

Roosa Kuusivaara

LENTOMATKUSTAMISEN TEKNOLOGISET INNOVAATIOT

Kandidaatintutkielma
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Maaliskuu 2022

TIIVISTELMÄ

Roosa Kuusivaara: Lentomat kustamisen teknologiset innovaatiot
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma, tietotekniikka
Maaliskuu 2022

Tämä kandidaatintutkielma on kirjallisuuskatsaus siitä, minkälaisia uusia innovaatioita lentomatkailussa on kehitteillä ja miten ne pyrkivät hillitsemään ilmastonmuutosta. Lentomat kustamisen suosio on kasvanut viime vuosikymmenten aikana, ja siitä on tullut turvallinen ja nopea matkustamismuoto yleisesti ympäri maailman. Lentoliikenteen ympäristövaikutukset ja maailmanlaajuisen ilmastonmuutos ovat ajankohtainen ja huolta herättävä aihe. Tällä hetkellä lentoliikenne aiheuttaa 2–3 % maailman hiilidioksidipäästöistä. Vaikka prosenttiluku ei ole kovin suuri, kansainvälinen ilmakuljetusliitto IATA on arvioinut lentoliikenteen kaksinkertaistuvan seuraavan 20 vuoden aikana. Sekä lentoyhtiöt että alan insinöörit ja tutkijat pyrkivät kehittämään uusia ratkaisuja sekä innovaatioita päästöjen hillitsemiseen.

Työssä tarkastellaan ensin lentokoneiden laitteiston kehitystä ja niihin liittyviä ongelmia. Tämän jälkeen uusia innovaatioita käsitellään kahdessa kappaleessa, joista ensimmäinen käsittelee vaihtoehtoisia polttoaineita lentokoneissa käytetylle lentopetrolille ja jälkimmäinen lentokoneiden teknisiä innovaatioita. Työssä keskitytään tarkastelemaan innovaatioita ja ratkaisuja pääsääntöisesti kaupallisten matkustajalentokoneiden näkökulmasta.

Tutkimustulokset osoittavat, että tällä hetkellä monet uudet innovaatiot pyrkivät ympäristöystävällisempiin ratkaisuihin ajatellen myös kestäväää kehitystä. Innovaatioista lupaavimmat kaupallisille lennoille ovat biopolttoaineet, järjestelmien sähköistäminen (MEA) sekä täysin sähköiset lentokoneet. Biopolttoaineet ovat kehittyneet vähitellen viime vuosien aikana, ja osa koneista lentääkin jo osittain biopolttoainetta käyttäen. Biopolttoaineiden haittapuolena on kuitenkin niiden korkea hintataso. MEA-konsepti (engl. More Electric Aircraft) on ratkaisu muuttamaan vanhoja lentokone malleja enemmän sähköä käyttäviin järjestelmiin. Tämän konseptin myötä uudet järjestelmät mahdollistavat tulevaisuuden lentokoneiden olevan hiljaisempia, polttoainetehokkaampia sekä ylläpitokustannuksiltaan alhaisempia. Sähkölentokoneet ovat täysin hiilineutraali ratkaisu lentoliikenteeseen. Kotimaan lentoja sekä esimerkiksi lyhyitä lentoja naapurivaltioihin on suunniteltu korvaamaan sähkölentokoneilla. Lentokoneen matalat käyttö- ja huoltokustannukset pystyisivät mahdollistamaan uusien reittien sekä tiheämpien vuorojen lisäämisen lentoliikenteeseen. Täytyy kuitenkin huomioda, että sähkölentokoneiden käyttöönotossa menee vielä useita vuosia teknologiaan liittyvistä ratkaisemattomista haasteista johtuen.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella havaittiin, että joitakin uusia innovaatioita ja ratkaisuja on jo markkinoilla. Silti lisäksi innovaatioita täytyy vielä parannella ja niihin liittyviä ongelmia ratkaista, ennen kuin ne toimivat yhtä tehokkaasti kuin korvattava tuote.

Avainsanat: lentoliikenne, innovaatio, ilmastonmuutos, sähkölentokone, MEA, biopolttoaineet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUTKIMUSMENETELMÄ	2
3. LENTOKONEIDEN TURVALLISUUDEN KEHITYS TEKNOLOGIAN KEHITTÄMISEN MYÖTÄ.....	3
4. LENTOLIIKENTEEN PÄÄSTÖT	4
4.1 Lentopetroli.....	4
4.2 Ekologisemmat polttoaineratkaisut.....	4
5. TULEVAISUUDEN TEKNISET INNOVAATIOT	6
5.1 MEA-konsepti	6
5.1.1 Hyödyt	6
5.1.2 MEA-konseptin haasteet	7
5.2 Sähkölentokoneet.....	7
5.2.1 Sähkölentokoneet Suomessa.....	8
5.2.2 Sähkölentokoneiden haasteet	9
5.3 Aurinkoenergialentokoneet.....	10
6. TULOKSET	13
7. YHTEENVETO.....	15
LÄHTEET	17

LYHENTEET JA MERKINNÄT

MEA	engl. More Electric Aircraft, konsepti, jolla lentokoneista pyritään tekemään enemmän sähköenergiaa hyödyntävä
IATA	Kansainvälinen ilmakuljetusliitto
ICAO	Kansainvälisen siviili-ilmailujärjestö
pneumaattinen	paineella toimiva/paineilmakäyttöinen
NASA	Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto
SAF	kestävä polttoaine (engl. <i>Sustainable Aviation Fuel</i>)

1. JOHDANTO

Lentoliikenteen suosio on kasvanut suuresti viime vuosikymmenien aikana, ja lentomat-kustamisesta on vähitellen tullut koko kansan hupia. Lyhyetkin välimatkat, kuten maan sisällä kaupungista toiseen tai naapurivaltioihin on helppoa ja nopeaa matkustaa len-täen. Tällä hetkellä lentoliikenne aiheuttaa 2–3 % maailman hiilidioksidipäästöistä. Tois-aiseksi prosenttiluku ei ole suuri, mutta kansainvälinen ilmakuljetusliitto IATA on arvioi-nut lentoliikenteen kaksinkertaistuvan seuraavan 20 vuoden aikana. [1] Tämä lentolii-kenteen kaupallisen suosion kasvu tuo mukanaan haasteita liittyen ympäristöön sekä teknologian kehitykseen.

Tämän työn tarkoitus on selvittää, **mitä uusia innovaatioita lentomat-kailussa on ke-hitteillä ja miten ne pyrkivät hillitsemään ilmastonmuutosta**. Tällä hetkellä ihmis-kunta pyrkii hiilineutraalimpiin valintoihin ja lentoliikenne on yksi nopeimmin kasvavista kasvihuonepäästöjen lähteistä liikenteen alalla [2]. Tämä työ keskittyy pääsääntöisesti kaupallisten matkustajalentokoneiden tulevaisuuden ratkaisuihin ja kehitykseen. Tarkoi-tuksena on kartoittaa ilmailualan nykytilannetta ja käydä läpi uusia lentokoneen teknisiä ratkaisuja, jotka mahdollistaisivat lentokoneiden olevan vähäpäästöisempiä, tehokkaam-pia sekä hiljaisempia. Lisäksi pyritään saamaan yleiskuva siitä, millaisiin tavoitteisiin il-mailuala on pyrkimässä ja millaisia sopimuksia lentoyhtiöt ja niiden yhteistyökumppanit ovat solmineet.

Tutkielman toisessa luvussa käydään läpi työssä käytettyjä tutkimusmenetelmiä. Lu-vussa 3 tutustutaan tarkemmin lentokoneiden turvallisuuden kehitykseen automaation kehittymisen myötä. Tutkielman neljännessä luvussa perehdytään lentokoneen aiheut-tamiin päästöihin ja tarkastellaan mitä ekologisempia polttoaineratkaisuja on kehitteillä. Luku 5 käsittelee lentokoneiden tulevaisuuden innovaatioita. Aliluvuissa perehdytään tarkemmin MEA-konseptiin, sähkölentokoneisiin sekä aurinkoenergialentokoneisiin. Kuudes luku sisältää tutkimuksen tulokset, jossa tarkastellaan vielä yhteisesti jokaisen innovaation nykyhetkeä, tulevaisuuden ennustetta sekä suurimpia haasteita, jotka täytyy ratkaista ennen kuin innovaatiot toimivat yhtä tehokkaasti kuin aiempi, korvattava tuote. Luku 7 sisältää johtopäätökset sekä yhteenvedon tutkielmasta. Työn lopusta löytyy vielä työssä käytetyt lähteet.

2. TUTKIMUSMENETELMÄ

Tutkielma on tehty kirjallisuuskatsauksena. Hakukoneina on käytetty Andoria ja Google Scholaria. Näiden lisäksi myös valmistajien omilta kotisivuilta on etsitty tietoa. Käytettyjä hakusanoja Google Scholarissa on ollut:

”sustainable aviation fuels”,

”solar aircraft”,

”lentokoneen polttoaineet”,

”electric airplanes”.

Andorissa käytettyjä hakulausekkeita on mm.

“electric aircraft” AND innovative

"solar-powered airplanes" AND future

Tutkielmaan on löytynyt hyvin tuoreitakin artikkeleita, jotka ovat antaneet hyvin ajankohtaista tietoa tutkielmaani, mutta esimerkiksi lentokoneiden kehityksen lähteinä on käytetty vanhempiakin artikkeleita. Suurin osa käytetyistä lähteistä on englanninkielisiä artikkeleita, mutta myös suomenkielistä tieteellistä raporttia on käytetty lähteenä sekä mm. Finnairin, Nesteen ja Finavian suomenkielisiä nettisivuja.

Tutkielmaan etsittiin tietoa tieteellisten artikkeleiden lisäksi suoraan yritysten kotisivuilta. Esimerkiksi luotettavin ja varmin tieto siitä, millaisia tulevaisuuden tavoitteita suomalaisella *Finnair Oyj* -lentoyhtiöllä on, oli helpointa ja luotettavinta etsiä suoraan yrityksen omilta kotisivuilta. Lisäksi myös lentopetrolia valmistava *Neste Oyj* on kertonut omista uusista biopolttoaineistaan laajasti omilla kotisivuillaan.

Tutkielmassa on yhteensä 29 lähdetä, mutta usea niistä on valmistajan kotisivu, josta on esimerkiksi löytynyt tietoa tietyn lentokonemallin ominaisuuksista. Useiden lähdeartikkeleiden tärkeänä ominaisuutena voidaan pitää niiden ajankohtaisuutta, sillä ilmastonmuutos, sähkölentokoneet, biopolttoaineet sekä sähköistyminen ovat nousseet hyvinkin ajankohtaisiksi aiheiksi viime vuosien aikana.

3. LENTOKONEIDEN TURVALLISUUDEN KEHITYS TEKNOLOGIAN KEHITTÄMISEN MYÖTÄ

Ensimmäiset automaattisen lähestymisen lennon ja automaattisen laskun suorittavat laitteet tulivat Suomeen vuonna 1965 [3]. Sitä ennen ohjaamossa tarvittiin viisi eri ammattilaista hoitamaan lennonaikaisia tehtäviä: lentoinsinööri, radio-operaattori, navigaattori sekä kaksi lentäjää. Automaation ja teknologian kehittymisen myötä kolme ensimmäistä ammattia olivat tarpeettomia. [4] Tässä luvussa tutustutaan lentokoneiden turvallisuuden kehitykseen, ja miten automaation kehitys on parantanut lentokoneiden turvallisuutta.

Lentoturvallisuus on parantunut vuosien varrella suuresti, saavuttamatta kuitenkaan nollaonnettomuus -tavoitetta. Suurin vaikuttava tekijä lentokoneiden turvallisuuden parantumiseen on koneiston kehittyminen, tekoäly ja autopilotti. Autopilotti-järjestelmä ohjaa lentokonetta lentäjän tapaan. Autopilotilla on perustavanlaatuinen rooli nykypäivän kaupallisilla lennoilla, ja järjestelmä auttaa lentäjiä lähes jokaisella lentämisen osa-alueella. [4] Autopilotti koostuu kolmesta pääosasta: lentomonitoritietokoneesta, suorittamista sekä sarjasta antureita eri puolella konetta, jotka lähettävät jatkuvasti uutta dataa prosessoreihin. Autopilotin tärkein tehtävä on varmistaa, että siivet pysyvät tasapainossa ja kone vakaana, sekä vähentää lentäjien rasitusta koneen ohjaamisessa etenkin pitkillä lennoilla. Järjestelmän kehittymisen vuoksi lentäjän on nykypäivänä helpompi keskittyä lentokoneen ja lennon yleiseen tilaan. Autopilottia ei ole vielä tänä päivänäkään jokaisessa ilmailualuksessa, mutta kansainvälisten ilmailumääräysten mukaan lentokoneissa on pakollista olla autopilottijärjestelmä, mikäli kone on yli kaksikymmentäpaikkainen. [5]

Vaikka automaation käyttöönotto on ratkaissut vanhoja ongelmia, se on lisäksi tuonut myös uusia aivan erityyppisiä ongelmia ja onnettomuuksia. Ilmailuajakauden alussa ihmisten suorituskykyä heikensi niin sanottu engl. under-redundancy: stressi, väsymys ja muut häiriötekijät heikensivät lentäjien suorituskykyä. Automaation myötä lentäjien ongelmaksi on tullut niin sanottu ”over-redundancy”, millä tarkoitetaan, että automatisoinnin lisääntyminen saattaa johdattaa pilotin ns. ”ohjaamisen ulkopuolelle”, jolloin lentäjän tilannetietoisuus heikkenee ja automaatioon luotetaan liikaa. Tämä ongelma voi johtaa siihen, että lentäjien peruslentotaito rapistuu. [4] Siksi lentäjien on tärkeää käydä säännöllisin väliajoin kouluttautumassa ja lentää myös ilman apujärjestelmiä.

4. LENTOLIIKENTEEN PÄÄSTÖT

Lentoliikenteestä aiheutuvat päästöt ovat tällä hetkellä vajaa 2,5 % globaaleista kasvi-huonepäästöistä. Luku ei toistaiseksi ole ilmastonmuutoksen kannalta suuri, mutta kansainvälinen ilmakuljetusliitto IATA on ennakoanut lentoliikenteen kasvavan kaksinkertaiseksi seuraavan 20 vuoden aikana. [1] Tässä luvussa perehdytään tarkemmin lentokoneiden tämänhetkisiin polttoaineisiin sekä niitä korvaaviin vaihtoehtoihin.

4.1 Lentopetroli

Lentokoneiden suihkumoottoreissa ja kaasuturbiineissa on tällä hetkellä käytössä raakaöljystä tarkasti jalostettu lentopetroli eli kerosiini. Niemistö et al. kertovat raportissaan, että ”vuonna 2017 kaupalliset lentoalan toimijat käyttivät 275 miljoonaa tonnia lentopolttoaineita, joka vastaa noin 10 prosenttia maailman nestemäisten polttoaineiden kulutuksesta” [6]. Kaupallisilla lennoilla käytetään pääosin jalostettuja laatuja Jet A ja Jet A-1. Lentopetrolin jalostuksella pyritään alentamaan jäätymispistettä, vähentämään palamista sekä poistamaan vesi mahdollisimman tarkasti polttoaineesta.

Valtaosa lentoliikenteen päästöistä aiheutuu lentomatkojen aikana polttoaineen palamisprosessin tuloksena, mutta myös lentokoneiden valmistus, polttoaineiden jalostus ja kuljetus, lentoasemien rakentaminen ja ylläpito sekä matkustus lentokentille tuottaa huomioitavia päästöjä. Moottorin palamisprosessissa syntyy ilmakehään hiilidioksidia, vesihöyryä sekä alle prosentin verran muita päästöjä, kuten typen oksideja, rikin oksideja, hiilivetyjä, häkää ja pienhiukkasia. [6] Finavian mukaan yhdestä kilosta lentopetrolia syntyy palamisprosessissa 3,16 kg hiilidioksidia sekä 1,3 kg vesihöyryä. Muiden päästöjen määrään vaikuttaa lennon eri vaiheet sekä lentokoneen koko ja moottori. [7]

4.2 Ekologisemmat polttoaineratkaisut

Uusiutuvista raaka-aineista valmistettuja polttoaineita pidetään tärkeimpänä ratkaisuna päästöjen vähentämisessä. Niemistö et al. selittää raportissaan, että kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAO:n määritelmän mukaan vaihtoehtoinen polttoaine on ”mikä tahansa polttoaine, jolla on potentiaalia tuottaa vähemmän hiilidioksidipäästöjä elinkaari-pohjaisesti verrattuna perinteiseen kerosiiniin” [6]. Tällä hetkellä pyritäänkin vauhdilla kehittämään uuden sukupolven polttoaineita, joiden raaka-aineita ovat esimerkiksi kasviöljyt, yhdyskuntajäte, jätekaasut ja maatalousjätteet. Uusiutuvia lentopolttoaineita pyritään

valmistamaan kestäväen kehityksen periaatteet huomioiden, ja näitä polttoaineita kutsutaankin kestäviksi polttoaineiksi (SAF, engl. Sustainable Aviation Fuel). Näin ollen raaka-aineena ei käytetä vielä syötäväksi kelpaavia viljoja tai muita ensimmäisen sukupolven biopolttoaineissa käytettyjä raaka-aineita vaan pyritään rajautumaan jäte- ja tähderraaka-aineiden käyttöön. Uusiutuvan polttoaineen (SAF) käytöllä voidaan auttaa vähentämään jopa 80 prosenttia kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna fossiiliseen lentopetroltiin. [6] [8]

Uusiutuvan dieselin tuottaja Neste Oyj on solminut yhteistyösopimuksia lentoalan toimijoiden, kuten Finnairin ja AirBalticin kanssa uusiutuvien lentopolttoaineiden käyttöönoton lisäämisestä. Neste on kehittänyt oman vastuullisen *Neste MY* lentopolttoaineen, joka on valmistettu jätteistä ja tähteistä. Tämä biopolttoaine toimii niin sanottuna drop-in polttoaineena sekoitettuna fossiiliseen lentopetroltiin, ilman että teknisiä muutostarpeita koneeseen tai sen moottoriin tarvitsee tehdä. [8]

Finnairin tämänhetkinen pyrkimys on puolittaa päästönsä vuoden 2025 loppuun mennessä vuoden 2019 tasosta, ja saavuttaa täysi hiilineutraalius vuoteen 2045 mennessä. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi Finnair aikoo investoida uusiin lentokoneisiin ja biopolttoaineisiin, sekä tehdä yhteistyötä asiakkaiden ja sidosryhmien kanssa. [9] Lentoalan kansainvälisiä tavoitteita päästöjen hillitsemiseksi IATA:n mukaan on hiilineutraali kasvu vuodesta 2020 alkaen sekä hiilipäästöjen puolittaminen vuoden 2005 tasosta vuoteen 2050 mennessä. [6]

Vaikka uusiutuvia lentopolttoaineita on jo nyt saatavilla, sen hinta perinteiseen lentopetroltiin nähden on vielä noin 3–4-kertainen. Tähän syy on yksinkertaisesti merkittävästi raakaöljyä kalliimmat uusiutuvat raaka-aineet. Hinnan lisäksi haasteita tuo raaka-aineiden kestävä saatavuus, jakelun logistiikka sekä tehokas sekoittaminen fossiilisen polttoaineen kanssa. [6]

5. TULEVAISUUDEN TEKNISET INNOVAATIOT

Ilmailualan teknologisen askelmuutoksen tavoitteena on vähentää toimintakustannuksia, polttoaineen kulutusta sekä lentomatkustamisen ympäristövaikutuksia [10]. Tässä luvussa käsitellään uusia teknisiä innovaatioita ilmailualalla.

5.1 MEA-konsepti

Vaikka lentokoneet eivät ole ulkonäöltään muuttuneet vuosien saatossa, lentokoneiden järjestelmäsuunnittelussa on kuitenkin tapahtunut merkittäviä muutoksia. Lentokoneiden hydraulisia, mekaanisia tai pneumaattisia voimanlähteitä on pyritty korvaamaan vain sähköä käyttävillä kokonaisuuksilla. Tällaista pyrkimystä kutsutaan MEA-konseptiksi, joka tulee englannin kielen sanoista *More Electric Aircraft*. [10]

5.1.1 Hyödyt

MEA-konseptin myötä järjestelmien hyötysuhde paranee, sekä lisäksi se mahdollistaa lentokoneiden olevan hiljaisempia, polttoainetehokkaampia sekä ylläpitokustannuksiltaan alhaisempia. [10] Uusimmat lentokoneet rakennetaan nykyään niin, että niissä on käytössä jo valmiiksi mm. sähköllä käynnistyvä moottori sekä kokonaan sähköinen ympäristönhallintajärjestelmä. Aiemmin nämä järjestelmät toimivat pneumaattisella ja hydraulisella voimalla. Kuitenkin vanhoissa lentokoneissa, joissa on vielä vanha arkkitehtuuri käytössä, on mahdotonta loputtomiin asti toteuttaa MEA-suuntausta optimointimahdollisuuksien puutteen vuoksi. [11]

Sähköenergiaa voidaan jo nykypäivänä käyttää lentokoneiden käyttöjärjestelmiin, siipien jääsuojajärjestelmiin, ympäristönhallintajärjestelmiin, matkustamon paineistamiseen ja polttoaineen pumppaamiseen [11]. Aiemmin lentokoneissa matkustamon paineistaminen toteutettiin johtamalla korkeapaineista ilmaa lentokoneen moottoreista putkien avulla, joka heikentää moottorien hyötysuhdetta. Tämän toteuttaminen sähköisesti mahdollistaa suihkumoottorien toiminnan optimoinnin vähentäen polttoaineen kulutusta ja tuotettuja päästöjä. [12]

5.1.2 MEA-konseptin haasteet

Järjestelmien sähköistyminen tuo selkeitä haasteita, joita täytyy ottaa huomioon järjestelmiä suunniteltaessa. Sähköisten järjestelmien täytyy olla vähintäänkin yhtä luotettavia, toimivia ja tehokkaita kuin niitä aiemmin korvanneet perinteiset järjestelmät. Muuten järjestelmien korvaaminen olisi perustelematonta. [11]

Lentokoneiden järjestelmät altistuvat käytössä jatkuvasti erityyppisille rasituksille. Ympäristön aiheuttama lämpötilan muutos sekä ilmanpaineen vaihtelu ovat suurimpia aiheuttajia lentokoneen järjestelmien rasitukselle. Tehoelektroniset laitteet valmistetaan yleensä useasta eri materiaalista, joista jokainen laajenee eri lailla lämpötilan vaihdeltaessa. Lämpösyklien vaikutuksesta tehoelektronikassa käytettävissä IGBT-piireissä on mahdollista tapahtua juotosliitosten katkeamista. Tätä järjestelmiin kohdistuvaa lämpötilojen muuttumista pyritään hallitsemaan erilaisilla jäähdytysratkaisuilla. [12] [11]

Ilmanpaineen vaihtelu aiheuttaa haasteita sähköjärjestelmien eristämisessä. Ympäröivä ilmanpaine laskee koneen noustessa ilmaan, mikä heikentää sähkölaitteissa käytettävien eristeiden sietokykyä osittaispurkauksille. Osittaispurkaukset eivät kuitenkaan heti aiheuta ongelmaa lentokoneissa, mutta ne heikentävät eristeitä. Niiden hajoaminen taas voi johtaa vakavampiin ongelmiin järjestelmissä. [12]

5.2 Sähkölentokoneet

Ilmailuteollisuus on pohtinut uudenlaista lentokoneen arkkitehtuuria, joka mahdollistaisi joko hybridilentokoneet tai täysin sähköiset lentokoneet. Tällä tavoin lentomat kustamisesta on mahdollista tehdä energiatehokkaampaa, ympäristöystävällisempää. Lisäksi koneiden melutaso olisi paljon pienempi verrattuna tämänhetkisiin turbiini- ja suihkumoottorikoneisiin. [11]

Hybridilentokoneissa on sekä sähkömoottori että polttoainemoottori. Idea hybridilentokoneissa on sama kuin hybridiautoissa: hybridisähkö säästää polttoainepäästöissä, kuluttaa hitaammin koneen polttoainetta sekä hiljentää koneen lentoonlähtömelua [11]. Pienkoneiden kehitystyötä hybridisähkö- ja sähkömoottoreiden suuntaan on tehty jo vuodesta 2010 lähtien, ja monet mallit ovatkin jo päässeet ihan markkinointikäyttöön. [13] Viime aikoina kuitenkin täysin sähköiset lentokoneet ovat nousseet hybridilentokoneita ajankohtaisemmaksi aiheeksi. Taulukossa 1 esitellään muutamia jo käytössä olevia piensähkölentokoneita, niiden kapasiteetti sekä lentomatka ja/tai -aika.

Taulukko 1. Tämänhetkisiä piensähkölentokoneita ja niiden ominaisuuksia. [14] [15] [16]

Malli	kapasiteetti (hlö)	lentomatka / -aika
Pipistrel Alpha Electro	2	n. 100 km / 1 h
Bye Aerospace eFlyer	2	1 h
magniX eCaravan	9	160 km / 30 min

Taulukossa 2 esitellään muutama suunnitteilla tai rakenteilla oleva sähkölentokonemalli sekä niiden ominaisuuksia: matkustajakapasiteetti lentäjä mukaan lukien, lentomatka sekä lisäksi tavoiteltu käyttöönottovuosi.

Taulukko 2. Tulevaisuuden sähkölentokonemalleja ja niiden ominaisuuksia. [17] [18] [19] [20] [21]

Malli	kapasiteetti	lentomatka	tavoiteltu käyttöönottovuosi
Heart Aerospace ES-19	19	400 km	2026
Lilium Jet eVTOL	7	500 km	2024
Evitation Alice	9	815 km	2022
Wright Electric	180	500 km	2030
NASA X-57 Maxwell	2	160 km	ensilento 2022

Yllä olevista taulukoista 1 ja 2 voidaan todeta, että tällä hetkellä suunnitellut mallit ovat kehitelty lyhyen kantaman matkoille ja pienelle matkustajamäärälle. Tämä toimisi etuna etenkin pienten paikkakuntien lentokentillä, sillä matkustajia on vähän ja lentäen etäisyydet isommille lentokentille lyhyet. Lentoja olisi näin myös mahdollista tehdä tiheämmin, eivätkä sähkölentokoneet vapauta ollenkaan haitallisia hiilidioksidipäästöjä ilmaan. Tarkastellessa taulukon viimeisestä sarakkeesta, voidaan hyvin jo vahvistaa, että sähkölentokoneet tosiaan ovat hyvinkin ajankohtainen aihe.

5.2.1 Sähkölentokoneet Suomessa

Helsingin sähkölentoyhdistyksen puheenjohtajan Janne Vasaman mukaan sähkölentokoneet ovat kallis investointi, mutta maksavat itsensä nopeasti takaisin, sillä moottorin huolto- ja polttoaineen kuluerät ovat vain 10 % polttomoottorikoneisiin verrattuna. Tällä hetkellä Suomen ainoa sähkölentokone on Helsingin sähkölentokoneyhdistyksen omistama kaksipaikkainen *Pipistrel Alpha Electro* ja sen ensilento nähtiin Suomessa Malmin lentokentällä 2018. Kyseinen lentokone pystyy lentämään yhtäjaksoisesti noin tunnin

mittaisen matkan matkalentonopeutena 157 km/h, ja akun lataukseen täysin tyhjästä täyteen akkuun kestäisi nopeimmillaan 1 h 10 min. [14]

Finnair on tehnyt ruotsalaisyrityksen *Heart Aerospace* kanssa aiesopimuksen 19-paikkaisten matkustajasähkölentokoneiden tilaamisesta. Finnairin tavoitteena on siirtyä kokonaan päästöttömiin lentokoneisiin lyhyillä kaupallisilla reiteillä. Kuten jo aiemmin taulukoiden 1 ja 2 jälkeen todettiin, tulevaisuuden sähkölentokoneet tukevat hyvin tavoitetta mahdollistamaan lyhyet matkustajalennot, kuten esimerkiksi kotimaan lennot, täysin päästöttömänä. Sähkölentokoneissa koneiden operointikustannukset pienentyisivät, mikä mahdollistaisi lentovuorojen lisäämisen monille kentille, myös sellaisiin paikkakuntiin, joissa Finnairin koneet eivät tällä hetkellä operoi. [22] Sähkölentokoneiden myötä pienillekin paikkakunnille lentomatkustus olisi toimivaa, sillä täysin sähköiset lentokoneet ovat paljon hiljaisempia eivätkä tuottaisi niin paljoa melupäästöjä ympäristöön.

5.2.2 Sähkölentokoneiden haasteet

Vaikka sähkölentokoneita kehitetään kovaa vauhtia ja niiden tulevaisuus näyttää lupaavalta, on sähkölentokoneissa silti ratkaistavia haasteita ennen niiden käyttöönottoa matkustajalenoille. Lentokoneiden moottoreihin ei olla tällä hetkellä saamassa niin suurta tehoa sähköllä kuin mitä ne vaatisivat. Lisäksi sähkölentokoneiden ongelmana on niiden hitaus. Muita ominaisuuksia, joita täytyy ottaa huomioon tarkastellessa koneen soveltuvuutta reittileinnoille, on turvallisuus, latausaika, lentomukavuus sekä käyttöikä. [13]

Akkuteknologia on kehittynyt viime vuosien ajan suunnattomasti sähköautojen yleistyttyä kuitenkin pystymättä kattamaan suurempien lentokoneiden käyttövoimatarpeita. Tämänhetkiset piensähkölentokoneet toimivat pääosin litiumioniakuilla, mutta akkuihin parempaa tehoa on nyt myös pyritty saamaan ioni-rikkiakuilla. Akkuihin liittyy tällä hetkellä kaksi pääongelmaa: akun kapasiteetti sekä tehokkuuden säilyminen. Tällä hetkellä kevyissä ja pienissä akuissa ei ole tarpeeksi kapasiteettia nostamaan konetta ilmaan, kun taas liian suuret akut tuovat koneisiin liikaa lisäpainoa. Haasteena akuissa on myös niiden jatkuva käyttö ja lataaminen, joka ajan myötä johtaa akun heikkenemiseen sekä lopulta tuhoutumiseen. Akkuja kehitetään etenkin sähköautojen saralla jatkuvasti ja autovalmistajat käyttävät siihen paljon panostusta ja resursseja, mistä varmasti on hyötyä sähkölentokoneiden akkujen kehityksessä. [23]

Sähkölentokoneiden sertifiointi on toinen suuri haaste lentokoneiden käyttöönotossa. Uusien teknologioiden ja innovaatioiden täytyy ensiksi täyttää kaikki vaaditut turvalli-

suus- ja teknologiavaatimukset ennen kuin ne voidaan tarjota kuluttajien käyttöön. Prosessi on pitkä ja tarkka, jotta voidaan taata tarpeeksi hyvä turvallisuus ja laitteiden toiminta sekä matkustajille että lentäjille. [24]

Muita haasteita sähkölentokoneiden kehitykselle ovat kustannukset sekä asiakkaiden luottamus. Sähkölentokoneiden kehitys vaatii paljon rahallista sekä ajallista panostusta. Taloudelliset resurssit riippuvat paljon asiakkaiden ja sijoittajien luottamuksesta, joka on tärkeää myös koneiden jatkuvan kehittämisen kannalta. Siirtyminen perinteisistä koneista sähköisiin lentokoneisiin onnistuu vasta kun kuluttajat luottavat uuteen teknologiaan. [25]

5.3 Aurinkoenergialentokoneet

Vuonna 2010 tehtiin ensimmäinen miehitetty lento täysin aurinkoenergialla toimivalla lentokoneella. Aurinkoenergialentokoneiden historia on kuitenkin jo paljon pidempi. Ensimmäinen miehitetty lento aurinkovoimaisella ilma-aluksella tehtiin vuonna 1974 Kaliforniassa *Sunrise I* -nimisellä aluksella. Kun tämä alus tuhoutui myrskyssä, rakennettiin paranneltu versio, *Sunrise II* vuotta myöhemmin. Sen odotettiin nousevan jopa 15,2 km korkeuteen ja lentävän jopa kuuden tunnin ajan, mutta testilennollaan saavutti vain 5,2 km korkeuden johtuen ohjaus- ja hallintajärjestelmän kaatumisesta. [26]

70-luvun loppupuolella tutkijoita alkoi kiinnostamaan miehitetyt lennot, jotka yksinomaan toimisivat aurinkoenergialla. Vuonna 1980 ensimmäinen miehitetty kone, *Gossamer Penguin*, saatiin ilmaan, mutta koneen ei ollut turvallista lentää kuin muutaman metrin korkeudessa. Vuonna 2010 suoritettiin ensimmäinen miehitetty lento täysin aurinkoenergialla toimivalla lentokoneella. Sveitsiläinen Bertrand Piccard kehitti *Solar Impulse* -hankkeen todistaakseen maailmalle, että täysin hiilineutraali lento maailman ympäri on mahdollista. Yksipaikkaisella *Solar Impulse 2*:lla lennettiin maailman ympäri vuosina 2015–2016. Matkaa ei kuitenkaan tehty välilaskuitta, vaan maailmanympärimatka sisälsi useita välilaskuja lentäjän vaihtamiseksi sekä korjausoperaatioiden tekemiseen ja hankkeen esittelyyn. [27]

NASA on kehitellyt omia prototyyppisiä aurinkovoimalla toimivasta kauko-ohjattavasta lentokoneesta. *Helios* -hankkeella pyrittiin kehittämään lentokoneista pitkäkestoisia ja mahdollisimman korkealla lentäviä aluksia, jotka voisivat toimia satelliittien kaltaisesti ilmakehässä. *Helios* -sarjan viimeisen prototyyppillä oli kaksi tavoitetta, lentää noin 30 000 m korkeudessa sekä lentää yhtäjaksoisesti 24 tunnin ajan. Ensimmäinen tavoite täyttyi,

mutta toiseen tavoitteeseen ei koskaan päästy koneen tuhouduttua rakenteellisten vikojen vuoksi kesken lennon. [27] [28]

Brittiläinen yritys QinetiQ aloitti kehittämään aurinkoenergialla toimivia *Zephyr* -lentokoneita vuonna 2003. Vuonna 2010 *Zephyr 7* rikkoi maailman ennätyksen lentoajan pituudessa lennettyään yhtäjaksoisesti 14 päivää ja 21 min. [26] Tällä hetkellä *Zephyr* -projektin kehitys on siirtynyt Airbus -yhtiölle ja se on maailman johtava miehittämätön aurinkoenergiaa hyödyntävä lentokonevalmistaja, joka lentää vuorokauden ympäri stratosfäärissä ilmakehässä (n. 15 km korkeudessa). [27]

Taulukko 3. Aurinkolentokoneiden mallit, lentonopeus, lentokorkeus sekä miehitys [27], [28], [29]

Malli, ensilento	Lentonopeus	Lentokorkeus	Miehitys	Pisin lentoaika
Sunrise I, 1974	22 km/h	22 km	Ei	4 h
AeroVironment Helios, 2001	30 – 43 km/h	29,5 km	Ei	20 h
Zephyr 7, 2010	56 km/h	23 km	Ei	336 h
Solar Impulse II, 2014	70 km/h	8,5 km	Kyllä	48 h

Aurinkoenergialla toimivilla koneilla on paljon potentiaalia korkean lentokorkeuden ja pitkien lentoaikojen ansiosta. Ne pystyisivät teoriassa pysymään ilmassa satelliittien tavoin vuosia, johtuen niiden rajoittamattomasta määrästä saada energiaa auringosta aluksen siipien päällä olevien aurinkopaneelien kautta. [26]

Miehittämättöminä aurinkoenergialentokoneet sopivat hyvin sekä armeija- että siviilikäyttöön. Puolustusvoimien käytössä ne toimivat hyvin esimerkiksi rajavartiointissa. Siviilikäytössä aurinkoenergialentokoneiden avulla voitaisiin tutkia valtameriä, ilmakehää tai säätä sekä parantaa mm. mobiiliviestintäpalveluita. 20 kilometrin korkeudessa oleva alus pystyy tarjoamaan matkaviestintäpalveluja 500 km:n säteelle. Aurinkoenergialentokoneilla olisi joustavampi käyttöönotto verrattuna satelliitteihin sekä laajempi palvelun kattavuus verrattuna maanpäällisiin tukiasemiin ja mastoihin. [26]

Aurinkoenergialla toimivan lentokoneen pääasiallinen hyöty on sen ympäristöystävällisyys, sillä kaikki koneeseen tarvittava energia saadaan auringosta. Auringon energia on täysin fossiilivapaa, uusiutuva energialähde. Rajattoman energianlähteen johdosta ilmaluksen on mahdollista pysyä ilmassa pitkiäkin aikoja. Ilmaisen energianlähteen johdosta aluksella on alhaiset käyttökustannukset. [26]

6. TULOKSET

Ilmailualalla on kehitteillä monia ratkaisuja ja innovaatioita hillitsemään ilmastonmuutosta. Kehitteillä olevia ratkaisuja ovat uusiutuvat biopolttoaineet, koneiden järjestelmien sähköistäminen (MEA) ja sähkölentokoneet. Lisäksi miehittämättömänä aurinkovoimalla toimivia lentokoneita voitaisiin hyödyntää tutkimus- sekä puolustusvoimien käytössä, vaikka matkustuslentokoneiksi ne eivät ole toistaiseksi sopivia. Taulukossa 4 esitellään työssä esitellyt innovaatiot, niiden nykystatus, tulevaisuuden ennuste sekä käyttöönoton suurimmat haasteet.

Taulukko 4. *Innovaatiot, niiden tämänhetkinen status, tulevaisuuden ennustus ja suurimmat haasteet.*

Innovaatio	Status	Ennuste	Suurimmat haasteet
Biopolttoaineet	Markkinoilla, osittain kuluttajien käytössä.	Tulee korvaamaan lentopetrolin kokonaan tulevaisuudessa.	- Kallis hinta - Rajallinen määrä raaka-aineita
MEA-konsepti	Käytössä uusimmissa lentokoneissa.	Voidaan muokata vanhoista lentokonemalleista hiljaisempia, polttoainetehokkaampia sekä ylläpitokustannuksiltaan alhaisempia.	Ei pystytä loputtomiin asti toteuttamaan lentokoneiden vanhasta arkkitehtuurista johtuen
Sähkölentokoneet	Pienlentokoneita olemassa. Monia aiesopimuksia solmittu valmistajien ja lentoyhtiöiden välille.	Mahdollistaisivat päästöttömät maan sisäiset reittilennot lähitulevaisuudessa.	- Riittävän tehokkaiden ja kevyiden akkujen valmistaminen - Sertifiointi
Aurinkokenno-lentokoneet	Miehittämättömiä sekä miehitettyjä testilentoja tehty	Miehittämättöminä tutkimus- sekä puolustusvoimien käyttöön	- Ohjelmistovirheet - Tehokas akku - Sääolosuhteet

Biopolttoaineet ovat tällä hetkellä jo osittain kuluttajien käytössä. Tulevaisuudessa tämä energianlähde tulee varmasti olemaan nykyistä merkittävämpi, sillä lentoyhtiöiden hiileneutraalius -tavoitteiden saavuttamisessa biopolttoaineet tulevat olemaan suuressa roolissa. Suurimpina haasteina biopolttoaineissa on nykyhetkellä sen kallis hinta sekä raaka-aineiden rajallinen saatavuus.

MEA-konseptia toteutetaan tällä hetkellä uudemmissa lentokoneissa. Niissä on käytössä esimerkiksi sähköllä käynnistyvä moottori sekä sähköinen ympäristönhallintajärjestelmä, jotka vanhemmissa koneissa toimivat hydraulisilla, mekaanisilla ja pneumaattisilla voimanlähteillä. Suurimpia etuja tällä konseptilla on se, että lentokoneista saadaan hiljaisempia, tehokkaampia sekä ylläpitokustannuksiltaan alhaisempia. Raja kuitenkin tämän loputtomaan toteutukseen tulee jossain kohtaa vastaan lentokoneiden arkkitehtuurista johtuen.

Sähkölentokoneita kehitetään kovaa vauhtia. Tällä hetkellä on kehitetty 2–4 paikkaisia pienkoneita. Nyt akuista pyritäänkin kehittämään tarpeeksi kevyitä, mutta tehokkaita, että sähkölentokoneet voisivat toimia lyhyillä kaupallisilla lennoilla. Vaikka sähkölentokoneita ei ole vielä kehitetty tarpeeksi pitkälle, ovat jo monet lentoyhtiöt sopineet aiesopimuksia valmistajien kanssa. Esimerkiksi Finnair on suunnitellut siirtyvänsä sähköisiin kotimaan lentoihin, mikä voisi lisätä uusia lentoreittejä sekä tiheämpiä lentovuoroja tarjontaansa. Akkujen kehityksen lisäksi toisena hidasteena sähkölentokoneiden markkinoille saamiseksi on niiden pitkä sertifiointiprosessi. Koneiden täytyy käydä tarkat ja pitkät testit läpi, että sähkölentokoneet täyttävät kaikki ilmailuun vaaditut kriteerit ja ovat tarpeeksi turvallisia kuluttajille.

Aurinkoenergialentokoneita on kehitelty jo 1970-luvulta lähtien sekä miehitettyjä että miehittämättömiä, ja testilentoihin useat valmistajat ovatkin jo vuosien aikana päässeet. Ensisijaisesti lentokoneita ei suunnitella matkustajakäyttöön vaan miehittämättömiksi lentokoneiksi siviili- sekä armeijatoimintaan. Siviilikäytössä koneita voitaisiin käyttää tutkimaan maan ilmakehää, meriä sekä säätä ja puolustusvoimien käytössä koneet voisivat toimia rajavartioidinnissa sekä muissa tiedustelutehtävissä. Suurimpina haasteina tässä sähköisessä ilma-aluksessa on ohjelmistovirheet, sillä kone täytyy olla tarpeeksi hyvin etukäteen ohjelmoitu ennen sen taivaalle lennättämistä, sekä lisäksi lentokoneen hitaus ja sääolosuhteet.

7. YHTEENVETO

Työn päätavoitteena oli selvittää, **mitä uusia innovaatioita lentomatkailussa on kehitteillä ja miten ratkaisut pyrkivät hillitsemään ilmastonmuutosta**. Tähän mennessä lentokoneiden autopilotti -järjestelmä on huomasti vienyt teknologiaa eteenpäin ja parantanut lentokoneiden turvallisuutta. Teknologian kehitys ja hiilineutraaliuteen pyrkiminen ovat tärkeimpiä teemoja ilmailualalla ja suurimmat innovaatiot pyrkivätkin tukemaan ajatusta hiilineutraalista tulevaisuudesta.

Tutkielmasta voidaan todeta, että lentomatkustamisen päästöjä voidaan vähentää lentomatkustuksen määrän vähentämisen lisäksi parantamalla lentokoneiden sekä polttoainoiden tehokkuutta, muuttamalla polttoaineet osittain tai täysin hiilineutraaleiksi tai kehittämällä täysin uusia ympäristöystävällisiä lentokoneita. Kansainvälisiä tavoitteita päästöjen hillitsemiseksi on kehitetty, ja lisäksi monet lentoyhtiöt ovat määritelleet itselleen ilmastotavoitteita. Jotkin lentoyhtiöt ovat myös solmineet yhteistyösopimuksia esim. biopolttoaineita valmistavien yritysten kanssa sekä aiesopimuksia sähkölentokonevalmistajien kanssa.

Työssä perehdyttiin matkustajalentokoneiden teknisten laitteiden sekä turvallisuuden kehitykseen, vaihtoehtoihin lentopolttoaineisiin sekä suunnitteilla oleviin uusiin teknisiin innovaatioihin. Innovaatioiden käyttömahdollisuuksia tarkasteltiin niin maailmanlaajuisella mittakaavalla, kuin Suomen sisäisessä lentoliikenteessä. Merkittävimmät tulevaisuuden innovaatiot kaupallisille matkustajalennolle ovat biopolttoaineet, lentokoneiden järjestelmien sähköistyminen (MEA-konsepti) sekä sähkölentokoneet. Hyötyjä edellä mainittujen innovaatioiden käyttöönotossa on mm. päästöjen pienentyminen, pienemmät käyttö- ja huoltokustannukset sekä melusaasteen pieneneminen. Näiden lisäksi työssä selvisi, että vaikka täysin aurinkoenergialla toimivilla miehitetyillä lentokoneilla ei toistaiseksi olla tehty suurempaa läpimurtoa, niin miehittämättömiä aurinkoenergialentokoneita voitaisiin hyödyntää ilmakehän tai meren tutkimuksissa sekä puolustusvoimien toiminnassa. Aurinkoenergialentokoneiden suurin hyöty on niiden ekologisuus, pitkät lentoajat (aurinkoenergian ansiosta kone voi pysyä ilmassa jopa kuukausia) sekä korkea lentokorkeus verrattuna tavallisiin lentokoneisiin.

Työssä tarkasteltiin, mitä hyötyjä ja esteitä innovaatioiden käyttöönotolla on. Sen lisäksi tarkasteltiin, mikä on innovaatioiden nykytilanne, ja analysoitiin, miltä niiden tulevaisuus

näyttää. Tuloksista huomattiin, että uusia innovaatioita ja ratkaisuja on jo olemassa markkinoilla. Silti jokaisessa innovaatioissa löytyy vielä asioita, joita täytyy parannella ja niihin liittyviä ongelmia ratkaista, ennen kuin ne toimivat yhtä tehokkaasti kuin korvattava tuote. Tekninen kehitys tuskin koskaan pystyy kompensoimaan täysin lentoliikenteen päästöjä, mutta parempaan päin ollaan koko ajan pyrkimässä.

LÄHTEET

- [1] IATA. *IATA Forecast Predicts 8.2. billion Air Travelers in 2037*. 2018. Saatavissa: <https://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2018-10-24-02.aspx>
- [2] Euroopan Parlamentti. *Lento- ja laivaliikenteen päästöt*. 2019. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20191129STO67756/lento-ja-laivaliikenteen-paastot-infografiikka>
- [3] H. Sommar, *Automaatio mullisti lentämisen*. Yle Elävä Arkisto. 2010. Saatavissa: <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2010/12/28/automaatio-mullisti-lentamisen>
- [4] A. Chialastri, *Automation in Aviation*. 2012. Saatavissa: https://www.academia.edu/44462557/5_Automation_in_Aviation
- [5] J. Thesis, D. Ossmann, F. Thielecke, F. Pfifer, *Robust Autopilot Design for Landing a Large Civil Aircraft in Crosswind*. 2018. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.04.010>
- [6] J. Niemistö, S. Soimakallio, A. Nissinen, M. Salo, *Lentomatkustuksen päästöt*. Suomen ympäristökeskus, 2020. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/292417/SYKEra_2_2019.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- [7] Finavia. *Lentoliikenne ja ilmasto*. Saatavissa: <https://www.finavia.fi/fi/lentoliikenne-ja-ilmasto?id=> viitattu 27.1.2022
- [8] Neste Oyj. *Lentoliikenne*. 2022. Saatavissa (viitattu 2.2.2022): <https://www.neste.fi/vastuulliset-ratkaisut/tuotteet/lentoliikenne>
- [9] Finnair. *Finnair tähtää hiilineutraaliksi vuoteen 2045 mennessä*. 2020 Saatavissa: <https://www.finnair.com/fi-fi/bluewings/vastuullisuus/finnair-t%C3%A4ht%C3%A4%C3%A4-hiilineutraaliksi-vuoteen-2045-meness%C3%A4-2053976>
- [10] P. Wheeler, S. Bozhko, *The more electric Aircraft: Technology and Challenges*. 2014. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/MELE.2014.2360720>
- [11] P. Thalín. *Fundamentals of Electric Aircraft*, SAE International, 2019, pp. 4-10, 27 p.
- [12] I. Moir, A. Seabridge, *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration, 3rd Edition*. New York, 2008. 550 p.
- [13] C. Frederich & P.A. Robertson, *Hybrid-Electric Propulsion for Aircraft*. 2015. Saatavissa: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.C032660>
- [14] Helsingin sähkölentokoneyhdistys. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://sahkolentokone.fi/>
- [15] Bye Aerospace. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://bye aerospace.com/electric-airplane/>
- [16] Magnix. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://www.magnix.aero/>

- [17] Heart Aerospace. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://heartaerospace.com/>
- [18] Lilium, Introducing the Lilium Jet. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://lilium.com/jet>
- [19] Alice Pure Electric. Eviation. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://www.eviation.co/>
- [20] Wright Electric. Wright. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://www.weflywright.com/>
- [21] Nasa X-57 Maxwell. Nasa. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://www.nasa.gov/specials/X57/>
- [22] Finnair. *Finnair vahvistaa yhteistyötä sähkölentämisen pioneerin Heart Aerospaceen kanssa*. 2021. Saatavissa: <https://www.finnair.com/fi-fi/bluewings/vastuullisuus/finnair-vahvistaa-yhteisty%C3%B6t%C3%A4-s%C3%A4hk%C3%B6lent%C3%A4misen-pioneerin-heart-aerospaceen-kanssa-2253660>
- [23] M. Crittenden, *The Ultralight Batteries for Electric Airplanes*. 2020. Saatavissa: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1109/MSPEC.2020.9173903>
- [24] S. Baumeister, A. Leung, T. Ryley, *The emission reduction potentials of First Generation Electric Aircraft (FGEA) in Finland*. Journal of Transport Geography. 2020. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102730>
- [25] H. Heesup, Y. Jongsik, K. Wansoo, *An electric airplane: Assessing the effect of travelers' perceived risk, attitude, and new product knowledge*. Journal of Air Transport Management. 2019. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.04.004>
- [26] X. Zhu, Z. Guo, Z. Hou, *Solar-powered airplanes, A historical perspective and future challenges*. Progress in Aerospace Sciences. 2014. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.06.003>
- [27] A. North, (2008). *Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight*. ETH Zürich. Saatavissa: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005745622>
- [28] NASA. *NASA Armstrong Fact Sheet: Helios Prototype*. 2014. Saatavissa: <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-068-DFRC.html>
- [29] Airbus. *Zephyr, The first stratospheric UAS of its kind*. Saatavissa (viitattu 16.3.2022): <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/zephyr>