ILMAILUALAN SÄHKÖISTYMINEN

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Tuomas Korpijaakko

Tarkastaja: TkT Pia Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT Energiajärjestelmät
Sähkötekniikka

Tuomas Korpijaakko
Ilmailualan sähköistyminen

Sähkötekniikan kandidaatintyö
2022
22 sivua, 7 kuvaa, 1 taulukko
Tarkastaja: TkT Pia Lindh
Hakusanat: Ilmailuala, sähköistyminen, lentokone, sähkölentokone, sähkökäyttö

Tässä kanditaatintyössä tarkastellaan ilmailualaa ja sen näkymiä sähköistymisen kannalta. Kaupallisessa lentoliikenteessä moottoreiden energianlähteenä käytetään lähes poikkeuksetta uusiutumatonta ja hiilipohjaista kerosiinia ja sähköistyminen voisi tarjota ratkaisuja vähentää tätä lentoliikenteen aiheuttamaa hiilikuormaa.

Työssä käydään läpi lentämisen taustaa, sähköistymisen mahdollisuuksia tulevaisuutta ajatellen ja esitellään projekteja lentokoneista, joita on sähköistetty. Lisäksi tutkitaan suuren kokoluokan koneelle tehtyjä sähkökäytön innovaatioita, jotka ovat parantaneet lentokoneen energiatehokkuutta. Tavoitteena on tehdä kirjallisuuskatsaus aiheeseen tutkimalla erilaisia lentämiseen ja sen sähköistymiseen liittyviä lähteitä.

Täysin sähköisten lentokoneiden kannalta suurin este tulee energiavarastojen energiatiheydestä. Akut, jotka tällä hetkelle ovat kuitenkin ensimmäinen vaihtoehto sähkön energianlähteelle, eivät yllä vaaditulle tasolle, joka tarvittaisiin sähköiseen lentämiseen. Joillekin lentokoneille sähköistyminen on jo kuitenkin mahdollista, minkä osoittavat erilaiset pienkoneille tehdyt sähköistämisprojektit. Valitettavasti kaupalliseen matkustajaliikenteeseen korvaajaa ei vielä sähköstä ole. Se, mitä nykyiseltään voidaan tehdä päästöjen vähentämiseksi, on parantaa energiatehokkuutta. Esimerkkinä Boeing 787, joka on laajarunkoinen suuren kokoluokan kone, jossa on korvattu perinteisiä järjestelmiä sähkökäytöllä. Tämä sähköistäminen on vähentänyt polttoaineen kulutusta ja sitä kautta lentäminen voi kuormittaa vähemmän ilmastoa.

Ilmailualan sähköistymistä täytyy odottaa vielä tulevaisuuteen, eli se ei ole kokonaan poissuljettu mahdottomuus. Potentiaalin kasvua on, kun lentoalan yritykset tutkivat ja kehittävät nykyisistä lentokonemalleista energiatehokkaampia. Lentokoneet kehittyvät entistä kevyemmiksi ja aerodynaamisemmiksi, mikä edesauttaa sähköistymisen mahdollisuuksia.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto ... 5
   1.1 Tutkimustavoitteet ... 6
2. Sähköistymisen tilanne ja näkymät ... 6
   2.1 Taustaa lentämiseen ... 6
      2.1.1 Lentämisen fysiikkaa ... 6
   2.2 Energiankäyttö ... 6
      2.2.1 Suihkuturbiinimoottori ... 6
      2.2.2 Energiatiheys ... 7
      2.2.3 Energiavarastot ... 7
   2.3 Vaihtoehtoiset energianlähteet ... 8
      2.3.1 Polttokennot ... 9
      2.3.2 Aurinkokennot ... 9
   2.4 Lentokoneen energiankulutus ... 9
   2.5 Sähkölentokoneet matkustajaliikenteeseen ... 11
      2.5.1 Akut energianlähteenä ... 11
   2.6 Tulevaisuuden näkymiä ... 12
3. Sähköiset lentokoneet ... 13
   3.1 Sähköisen lentämisen historiaa ... 13
   3.2 Sähkölentokoneiden projekteja ... 14
      3.2.1 Extra 330 LE ... 14
      3.2.2 HEMEP - Hybrid Electric Multi Engine Plane ... 14
      3.2.3 Hybridilentokone – Airbus E-Fan X ... 15
4. Sähkökäyttö matkustajalentokoneessa ... 15
   4.1 Sähkövirran tuotto lentokoneissa yleisesti ... 15
      4.1.1 Generaattorit moottoreissa ... 16
      4.1.2 APU-moottori ja generaattori ... 16
      4.1.3 Maasähkö ... 16
      4.1.4 RAT-generaattori ... 16
      4.1.5 Akku ... 16
      4.1.6 Muut järjestelmät – Paineilma ... 17
   4.2 Sähkökäytön innovaatiot matkustajakoneessa – Boeing 787 ... 17
      4.2.1 Mitkä sähkötekniset ratkaisut ovat johtaneet energiatehokkuuteen? ... 17
      4.2.2 Korvaaja paineilmalle – ’No-bleed’-systeemi ... 18
      4.2.3 Sähköjärjestelmän edut ... 18
   4.3 Mihin jatketaan? ... 19
      4.3.1 Fly-by-wireless ... 19
5. Yhteenveto/johtopäätökset ... 19

Lähteet ... 20

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

CAGR	Compound Annual Growth Rate
MTOW	Maximum take-off weight
MLW	Maximum landing weight
Pax	Matkustajapaikka

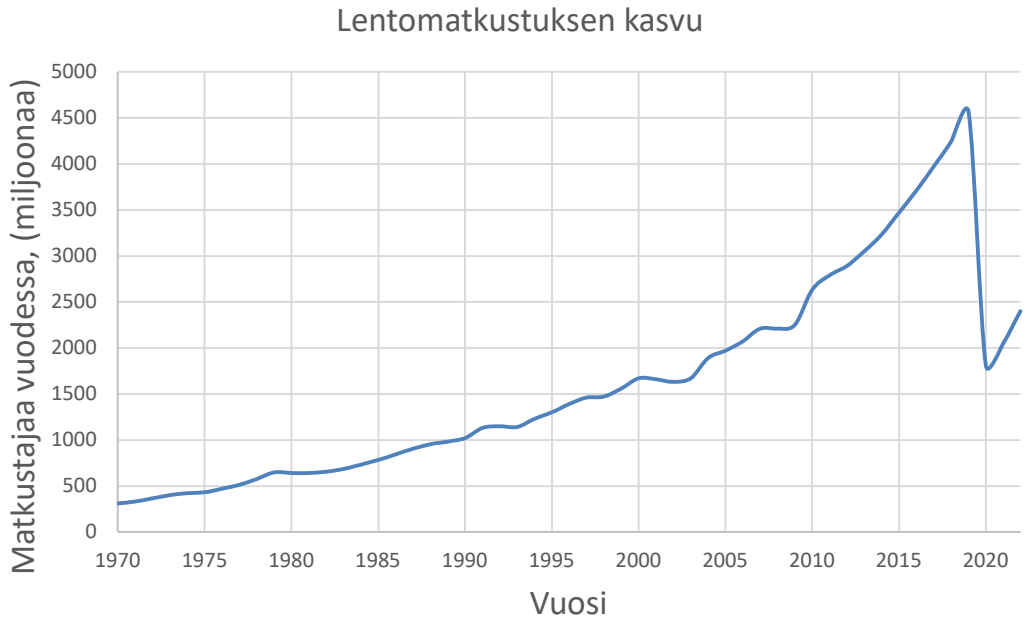
1. JOHDANTO

Kaupallisessa ilmailussa lentokoneiden polttoaineena on tähän asti käytetty öljystä jalostettua kerosiinia, josta aiheutuvat suurin osa ilmailun päästöistä. Maailma on siirtymässä hiilineutraaliutta kohti ja ilmailualallakin on alettu tavoitella päästöjen vähentämistä entistä enemmän. Päämääränä olisi siis päästä irti fossiilisista polttoaineista ja yksi tapa päästä tavoitteeseen olisi siirtyä käyttämään sähköä liikkumisen energianlähteenä.

Lentoliikenne aiheuttaa vuotuisia hiilidioksidipäästöjä noin kahden prosentin osuuden kaikista ihmisen aiheuttamista päästöistä, Ilmailun todellinen vaikutus ilmastonlämpenemiseen on noin 4 %. Tähän lasketaan kaikki ilmastolle aiheutuvat haitat, kuten muut suorat päästöt, joita ovat typen oksidit, rikkidioksidit, hiilimonoksidi, sekä päästöille laskettu säteilypakote. Säteilypakote tarkoittaa päästöjen syntymistä lennon aikana yläilmakehässä, ja siihen perustuen päästöt ovat haitallisempia ilmaston lämpenemiselle, kuin vastaavat päästöt maanpinnalla. (Ilmastoapu. 4.2.2020)

Kuvasta 1 nähdään lentomatkustajien kehityksen historia 1970-luvulta lähtien. Matkustajamäärät ovat nousseet jatkuvasti ja käyrän mukaan se kiihtyy entisestään vuosi vuodelta. Jotkin historian tapahtumat ovat vaikuttaneet matkustajamääriin negatiivisesti. Tällaisen vaihtelun taustalla on usein ollut jokin maailmanlaajuinen taloudellinen tai poliittinen kriisi, esimerkiksi suurimpana vaikuttajana on vuoden 2020 COVID-19 pandemia.

Lentomatkustuksen on arvioitu kasvavan edelleen noin 4 %:n vuosikasvulla, mikä tarkoittaisi matkustajamäärän kaksinkertaistumista seuraavan kahdenkymmenen vuoden aikana. Lentomatkustuksen on ennustettu palautuvan nopeasti takaisin vuoden 2019 tasolle. (ICAO, 5.9.2022)



Kuva 1 Lentomatkustuksen kasvu (The World Bank, 5.9.2022)

1.1 Tutkimustavoitteet

Tämän työn tarkoituksena on tarkastella sähköisen ilmailun tilannetta ja luoda katsaus sen etuihin ja haittoihin, kun tavoitteena on fossiilisien polttoaineiden käytön vähentäminen. Työ keskittyy lentokoneisiin ja sähköisen ilmailun kaupallisen käytön mahdollisuuksiin.

Työssä tutkitaan täysin sähköisten ja hybridilentokoneiden nykytilaa. Tutkittavana kohteina ovat kolme erilaista sähkölentokoneprojektia. Toisena tutkittavan kohteena on modernin lentokoneen, Boeing 787:n, sähköjärjestelmä. Boeing 787 on valittu tutkittavaksi kohteeksi, koska se on markkinoiden energiatehokkain matkustajakone ja sen sähköjärjestelmä on matkustajalentokoneista edistynein johtuen erilaisista sähkökäytön toteutuksista (Page, 2019).

2. SÄHKÖISTYMISEN TILANNE JA NÄKYMÄT

2.1 Taustaa lentämiseen

Ilmailun neljän prosentin vaikutus ilmastonlämpenemiseen ei saata kuulostaa suurelta, mutta lentämisen kasvu lähivuosien aikana ja muun liikenteen, kuten autojen ja junien, päästessä nollapäästöihin tulee vaikuttamaan päästöjen osuuteen ja motivaatioon saada toimivia ratkaisuja sähkölentokoneille.

Autoihin ja juniin verrattuna liikenne lentäen eroaa paljon varsinkin liikkumiseen käytettävän energian kannalta: autoilla liikutaan huomattavasti lyhyempi matka kerrallaan ja sähköveturin ei tarvitse varastoida junan liikkumiseen käytettävää energiaa mukanaan.

Lentämisen etu muihin matkustusmuotoihin nähden tulee sen tehokkuudesta: matkantekonopeus on sellainen, että lentomatka tehdään verrattain lyhyessä ajassa. Matkustajaliikenteessä lentonopeus suihkumoottorisella lentokoneella voi olla yli 900 km/h ja lentokoneella pystytään operoimaan ilman välilaskuja jopa 21 tuntia (Broom 2019).

2.1.1 Lentämisen fysiikkaa

Lentämisessä vaikuttavat neljä voimaa: lentokoneen massan aiheuttama paino (weight), lentämiseen tarvittava nostovoima (lift), moottoreista saatava työntövoima (thrust) ja ilmanvastus (drag). Paino ja nostovoima ovat vastakkaissuuntaisia, kuten myös työntövoima ja ilmanvastus. Lentokoneen siivet tuottavat suurimman osan nostovoimasta, mutta ne tarvitsevat siihen ilmanvirtausta, johon vaikuttaa moottorien tuottama työntövoima. Tämän takia lentokoneen massaa kasvatettaessa nostovoimaa tarvitaan samassa suhteessa. Esimerkiksi jos lentokoneen massaa lisätään 35 % niin energiantarve suurenee myös 35 %. Autolle 35 %:n lisäys massaan lisää energian tarvetta noin 13–20 %. (Verstraete, 2019)

2.2 Energiankäyttö

2.2.1 Suihkuturbiinimoottori

Lentokoneiden suihkumoottoreista on käytössä kahdenlaisia versioita suihkuturbiini- ja ohivirtausmoottori. Suihkumoottori on kaasuturbiini, jonka toiminta perustuu systeemin läpivirtaavan ilman nopeuden kasvattamiseen. Suihkuturbiinin voimantuoton vaiheet ovat:

1. Ilman sisäänotto puhaltimella ja otetun ilman paineen kasvattaminen kompressorissa
2. Ilman siirtyminen polttokammioon, jossa puristettuun ilmaan sekoitetaan kerosiinia
3. Seoksen sytyttäminen
4. Palamiskaasut poistuvat turbiinin kautta tuottaen työntövoimaa ja pyörittäen akselin välityksellä ilmanoton puhallinta

Suihkumoottoreista yleisempi käytössä oleva versio on ohivirtausmoottori, jossa osa sisään otetusta ilmasta johdatetaan muun prosessin ohi. Ohivirtausmoottorin hyötysuhde on uusimpien lentokoneiden moottoreissa noin 40 %. (NASA, 4.2.2020)

Lentämiseen käytettyjen sähkömoottorien hyötysuhde voi olla jopa 95 %. Mutta eräänä ongelmana voi esiintyä se, että suihkuturbiinimoottorin kanssa ei voida käyttää ainoastaan sähköä, koska suihkuturbiini vaatii palavaa ainetta tuottamaan tarvittava työntövoima. Sähkömoottori voisi toimi hybridikäytössä suihkuturbiinin kanssa tai sitten sähkömoottorit on rajoitettava propellikäyttöön. (Siemens, 2018)

2.2.2 Energiatiheys

Energiatiheys on hyvin oleellinen energialähteiden vertailussa. Se tarkoittaa varastoidun energian määrää varaston tilavuutta kohden. Energiatiheyden yksikköinä käytetään Wh/L, joka ilmoittaa energian tilavuutta kohden ja Wh/kg, joka ilmoittaa massaa kohden. Energiatiheys voidaan ilmoittaa jouleina tai wattitunteina. Joulelle ja wattitunnille pätee 1 kWh = 3,6 MJ ja 1 MJ = 0,28 kWh.

Vuonna 2020 litiumioni akuilla on korkein energiatiheys, joka on parhaimmillaan noin 0,9 MJ/kg (tai 0,25 kWh/kg). (University of Washington, 2020)

2.2.3 Energiavarastot

Lentämisen kannalta käytettävän energiavaraston energiatiheydellä on suuri merkitys. Matkustajalentokoneissa käytetyn kerosiinin energiatiheys on noin 43 MJ/kg. (Engineering ToolBox, 2008)

Taulukossa 1 on esitetty, kuinka paljon eri lentokonemallien polttoaineen osuus voi olla lentokoneen kokonaispainosta lentoon lähdettäessä. On huomioitavaa, että lentokoneet eivät aina lennä suurimmalla mahdollisella kuormalla pisintä mahdollista kantamaa, joten tarvittava polttoaine lentämiseen on matkakohtainen.

Taulukkoon viitaten lentoliikenteessä käytetään lyhennettä pax lentokoneen matkustajapaikan kuvaamiseen. Taulukossa on käytetty kullekin lentokonemallille tyypillistä istuinmäärää. Pax ja MTOW (Maximum take-off weight) antavat kuvan lentokoneen kokoluokasta. Runko kirjain lyhenteet: L = Laaja, K = Kapea, p = pienkone.

Malli	Runko	Pax	MTOW (kg)	Polttoainekapasiteetti (kg)	Polttoaine/MTOW suhde (%)
Airbus A380	L	555	560 000	256 000	45,7
Boeing 787–10	L	330	254 000	101 100	39,8
Boeing 737 MAX-9	K	190	88 300	20 800	23,6
ATR 72	K	72	23 000	5 000	21,5
Cessna 172	p	4*	1 100	169	15,4

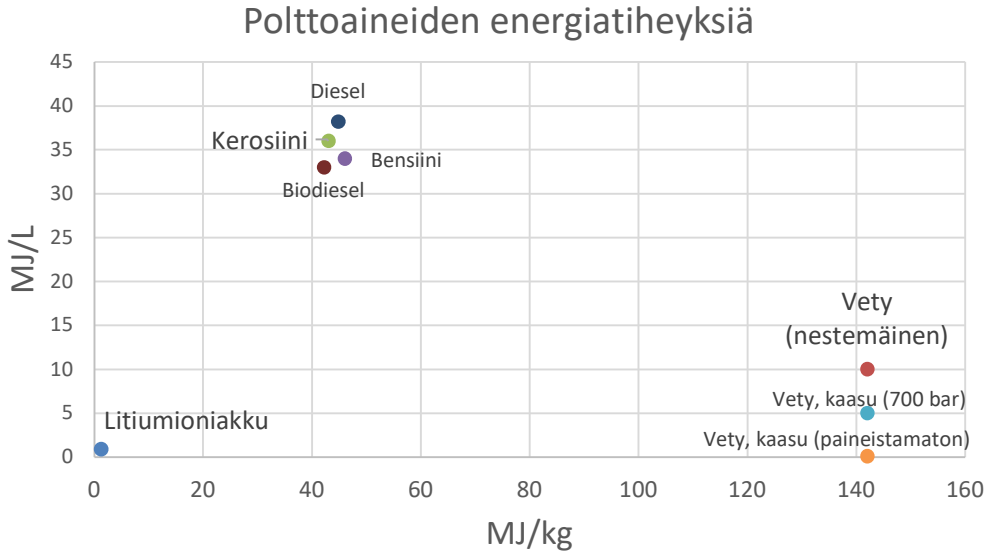
Taulukko 1 Lentokonemallien vertailu (Modern Airliners, 27.1.2018) *Cessnassa yksi paikka on lentäjälle ja 3 matkustajille

Taulukosta nähdään, mitä pienempiä ja kevyempiä koneita lähestytään, sitä pienempi polttoaineen suhde on lentokoneen kokonaismassaan. Toisin sanoen kokonaismassan kasvaessa tarvitaan yhä enemmän energiaa ja akkujen energiatiheydellä tämä mahdollistaa toistaiseksi vain pienlentokoneiden sähköistämisen.

Cessna 172 on nelipaikkainen pienkone ja sähköiset lentokoneprojektit toimivat pääosin tämän kokoluokan lentokoneiden ympärillä. Sähkölentokoneprojekteja tarkastellaan tarkemmin kolmannessa kappaleessa.

2.3 Vaihtoehtoiset energianlähteet

Verrattain korkean energiatiheyden ansiosta kerosiinilla on selkeä yliote akkuihin energiavarastoina, joten on hyvä miettiä muita ratkaisutapoja. Tulevaisuudessa sähköenergianlähteitä lentokoneille voisivat mahdollisesti olla esimerkiksi vetykäyttöiset polttokennot tai aurinkokennot. Kuvassa 2 on liikenteessä käytettyjen polttoaineiden energiatiheyksiä. Kuvassa vety on eritelty nestemäisenä ja kaasuna.



Kuva 2 Polttoaineiden energiatiheyksiä (Engineering Toolbox, 2008)

Muista energialähteistä hiilipohjaiset polttoaineet erottuvat omana joukkonaan, poikkeuksena biodiesel, josta on saatavilla lentämiseen jalostettua biopolttoainetta. Biopolttoaineen avulla lentämisen päästöjä voidaan vähentää jo nykyisillä lentokoneilla ja se soveltuu käytettäväksi seoksena hiilipohjaisen kerosiinin kanssa. Biopolttoaineen haittana on kuitenkin sen saatavuus ja korkeampi hinta. (Le Feuvre, 2019)

2.3.1 Polttokennot

Polttokennot toimivat samalla periaatteella, kuin akut, mutta polttoainetta syötetään kemialliseen reaktioon polttokennon ulkopuolelta. Vedyssä energiaa on varastoituneena 142 MJ/kg, mutta tilavuutta kohden energiatiheys on selvästi huonompi, kuin kerosiinin ja se vaihtelee vedyn olomuodon mukaan (Fung, 2005). Polttokennojen toimivuus lento-olosuhteissa on vielä tutkinnan alla vedyn ominaisuuksien vuoksi. Vety on herkästi syttyvää ja väärin käsiteltynä vaarallista, joten esimerkiksi riittävän kovan turbulenssin vaikutus voisi olla uhka epävakauttamaan vetyä. (Klesius, 2009)

2.3.2 Aurinkokennot

Solar Impulse 2 on esimerkki projektista, jossa energiantuottoon käytetään aurinkokennoja. Aurinkokennoilla päädytään kuitenkin samankaltaiseen ongelmaan, kuin akkujen kanssa eli tuotettu energia on hyvin vähäistä verrattuna siihen, kuinka paljon paneeleita tarvitaan. Solar Impulse 2:ssa on 17 000 aurinkokennoa noin 550 m^2 kokoisella pinta-alalla, joka vastaa Boeing 747:n siipien alaa. Lentäminen Solar Impulse 2:lla tapahtuu noin 70 km/h nopeudella ja kone painoi noin 2 000 kg. (Plumer, 2016)

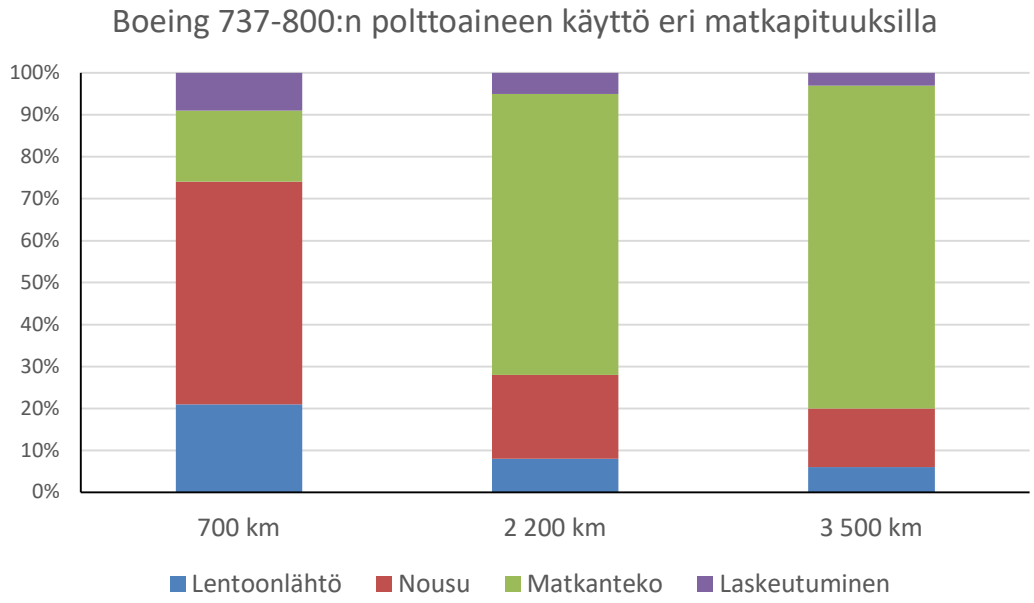
2.4 Lentokoneen energiankulutus

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty, miten energiankulutus jakaantuu lentomatkan eri osiin Boeing 737–800 lentokoneella. Boeing 737 on yksi yleisin käytössä oleva matkustajakonemalli, se on kapearunkoinen ja yleensä 150–190 paikkainen. Kuvassa 3 on arviot polttoaineen käytöstä lennon eri vaiheissa. Kuvasta nähdään myös eri pituisten lentomatkojen vaikutusta polttoaineen osuuteen. Kuvassa 4 taas on arviot kapearunkoisen lentokoneen moottoreiden käyttämästä korkeimmasta tehosta lennon eri vaiheissa.

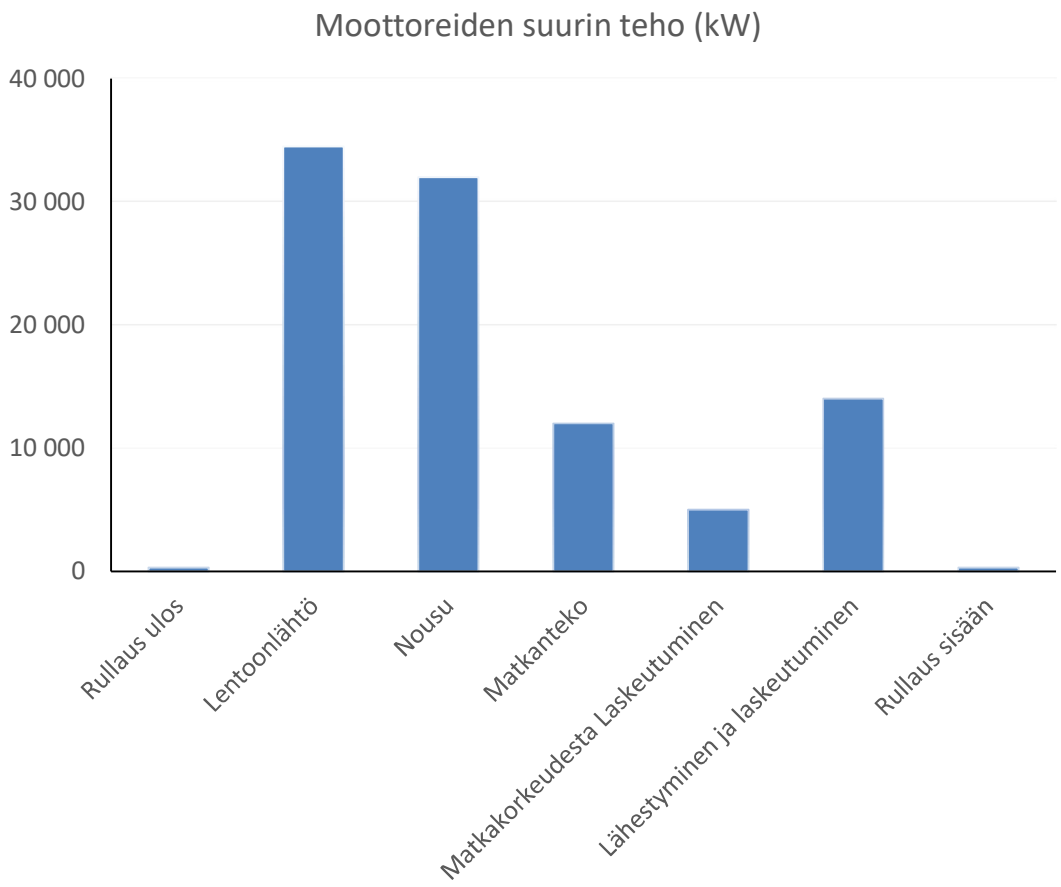
Kuvan 4 perusteella nähdään, että moottoreita käytetään huomattavasti suuremmalla teholla lentoonlähdön ja nousun aikana, kuin muun lennon aikana ja kuvasta 3 nähtynä lyhyellä 700 km matkalla polttoainetta kuluu alussa noin 75 %. Lentoonlähdössä on käytettävä paljon energiaa, sillä nostovoiman tulee olla suurempi, kuin painon. Lentokoneen polttoaineen käytön kannalta nousun tekeminen nopeasti korkealle ilmakehään on myös kaikista taloudellisinta. Lentokorkeus lentokoneen moottorityypin mukaan ja suihkumoottorisille koneille korkeus on yleensä 10–13 kilometriä ja potkurikoneille tavallinen lentokorkeus on noin 7–8 kilometriä.

Nousu yläilmakehään tehdään, koska sen taloudelliset hyödyt ylittävät haitat verrattuna matalemmalla tehtyyn matkaan. Taloudellisin lentomatkan tekeminen tapahtuu yläilmakehässä, jossa ilmanvastus on pienempi johtuen harvemmasta ilmasta. Energiaa työntövoiman tuottamiseen lentokorkeudessa tarvitaan vähemmän. Harvempi ilma tarkoittaa kuitenkin pienempää nostovoimaa, jolloin siiven pinta-alalla ja muotoilulla joudutaan korvaamaan puuttuvaa nostetta. (Liu & Kharina, 2017)

Pienempi energiantarve matkanteossa, johtaa siihen, että matkan pidetessä lentokoneen energiatehokkuus paranee. Matkustajaliikenteessä yhtiöt suosivatkin pitkiä lentoja usean lyhyemmän lennon sijaan polttoaineen säästymisen takia. Nousujen aikana moottoreiden käyttö suuremmilla tehoilla myös lyhentää niiden käyttöikää. (Liu & Kharina, 2017)



Kuva 3 Boeing 737–800:n polttoaineen käyttö lennon eri vaiheissa (Liu & Kharina, 2017)



Kuva 4 Suihkumoottorin tehonkäyttö lennon eri vaiheissa (ICAO, 2018)

2.5 Sähkölentokoneet matkustajaliikenteeseen

Kaupallisessa käytössä olevan matkustajalentokoneen hinta voi olla kymmenien ja satojen miljoonien eurojen välillä ja yhden lentokokeen käyttöiän odotusarvo voi olla yli 20 vuotta. Laivaston nopeampi päivittäminen uudempiin malleihin ei kuitenkaan ole epätavallista ja lentoyhtiölle se voi lyhyelläkin aikavälillä olla jopa taloudellisempaa, kuin vanhojen mallien käyttäminen ja ylläpitäminen. Esimerkiksi eurooppalaisten lentoyhtiöiden laivastoissa alle viidennes koneista on yli 20 vuotta vanhoja (De Oliva, 2017). Uusien lentokonemallien säästöt koostuvat monesta tekijästä, mutta erityisesti energiatehokkuuden parantuminen voi osoittautua arvokkaaksi ja tämän säästöedun sähköiset lentokoneet voisivat tarjota.

2.5.1 Akut energianlähteenä

Matkustajaliikenteessä lentoyhtiöt pyrkivät usein minimoimaan lentojen välisen ajan maassa. Tätä operaatiota kutsutaan lentokoneen käännöksi. Lentokoneen kääntö sisältää kaiken lentoon valmistavat vaiheet, joihin kuuluu myös tankkaus. Lentokoneen tankkausoperaatio vie tavallisesti 15–20 minuuttia.

Sähkölentokoneen akkuihin tulisi pystyä lennon jälkeen lataamaan tarvittava määrä energiaa 15–20 minuutin aikana. Vaihtoehto lataukselle olisi tyhjän akun vaihtaminen lentojen välissä. Toisaalta, mikäli akut voitaisiin ladata kerralla useamman lennon tarpeisiin, koko tankkaus tai sähkölentokoneen tapauksessa latausprosessi voitaisiin jättää pois lentojen välistä.

Akkujen käytön yhdeksi ongelmaksi voi osoittautua se, että akkujen kanssa lentokone ei kevene lennon aikana. Lentokoneille on määritetty mallikohtainen maksimi laskeutumispaino (MLW, maximum landing weight) ja se on mitoitettu siten, että laskeutuessa lentokoneen rakenteet eivät vaurioidu. Polttoainetta kuluttaessa lentokone kevenee lennon aikana, mutta akuilla samanlaista painon putoamista ei tapahtuisi. Tämä aiheuttaa ongelman, jossa akkuteknologia ei ole ainoastaan kaukana jäljessä energiatiheydessä, vaan akkujen paino pitäisi vielä mahtua MLW:hen.

Lentokoneen keveneminen johtaa myös pienempään energiantarpeeseen lentomatkan edetessä. Akkujen kanssa paino pysyisi vakiona ja tämä johtaisi tilanteeseen, jossa energiantarve olisi sama koko lennon ajan.

2.6 Tulevaisuuden näkymiä

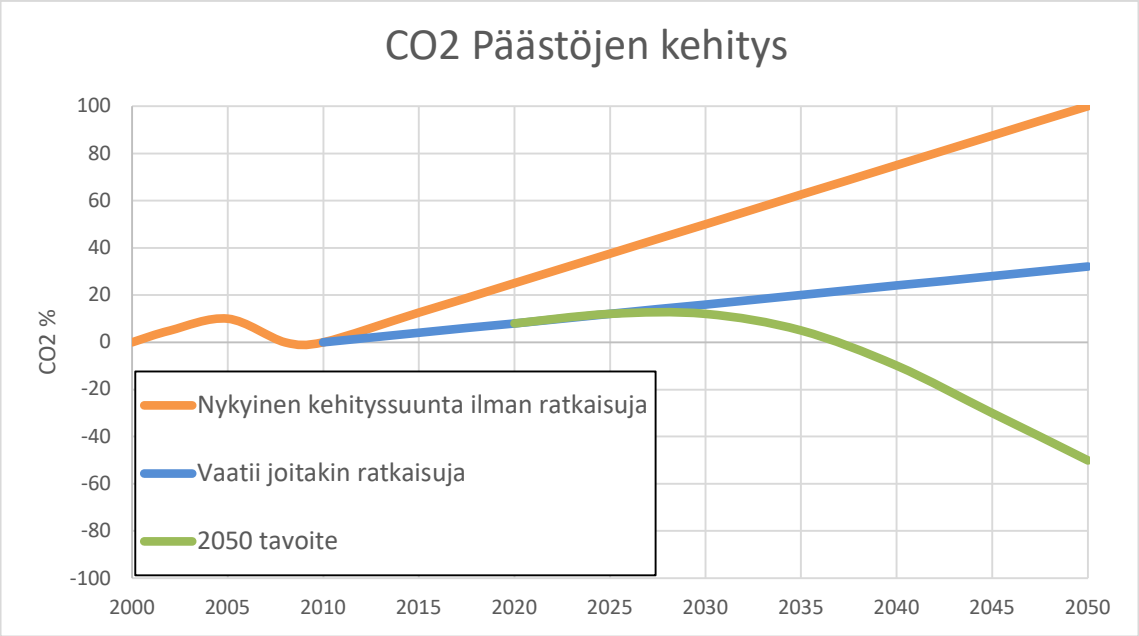
Vuosina 2009–2020 matkustajaliikenteessä käytettyjen lentokoneiden energiatehokkuus on parantunut noin 1,5 % vuodessa. Energiatehokkuuden jatkuvaan parantamiseen päästään teknologian kehityksen kautta saatavilla ratkaisuilla: sähköjärjestelmien lisäys, aerodynaamisemmat lentokoneenrungot ja siivet sekä kehittyvä moottoriteknologia. Vanhojen lentokoneiden poistuminen käytöstä vaikuttaa myös trendin parantumiseen. (IATA, 2013)

Euroopan komissio teki vuonna 2011 päätöksen Flightpath 2050-nimisestä ohjelmasta, jossa on esitetty ilmailualan tavoitteita Euroopan Unionin osalta vuoteen 2050 mennessä. Yksi tavoitteista on olla edelläkävijänä päästöihin liittyvissä tutkimuksissa ja kannustaa vaihtoehtoisten energianlähteiden käyttöön. Lentokoneiden suorien päästöjen pienentämiseen tavoitteena ovat: 1. 75 % hiilidioksidi-, 90 % typen oksidi-, sekä 65 % melupäästöjen vähentäminen ja 2. lentokoneiden maassa liikkumisen eli rullauksen tekeminen päästöttömästi. (EU, 2011)

Kuvassa 5 on esitetty arviot, miten päästöt tulevat kehittymään Flightpath 2050 -ohjelman myötä. Ilman reagoimista päästöt kehittyvät suoraan verrannollisesti matkustajamäärän kasvun kanssa. Erilaisilla teknologian kehityksillä voidaan kuitenkin päästä jo joihinkin vähennyksiin. Kuvassa sijoitutaan silloin oranssin ja sinisen viivan väliin. Sinisen viivan alle eli vielä parempiin vähennyksiin päästäisiin kuitenkin yhdistämällä teknologian kehityksen kanssa vaihtoehtoisia polttoaineita, kuten biopolttoaineita.

Myös Kansainvälinen ilmakuljetusliitto IATA (International Air Transport Association) on esitellyt tavoitteet vuoteen 2050 mennessä. IATA:lla hiilidioksidipäästöjen vähennyksen tavoite on 50 %.

Näitä päästövähennyksiä tavoitellessa tulee miettiä uusia ratkaisuja, sillä suurin päästöjenaiheuttaja on kuitenkin öljypohjaisen kerosiinin polttaminen lentokoneiden moottoreissa. EU:n asettamaan 75 % vähentämiseen tarvitaan jo suurta edistystä teknologian osalta. Mikäli sähkölentokoneita saataisiin liikennekäyttöön niin tämä voisi olla tavoitettavissa. Sähkölentokoneiden toteutus rajoittuu kuitenkin niiden käytännöllisyyteen ja tavoitteisiin ei päästä, mikäli teknologian puolelta ei löydetä eteenpäin vieviä ratkaisuja. Sähkölentokoneiden kehitykseen onkin lähtenyt mukaan suuria eurooppalaisia yrityksiä kuten Siemens ja Airbus.



Kuva 5 Flightpath 2050:n hiilidioksidipäästöjen tavoitteita (Siemens, 2018)

3. SÄHKÖISET LENTOKONEET

3.1 Sähköisen lentämisen historiaa

Ensimmäisiä lupaavia merkkejä sähköisestä ilmailusta saatiin vuonna 1960, jolloin saksalainen insinööri Fred Militky onnistui sähkömotorisoimaan lentokoneen pienoismallin. Militky oli 20 vuotta aiemmin tehnyt kokeiluja pienoismalleilla, jotka olivat epäonnistuneet moottorien ja lyijyakkujen painoon. Teknologian kehityksen myötä onnistuneessa pienoismallissa oli nyt tehokkaampi sähkömoottori, mutta edelleen käytössä oli lyijyakkuja. Militky jatkoi pienoismallien työstämistä ja vuonna 1972 harrastuskäyttöön tarkoitettu radio-ohjattava pienoismalli sai energiansa nikkeli-kadmiumakusta, joka soveltui lentämiseen lyijyakkua paremmin suuremman energiatiheyden takia. (Hepperle, 2012)

Lentokoneiden pienoismalleista Militky eteni ensimmäiseen miehitettyyn lentoon heti seuraavana vuonna 1973 yhteisprojektina lentokonevalmistaja ja lentäjä Heino Brditschkan kanssa. Brditschka lensi MB-E1 (Militky-Brditschka-Elektro-1) nimisellä koneella noin 11 minuutin ajan 360 metrin korkeudessa. Koneen akkuina olivat nikkeli-kadmiumakut, jotka sijoitettiin moottoripurjelentokoneessa matkustajan paikalle. Kone painoi 440 kg, akkujen osuus painosta oli 60 kg. (Sigler, 2019)

Vuonna 2018 sähköiseen ilmailuun liittyviä projekteja oli arviolta noin 170. Yli 50 % on pienten lentokoneiden projekteja, usein 1–2 henkilön istuttavia koneita. Noin 10 % projekteista kohdistuu matkustajakäyttöön tarkoitettujen sähkölentokoneiden kehitykseen ja sähköistämiseen liittyvät muut projektit kattavat loput. (Pfeifer, 2019)

Sähkölentokoneet ovat edenneet Militkyn MB-E1 koneesta, mutta kuitenkaan löytämättä ratkaisua suurempien lentokoneiden sähköistämiseen. Muita kehitysaskeleiden merkkejä ovat esimerkiksi vuonna 2007 slovenialaisen Pipistrelin sähkölentokone Taurus Electro, joka oli ensimmäinen sarjatuotantoon ja myyntimarkkinoille tuotu 2-paikkainen lentokone

(Pipistrel, 4.2.2020). Toinen merkittävä askel oli ensimmäinen kaupallinen tehty lento sähkölentokoneella. Lento tehtiin kuusipaikkaisella potkurikoneella Kanadassa 17.12.2019 ja lentoaika oli 15 minuuttia. (Cogley, 2019)

3.2 Sähkölentokoneiden projekteja

Sähkölentokoneprojekteja esitellään kolme erilaista. Kaikissa sähköenergian varastona toimivat akut, mutta ne eroavat toisistaan voimantuoton kannalta. Lentokoneista kaksi ovat pieniä propellikoneita, joista toinen on hybridiprojekti. Kolmas on suurempi hybridilentokone, joka käyttää suihkuturbiinimoottoreita tavoitteena on matkustajaliikenne.

3.2.1 Extra 330 LE

Extra 330 LE on täysin sähköinen kone, joka on rakennettu Extra 300 L taitolentokoneen runkoon. Ensimmäinen lento koneella suoritettiin vuonna 2016. Projektin takana on saksalainen lentokonevalmistaja Extra Flugzeugbau ja projektin tarkoituksena oli toimia eräänlaisena kokeena Siemensin SP260D sähkömoottorille.

SP260D moottori pystyy 260 kW:n voimantuottoon 95 % hyötysuhteella. Moottori painaa 50 kg ja sillä on ennätyksellinen tehontuotto painoa kohden, joka on 5,2 kW/kg (Siemens, 2018). Akkuina lentokoneessa käytetään 14 litiumioniakkua, joiden jokaisen kapasiteetti on 18,6 kWh. Sähkömoottorin ansiosta 1 000 kg:n painoisella koneella saavutettiin sähkölentokoneiden ennätykset nopeimmasta lentonopeudesta ja nousuajasta. Tulokset olivat 337,5 km/h nopeus ja nousuennätys tehtiin 3 000 metriin neljässä minuutissa ja 22 sekunnissa.

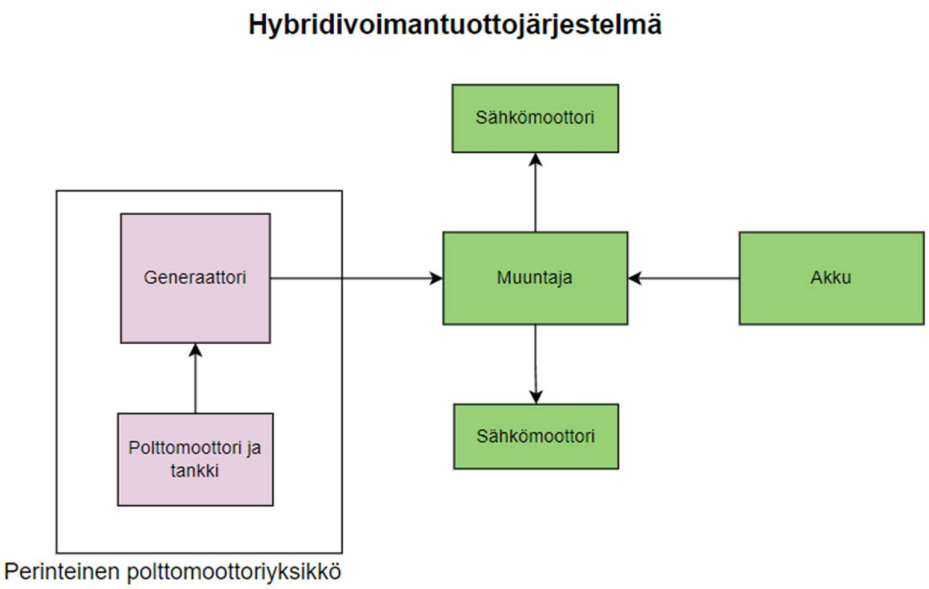
Moottorin jatkuva vääntömomentti on 1 000 Nm ja voimansiirto on tehty ilman vaihteistoa moottorilta suoraan propellille. Lentokoneella päästään 20 minuutin lentoaikaan. (Aerospace Technology, 4.2.2020)

3.2.2 HEMEP - Hybrid Electric Multi Engine Plane

Ensimmäinen esiteltävä hybridilentokone on nimeltään HEMEP. Projektissa mukana ovat muun muassa Diamond Aircraft Industries, Siemens, Airbus, ja muun muassa Itävaltalainen Linzin yliopisto. Projektin tarkoituksena on muokata yksimoottorisesta DA40-pienlentokoneesta kaksimoottorinen. Lentokoneen tavoitteena on pystyä tekemään lentoonlähtö täysin sähköisesti ja tarvittaessa käyttää matkantekoon energianlähteenä dieseliä.

Hybridikäyttö toteutetaan sarjahybridinä kahdella sähkömoottorilla, sekä yhdellä dieselmoottorilla, jossa sähkömoottorit pyörittävät lentokoneen propelleja ja dieselmoottoriin yhdistetyllä generaattorilla voidaan tuottaa muuntajan kautta lisää tehoa moottoreille. Kuvassa 6 on lohkokaavio hybridimoottorin rakenteesta.

Lentokoneen kaksi sähkömoottoria pystyvät tuottamaan tehoa lentoonlähdössä 150 kW ja dieselmoottorilla voidaan tuottaa ylimääräinen 110 kW teho hybridimoottorille. Pelkällä sähkömoottoreilla ja akuilla koneella voidaan lentää 30 minuutin ajan, mutta hybridikäytön ansiosta jopa viiden tunnin lentäminen on mahdollista. (Diamond Aircraft, 2015)



Kuva 6 Hemep sarjahybridi-moottorikaavio (Diamond Aircraft, 2015)

3.2.3 Hybridilentokone – Airbus E-Fan X

Airbus, Rolls Royce ja Siemens yhdistivät voimiansa projektiin, jonka lentokonemalli oli matkustajalentokone. Lentokoneen runko oli nelimoottorinen BAe 146 ja tämä rakenne sopi projektiin koska lentokoneen suihkuturbiinimoottorit ovat verrattain pienet matkustajalentokoneiden luokassa.

Tarkoituksena oli rakentaa hybridilentokone siten, että lentokoneen turbiinimoottoreista yksi muutetaan sähköiseksi. Tämä hybridikäyttö ei olisi yhdistänyt sähköistä voimaa samoihin moottoreihin kerosiinikäyttöisten kanssa, kuten esimerkiksi edellinen HEMEP-projekti teki, vaan sähköinen moottori olisi pyörittänyt omaa 2 MW: n moottoriyksikköä (Flight International, 2017).

E-Fan X-projekti kuitenkin keskeytettiin vuonna 2020, mutta se toimii esimerkkinä erilaisille tavoille käyttää sähköä lentokoneiden voimanlähteenä (Airbus, 12.8.2022).

4. SÄHKÖKÄYTTÖ MATKUSTAJALENTOKONEESSA

Tässä osassa käydään läpi yleisellä tasolla matkustajalentokoneen sähköjärjestelmää ja tarkasteluun otetaan myöhemmin Boeing 787-mallin edistynyt sähköjärjestelmä, joka on mahdollistanut joidenkin perinteisten järjestelmien korvaamisen sähköisillä. Vaikka akulla toimivia sähkölentokoneita ei vielä saada suurempien lentokoneiden osalta kaupalliseen käyttöön, niin Boeingin edellä käynti sähköistyvien järjestelmien tiellä on askel jatkuvaan energiatehokkuuden parantumiseen matkustajaliikenteessä.

4.1 Sähkövirran tuotto lentokoneissa yleisesti

Lentokoneet sisältävät useita järjestelmiä, jotka tarvitsevat sähköä toimiakseen ja normaaleissa lento-olosuhteissa sähkövirta tuotetaan lentokoneen moottoreiden generaattoreilla.

Pääjännite, jota lentokone itse tuottaa tai käyttää on tavallisesti 115 VAC, sähköjärjestelmässä käytetty taajuus on 400 Hz. Lentokoneen eri järjestelmät voivat toimia tasa- tai vaihtojännitteellä ja tasajännitejärjestelmiä varten koneista löytyy tasasuuntaajia. Tasavirranjakeluun käytetty tasajännitetaso on tavallisesti 28 volttia.

Lentokoneiden sähköjärjestelmiin on useita tapoja tuottaa sähkövirtaa. Yksi tapa on lentokoneen ulkopuolelta johdolla liitetty maasähkö. Kun lentokoneen täytyy itse tuottaa virtaa maassa tai viimeistään ilmassa, käytetään sen omia generaattoreita. Alla esitellään järjestelmät, joita käytetään matkustajalentokoneen sähköntuottamiseen. (Skybrary, 1.8.2022)

4.1.1 Generaattorit moottoreissa

Ilmassa lentäessä tai maalla rullattaessa virta järjestelmiin täytyy lentokoneen tuottaa itse ja pääasiassa se tapahtuu moottoreissa olevien generaattorien avulla. Eli lentokoneen turbiinimoottoreiden täytyy tuottaa pyöriessään työntövoiman lisäksi mekaaninen energia, joka muutetaan sähkövirraksi generaattoreilla. Tavallisesti kaksimoottorisessa matkustajakoneessa on molemmassa päämoottorissa yksi generaattori. Generaattoreiden koko riippuu konemallista, esimerkiksi kuvassa 7 käytetyn geneerisen koneen generaattorit ovat näennäisteholtaan 120 kVA. (Skybrary, 1.8.2022)

4.1.2 APU-moottori ja generaattori

Auxiliary Power Unit eli APU-moottori on myös turbiinimoottori, joka tuottaa virran tarvittaviin järjestelmiin omalla generaattorillaan. APU-moottori ei tuota päämoottorien tavoin työntövoimaa lentokoneelle, vaan moottoria käytetään silloin, kun päämoottorit ja niiden generaattorit eivät ole käynnissä. APU-moottori käynnistetään sille tarkoitettua akkua käyttäen ja itse APU-moottoria käytetään esimerkiksi päämoottorien käynnistämiseen. APU-moottoria voidaan käyttää tarpeen vaatiessa myös lennon aikana varavoimanlähteenä. (Skybrary, 1.8.2022)

4.1.3 Maasähkö

Ulkopuolista virransyöttöä kutsutaan maasähköksi (eng. *ground power* tai *external power*). Maasähköä syötetään 115 VAC:n jännitteellä 400 Hz:n taajuudella lentokoneen ollessa paikallaan. Tämä sähkövirta antaa tarvittavan tehon esimerkiksi ilmastoinnille ja valoille. Maasähkö liitetään yleensä maapalveluiden toimesta ja virtalähde voidaan liittää terminaalin matkustajasiltojen läheisyydestä, maakaivoista tai sitten esimerkiksi liikutettavasta generaattorista. Kun maasähköä ei ole kytkettynä, lentokoneen APU-moottoria voidaan käyttää tarvittavan sähkön tuottoon. (McFadyen, 2013)

4.1.4 RAT-generaattori

RAT-generaattori on edellisistä järjestelmistä harvimmin käytössä. Lyhenne tulee sanoista Ram Air Turbine Generator. Matkustajalentokoneissa se on pienehkö potkuri, joka voidaan avata ulos lentokoneen rungosta. Se on hätätilanteisiin tarkoitettu järjestelmä, joka tuottaa tarvittavan virran mahdollistamaan esimerkiksi ohjauksen ja hydrauliikan toiminnan. (Page, 2019)

4.1.5 Akku

Lentokoneissa on käytössä joitakin akkuja. Yleisimmät, jotka löytyvät useimmista matkustajakoneista ovat pääakku (eng. *Main Battery*) ja APU-moottorin akku. Niitä käytetään

APU-moottorin käynnistämiseen ja tuottamaan hätätilanteessa virtaa sen ajan, kunnes RAT-järjestelmä saadaan toimintaan. (Mark, 2018)

4.1.6 Muut järjestelmät – Paineilma

Perinteisesti lentokoneissa on käytetty paineilmaa useiden järjestelmien toimintaan. Paineilma tuotetaan moottorien läpi virtaavasta ilmasta. Tätä turbiinimoottorin tuottamaa ilmaa kutsutaan vuodatusilmaksi, (eng. *bleed air*). Vuodatusilman huono puoli on siinä, että se heikentää lentokoneen suihkuturbiinin tehoa tuottaa työntövoimaa, sillä käytetty ilma nimensä mukaisesti vuotaa ulos turbiiniprosessista. (Sinnett, 2008)

4.2 Sähkökäytön innovaatiot matkustajakoneessa – Boeing 787

Boeing 787 on yksi moderneimpia matkustajakoneita ja erilaiset teknologiset ratkaisut ovat saavuttaneet konemallille energiatehokkaimman toiminnan matkustajakoneluokassa. Kokoluokaltaan se on laajarunkoinen ja koneeseen mahtuu matkustajia yleensä 250–350 riippuen lentoyhtiöiden käyttämästä istuinjärjestelystä.

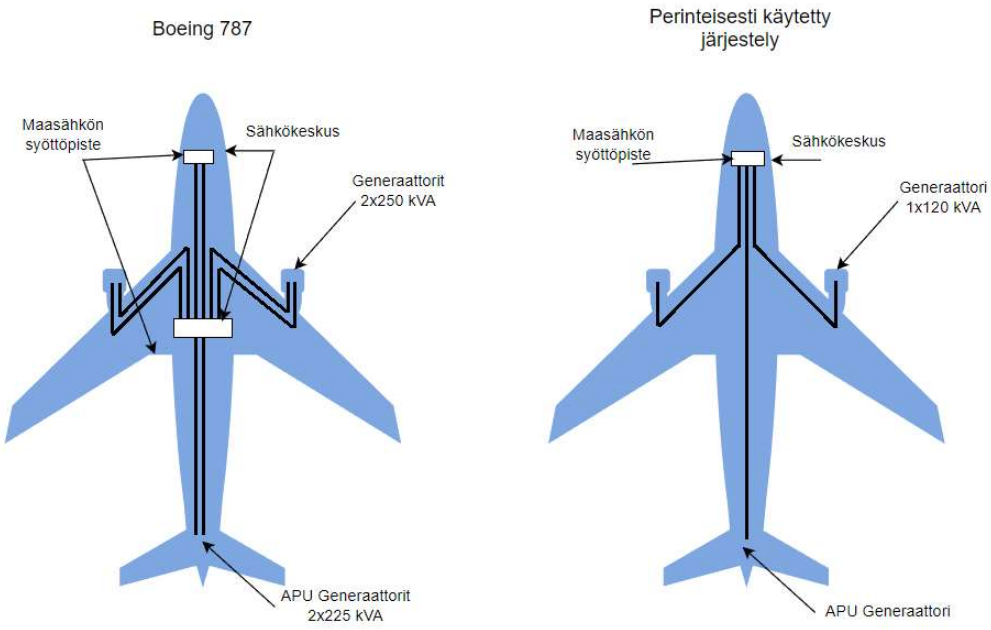
Boeing 787 on onnistunut parantamaan energiatehokkuutta suuren kokoluokan lentokoneeseen sähkön avulla ja lentoyhtiölle konemalli on energiatehokkuutensa takia kiinnostava kohde reittilennoille polttoaineen säästöstä aiheutuvien kustannusten ansioista. (Page, 2019)

4.2.1 Mitkä sähkötekniset ratkaisut ovat johtaneet energiatehokkuuteen?

Boeing 787:n edullisen energiatehokkuuden parantumiseen liittyy sähköjärjestelmien lisääminen. Tämä kuitenkin johtaa luonnollisesti suurempaan sähkön tarpeeseen ja 787 ei sisällä muita kiinteitä sähkövarastoja kuin APU-moottorin akun ja pääakun.

Lennon aikana joudutaan siis tuottamaan enemmän sähkövirtaa moottoreista ja tämän takia generaattoreita on jokaisessa moottorissa 2 eli 787:ssa on yhteensä 6 generaattoria. Kuvassa 7 on esitetty vierekkäin 787:n ja tavallisen matkustajalentokoneen sähkönjakelujärjestelmää. Sen lisäksi, että generaattoreita on enemmän, niin käytössä olevat yksiköt ovat näennäisteholtaan 250 kVA.

Boeing 787:ssa käytetyt generaattorit tuottavat 230 VAC jännitteen ja sähkönjakelussa käytössä on myös 115 VAC jännitetaso. (Sinnett, 2008)



Kuva 7 Miten Boeing 787 (vasemmalla) sähköjärjestelmä vertautuu normaaliin matkustajalentokoneeseen. (Sinnett, 2018)

4.2.2 Korvaaja paineilmalle – 'No-bleed'-systeemi

Lisätylle sähköjärjestelmälle löytyy käyttöä esimerkiksi paineilman korvaamisesta. Paineilmalaitteisto on pystytty sähköistyksen ansioista poistamaan lähes kokonaan. Käytössä olevat moottorit eivät tuota turbiiniprosessissa vuodatusilmaa. Tätä systeemiä kutsutaan Boeing 787 moottoreiden yhteydessä nimityksellä "No-bleed"-moottoriarkkitehtuuriksi. Paineilmaa käytetään vielä jonkin verran moottoreiden jäänestojärjestelmään ja sitä voidaan käyttää tarvittaviin järjestelmiin sähköjärjestelmän vikatilanteissa.

Toisin sanoen, sen sijaan, että päämoottoreista tuotaisiin paineilmaa ulos järjestelmien toimintaan, niin No-bleed-moottoritekniikalla generoidaan enemmän sähköä, jonka avulla järjestelmät toimivat. Merkittävänä etuina moottoreissa on ensinnäkin se, että turbiinimoottoreiden polttoaineenkäyttö tehostuu työntövoiman kannalta, koska moottoreiden läpi virtaavaa ilmaa ei katoa matkalla. Toiseksi moottoreista on voitu jättää suuret paineilmajärjestelmän osat, jotka ovat vaikuttaneet epäedullisesti lentokoneen massaan.

Perinteisesti paineilmalla toimivia ja vuotoilmaa käyttäviä järjestelmiä ovat olleet esimerkiksi lentokoneen hydrauliikka, paineistus, ilmanvaihto ja siipien jäänestojärjestelmä. Järjestelmiä ohjataan nyt sähköisillä pumpuilla ja kompressoreilla. Hydrauliikkaohjattuja järjestelmiä ovat esimerkiksi lentokoneen laskusiivekkeet. (Sinnett, 2008)

4.2.3 Sähköjärjestelmän edut

Johtopäätöksenä edut matkustajalentokoneiden sähköjärjestelmien lisäämisestä ovat moottorien parempi hyötysuhde, sekä se, että lentokoneen massaa on pystyttä pienentämään eisähköisten järjestelmien poistamisella. (Sinnett, 2008)

4.3 Mihin jatketaan?

Boeing 787 on hyvä esimerkki, miten sähköjärjestelmät voivat vähentää lentämisen päästöjä. Boeing on alkanut kehittämään edelleen energiatehokkaampaa konemallia 777X. Tämä konemalli on hieman suurempi, kuin 787 ja siinä käytetään samoja sähköjärjestelmien innovaatiota ja uusien moottorien myötä sen on tarkoitus säästää noin 10 % polttoainetta suhteellisesti verrattuna 787:an. (Boeing, 10.8.2022)

4.3.1 Fly-by-wireless

Nykyään käytössä oleva ’fly-by-wire’-ohjausjärjestelmä korvasi lentokoneen ohjaamisessa mekaanisen järjestelmän. Fly-by-wire toimii sähköisillä signaaleilla, jotka ohjaavat lentokoneen hydrauliikka.

Fly-by-wireless olisi fly-by-wire-järjestelmän mahdollinen seuraaja. Tarkoituksena olisi ohjata hydrauliikkaa langattomasti, joten ohjaavaa johdotusta voitaisiin vähentää näin ollen keventäen lentokoneen massaa. Fly-by-wireless-järjestelmä ei ole vielä yleisessä lentokäytössä, mutta sen tapaista toimintaa on testattu jonkin verran, esimerkiksi esitellyssä Airbus E-Fan X:ssä ohjaamiseen käytettiin langattomia yhteyksiä. (Graham-Rowe, 2006)

5. YHTEENVETO/JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähköisen lentämisen suurimpana haasteena on tällä hetkellä akkuteknologia, joka ei vielä ole läheskään riittävä käytännölliseen ja kaupalliseen matkailuun. Litiumioniakku soveltuu toimivasti sähköautojen tarpeeseen, mutta lentämiseen niiden energiatiheys ei vielä ole riittävä ja kokonaan sähköiseen ilmailuun tarvitaan vielä paljon teknologian kehitystä akkujen puolelta.

Sähköisen lentämisen suurena etuna voidaan pitää sähkön tehokkuutta hyötysuhteen kannalta siinä missä sähkömoottoreilla voidaan yltää yli 90 % hyötysuhteisiin suihkuturbiinimoottoreiden jäädessä alle 50 %. Lisäksi kuitenkin erilaiset suoritetut ja käynnissä olevat projektit osoittavat, että potentiaalia on tulevaisuutta ajatellen.

Toistaiseksi lentämisen päästöttömyyden kehityksessä on sähkön puolelta tyydyttävä vanhojen järjestelmien päivittämiseen, jonka Boeing 787 on osoittanut käytännölliseksi.
Myös muun teknologian kuten rakennusmateriaalien keventyminen ja aerodynamiikan kehitys auttavat yleisesti taloudellisempaan ja ympäristöystävällisempään matkustajalentämiseen. Kehityssuuntaa ohjataankin hyvin EU:n sekä IATA:n puolelta uusilla tavoitteilla tulevaisuutta ajatellen.

Joitakin tapoja, joilla nykyiseltään päästöjä voitaisiin pienentää tulevaisuudessa, olisi esimerkiksi hybridimoottoreiden käyttö lentokoneiden rullaukseen. Oli tämä hybridikäyttö sitten esimerkiksi vetypolttokennojen tai akulla toimiva sähkömoottori. Lähitulevaisuudessa pitäisi kuitenkin tavoitella jo energiatehokkuuden parantumista entisestään ja tähän uudet lentokonemallit ovat hyvin tärkeitä. Suuret valmistajat Airbus ja Boeing ovat jo kehittäneet uuden sukupolven lentokonemalleja, joilla päästään jo suuriin polttoainesäästöihin verrattuna vanhoihin lentokonemalleihin. Nämä lentokonemallit ovat Boeingin 787 ja Airbusin A350, joiden moottorit ovat noin 25 % energiatehokkaammat ja tuottavat arvioilta 15 % vähemmän CO2 päästöjä (Herbert, 2018).

LÄHTEET

Aerospace Technology. Extra 330LE Electric Aircraft [Verkkoaineisto] [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.aerospace-technology.com/projects/extra-330le-electric-aircraft/

Airbus. E-Fan X A giant leap towards zero-emission [Verkkoaineisto] [Viitattu: 12.8.2022]. Saatavissa: https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x

Boeing. Boeing 777X [Verkkoaineisto] [Viitattu: 10.8.2022]. Saatavissa: https://www.boeing.com/commercial/777x/index.page

Broom, D., 2019 Planes can now fly for 21 hours non-stop. But are people ready? [Verkkoaineisto] [Viitattu 27.1.2019]. Saatavissa: https://www.weforum.org/agenda/2019/05/planes-can-now-fly-for-21-hours-non-stop-but-are-humans-ready/

Cogley, B., 2019. World's first commercial electric plane takes off near Vancouver [Verkkoaineisto] [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.dezeen.com/2019/12/17/worlds-first-commercial-electric-plane-canada-seaplane/

De Oliva, A., 2017. How old is the EU's commercial aircraft fleet? [Verkkoaineisto] [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.euronews.com/2017/12/09/how-old-is-the-eu-s-commercial-aircraft-fleet-

Diamond Aircraft, 2015. HEMEP – Hybrid Electric Multi Engine Plane [pdf-aineisto] [Viitattu: 11.8.2022]. Saatavissa: https://www.airtn.eu/downloads/2015-06-30_airtn_next-gen_hemep.pdf

Engineering ToolBox, 2008,. Fossil and Alternative Fuels - Energy Content [Verkkoaineisto] [Viitattu 3.2.2020]. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/fossil-fuels-energy-content-d_1298.html

European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, Directorate-General for Research and Innovation, EU, 2011, Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs. [pdf-aineisto] [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: https://data.europa.eu/doi/10.2777/50266

Flight International, 2017. OPINION: E-Fan X is vital stepping stone [Verkkoaineisto] [Viitattu: 12.8.2022]. Saatavissa: https://www.flyingmag.com/diamond-da40-hybrid-electric-prototype-flies/

Fung, M., 2005. Energy Density of Hydrogen [Verkkoaineisto] [Viitattu: 3.2.2020]. Saatavissa: https://hypertextbook.com/facts/2005/MichelleFung.shtml

Graham-Rowe, D., 2006. 'Fly-by-wireless' plane takes to the air [Verkkoaineisto] [Viitattu: 11.8.2022]. Saatavissa: https://www.newscientist.com/article/dn9176-fly-by-wireless-plane-takes-to-the-air/

Hepperle, M., 2012. Electric Flight - Potential and Limitations [pdf-aineisto] [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/234738753_Electric_Flight_-_Potential_and_Limitations

Herbert, I., 2018. What is so special about the Airbus A350 and Boeing 787 Dreamliner? [Verkkoaineisto] [Viitattu: 16.8.2022]. Saatavissa: https://resources.vistair.com/articles_draft/articles/what-is-so-special-about-the-airbus-a350-and-boeing-787-dreamliner

Howell, E., 2019. Green for Takeoff: Inside the Electric Airplane Industry [Verkkoaineisto] [Viitattu: 14.1.2020]. Saatavissa: https://www.toptal.com/finance/market-research-analysts/electric-airplanes

IATA, 2013. Technology Roadmap [pdf-aineisto] [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: https://aviation.report/Resources/Whitepapers/6e0df8d7-f381-4a56-bef4-3f83fe8f65e1_IATA%20TECHNOLOGY%20ROADMAP%202013.pdf

ICAO, 2021, 2021 global air passenger totals show improvement from 2020, but still only half pre-pandemic levels [Verkkoaineisto] [Viitattu 5.9.2022]. Saatavissa: https://www.icao.int/Newsroom/Pages/2021-global-air-passenger-totals-show-improvement.aspx

ICAO, 2018, ICAOLong-TermTrafficForecasts [pdf-aineisto] [Viitattu 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.icao.int/sustainability/Documents/LTF_Charts-Results_2018edition.pdf

Ilmastoapu, 4.2.2020, Lentämisen päästöt [Verkkoaineisto] [Viitattu 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.ilmastoapu.fi/kirjoitus/9515

Klesius, M., 2/2009. How Things Work: Flying Fuel Cells [Verkkoaineisto] [Viitattu: 30.1.2020]. Saatavissa: https://www.smithsonianmag.com/air-space-magazine/how-things-work-flying-fuel-cells-47181830/

Le Feuvre, P., 18.3.2019. Are aviation biofuels ready for take off? [Verkkoaineisto] [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off

Liu, C., Kharina, A., 2017. Canada-U.S. transborder airline fuel-efficiency ranking. [pdf aineisto] [Viitattu: 3.2.2020]. Saatavissa: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Transborder-airline-ranking_working-paper_27122017_vF1.pdf

Mark, R., 2018. How an Auxiliary Power Unit Works [Verkkoaineisto] [Viitattu: 4.8.2022]. Saatavissa: https://www.flyingmag.com/how-an-auxiliary-power-unit-works/

McFadyen, S., 2013. What is Aircraft Ground Power [Verkkoaineisto] [Viitattu: 2.8.2022]. Saatavissa: https://myelectrical.com/notes/entryid/216/what-is-aircraft-ground-power

Modern Airliners. What are the Specs of the Airbus A380 Super Jumbo? [Verkkoaineisto] [Viitattu 27.1.2020]. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/fossil-fuels-energy-content-d_1298.html

NASA. Quest for Performance: The Evolution of Modern Aircraft, Chapter 10: Technology of the Jet Airplane [Verkkoaineisto] [Viitattu 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.hq.nasa.gov/pao/History/SP-468/ch10-3.htm

Page, C., 2013. How the 787 uses electricity to maximize efficiency [Verkkoaineisto] [Viitattu: 2.8.2022]. Saatavissa: https://thepointsguy.com/guide/how-the-787-uses-electricity/

Pfeifer, S., 2019. Electric planes: the revolution has some snags [Verkkoaineisto] [Viitattu: 5.1.2020]. Saatavissa: https://www.ft.com/content/a9dc81d2-725e-11e9-bf5c-6eeb837566c5

Pipistrel, Taurus Electro [Verkkoaineisto] [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.pipistrel-aircraft.com/products/gliders/taurus-electro/

Plumer, B., 2016. Solar planes aren't the green future of air travel. But here's what could be. [Verkkoaineisto] [Viitattu: 3.2.2020]. Saatavissa: https://www.vox.com/2016/5/6/11569202/aviation-emissions-solar-plane

Pope, S., 2018. Diamond Flies Multi-Engine Hybrid-Electric Prototype [Verkkoaineisto] [Viitattu: 11.8.2022]. Saatavissa: https://www.flyingmag.com/diamond-da40-hybrid-electric-prototype-flies/

Siemens AG, 2018. Siemens eAircraft - Disrupting Aircraft Propulsion [Verkkoaineisto] [Viitattu 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.ie-net.be/sites/default/files/Siemens%20eAircraft%20-%20Disrupting%20Aircraft%20Propulsion%20-%20OO%20JH%20THO%20-%2020180427.cleaned.pdf

Sigler, D., 2019. Austrians, Swiss, Chinese Launch Three New Electric Aircraft [Verkkoaineisto] [Viitattu: 10.12.2019]. Saatavissa: http://sustainableskies.org/austrians-swiss-chinese-launch-three-new-electric-aircraft/

Sinnett, M., 2013. 787 No-Bleed Systems: Saving Fuel and Enhancing Operational Efficiencies [Verkkoaineisto] [Viitattu: 15.8.2022]. Saatavissa: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/article_02_2.html

Skybrary. Aircraft Electrical Systems [Verkkoaineisto] [Viitattu: 1.8.2022]. Saatavissa: https://skybrary.aero/articles/aircraft-electrical-systems

The World Bank, 2022, Air transport, passengers carried [Verkkoaineisto] [Viitattu: 5.9.2022]. Saatavissa: https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR?end=2020&start=1997

University of Washington, 2019. What is a lithium-ion battery and how does it work? [Verkkoaineisto] [Viitattu 9.1.2020]. Saatavissa: https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/

Verstraete, D., 2019 Climate explained: why don’t we have electric aircraft? [Verkkoaineisto] [Viitattu 13.1.2020]. Saatavissa: https://theconversation.com/climate-explained-why-dont-we-have-electric-aircraft-123910