

Ekku Kemppi

# LENTOKONEIDEN VOIMANLÄHTEET JA POLTTOAINEET 20 VUODEN KULUTTUA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Toukokuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Ekku Kemppe: Lentokoneiden voimanlähteet ja polttoaineet 20 vuoden kuluttua  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2024

---

Lentokoneiden nykyiset polttoaineenaan Jet A1:stä käyttävät moottorit ovat maailman jatkuvassa kehityksessä jo vanhanaikainen keksintö, jonka korvaaminen on viimeistään muutamien kymmenien vuosien päästä erittäin ajankohtainen asia. Fossiilisia polttoaineita ei ole loputtomasti ja hiilineutraaleja vaihtoehtoja tarvittaisiin korvaamaan nykyinen Jet A1 -polttoaine. Työn tarkoituksena on kirjallisuuskatsauksen muodossa selvittää, miksi Jet A1 on ainoa tällä hetkellä käytössä oleva polttoaine, ja onko 20 vuoden kuluttua kyseinen polttoaine jo mahdollisesti korvattu fossiilittomalla vaihtoehdolla.

Työ on jaettu kahteen pääluokkaan: Ensimmäisessä luvussa käsitellään ohivirtausmoottoreita, joissa Jet A1 -polttoainetta käytetään. Toisessa pääluvussa esitetään vaihtoehtoiset Jet A1:n fossiilittomat korvaajat eli biokerosiini, vety, litiumioniakut ja ammoniakki. Kyseisistä vaihtoehdoista käsitellään niiden potentiaalia ja heikkouksia sekä pyritään luomaan käsitys niiden tulevaisuudennäkymistä.

Ohivirtausmoottorit tuottavat Jet A1 -polttoainetta polttamalla työntövoimaa, joka liikuttaa lentokoneita eteenpäin suurella teholla. Kyseisillä moottoreilla on myös useita ominaisuuksia, joiden takia niitä ei ole vielä korvattu. Tällaisia ovat muun muassa suuren työntövoiman myötä korkeat nopeudet, suuri tehokkuus korkeissa nopeuksissa ja aerodynaaminen suunnittelu. Fossiiliperäisyys on kuitenkin tässä ratkaisussa suuri ongelma ja siihen haetaan parempaa ratkaisua.

Biokerosiini on biomassasta valmistettu fossiiliton polttoaine, joka käy suoraan nykyisiin moottoreihin. Biokerosiinin saatavuudessa on toistaiseksi suuria ongelmia ja sen hinta on yli kolminkertainen Jet A1 -polttoaineeseen verrattuna. Biokerosiinia tullaankin todennäköisesti näkemään vain lähivuosina lentoliikenteessä, jotta ilmastopäästöissä päästään väliaikatavoitteisiin. Vety on puolestaan myös pitkille lennoille sopiva uusiutuva energianlähde, joka sopii hyvin lentoliikenteeseen sen lukuisten mahdollisuuksien vuoksi. Vedyn haasteita ovat muun muassa sen räjähdysherkkyys sekä jäähdyttämisen tarve alhaiseen lämpötilaan, jossa se olisi polttoaineena parhaimmillaan. Vedyllä kuitenkin vaikuttaa olevan parhaimmat edellytykset olla lopullinen korvaaja.

Litiumioniakkuja pidetään lentoliikenteen suurimpana tulevaisuutena niiden korkean hyötysuhteen, ekologisuuden ja pitkälle edenneen kehityksen vuoksi. Akkuja kuitenkin varjostavat niiden korkea massa suhteessa energiaan, joka tietää huonoa lentokantamaa. Akkujen materiaaleja myös louhitaan lapsityön avulla ja niiden tuotanto kuluttaa valtavasti vettä, joten akut eivät ole kovin ekologinen eikä varsinkaan eettinen ratkaisu tällä hetkellä. Ammoniakki on puolestaan tuntemattomin kaikista käsitellyistä vaihtoehdoista. Se on myös uusiutuva energianlähde, jota on maailmanlaajuisesti runsaasti tarjolla. Vetyyn verrattuna se on huomattavasti turvallisempi eikä sitä tarvitse viilentää. Ammoniakin ongelmana on sen typpioksidipäästöt, joita ei ohivirtausmoottorilla olla vielä pystytty suodattamaan.

Avainsanat: Fossiiliton, lentoliikenne, biokerosiini, vety, litiumioniakut, ammoniakki

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	3
2. NYKYISET POLTTOMOOTTORIT .....	5
2.1 Polttomoottorin toimintaperiaate .....	5
2.2 Menestyksen syyt .....	5
2.3 Polttomoottorien korvaamisen syyt .....	7
3. VAIHTOEHTOISTEN KORVAAJIEN LÄPIKÄYNTI .....	9
3.1 Yleinen kuvaus biokerosiinista polttoaineena .....	9
3.1.1 Biokerosiinin potentiaali Jet A1:n korvaajana .....	9
3.1.2 Biokerosiinin ongelmat ja riskit .....	10
3.1.3 Tulevaisuudennäkymät biokerosiinille .....	10
3.2 Yleinen kuvaus vedystä polttoaineena .....	12
3.2.1 Vedyn potentiaalisuus ja sen vahvuudet .....	12
3.2.2 Vedyn mahdolliset ongelmat ja niiden vaikutukset .....	13
3.2.3 Tulevaisuudennäkymät vedyn käytölle .....	14
3.3 Sähkö voimanlähteenä akkujen ja hybridimallin avulla .....	16
3.3.1 Sähköisen voimanlähteen suurimmat hyödyt .....	16
3.3.2 Ongelmakohdat sähkölentokoneissa .....	17
3.3.3 Litiumkaivosten eettisyys ja ekologisuus -ongelma .....	18
3.3.4 Miltä sähkölentokoneiden tulevaisuus näyttää .....	19
3.4 Ammoniakki polttoaineena .....	20
3.4.1 Ammoniakin potentiaali ja hyödyt .....	20
3.4.2 Ammoniakin ongelmakohdat .....	21
3.4.3 Tulevaisuudennäkymät ammoniakille lentotoiminnassa .....	22
3.5 Taulukko yhteenvetona kaikkien ominaisuuksista .....	22
4. YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	28

# 1. JOHDANTO

Lentokoneiden voimanlähteinä kaupallisessa liikenteessä käytetään edelleen lähes täysin fossiilisia polttoaineita käyttäviä suihkuturbiinimoottoreita. Nämä Jet A1 -nimellä kutsuttavaa polttoainetta polttavat moottorit ovat nykyisin täysin hiilineutraaliuteen pyrkivässä maailmassa erittäin vanhanaikainen vaihtoehto lentokoneiden liikuttamiseen. Perinteisten suihkuturbiinien korvaajiksi on esitetty useita eri vaihtoehtoja, mutta toistaiseksi yksikään fossiiliton vaihtoehto ei kuitenkaan ole pystynyt saavuttamaan edes pientä markkinarakoa ylivoimaista Jet A1:tä vastaan.

Tämä tutkielma käsittelee kirjallisuuskatsauksen muodossa mahdollisia Jet A1 -moottoreiden korvaajia ja sitä, onko ylipäätään realistista, että kahdenkymmenen vuoden päästä Jet A1:llä toimivat moottorit ovat jo vähimmäisosassa kaupallisesta lentoliikenteestä ja korvattu fossiilittomalla vaihtoehdolla. Tarkoituksena on siis kootuista fossiilittomista tai vähäfossiilisista polttoaineista ja voimanlähteistä kerätä niiden potentiaalit ja mahdolliset haitat. Näiden perusteella voidaan pohtia, onko jokin tai jotkin vaihtoehdot kaupallisessa liikenteessä realistisia Jet A1:n korvaajia ja pitääkö kyseisillä polttoaineilla tehdä myös kokonaan uusi moottori vai onko nykyinen itse ohivirtausmoottori edelleen toimiva ratkaisu. Tavoitteena on myös ymmärtää, miksi Jet A1 on tällä hetkellä niin ylivoimainen polttoaine ja miksi yksikään vaihtoehto ei ole sitä jo korvannut. Työssä vastataan siis seuraaviin kahteen tutkimuskysymykseen:

1. Miksi Jet A1 – polttoainetta käyttävät ohivirtausmoottorit ovat kaupallisessa liikenteessä vuonna 2024 ainoa käytettävä voimanlähde ja polttoaine?
2. Onko 20 vuoden päästä Jet A1 -moottorit jo mahdollisesti korvattu fossiilittomalla vaihtoehdolla ja mikä lukuisista vaihtoehdoista on paras korvaaja?

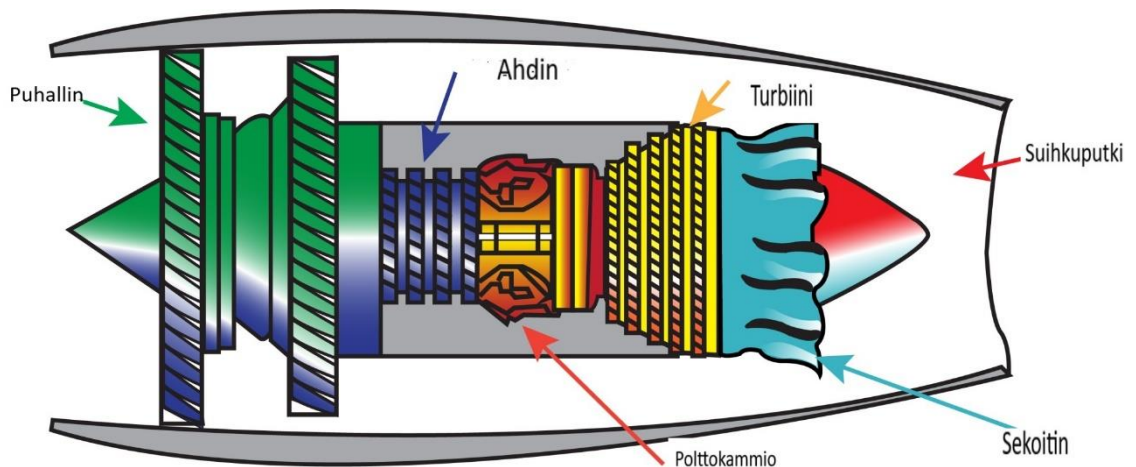
Työ on jaettu käsittelyotsikoiltaan kahteen pääluokkaan. Ensimmäisen otsikon alla käsitellään nykyisen Jet A1:llä toimivan moottorin ominaisuuksia ja syitä sille, miksi se on tällä hetkellä ainoa polttoaine kaupallisessa lentämisessä. Ensimmäisessä pääluvussa myös keskitytään syihin, miksi Jet A1:llä toimivat moottorit ylipäätään halutaan korvata ja miksi hyvän korvaajan löytäminen on tärkeää lentoliikenteen tulevaisuuden kannalta. Toisessa pääluvussa käsitellään tällä hetkellä tiedossa olevista lähes fossiilittomista voimanlähteistä ja polttoaineista vartenotettavat vaihtoehdot ja niiden potentiaali, mahdolliset riskit ja yhteenveto siitä, miltä niiden tulevaisuus näyttää. Mahdollisina vaihtoehtoina tutkitaan biokerosiinia, vetyä, sähköä ja ammoniakkia. Tutkielmassa lopulta päästään yhteenvetoon, jossa kerätyn tutkimuksen ja sen

analysoinnin perusteella vastataan tutkimuskysymyksiin ja päädytään lopputulemaan siitä, mikä saattaisi 20 vuoden kuluttua olla paras ratkaisu korvaamaan Jet A1 - polttoaineen.

## 2. NYKYISET POLTTOMOOTTORIT

### 2.1 Polttomoottorin toimintaperiaate

Nykyisin käytettävät polttomoottorit ovat pääosin niin sanottuja ohivirtausmoottoreita, jotka ovat tuoreimpia versioita perinteisistä turbiinimoottoreista. Ohivirtausmoottorit toimivat siten, että moottorin imuaukossa pyörii puhallin, joka imee ilmaa moottoriin. Osa ilmasta päätyy moottorin ahtimeen, jonka jälkeen paine on korkeimmillaan ja ilma puristetaan ja pusketaan polttokammioon, jossa ilma sekoitetaan Jet A1:n kanssa ja palamisreaktio tapahtuu. Tästä kuumentuneet pakokaasut ohjataan useista vyöhykkeistä koostuvaan turbiiniin, joka ottaa talteen ahtimelta ja puhaltimelta tulevan tehon ja kaasuvirtaukset ja ohjaa edelleen kaasuvirtaukset suihkuputkeen, mistä syntyy moottorin työntövoima. Kaikki ilma ei kuitenkaan mene polttokammiossa tapahtuvaan palamisreaktioon, vaan osa menee suoraan nopeasti pyörivän puhaltimen läpi ja ilman vesihöyryn seurauksena nopeutuneena suoraan sekoittajan läpi suihkuputkeen tuoden lisää työntövoimaa. Tästä tuleeekin nimitys ohivirtausmoottori. (Hall 2021)



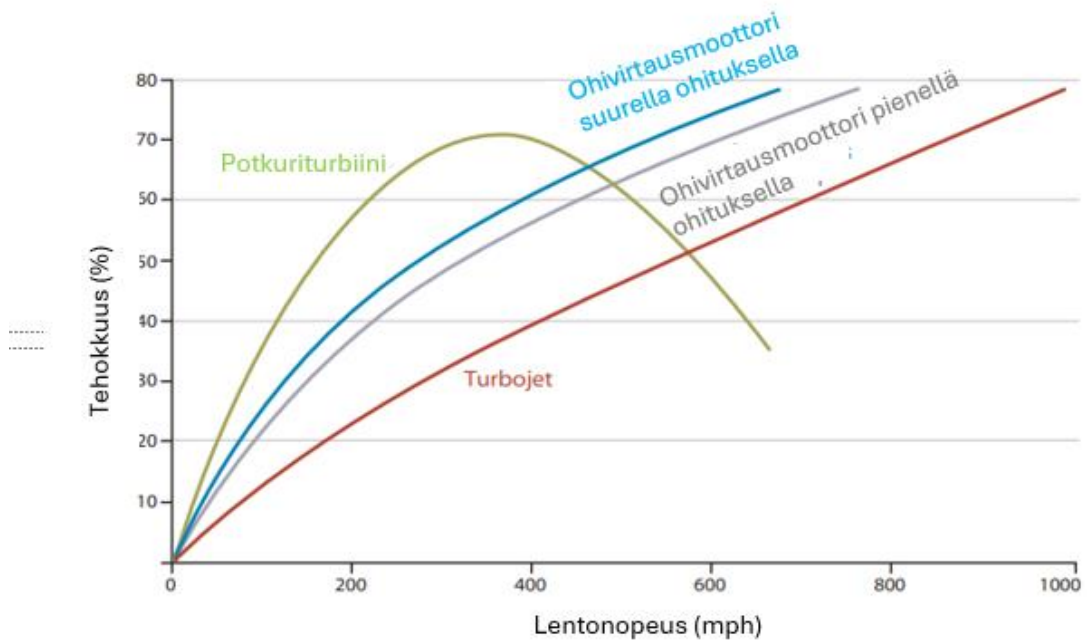
**Kuva 1.** Ohivirtausmoottorin yksinkertaistettu leikkauskuva (Muokattu lähteestä Gianonne 2021)

Kuvassa 1 on yksinkertaisesti esitetty ohivirtausmoottorin osat ja sen leikkauskuva, josta yllä selitetyn toimintaperusteen avulla pystytään havaitsemaan käytännössä, miltä moottorin sisällä näyttää ja tapahtuu.

### 2.2 Menestyksen syyt

Ohivirtausmoottoreita tai sen kaltaisia on käytetty kaupallisessa lentoliikenteessä vakituisesti jo 1950-luvulta lähtien (Stanford Edu 2004). Miten siis edelleenkin voidaan

lentää samankaltaisilla voimanlähteillä? Perinteisiin mäntämoottoreihin verrattuna samankokoinen ohivirtausmoottori voi olla jopa 20 kertaa tehokkaampi ja tuottaa kokoonsa nähden erittäin paljon työntövoimaa. Suuren työntövoiman ansioista pystytään saavuttamaan suurempia nopeuksia ilmassa, mikä on lentokoneille ihanteellinen ominaisuus varsinkin lentoyhtiöiden kannalta, joille aika on rahaa. Ilmassa lentokoneen vauhdin ollessa luja myös ilmaa liikkuu erittäin paljon. Ohivirtausmoottorin etuna pidetään sitä, että se pystyy käyttämään Rolls-Roycen mukaan 70 kertaa enemmän virtaavaa ilmaa hyödyksi energiantuotossa työntövoiman muodossa samankokoiseen mäntämoottoriin verrattuna, nimenomaan ohivirtauksen avulla. (The jet engine 2015)



**Kuva 2.** Suihkuturbiinien energiatehokkuus lentonopeuteen nähden (Muokattu lähteestä Anon 2015)

Hyötysuhde ja tehokkuus korkeassa lentonopeudessa nykyisillä moottoreilla ovat hyviä, mikä tarkoittaa sitä, että korkeassa lentonopeudessa ei synny oikeastaan ollenkaan hukkalämpöä vaan kaikki energia menee työntövoimaksi, minkä kuvan 2 kuvaaja osoittaa hyvin. Ohivirtausmoottori on myös mahdollista suunnitella siten, että se haittaa mahdollisimman vähän lentokoneen aerodynamiikkaa tehden siitä ylivoimaisen vaihtoehdon valmistajille tällä hetkellä. (The jet engine 2015)

## 2.3 Polttomoottorien korvaamisen syyt

Jos perinteisissä ohivirtausmoottoreissa on kerran paljon positiivisia asioita, miksi ne ylipäättään sitten pitäisi korvata? Ilmailu aiheuttaa tällä hetkellä yli 2 %:a koko maailman päästöistä, ja siihen haetaan muutosta huomattavasti pienempään. Fossiiliset polttoaineet ovat yksi suurimpia ilmastomuutoksen aiheuttajia ja ovat Pereran tutkimuksen mukaan nostaneet maapallon pintalämpötilaa jo yli celsiusasteella. (Perera & Nadeau 2022) Fossiilisia polttoaineita ei ole maailmassa loputtomiin ja kaupallinen ilmailu olisi oiva paikka vähentää niiden käyttöä ja nähdä konkreettista muutosta nopeallakin aikataululla. Fossiiliset polttoaineet vaikuttavat myös ilmanlaatuun negatiivisella tavalla ja potentiaalisesti lisäävät muun muassa astman ja keuhkotautien riskejä (Perera & Nadeau 2022).

Ilmastosyyt eivät ole ainoita minkä takia Jet A1:llä toimivat moottorit haluttaisiin korvata. Nykyisin käytössä olevat ohivirtausmoottorit ovat erittäin kalliita valmistaa, koska moottorin osien pitää kestää jatkuvaa korkeaa lämpötilaa lennon aikana. Moottorit ovat myös niin monimutkaisia, että niiden huoltaminen on kallista ja aikaa vievää, mikä ei ole kaupallisessa lentoliikenteessä ihanteellista. (Anon 2015)



**Kuva 3.** Jet A1:n hintakehitys (Fred 2024)

Kuvasta 3 huomataan myös, että Jet A1:n hinta Yhdysvaltojen gallonaa kohden eli noin 3,8 litraa kohden on tuplaantunut heinäkuusta 2016, jolloin se on ollut noin 1,3 dollaria ja helmikuun 24. päivä 2024 se on ollut noin 2,6 dollaria. Hinta on siis rutkasti noussut vain 8 vuodessa ja kaavion perusteella voidaan olettaa sen pikkuhiljaa vain kasvavan

lisää vuosien edetessä. Hintojen nousu kannustaa lentoyhtiötä etsimään vaihtoehtoisia ratkaisuja ja tässä fossiilittomat polttoaineet ja voimanlähteet astuvat kuvaan. Kaikki asiat yhteen mitoitettuna voidaankin pitää fossiilisten polttoaineiden korvaamista kaupallisessa lentoliikenteessä erittäin olennaisena.

## **3. VAIHTOEHTOISTEN KORVAAJIEN LÄPIKÄYNTI**

### **3.1 Yleinen kuvaus biokerosiinista polttoaineena**

Yleisesti biokerosiiniksi kutsutaan polttoainetta, joka on valmistettu eräänlaisesta biomassasta ja siitä jalostettu nesteeksi, jota voidaan käyttää lentokoneissa. Biomassaksi voidaan kutsua mitä vaan uusiutuvaksi luokiteltua raakamateriaalia, jota käytetään energiantuotannossa. Lentobiokerosiinin valmistamiseen on olemassa tällä hetkellä lähinnä kaksi vaihtoehtoa.

Ensimmäisenä synteettisiä Fischer-Tropsch polttoaineita, jossa biomassaa ensin tuotetaan epäpuhtaaseen kaasuun, joka on täynnä vetyä ja häkää. Tämän jälkeen suoritetaan Fischer-Tropsch prosessi, jossa kaasusta puhdistetaan epäpuhtaudet, kuten edellä mainittu häkä ja saadaan tuotettua puhtaasti palavaa hiilivetyneestettä, jota myös biokerosiini on. Toisessa valmistustavassa sokerit ja tärkkelykset pystytään käymisen avulla prosessoimaan alkoholeiksi, jotka voidaan kuivaamisen, oligomeroinnin, jossa pieniä samankaltaisia molekyylejä yhdistyy toisiinsa, sekä hydrauksen avulla muuntaa biokerosiiniksi. (Koistinen 2019) Näiden prosessien avulla saadaan siis lentokäyttöön sopivaa lentobiokerosiinia.

#### **3.1.1 Biokerosiinin potentiaali Jet A1:n korvaajana**

Biokerosiinin suurimpana hyötynä Jet A1:een verrattuna pidetään sen fossiilittomuutta. Biokerosiini pystytään valmistamaan monenlaisista fossiilittomista lähteistä, kuten kasveista, käytetyistä öljyistä, sokeriruo'osta sekä kaikenlaisista näiden yhdistelmistä, joita on lähes rajattomasti. Valmistustavasta riippuen biokerosiinilla pystytään vähentämään päästöjä, jopa 94 prosenttia tavalliseen kerosiiniin verrattuna, kuitenkin yleensä vähintään noin 80 prosenttia. (Duperrin 2023) Monipuolinen valmistusmahdollisuus ja päästöjen pienentäminen onkin biokerosiinin suurimpia vahvuuksia. Biokerosiinin vahvuutena muihin polttoaineisiin ja voimanlähteisiin pidetään myös sitä, että ne sopivat lähes aina polttoaineeksi suoraan jo olemassa oleviin ohivirtausmoottoreihin ilman, että moottoreihin tarvitsee tehdä muutoksia. (Koistinen 2019) Tämä lisää biokerosiinin helppokäyttöisyyttä ja mahdollistaa sen käytön nykyisen Jet A1:n rinnalla, jos biokerosiinin saatavuus on esimerkiksi juuri tietyllä hetkellä huono.

### 3.1.2 Biokerosiinin ongelmat ja riskit

Biokerosiini toimii muuten lähes tavallisen Jet A1:n tapaan ja paperilla yli 80 prosentin hiilidioksidi päästöjen pienentyminen normaaleihin fossiilipolttoaineisiin nähden kuulostaa erinomaiselta. Lentokoneiden päästöt ovat kuitenkin vain yksi osa polttoaineiden kiertokulkua ja on paljon syitä miksi lentoliikenteessä ei ole käytössä pelkkää biokerosiinia.

Biokerosiinin kiertokulkua ei ole pelkästään sen lopputuote, eli käyttäminen lentokoneissa polttoaineena, vaan myös sen valmistus. Biopolttoaineiden valmistuksesta, kuten viljelystä, satojen korjaamisesta ja kuljetuksesta syntyy suuria määriä kasvihuonekaasuja, joita ei lopullisessa palamisen tuotteissa oteta huomioon. (Koistinen 2019) Biokerosiinin ollessa lopullisessa käytössä paljon Jet A1:stä ekologisempi vaihtoehto, on sen valmistaminen vastaavasti enemmän kasvihuonekaasuja aiheuttavaa, kuin Jet A1:sen, mikä tulee ottaa huomioon polttoaineen kokonaishyötyjä ajatellessa.

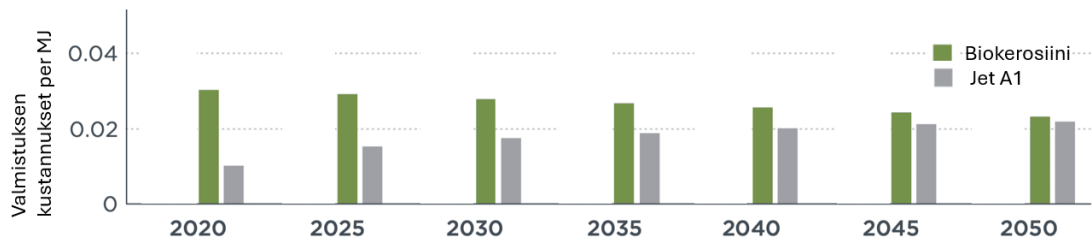
Tällä hetkellä biokerosiinin valmistamiseen tarvittavasta biomassasta suurin osa menee johonkin muualle, kuin itse biopolttoaineiden valmistukseen. Tällaisia ovat esimerkiksi ruuan valmistus ja eläimien rehu (Neuling, U. & Kaltschmitt, M 2015). Tämä tarkoittaa sitä, että vain pientä osaa biomassaa voidaan käyttää biokerosiinin valmistukseen, mikä rajoittaa sen leviämistä maailmanlaajuisesti radikaalisti. Osittain tämän syyn takia, myös biokerosiinin hinta on tällä hetkellä todella korkea. Riippuen valmistustavasta ja raaka-aineista, on biokerosiinin hinta keskimäärin tällä hetkellä noin kolmesta neljään kertainen Jet A1:een verrattuna, mikä selviää kuvasta 4. Tämä tarkoittaa sitä, että kannattavuutta ajatellen ei ole lentoyhtiöille tällä hetkellä järkevää vaihtaa biokerosiiniin, sillä kaupallisessa lentoliikenteessä polttoaineen hinnalla on erittäin merkittävä rooli.

### 3.1.3 Tulevaisuudennäkymät biokerosiinille

Biokerosiinilla on jo lennetty kaupallisessa lentoliikenteessä yksittäisiä lentoja vuodesta 2010 asti, jolloin käytettiin polttoaineena seosta, jossa 50 prosenttia oli biokerosiinia ja 50 prosenttia tavallista Jet-A1 polttoainetta (Quick 2010). Tähän päivään asti biokerosiinilla lennettävät lennot ovat edelleen jääneet yksittäisille reiteille ja kokonaista valtausta ei ole vielä tullut. Onko siis asiaan tapahtumassa muutosta lähiaikoina? Todennäköisesti ei ainakaan kovin suurta. Biokerosiini on ikään kuin yksi askel oikeaan suuntaan ja välietappi lentoyhtiöille päästösopimukseen pääsemisessä ennen lopullista Jet A1:n korvaajaa.

Euroopan lentoteollisuuden asettamien tavoitteiden mukaan vuoteen 2050 mennessä haluttaisiin muun muassa pienentää päästöjä 75 prosentilla per kilometri matkustajaa kohden. Tähän lentoyhtiöt pyrkivät osittain biokerosiinin avulla ja se on lentoyhtiöille paperilla helppo ratkaisu, sillä päästöt saadaan tilastoihin paljon pienemmiksi. Lopullinen päästöhyöty kuitenkin jää pieneksi muiden biokerosiinin ongelmien takia. Siksi voidaankin pitää biokerosiinia vain osittaisena ratkaisuna päästöongelmaan ja ikään kuin väliaikaisena polttoaineena, jota käytetään sen aikaa, että saadaan kehitettyä parempi polttoaine ja voimanlähde sopivaksi kaupalliseen lentoliikenteeseen. (Barke, Et al. 2022)

Biokerosiinin hinnan ollessa tällä hetkellä noin nelinkertainen Jet A1:seen verrattuna. Pystyykö 15 vuoden kuluttua biokerosiinilla kilpailemaan hinnassa?



**Kuva 4.** Ennuste biokerosiinin ja Jet A1:n hinnasta (Muokattu lähteestä Yuanrong, et al. 2022)

Yuanrongin tekemän ennusteen mukaan 15 vuoden päästä Jet A1 polttoaine on noin 20 prosenttia halvempaa megajoulea kohden Yhdysvaltain dollareissa, kuin biokerosiini, mikä selviää yllä olevasta ennusteesta. Määrä on hyvinkin kurottavissa kiinni ja sellainen, minkä moni ihminen voisi hyvinkin maksaa ekologisemmasta polttoaineesta ja siksi biokerosiinia ei kannata sulkea pois korvaajana.

## 3.2 Yleinen kuvaus vedystä polttoaineena

Vety on polttoaineena täysin hiilineutraali ja sen avulla lentoliikenteen päästöjä pystyttäisiin mahdollisesti vähentämään erittäin paljon. Vedyn käyttämiseen kaupallisen lentokoneiden polttoaineena pidetään toistaiseksi kahta eri vaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto on käyttää vetyä polttomoottorissa tavallisen bensiinin tavoin, jossa lämmönsiirron avulla vety saadaan muunnettua tavalliseen polttomoottoriin sopivaksi. Tässä vaihtoehdossa vetyä voidaan pitää siis ikään kuin suoraan kerosiinin korvaajana, moottorien pysyessä samankaltaisina. (Hoelzen, et al. 2022)

Toinen vaihtoehto on käyttää polttokennoja, joissa vetyä polttavat kennot tuottavat sähkövirtaa erilliselle sähkömoottorille, joka tuottaa työntövoimaa lentokoneisiin todennäköisesti puhaltimien tai turbiinin avulla. Tärkeää on myös huomata, että vety pääasiassa pitää muuttaa nestemäiseen muotoon kiinteästä, sillä nesteenä sillä on huomattavasti pienempi kokonaismassa kiinteään verrattuna. Ja kaasumainen vaihtoehto ei ole kovinkaan toimiva, sillä tilavuus vedyllä on kaasumaisena paljon suurempi. Lyhyillä reiteillä myös kaasumaisen vedyn käyttäminen voisi olla mahdollista, mutta nestemäistä vetyä pidetään pääasiallisena muotona kaupalliseen liikenteeseen. (Hoelzen, et al. 2022)

Puhdasta vetyä pystytään valmistamaan erottamalla se elektrolyysin avulla vedestä. Tämä tarkoittaa sitä, että vetyä on hyvin saatavilla ja sen valmistaminen on päästötöntä sähköä käyttämällä erittäin ekologista. Vedyn hyötysuhde on myös tuotannossa noin 70 prosenttia, mikä on hyvin kilpailukykyinen lukema ja vedyn valmistuksessa niin sanottuna hukkana syntyy vain happea ja lämpöä. Vedystä on mahdollista myös valmistaa eräänlaisia sähköpolttoaineita hiilidioksidin avulla. Tässä työssä perehdytään lähinnä pelkkään vetyyn, sähköpolttoaineiden ollessa toistaiseksi äärimmäisen kalliita. (Kostiainen 2023)

### 3.2.1 Vedyn potentiaalisuus ja sen vahvuudet

Vety ei sisällä ollenkaan hiiltä, mikä tarkoittaa sitä, että se ei aiheuta ollenkaan kasvihuonekaasuja ja sen reaktiossa hapen kanssa syntyy joko sähköä, vesihöyryä tai lämpöä. Nämä ovat kaikki polttoaineen näkökulmasta hyviä vaihtoehtoja. Vedyllä on myös suurin energiatiheys kaikkiin fossiilisiin polttoaineisiin painon perusteella verrattuna, ollen jopa kolme kertaa energiatehokkaampaa kuin perinteinen lentokoneissa käytettävä kerosiini. (Farokhi 2020)

Vetyä myös tankataan Jet-A1:n tavoin, eli lentokoneessa on vedylle oma tankki, joka tankataan bensiinille tyypillisellä tavalla, tehden sen tankkaamisesta lentokoneisiin äärimmäisen helppoa. Myös tankkauksen nopeuksia pidetään kerosiiniin verrattavina ja aikaa, jota lentokone viettää maassa lentojen välillä pidetään maksimissaan 20 prosenttia nykyistä hitaampana. Nykyisiä ohivirtausmoottoreita pystytään myös hyödyntämään vedyllä toimivien moottorien suunnitellussa, sillä vedyllä pystytään käyttämään hyvin samankaltaisia moottoreita, mitkä pienentävät kustannuksia huomattavasti. Suurimpia muutoksia aiheuttavat kerosiinitankkeihin verrattuina huomattavasti erilaiset nestevely tankit, joiden pitää olla hyvin eristettyjä ja kestävämpiä, jotta ne pystyvät pitämään vedyn tarpeeksi viileänä. (Hoelzen, et al. 2022)

Vedyllä päästään lentokoneen nopeuden osalta samoihin lukemiin Jet A1:sellä toimiviin ohivirtausmoottoreihin nähden, mikä on erittäin positiivinen asia, sillä nykyiset nopeudet ovat hyvin kilpailukykyisiä ja tarpeeksi suuria. Vedyllä mahdollisten innovaatioiden määrät ovat myös suuria, sillä alaa ei ole tutkittu vielä tarpeeksi ja on hyvin todennäköistä, että tullaan näkemään uusia täysin erilaisia ratkaisuja nykyisiin lentokoneisiin verrattuna

### **3.2.2 Vedyn mahdolliset ongelmat ja niiden vaikutukset**

Vedyssä on erittäin paljon haasteita. Nestevely muodostaa kiinteän hapen kanssa yhdisteen, joka räjähtää osumasta kovemmalla voimalla, kun sama määrä TNT:tä tehden siitä erittäin vaarallisen yhdisteen. Nestevelyä käyttävät lentokoneet pitäisi siis suunnitella siten, että happi ei missään tapauksessa pääsisi ikinä kosketuksiin nestevedyn kanssa. Tämä vaatisi erittäin laajaa testausta ja käytännössä muun muassa sitä, että polttoainekoneisto pitäisi aina puhdistaa ilmasta ennen vedyn laittamista tankkiin ja päinvastoin huoltoja tehdessä kaikki vety pitää ensin puhdistaa pois. (Spencer 2023)

Vetyä ei myöskään löydy itsessään oikeastaan ollenkaan vaan se esiintyy lähinnä osana seoksia, kuten vettä ja metanolia. Vetyä pitää siis hydrolysoida tai termolysoida vesimolekyylistä uusiutuvan energian avulla, jotta polttoaineena käytettävää vetyä saadaan tehtyä. Vedyllä on myös todella pieni tiheys jopa nestemäisessä muodossakin. Tämä tarkoittaa Farokhin mukaan sitä, että tämänhetkisiin lentokoneisiin verrattuna saman energiamäärän kantaminen vaatisi neljä kertaa isommat polttoainetankit, jolloin vetykäyttöiset lentokoneet pitäisi käytännössä suunnitella täysin puhtaalta pöydältä ja niiden massa nousisi huomattavasti ja muoto todennäköisesti muuttuisi. (Farokhi 2020) Tämä tarkoittaa sitä, että siirtyminen vetylentokoneisiin vaatisi mahdollisesti vuosien

suunnittelutyötä ja teknisten ratkaisujen hiomista täydellisyyteen, sillä lentoliikenne on erittäin tarkasti säännösteltyä ja kaiken pitää olla täysin turvallista ja säännösten mukaista. Kuitenkin 20 vuoden päästä on jo täysin mahdollista, että ensimmäiset vetylentokoneet ovat käytössä kaupallisessa liikenteessä.

Vedyn pitää olla nestemäisessä muodossa, jotta sen käyttäminen on edes mitenkään järkevää lentokoneissa. Tämä ei kuitenkaan ole ongelmatonta, koska vety muuttuu kaasusta nesteeksi vasta lämpötilassa  $-253$  celsiusastetta. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että sen eristäminen ja lämmön pitäminen matalana on erittäin haastavaa. Tämänhetkinen infrastruktuuri on myös vielä alkutekijöissään ja suuria vetyvarastoja ja tankkauspisteitä on todella vähän, ja kehitys tällä saralla varsinkin turvallisuuden kannalta on pahasti kesken. Vaatisi siis suuria investointeja lentokentiltä saada vetytankkausmahdollisuus ja tämä rajoittaa ainakin toistaiseksi vedyn leviämistä maailmanlaajuisesti. (Farokhi 2020) Suuria kehitysaskelia kuitenkin tapahtuu koko ajan ja turvallisuusrajoitukset vedyn suhteen eivät ole mahdottomia ja lentokentän tasolla eivät eroaisi merkittävästi nykyisistä.

Vetyä polttoaineena käyttävien lentokoneiden uskotaan myös nostavan käyttökustannuksia. Vetylentokoneissa investoinnit ovat kalliimpia, huoltaminen on kalliimpaa ja vety maksaa enemmän, koska vetylentokoneet eivät ole yhtä energiatehokkaita nykyisin käytettävissä oleviin lentokoneisiin verrattuna, lähinnä nestevetytankkien aiheuttaman ylimääräisen massan takia. Hoelzenin ennusteen mukaan lyhyille matkoille tarkoitettuihin lentoihin kulut nousivat yhteensä noin 6 prosenttia ja keskipitkille matkoille noin 10 prosenttia per lentokone, mitkä eivät ole mahdottomilta kuulostavia, varsinkin jos tuotteena on fossiilisia päästöinä nolla. Lyhyellä matkalla tässä tapauksessa voitaisiin tarkoittaa esimerkiksi matkaa Helsingistä Frankfurtiin ja keskipitkällä matkalla Helsingistä Malagaan.

### **3.2.3 Tulevaisuudennäkymät vedyn käytölle**

Huomataan siis, että vedyn käyttäminen ei ole ongelmatonta ja sen käyttäminen vaatii monia ongelmien ratkaisuja, jotta sen käyttäminen voi olla täysin turvallista ja osana tavallista lentoliikennettä. Ongelmiin haetaan kuitenkin jatkuvasti ratkaisuja ja ensimmäisiä potentiaalisia kaupallisen liikenteen vetylentokoneita on jo kehitteillä. Esimerkkinä Airbus, joka on yksi maailman suurimmista lentokonevalmistajista, on jo esitellyt oman kehityksessä olevan Airbus ZEROe -vetylentokoneensa ja heidän tavoitteenaan on tuoda koneita markkinoille viimeistään 2035. Hankkeessa Airbus on toistaiseksi suunnitellut neljä erilaista vetylentokonetta, jotka jokainen hyödyntävät vetyä

eri tavalla. Ensimmäisessä vaihtoehdossa kone on tyyppinen ohivirtausmoottoreilla varustettu kone, joka käyttää polttoaineenaan vetyä. Toisessa tapauksessa ohivirtausmoottorien sijaan on potkuriturbiinit, mutta muuten ideana sama kuin ensimmäisessä. Kolmas vaihtoehto on niin sanottu Blended wing, jossa koko lentokone on yhtä siipeä, jolloin vedyn säilytykselle avautuu uusia vaihtoehtoja ja voimansiirtona toimii ohivirtausmoottorit. Viimeisenä vaihtoehtona polttokennoilla toimiva täyssähköinen lentokone, jossa sähkömoottorilla toimivat potkurit työntävät konetta eteenpäin. (ZEROe 2024) Todennäköisesti kaupalliset vetylentokoneet tulevat noudattamaan jotakin näistä vaihtoehdoista toteutuksessaan.



**Kuva 5.** Airbus ZEROe Blended wing kone (ZEROe 2024)

Kuvassa 5 on esitetty juuri Airbusin Blended wing vetylentokoneen konseptia. Kuvasta huomataan, että lentokoneiden suunnittelu saattaa muuttua dramaattisesti vedyn vaatiessa koneesta huomattavan määrän tilaa. Tällöin parasta ratkaisua joudutaan hakemaan erilaisilla koneen muotoiluilla ja ainakin Airbus on toistaiseksi päätenyt tällaiseen ratkaisuun. Airbus kertoo, että koneita on mahdollisesti käytössä jo vuonna 2035, jolloin kehitys on jo suhteellisen pitkällä. (ZEROe 2024)

### 3.3 Sähkö voimanlähteenä akkujen ja hybridimallin avulla

Täyssähkö lentokonetta pidetään ilmailun tulevaisuutena (Han, et al. 2019). Yksi vaihtoehto täyssähkölentokoneisiin on akuilla ja sähkömoottoreilla toimiva lentokone, jossa litiumioni akut sijoitetaan lentokoneen runkoon ja niiden varastoiman energian avulla saadaan sähkömoottoreista työntövoimaa. Akkujen kehitys ei kuitenkaan vielä ole täysin ideaalilla tasolla ja siksi hybridimallia pidetään vähintäänkin väliaikaisratkaisuna.

Hybridimallissa koneessa on sekä sähkön avulla toimiva voimanlähde, sekä tavallisella polttoaineella toimiva suihkumoottori tai potkuriturbiini. Hybridimallissa päämoottorina voi toimia kumpi vaan ratkaisusta. Esimerkiksi polttomoottoripainoitteisessa ratkaisussa sähköllä voitaisiin hoitaa vähemmän voimaa vaativat tilanteet, kuten lentokoneen rullaukset kiitotielle ja sähkömoottoripainoitteisessa ratkaisussa polttomoottorilla pahimmat sähköä kuluttavat lennon vaiheet, kuten nousut ja laskeutumiset. (Thalin 2019)

#### 3.3.1 Sähköisen voimanlähteen suurimmat hyödyt

Sähköinen voimanlähde, kuten muutkin tässä tutkielmassa esitetyt vaihtoiset polttoaineet, on käytössä fossiiliton ja myös kasvihuonepäästöt kyseisellä voimanlähteellä vähenevät jopa 90 prosentilla suunnilleen Helsinki-Varsova välin pituisella matkalla. Samalla matkalla lentokoneen käyttökustannuksien arvioidaan olevan myös noin 30 prosenttia pienemmät, mitkä ovat suurella mittakaavalla erittäin merkittävät. Kulujen vähennykset tulevat lähinnä sähkömoottorien suuresta hyötysuhteesta ja sähkön hinnasta alhaisuudesta, sekä mahdollisuudesta suunnitella lentokoneet tehokkaammiksi sähköisen voimanlähteen runkoon sijoitusmahdollisuuksista johtuen. (Thalin 2019)

Nykyiset lentokoneet ovat myös hyvin äänekkäitä ja lentokentät ovat usein sijoitettu lähelle asumista, missä melurajoitukset ovat tavallisia. Sähkölentokoneet puolestaan ovat erittäin hiljaisia ja siten oiva vaihtoehto tähän ongelmaan. Nykyiset lentokoneet ovat äänenkovuudeltaan helposti 100 desibeliä ja yli, noin 30 metrin päästä lentokoneesta sen ollessa lentoonlähdessä. Täyssähkölentokoneessa vastaava luku on parhaimmillaan noin 55 desibeliä eli äänenvoimakkuuden ero on todella huomattava, mikä tarkoittaa sitä, että täyssähkökoneilla voitaisiin laskeutua muun muassa todella väkirikkeisiin paikkoihin. (Thalin 2019)

Sähköinen siirtymä on myös erittäin suuri ilmiö tällä hetkellä maailmanlaajuisesti ja siihen investoidaan suuria määriä rahaa. Varsinkin autoteollisuudessa käydään suurta sotaa akku- ja sähköteollisuuden kanssa ja uusia keksintöjä tulee koko ajan lisää. On siis myös erittäin todennäköistä, että sama tulee siirtymään myös ilmailuun, kunhan pohjatytöt on tehty ensin kunnolla autoteollisuuden puolella. (Han, et al. 2019) Myös infrastruktuurin kehitys on esimerkiksi vetyyn verrattuna paljon pidemmällä ja latausasemia löytyy yleisesti melkein mistä vaan. Tämä helpottaa myös lentokentille asennettavien latausasemien kehittämistä, sillä tarvittavaa tietotaitoa on jo pohjalla valmiiksi.

### **3.3.2 Ongelmakohdat sähkölentokoneissa**

Sähkölentokoneiden suurimpana ongelmana tällä hetkellä pidetään litiumakkujen pientä energiaa suhteessa sen korkeaan painoon ja ilmailussa kevyt on lento-ominaisuuksien puolesta erittäin tärkeä ominaisuus. Etenkin siis pitkillä matkoilla tulisi ongelmia, koska pidemmille matkoille tarvitaan isommat akut ja tätä myöten paino lisääntyy huomattavasti. Eräänlaisena väliaikaisratkaisuna on pidettykin mallia, jossa lentoonlähdöt ja laskeutumiset hoidettaisiin polttoaineiden avulla ja niin sanottu matkalento-osuus, akkujen avulla, koska energiankulutus on huomattavasti pienempää matkalennon aikana, jossa vauhti on tasaista, ilmanvastus pienempää ja ilmavirrat avustavat. (Tountas 2021) Tätä kutsutaan myös aikaisemmin avatuksi hybridimalliksi.

Ongelmana pidetään myös koneiden suuria latausaikoja lentojen välillä. Lentoyhtiöille kaikki maassa vietetty ylimääräinen aika maksaa paljon ja sen minimoiminen on yhtiön kannattavuuden kannalta merkittävää. Pelkästään lyhyen matkan eli käytännössä maksimissaan muutamien satojen kilometrien päähän lentämisen jälkeen nykyisellä teknologialla lentokonetta pitää ladata vähintään 90 minuuttia, mikä on maassa vietettävään aikaan lyhyellä matkalla pitkä aika. Ongelma ei kuitenkaan ole, sillä muut käyttökustannukset ovat pienempiä nykyisiin koneisiin verrattuna (Cesconetto 2022).

Akkulentokoneita on myös toistaiseksi testattu oikeassa käytössä vähänlaisesti. On tehty vain muutamia lentoja, joiden pituudet ovat olleet kymmenien minuuttien luokkaa, joten todellista akkujen toimivuuden näyttöä on vielä vähän. Akkujen suorituskyvyn tiedetään myös tippuvan huomattavasti, kun lämpötila painuu pakkasen puolelle. Korkealla ilmassa lämpötilat ovat kylmiä ja siksi akut pitäisikin suunnitella koneeseen siten, että niiden lämpötilavaihtelut saataisiin mahdollisimman vähiin. Myös pienenä kysymysmerkkinä on, kuinka hyvin akkujen varaus kestäisi vuosien saatossa ja vaikuttaisiko se merkittävästi koneen toimintamatkaan.

Litiumioniakuissa piilee myös ongelmia tulipalon sattuessa. Nämä akut ovat lähes mahdottomia sammuttaa, kun ne syttyvät esimerkiksi ylikuumentumisesta seuraavan savun ajautuessa akun elektronien kanssa kosketuksiin, jotka ovat erittäin helposti syttyviä (Mikolajczak 2011). Litiumioniakkujen ominaisuudet pitää siis huomioida erittäin tarkasti koneiden suunnittelussa, jotta palon syttymisen riski on mahdollisimman pieni.

### **3.3.3 Litiumkaivosten eettisyys ja ekologisuus -ongelma**

Litiumioni akkujen valmistaminen on pitkä prosessi, joka vaatii raaka-aineinaan muun muassa litiumia ja kobolttia. Litiumkaivoksista saadaan malmia, josta erotetaan tarvittavat aineet käyttäen paljon energiaa ja vettä. Tämä on jo heti ristiriidassa akkukäyttöisten laitteiden perimmäisen tarkoituksen eli päästöjen pienentämisen kanssa, jos pelkästään niiden raaka-aineisiin tuhlataan äärimmäisen paljon energiaa ja samalla ihmisille elintärkeää vettä. Olemassa on myös kestävämpiä erottelutapoja, mutta niiden käyttäminen on vielä suuressa mittakaavassa pientä. (Anon, 2021)

Suurimmat litiumin louhijat maailmassa ovat Argentiina ja Chile, joiden suolatasangoilta tulee noin kolmasosa maailman litiumista. Kongon demokraattisesta tasavallasta puolestaan tulee noin 70 prosenttia koko maailman koboltista. Lähtökohtaisesti molemmissa maissa ihmisoikeudet eivät ole parhaalla tasolla, ja kaivoksilla esiintyykin lapsityövoimaa ja muita vaarallisia työolosuhteita, jotka tekevät akkujen tuotannosta todella epäeettistä. Työntekijöille maksetaan olematonta palkkaa ja he ovat kaivosten omistajille ainoastaan pohjasakkaa. Akkujen valmistus pitäisikin siis tehdä ensin kestävämmän ja vastuullisemman, jotta litiumioniakkuja voitaisiin pitää oikeana ratkaisuna fossiilisten polttoaineiden korvaajiksi. (Lithium-ion batteries need to be greener and ethical 2021) Positiivisena asiana voidaan pitää sitä, että suuri osa akuista pystytään kierrättämään ja materiaalit uudelleen käyttämään parantaen sen ekologisuutta.

Suurimpien kaivosten ollessa jo valmiiksi ympäri maailmaa, tulee myös raaka-aineiden siirtämisestä pienimuotoinen ongelma. Itse akkujen valmistus tapahtuu maailmanlaajuisesti ja valmistusmateriaaleja pitääkin kuljettaa tuhansia kilometrejä eri valmistusmaihin tehden siitä suuren päästöhaitan koko maailmalle. On myös tärkeää huomioida, onko lentokoneiden akkujen lataukseen käytetty sähkö tuotettu fossiilisten polttoaineiden avulla vai kestävästi uusiutuvia energianlähteitä käyttäen, sillä sekin vaikuttaa siihen, kuinka paljon todelliset sähkölentokoneen päästövähennykset tavalliseen Jet A1:llä toimivaan lentokoneeseen ovat.

### 3.3.4 Miltä sähkölentokoneiden tulevaisuus näyttää

Sähkölentokoneita kehitetään koko ajan eteenpäin ja tulevaisuus näyttää sillä saralla positiiviselta. Useat yhtiöt, kuten esimerkiksi Airbus, Siemens ja Heart Aerospace ovat jo alkaneet kehittämään omia versioitaan akkukäyttöisistä lentokoneista. Ensimmäiset versiot ovat vielä todella pieniä lentokoneita ja lähinnä muutaman ihmisen istuttavia prototyyppisiä, joista lähdetään kehittämään tulevaisuuden lentokonetta. Tässä vaiheessa voidaan kuitenkin jo sanoa, että mahdolliset kaupallisen liikenteen korvaajat tulevat todennäköisesti näyttämään erilaisilta nykyisiin koneisiin verrattuna lähinnä akkujen aiheuttamien vaatimusten ja lisääntyneen vapauden sijoittaa moottorit runkoon tehokkaammin vuoksi. Havainnekuvia mahdollisesti jo 15 vuoden kuluttua käytössä olevista koneista on tehty useita ja niistä saa hyvän kuvan miltä ne voisivat näyttää, mutta pidemmille ja suuremmista matkoilla suunnatuista koneista on tehty prototyyppisiä vasta vähän.



**Kuva 6.** Heart Aerospace:n kehittämä akkulentokoneesta (Heart Aerospace 2024)

Kuvassa 6 on Heart Aerospace:n luoma täyssähkölentokone, jossa virtalähteenä toimii akut. Koneessa toki työntövoimaa tuottaa potkuriturbiinit eikä ohivirtausmoottorit, kuten yleensä, mutta prototyyppistä saa kuvan miltä lyhyelle matkalla suunnattu akkulentokone voisi näyttää.

Haasteita aiheuttavat ilmailun lukuisat säädökset ja ne hidastavat kehitystyötä merkittävästi. Onkin siis epätodennäköistä, että 20 vuoden kuluttua kaupallisessa liikenteessä on vielä todella pitkälle kehittyneitä akkukäyttöisiä lentokoneita käytössä. Osa lyhyemmistä reiteistä on kuitenkin jo todennäköisesti korvattu kyseisillä koneilla. Tämä johtuu siitä, että akkukoneiden ominaisuudet sopivat parhaiten juuri lyhyemmille matkoille ja muutos tapahtuu sen takia ensin kyseisillä reiteillä.

### 3.4 Ammoniakki polttoaineena

Viimeisenä vaihtoehtoisena polttoaineena käsitellään ammoniakia. Ammoniakki on vedystä ja typestä koostuva aine, joka on polttoaineena hiilineutraali. Ammoniakkia on helppo vertailla vetyyn, sillä se on polttoaineena ja ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen ratkaisu. Samoin kuin vetyä, ammoniakia voidaan käyttää tuottamaan sähköä polttokennojen, sekä polttomoottorin avulla. Lähtökohtaisesti ammoniakkimoottoria ei kuitenkaan ole vielä esitetty käytettäväksi omana itsenään vaan enemmänkin hybridimuodossa, jossa ammoniakkimoottori tuottaa osan lentokoneen työntövoimasta. Täysin ammoniakilla toimiva kone on kuitenkin mahdollista toteuttaa. (Boretti 2023)

Ammoniakkia tuotetaan käyttämällä uusiutuvaa vetyä ja sen käsitteleminen on huomattavasti helpompaa, kuin esimerkiksi juuri polttoaineena käytettävä nestevely. Ammoniakki ei myös ole niin herkästi syttyvä aine, kuin nestevely ja vaatiikin polttoaineena erillisen isomman polttoaineen sytyttäjän toimiakseen kunnolla, mutta tämä on mahdollista toteuttaa järkevästi ja tarpeeksi edullisesti. (Boretti, Castelletto 2022)

#### 3.4.1 Ammoniakin potentiaali ja hyödyt

Ammoniakilla on vetyyn verrattuna korkea energiatiheys tilavuuteen suhteutettuna, tarkoittaen sitä, että ammoniakia mahtuu tilavuudeltaan paljon enemmän samaan tilaan, kuin vastaavaa vetyä, vieden paljon vähemmän tilaa koneesta. Samassa massassa ammoniakia on vain 20 prosenttia vedyn energiasta eli sama määrä ammoniakia painaa paljon vetyä enemmän. (Boretti, Castelletto 2022)

Ammoniakkia on saatavilla maailmanlaajuisesti paljon, sillä se on yleisesti varsinkin maataloudessa ja teollisuudessa käytetty aine. Ammoniakkia voidaan myös tuottaa käyttäen uusiutuvia energianlähteitä, kuten tuulivoimaa, jolloin ammoniakissa on potentiaalia tulla kestäväksi ja helposti saatavaksi polttoaineeksi lentokoneisiin. (Boretti 2023)

Ammoniakki on myös huomattavasti turvallisempi aine käsitellä ja polttoaineena, kuin vety, sillä ammoniakki ei ole läheskään niin räjähdysherkkää, jolloin ei tarvitse tehdä yhtä suuria varotoimenpiteitä koneiden suunnittelussa. Ammoniakki tarvitsee syttyäkseen energiaa 650 millijoulea, kuin vedylle sama lukema on noin 0.016 millijoulea, kertoen vedyn äärimmäisestä syttymisherkkydestä. Ammoniakkia ei myös tarvitse viilentää yhtä

kylmäksi kuin nestevevyä, sillä ammoniakki saavuttaa ideaalisimman tiheydensä jo noin -35 celsiusasteessa ja 25 celsiusasteessakin se on lähes yhtä tiheää. (Boretti 2023)

### 3.4.2 Ammoniakin ongelmakohdat

Ammoniakin suurimpana ongelmana pidetään sen päästöinä syntyviä typen oksideja. Typen oksidit ovat hiilidioksidin ohella suuria kasvihuonekaasuja, jotka aiheuttavat ilmastonmuutosta ja huonontavat ilmanlaatua. Tällä hetkellä suurimpia typen oksidien aiheuttajia eivät kuitenkaan ole liikenteestä tulevat päästöt, vaan hiilivoimalat, joiden tuotannosta päästöjä aiheutuu merkittävästi. Typen oksideja tulee siis väistämättä tällä hetkellä jo lukuisasti ja silti niiden aiheuttamat päästöt ovat suhteellisen pienet hiilidioksidiin verrattuna. (Bilgen 2014)

Hiilidioksidipäästöjen pienentämistä pidetäänkin paljon kriittisempänä, kuin typen oksidien. Tämä on ammoniakin kannalta positiivinen asia, sillä typen oksidit olisivat varsinkin suihkurturbiinimoottoreissa vaikeita käsitellä, sillä ennen suihkuputkea on vaikea asentaa suodatinta, jolla typen oksidit saataisiin vähennettyä. Siksi ammoniakin kohdalla onkin ehdotettu käytettäväksi tavallisempia tehokkaita polttomoottoreita, joissa käytettäisiin sekä ammoniakkia, että vetyä tai ammoniakkia ja dieseliä. Tällöin vedyn tai dieselin suihkuttaminen moottoriin aloittaisi palamisen ja moottori toimisi ammoniakilla. Kahden polttoaineen ratkaisu polttomoottorissa on mahdollisuus, mikä voisi toimia varsinkin pienemmissä lentokoneissa, sillä isommissa koneissa perinteiset polttomoottorit eivät välttämättä toimisi kovinkaan hyvin. (Boretti, Castelletto 2022)

Ammoniakissa on myös muita teknisiä ja käytännön ratkaisuja, mitä täytyy vielä ratkoa ennen sen mahdollista käyttöönottoa. Tällaisia ovat muun muassa se, miten polttoainetta käytetään mahdollisimman tehokkaasti ja sen käytön turvallisuuden varmistaminen. Teoriassa ammoniakin pitäisi olla täysin turvallista, mutta käytännössä ongelmia tulee aina ja ne pitää ensin ratkoa ja turvallisuus taata. Myös infrastruktuuria ei ole ammoniakille vielä luotu laajasti ja sen vaatimukset tulevat tuomaan haasteita. Ammoniakin kehitys polttoaineena ei myös ole niin pitkällä muihin verrattuna ja siksi tulevilla tutkimuksilla ja kehityksillä tuleekin olemaan suuri merkitys ammoniakin todellisen potentiaalin tajuamiseen ja kartoitukseen. (Boretti 2023)

### 3.4.3 Tulevaisuudennäkymät ammoniakille lentotoiminnassa

Ammoniakin potentiaalin ollessa vielä hieman tuntematon, on tulevilla vuosilla tärkeä merkitys, nähdäänkö ammoniakin yleistyminen polttoaineena ja onko se oikeasti varteenotettava vaihtoehto. Kunhan rahoitus tutkimukseen ja kehitykseen saadaan vaadittavalle tasolle, on hyvinkin mahdollista, että jo 20 vuoden kuluttua on olemassa ammoniakilla toimivia kaupallisia lentokoneita. (Boretti, Castelletto 2022)

Aluksi ammoniakilla toimivia lentokoneita nähtäisiin todennäköisesti lyhyillä lennoilla, joista ne mahdollisesti voisivat siirtyä myös pidemmille matkoille, kun tutkimus kehittyy vuosien saatossa ja suurimmat ongelmat on saatu selätettyä. Vaikka ratkottavia ongelmia onkin useampia, on ammoniakilla kaikki ominaisuudet menestyä erinomaisesti. Tutkimuksen edetessä nähdään ammoniakin todellinen potentiaali ja se, kuinka suurella osin se pystyy valloittamaan kaupallisen lentoliikenteen markkinoita. Toistaiseksi ammoniakin tulevaisuus näyttää kuitenkin suhteellisen valoisalta, eikä todellisia syitä, miksi kehitystä ei tulisi jatkaa ole ainakaan vielä ilmennyt. (Boretti, Castelletto 2022)

### 3.5 Taulukko yhteenvetona kaikkien ominaisuuksista

	Potentiaali	Heikkoudet
<b>Biokerosiini</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sopii suoraan nykyisiin ohivirtausmoottoreihin</li> <li>- Ei vaadi sopeuttamista ilmailusäädöksiin</li> <li>- Hyvä korvaava vaihtoehto lyhyelle aikavälille</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kallista</li> <li>- Biomassaa ei riitä tällä hetkellä tarpeeksi lentoliikenteeseen</li> <li>- Valmistaminen ei kovin päästötöntä</li> </ul>
<b>Vety</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parhaat valmiudet pitkän matkan lentokoneisiin</li> <li>- Mahdollisuuksia suunnitteluun lähes rajattomasti</li> <li>- Uusiutuva energianlähde</li> <li>- Helppo käyttää</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Räjähdysherkkä</li> <li>- Vaatii paljon tilaa koneesta</li> <li>- Huoltaminen haastavaa</li> <li>- Vaatii lämpötilansa puolesta vahvat eristeet</li> </ul>

<p><b>Litiumioniakut</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mahdollisuus hiljaisiin moottoreihin</li> <li>- Hyvä hyötysuhde</li> <li>- Halpoja operoida</li> <li>- Helppo käyttää</li> <li>- Hyvät tulevaisuudennäkymät</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Korkea massa suhteessa energiaan</li> <li>- Pitkät latausajat</li> <li>- Akkujen toimintamatkaa vaikea arvioida</li> <li>- Valmistus ei tällä hetkellä ekologista</li> </ul>
<p><b>Ammoniakki</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Runsas saatavuus</li> <li>- Turvallinen vaihtoehto</li> <li>- Ei vie paljon tilaa</li> <li>- Ei vaadi jäähdytystä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Typen oksidit päästöinä</li> <li>- Tutkimus ja kehitys vasta alkutekijöissä</li> <li>- Toistaiseksi vain lyhyille matkoille</li> </ul>

## 4. YHTEENVETO

Jet A1 -polttoaineella toimivat ohivirtausmoottorit ovat olleet käytössä kaupallisessa liikenteessä ainoana voimanlähteenä jo 1950-luvulta asti. Ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä olikin: Miksi Jet A1 -ohivirtausmoottorit ovat kaupallisessa liikenteessä vuonna 2024 ainoa käytettävä voimanlähde ja polttoaine? Kyseiset moottorit tarjoavat koneisiin suuren työntövoiman kokoonsa nähden ilman liiallista polttoaineen kulutusta. Suuren työntövoiman avulla saavutetaan myös suuria nopeuksia, jolloin moottorit saavuttavat vähintään kohtalaisesti kaikki lentokoneen moottorille tärkeät ominaisuudet

Jet A1 -polttoaineella toimivat voimanlähteet ovat päästöttömyyteen pyrkivässä maailmassa hyvinkin vanhanaikainen ratkaisu ja tähän fossiilisia polttoaineita polttavaan voimanlähteeseen ja nimenomaan sen käyttämään polttoaineeseen pyritäänkin löytämään korvaava fossiiliton ratkaisu. Toisena tutkimuskysymyksenä olikin: onko 20 vuoden päästä Jet A1 -moottorit jo mahdollisesti korvattu fossiilittomalla vaihtoehdolla ja mikä lukuisista vaihtoehdoista on paras korvaaja? Vaihtoehtoisista voimanlähteistä ja polttoaineista käsittelyyn valikoitui biokerosiini, vety, sähkö akkujen avulla sekä ammoniakki. Jokaisella vaihtoehtoisella korvaajalla on paljon potentiaalia, mutta myös negatiivisia asioita, mitkä mahdollisesti ovat esteenä polttoaineen kaupallistumiselle.

Biokerosiini on niin sanotusti helpoin vaihtoehto Jet A1:n korvaajaksi, sillä se käy moottoreihin usein suoraan ilman, että niihin tarvitaan suurempia muutoksia. Tämä biomassasta usein valmistettu vaihtoehto sopisikin lentoyhtiöille erinomaisesti sen helppouden takia ja se myös alentaisi päästöjä huomattavasti. Tällä hetkellä biokerosiinin hinta on kuitenkin moninkertainen Jet A1:een verrattuna, lähinnä sen saatavuuden takia, eikä nopeaa muutosta asiaan ole näkyvissä. Tämä aiheuttaa haasteita sen kaupallistumiselle.

Biokerosiinilla on jo lennetty kaupallisessa lentoliikenteessä kymmeniä lentoja ja se on osoittautunut käytössä toimivaksi. Todellista murrosta ei kuitenkaan ole tapahtunut, vaan biokerosiinin käyttö on jäänyt vähäiseksi kaupallisessa liikenteessä ja suurimpana ongelmana pidetään juuri sen moninkertaista hintaa. Biokerosiinin tulevaisuus ei kuitenkaan ole täysin tuomittu, vaan sillä on paikka varsinkin lentoliikenteen murroksessa, jossa biokerosiini tulee todennäköisesti toimimaan eräänlaisena välipolttoaineena, jolla väliaikaisesti pystytään pienentämään kaupallisen lentoliikenteen päästöjä ennen lopullisten korvaajien löytymistä.

Vety puolestaan polttoaineena sellainen, jolla potentiaali on lähes rajaton ja sen kehityksessä mahdollisuuksia on lähes loputtomasti. Vedyn avulla pystytään kehittämään lukuisia erilaisia ratkaisuja, joista vain ajan kanssa huomataan parhaimmat.

Vedyn ominaisuuksista erittäin suotuisan tekee muun muassa sen runsas saatavuus esimerkiksi vedestä. Vedyllä on myös erittäin korkea energian suhteessa sen painoon ja vetymootoreiden ominaisuudet ja mahdollisuudet ovat nykyisten ohivirtausmootoreiden tasolla, muun muassa nopeudessa ja tankkausmahdollisuuksissa tehden siitä erittäin suotuisan ratkaisun lentoyhtiöille.

Vety on räjähdysherkkä aine, joka pitää ottaa koneiden suunnittelussa huomioon. Käytännössä vetylentokoneet vaativat siis kestävämmät tankit vedylle ja erittäin pitävät eristykset, sillä vedyn ominaisuudet ovat parhaat nesteinä eli pienimmillään -253 celsiusasteessa. Vety vaatii myös paljon enemmän tilaa Jet A1:een verrattuna, jolloin lentokoneiden muoto todennäköisesti tulee muuttumaan huomattavasti, jotta vedylle saadaan koneeseen enemmän tilaa.

Kaikki ongelmat huomioon ottaen vedyn mahdollinen potentiaali on kuitenkin niin suuri, että ongelmia kannattaa lähteä ratkomaan ja vedyn tulevaisuus ilmailun saralla näyttää lupaavalta. Jo käynnissä olevat hankkeet vetylentokoneen kehittämiseen tukevat tätä väitettä ja uskonkin vetylentokoneella olevan parhaimmat edellytykset olla kaupallisessa ilmailussa Jet A1 -koneiden korvaajana.

Vedyn rinnalla litiumioniakuilla toimivat sähkölentokoneet ovat olleet suurena puheenaiheena ja yleisesti sähkölentokoneita pidetään ilmailun tulevaisuutena. Akkulentokoneissa hyötysuhde on erittäin suuri ja sähkömootoreilla toimiva lentokone on äärimmäisen hiljainen varsinkin nykyisiin koneisiin verrattuna. Se olisi oiva ratkaisu kaupunkien läheisyydessä sijaitseville lentokentille, missä on laajat melurajoitukset. Lentokoneiden ollessa täysin sähköisiä ei polttoaineita tarvita, joten akkulentokone on käytössä erittäin ekologinen ja päästötön ratkaisu.

Akkujen valmistus ei tällä hetkellä kuitenkaan ole mitenkään ekologista tai varsinkaan eettisesti oikein, sillä kaivoksilla tuhlataan suuria määriä vettä akkuihin tarvittavien materiaalien saamiseen. Lisäksi työolot kaivoksilla ovat erittäin huonot ja muun muassa lapsityövoimaa esiintyy huomattavasti. Tämä tarkoittaa sitä, että akkujen valmistuksesta pitää saada ekologisempaa, jotta akkulentokoneiden käyttöä voitaisiin tosissaan harkita ja kaupallistaa.

Akkulentokoneiden suurimpana ongelmana on akkujen korkea paino suhteessa niiden energiaan. Käytännössä lentokoneen massa nousisi todella korkeaksi, jos haluttaisiin lentää pidempää matkaa ja näin sen lento-ominaisuudet heikkenisivät huomattavasti,

eikä lentäminen olisi tehokkaasti mahdollista pitkällä matkalla. Myös latausajat nousevat helposti 90 minuuttiin, mutta huomattavasti pienemmät käyttökustannukset kuitenkin mahdollistavat rahallisesti tuottavat akkulentokoneet.

Akkukoneisiin on pidetty mahdollisuutena yhdistää muun muassa biokerosiinilla toimiva polttomoottori, jolloin puhutaan eräänlaisesta hybridilentokoneesta. Tällöin esimerkiksi pahimmat akkua vievät lennon vaiheet suoritetaan polttomoottoreilla ja lennon matkalentovaihe sähköllä, jolloin koneen kantama kasvaa merkittävästi. Tämä ratkaisu myös lisäisi merkittävästi koneen painoa eikä siten olisi kovin pitkäkestoinen ratkaisu.

Suurien investointien myötä myös sähkölentokoneen tulevaisuus näyttää kuitenkin valoisalta, joko täysin sähköisenä tai hybridimallisena. Pitkillä lennoilla, kuten mannertenvälisillä lennoilla akkukoneita ei kuitenkaan tulla todennäköisesti näkemään ainakaan vielä 20 vuoden päästä, mutta lyhyillä, kuten kotimaan lennoilla on täysin mahdollista, että litiumioniakkulentokoneet ovat silloin jo arkipäiväisiä.

Ammoniakki on vielä polttoaineena tuntemattomampi, mutta sen nouseminen tapetille on myös pikkuhiljaa alkanut tapahtumaan ja sen potentiaali nousemaan ihmisten tietoisuuteen. Ammoniakki on polttoaineena vetyyn verrattavissa oleva aine, jonka ominaisuuksilla pystytään tekemään samankaltaisia ratkaisuja, kuin vedyllä. Ammoniakilla voidaan siis muun muassa tuottaa sähköä polttomoottorin tai polttokennojen avulla, jolloin myös mahdollisia voimantuoton ratkaisuja on monia.

Ammoniakki on vetyyn verrattuna turvallinen polttoaine, joka ei ole läheskään yhtä räjähdysherkkä ja sen käyttäminen ei vaadi samanlaista jäähdyttämistä, kuin nestevety. Ammoniakki on tilavuutensa puolesta erinomainen vaihtoehto koneen polttoaineeksi. Tämä tarkoittaa siis sitä, että ammoniakkia voidaan tankata koneeseen energialtaan paljon ilman, että se vie koneesta liikaa tilaa. Ammoniakin massa hieman rajoittaa mahdollisuuksia, sillä muun muassa vetyn verrattuna sama massa ammoniakkia sisältää vain 20 prosenttia vedyn energiasta. Ammoniakin vahvuuksiin kuuluu myös se, että se on laajasti maataloudessa käytössä ja sitä pystytään tuottamaan suuria määriä uusiutuvia energianlähteitä käyttäen.

Ammoniakin kehitys polttoaineena ei kuitenkaan ole vielä yhtä pitkällä muiden työssä mainittujen polttoaineiden ja voimanlähteiden kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että ammoniakin kohdalla löytyy vielä paljon ongelmia, jotka pitää ratkoa ennen virallista käyttöönottoa. Ammoniakin polttamisesta syntyy muun muassa runsaasti typen oksideja, joita ei ole tällä hetkellä mahdollista ohivirtausmoottorien avulla suodattaa. Ratkaisuna tähän on esitetty muun muassa kahden polttoaineen menetelmää, jossa käytettäisiin perinteisempää polttomoottoria ja täten typen oksidit pystyttäisiin suodattamaan.

Ammoniakista löytyy kaikki erinomaisen polttoaineen ominaisuudet ja potentiaalia on runsaasti. Kehityksen ollessa kuitenkin vielä muita jäljessä on epätodennäköistä, että ammoniakki olisi suurin korvaaja nykyisille ratkaisuille. Kehityksen myötä ja ammoniakkin todellisen potentiaalin ymmärtämisen jälkeen tämä on vielä täysin mahdollista myöhemmin. Varsinkin lyhyille matkoille ammoniakkia voidaan pitää potentiaalisena jo 20 vuoden päästä. Matkan pituuden rajoitus johtuu siitä, että kunnollista ohivirtausmoottorin tyylistä ratkaisua ei ole vielä saatu kehitettyä.

Lentoliikenne on todella tarkasti säänneltyä, joten nopeita ratkaisuja ei tulla näkemään ja 20 vuottakin on kaupallisessa lentoliikenteessä äärimmäisen lyhyt aika uusien innovaatioiden saralla. Siksi kehittyneimmillä innovaatioilla, kuten biokerosiinilla ja akkukäyttöisillä lentokoneilla, on todennäköisesti seuraavina vuosina suurimmat mahdollisuudet saada markkinarakoa lentoliikenteessä. Vedyllä ja ammoniakilla kuitenkin lienee suurin potentiaali olla todellinen Jet A1 -koneiden lopullinen korvaaja 20 vuoden päästä ja varsinkin vielä vuosia sen jälkeen. Todellisuudessa mikään vaihtoehto todennäköisesti ei ole täysin korvannut nykyistä polttoainetta, mutta loistavia vaihtoehtoja sille on 20 vuoden kuluttua hyvin todennäköisesti ja niistä parhaana todennäköisesti jokin vetyä hyödyntävä kokonaisuus.

# LÄHTEET

Barke, A. et al. (2022). Are Sustainable Aviation Fuels a Viable Option for Decarbonizing Air Transport in Europe? An Environmental and Economic Sustainability Assessment. *Applied sciences*. [Online], Vol. 12 (2), pp. 597-.

Bilgen, S. (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable & sustainable energy reviews*. [Online], pp. 38890–902.

Boretti, A. (2023). Ammonia energy storage for hybrid electric aircraft. *International journal of hydrogen energy*. [Online], Vol. 48 (90), pp. 35305–35315.

Boretti, A. & Castelletto, S. (2022). NH<sub>3</sub> Prospects in Combustion Engines and Fuel Cells for Commercial Aviation by 2030. *ACS energy letters*. [Online], Vol. 7 (8), pp. 2557–2564.

Cesconetto, G (2022). *Charging AAM aircraft: How long does it take?* CAAM. <https://canadianaam.com/2022/05/10/charging-aam-aircraft-how-long-does-it-take/>

Duperrin, B. (2023). *What fuels and energy sources can be used to fly and aircraft?* TravelGuys. <https://www.travelguys.fr/en/2023/09/27/what-fuels-and-energy-sources-can-be-used-to-fly-an-aircraft/#whats-the-best-option-for-the-future-of-commercial-aviation>

Farokhi, S. (2020) *Future propulsion systems and energy sources in sustainable aviation*. Hoboken, New Jersey; Wiley.

Gianonne, M. (2021). *Smaller is Better for Jet Engines*, NASA. <https://www.nasa.gov/aeronautics/smaller-is-better-for-jet-engines/>

Hall, N. (2021). *Turbofan Engine*, NASA. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etfr.html>

Han, H. et al. (2019). An electric airplane: Assessing the effect of travelers' perceived risk, attitude, and new product knowledge. *Journal of air transport management*. [Online], pp. 7833–42.

Heart Aerospace (2024). <https://heartaerospace.com/>

Hoelzen, J. et al. (2022). *Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps*. *International journal of hydrogen energy*. [Online], Vol. 47 (5), pp. 3108–3130

*Kerosene-Type Jet Fuel Prices: U.S. Gulf Coast*. (2024). U.S. Energy Information Administration, retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis. <https://fred.stlouisfed.org/series/MJFUELUSGULF>

Koistinen, K, et al. (2019). Stakeholder signalling and strategic niche management: *The case of aviation biokerosene*, Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.283>.

Kostiainen, J. (2023). *Vetytalous*, Nordea. <https://corporate.nordea.com/article/80926/vetytalous>

Lithium-ion batteries need to be greener and ethical. (2021). [Online], Vol. 595 (7865), pp. 7–7.

Mikolajczak, Celina. et al. (2011). *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. 1st ed. 2011. [Online]. New York, NY: Springer New York.

Neuling, U. & Kaltschmitt, M. (2015). Conversion routes for production of biokerosene—status and assessment. *Biomass conversion and biorefinery*. [Online], Vol. 5 (4), pp. 367–385.

Perera, F. & Nadeau, K. (2022). Climate Change, Fossil-Fuel Pollution, and Children’s Health. *The New England journal of medicine*. [Online], Vol. 386 (24), pp. 2303–2314.

Quick, D. (2010). *Biofuel Airbus A320 completes first successful test flight*. New Atlas. <https://newatlas.com/biofuel-airbus-a320/17123/>

Spencer, R. (2023). *Certification considerations for the configuration of a hydrogen-fuelled aeroplane*. The Aeronautical Journal, Vol. 127(1308), pp. 213–231. <https://www.cambridge.org/core/journals/aeronautical-journal/article/certification-considerations-for-the-configuration-of-a-hydrogenfuelled-aeroplane/69BD73E76F39C4CA5202CF0FF0EAF808>

Stanford Edu. THE JET ENGINE: A HISTORICAL INTRODUCTION. (2004). <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/ww2/projects/jet-airplanes/planes.html>

The jet engine. (2015). 5th ed. Chichester, West Sussex: Wiley.

Thalin, P. (2019). *Fundamentals of electric aircraft*. Warrendale: SAE International.

Tountas, A. (2021). *Getting renewable energy in the sky with better aircraft designs*. Advanced science news. <https://www.advancedsciencenews.com/getting-renewable-energy-in-the-sky-with-better-aircraft-designs/>

Yuanrong, et al. (2022). *CURRENT AND FUTURE COST OF E-KEROSENE IN THE UNITED STATES AND EUROPE*. Iccct. <https://theicct.org/publication/fuels-us-eu-cost-ekerosene-mar22/>

ZEROe, Towards the world’s first hydrogen-powered commercial aircraft. (2024). Airbus. <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>