestävässä lentopolttoaineissa marginaaliset tuotantovolyymit. Biopohjaiset kestävät lentopolttoaineet ovat kuitenkin teknologisesti kypsimpiä, ja ne soveltuvat sekoitettuna fossiiliseen lentopetroliin nykyiseen kalustoon ja infraan.

Kansainvälisissä ja EU-tason tavoitteissa korostuvat kestävien lentopolttoaineiden merkitys, mutta ovatko kestävät lentopolttoaineet vain välivaihe? Tulevaisuutta arvioitaessa on huomioitava eri käyttövoimien ominaisuudet, joita on kuvattu taulukossa 18.

Taulukko 18. Lentoliikenteen käyttövoimien vertailu.

	Biopohjaiset kestävät lentopoltto- aineet polttomootto- rissa	Synteettiset lentopoltto- aineet polttomootto- rissa	Vety polttokennos- sa tai polttomootto- rissa	Akkusähkö sähkämootto- reissa
Suorat CO ₂ - päästöt verrattuna fossiilisen lentopetroliin (Clean Sky, 2020)	-100 %	-100 %	-100 %	-100 %
Elinkaaren aikaiset CO ₂ - päästöt (LCA+ILUC) verrattuna fossiilisen lentopetroliin	Riippuu tuotantoprosessi sta. Esimerkiksi tietyillä HEFA- polttoaineilla lähes 80 %:n vähennys. (ICAO, 2023c)	Riippuu tuotantoprosessi sta. Uusiutuvalla energialla, FT- prosessilla tuotettuna 80–90 % vähennys. (ICCT, 2021)	Riippuu vedyn tuotantoprosessi n aikaisista päästöistä. Uusiutuvalla vedyllä 100 % vähennys. (Clean Sky, 2020)	Riippuu sähköntuotannon päästöistä. Uusiutuvalla energialla 100 % vähennys. (Clean Sky, 2020)
Muut päästövähennykset	Matalat aromaattisten aineiden pitoisuudet johtavat merkittävästi pienempiin nokipäästöihin ja jääkidepitoisuuksiin, josta seuraa vähemmän tiivistymisvannoja ja ilmastovaikutusta. Myös vähemmän NO _x - päästöjä, koska palamislämpötila on matalampi. (Voigt C, Kleine J, Sauer D. et al, 2021).	Matalat aromaattisten aineiden pitoisuudet johtavat pienempiin nokipäästöihin ja jääkidepitoisuuksiin, josta seuraa vähemmän tiivistymisvannoja ja ilmastovaikutusta. Palamisessa syntyy edelleen NO _x -päästöjä. (Voigt C, Kleine J, Sauer D. et al, 2021).	Polttokennossa käytettynä 75– 90 % pienemmät ilmastovaikutukset. Polttomoottorissa poltettuna 50–75 % pienemmät. (Clean Sky, 2020)	100 %, koska sähkämoottorit eivät tuota käytön aikana mitään päästöjä. (Clean Sky, 2020)

Kaupallistumisen aikatauluarvio (riittävä teknologinen, kaupallinen ja sääntelyn kypsyy s)	Sekoitteena 2020→ 100-prosenttisenä 2030→ HEFA-polttoaineet kaupallisesti kypsiä – muut tuotantotavat vaativat vielä vuosia laajaan kaupallisuuteen.	2030→ Valmistusprosessit vasta kehitymässä. Haasteena korkeat valmistuskustannukset.	2030/2040→ Tarvitsee vetytalouden laajaa kehitystä ja uusien lentokonetyyppien hyväksyntää.	2030/2040→ Edellyttää akkuteknologian kehitystä ja uusien lentokonetyyppien hyväksyntää.
Raaka-aineet ja niiden kestävä saatavuus	Kestävää biomassaa saatavilla, mutta raaka-ainemarkkinoiden ja toimitusketjujen kehitys ottaa aikansa. Raaka-aineet eivät ole rajattomia ja kestävyden varmistaminen haastavaa.	Hiilidioksidia käytännössä rajattomasti. Saatavuutta hidastaa hiilidioksidin talteenoton teknologian kehittymättömyys ja hinta. Vaatii hyvin paljon uusiutuvaa energiaa.	Vettä saatavilla lähes rajattomasti ja uusiutuvan energian määrä kasvamassa globaalisti kiihtyvällä tahdilla. Vaatii kuitenkin paljon uusiutuvaa energiaa.	Uusiutuvan energian määrä kasvamassa globaalisti kiihtyvällä tahdilla.
Tuotantokustannukset vrt. fossiilinen lentopetrolin energiamäärä	2–4 kertaa enemmän. (ING, 2023)	3–6 kertaa enemmän. (ING, 2023)	4-kertaa enemmän. (Clean Sky, 2020)	50–75 % vähemmän. (Traficom, 2022a)
Infrastruktuuri	Sekoitettuna toimii nykyisessä infrassa, 100-prosenttisenä vaatinee uuden rinnakkaisen infran.	Toimii sellaisenaan nykyisessä infrassa.	Vaatii täysin uuden nestemäiseen vetyyn soveltuvan infrastruktuurin.	Vaatii sähkölatausinfrastruktuuria tai akkujen vaihtoa.
Keskeiset tuotantotavat	HEFA, AtJ, Kaasu + FT	FT tai metanolisynteesi	Elektrolyysi	Uusiutuvan energian tuotanto ja siirto sähköverkossa

Pitkällä tähtäimellä vety ja akkusähkö ovat ilmastovaikutusten näkökulmasta kestäviä lentopolttoaineita parempia. Näissä teknologioissa tulee kuitenkin tapahtua merkittäviä kehitysharppauksia, jotta ne voisivat täysin korvata kestävät lentopolttoaineet.

Akkujen kehitys voi yllättää nopeudellaan, mutta haasteena on edelleen akkujen käyttöikä sekä se, että akkujen painoa tulee kantaa koko lennon ajan. Akkuteknologian läpimurto voisi moninkertaistaa energiatihedyet, mikä voisi avata mahdollisuuden sähköistää jopa kapearunkokoneita. Toinen merkittävä harppaus olisi nestemäiseen vetyyn pohjautuvien lentokoneiden tyyppihyväksyntä – tämä mahdollistaisi sekä kapea- että leveärunkokalustossa merkittävät päästövähennykset. Airbus ja monet muut valmistajat tavoittelevat vetykaluston tyyppihyväksyntää jo 2030-luvun puolella. Sähkö yleistyy ensimmäisenä pienessä kalustossa tarjoten uudenlaisia liikennöintitapoja, joita on arvioitu Traficom in sähköisen lentämisen selvityksessä. (Traficom, 2022a)

Kuvassa 20 on arvioitu vaihtoehtoisten käyttövoimien roolia lentoliikenteessä eri pituisilla lentomatkoilla. Arvio perustuu asiantuntija-arvioon sekä Clean Sky-selvitykseen (Clean Sky, 2020). Kuvassa on esitetty myös Eurocontrolin arviot vuonna 2020 EU:n lentoasemilta lähteneiden lentojen hiilidioksidipäästöistä ja osuudesta kaikista lennoista. Akkusähkö ja vedyn käyttäminen polttokenossa ovat potentiaalisimpia teknologioita alle 1 500 km lennoilla, jotka

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Alueellinen lentoliikenne ja lyhyet lennot < 1 500 km n. 74 % EU:n lentoasemilta lähtevistä lennoista n. 25 % CO ₂ -päästöistä	SAF	SAF	SAF Vety Täyssähkö	SAF Vety Täyssähkö	Vety SAF Täyssähkö	Vety Täyssähkö SAF
Keskipitkät lennot 1 500 – 4 000 km n. 20 % EU:n lentoasemilta lähtevistä lennoista n. 23 % CO ₂ -päästöistä	SAF	SAF	SAF	SAF Vety	SAF Vety	Vety SAF
Pitkät lennot > 4 000 km n. 6 % EU:n lentoasemilta lähtevistä lennoista n. 52 % CO ₂ -päästöistä	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF Vety	SAF Vety

SAF = sustainable aviation fuel eli kestävä lentopolttoaine (kattaa sekä biopohjaiset että synteettiset kestävät lentopolttoaineet)

Kuva 20. Arvio vaihtoehtoisten käyttövoimien yleistymisestä ja kestävien lentopolttoaineiden (SAF) roolista eri mittaisilla lennoilla, jotka lähtevät EU:n lentoasemilta. Järjestys kuvaa eri käyttövoimien osuutta. Hiilidioksidipäästöjen ja lentopituuksien jakauman lähde. (Eurocontrol, 2021)

vastaavat noin neljäsosasta hiilidioksidipäästöistä, vaikka näiden lentojen osuus on kolme neljäsosaa kaikista lennoista (Eurocontrol, 2021). Mm. Airbusin arvioiden mukaan vedyllä on myös roolinsa pidemmällä lentomatkoilla. Nämä pidemmät kantamat vaativat nykyteknologian valossa vedyn polttamista polttomoottorissa ja uusia lentokonetyyppejä.

Kokonaisuudesta huomataan, että kestäville lentopolttoaineille tulee olemaan kaikissa segmenteissä merkittävä rooli lähitulevaisuudessa. Niillä on tärkeä roolinsa myös pidemmällä tulevaisuudessa pitkien lentomatkojen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Vaikuttavuuden

näkökulmasta kestäväää lentopolttoainetta voitaisiin kohdistaa erityisesti näihin lentomatkoihin seuraavina vuosikymmeninä, ja pyrkiä edistämään sähkö- ja vetylentämistä lyhyemmällä kantamalla. Tämä näkökulma näkyy myös Euroopan lentoalan tiekartassa (kts. kuva 19). Kuvassa 20 käyttövoimien järjestys laatikossa kuvastaa kyseisen käyttövoiman yleisyyttä suhteessa muihin käyttövoimiin tarkasteltuna vuonna. Esimerkiksi vuonna 2050 alle 1 500 km lennoilla vedyn arvioidaan olevan yleisin käyttövoima, täyssähkö tämän jälkeen ja viimeisenä kestäväät lentopolttoaineet.

Sekä sähköön että vetyyn perustuva lentoliikenne edellyttää, että teknologia kehittyy suotuisasti. Mikäli vetyä ei saada syystä tai toisesta käyttöön, korvaavat kestäväät lentopolttoaineet tämän. Lentoalalla ei ole kuitenkaan varaa tai aikaa jäädä odottelemaan, vaan hiilidioksidipäästöjä on vähennettävä välittömästi. Tämän takia on hyvin todennäköistä, että kestäväät lentopolttoaineet ovat pysyvämpi osa lentoliikenteen tulevaisuutta. On myös huomioitava, että bio- ja synteettisten polttoaineiden tuotantolaitosten takaisinmaksuaika voi olla jopa 30 vuotta. Esimerkiksi 2040-luvulla perustettu AtJ-lentopolttoaineita tuottava tehdas on toiminnassa todennäköisesti vielä 2070-luvulla. Jotta tuotantoon uskalletaan investoida, on lentoalan turvattava uskottava näkymä vuosikymmeniksi eteenpäin – toivoo ei voida jättää vedyn varaan.

Biopohjaiset vai synteettiset polttoaineet

Biopohjaiset ja synteettiset lentopolttoaineet eivät poikkea merkittävästi ilmastovaikutuksiltaan, mutta synteettiset polttoaineet tuottavat enemmän NO_x-päästöjä. Synteettisten polttoaineiden tuotannon heikko hyötysuhde, korkea hinta ja osin kehittymätön teknologia puoltavat biopohjaisten lentopolttoaineiden tuotantoa lyhyellä ja keskipitkällä tähtäimellä. Tämän voi havaita myös ilmoitetuista investoinneista.

Toisin kuin biopohjaisten kestävien lentopolttoaineiden kohdalla, synteettiset polttoaineet eivät vaadi maa-alaa raaka-aineiden kasvatukseen. Ilmastonmuutoksen edetessä maapallon viljeltävät maa-alat saattavat myös pienentyä, ja metsien suojelu yleistyä, mikä vähentäisi biomassan saatavuutta. Synteettisillä polttoaineilla saatavuusriskiä tuskin on, koska hiilidioksidin kaappausteknologia kehittyy ja vihreän vedyn tuotantoon sekä uusiutuvaan energiaan ollaan panostamassa merkittävästi. Synteettisten polttoaineiden tuotanto vaatii kuitenkin valtavat määrät uusiutuvaa energiaa, mikä myös vaatii maa-alaa. Synteettisten polttoaineiden skaalautuvuus on huomattavan suuri pidemmällä aikavälillä, joten niiden rooli lentoliikenteen energiavalikoimassa kasvaneen ajan kanssa. Sama arvio kuultiin myös monilta haastatelluilta toimijoilta.

Biopohjaisten ja synteettisten kestävien lentopolttoaineiden vertailu on samankaltainen kuin kestäväät lentopolttoaineet vastaan vety -asettelussa: toinen teknologia on jo kypsää ja skaalattavaa, ja toinen vaatii aikaa. Turhien investointien riskiä tuskin on, sillä lentoliikenteen tarvitsemat polttoainemäärät ovat niin suuria, että alalla on tulevaisuudessa tarve sekä biopohjaisille että synteettisille kestäville lentopolttoaineille.

Lähdeluettelo

- AFRY. (2020). *Jakeluvelvoitteen laajentaminen*. VN/336/2020, Työ- ja elinkeinoministeriö.
- AFRY. (2020). *Uusiutuvien lentopolttoaineiden jakeluvelvoite – Nykytila ja vaikutusarvioinnit*. Valtioneuvoston selvityksiä.
- AFRY. (2021). *Liikenteen jakeluvelvoitetason nosto*. Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM): VN/13870/2021.
- Air Transport Action Group. (2023). Air Transport Action Group.
- Air Transport Action Group. (2023). *Beginner's guide to sustainable aviation fuel*. Air Transport Action Group.
- AirBaltic. (9. Syyskuu 2023). *Airbaltic*. Noudettu osoitteesta Kestävä lentopolttoaine: <https://www.airbaltic.com/fi/kestava-lentopolttoaine?country=CZ>
- Airbus. (18. Marraskuu 2022). *Airbus*. Noudettu osoitteesta Airbus A330MRTT completes first 100% SAF test flight on both engines: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-a330mrtt-completes-first-100-saf-test-flight-on-both-engines>
- Airbus. (2023). Noudettu osoitteesta Sustainable aviation fuel: <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel>
- Airbus. (Syyskuu 2023). Haastattelu.
- ASTM. (2022). *ASTM D7566-22 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*. Noudettu osoitteesta <https://www.astm.org/d7566-22.html>
- ASTM. (2023a). *ASTM D1655-22a - Standard Specification for Aviation Turbine Fuels*. Noudettu osoitteesta <https://www.astm.org/d1655-22a.html>
- ASTM. (2023b). *ASTM D4054-22 Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives*. Noudettu osoitteesta <https://www.astm.org/d4054-22.html>
- ATAG. (2021a). *TRACKING AVIATION EFFICIENCY*. Waypoint 2050.
- ATAG. (2021b). *Waypoint 2050*. Air Transport Action Group.
- Boeing. (24. Helmikuu 2008). *News releases*. Noudettu osoitteesta Boeing, Virgin Atlantic and GE Aviation to Fly First Commercial Jet on Biofuel: <https://boeing.mediaroom.com/2008-02-24-Boeing-Virgin-Atlantic-and-GE-Aviation-to-Fly-First-Commercial-Jet-on-Biofuel>
- Boeing. (6. Helmikuu 2023). Noudettu osoitteesta Liquid asset: This fluid helps chart a course to 100% SAF: https://onfirstup.com/boeing/BNN/articles/liquid-asset-this-fluid-helps-chart-a-course-to-saf-1?bypass_deeplink=true
- CAAFI. (2023). *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative*. Noudettu osoitteesta Fuel Qualification: https://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html
- Cision. (2023). *Cision PR Newswire*. Noudettu osoitteesta ASTM decision brings 100% SAF certification within reach: <https://www.prnewswire.com/in/news-releases/astm-decision-brings-100-saf-certification-within-reach-301893622.html>
- Clean Aviation Joint Undertaking. (6. May 2021). *Clean Aviation*. Noudettu osoitteesta Clean Aviation: <https://www.clean-aviation.eu/sites/default/files/2021-07/CA-CH%20workshop%20-%20key%20messages.pdf>
- Clean Sky. (2020). *Hydrogen-powered aviation*. Clean Sky.
- Det Kongelige Samferdselsdepartement. (2022). *Nasjonal luftfartsstrategi*.
- DHL. (2021). *DHL EXPRESS SHAPES FUTURE FOR SUSTAINABLE AVIATION WITH THE ORDER OF FIRST-EVER ALL-ELECTRIC CARGO PLANES FROM AVIATION*. Haettu 14. April 2022 osoitteesta <https://www.dhl.com/global-en/home/press/press-archive/2021/dhl-express-shapes-future-for-sustainable-aviation-with-the-order-of-first-ever-all-electric-cargo-planes-from-aviation.html>
- Doliente SS, Narayan A, Tapia JFD, Samsatli NJ, Zhao Y and Samsatli S. (2020). *Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components*. Front. Energy Res.
- EASA. (2022). *European Aviation Environmental Report*. European Union Aviation Safety Agency.
- EASA. (2023a). *EASA Eco*. Noudettu osoitteesta How sustainable are SAF?: <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/how-sustainable-are-saf>
- EASA. (2023b). *Type-certificate Data Sheet EASA.A.064 for Airbus A318 - A319 - A320 - A321*.

- Energimyndigheten. (22. 3 2023). *Greenhouse gas reduction mandate*. Noudettu osoitteesta <https://www.energimyndigheten.se/en/sustainability/sustainable-fuels/greenhouse-gas-reduction-mandate/>
- EU 2021/2139, ajantasaiskooste. (ei pvm).
- EU C/2023/3850 final. (ei pvm).
- EU Direktiivi 2018/2001. (ei pvm).
- Eurocontrol. (2021). *EUROCONTROL Data Snapshot #4 on CO₂ emissions by flight distance*.
- Eurocontrol. (2022). *Aviation Outlook 2050*. Eurocontrol.
- Eurocontrol. (2023). Noudettu osoitteesta Lähde: <https://www.eurocontrol.int/article/sustainable-aviation-fuels-saf-europe-eurocontrol-and-ecac-cooperate-saf-map>
- Euroopan komissio. (2020). *Periodic Reporting for period 2 - JETSCREEN (JET Fuel SCREENing and Optimization)*. Noudettu osoitteesta <https://cordis.europa.eu/project/id/723525/reporting>
- Euroopan komissio. (2023a). Noudettu osoitteesta Vihreän kehityksen ohjelma: EU:ssa yhteisymmärrys uusiutuvan energian käyttöönoton nopeuttamisesta: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/IP_23_2061
- Euroopan komissio. (2023b). Noudettu osoitteesta EU Emissions Trading System (EU ETS): https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- Euroopan komissio. (2023c). *An official website of the European Union*. Noudettu osoitteesta European Green Deal: new law agreed to cut aviation emissions by promoting sustainable aviation fuels: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_2389
- Euroopan komissio. (2023d). *European Green Deal: EU agrees stronger legislation to accelerate the rollout of renewable energy*. Noudettu osoitteesta An official website of the European Union: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_2061
- Euroopan parlamentti. (2023a). *European Parliament*. Noudettu osoitteesta Revision of the EU Emissions Trading System for aviation, as part of the European Green Deal: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/package-fit-for-55/file-revision-of-the-eu-emission-trading-system-for-aviation>
- Euroopan Parlamentti. (2023b). Noudettu osoitteesta EU's response to the US Inflation Reduction Act (IRA): [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2023/740087/IPOL_IDA\(2023\)740087_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2023/740087/IPOL_IDA(2023)740087_EN.pdf)
- Euroopan parlamentti. (2023b). *Provisional agreement resulting from interinstitutional negotiations*. European Parliament.
- Euroopan Unioni*. (2023). Noudettu osoitteesta https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-aviation_en
- Eurooppa-neuvosto. (9. Lokakuu 2023). *Eurooppa-neuvosto*. Noudettu osoitteesta ReFuelEU Aviation -aloite: <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>
- Finavia. (Elokuu 2023). Haastattelu.
- Finnair. (Syyskuu 2023). Haastattelu.
- Gurhan Andac, Stephen Kramer. (2022). *100 % SAF - Background, status, considerations*. Caafi.
- IATA. (7. 12 2022). *2022 SAF Production Increases 200% - More Incentives Needed to Reach Net Zero*. The International Air Transport Association (IATA).
- IATA. (2023). Noudettu osoitteesta Our Commitment to Fly Net Zero by 2050: <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>
- ICAO. (2022). *Placing Costs Associated with LTAG Integrated Scenarios in Context*.
- ICAO. (2023a). *SAF airports*.
- ICAO. (Syyskuu 2023b). *SAF Offtake Agreements*. Noudettu osoitteesta SAF Offtake Agreements: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Offtake-Agreements.aspx>
- ICAO. (2023c). Noudettu osoitteesta CORSIA Eligible Fuels: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx>

- ICCT. (2021). *Assessing the sustainability implications of alternative aviation fuels*. WORKING PAPER 2021-11.
- Illinois Department of Revenue. (2023). *Illinois*. Noudettu osoitteesta <https://www.illinois.gov/>
- Imperial Consultants. (2021). *Sustainable biomass availability in the EU, to 2050*. London: Imperial Consultants.
- ING. (11. Toukokuu 2023). *Stronger supply of sustainable aviation fuels crucial to securing uptake*. Noudettu osoitteesta Sustainability: <https://think.ing.com/articles/stronger-supply-of-sustainable-aviation-fuels-critical-to-securing-uptake/>
- Johnson Matthey. (2020). Sustainable Aviation Fuels. *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 2020, 64, (3), 263–278, 266.
- Kalifornian osavaltio. (2022). *Legislative information*. Noudettu osoitteesta AB-1322 California Global Warming Solutions Act of 2006: https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=202120220AB1322
- Kauppalehti. (15. 8 2023). Uusi sääntely kiristää Finnairin kukkaroa – Neste hyöttyy, mutta kilpailijat käyvät pian sen tontille. *Kauppalehti*.
- Narciso, M.; de Sousa, J.M.M. (2021). *Influence of Sustainable Aviation Fuels on the Formation of Contrails and Their Properties*. Noudettu osoitteesta <https://doi.org/10.3390/en14175557>
- Neste. (2019). *Blog: Let's talk about sustainable aviation fuel safety*. Noudettu osoitteesta <https://www.neste.com/blog/aviation/lets-talk-about-sustainable-aviation-fuel-safety>
- Neste. (21. Kesäkuu 2022). Neste. Noudettu osoitteesta First flight in history with 100% sustainable aviation fuel on a regional commercial aircraft: <https://www.neste.com/releases-and-news/renewable-solutions/first-flight-history-100-sustainable-aviation-fuel-regional-commercial-aircraft>
- Neste. (2023). *Capital Markets Day 2023*. Noudettu osoitteesta <https://www.neste.com/investors/calendar/capital-markets-day>
- Neste. (Elokuu 2023). Haastattelu.
- Neste. (2023). *Liikennöintimaksujen modulaatio edistämään uusiutuvan lentopolttoaineen käyttöä lentokentällä*. Neste.
- NLR. (2021). *Destination 2050 – A route to net zero European aviation*. NLR – Royal Netherlands Aerospace Centre, SEO Amsterdam Economics.
- Philippe A. Bonnefoy, R. S. (2022). *Placing Costs Associated with LTAG Integrated Scenarios in Context*. The International Civil Aviation Organization (ICAO).
- Prussi, M.; Panoutsou, C.; & Chiamonti, D. (2022). Assessment of the Feedstock Availability for Covering EU Alternative Fuels Demand. *Appl. Sci.* 2022, 12, 740. <https://doi.org/10.3390/app12020740>.
- Rolls-Royce. (1. Helmikuu 2021). *Rolls-Royce*. Noudettu osoitteesta Rolls-Royce conducts first tests of 100% sustainable aviation fuel for use in business jets: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2021/01-02-2021-business-aviation-rr-conducts-first-tests-of-100-percent-sustainable-aviation-fuel.aspx>
- SAS. (21. Helmikuu 2023). SAS. Noudettu osoitteesta DSV PARTNERS WITH SAS: <https://www.sasgroup.net/newsroom/press-releases/2023/dsv-partners-with-sas/>
- SkyNRG. (2023). *A market outlook on SAF*. May 2022 Update.
- St1. (15. Syyskuu 2023).
- Statista. (Joulukuu 2022). Noudettu osoitteesta Total fuel consumption of commercial airlines worldwide between 2005 and 2021, with a forecast until 2023: <https://www.statista.com/statistics/655057/fuel-consumption-of-airlines-worldwide/>
- Stenius, J. (2023). *Developing the offering of Sustainable Aviation Fuel*. Sustainable Aviation Business: Haaga-Helia University of Applied Sciences.
- Stillwater Associates. (7. Syyskuu 2022). Noudettu osoitteesta Inflation Reduction Act Sustainable Aviation Fuel Credit: <https://stillwaterassociates.com/inflation-reduction-act-sustainable-aviation-fuel-credit-carbon-intensity-matters/>
- Swedavia. (2023). *Airport Charges & Conditions of Services*. Swedavia AB.
- The White House. (2021). *Biden Administration Advances the Future of Sustainable Fuels in American Aviation*. Noudettu osoitteesta whitehouse: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/09/09/fact-sheet-biden-administration-advances-the-future-of-sustainable-fuels-in-american-aviation/>
- Tilastokeskus. (2023a). *Lentopetrolin myynti 2017-2023*.

- Tilastokeskus. (2023b). *Tilastokeskus*. Noudettu osoitteesta Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa, 1990-2022*: https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__khki/statfin_khki_pxt_138v.px/table/tableViewLayout1/.
- Traficom. (2022a). *Sähköinen lentäminen Suomessa*. Traficom in julkaisuja.
- Traficom. (2022b). *Vetylentämisen selvitys*.
- Traficom. (Syyskuu 2023). Haastattelu.
- Transportstyrelsen. (2023). *Luft under gröna vingar*. Transportstyrelsen.
- UPM. (Syyskuu 2023).
- Valtioneuvosto. (2019). *Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019*. Valtioneuvoston julkaisuja 2019:31.
- Valtioneuvosto. (26. Huhtikuu 2023). Noudettu osoitteesta EU:ssa alustava sopu vaihtoehtoisten polttoaineiden käytöstä lentoliikenteessä: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410829/eu-ssa-alustava-sopu-vaihtoehtoisten-polttoaineiden-kaytosta-lentoliikenteessa-mukana-suomelle-tarkea-joustokirjaus>
- Valtioneuvosto. (2023). *Neuvottelutulos hallitusohjelmasta 16.6.2023*. Valtioneuvosto.
- Virgin Atlantic. (20. Heinäkuu 2023). *Virgin Atlantic*. Noudettu osoitteesta World first 100% SAF transatlantic flight taxis closer to takeoff: <https://corporate.virginatlantic.com/gb/en/media/press-releases/world-first-SAF-transatlantic-flight-taxis-closer-to-takeoff.html>
- Voegele, E. (2023). Washington Senate passes bill to establish SAF tax credits. *Biomass magazine*.
- Voigt C, Kleine J, Sauer D. et al. (2021). Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness. *Commun Earth Environ* 2, 114.
- Västflyg. (7. Kesäkuu 2023). Noudettu osoitteesta Högsta möjliga inblandningen av förnybart flygbränsle: <https://vastflyg.se/hogsta-mojliga-inblandningen-av-fornybart-flygbransle/>
- Word Economic Forum. (2023). Noudettu osoitteesta 2030 Ambition Statement.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

PL 320, 00059 TRAFICOM

p. 029 534 5000

traficom.fi

ISBN 978-952-311-885-0 (verkkajulkaisu)

ISSN 2669-8781

TRAFICOM
Liikenne- ja viestintävirasto