



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

LENTOLIIKENTTEEN SÄHKÖISTYMISEN TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Antti Kaarre

Konetekniikka
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2026

TIIVISTELMÄ

Lentoliikenteen sähköistymisen tulevaisuuden näkymät

Antti Kaarre

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö, 2026, 23 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Aapo Hölsä

Sähköistymistä tavataan jo suurissa määrin autoteollisuudessa, mutta selkeitä läpimurtoja lentokonekäytössä ei olla vielä nähty. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia lentoliikenteen sähköistymisen tulevaisuuden näkymiä.

Työ suoritetaan kirjallisuustutkimuksena, jossa tarkastellaan lentokoneiden sähköistymistä. Muodostetaan kuva lentokonetekniikkaan vakiintuneista moottorityypeistä sekä työntövoiman tuottamistavoista, vakiintuneen tekniikan sähköistämismahdollisuuksista, lentokonevalmistajien käytännön toteutuksista sekä konsepteista. Tutkimuksessa tarkastellaan myös lentokoneiden sähköistämistä rajoittavia tekijöitä.

Lentokonevalmistajilta löytyy käytännön toteutuksia sekä konsepteja, mutta tutkimuksen kirjallisuudessa ei ole havaittavissa yhtä selkeää toteutustapaa. Tutkimuksen perusteella voidaan myös todeta, että sähköistäminen ei vielä ole haasteetonta. Tulevaisuudelta odotetaan akkuja, joiden energiatiheys on suurempi. Muita sähköistymisen esteitä ovat lentokoneisiin liittyvät turvallisuusmääräykset sekä lentokenttäinfrastruktuurin kehittämiseen tarvittava aika sekä raha. Vaikka sähköistäminen vähentää hiilidioksidipäästöjä merkittävästi, on lentoliikenteen sähköistäminen yleisen käsityksen mukaan mahdollista vasta seuraavan 20 vuoden aikana.

Asiasanat: Lentokonetekniikka, lentoliikenne, sähköistyminen

ABSTRACT

The future of electrification in air traffic

Antti Kaarre

University of Oulu, Degree Programme in Mechanical Engineering

Bachelor's thesis, 2026, 23 pp.

Supervisor at the university: Aapo Hölsä

Electrification has taken its space in the automotive industry, yet aviation industry lacks this breakthrough of electrification. This bachelor's thesis examines and evaluates the future of electrification in air traffic.

This is done as literary research, focusing on the electrification of airplanes. Familiarizing the reader with subjects including established engine types and ways of making propulsion in airplane industry, electrification of established powertrain technologies and aircraft manufacturers' applications of said technology and future concepts. Research also includes a look into the factors limiting electrification in airplanes.

Aircraft manufacturers have applications of electric powertrains including concepts, but the literary sources used in this research cannot name the best electric powertrain option. According to the research, it can be concluded that electrification does not come without challenges. The future of electrification needs batteries with higher energy density. Other factors limiting electrification in airplanes include strict safety protocols in aviation and the need for updated airport infrastructure, taking up time and money. Although electrification reduces carbon emissions significantly, the consensus among research states that the electrification of air traffic will be possible within 20 years.

Keywords: Aircraft technology, air traffic, electrification

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO.....	4
1 JOHDANTO.....	5
2 LENTOKONETEKNIikka.....	6
2.1 Mäntämoottori ja potkuri.....	7
2.2 Suihkumoottori	7
2.2.1 Turbojettimoottori.....	7
2.2.2 Ohivirtausmoottori.....	8
2.3 Potkuriturbiinimoottori.....	9
3 ERILAISIA SÄHKÖISIÄ TOTEUTUKSIA.....	11
3.1 Hybridit.....	11
3.2 Turboelectric	12
3.3 Täyssähkö	13
3.4 Käytännön toteutukset sekä tulevaisuuden konseptit	14
3.4.1 Velis Electro.....	14
3.4.2 ES-30	15
3.4.3 EcoPulse	16
3.4.4 N3-X.....	17
4 SÄHKÖISTÄMISEEN LIITTYVÄT RAJOITTEET	19
5 YHTEENVETO.....	21
LÄHDELUETTELO	22

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on tarkastella tulevaisuuden lentoliikennettä ja etenkin lentoliikenteen sähköistymisen näkökulmasta. Lentoliikenne sisältää lentokoneiden lisäksi myös muita ilma-aluksia kuten helikoptereita, mutta tarkastelu keskittyy lentokoneisiin, niiden tekniikkaan, nykyisiin tekniisiin toteutuksiin, tekniikan kehitykseen sekä sähköistämistä rajoittaviin tekijöihin. Tarkastelun kohteena olevat lentokoneet ovat kiinteäsiipisiä sekä miehitettyjä.

Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, joka vastaa tutkimuskysymyksiin. Tutkimuskysymykset ovat:

- Minkälaisia sähköisiä toteutuksia on olemassa tai kehitteillä?
- Mitkä tekijät rajoittavat sähköistymisen etenemistä tällä hetkellä?

Sähköistyminen itsessään on hyvin ajankohtainen kaikissa ajoneuvoissa. Sähkön käyttäminen energian lähteenä perinteisten fossiilisten polttoaineiden sijaan vähentää merkittävästi hiilidioksidipäästöjä, täten vähentäen haitallista ilmaston lämpenemistä. Voidaan sanoa, että sähkön käyttäminen on lyönyt itsensä läpi autoteollisuudessa, sillä markkinoilta löytyy jo useita täysin sähköisiä automalleja useilta eri valmistajilta. Kuitenkaan ilmailussa ja lentoliikenteessä samantapaista läpimurtoa ei olla vielä nähty. Lentoliikenteessä sähkön käyttäminen energian lähteenä on monimutkaisempaa kuin autoilussa, sillä voimaa tulee kyetä tuottamaan mahdollisimman paljon, mutta kuitenkin siten että lentokoneen paino ei nouse liikaa.

Suurimpana ongelmana voidaan pitää sähkön varastoimiseen liittyviä ongelmia. Akustot ovat painavia ja vievät paljon arvokasta tilaa sekä kykyä kuljettaa suurempia lasteja perille. Tämä vähentää huomattavasti lentoliikenteen tehokkuutta ja aiheuttaa kustannuksia, sillä joudutaan lentämään useita kertoja, jotta saavutetaan samanlainen kantokyky ja tehokkuus kuin nykyisillä fossiilisiin polttoaineisiin nojautuvilla ratkaisuilla. Lentokenttien infrastruktuuri tulee päivittää siten, että lataaminen on mahdollista kentillä nopeasti sekä turvallisesti.

2 LENTOKONETEKNIikka

Lentokoneet ovat nähneet läpimurtonsa 1900-luvulla. Yleisesti Wrightin veljesten vuonna 1903 rakentamaa lentokonetta pidetään ensimmäisenä lentokoneena, jolla kyettiin lentämään hallitusti. (Petrescu et al. 2017) Vaikka lentokoneet ovat nähneet lukuisia muutoksia teknillisesti, lentämiseen vaadittava rakenne on säilynyt samanlaisena.

Lentämiseen tarvitaan aerodynaamista rakennetta, kuten runkoa ja siipiä. Lisäksi tarvitaan ohjauslaitteistoa kuten laippoja ja peräsintä. Työntövoiman tuottamiseen tarvitaan moottoria, joka taas puolestaan vaatii polttoainetta, jäähdytysnestettä ja öljyä. Näiden lisäksi lentokoneista löytyy hallintalaitteita sekä mittareita, jotka sijaitsevat ohjaamossa pilotin ulottuvilla. Lentokoneen liikuttamiseen lentokentällä, nousuun ja laskeutumiseen tarvitaan laskutelineet.

Muutoksia lentokoneiden tekniikassa on etenkin nähty materiaalivalinnoissa. Kehityksen alkupäässä tarpeeksi kevyen rakenteen saavuttamiseksi käytettiin paljon puuta lentokoneiden rungoissa. Nykypäivänä puu on korvattu alumiinilla ja sen eri seoksilla. Lentokoneisiin on myös lisätty paljon lentämistä helpottavaa teknologiaa kuten autopilotti tai keinohorisontti. Merkittävää kehitystä on tapahtunut työntövoiman aikaansaamisessa erilaisten moottoriratkaisujen kehityttyä.

Sähköistämisen kannalta merkittävin tarkasteltava lentokoneen osa on voimalinja. Lentokoneissa voimalinja yleisesti koostuu polttomoottorista, joka tuottaa lentämiseen vaadittavaa työntövoimaa. Tästä työntövoiman tuottamistavasta käytetään myös termiä propulsio (engl. propulsion). Yleisimmät moottorityypit nykyaikaisessa ilmailussa ovat perinteinen mäntämoottori, suihkumoottori sekä potkuriturbiinimoottori. Työntövoiman tuottamiseen käytetään mäntämoottoreissa sekä potkuriturbiinimoottoreissa potkuria. Suihkumoottorin avulla työntövoimaa tuotetaan moottorin lävitse virtaavan ilman avulla. (Zhang et al. 2021)

2.1 Mäntämoottori ja potkuri

Mäntämoottori oli tärkeässä roolissa voimantuottamisessa 1900-luvun alusta aina toisen maailmansodan loppumiseen (Petrescu et al. 2017). Lentokoneissa käytetyt moottorit olivat nelitahtimoottoreita, jotka toimivat bensiinillä. Moottorityyppejä käytettiin useita, joista yleisimpinä voidaan pitää rivimoottoreita, V-moottoreita sekä tähtimoottoreita (National Air and Space Museum 2026).

Nelitahtimoottori toimii neljässä vaiheessa: 1. imutahti, 2. puristustahti, 3. työtahti ja 4. poistotahti. Imutahdissa sylinteriin imetään imuventtiilien läpi polttoaineen ja ilman seos. Puristustahdissa mäntä puristaa seoksen männän noustessa ylös. Työtahdissa puristettu seos sytytetään sytytystulpan avulla, jolloin saadaan aikaan hallittu räjähdys, joka lähettää männän takaisin ala-asentoon. Poistotahdissa mäntä palaa alas ja samalla räjähdyksessä syntyvät pakokaasut poistuvat pakoventtiilien kautta sylinteristä. Männät on kiinnitetty kampiakseliin, joka muuntaa mäntien liikkeen pyöriväksi liikkeeksi. Työntövoima tuotetaan moottoriin kiinnitetyn potkurin avulla. Potkuri on kiinnitetty moottorin kampiakseliin, josta pyöriväliike saadaan työntövoiman aikaansaamiseksi. (Hall 2021 a)

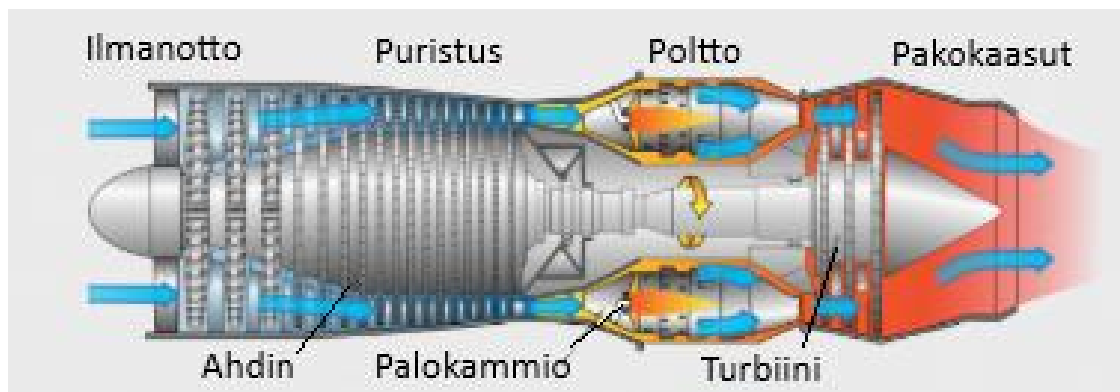
2.2 Suihkumoottori

Nykyaikaiset matkustajalentokoneissa käytettävät suihkumoottorityypit voidaan jakaa ohivirtausmoottoreihin (engl. turbofan) ja turbojettimoottoreihin (engl. turbojet). Suihkumoottori tuottaa tarvittavan työntövoiman moottorin läpi virtaavan ilman avulla.

2.2.1 Turbojettimoottori

Turbojettimoottori oli suihkumoottorityypeistä ensimmäinen, jota käytettiin lentokoneen työntövoiman tuottamiseen. Turbojetti kehiteltiin 1940-luvulla Saksassa, minkä seurauksena ensimmäinen tuotantosuihkuhävittäjä Messerschmitt Me 262 suoritti ensilentonsa 18.7.1942. Toisen maailmansodan jälkeen turbojettimoottorien kehittämisestä tuli maailmanlaajuinen ilmiö, jonka seurauksena lentokoneteollisuus nojautui yhä enemmän suihkumoottoreiden käyttämiseen. Suihkumoottorit korvasivat perinteiset nelitahtiset mäntämoottorit, sillä suihkumoottoreiden tehopainosuhte oli huomattavasti parempi. (El-Sayed 2017)

Turbojettimoottoria pidetään yksinkertaisimpana suihkumoottorityyppinä. Turbojettimoottori koostuu viidestä komponentista: Ilmanotto, kompressori/ahdin, palokammio, turbiini ja suihkuputki/suihkusuutin. Ilma virtaa ilmanotosta moottoriin, jonka jälkeen ilma puristuu kasaan ahtimessa. Ahtimen puristaessa ilmaa kasaan, ilman paine kasvaa. Tämän jälkeen ilmaan sekoitetaan polttoainetta ja seos sytytetään. Seos palaa hallitusti ja jatkuvasti palokammiossa, jonka jälkeen pakokaasut jatkavat matkaansa turbiiniin. Turbiini ja ahdin ovat yhdistetty toisiinsa akselin avulla. Turbiini hyödyntää pakokaasujen ja ilman virtausta ahtimen pyörittämiseen, jonka seurauksena moottoriin saadaan vielä enemmän ilmaa. Pakokaasujen virtaus ohjataan moottorista ulos suihkuputken ja suihkusuuttimen kautta. Suihkuputkesta poistuva kaasuvirtaus tuottaa työntövoimaa (kuva 1). (El-Sayed 2017)



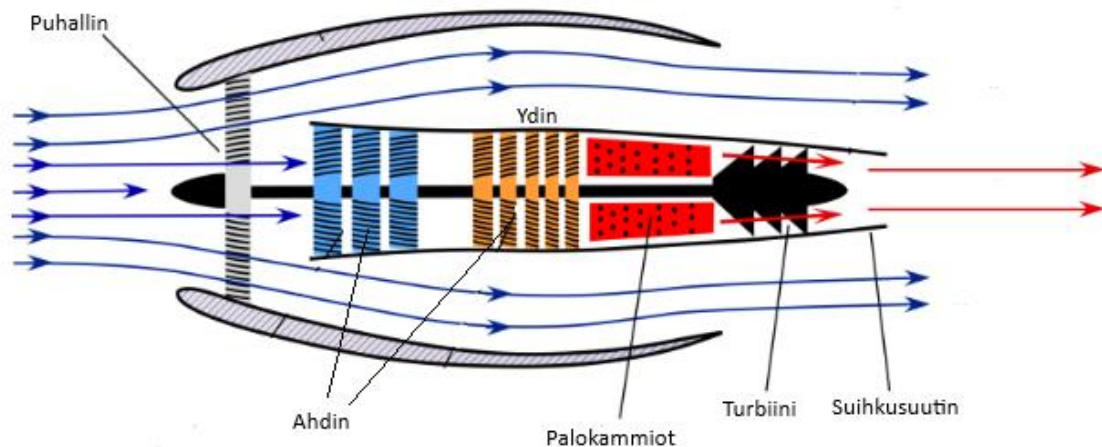
Kuva 1. Turbojettimoottorin rakenne ja toiminta. (mukaillen Leishman 2023)

Voidaan huomata, että perinteiset polttomoottorit ja suihkumoottorit tuottavat voimaa samanlaisten vaiheiden kautta. Ensin ilmaa tuodaan moottoriin, jonka jälkeen se puristetaan/paineistetaan. Tämän jälkeen ilman ja polttoaineen seos sytytetään. Sytytyksen jälkeen syntyvät pakokaasut ohjataan pois moottorista. Suihkumoottorissa nämä vaiheet ovat yhtäaikaaisesti käynnissä, kun taas mäntämoottoreissa vaiheet on tahditettu toimimaan toistensa jälkeen. (Hu et al. 2023)

2.2.2 Ohivirtausmoottori

Ohivirtausmoottorit ovat todella yleisiä nykypäivän isoissa matkustaja- sekä rahtilentokoneissa. Ohivirtausmoottoreissa työntövoiman tuottaminen tapahtuu samalla periaatteella kuin turbojettimoottorissa. Rakenteeltaan ohivirtausmoottorit eroavat turbojettimoottoreista siten, että ahtimen ilmanotossa on ahtimen halkaisijaa suurempi

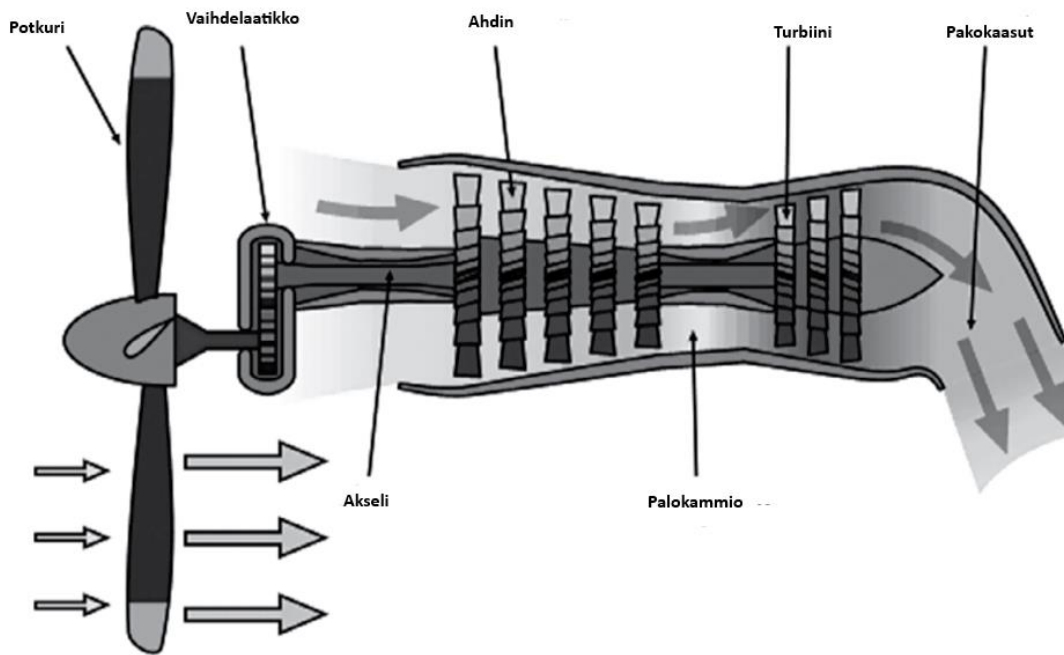
puhallin. Puhallin imee sekä ohjaa ilmaa suihkumoottorin ahtimeen, mutta suurin osa ilmasta ohjautuu moottorin ytimen ohitse. Ytimen ohi virtaava ilma ohjautuu moottorin lävitse. Puhaltimen läpi kulkeva ilma kiihtyy ja luo työntövoimaa. Ohivirtausmoottori saakin työntövoimaa sekä ytimeltä eli suihkumoottorilta ja puhaltimelta (kuva 2). (Hall 2021b)



Kuva 2. Ohivirtausmoottorin rakenne ja toiminta. (mukaillen Leishman 2023)

2.3 Potkuriturbiinimoottori

Kuten mäntämoottorin ja potkurin yhdistelmässä, potkuriturbiinimoottori (engl. turboprop engine) yhdistää työntövoiman tuottamiseksi potkurin ja turbojettimoottorin. Potkuriturbiinimoottorin rakenne on optimoitu siten, että turbojettimoottori tuottaa pyörivää voimaa, joka välitetään potkurille akselin avulla. Työntövoiman tuottaminen siis perustuu kaasuvirtauksen työntövoiman sijaan potkurin työntövoimaan, joka saadaan turbiinin aiheuttaman pyörivän liikkeen avulla. Voimaa välittävä akseli on yhteydessä turbojettimoottorin turbiiniin, josta voima välitetään vaihdelaatikon kautta potkurille (kuva 3). Vaihdelaatikon avulla säädellään potkurin nopeutta. (El-Sayed 2017)



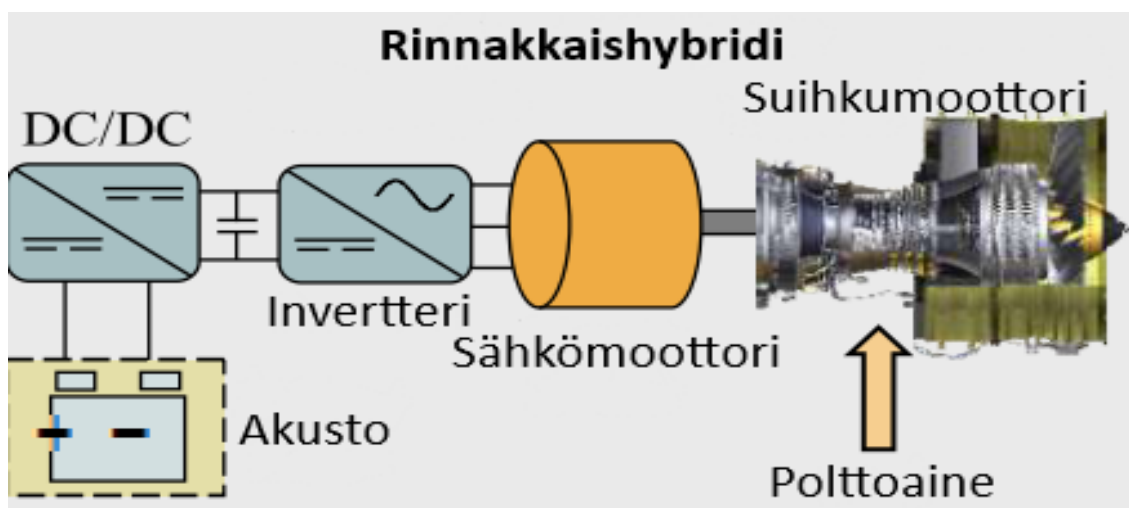
Kuva 3. Potkuriturbiinimoottorin rakenne ja toiminta. (mukaiillen El-Sayed 2017)

3 ERILAISIA SÄHKÖISIÄ TOTEUTUKSIA

Lentokoneissa laajasti käytetyt suihkumoottorit ja niiden erilaiset variaatiot ovat mahdollittomia sähköistää täysin. Suihkumoottoreiden toimintaperiaate perustuu täysin polttoaineen eli lentopetrolin palamiseen. Ilman ja polttoaineen seos sytyttäessä laajenee, joka taas puolestaan kiihdyttää moottorin ilmanottoa, lisäten poltettavan seoksen määrää. Laajentumisen seurauksena moottorista ulos ohjattava kiihtynyt kaasuvirta tuottaa työntövoimaa.

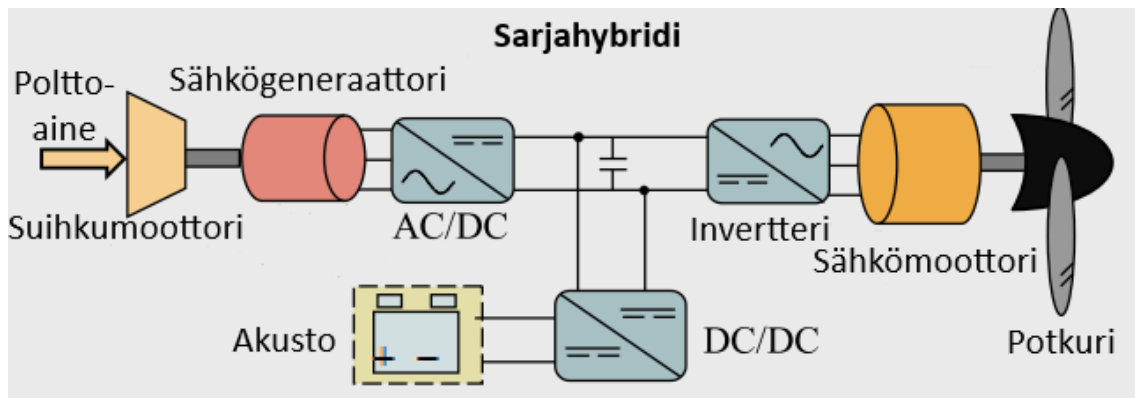
3.1 Hybridit

Suihkumoottoria voidaan kuitenkin hyödyntää hybridikokoonpanoissa, joissa sähkömoottori sekä suihkumoottori ovat yhdistetty akselien avulla toisiinsa. Sähkömoottori on akkukäyttöinen. Tällöin esimerkiksi ohivirtausmoottorissa sähkömoottori voi ohjata tuuletinta yksin tai samanaikaisesti suihkumoottorin kanssa. Hybriditoiminto lisää näin suihkumoottorin suorituskykyä. Tämänkaltaista rakennetta kutsutaan rinnakkaishybridiksi (engl. parallel hybrid) (kuva 4). (Benzaquen et al. 2021)



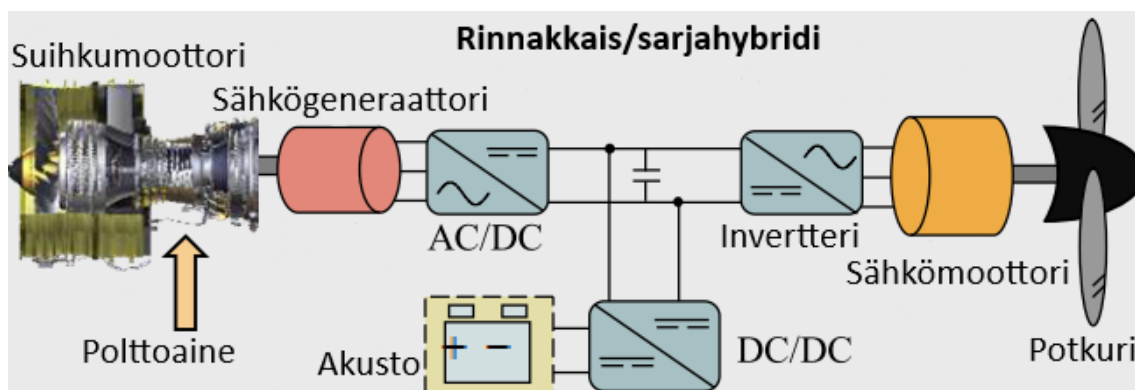
Kuva 4. Rinnakkaishybridi (mukaiillen Benzaquen et al. 2021)

Toinen vaihtoehtoinen hybridiratkaisu olisi sarjahybridi (engl. series hybrid), jossa työntövoima tuotetaan potkurin avulla, joka on kytketty sähkömoottoriin. Kaikki työntövoima tuotetaan tällöin akustoon kytketyn sähkömoottorin avulla. Suihkumoottori on taas kytketty siten, että sen avulla käytetään sähkögeneraattoria, joka lataa akustoa (kuva 5). (Benzaquen et al. 2021)



Kuva 5. Sarjahybridi (mukaiillen Benzaquen et al. 2021)

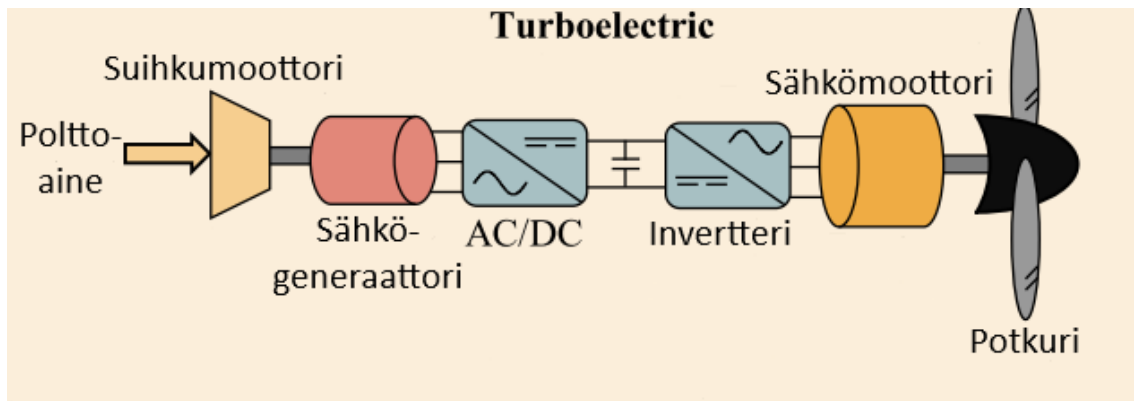
Kolmas ratkaisu on rinnakkais- ja sarjahybridin yhdistelmä (engl. series/parallel hybrid). Tällöin työntövoimaa voidaan tuottaa joko sähkömoottorin tai suihkumoottorin avulla. Molempia moottoreita voidaan hyödyntää akkujen tai suihkumoottorilla käytettävän sähkögeneraattorin avulla (kuva 6). (Benzaquen et al. 2021)



Kuva 6. Rinnakkais- ja sarjahybridin yhdistelmä. (mukaiillen Benzaquen et al. 2021)

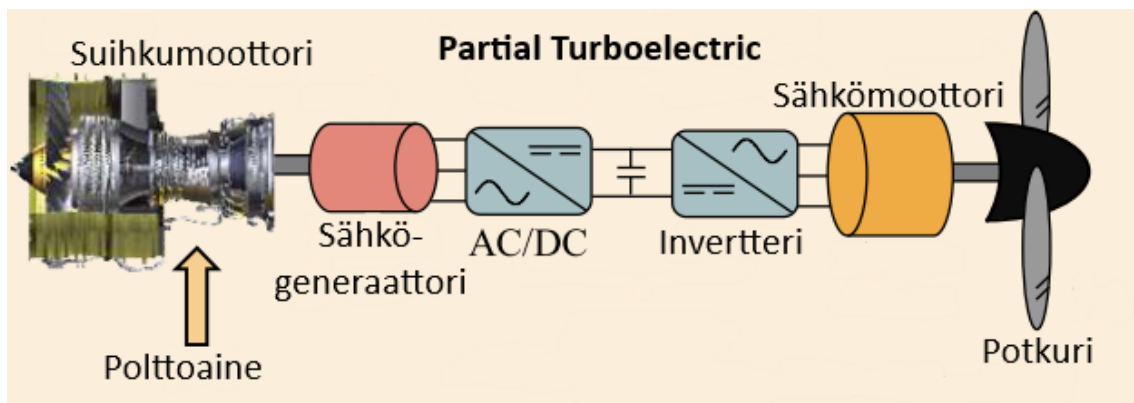
3.2 Turboelectric

Turboelectric sekä partial turboelectric ovat toiminta periaatteeltaan samantapaisia kuin hybridit. Suurin ero hybridien ja turboelectric toteutusten välillä on se, että turboelectric ei sisällä sähköenergian säilytykseen liittyviä teknologioita, kuten akkuja ollenkaan. Turboelectric toimii pitkälti samalla periaatteella kuin sarjahybridi, mutta ilman akustoa. Sähkömoottori tuottaa kaiken työntövoiman potkurin avulla, mutta sähkömoottori saa käyttöenergiänsä sähkögeneraattoreista. Generaattoreita käytetään suihkumoottorin avulla (kuva 7). (Benzaquen et al. 2021)



Kuva 7. Turboelectric-voimalinja. (mukaiillen Benzaquen et al. 2021)

Partial turboelectric taas käyttää työntövoiman tuottamiseen sekä sähkömoottoria, että suihkumoottoria. Samantapaisesti kuin rinnakkais- ja sarjahybridissä (kuva 8).(Benzaquen et al. 2021)

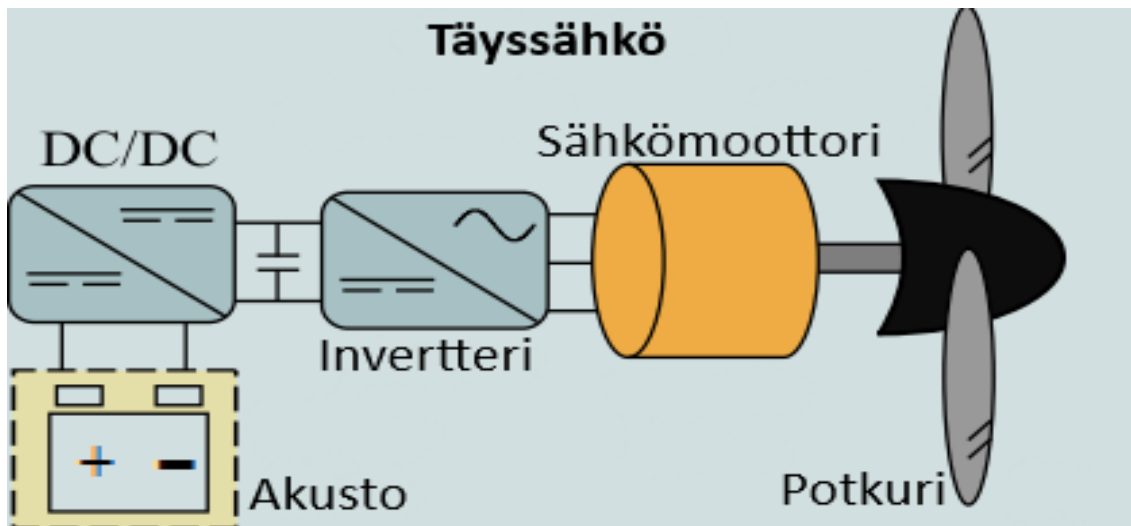


Kuva 8. Partial turboelectric-voimalinja. (mukaiillen Benzaquen et al. 2021)

3.3 Täyssähkö

Täyssähköarkkitehtuuri olisi toteutuessaan kaikista sähköisistä toteutuksista ympäristöystävällisin, sillä täyssähkön avulla päästään nollopäästöihin. Kaikki työntövoiman tuottamiseen käytettävä energia saadaan lentokoneen akuista, joiden sisältämää sähköenergiaa käytetään sähkömoottorin voimanlähteenä. (Benzaquen et al. 2021)

Toteutukseltaan täyssähkö on hyvin samanlainen kuin mäntämoottorilla ja potkurilla toimiva voimalinja. Polttoainesäiliöt on korvattu akuilla sekä muuntajilla, ja polttomoottori sähkömoottorilla (kuva 9).



Kuva 9. Täyssähkövoimalinja. (mukaiillen Benzaquen et al. 2021)

3.4 Käytännön toteutukset sekä tulevaisuuden konseptit

Vaikka sähköistyminen onkin vielä hyvin varhaisessa kehitysvaiheessa, löytyy markkinoilta jo valmiitakin sähköisiä lentokoneita. Tämän luvun tarkoituksena on luoda kuva tämänhetkisistä saavutuksista sekä mahdollisista tulevaisuuden toteutuksista.

3.4.1 Velis Electro

Slovenialaisyhtiö Pipistrelin valmistama täyssähköinen lentokonemalli Velis Electro on maailman ensimmäinen tyyppihyväksytty sähkölentokone (kuva 10). Malli on suunniteltu kahdelle hengelle, ja lentokoneen pääkäyttötarkoitus on toimia koulutuskoneena. Lentokoneen moottorina toimii EASA:n (European Union Aviation Safety Agency) tyyppihyväksymä Pipistrel E-811 sähkömoottori. Velis Electron lentoajaksi on ilmoitettu noin 50 minuuttia, moottorin tuottamaksi suurimmaksi tehoksi 57,6 kilowattia ja toimintajännitteeksi 345 VDC. Tavanomainen lentonopeus on 163 kilometriä tunnissa. (Pipistrel 2026)



Kuva 10. Pipistrel Velis Electro. (Pipistrel 2026)

3.4.2 ES-30

Matkustajalentokoneista ruotsalaisyhdysvaltalaisen yhtiön Heart Aerospaceen konseptilentokone ES-30 on lupaavimpia lähitulevaisuuden toteutuksia (kuva 11). ES-30 on vielä konsepti vaiheessa, mutta yhtiö tähtää tyyppihyväksyntään vuoteen 2029 mennessä. Kyseessä on hybridilentokone, jota voidaan käyttää myös täysin sähköllä. Yhtiö lupaa lentomatkaksi pelkällä sähköllä 200 kilometriä ja hybridikäytöllä 800 kilometriä. Kuten mallinimestä voidaan päätellä, tulee matkustajapaikkoja koneeseen 30 kappaletta. ES-30 on valmistajan mukaan suunniteltu etenkin lyhyiden matkojen suorittamiseen. Esimerkiksi maan sisäiset pienet siirtymät alueellisten lentokenttien välillä. (Heart Aerospace 2026)



Kuva 11. Heart Aerospace ES-30. (Heart Aerospace 2026)

3.4.3 EcoPulse

Kolmen ranskalaisen ilmailuvalmistajan Airbusin, Daherin ja Safranin yhteinen projekti EcoPulse toteutettiin osana Airbusin etenemissuunnitelmaa kohti vähäpäästöistä ilmailua. EcoPulse toteutettiin muunnellun Daher TBM 900 potkuriturbiinilentokoneen runkoon lisäämällä siipiin kuusi e-potkuria (kuva 12). Potkureita käytettiin 50 kilowatin sähkömoottorilla, jonka voimanlähteenä käytettiin akustoa tai 100 kilowatin lisävirtalähdettä. Ensilento toteutettiin vuoden 2023 marraskuussa. 50 koelennon ja 100 lentotunnin jälkeen, projekti saatettiin päätökseen vuoden 2024 joulukuussa. Projektia voidaan pitää onnistuneena, sillä EcoPulsen avulla tulevaisuuden toteutusten mallintaminen on helpompaa koelentojen avulla kerätyn datan avulla. Myös 800 VDC:n akku oli suunnittelultaan onnistunut, sillä sen sovittaminen lentokonekäyttöön onnistui ilman lentoturvallisuuden vaarantamista. (Airbus 2026)



Kuva 12. EcoPulse-projektia varten muunneltu Daher TBM 900. (Airbus 2026)

3.4.4 N3-X

NASA N3-X lentokonekonsepti on äärimmäisen mielenkiintoinen, niin työntövoiman tuottamisen, kuin runkorakenteen sekä aerodynamiikan näkökulmasta. Lentokoneen työntövoima toteutetaan hajautetulla turboelectric-voimalinjalla. Lentokoneen rungon päällä sijaitsevat 16 sähkömoottoreilla toimivaa puhallinta vastaavat työntövoiman tuotosta. Siipien päissä sijaitsevat turboelectric-moottorit toimivat sähkögeneraattoreina 16 puhaltimelle. Siipien päissä sijaitsevat moottorit käyttävät polttoaineena nestemäistä vetyä. N3-X:n runko on muodoltaan hybridi lentävä siipi, jossa yhdistyy lentävän siiven tyyppinen siipirakenne sekä matkustajalentokoneelle ominainen matkustajatila (kuva 13). N3-X on suunniteltu siten, että se kykenisi samaan lentomatkkaan, nopeuteen ja lentokenttäinfraan, kuin olemassa olevat isot kaksikäytäväiset matkustajalentokoneet. (NASA 2026)



Kuva 13. Nasan renderoitu kuva N3-X:stä. (NASA 2026)

4 SÄHKÖISTÄMISEEN LIITTYVÄT RAJOITTEET

Kappaleessa 3.4 esitettyjen esimerkkien avulla voidaan tehdä johtopäätös, että valmistajien tulevaisuuden projektit ja konseptit keskittyvät voimakkaasti vain osittain sähköisiin ratkaisuihin. Tämä on havaittavissa varsinkin matkustajaliikenteeseen suunnattujen lentokoneiden kohdalla. Tulevaisuuden matkustajalentokoneista ei tehdä täyssähköisiä. Tässä luvussa tarkastellaan sähköisien toteutuksien heikkouksia ja ongelmia sekä toteutusten kilpailukykyä perinteisiin fossiilisilla polttoaineilla toimiviin lentokoneisiin. Luodaan silmäys myös lentokenttäinfrastruktuuriin tarvittaviin muutoksiin.

Nykyiset tutkimuskohteet lentoliikenteen sähköistämiseksi tähtäävät kohti hybriditeknologioita, sillä nykyisillä akkuteknologioilla ei päästä matkustajalentokoneiden vaatimaan teho/paino- tai lentoetäisyysluokkaan (Leishman 2023). Täysin sähköiset toteutukset ovat äärimmäisen rajoittuneita, sillä akkujen paino yleisellä tasolla on aivan liikaa lentämisen toteutumiseen. Yleisen ohivirtausmoottoreilla varustetun pitkänmatkan Airbus A380-matkustajalentokoneen täydestä polttoainesäiliöllisestä polttoainetta saatu teho saadaan tuotettua 22000 tonnilla nykyisiä kaupallisia akustoja. Oletuksena laskutoimitukselle on, että käytetään täyssähköauto Tesla S:n litiumioniakkuja, joiden energiatiheys on 1,4 wattituntia kilogrammaa kohden. Vaadittujen akkujen arvioitu yhteenlaskettu massa on suuruudeltaan 38 kertaa suurin sallittu A380-matkustajalentokoneen lentoonlähtöpaino. (Caset et al. 2018)

Akkujen energiatheyden tulee nousta, jotta täyssähkö- ja hybridilentokoneet voivat olla varteen otettavia vaihtoehtoja ilmailuteollisuudessa. Nykyisten tutkimusten perusteella voidaan arvioida, että tarvittavat edistykset akkuteknologiassa tai sähköenergian varastoimisessa mahdollistavat lentämisen sähköistämisen seuraavan 20 vuoden aikana. (Benzaquen et al. 2021) Akustojen kehityksen suurena mahdollistajana voidaan pitää autoteollisuutta, sillä sähköautojen kehitysmahdollisuudet sekä valmistaminen ovat molemmat huomattavasti vakiintuneempia kuin sähköisten lentokoneiden.

Muina merkittävänä heikkouksina voidaan pitää epävarmuuksia koskien täyssähkö- sekä hybridilentokoneiden kestävyyttä/luotettavuutta, elinikää ja komponenttien hintoja. Muusta ajoneuvokäytöstä saatua dataa sähköisten komponenttien käyttämisestä ei voi täysin hyödyntää ilmailussa, sillä käyttöolosuhteet sekä toteutusmahdollisuudet ovat

erilaiset. Lisäksi lentokoneisiin ja niiden käyttöön liittyy todella tarkkoja turvallisuusmääräyksiä ja luotettavuusvaatimuksia, joita ei voida sivuuttaa. (Benzaquen et al. 2021)

Turboelectric-voimalinjoilla varustettuja lentokoneita voidaan pitää mahdollisina suunnannäyttäjinä lentoliikenteen sähköistymisessä. Kyseisellä voimalinjaratkaisulla voidaan vähentää fossiilisista polttoaineista syntyviä päästöjä merkittävästi ilman sähköenergian varastoimista, joka tällä hetkellä on rajoittavin tekijä. (Adu-Gyamfi and Good 2022)

Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan pitää Nasan N3-X lentokonekonseptia. N3-X lentokonekonseptin yksi pääominaisuuksista on kyky vähentää polttoainekulutusta 70 % innovatiivisen muotoilun sekä ilmapirtaa hyödyntävien sähkömoottorituulettimien avulla. (NASA 2026)

Lentokenttien infrastruktuuriin tarvitaan merkittäviä muutoksia sähköisen lentoliikenteen mahdollistamiseksi. Lentokoneissa käytettävät akut tarvitsevat tehokkaammat laturit kuin esimerkiksi sähköautot, sillä latausajan tulee olla mahdollisimman lähellä nykyisiä matkustajakoneiden kääntymisaikoja lentokentillä. Lentokentille tuleekin rakentaa lentokoneiden lataamiseen suunniteltu sähköverkko, joka on mahdollisimman tehokas, käytännöllinen sekä turvallinen. Tehokkuuden ja turvallisuuden yhdistämiseksi tulee löytää uusia innovatiivisia ratkaisuja lataamiselle, sillä nykyiset sähköajoneuvokäyttöön suunnitellut latausjärjestelmät eivät ole riittäviä. Ongelmia syntyy suuren latausvirran synnyttämässä lämmössä sekä turvallisessa hallinnassa. Käytännöllisyyttä ajatellen tulee määrittää oikeanlaiset sijainnit ja totutukset latausvirran jakelulle. Latausliitäntöjen tulee olla myös mahdollisimman standardisoituja tai ristiin sopivia (Leishman 2023). Kaikki nämä muutokset tuovat lisää huomattavia kustannuksia sähköistämistä ajatellen.

Tulee kuitenkin muistaa, että sähköistäminen omaa myös merkittäviä hyviä puolia. Sähkömoottoreiden nettoteho on noin 90 % luokkaa, kun taas mäntämoottoreiden noin 35 %. Potkuriturbiinimoottori on nettoteholtaan hieman mäntämoottoria parempi yltäen noin 50 %. Sähkömoottorit pystyvät siis muuttamaan tuottamastaan energiasta 90 % tässä tapauksessa potkurin työntövoimaksi. Hyvän energiatehokkuuden lisäksi täyssähkölentokoneiden kohdalla ilmastolle haitalliset hiilidioksidipäästöt lennon aikana ovat nolla. (Leishman 2023)

5 YHTEENVETO

Tämän kirjallisuustutkimuksena toteutetun kandidaatintyön päätavoitteena oli tutustuttaa lukija lentoliikenteen sähköistymisen nykytilaan sekä tulevaisuuteen. Voidaan todeta, että lentokoneet ja niihin liittyvät työntövoiman tuottamiseen tarvittavat tekniikat ovat verrattain uusia keksintöjä.

Selkeää sähköistämisen toteutustapaa ei olla vielä määritelty tarkasti. Useissa lähteissä sekä tutkimuksissa listataan työssä mainittuja sähköisiä toteutuksia, mutta mitään toteutusta ei pidetä ylivoimaisena tai parhaimpana vaihtoehtona. Kuitenkin turboelectric-voimalinjoja pidetään tärkeinä välimalleina hybridien ja täyssähköjen yleistymisen kannalta etenkin matkustajalentokoneissa. Pipstrelin Velis Electro on ensimmäinen tyyppihyväksytty täyssähkölentokone, mutta kyseisen lentokoneen käyttö on rajattu pääsääntöisesti koulutuslentokoneeksi. Nykyisten akkuteknologioiden perusteella vain kevyet sekä lyhyenkantaman lentokoneet kykenevät sähköistymään. Edistyksellisin matkustajakäyttöön suunniteltu sähköinen lentokone tällä hetkellä on Heart Aerospaceen ES-30, joka valmistajan arvion mukaan tyyppihyväksytään vuoteen 2029 mennessä.

Hyvänä vertauskohtana lentoliikenteen sähköistymiselle voidaan pitää autoteollisuutta. Autoteollisuuden sähköistämiseen liittyvät teknologiat kulkevat lentokoneteollisuuden edellä, mutta autoteollisuuden innovaatiot esimerkiksi akkujen energiatiheyksien nousemisessa edistävät lentokoneiden sähköistämiseen vaadittavia tarpeita. Kuitenkin lentokoneiden tarkat turvallisuusmääräykset hidastavat sähköistymisen etenemistä. Sähköistymisen edellytys on myös lentokenttien päivittäminen sellaiselle tasolle, että lentokoneita voidaan ladata helposti, turvallisesti ja riittävän nopeasti. Tämä edellyttää latausinfraan suunnittelua sekä kehitystä, joihin kuluu sekä aikaa että rahaa.

Vaikka nykyisen tilan mukaan näyttää siltä, että lentoliikenteen sähköistäminen on haastavaa, tutkimukset luovat uskoa tulevaisuuden mahdollisuuksiin. Arvioiden mukaan 2030 ja 2040-luvulla akut ovat vaadittavalla tasolla ja sähköistyminen käynnistyy toden teolla. Sähkömoottorit kuitenkin ovat hiilidioksidipäästöiltään olemattomia ja nettoteholtaan äärimmäisen kilpailukykyisiä.

LÄHDELUETTELO

- Adu-Gyamfi, B. A. and Good, C., 2022. Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. *Transportation Engineering*.
- Airbus, 2026. *EcoPulse* [online]. Saatavilla: <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hybrid-and-electric-flight/ecopulse> [viitattu 24.4.2026].
- Benzaquen, J., He, J. and Mirafzal, B., 2021. Toward more electric powertrains in aircraft: Technical challenges and advancements. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 5 (3), 177–193.
- Caset, F., Boussauw, K. and Storme, T., 2018. Meet & fly: Sustainable transport academics and the elephant in the room. *Journal of Transport Geography*, 70, 64–67.
- El-Sayed, A. F., 2017. *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines* [online]. Second edition. Boca Raton, FL: CRC Press. Saatavilla: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=609b4c74-4820-3be7-b4f5-b583e72dd9ed>.
- Hall, N., 2021a. *Propeller Propulsion NASA* [online]. Saatavilla: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/propeller.html> [viitattu 7.3.2026].
- Hall, N., 2021b. *Turbofan Engine NASA* [online]. Saatavilla: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/aturbf.html> [viitattu 18.3.2026].
- Heart Aerospace, 2026. *ES-30* [online]. Saatavilla: <https://heartaerospace.com/es-30/> [viitattu 24.4.2026].
- Hu, L., Long, F., Xie, B. and Zhuang, X., 2023. Four variants of turbofan, turbojet, turboprop and ramjet engines and their future prospects. *Applied and Computational Engineering*, 11 (1), 137–142.

Leishman, J. Gordon., 2023. *Introduction to aerospace flight vehicles*. Embry-Riddle Aeronautical University.

NASA, 2026. *N3-X* [online]. Saatavilla: <https://www.nasa.gov/eap-aircraft-concepts/n3-x/> [viitattu 24.4.2026].

National Air and Space Museum, 2026. *Power and Control in the Air* [online]. Saatavilla: <https://airandspace.si.edu/explore/stories/power-and-control-air> [viitattu 20.2.2026].

Petrescu, R. V. V., Aversa, R., Akash, B., Bucinell, R., Corchado, J., Berto, F., Mirsayar, M., Apicella, A. and Petrescu, F. I. T., 2017. History of Aviation-A Short Review. *Journal of Aircraft and Spacecraft Technology*, 1 (1), 30–49.

Pipistrel, 2026. *Velis Electro* [online]. Saatavilla: <https://www.pipistrel-aircraft.com/products/velis-electro/> [viitattu 9.4.2026].

Zhang, Z., Zhang, T. and Gao, H., 2021. Current Status and Development of Jet Engine. *In: Proceedings - 2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture, AIAM 2021*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 71–75.