



## **LENTOKONETEKNIIKAN KEHITYS**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Eemil Polus

Tarkastaja: Tutkijatohtori Jonna Tiainen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Eemil Polus

### **Lentokonetekniikan kehitys**

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

40 sivua, 9 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijatohtori Jonna Tiainen

Avainsanat: Lentokone, Suihkumoottori, Aerodynamiikka, Kehitys, Päästöt, Melu, Lentokonetekniikka

Kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus lentokonetekniikan kehitykseen. Työssä tarkasteltiin erityisesti suurien matkustajalentokoneiden kehitystä viime vuosina, sekä mitkä tekijät ajavat kehitystä. Kehitystä tarkasteltiin lentokoneen moottorin, sekä lentokoneen rungon näkökulmasta.

Perinteinen lentokoneen moottori toimii avoimen kaasuturbiinin tavoin, mutta on sähkön tuottamisen sijasta optimoitu työntövoiman tuottamiseen. Moottorin tuottama työntövoima vie lentokonetta eteenpäin ilmanvastusta vasten. Siivet tuottavat nostovoiman, joka pitää koneen ilmassa. Pienentämällä koneen ilmanvastusta ja painoa voidaan vähentää tarvittavaa työntö- ja nostovoimaa.

Työssä selvitettiin, että kehityksen taustalla on lentämisen lisääntyminen, nousevat polttoaineen hinnat ja huoli ympäristöstä. Moottorin hyötysuhdetta pyritään parantamaan suuremmilla ohitus- ja painesuhteilla. Moottorista tulevia päästöjä pyritään pienentämään suuremmilla ilma-polttoainesuhteilla, sekä palamisen optimoinnilla. Moottorista tulevaa melua voidaan vähentää ohitussuhteen kasvattamisen lisäksi absorboivilla materiaaleilla ja suuttimen ulosvirtauksen paremmalla sekoittumisella. Rungon ja moottorin painoa voidaan vähentää kevyemmällä ja kestävimmillä materiaaleilla kuten komposiiteilla. Rungosta saa aerodynaamisemman kasvattamalla siipien muotosuhdetta ja parantamalla siipien muotoilulla. Näillä muutoksilla lentokoneista voi tehdä isompia ja ne voivat lentää jopa 40 % pidemmälle tuottaen vähemmän päästöjä ja melua kuin aikaisemmat lentokoneet.

Työssä tuli myös ilmi, että lisääntyvän lentämisen takia edellä mainitut parannukset eivät tule riittämään päästötavoitteiden saavuttamiseksi. Sen takia radikaalisemmat uudistukset ovat pakollisia. Esimerkiksi biopolttoaineet, uudet lentokoneen muotoilut ja sähköistyminen voivat auttaa päästö ja melu tavoitteiden saavuttamiseksi.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Eemil Polus

### **The Development of Aircraft Technology**

Bachelor's thesis

2022

40 pages, 9 figures ja 3 tables

Examiner: Post-doctoral researcher Jonna Tiainen

Keywords: Aircraft, Jet engine, Aerodynamics, Development, Emissions, Noise, Aircraft technology

The bachelor's thesis is a literature review on the development of aircraft technology. The thesis specifically looked at the development of large passenger aircraft in recent years, as well as which factors drive the development. The development was examined from the point of view of the aircraft engine and the aircraft frame.

A traditional aircraft engine works like an open gas turbine, but instead of generating electricity, it is optimized for generating thrust. The thrust produced by the engine is the force that moves the aircraft forward against the drag. The wings produce a lift that keeps the plane in the air. By reducing the drag and weight of the airplane, the required thrust and lift can be reduced.

The thesis revealed that the development is driven by an increase in flying, rising fuel prices, and concern for the environment. Engine efficiency is increased with higher bypass and pressure ratios. The emissions produced by the engine are reduced with larger air-to-fuel ratios and combustion optimization. In addition to increasing the bypass ratio, noise from the engine is prevented by absorbent materials and better mixing of the nozzle outflow. The weight of the frame and engine can be reduced with lighter and more durable materials such as composites. The fuselage can be made more aerodynamic by increasing the aspect ratio and design of the wings. With these changes, the planes can be made bigger and with a 40% bigger range, producing fewer emissions and noise than previous planes.

The thesis also revealed that due to the increase in flying, the aforementioned improvements will not be enough to achieve the emission reduction goals. That is why more radical reforms are mandatory. For example, biofuels, new aircraft designs, and electrification can help to achieve emission and noise reduction goals.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

$A$	poikkipinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$a$	äänennopeus	[m/s]
$C$	kerroin	
$c$	siiven keskilinja (chord)	[m]
$D$	vastusvoima	[N]
$E$	energia	[J]
$F$	voima	[N]
$L$	nostovoima	[N]
$M$	Machin-luku	
$M_m$	Momentti	[Nm]
$m$	massa	[kg]
$p$	paine	[Pa]
$P$	teho	[W]
$q_m$	massavirta	[kg/s]
$R$	ainekohtainen kaasuvakio	[J/(kg K)]
$r$	säde	[m]
$T$	työntövoima	[N]
$t$	aika	[s]
$T_L$	lämpötila	[K]
$w$	virtauksen nopeus	[m/s]
$W$	gravitaatiovoima	[N]

### Kreikkalaiset

$\alpha$	kohtauskulma	[°]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta$	hyötysuhde	
$\gamma$	lämpökapasiteettisuhde	
$\theta$	kulma horisonttiin nähden	[°]

### Dimensiottomat luvut

Re	Reynoldsin luku
----	-----------------

### Alaindeksit

1	tilapiste 1
2	tilapiste 2
i	ilma
pa	polttoaine
out	ulostulo
in	sisääntulo
prop	propulsio
jet	suihkuvirtaus
dyn	dynaaminen
l	nostovoima
d	vastusvoima
m	momentti
p	paine

ymp	ympäristö
	samansuuntainen
⊥	kohtisuora

#### Lyhenteet

TSFC	thrust-specific fuel consumption (työntövoimakohtainen polttoaineenkulutus)
ICAO	Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö
IATA	Kansainvälinen ilmakuljetusliitto
GE	General Electric
FAA	Liittovaltion ilmailuhallinto (Federal Aviation Administration)
HFLC	hybrid laminar flow control (hybridilaminaarinen virtaussäätö)
AFR	air/fuel ratio (ilma-polttoainesuhde)
LTO	landing and take off (laskun ja nousu kierto)
TAPS	twin-annual preswirlers

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
2	Historia .....	10
3	Suihkumoottori .....	12
3.1	Toimintaperiaate .....	12
3.1.1	Kaasuturbiiniprosessi.....	13
3.1.2	Diffuusori ja suutin .....	14
3.1.3	Työntövoima.....	16
3.1.4	Hyötysuhde .....	18
3.2	Moottorityypit .....	18
3.2.1	Ohivirtausmoottori.....	19
3.2.2	Potkuriturbiinimoottori .....	19
4	Aerodynamiikka .....	20
4.1	Siipeen vaikuttavat voimat.....	20
4.2	Lentokoneen suorituskykyyn vaikuttavat tekijät .....	22
5	Kehitys.....	24
5.1	Kehitystä ajavat tekijät .....	24
5.2	Kehittyneiden materiaalien vaikutus.....	26
5.3	Moottorin hyötysuhteen kasvattaminen .....	29
5.4	Aerodynaaminen muotoilu.....	31
5.5	Päästöt ja polttoaineet .....	33
5.6	Melu .....	36
5.7	Tulevaisuus .....	37
6	Johtopäätökset .....	39
	Lähteet .....	41

# 1 Johdanto

Kiinnostuin ensimmäistä kertaa lentokoneista noin 10-vuotiaana. Televisiosta tuli silloin Lentoturmatutkinta nimellä kulkeva sarja. Dokumenttisarjassa tutkittiin usein jo selvitettyä lentoturmaa, mutta ajoittain myös selvittämättömiä mysteereitä. Sarja loi kiinnostuksen ilmailua kohtaan, joka on säilynyt. Lentokoneet ovat yksi insinööritiedon taidonnäytteistä ja lentäminen on pienentänyt maailmaa valtavasti. Lentokoneiden peruserä ja ulkonäkö ovat pysyneet samana jo pitkään. Siitä näkökulmasta voisi ajatella, että kehitystä ei tapahdu tai se ei ole merkittävää. Vaikka suuria toimintaperiaatteen tai ulkonäön muutoksia ei olekaan tapahtunut on mahdollista ja jopa todennäköistä, että tulevina vuosikymmeninä lentäminen tulee muuttumaan paljon. Airbus antaa viitteitä tästä UpNext ohjelmassa, jossa on useita projekteja, jotka keskittyvät tulevaisuuden teknologioihin (Airbus 2022a).

Työn aihe on lentokonetekniikan kehitys. Lentokonetekniikan kehitys on ajankohtainen aihe, koska lentokoneilla ja matkustamisella on iso merkitys tämän ajan maailmanpolitiikassa. Huoli ilmastonmuutoksesta on lisännyt painetta tehdä päätöksiä ja kehittää uutta teknologiaa sen hillitsemiseksi. Ilmailuteollisuus tuottaa noin 2–3 % maailman polttamisesta tulevasta CO<sub>2</sub> päästöistä, joka saattaa kuulostaa pieneltä, mutta on silti absoluuttisessa määrässä valtava määrä hiilidioksidia (Sforza 2014, 11). Esimerkiksi Euroopan komissio on asettanut ilmailusta tuleville päästöille kunnianhimoisen päästövähennys tavoitteen. Tavoitteen saavuttaminen tulee olemaan vaikeaa lisääntyvän ilmailun takia. Ilmastonmuutos on laaja ongelma, jonka takia sen hillitseminen vaatii kaikkien alojen myös ilmailun osallistumista, sekä muutosta. Myös epävakaa öljyn hinta ja 2020 alkanut koronavirus pandemia lisäävät aiheen ajankohtaisuutta.

Työn tavoitteena on selvittää mitkä tekijät ajavat ilmailun kehitystä, ja mitkä ovat matkustajakoneiden viimeisimmät edistys askeleet. Tavoitteena on myös saada ennuste tulevasta, sekä siitä mitä toimia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja lentämisen aiheuttamien meluhaittojen vähentämiseksi ilmailussa voidaan tehdä.

Työssä perehdytään siis yleisesti lentokonetekniikan kehitykseen lentokoneen moottorin, sekä aerodynamiikan ja muun lentokoneen rakenteen näkökulmasta. Työ sisältää kirjallisuuskatsauksen lentokoneen historiasta, moottorin toiminnasta ja aerodynamiikan



perusteista. Aihe on laaja, joten työssä keskitytään pääasiassa matkustajakoneiden moottorien ja rungon kehitykseen polttoaineen kulutuksen, päästöjen, melun sekä materiaali- ja valmistustekniikan näkökulmasta. Rahti koneet, ylisooniset lentokoneet, pienet potkurikoneet ja sotilaalliseen käyttöön tarkoitettut lentokoneet jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Tarkastelun ulkopuolellejäävät myös helikopterit, ilmalaivat ja liidokit.

## 2 Historia

Lentokoneiden kehitys tapahtui alkuaikoina amatööri-intoilijoiden toimesta. Myöhemmin kehitys tapahtui kansallisen ylpeyden ja lopulta kansallisen turvallisuuden nimissä (Rolls-Royce 2015, 26). Näihin amatööri intoilijoihin kuului esimerkiksi Wrighting veljekset, jotka ovat vastuussa ensimmäisestä lennosta, jossa ihmistä kuljettava kone oli noussut omalla voimalla ilmaan, lentänyt eteenpäin ilman nopeuden hidastumista ja laskeutunut yhtä korkealle, josta lento alkoi. Tämä tapahtui 17.12.1903 lentäjänä Orville Wright. Sitä lentoa pidetään todellisena ensimmäisenä ilmaa raskaampana lentona. Lentokone kuitenkin oli keksitty jo aikaisemmin ja lentoja erinäisin avustuksin oli tehty pitkin 1800-lukua. (Anderson J. D. Jr. 1989, 1–2.) Lentokoneen todellisena keksijänä pidetään Sir George Clayleyta, joka tajusi erottaa nosto- ja työntövoiman. Sitä aikaisemmin mekaaninen lento oli suuntautunut räpytteleviä siipiä kohti, joissa siipien liike tuottaisi molemmat työntö- ja nostovoiman (Anderson J. D. Jr. 1989, 6). Lentokoneen kehittäjiä oli monia ja aluksi kehitys keskittyi myös liidokkeihin eli purjelentokoneisiin. 1900-luvulla kilpailu kehityksestä kiihtyi erityisesti Wrightin veljeksien, Samuel Langleyn ja Glenn Curtissin voimin. (Anderson J. D. Jr. 1989, 37.)

Ongelmana kehityksessä on ollut työntövoiman tuottaminen tarpeeksi kevyellä moottorilla. Bensiinikäyttöisten moottorien keksiminen 1870-luvulla ja sen kehittyminen 1800- ja 1900-luvun taitteessa oli ratkaisevassa roolissa lentokoneiden kehityksessä (Anderson J. D. Jr. 1989, 44–45). Ensimmäisissä lentokoneissa voimanlähteenä toimi männillä toimiva moottori ja työntövoimaa tuotti potkuri. Jo silloin oli kuitenkin selvää, että kyseinen teknologia kohtaisi teoreettiset rajansa ja lentonopeuden kasvattamiseksi oli keksittävä uusi tapa tuottaa työntövoimaa. Uudeksi tavaksi keksittiin tänä päivänäkin käytetty suihkumoottori, joka perustuu avoimeen kaasuturbiini- ja Brayton-prosessiin. Tämä uusi teknologia sai alkunsa 1920-luvulla ja kehittyi lopulta toimiviksi prototyypeiksi 1930-luvun lopulla. (Rolls-Royce 2015, 26.) Tämä kehitys lentokoneiden moottoreissa nosti moottorien tehon Wrightien vuonna 1903 käyttämästä 12-hv:sta 2200-hv:aan vuoteen 1945 mennessä. Nopeus nousi 45:sta yli 800 km/h. Nykyään suihkumoottorit ja rakettimoottorit, voivat tuottaa tarpeeksi työntövoimaa ääntä moninkertaisesti nopeampaan lentämiseen. Tämä eksponentiaalinen kehitys lentokoneissa ja niiden moottoreissa alkoi 1900-luvun alussa ja on mahdollistanut lentämisen nopeammin ja korkeammalle. (Anderson J. D. Jr. 1989, 45 ja 48.)

Vaikka suihkumoottorin peruseriaate onkin pysynyt samana, on silti kehitystä tapahtunut jatkuvasta, eikä kaikkea potentiaalia olla vieläkään pystytty saavuttamaan. Merkittävimpiä kehitysaskelia ovat olleet erilaiset versiot suihkumoottorista esimerkiksi suuren ohitussuhteen suihkumoottorit (ohivirtausmoottori, turbofan) ja potkuriturbiinimoottori (turboprop). Myös moniakseliset suihkumoottorit, sekä uudet materiaali- ja valmistustekniikan innovaatiot veivät kehitystä eteenpäin (Rolls-Royce 2015, 16, 19, 30). Lentokoneen rungon ja aerodynamiikan puolella merkittäviä kehitysaskelia olivat esimerkiksi etureunasolakoiden (slats), laskusiivekkeiden (flaps) ja wingtip-laitteiden keksiminen.

Nykyään kehitys on keskittynyt lisääntyvästä lentämisestä aiheutuvien kasvihuonepäästöjen ja melun vähentämiseen, sekä taloudellisen hyödyn maksimoimiseen esimerkiksi vähentämällä lentokoneen polttoaineen kulutusta, sekä valmistus- ja huoltokustannuksia (Rolls-Royce. 2015, 54 ja 211).

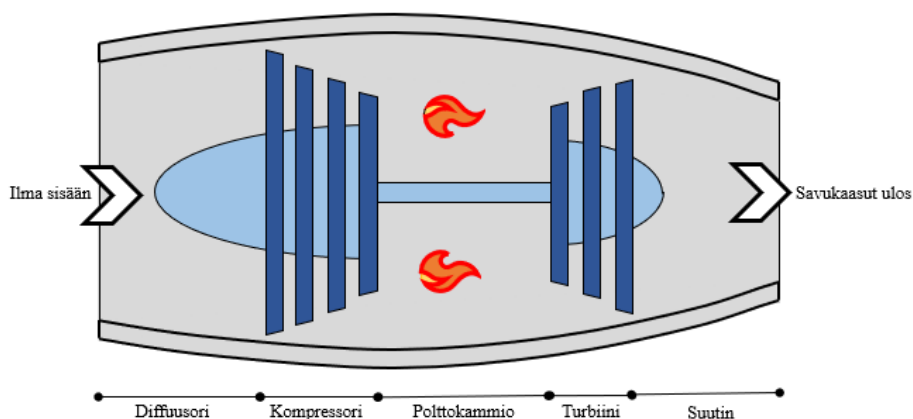
### 3 Suihkumoottori

Suihkumoottori toimii lentokoneen voimanlähteenä ja on sen takia ollut keskeinen kehityskohde lentokoneiden kehityksessä. Tässä osassa käsitellään suihkumoottorin toimintaperiaate kaasuturbiiniprosessin ja työntövoiman ymmärtämisen avulla, sekä matkustajakoneille tyypillisimmät moottorityypit.

#### 3.1 Toimintaperiaate

Suihkumoottorin toimintaperiaate on lähes sama kuin perinteisellä kaasuturbiinivoimalalla. Suihkumoottorissa halutaan tuottaa työntövoimaa, kun taas kaasuturbiinivoimalassa sähköä. Vaikka molemmat perustuvat Brayton-prosessiin on silti suihkumoottori erilainen, johtuen lentämisestä tulevasta painorajoituksesta, sekä muista erityisvaatimuksista.

Tavallinen suihkumoottori koostuu diffuusorista, kaasugeneraattorista eli kaasuturbiinista ja suuttimesta kuvan 1 mukaan. Lentokoneen moottorin kaasuturbiini osio koostuu samoista osista ja niillä on sama käyttötarkoitus kuin paikallaankin olevassa kaasuturbiinissa. Erona on se, että kaasu ei paisu loppuun asti vaan sen verran, että turbiini pystyy pyörittämään kompressoria ja lentokoneen apulaitteita. Palamiskaasut lähtevät turbiinista selvästi ilmakehää korkeammassa paineessa ja paisuvat lopulta suuttimessa korkeaan nopeuteen ennen niiden poistumista ilmakehään. (Morgan, M. J. Shapiro, H. N. Boettner, D. D. Bailty, M. B. 2014, 562.) Muita moottorin toiminnalle keskeisiä osia ovat laakerit, akselit, sekä esimerkiksi jäähdytykseen, voiteluun ja polttoaineen syöttöön liittyvät neste- ja kaasujärjestelmät (Rolls-Royce 2015, 150 ja 166).



Kuva 1. Suihkumoottorin leikkauskuva.

### 3.1.1 Kaasuturbiiniprosessi

Kaasuturbiiniprosessi voi olla suljettu tai avoin. Avoimessa systeemissä puristettava ilma tulee ulkoa ja polton jälkeen savukaasut palaavat takaisin ilmakehään. Yksinkertainen avoin aksiaalimallinen kaasuturbiini on hyvin samanlainen kuin suihkuturbiinimoottori ja koostuu kompressorista, polttokammioista, sekä turbiinista kuvan 1 tapaan (Morgan M. J. et al. 2014, 525).

Kompressorin puristaa ilman korkeaan paineeseen. Kompressorin painesuhteella on iso merkitys kokoprosessin termiseen hyötysuhteeseen. Se voidaan nähdä seuraavasta yhtälöstä (Morgan M. J. et al. 2014, 532).

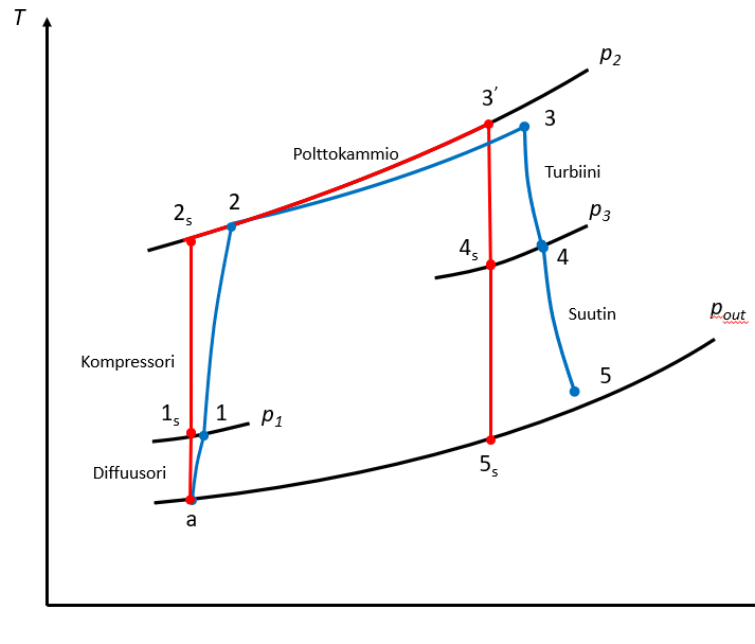
$$\eta = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (1)$$

jossa  $p_1$  on paine ennen kompressorin [Pa],  $p_2$  on paine kompressorin jälkeen ja  $\gamma$  on lämpökapasiteettisuhde. Aksiaalikompressorissa paineen nousu yhdessä vaiheessa on pieni (1,3–1,4). Siten voidaan välttää virtauksen liian nopeasta hidastumisesta johtuva virtauksen irtoaminen, sekä sakkaaminen. Näin voidaan saavuttaa korkea hyötysuhde, sekä pieni polttoaineen kulutus. (Rolls-Royce. 2015, 96.)

Polttokammiossa ilma sekoittuu polttoaineen kanssa ja palaminen tapahtuu. Liian suuri virtausnopeus polttokammiossa johtaa epävakaiseen palamiseen, jonka takia polttokammiossa on takaisinvirtausalueita, joissa ilma virtaa hitaammin. Palamisen jälkeen savukaasujen lämpötila on liian suuri (2100 °C), joten polttokammion loppuosassa sinne syötetään lisää ilmaa virtauksen jäähdyttämiseksi ja päästöjen vähentämiseksi. (Rolls-Royce 2015, 116.)

Savukaasut paisuvat turbiinin läpi, joka muuttaa savukaasujen energiaa mekaaniseksi energiaksi. Suihkumoottorissa suurin osa turbiinissa tuotetusta työstä käytetään kompressorin, sekä mahdollisen propellin tai puhaltimen ajamiseen. Turbiini voi olla impulssi- tai reaktioturbiini, sekä niiden yhdistelmä, riippuen tapahtuuko paisunta staattorissa, roottorissa vai molemmissa. (Rolls-Royce 2015, 134.)

Brayton-prosessi on häviötön ideaali malli, kun taas kaasuturbiiniprosessi on todellinen, jossa tapahtuu häviöitä. Brayton-prosessissa puristus ja paisunta tapahtuvat isentrooppisesti ja lämmöntuonti vakioaineessa (Morgan M. J. et al. 2014, 534–535). Kaasuturbiiniprosessin ja Brayton-prosessin eroja on kuvattu T,s-tasoon kuvassa 2.



Kuva 2. Brayton-prosessia (a, 1s, 2s, 3', 4s, 5s) ja suihkumoottoria (a, 1, 2, 3, 4, 5,) verrattu T,s-tasossa (Tabatabaian & Raiput 2018, 681).

### 3.1.2 Diffuusori ja suutin

Kuvasta 2 nähdään, että ideaalisessa diffuusorissa ja suuttimessa paineen nousu ja lasku tapahtuvat isentrooppisesti. Todellisuudessa häviöitä kuitenkin tapahtuu ja ominaisentropia kasvaa molempien komponenttien yli Diffuusorin tehtävä on hidastaa ilmavirtaa, tuoda se siististi kompressorille ja nostaa sen painetta ennen kompressoria. Suuttimen tehtävä on kasvattaa virtausnopeutta ja tuottaa sitä kautta lisää työntövoimaa. (Morgan M. J. et al. 2014, 563.)

Lentokoneiden suurten lentonopeuksien takia diffuusorin tai suuttimen toimintaa täytyy mallintaa kokoonpuristuvan virtauksen yhtälöillä. Kokoonpuristumattoman ja -puristuvan virtauksen rajana käytetään yleensä  $M < 0,3$  (normaalissa lämpötilassa n. 100 m/s.) (Anderson J. D. Jr. 1989, 133). Machin luku M voidaan laskea seuraavasti.

$$M = \frac{w}{a} \quad (2)$$

jossa  $w$  on virtausnopeus [m/s] ja  $a$  on äänennopeus [m/s]. Machin luvun laskemiseksi on tiedettävä äänennopeus, joka lasketaan seuraavasti.

$$a = \sqrt{\gamma RT_L} \quad (3)$$

jossa  $R$  on ainekohtainen kaasuvakio [J/kgK] ja  $T_L$  on lämpötila [K]. (Morgan M. J. et al. 2014, 570.)

Jos  $M > 1$  virtaus on ylisoonista ja jos  $M < 1$  se on alisoonista. Kun  $M = 1$  se on sooonista eli yhtä suurta kuin äänennopeus. Diffuusori ja suutin käyttäytyvät alisoonisessa virtauksessa päinvastoin kuin ylisoonisessa virtauksessa. Tämä tarkoittaa sitä, että ylisooninen diffuusori on alisooninen suutin ja päinvastoin. Se miten virtaus käyttäytyy, voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä, kun oletetaan prosessi isentrooppiseksi ja aine idealikaasuksi. (Borgnakke C. & Sonntag R. E. 2012, 720–722 ja Morgan M. J. et al. 2014, 572–573.)

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dw}{w}(1 - M^2) = \frac{dp}{\rho w^2}(1 - M^2) \quad (4)$$

jossa  $A$  on poikkipinta-ala [m<sup>2</sup>] ja  $\rho$  on tiheys [kg/m<sup>3</sup>]. Yhtälöstä 4 voidaan saada 4 eri tapausta.

1. Alisooninen suutin.  $M < 1$ ,  $dV > 0$ ,  $dP < 0 \Rightarrow dA < 0$ : kanava suppenee.
2. Ylisooninen suutin.  $M > 1$ ,  $dV > 0$ ,  $dP < 0 \Rightarrow dA > 0$ : kanava laajenee.
3. Alisooninen diffuusori.  $M < 1$ ,  $dV < 0$ ,  $dP > 0 \Rightarrow dA > 0$ : kanava laajenee.
4. Ylisooninen diffuusori.  $M > 1$ ,  $dV < 0$ ,  $dP < 0 \Rightarrow dA < 0$ : kanava suppenee.

Näistä tapauksista voidaan päätellä, että alisoonisen virtauksen kiihdyttäminen vaatii suppenevan kanavan, kunnes virtaus saavuttaa  $M = 1$ , sen jälkeen virtausnopeutta voi kasvattaa ylisooniseksi vain, jos se menee laajenevan kanavan läpi. Sama pätee diffusorille, mutta vain toisinpäin. Molemmissa tapauksissa virtaus saavuttaa Machin luvun kanavan pienimmän poikki pinta-alan omaavassa kohdassa, ns. kurkussa (Morgan M. J. et al. 2014, 573).

Suuttimen toimintaan vaikuttaa vastapaine suuttimen ulkopuolella. Vastapaineen suhde suutinta edeltävään paineeseen määrää kuinka virtaus kiihtyy suuttimessa ja miten se käyttäytyy sen ulkopuolella. Mitä pienempi painesuhde on, sitä suurempaan nopeuteen virtaus kiihtyy,

suuttimen geometrian tuomissa rajoituksissa (suppeneva- vai suppenevalaajeneva suutin). (Borgnakke C. & Sonntag R. E. 2012, 725 ja 731–732.)

### 3.1.3 Työntövoima

Lentokoneen moottorin tehtävä on tuottaa työntövoimaa. Työntövoima on reaktiovoima, joka vie lentokonetta eteenpäin ja nousun aikana myös ylöspäin, sekä saa lentokoneen kiihtymään (Rolls-Royce 2015, 15). Työntövoima perustuu voimaan ja vastavoimaan. Moottori työntää ilmaa taaksepäin suuremmalla nopeudella kuin lentokone lentää. Ilman liikemäärän muutos lentosuuntaa vastaan aiheuttaa Newtonin III lain mukaan vastakkaisen voiman työntövoiman, joka työntää lentokonetta eteenpäin. (Anderson J. D. Jr. 1989, 492.)

Työntövoima voidaan ilmoittaa moottorin läpi menevän ilman massavirran ja -nopeuden kasvun tulona. Tätä muotoa työntövoimasta kutsutaan liikemäärän työntövoimaksi (Rolls-Royce 2015, 14–15). Kun moottorin suutin on suppeneva ja ulosvirtaus saavuttaa äänennopeuden ei voida virtauksen nopeutta enää kasvattaa. Tällöin työntövoiman lisäämiseksi tarvitaan paineen työntövoimaa. Työntövoimaa voidaan kuvata nyt seuraavalla yhtälöllä. (Rolls-Royce. 2015, 14 ja Anderson J. D. Jr. 1989, 495.)

$$T = (q_{m,i} + q_{m,pa}) \cdot w_{out} - q_{m,i} \cdot w_{in} + (p_{out} - p_{in}) \cdot A_{out} \quad (5)$$

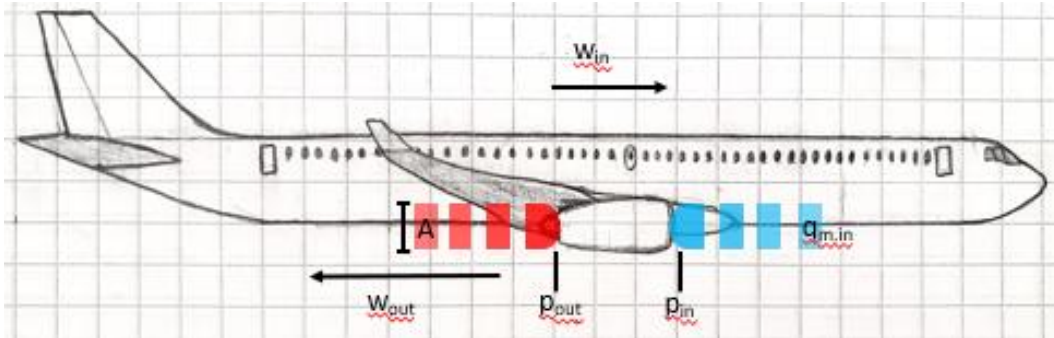
jossa  $q_{m,i}$  on ilman massavirta [kg/s],  $w_{out}$  on moottorista poistuvan ilmapinnan nopeus [m/s],  $w_{in}$  on sama kuin lentokoneen nopeus [m/s],  $p_{out}$  on kaasun staattinen paine moottorin poistokanavassa [Pa],  $p_{in}$  on ympäristön paine moottorin sisääntulokanavassa [Pa] ja  $A_{out}$  on poistovirtauksen pinta-ala poistosuuttimessa [m<sup>2</sup>]. Yhtälöstä 5 voidaan nähdä, että paineen avulla voidaan saada myös voima, joka Newtonin III lain mukaan työntää lentokonetta eteenpäin.

Työntövoimaa voidaan ajatella myös seuraavalla tavalla: ”Suihkumoottorin työntövoiman todellinen peruslähde on moottorin pintaan kohdistuvien paine- ja leikkausjännitysjakaumien tuottama nettovoima” (J. D. Anderson Jr. 1989, 492). Kun leikkausjännityksen vaikutusta ei huomioida voidaan laskea työntövoima summaamalla integraali moottorin sisäisen painejakauman x-suuntaiset komponentit sisäpinnan yli ja integraali moottorin ulkoisen painejakauman x-suuntaiset komponentit ulkopinnan yli. Tästä saadaan seuraava yhtälö. (Anderson J. D. Jr. 1989, 492–495.)



$$T = \int (p_{in} dA)_x + \int (p_{out} dA)_x \quad (6)$$

Yhtälö 6 saadaan johdettua samaan muotoon kuin yhtälö 5. Jälkimmäinen selitys työntövoimalle ei ole yleisessä käytössä, mutta se on tärkeä ymmärtää, koska se kuvaa työntövoiman todellisen peruslähteen (Anderson J. D. Jr. 1989, 492). Työntövoimaa havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Moottorin tuottama työntövoima havainnollistettuna.

Yhtälöistä 5 nähdään, että työntövoimaa voidaan kasvattaa kolmella tapaa. Kasvattamalla moottorin läpimenevän ilman massavirtaa, poistuvan ilmavirtauksen nopeutta tai painetta moottorin ulostulossa. Massavirtaa ei voi kasvattaa loputtomasti, koska tällöin moottorin koko kasvaa ja koon mukana myös sen paino. Poistuvan ilmavirran painetta voidaan kasvattaa lisäämällä kompressorin vaiheita, joka taas lisää painoa. Virtauksen poistumisnopeutta ei voi kasvattaa yli äänen nopeuden, mutta äänen nopeutta voi kasvattaa nostamalla lämpötilaa. Tämä voidaan nähdä yhtälöstä 3. Lämpötilaakaan ei voi kasvattaa loputtomasti materiaalien kestävyden takia. Ilmavirran poistumisnopeuden kasvattaminen lisää lentokoneen moottorin melusaastetta, jonka takia sen kasvattaminen ei ole aina suotavaa. (Rolls-Royce 2015, 14.)

Edellä mainitut tavat kasvattaa työntövoimaa olettavat, että moottorin ulostulosuutin on suppeneva. Ulostulo virtaus voi olla kuitenkin ääntä nopeampaa, jos suutin on suppenevalaajeneva. Lentokoneen moottoreissa suppenevaa laajenevaa suutinta käytetään pääosin ylläni lentämiseen tarkoitetuissa lentokoneissa. (NASA 2022.)

### 3.1.4 Hyötysuhde

Polttoaineen kulutus ja työntövoima eivät kasva samassa suhteessa. Syynä tähän on polttoaineen virtaukseen tuoman tehon, riippuvuus suihkuvirtauksen nopeuden neliöstä seuraavasti.

$$P = \frac{1}{2} q_m w_{out}^2 \quad (7)$$

jossa  $P$  on virtauksen teho [W]. Työntövoima taas riippuu suoraan suihkuvirtauksen nopeudesta yhtälön 5 mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että työntövoiman kaksinkertaistuksessa polttoaineen kulutus nelinkertaistuu (Rolls-Royce. 2015, 15). Moottorin hyötysuhdetta voi kuvata termisenhyötysuhteen lisäksi propulsiivisella hyötysuhteella, jossa propulsioteho jaetaan suihkuvirtauksen tehon muutoksella moottorin yli seuraavasti (Kottas A. T. Bozoudis M. N. Madas M. A. 2020).

$$\eta_{prop} = \frac{P_{prop}}{\Delta P_{jet}} = \frac{T \cdot w_{in}}{P_{out} - P_{in}} \quad (8)$$

jossa  $P_{prop}$  on propulsioteho [W] ja  $\Delta P_{jet}$  on suihkuvirtauksen tehon muutos [W]. Propulsiohyötysuhde on ulkoinen hyötysuhteen mittari, kun taas terminen hyötysuhde on sisäinen hyötysuhteen mittari. Yhdessä ne muodostavat kokonaishyötysuhteen. (Kottas et al. 2020.) Lentokoneen polttoaineen kulutusta voidaan kuvata työntövoimakohtaisella polttoaineenkulutuksella (TSFC, Thrust Specific Fuel Consumption). TSFC on yleisesti käytetty ja on tärkeimpiä moottorin parametrejä kaupallisessa ilmailussa. TSFC saadaan jakamalla polttoaineen massavirta tuotetulla työntövoimalla (Kottas et al. 2020).

$$TSFC = \frac{q_{m,pa}}{T} \quad (9)$$

Pieni TSFC kertoo vähäisestä polttoaineen kulutuksesta suhteessa tuotettuun työntövoimaan.

## 3.2 Moottorityypit

Perinteisellä suihkumoottorilla on rajoituksensa suuren polttoaineen kulutuksen ja melun takia. Siksi se on usein korvattu, jollakin toisella moottorityypillä. Suurissa

matkustajakoneissa ohivirtausmoottorit ja potkuriturbiinimoottorit ovat suosittuja pienemmän melun ja paremman polttoainetalouden takia.

### 3.2.1 Ohivirtausmoottori

Ohivirtausmoottorit (turbofan) ovat laajasti käytettyjä matkustaja lentokoneissa, sekä sotilaallisessa käytössä (Rolls-Royce. 2015, 16). Ohivirtausmoottori on suihkumoottori, jonka edessä on puhallin. Ohivirtausmoottorissa ilmavirta menee ensin propellin tavoin toimivan kanavoidun puhaltimen läpi. Sen jälkeen ilmavirta jakautuu suihkumoottoriin, sekä sen kiertävään ohivirtaukseen, jotka yhtyvät suuttimessa. Ohivirtausmoottorin hyötysuhde on normaalia suihkumoottoria parempi, koska moottorin tuottaman työntövoima on puhaltimen ja suuttimesta tulevan suihkuvirtauksen summa ja ainoastaan ytimen läpi menevä ilma osallistuu palamiseen. Tietenkin turbiini joutuu tekemään enemmän töitä puhaltimen pyörittämiseksi, jolloin suihkuvirtauksen nopeus pienenee. (Anderson J. D. Jr. 1989, 500.) Puhaltimen painesuhde on noin 2:1 ja 4:1 välillä riippuen onko kyse suuren- vai pienenoitussuhteenmoottorista. Ohitusuhde kertoo kuinka suuri osa ilmavirrasta kiertää moottorin ytimen. Suuren ohitusuhteenmoottorit ovat tyypillisesti matkustajalentokoneen moottoreita, kun taas pienen ohitusuhteenmoottorit ovat sotilaslentokoneen moottoreita. Matkustajalentokoneissa ohitusilma tuottaa yli 75 % moottorin työntövoimasta. (Rolls-Royce. 2015, 101.)

### 3.2.2 Potkuriturbiinimoottori

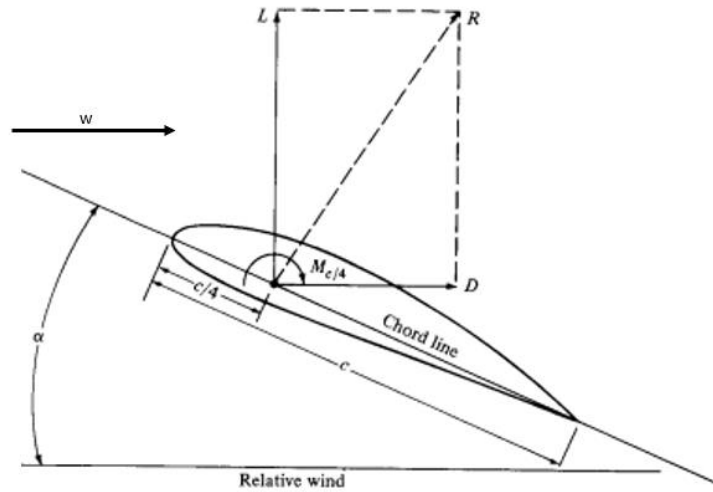
Potkuriturbiinimoottori (turboprop) on käytännössä suihkumoottori, jonka edessä on potkuri. Potkuria ei ole kanavoitu kuten ohivirtausmoottorissa ja turbiini ajaa sitä vaihdelaatikon välityksellä. Potkuri tuottaa suurimman osan työntövoimasta n. 80 % (Tabatabaian & Raiput 2018, 702). Potkuri kiihdyttää enemmän ilmaa, mutta pienempään nopeuteen kuin ohivirtausmoottorin puhallin suhteessa moottorin painoon. Tämän takia potkuriturbiinimoottorilla on pienempi polttoaineen kulutus ja pienempi TSFC kuin ohivirtausmoottorilla. Potkuriturbiini toimii hyvällä hyötysuhteella lentonopeuksien ollessa alle 600 km/h. (Rolls-Royce. 2015, 17 ja Tabatabaian & Raiput 2018, 702.) Pieni ulosvirtausnopeus kuitenkin rajoittaa potkuriturbiinilla saavutettavan lentonopeutta, joka jää ohivirtausmoottorien alapuolelle (Morgan M. J. et al. 2014, 573).

## 4 Aerodynamiikka

Lentokoneen runko on vähintäänkin yhtä tärkeä osa lentokonetta kuin sen moottorit. Lentokoneen runko koostuu itse rungosta, siivistä ja pyrstöstä. Siipien tehtävä on pitää lentokone ilmassa ja pyrstön tasapainottaa lentoa. Tässä osassa käsitellään aerodynamiikan perusteita pääosin siiven toiminnan näkökulmasta. Osassa käsitellään siipeen vaikuttavat voimat, sekä mitkä tekijät vaikuttavat lentokoneen liikkeisiin ja suorituskykyyn.

### 4.1 Siipeen vaikuttavat voimat

Lentokoneessa nostovoima tulee siivestä. Siiven poikkileikkausta sanotaan siipiprofiiliksi (airfoil). Siipiprofiili kuvattu kuvassa 4. Nostovoiman todellinen peruslähde tulee työntövoiman tapaan paine- ja leikkausjännitys jakaumasta, mutta vaan siiven pinnan yli. Siitä tuleva resultanttivoima voidaan jakaa suhteellisen ilmapirran suunnan mukaan vaakavoimaan vastusvoimaan (drag) ja pystyvoimaan nostovoimaan (lift) kuvan 4 tapaan. Paine- ja leikkausjännitys jakaumat aiheuttavat myös momentin, joka pyrkii kiertämään siipeä. Leikkausjännitys jakauma syntyy fluidin viskositeetin aiheuttamasta kitkasta, jolloin se vaikuttaa pääosin siiven vastukseen. (Anderson J. D. Jr. 1989, 179–182.) Painejakaumalle on monia selityksiä, jotka perustuvat yleensä joko Bernoullin lakiin, Newtonin III lakiin tai ns. kiertoteoriaan. Bernoullin laissa painejakauma syntyy virtausnopeuden muutoksesta ja nopeuserosta siiven ylä- ja alapinnoilla. Nopeuseron voidaan taas ajatella tulevan virtauksen puristumisesta. Newtonin III lain selitys perustuu virtauksen suunnanmuutokseen. Kiertoteoriassa selitys perustuu pyörrevirtauksen ja lineaarisenvirtauksen eräänlaiseen yhdistämiseen. Kaikilla edellä mainituilla selityksillä on kuitenkin ongelmansa eikä ole olemassa ”oikeaa” selitystä. Miksi virtaus kiihtyy, hidastuu tai puristuu siten, että syntyy nostovoimaa? Onko virtauksen suunnanmuutos seuraus eikä syy nostovoimalle? Kiertoteoria taas muistuttaa enemmän matemaattista mallia kuin selitystä, vaikka sitä voidaankin käyttää kahden edellisen mallin syvällisempään selittämiseen. (Anderson J. D. Jr. 1989, 235–236.) Painejakaumaa mallinnettu kuvassa 5.



Kuva 4. Sketch showing forces and moments affecting the airfoil.

Nostovoimaan, vastusvoimaan ja niiden aiheuttamaan momenttiin vaikuttaa monta fysikaalista ominaisuutta. Dimensioanalyysistä saadaan nostovoimalle, vastusvoimalle ja momentille yhtälöt, jotka voidaan järjestää seuraavaan muotoon nostovoima-, vastusvoiman- ja momenttikertoimien ratkaisemiseksi.

$$C_l = \frac{L}{p_{dyn} A} = f(\alpha, M, Re), \quad C_d = \frac{D}{p_{dyn} A}, \quad C_m = \frac{M_m}{p_{dyn} A c} \quad (10, 11 \text{ ja } 12)$$

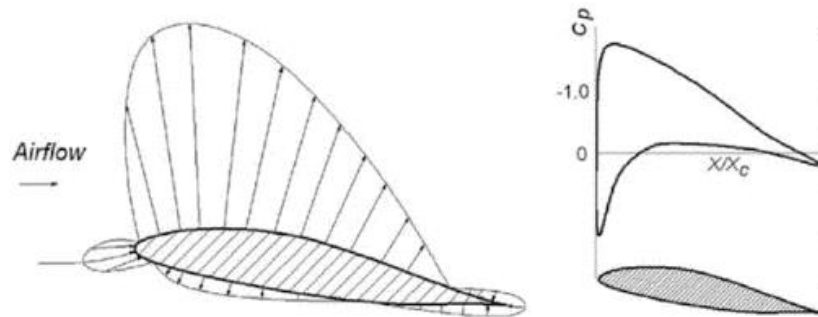
jossa  $L$  on nostovoima [N],  $p_{dyn}$  on dynaaminen paine,  $\alpha$  on kohtauskulma [°],  $Re$  on Reynoldsin luku,  $D$  on vastusvoima [N]  $M_m$  on momentti [Nm] ja  $c$  on siiven keskilinja (chord). Ylhäällä olevat yhtälöt ovat perusteet sovelletun aerodynamiikan taustalla (Anderson J. D. Jr. 1989, 184–185). Yhtälöstä 10 nähdään esimerkiksi, että nostovoima on kohtauskulman funktio, jolloin kohtauskulmaa muuttamalla voidaan vaikuttaa nostovoimaan. Jos kohtauskulma kasvaa liian suureksi tapahtuu siiven yläpinnan virtauksen irtoaminen, joka muuttaa painejakaumaa niin, että vastus kasvaa merkittävästi ja nostovoima vähenee. Tätä kutsutaan sakkauttamiseksi. (Anderson J. D. Jr. 1989, 188.)

Siiven käyttäytymistä voidaan kuvata myös painekertoimella. Jonka avulla voidaan mallintaa painejakauman käyttäytymistä. Painekerroin on määritelty seuraavalla yhtälöllä.

$$C_p = \frac{p - p_{ymp}}{p_{dyn}} \quad (13)$$

jossa  $p_{ymp}$  on ympäristöpaine [Pa]. Jos painekerroin on negatiivinen, on paine siinä pienempi kuin ympäristön paine ja toisinpäin. Paine kertoimesta voi tehdä kuvaajan siiven ylä-

ja alapinnoille, josta nähdään, kuinka suuri paine kerroin on siiven pinnan jokaisessa kohdassa kuva 5 (Anderson J. D. Jr. 1989, 194). Yleensä siiven yläpinnan pienempi paine tuottaa suurimman osan nostovoimasta kuvan 5 tapaan.



Kuva 5. Pressure distribution and pressure coefficient around the airfoil (Kundu 2010, 62).

Vastus voidaan myös jakaa haitalliseen- (parasite drag) ja indusoituun vastukseen (induced drag). Haitallinen vastus koostuu pintakitkasta ja painevastuksesta eikä kumpikaan niistä auta nostovoiman tuottamisessa. Indusoituvastus taas liittyy nostovoiman syntymiseen. (Kundu, A. K. 2010, 73.)

Siipiprofiilia tarkasteltaessa täytyy muistaa, että siivet eivät ole äärettömän pitkiä, jolloin virtausta tapahtuu myös siiven suuntaisesti. Siiven kärjissä siiven ylä- ja alapuolen välinen paine-ero pyrkii tasaantumaan aiheuttaen pyörteen, josta indusoituvastus on vastuussa. Paine-eron tasaantumista ja siten indusoitua vastusta voidaan pienentää erilaisilla siiven kärjen muodoilla ja kasvattamalla siiven muotosuhdetta (sivusuhdetta), joka on siiven pituuden neliön suhde siipipinta-alaan. (Kundu, A. K. 2010, 89 ja Anderson J. D. Jr. 1989, 192–193.) Haitallinen vastus on suurimmillaan suurilla lentonopeuksilla, koska lentonopeuksien kasvaessa pintakitkan osuus lisääntyy. Indusoituvastus on taas suurimmillaan pienillä nopeuksilla, jolloin nostovoiman tuottamiseksi tarvitaan suuria kohtauskulmia (Anderson J. D. Jr. 1989, 276).

#### 4.2 Lentokoneen suorituskykyyn vaikuttavat tekijät

Lentokoneen liikkeisiin vaikuttaa neljä voimaa, jotka ovat havainnollistettu kuvassa 6:

1. Nostovoima  $L$ , joka on lentosuuntaa kohtisuorassa
2. Vastusvoima  $D$ , joka on lentosuunnan kanssa yhdensuuntainen
3. Paino  $G$ , jonka suunta on suoraan maankeskipisteeseen

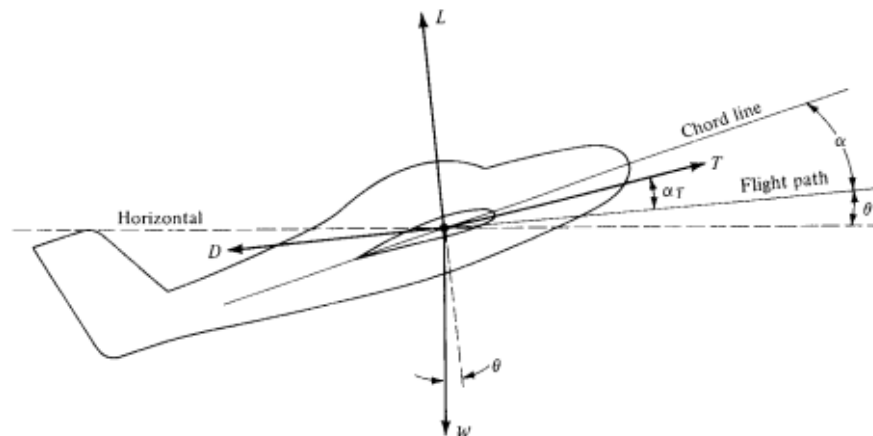
4. Työntövoima  $T$ , joka on kulmassa  $\alpha_t$  lentosuuntaan nähden

Voimista koneen on tuotettava nosto- ja työntövoima pysyäkseen ilmassa. Paino- ja vastusvoima taas vaikuttavat koko koneeseen passiivisesti hidastaen sitä ja vetämällä maata kohti. Voimat voidaan jakaa lentosuunnan kanssa yhdensuuntaisiin ja kohtisuoriin voimiin, jolloin Newtonin II lain mukaan voimien summaksi saadaan seuraavat yhtälöt.

$$\Sigma F_{\parallel} = m \cdot \frac{dw}{dt} = T \cos \alpha_t - D - W \sin \theta \quad (14)$$

$$\Sigma F_{\perp} = m \cdot \frac{w^2}{r} = L + T \sin \alpha_t - W \cos \theta \quad (15)$$

jossa  $F$  on voima [N],  $t$  on aika [s],  $m$  on massa [kg],  $W$  on gravitaatiovoima [N] ja  $\theta$  on lentosuunta verrattuna horisonttiin [ $^{\circ}$ ]. Jos oletetaan lento vaakasuoraksi ja  $\alpha_t$  pieneksi on paino- ja nostovoima silloin yhtä suuria ja toisilleen vastakkaisia ( $L=W$ ). Tällöin myös työntö- ja vastusvoima ovat yhtä suuria ja toisilleen vastakkaisia ( $T=D$ ). Jos nämä yhtälöt yhdistetään yhtälöihin 10 ja 11 voidaan silloin lentoa mallintaa vielä tarkemmin eri tilanteissa. (Anderson J. D. Jr. 1989, 261–264.) Lentokoneen lentoa havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Airplane force diagram during flight (J. D. Anderson Jr. 1989, 262).

Aikaisemmin mainitut voimat aiheuttavat lentokoneen liikkeit. Lentokone voi liikkua kolmiulotteisesti eteen taakse (x-akseli), oikealle vasemmalle (y-akseli) ja ylös alas (z-akseli). Edellä mainitut ovat lineaarisia nopeuksia. Lentokone voi myös kääntyä jokaisen akselin ympäri pyörittämällä (roll) x-akselin ympäri, (pituus)kallistamalla (pitch) y-akselin ympäri ja kääntymällä (yaw) z-akselin ympäri. Pyörimisliikkeessä puhutaan kulmanopeudesta. Liike voi olla myös kiihtyvää tai kulmakiihtyvää jokaiseen suuntaa. Siipiin ja pyrstöön asennetut ohjaussiivekkeet mahdollistavat edellä mainitut liikkeit. (Kundu, A. K. 2010, 57.)

## 5 Kehitys

Lentokoneet ovat kehittyneet pitkälle, vaikka perustoimintaperiaate onkin pysynyt samana. Moderni lentokoneenmoottori on puolet kevyempi ja polttaa puolet vähemmän polttoainetta kuin yhtä suuren työntövoiman omaava 1950-luvun moottori. Saman aikaisesti peruskorjauksen välinen aika on kasvanut parista sadasta tunnista kymmeniintuhansiin tunteihin. (Rolls-Royce 2015, 30.)

Kehitys on tapahtunut pääosin pienin askelein, parantaen koneen kilpailukykyä, joko parantamalla sen hyötysuhdetta tai pienentämällä sen ylläpito- tai valmistuskustannuksia. Pienet parannukset muuttuvat kuitenkin ajan myötä suuriksi eroiksi koneen suorituskyvyssä. Perinteisen lentokoneen designissa tuskin tulee suuria läpimurtoja, mutta kehitys vaikuttaa lupaa-  
vimmalta painon ja vastusvoimien pienentämisessä, sekä moottorin päästöjen ja melun vähentämisessä. Toisaalta kehitystä ajavat tekijät saattavat kasvaa niin suuriksi, että on pakko tehdä suuria muutoksia. Tällöin tulevaisuuden lentokonetta voi olla vaikea tunnistaa nykyisistä malleista. Airbus antaa tähän viitteitä 2020 marraskuussa julkaisemassaan uutisessa, jossa pohditaan lentämisen tulevaisuutta lentävänsiiven muotoisessa matkustaja koneessa (blended wing body aircraft). Tämä on osa Airbus UpNext hanketta, jossa kehityskohteina on muitakin potentiaalisia tulevaisuuden teknologioita (Airbus 2020).

Tässä osassa ensin keskitytään kehitystä ajavien tekijöiden selvittämiseen. Osassa myös tutkitaan, miten perinteisen lentokoneen design on kehittynyt viime vuosina. Lopuksi selvitetään mitä uusia teknologioita on kehitteillä ja pohditaan mitkä niistä voidaan ottaa käyttöön lyhyellä ja pitkällä aikavälillä.

### 5.1 Kehitystä ajavat tekijät

Viime vuosina kehitys kohteina ovat olleet erityisesti painon, koneen kokeman ilmanvastuksen, polttoaineen kulutuksen ja moottorin päästöjen, sekä melun vähentäminen, mutta myös matkustus mukavuuden lisääminen ja huoltotarpeen vähentäminen. Kehitystä tapahtuu myös turvallisuudessa, automatisoinnissa, suunnittelusovelluksissa ja valmistuksessa. Näiden



vaikutus kehitykseen ei ole välttämättä suoraan nähtävissä tai mitattavissa, mutta ne mahdollistavat edellä mainittujen asioiden kuten polttoaineen kulutuksen vähentämisen.

Kehityksen taustalla on kasvava lentoteollisuus. Kaupalliset lentokonemarkkinat arvioitiin vuonna 2020 olevan 85,45 miljardin suuruiset ja sen ennustetaan kasvavan 173,1 miljardin suuruisiksi vuoteen 2026 mennessä. Se on lisännyt kilpailua Airbusin ja Boeing välillä, mutta myös antanut mahdollisuuden uusille pääosin kansallisille valmistajille kuten Kiinan COMACille. (Mordor Intelligence LPP 2021.) Hieman maltillisempaa kasvua on myös nähtävissä yksityisellä lentokonepuolella, jossa markkina-arvon ennustetaan kasvavan 30 miljardista vuonna 2022 42 miljardiin vuoteen 2030 mennessä (Markets and Markets 2022).

Polttoaineen hintojen nousu on yksi päätekijöistä kehityksen taustalla. Polttoaine on lentoyhtiölle merkittävä kulu, joka tekee polttoaineenkulutuksen vähentämisestä tehokkaan tavan karsia kuluja. Polttoaineen hinnan kasvaessa myös sen merkitys käyttökustannuksissa kasvaa. Kerosiinin hinta on noussut siinä missä muidenkin polttoaineiden niin lyhyellä kuin pitkällä aikavälillä, joka on nähtävissä kuvasta 7. Kuvasta voidaan nähdä myös hinnan suuri volatiliiteetti etenkin viimevuosina. Tällöin myös polttoaineen hinnan osuus käyttökustannuksista vaihtelee rajusti.



Kuva 7. U.S. Kerosiinin spot hinta \$/l. Data (EIA 2022).

Kolmas merkittävä tekijä kehityksen taustalla on huoli ympäristöstä. Se työntää yrityksiä kohti vihreämpää ilmailua. Ilmailuala tuottaa 2–3 % maailman CO<sub>2</sub> päästöistä. Lisäksi lentokoneen lentäessä korkealla moottori voi jättää jälkeensä tiivistymisjuovan.

Tiivistymisjuova voi levitä laajalle alueelle muodostaen untuvapilviä, joilla on ilmakehää lämmittävä vaikutus (Gomez, A. & Smith, H. 2019).

Huoli ympäristöstä kasvaa entisestään, kun vertaa ilmailun kasvamista siitä tulevien päästöjen vähentämiseen. Vaikka viimeisen 15 vuoden aikana kehitykset teknologiassa ovatkin mahdollistaneet jopa 34 % vähennyksen CO<sub>2</sub> päästöissä (kg polttoainetta per matkustaja per matka) olettaa silti Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö (ICAO) ilmailusta tulevien päästöjen kasvavan vuoteen 2050 mennessä 3–7 kertaisiksi vuoteen 2005 verrattuna (Gomez, A. & Smith, H. 2019). Tämän takia joudutaan tekemään radikaalisempia toimia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Kansainvälinen ilmakuljetusliitto (IATA) on asettanut kunnianhimoisen tavoitteen vähentää ilmailusta tulevia CO<sub>2</sub> päästöjä 50 % ja Euroopan komission, jopa 60 % vuoteen 2050 mennessä (Karakoç, T. H., Colpan, C. O., Şöhret, Y., SpringerLink. 2018, 44). Näiden tavoitteiden mukana tulee verojen ja erilaisten säädösten kiristyminen, joka viimeistään pakottaa lentoyhtiöitä uusimaan lentokonekantaansa ja valmistajia panostamaan rajummin ympäristöystävälliseen teknologiaan. On siis yhdentekevää ovatko ilmailualan yritykset tekemässä muutoksia kustannusten vähentämisen vai ympäristön tähden, koska ne ovat hyvin pitkälle sama-asia. On myös selvää, että nykyinen kehitys ei ole tarpeeksi nopeaa päästötavoitteiden saavuttamiseksi, jonka takia radikaalisimpiin toimiin on ryhdyttävä. Aikaisemmin ilmailualan yritykset saattoivat tehdä parannuksia lentokoneisiin vain säästöjen ja kilpailukyvyn takia, mutta tavoitteista päätellen nykyään taustalla näyttää olevan aivan aitoa halua kiinnittää huomiota myös ympäristöön.

## 5.2 Kehittyneiden materiaalien vaikutus

Aina pyritään tuottamaan kestävämpiä ja kevyempiä materiaaleja. Se kuitenkin johtaa usein kalliimpiin osiin. Toisaalta uudet materiaalit mahdollistavat kestävämpien ja kevyempien osien suunnittelun, jolloin polttoaineen kulutus ja huoltotarve vähenee. Polttoaine, seisokkiaika ja varaosat ovat merkittäviä kustannuksia lentokoneen operoinnissa, joten usein kalliimpi ja huoltovapaampi lentokoneen runko tai moottori maksaa itsensä takaisin ajan myötä (Siluyanova, M. V. & Gyazova, M. M. 2020).

Perinteisesti lentokoneen runko on tehty erilaisista alumiiniseoksista. Alumiinilla on monia lentokoneeseen sopivia ominaisuuksia, joka on tehnyt siitä hyvän materiaalin. 2000-luvulla komposiitit ja muut edistyksellisemmät materiaalit ovat kuitenkin tehneet tiensä

sotilaalliselta puolelta matkustaja puolelle. Yksi näistä materiaaleista on komposiitti, joiden käyttö on noussut vuosikymmenessä 10 % yli 50 % uuden lentokoneen painosta (Sforza 2014, 9).

Komposiitti on materiaali, joka koostuu kahdesta tai useammasta materiaalista, jotka eivät ole sulautuneet yhteen. Komposiittien käytöstä hyvä esimerkki on Boeing 787 Dreamliner. Noin puolet Boeing 787 painosta koostuu komposiiteista, joista suurin osa hiilikuituvahvisteisista muovista ja lasikuidusta. Komposiittien kestävyys ja keveys on hyvin tiedetty, mutta lähes yhtä tärkeää on niiden korroosion, sekä rasituksen kesto. (Boeing 2022.) 787 runko on lähes kokonaan valmistettu komposiitista, joka lisää matkustaja mukavuutta monella tapaa. Normaalisissa matkalentokorkeudessa ilmanpaine on noin 0,3–0,2 atm., mutta runko paineistetaan noin 0,8–0,7 atm. Lentokone pitää paineista, koska matalasta paineesta voi saada ns. vuoristotaudin tai sen oireita. (Sforza 2014, 51–52.) Jatkuvista paineistus kerroista johtuen metallit alkavat väsymään, jolloin niitä täytyy huoltaa. Komposiitit ovat lähes immuuneita väsymykselle, koska rasitus niihin tapahtuu käytännössä kokonaan elastisella alueella eli ne palautuvat alkuperäiseen muotoonsa (Giurgiutiu, V. & Harris, G. 2016, 12–14). Tämän takia komposiitista valmistetun osan huoltokustannukset ovat usein pienemmät kuin metallista valmistetun. Komposiitti runkoisen lentokoneen voi siis paineistaa korkeampaan paineeseen ja siihen saa jopa isommat ikkunat kuin alumiini runkoiseen koneeseen. Myös 787 siivet on pääosin valmistettu erilaisista komposiiteista, joka on tehnyt niistäkin kevyempiä, kestävämpiä, pidempiä ja aerodynaamisempia (Boeing 2022).

Moottorin materiaalit valitaan pääasiassa niiden kyvyn mukaan kestää siellä vallitsevia olosuhteita. Tällöin materiaalien kestävyys korkeissa lämpötiloissa ja korroosionkestävyys ovat etusijalla. Myös 787 moottorit General Electricin (GE) GENx ja Rolls Roycen Trent 1000 ovat edistyksellisiä materiaalien näkökulmasta. Esimerkiksi GENx moottorista on pystytty tekemään kevyempi käyttämällä puhaltimen siivissä ja kotelossa komposiittia. Kevyiden komposiittien käyttö puhallin siivissä mahdollistaa niiden suuremman koon ja pyörimisnopeuden, joka taas lisää moottorin ohitussuhdetta ja sitä kautta parantaa hyötysuhdetta, sekä vähentää polttoaineen kulutusta (Donner R. 2010).

Titaaniseokset otettiin ensimmäistä kertaa käyttöön SR-71 Blackbirdin kehityksessä, jonka jälkeen niiden käyttö on lisääntynyt ilmailualalla (Davis, B. J. 2017). Titaaniseokset voivat olla vahvempia ja kevyempiä kuin terässeokset, joka näkyy hyvänä vahvuus-painosuhteena (Youssef K. M., Zaddach A. J., Niu C., Douglas L., Koch. I. & C. 2015). Titaaniseoksilla on

myös hyvä lämmönkestävyys, joka tekee siitä optimaalisen materiaalin lentokoneen moottorissa (Rolls-Royce. 2015, 30). Kompressorin roottorin siipien lisäksi titaaneoksia on käytetty esimerkiksi GEnx moottorin komposiittista tehtyjen puhallinsiipien suojana. Aikaisemmin koko puhallin on saatettu valmistaa titaaneoksesta, mutta nykyään komposiitti on korvaamassa titaania puhallinmateriaalina. Pelkkää komposiittia ei voi kuitenkaan käyttää puhallin materiaalina, koska iskun saadessaan se ei pysty muovautumaan kuten metallit ja voi hajota. (Donner 2010.)

Harvinaisen suuri osa 787 painosta on titaania noin 15 %. Titaania on moottorin lisäksi käytetty rungon komposiittilevyjen kiinnikkeissä (Giurgiutiu, V. & Harris, G. 2016, 12–14). Syy siihen löytyy todennäköisesti titaanin sijainnista galvaanisesta taulukosta. Koska grafiitti löytyy galvaanisen taulukon jalosta päädyistä, toimii se silloin katodina ja syövyttää kaikkia sen kanssa kosketuksissa olevia sitä vähemmän jaloja metalleja. Suuri osa rungosta ja siivistä sisältää grafiittia, joka vain lisää syöpyimisprosessia. Titaani sattuu olemaan lähempänä grafiittia kuin esimerkiksi alumiini. Alumiini syöpyisi siis selvästi nopeammin kuin titaani, vaikka kummatkaan ei yksinään syöpyisi mihinkään. (Corrosion-Doctors 2022.) Titaani siis todennäköisesti valittiin sen paremman huollettavuuden takia, vaikka se onkin selvästi kalliimpi materiaali kuin esimerkiksi alumiini.

Keramiikan hyvä lämmönkestävyys ja pieni paino ovat mahdollistaneet myös sen käytön pinnoitteina moottorien laakereissa, polttokammiossa ja turbiineissa. Moottorin kuumimmat osat on valmistettu yleensä nikkeli- ja koboltti seoksista. Silti niiden jäädyttäminen ja pinnoittaminen keramiikalla on pakollista suurten lämpötilojen takia. Parannukset materiaalien lämmönkestävyyksiin ja jäähdytykseen on mahdollistanut turbiinin sisääntulolämpötilan nousun alle 1000 asteesta 1600 asteeseen (Rolls-Royce. 2015, 27, 30, 212), joka mahdollistaa esimerkiksi korkeampien painesuhteiden käytön.

Komposiittien nopeaa suosion kasvua selittää komposiittiosien matala hinta, sekä valmistustekniikan kehitys. Koneen suunnittelussa tarkkojen rasitus- ja virtausanalyysien tekeminen on tuonut merkittäviä parannuksia aerodynamiikassa, mutta myös rakenteiden kestävyysdessä. Tästä hyvä esimerkki on 787 siivet, jotka taipuivat siipien rasituskokeessa ylöspäin lähes 8 metriä (Boeing 2010). Komposiittista valmistetuissa koneissa on huomattavasti vähemmän osia kuin metallista valmistetuissa. Esimerkiksi 787 rungon valmistuksessa on käytetty yksiosainen tynnyrirakennusmenetelmä (one-piece barrel construction method) mahdollistaa suurien rungon osien valmistuksen (Boeing 2022). Myös titaaniosien

valmistuksessa Boeing joutui käyttämään uusia valmistustekniikoita. Titaani on kallista, joten materiaalihävikkiä valmistusvaiheessa pyritään välttämään kaikin keinoin. Boeing käyttää titaaniosien valmistuksessa Norsk Titaniumin FAA (Liittovaltion ilmailuhallito) sertifikaatin omaavaa 3D tulostus tapaa, jonka avulla Boeing pyrkii säästämään miljoonia yhden koneen hinnasta (Anon 2017).

### 5.3 Moottorin hyötysuhteen kasvattaminen

Moottorivalinta voi olla yksi tapa vähentää polttoaineen kulutusta. Esimerkiksi potkuriturbiinimoottoreilla on korkeampi propulsio hyötysuhde ja pienempi polttoaineen kulutus kuin parhaimmillakin ohivirtausmoottoreilla, mikä on lisännyt niiden houkuttelevuutta pienemmästä lentonopeudesta huolimatta (Sforza 2014, 8 ja 11). Pienempi lentonopeus ei ole iso ongelma lyhyillä matkoilla, josta saattaisi löytyä markkinarako potkuriturbiinikoneille. Kuitenkin lyhyiden lentomatkojen vähentyminen viime vuosina etenkin Euroopassa voi osoittautua haasteeksi. Esimerkiksi Ranskassa kiellettiin 2021 (astuu voimaan 2022) lyhyenmatkan lennot kokonaan, jos reitille on alle 2,5 tunnin juna- tai bussiyhteys (BBC 2021). Vaikka viime aikoina potkuriturbiini lentokoneiden suosio onkin kasvanut ja jopa 5 valmistajaa harkitsee uusien kehittämistä, on silti niiden osuus kaikista lentokoneista ollut laskussa viimeiset 20 vuotta (Sforza 2014, 8 ja 11).

Tällä hetkellä matkustajakoneiden ohivirtausmoottoreilla on muutama selvä trendi, joihin pyritään moottorin valmistajasta riippumatta. Ensimmäinen niistä on ohitussuhteen kasvattaminen (Rolls-Royce. 2015, 109). Ohitussuhteen kasvattaminen on haluttua, koska se kasvattaa moottorin propulsiivista hyötysuhdetta ja pienentää TSFC:tä (Dankanich, A. & Peters, D. 2017). Siihen on valmistajilla erilaisia tapoja. Esimerkiksi suhteellisen uusi Airbus A320neo käyttää Pratt & Whitney PW1000G moottori perheen moottoreita. Sen suuri 12:1 ohitussuhde on saavutettu planeetaarivaihteistolla, joka erottaa puhaltimen matalapaine kompressorista. Vaihteiston avulla puhallin voi pyöriä hitaammin kuin muut samalla akselilla olevat osat ja mahdollistaa moottorin jokaisen osan suunnittelun siten, että ne toimivan parhaalla mahdollisella hyötysuhteella. (Chandler, C. 2012.) Rolls-Royce taas pyrkii Trent 1000 moottoreilla ohitussuhteen kasvattamiseen kolmella akselilla (EASA 2019). Siten päästään lähes samaan lopputulokseen kuin vaihteistolla. Ohitussuhteen kasvattamisessa rajoittavatekijä on puhaltimen kestävyys. Keskipakoisvoiman ja puhaltimen suuren koon takia

se joutuu kestämaan suuria voimia. Sen takia kevyemmällä ja kestävämmillä puhallin materiaaleilla voidaan kasvattaa puhaltimen kokoa ja ohitussuhdetta.

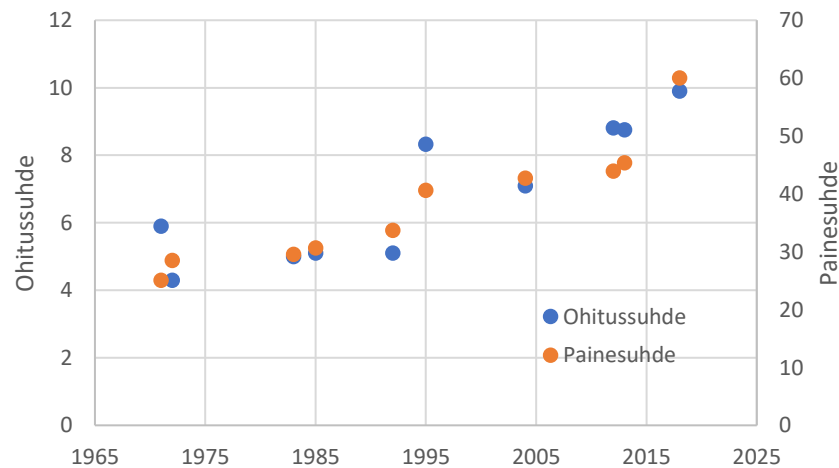
Toinen trendi on kompressorin painesuhteiden kasvaminen (Rolls-Royce 2015, 109). Painesuhteet ovat kasvaneet yli 10 kertaisiksi 1940-luvun 5:1 suhteista (Rolls-Royce 2015, 27). Painesuhteen kasvattaminen parantaa termistä hyötysuhdetta yhtälön 1 mukaan, jonka takia myös sen kasvattaminen on haluttua. Painesuhteen kasvattamisessa viimeisten kompressorivaiheiden kestävyys voi olla rajoittavan tekijänä korkeiden lämpötilojen takia.

Tutkimalla General Electricin moottori mallistoa vuosien varrelta voidaan kasata seuraava taulukko.

Taulukko 1. General Electricin moottorimallien tietoja. (Vuosiluvut saattavat vaihdella muiden eri moottorimallien ja versioiden takia) (EASA 2021).

Malli	Ensilento	Ohitussuhde	Painesuhde	Työntövoima [kN]
CF6-6	1971	5,90	25,1	178
CF6-50	1972	4,30	28,5	228
CF6-80A	1983	5,00	29,6	213
CF6-80C2	1985	5,10	30,6	257
CF6-80E1	1992	5,10	33,7	291
GE90-94B	1995	8,33	40,6	432
GE90-115B	2004	7,09	42,7	514
Genx-1B70	2012	8,81	43,9	322
Genx-1B74/75	2013	8,76	45,4	333
GE9X-105B1A	2018	9,90	60,0	490

Taulukosta 1 nähdään eri moottorimallien ohitus- ja painesuhde, sekä työntövoima. Taulukon tiedot voidaan laittaa kuvaan, jossa on kuvattu ohitus- ja painesuhteen muuttuminen vuosien varrella.



Kuva 8. Ohitus- ja painesuhteen kasvu vuosien aikana.

Kuvasta 8 näkyy selvästi, kuinka moottorin paine- ja ohitussuhde kasvavat vuosien varrella. ICAO:n lentokonemoottorien päästötietopankin datasta voidaan myös nähdä, että kehitys on ollut samanlaista myös muilla moottorivalmistajilla.

Kolmas trendi on kevyempien osien suunnittelu (Rolls-Royce 2015, 109). Osien painon merkitys on kasvanut samalla, kun moottorien koko on kasvanut suurempien ohitussuhteiden takia. Painoa voidaan karsia esimerkiksi kevyemmillä materiaaleilla, mutta myös suunnittelu valinnoilla. Edellä mainittujen Pratt & Whitnayn ja Rolls-Roycen moottoreissa lisää painoa tuo vaihteisto, sekä ylimääräiset akselit. Suunnittelijoiden täytyy siis punnita kannattaako kolmannen akselin korvata vaihteistolla. Tästä nähdään, että suunnittelijoiden on tehtävä kompromisseja eri ratkaisuiden välillä ja samaan lopputulokseen eli tehokkaaseen moottoriin voi päästä eri tavoilla.

#### 5.4 Aerodynaaminen muotoilu

Käytetään taas 787 Dreamlineria hyvänä esimerkkinä lentokoneen aerodynaamisesta muotoilusta. 787 siiven geometria ei muistuta tavallista symmetristä siipiprofiilia. 787 siipiprofiilia kutsutaan ylikriittiseksi siipiprofiiliksi, jossa siiven yläosa on tasaisempi ja sen taka-reunassa siipi kapenee selvemmin. Ylikriittinen siipiprofiili ei ole uusi keksintö, mutta 787 uudet materiaalit, sekä muut aerodynaamiset parannukset ovat tehneet siitä kyseisen teknologian viimeisimmän iteraation. Ylikriittisellä siipiprofiililla on monia etuja tavalliseen verrattuna. Isoin etu tulee siiven yläpinnan paineaaltojen ja siitä aiheutuvan virtauksen irtoamisen välttämisestä. Koska virtaus kiihtyy siiven yläpinnalla ylittää se äänennopeuden ennen itse lentokonetta. Tämän takia siiven yläpinnasta on tehty tasaisempi, jolloin virtaus ei kiihdy niin paljon. Yläpinnan muutoksista aiheutuvaa nostovoiman menetystä voidaan korvata suuremmalla kohtauskulmalla. Tällöin myös suurempiosa nostovoimasta tuotetaan siiven alapinnalla. Muotoilu on mahdollistanut vähentämään 787 polttoaineen kulutusta jopa 20 %. Siipiprofiilin laatikkomaisempi muoto mahdollistaa myös suurempien polttoainemäärien kuljettamisen siiven sisällä. (NASA 2015.)

Boeing 787 siivet ovat myös pidemmät kuin esimerkiksi sen edeltäjällä Boeing 767:lla. Uudet materiaalit ovat mahdollistaneet siiven sivusuhteen kasvattamisen 8 jopa 11 (Dreamliner

Analysis 2019). Sivusuhteen kasvattaminen vähentää indusoituavastusta, jolloin myös kokonaisvastus on pienempi. Toinen merkittävä muutos on siiven kärkien taaksepäin viettävä muotoilu (raked). Alun perin siiven kärjet (winglets) olivat suorat. Suora siipi kuitenkin estää siiven ylä- ja alapuolien paine-eron tasoittumista huonosti. Paine-eron tasoittumisesta aiheutuva ilmavirta muodostuu siivenkärkipyörteiksi (wingtip vortex). Nämä pyörteet lisäävät indusoituavastusta ja vähentävät siiven tuottamaa nostovoimaa, joka johtaa suurempaan polttoaineen kulutukseen. Tämä ilmiö korostuu suurilla kohtauskulmilla nousujen ja laskujen yhteydessä. Ilmiötä voi kuitenkin pienentää lisäämällä siiven kärkeen wingletit. Vaikka niiden aerodynaamiset hyödyt tekevät niistä kannattavia tuovat ne silti lisää painoa ja lisäävät ilmanvastusta kasvaneen etuosan pinta-alan takia. (Arnot, M. 2019.) 787 siipien kärjissä ei kuitenkaan ole varsinaisia winglettejä. 787 on suunniteltu pitkille lentomatkoille, jolloin nousu ja lasku muodostavat suhteessa pienemmän osan lennon pituudesta. Tämän takia 787 siipien suunnittelussa keskityttiin matkanopeudella lentämisen optimointiin, ja wingletit jäivät pois. Matkanopeudella lentämiseen 787 taaksepäin viettävät kärjet sopivat hyvin, koska kärjen muotoilu ohjaa siitä muodostuvat pyörteet kauemmaksi siivistä ja jakaa nostovoiman tasaisemmin koko siiven pituudelle. 787 siiven kärjet ja tavalliset wingletit molemmat vähentävät siis vastusta ja pidentävät koneen kantamaa, mutta ovat vain optimoitu eri pituisille matkoille. (Aircraft Engineer 2016.)

Boeing mainostaa sivuillaan ”Low-drag empennage” eli pienen vastuksen perävakaajaa, jolla todennäköisesti tarkoitetaan lentokoneen pyrstön siipien etuosaan tehtyä HFLC (hybrid laminar flow control) systeemiä. Pyrstön siivissä olevat pienet luukut myös viittaisivat tähän. Lentokoneiden suurten lentonopeuksien takia virtaus siipien pinnalla on lähes aina turbulenttista, joka lisää pintakitkaa. HFLC systeemillä pyritään pitämään virtaus laminaarisena pienemmän pintakitkan saavuttamiseksi. Virtaus saadaan pysymään laminaarisena mikroskooppisen pienillä rei’illä siiven pinnalla, jotka ”imevät” virtauksen siivenpintaan kiinni. Paine-ero siiven ulko- ja sisäpinnan välille voidaan saada kompressorilla tai edellä mainituilla luukuilla, josta virtaus joko menee sisälle tai ulos riippuen halutusta virtauksen suunnasta. HFLC systeemin huonona puolena on lisääntynyt paino, rakenteen monimutkaisuus, sekä reikien mahdollinen tukkeutuminen. (Krishnan, K. S. G., Bertram O., Seibel O. 2017.)



Kehitykset aerodynamiikassa ja moottoreissa on mahdollistanut 787 Dreamlinerin tapaisten lentokoneiden valmistamisen. 787-8 versio korvasi 767-300 version, joka tekee niiden vertailusta mielenkiintoisen. Lentokoneita on vertailtu taulukossa 2.

Taulukko 2. 787-8 ja 767-300 vertailu (Dreamliner Analysis 2019)

	767-300	787-8	muutos
istuinpaikkojen määrä	218-350	210-250	riippuen luokkien konfiguraatiosta
rungon leveys [m]	5,03	5,79	15 % pidempi
lasti [m <sup>3</sup> ]	106,7	136,5	28 % enemmän
pituus [m]	54,9	56,7	3 % pidempi
tyhjä paino [kg]	80200	109700	37 % painavampi
siipiväli [m]	47,5	60,0	26 % pidempi
siipipinta-ala [m <sup>2</sup> ]	283,3	325,2	15 % suurempi
siiven keskileveys (chord)	5,97	5,43	10 % pienempi
siiven sivusuhte	8	11	38 % suurempi
matka nopeus [M]	0,8	0,85	6 % nopeammin
polttoaine [l]	91000	127000	40 % enemmän
kantama (maksimi painolla)	11000	15100	37 % pidemmälle
arvio km/l (maksimi paino)	0,121	0,119	2 % pienempi

Taulukosta nähdään suuret parannuksen läpi koneen. Uusista materiaaleista huolimatta 787 on painava lentokone. Lisääntynyt paino tulee lentokoneen suuremmasta koosta, joka myös mahdollistaa suuremman lastin ja tilavamman matkustamon. Vaikuttaa siltä, että komposiitit eivät varsinaisesti ole tehnyt 787-8 kevyempää vaan selvästi kestävämmän. Tähän viittaa kasvaneen painon lisäksi suurempi koko esimerkiksi siivissä. Ensisilmäykseltä näyttää, että 787 polttoaineen kulutus on samaa luokkaa vanhemman 767 kanssa. Asia kuitenkin muuttuu, kun ottaa huomioon suuremman lentonopeuden, isomman lastin ja pidemmän kantaman. 787 tuottaa myös vähemmän päästöjä ja on hiljaisempi kuin vanhemmat lentokoneet, johon paneudutaan seuraavaksi.

## 5.5 Päästöt ja polttoaineet

Selkein ja tehokkain tapa vähentää päästöjä on polttoaineen kulutuksen vähentäminen. Nykyisillä polttoaineilla päästöjä kuitenkin syntyy joka tapauksessa, joka lisää palamisen optimoinnin tärkeyttä. Erityisesti savukaasujen CO ja NO<sub>x</sub> päästöjen, sekä savun ja hiilivetyjen

vähentämien on keskeisessä osassa uusien moottorien suunnittelua (Rolls-Royce 2015, 126) Päästöjä tutkiessa voimme tarkastella 787 Dreamlinerin GENx moottoria ja verrata miten se eroaa perinteisistä moottoreista päästöjen näkökulmasta.

Iso osa moottorin kehityksestä keskittyy päästöjen vähentämiseen. Päästöjä pyritään vähentämään muutoksilla polttokammioon, sekä säätämällä ilma-polttoaine suhdetta palamisen eri kohdissa. Kerosiin stökiometrinen ilma-polttoaine suhde (AFR, air/fuel ratio) on noin 15:1. Silloin palaminen on kaikista kuuminta, ja koska NO<sub>x</sub> päästöt lisääntyvät lämpötilan kasvaessa on myös silloin niiden muodostuminen suurinta. Polttoaine ei sekoitu tasaisesti polttokammiossa, jolloin sinne jää suuremman ja pienemmän konsentraation kohtia. Usein päästöjä pyritään optimoimaan polttamalla polttoainetta aluksi pienillä AFR suhteilla (rich burn), jonka jälkeen ilmaa lisätään nopeasti palamisprosessiin, jolloin AFR kasvaa suureksi (lean burn). Siten pyritään vähentämään NO<sub>x</sub> päästöjä ilman, että palamislämpötila laskee liian matalaksi, ja CO pitoisuudet alkaisivat lisääntyä. (Rolls-Royce 2015, 126.) Palaminen kuitenkin menee kuumen stökiometrisen palamisalueen läpi, jolloin NO<sub>x</sub> päästöjä syntyy. GENx moottorin TAPS (twin-annual preswirlers) järjestelmässä polttoaineen sekoittuminen pyritään saamaan niin hyväksi, että edellä mainittua siirtymistä ei tapahdu tai se on mahdollisimman pieni. Polttoaine rikkaiden kohtien poisto vähentää myös savun syntyä. Palaminen pyritään siis suorittamaan kokonaan isolla AFR:lla. Siten NO<sub>x</sub> päästöjä on pystytty laskemaan jopa 50 %. (Anon 2005.) TAPS järjestelmä on merkittävä kehitys askel, koska sillä on pystytty saavuttamaan laiha palaminen lähes koko polttokammiossa ja välttämään suurilla ilmapolttoaine suhteilla tuleva palamisen vakauden menetys. GE päästö väitteet voi myös tutkia ICAO:n lentokonemoottorien päästötietopankista. Verrataan uutta GENx-1B76 moottoria sen korvaamaan moottoriin eli CF6-80C2. Arvot on otettu yhdestä laskun ja nousu kierrosta (LTO). Sarakkeissa on ensin keskimääräinen tuotettu saasteen määrä LTO kierron aikana suhteutettuna työntövoimaan ja sen jälkeen tuotetun saasteen määrää prosenttiosuutena säädöksissä sallitusta määrästä (oltava < 100 %).

Taulukko 3. GENx-1B76 ja CF6-80C2 päästöjen vertailu. (EASA 2021)

	Poltin teknologia	Hiilivedyt (g/kN)	Hiilivedyt (% sallitusta)	CO (g/kN)	CO (% sallitusta)	NO <sub>x</sub> (g/kN)	NO <sub>x</sub> (% CAEP/8 standardista)	Savu (% sallitusta)
CF6-80C2	-	12,0	79,4	54,9	53,0	44,4	94,3	47,8
CF6-80C2	1862M39	2,0	13,0	24,5	23,6	45,1	95,2	43,4
GENx-1B76	TAPS	0,4	3,2	14,3	14,8	49,4	67,3	4,4

Vähennys	-	29x	24x	2,9x	2,6x	-10 %	40 %	9,9x
Vähennys (1862M39)	-	3,9x	3,1x	72 %	59 %	-9 %	41 %	8,9x

Taulukosta 3 nähdään GENx moottorin parannukset päästöissä verrattuna kahdella eri poltin teknologialla varustettuun CF6 moottoriin. Taulukon tulokset vaikuttavat muuten luotettavilta, mutta GENx NO<sub>x</sub> päästöjen työntövoimaan suhteutettu arvo vaikuttaa oudolta ottaen huomioon, että se täyttää CAEP/8 standardin silti noin 40 % paremmin kuin CF6. Eroavaisuus voi johtua siitä, miten CAEP/8 standardi on määritelty. Taulukon tiedot näyttävät olevan lähellä GE väitettä 40–50 % NO<sub>x</sub> päästöjen, sekä muiden päästöjen vähentymisestä, jos CAEP/8 sarakkeen tietoja katsoo (Donner, R. 2010).

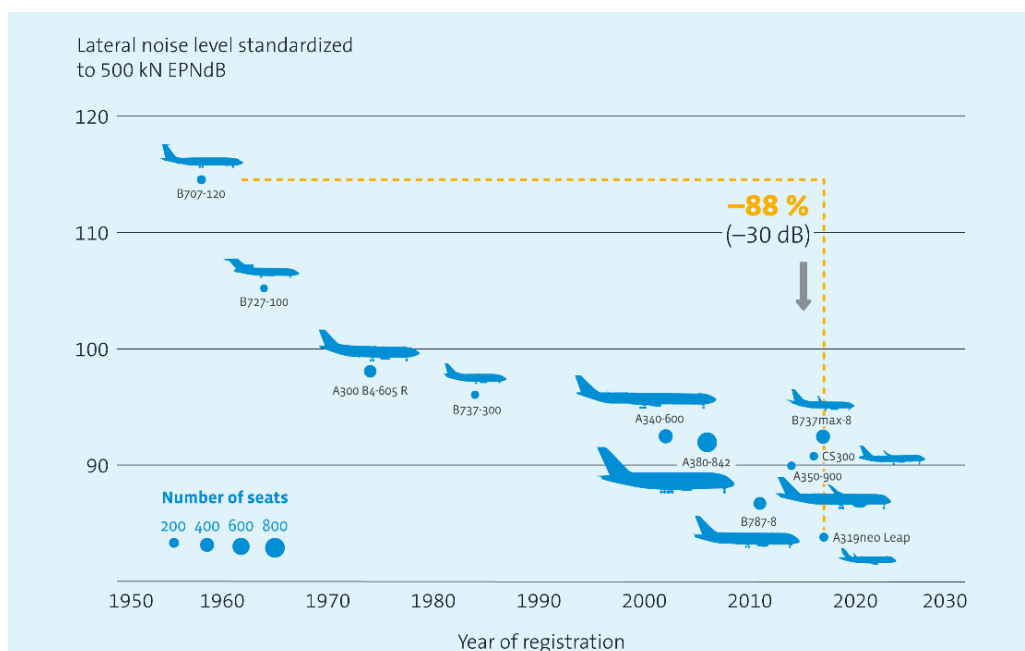
Palamisesta tulevia päästöjä voidaan vähentää polttamalla biopolttoaineita. Biopolttoaineet lasketaan hiilineutraaleiksi. Biopolttoaine siis vapauttaa ainoastaan sen määrän CO<sub>2</sub> kuin kasvit sitoivat, josta polttoaine on tehty. Biopohjaisilla lentopolttoaineilla voidaan vähentää jopa 89 % ilmailusta tulevasta kasvuhuonepäästöistä. Niillä on myös monia hyviä lentopolttoaineelle sopivia ominaisuuksia. (Karakoç, T. H. et al. 2018, 26.) Biopolttoaineilla ongelmana on niiden pienempi energiatiheys, verrattuna fossiilisiin vastineisiin. Niitä voitaisiin kuitenkin lisätä fossiilisen polttoaineen sekaan jollakin sekoitussuhteella. TF33 moottorilla tehdyillä testeillä on pystytty polttamaan 50–50 sekoitussuhteen polttoainetta, joka suoriutui yhtä hyvin kuin 100 % fossiilinen lentopetroli ja tuottaen jopa 50 % vähemmän rikkipäästöjä. (Sforza 2014, 12–13.) Kaikki polttoaineet eivät kuitenkaan sovi sakotettaviksi keskenään. Biopolttoaineista esterien ja biodieselin on havaittu olevan yhteensopivia kerosiin kanssa, joka tekee niistä houkuttelevimpia vaihtoehtoja (Karakoç, T. H. et al. 2018, 26). Biopolttoaineiden käyttö voi kuitenkin olla ongelmallista, jos viljelypinta-alaa tai metsää aletaan muuntamaan polttoainekasviviljelmiksi. Myös biopolttoaineen valmistaminen täytyy olla tehokasta, koska jos sen valmistamiseen menee paljon energiaa, mahdollisesti fossiilisia polttoaineita, häviää vihreys polttoaineesta samoin tein.

Myös vaihtoehtoisia polttoaineita kuten vetyä on mietitty lentokoneen voimanlähteenä. Vetyä voidaan polttaa sellaisenaan tai käyttää polttokennossa, jolloin moottorista tulisi sähköinen. Vaikka vety onkin maailman yleisin aine, on sitä maapallolla ainoasta molekyylisidoksissa, jolloin se pitää tehdä keinotekoisesti. Ongelmia vedyn käyttöönotossa on sen pienestä tiheydestä johtuva huono energiatiheys. Vedylle olisi varattava noin 4 kertaa enemmän tilaa kuin kerosiinille, vaikka sen energiatiheys on 2,8 kertaa isompi kuin kerosiinilla.

(Gomez, A. & Smith, H. 2019.) Vedyn hyvät ja huonot puolet on tiedetty jo pitkään eikä sen huonoille puolille ole vielä keksitty nykyiseen lentokalustoon sopivaa ratkaisua.

## 5.6 Melu

Melun vähentäminen on vahva ympäristöhuoli, johon on alettu kiinnittämään enemmän huomiota. ICAO säättää määräyksiä joihin lentokoneiden ja moottorien on päästävä. Sallittu meluraja vaihtelee esimerkiksi sen suunnan, koneen maksimi lähtöpainon ja moottorien määrän mukaan. Myös koneen tyypillä on vaikutusta sen tuottamaan meluun. Yleensä lyhyen matkan koneilla moottorin rooli meluntuottajan kasvaa. (Zhao, K. Okolo, P. Neri, E. Chen, P. Kennedy, J. Bennett, G. J. 2020.) Melun vähentämisessä rungon sekä moottorin tuottama melu täytyy ottaa huomioon. Tieto sen välillä kumpi tuottaa enemmän melua on ristiriitaista. Airbusin mukaan lentokoneen runko tuottaa enemmän melua, kun taas Rolls Roycin mukaan moottorit tuottavat enemmän (Zhao, K. et al. 2020 ja Rolls-Royce 2015, 59). Kuvassa 9 nähdään lentokoneiden melun väheneminen vuosienvarrelta. Vaikka yksittäisen lentokoneen tuottama melu väheneekin ei se silti tarkoita, että kokonaisuudessa melu vähenee. Melun määrä tulee pikemminkin lisääntymään ilmailun lisääntyessä. Kuvasta näkee myös, kuinka hyvin 787-8 vertautuu muihin koneisiin. Boeing lupaa 787:lle jopa 60 % pienemmän melu jalanjäljen kuin 767:lle (Boeing 2022). 30 % siitä on GENx moottorin melu vähennyttä, mutta loput ovat 787 rungon muotoilusta tulevaa, melun vähentymistä (Donner, R. 2010).



Kuva 9. Development of aircraft noise emissions (CFD Software E + F GmbH Berlin 2017).

Melu jakautuu eri osien välille eri lailla nousun ja laskun aikana. Puhallin dominoi usein moottorista tulevaa melua. Sitä voidaan vähentää esimerkiksi ääntä absorboivilla materiaaleilla ja rakenteilla, sekä puhallinsiipien muotoilulla (Rolls-Royce. 2015, 58–63). General Electricin GENx moottorin suunnittelussa melu on otettu monella tapaa huomioon. Melua on pystytty vähentämään suuremmilla ohitussuhteilla. Ohitussuhteiden kasvaminen pienentää moottorista lähtevä suihkuvirtauksen nopeutta, joka on merkittävin tekijä melun vähentämisessä. Ilman sekoittumisen optimointi suuttimessa ja sen ulkopuolella vähentää myös suihkuvirtauksen melua. GENx moottorissa on ns. chevronit. Eli aaltoileva kaulus moottorin suuttimessa. Sillä pyritään lisäämään nopean ja hitaan ilman sekoittumista ja siten vähentäen melua. Huono puoli chevroneissa on lisääntynyt ilmanvastus ja polttoaineen kulutus (Loh, C. 2022). Joissakin moottoreissa suuttimen sisällä on ns. virtauksen sekoittaja (core mixer), joka toimii juuri niin kuin nimestä voi päätellä. Sillä on kuitenkin samat huonot puolet kuin chevroneilla (Rolls-Royce. 2015, 58–63).

Lentokoneen rungosta syntyvä melu syntyy pääosin virtauksen irtoamisesta, sekä turbulensivirtauksen ja lentokoneen pintojen vuorovaikutuksesta. Rungon osista eniten ääntä aiheuttaa siipien etureunat, etureunasolakot (slats), laskusiivekkeet (flaps) ja laskutelineet (Zhao, K. et al. 2020). Näistä lähtevää melua voi vähentää suojuksilla ja taipuisilla materiaaleilla, jotka pyritään saamaan saumattomiksi turbulenssin pienentämiseksi (NASA 2018). On myös mahdollista, että HFLC systeemeillä voidaan vähentää melua, koska se vähentää rungon melua aiheuttavia tekijöitä kuten turbulenssia.

## 5.7 Tulevaisuus

Kehitystä ajavat tekijät antavat tavoitteet sille miltä ilmailun pitää näyttää tulevaisuudessa. Vaikka talous saneleekin kehityksen kulun, on silti todennäköistä, että joitakin teknologioita joudutaan ottamaan käyttöön, vaikka ne olisivat aluksi tappiollisia. Tätä ajaa myös ympäristö puolelle asetetut kovat tavoitteet, joihin on hyvin vaikea päästä ilman radikaaleja muutoksia lentokoneen designiin. Lentävänsiiven muotoisen matkustajakoneet voisivat olla etenkin rungon muotoilun kannalta tärkeä askel. Airbus lupaa jopa 20 % pienemmän polttoaineen kulutuksen samalla moottorilla varustettuihin yksi käytäväisiin malleihin verrattuna. Yhdistetyn siiven muotoilu mahdollistaa tilavammat sisätilat ja antaa mahdollisuuden myös muun tyyppisille propulsiojärjestelmille. (Airbus 2020.) Rungon uuden muotoilun myötä

myös moottoreiden sijoitus voi muuttua. Tämä voi tietenkin tapahtua myös toisinpäin. Esimerkiksi moottoreiden kasvavat ohitussuhteet saattavat vaatia uuden moottori- tai siipisijoituksen.

Radikaaleja muutoksia joudutaan tekemään myös moottorien puolella. Nykyisellä lentopetrolilla päästöjen vähentäminen polttoainekulutusta pienentämällä on rajallista, koska sen polttamisesta tulee CO<sub>2</sub> päästöjä. Sen takia vihreiden polttoaineiden käyttöönotto tulee olemaan edessä. Etenkin biopolttoaineet näyttävät lupaavilta, sekä ovat nopeammin integroitavissa nykyiseen järjestelmään, kuin esimerkiksi vety tai kokonaan sähköiset lentokoneet. Sähkö ja vety voisivat kuitenkin olla osa pidemmän aikavälin suunnitelmaa kilpailevana vaihtoehtona biopolttoaineille. Akkujen huono energiatiheys on vielä rajoittavana tekijänä täysin sähköisille lentokoneille. Airbus kuitenkin demonstroi E-Fan koneellaan 2015 sähköisien koneiden potentiaalia lentämällä Englannin kanaalin yli. Se luo uskoa pienillä matkustaja määrillä suoritettaviin lyhyiden matkan lentoihin. Lyhyidenmatkojen mahdollisista lentokielloista johtuen vaikuttaa se myös todennäköisimmältä markkinaraolta täysin sähköisille lentokoneille (olettaen, että kielto koskee vain fossiilisia lentoja). Sähkö voi ilmentyä ilmailuun myös hybridi lentokoneiden muodossa. Airbus kuitenkin keskeytti niiden E-Fan X hybridilentokone ohjelman vuonna 2020 COVID-19 pandemian takia. Ohjelman tavoitteena oli korvata yksi neljästä moottorista sähköisellä moottorilla. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että Airbus ei ole hylännyt ohjelmaa täysin, koska ohjelman esittely sivu löytyy vielä Airbusin nettisivuilta. Se tekee ohjelman uudelleen käynnistämisestä mahdollista (Airbus 2022b).

Melun osalta esimerkiksi chevronit vaikuttavat olevan jo vanhaa teknologiaa. General Electric on poistanut ne sen uusimmasta GE9X moottorista (Loh, C. 2022) ja on mahdollista, että tulevaisuudessa ne häviävät myös GENx moottoreista. Syynä niiden poistolle voi olla uudet suutin designit kuten ääntä absorboivat muotoilut, jotka eivät lisää ilmanvastusta. On myös mahdollista, että niiden tuomasta melun vähennyksestä saatavat säästöt rungon eristeissä ja painossa eivät osoittautuneet kannattaviksi lisääntyneeseen ilmanvastukseen verrattuna. Toisaalta voisi kuvitella, että tällöinen tutkittaisiin etukäteen. Nykyisillä säädöksillä moottoreiden suorituskyky optimoidaan melulle polttoaineen säästämisen sijaan (Rolls-Royce 2015, 277). Se voi loppupelissä tuoda lentokoneisiin lisää chevroneiden kaltaisia osia riippuen kumpaan halutaan keskittyä enemmän melun vai polttoaineen kulutuksen vähentämiseen. Tavoitteena on tietenkin pyrkiä molempiin, mutta aivan varmaa on, että kompromisseja joudutaan tekemään.

## 6 Johtopäätökset

Tulevaisuuden ennustaminen on mahdotonta, mutta tietyt trendit ovat selkeästi nähtävissä lentokonetekniikan kehityksessä. Moottorit ovat menossa kohti pienempää polttoaineen kulutusta ja pienempiä päästöjä tuottaen samanaikaisesti vähemmän melua. Hyötysuhteen parantamiseen pyritään esimerkiksi suuremmilla ohitus- ja painesuhteilla ja kompressorin painesuhteilla. Kuvasta 8 nähtiin kuinka ohitus- ja painesuhteet ovat kasvaneet vuosien varrella. Siitä voidaan jo päätellä, että seuraavat erittäin korkean ohitusuhteen moottorit ovat jo tuloilla.

Palamisen optimoinnilla pyritään vähentämään siitä tulevia päästöjä. Isommat ilmapolttoaine suhteet ja uudet poltinteknologiat kuten GENx moottorissa käytetty TAPS polttoaineen syöttöjärjestelmä mahdollistavat päästöjen merkittävän vähentämisen. Taulukosta 3 nähtiin moninkertaiset päästöjen vähenemiset GENx moottorissa aikaisempaan CF6 verrattuna.

Melu otetaan yhä paremmin huomioon moottorin ja koneen rungon suunnittelussa. Ohitusuhteiden kasvattamisen lisäksi melua pyritään vähentämään absorboivilla rakenteilla, sekä suuttimen suihkuvirtauksen paremmalla sekoittumisella. Myös koneen rungon virtaviivaisempi muotoilu vähentää sen aiheuttamaa melua, joka nähtiin 787 Dreamlinerin hyvästä sijoituksesta kuvassa 9. Samasta kuvasta voidaan myös nähdä selvä trendi lentokoneiden melun vähentymisessä. Silti täytyy muistaa, että lisääntyvästä lentämisestä johtuen vuorokausi melu todennäköisesti tulee lisääntymään. Yhdessä edellä mainitut muutokset lupasivat noin 15 % pienemmän TSFC, 40–50 % vähemmän NOx päästöjä ja 60 % vähemmän melua kuin korvattavat mallit.

Koneen rungon kehitys näkyy hyvin esimerkiksi Boeing 787 Dreamlinerissa. Sen siivet ovat pidemmät ja kapeammat kuin aikaisemmilla malleilla. Siipien muotoilu etenkin niiden kärjissä on optimoitu vastusvoimien vähentämiseksi. Lisäksi 787 pyrstössä on HFLC teknologiaa. Yhdessä muutokset ovat mahdollistaneet suuremman koneen, joka lentää 6 % nopeammin ja lähes 40 % pidemmälle kuin edeltäjänsä, joka nähtiin taulukosta 2.

Kehitys suunnittelussa, sekä materiaali- ja valmistustekniikassa on mahdollistanut edellä mainitut parannukset. Komposiittien ja titaaniseoksien käyttö on parantanut osien kestävyttä ja tehnyt niistä kevyempiä kuin aikaisemmin. Myös tietokoneiden kehityksen mukana

parantunut laskentateho on mahdollistanut kehittyneempien rasi- ja virtausanalyysien tekemisen.

Boeing 787 tapaiset lentokoneet näyttävät kehityksen suunnan. Silti 787 on perinteinen lentokone, joka polttaa fossiilisia polttoaineita. Kaupallisten lentomarkkinoiden kasvu ja Aasian maiden vaurastuminen lisää lentämisen määrää merkittävästi. Näillä näkymin hyötysuhteen ja polttoainetehokkuuden kasvusta huolimatta on ennustettu ilmailusta tulevien päästöjen kasvavan moninkertaisiksi vuoteen 2050 mennessä. Sen takia radikaalimpia muutoksia on tehtävä. Etenkin, jos halutaan saavuttaa IATA:n ja Euroopan komission asettamat kunnianhimoiset 50 ja 60 % päästövähennykset vuoteen 2050 mennessä. Ottaen huomioon vielä näiden tavoitteiden mahdolliset kiristymiset ei ole aikaa hukattavana. Sen takia ei voida odottaa esimerkiksi patteriteknologian kehittymistä ikuisesti, kun jo nyt olemassa olevilla teknologioilla voidaan vähentää ilmailuntuottamia päästöjä ja melua merkittävästi.

Lyhyellä aikavälillä lentokonekannan uusiminen, sekä vanhojen lentokoneiden päivittäminen pitäisi olla etusijalla. Tässä Boeing 787 ja Airbus A350 tapaiset mallit ovat hyviä vaihtoehtoja. Biopolttoaineiden käyttöönotto olisi hyvä aloittaa mahdollisimman pian. Se tapahtuisi aluksi jollakin sekoitussuhteella fossiilisen polttoaineen kanssa. Silloin käyttöönotto on nopeaa ja muutoksia tarvitsee tehdä mahdollisimman vähän. Lopulta fossiiliset polttoaineet olisi hyvä korvata täysin biopohjaisilla polttoaineilla. Keskipitkällä aikavälillä lyhyet lennot on todennäköisesti mahdollista korvata täysin sähköisillä tai biopolttoainetta käyttävillä hybridi lennoilla. Myös moottorien uudistuessa niiden sijoitteluun saatetaan joutua tekemään muutoksia. Airbusin demonstroima lentäväsiipi konsepti voi olla saavutettavissa hieman pidemmällä aikavälillä. Sen aerodynaamiset hyödyt ovat kuitenkin selvät, joten siihen olisi hyvä pyrkiä. Vety polttoaineena ja täyssähköiset pitkänmatkan lentokoneet vaikuttavat olevan vähintään yhtä kaukana kuin lentäväsiipi muotoilu, jonka takia niitä voisi miettiä enemmänkin tulevaisuuden sijoituksina ja mahdollisina kilpailijoina biopolttoaineille.

Ilmastonmuutos on avannut ilmailun silmät ja vaikutta, että muutosta on tapahtumassa. Muutos täytyy tapahtua vilpittömästi halusta kehittyä eikä se saa jäädä pelkäksi ”viherpesuksi”. Paljon on puhetta tavoitteista vähentää melua tämän verran ja päästöjä tuon verran. Jokaisesta työssä käsitellystä aiheesta voisi itsessään kirjoittaa monta tutkimusta, mutta yleisellä tasolla seuraavaksi olisi hyvä tutkia, mitä konkreettisia muutoksia täytyy tehdä näiden tavoitteiden saavuttamiseksi, sekä mitkä tekijät rajoittavat näiden ”tulevaisuuden teknologioiden” kehittymistä ilmailuun sopiviksi tai jo olemassa olevien käyttöönottoa.



## Lähteet

- Airbus. 2020. Imagine travelling in this blended wing body aircraft. Airbus Newsroom. 11.11.2020. [Verkkosivu]. [Viitattu: 29.8.2022]. Saatavissa: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-imagine-travelling-in-this-blended-wing-body-aircraft>
- Airbus. 2022a. *Airbus UpNext: Flying future technologies today*. Airbus. [Verkkosivu]. [Viitattu: 1.9.2022]. Saatavissa: <https://www.airbus.com/en/innovation/innovation-ecosystem/airbus-upnext>
- Airbus. 2022b. *E-Fan X*. Airbus. [Verkkosivu]. [Viitattu: 1.9.2022]. Saatavissa: <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x>
- Aircraft Engineer. 2016. *Raked wingtips – Why Boeing-777 doesn't have winglets?*. 3.5.2016. [Verkkosivu]. [Viitattu: 29.8.2022]. Saatavissa: <https://www.aircraft-engineer.info/raked-wingtips/>
- Anderson J. D. Jr. 1989. *Introduction to Flight*, 3. Painos. McGraw Hill Book Company. 616 s. ISBN: 0-07-001641-0.
- Anon. 2005. GE's Simpler, More Efficient Genx. *Aviation Maintenance*. Vol. 24:11. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 1.9.2022]. Saatavissa: <https://www.proquest.com/docview/228291213?accountid=27292&parentSessionId=G2HtyhqLgnBu7q%2Fc2TPLZ13HSW%2BwPKWdyG1z6R4JR1Y%3D&pq-origsite=primo>
- Anon. 2017. Boeing turns to 3D printing to shave millions off the 787 Dreamliner. *Computer Shopper*. Vol. 353. S.20–20. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 1.9.2022]. Saatavissa: <https://www.proquest.com/docview/1983614115?accountid=27292&parentSessionId=abXd2NAbsRaV6z8cj6UCTm2a1qbey2USieuAx0ln7Es%3D&pq-origsite=primo>
- Arnot, M. 2019. All about airplane winglets and how to tell them apart. *The Points Guy*. 9.12.2019. [Verkkolehti]. [Viitattu: 25.8.2022]. Saatavissa: <https://thepointsguy.com/news/all-about-airplane-winglets/>

BBC. 2021. France moves to ban short-haul domestic flights. *BBC News*. 12.4.2021. [Verkkoalehti]. [Viitattu: 25.8.2022]. Saatavissa: <https://www.bbc.com/news/world-europe-56716708>

Boeing. 2010. Boeing Completes Ultimate-Load Wing Test on 787. Boeing Mediaroom. 28.3.2010. [Verkkosivu]. [Viitattu: 29.8.2022]. Saatavissa: <https://boeing.mediaroom.com/2010-03-28-Boeing-Completes-Ultimate-Load-Wing-Test-on-787>

Boeing. 2022. *787 Dreamliner by design*. Boeing. [Verkkosivu]. [Viitattu: 30.8.2022]. Saatavissa: <https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/all>

Borgnakke C. & Sonntag R. E. 2012. *Fundamentals of Thermodynamics*. 8. Painos. John Wiley & Sons, Inc. 894 s. ISBN 978-1-118-13199-2.

CFD Software E + F GmbH Berlin. 2017. *Aviation invests billions in active and passive noise control*. BDL Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft. [Kuva]. [Viitattu: 30.8.2022]. Saatavissa: <https://www.bdl.aero/en/topics-and-positions/sustainability/aircraft-noise/>

Chandler, C. 2012. Innovations in Turbine Engines. *Aircraft maintenance technology*. Vol. 23:3. S. 6–10. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 5.8.2022]. Saatavissa: <https://www.proquest.com/docview/928759947?accountid=27292&parentSessionId=e9Ag-lbSkrN4lTNX%2BTcd6hZbCxpom%2Bfn6VfjVAsNfWVU%3D&pq-origsite=primo>

Corrosion-Doctors. 2022. *Galvanic Series*. Corrosion-Doctors. Deepwater. [Verkkosivu]. [Viitattu: 1.9.2022]. Saatavissa: <https://corrosion-doctors.org/Definitions/galvanic-series.htm>

Dankanich, A. & Peters, D. 2017. *Turbofan Engine Bypass Ratio as a Function of Thrust and Fuel Flow*. Mechanical Engineering and Materials Science Independent Study. 34. Washington University in St. Louis. 19 s. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 28.8.2022]. Saatavissa: <https://openscholarship.wustl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&context=mems500>

Davis, B. J. 2017 Airframe: The SR-71 Blackbird. *The Airman*. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 1.9.2022]. Saatavissa: <https://www.airmanmagazine.af.mil/Features/Display/Article/2594085/airframe-the-sr-71-blackbird/>

- Donner, R. 2010. The GENx Engine. *Aircraft maintenance technology*. Vol. 21:5. S.12–15. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 5.8.2022]. Saatavissa: <https://www.proquest.com/docview/347554047?parentSessionId=1dqgECsjZdAn8%2FtjCNF93Pf%2B6yDDd39PL4P8%2BUB8OK0%3D&pq-origsite=primo&accountid=27292>
- Dreamliner Analysis. 2019. *Dreamliner Analysis*. 26.11.2011 [Verkkosivu]. [Viitattu: 31.8.2022]. Saatavissa: <http://www.galexander.org/dreamliner.html>
- EASA 2019. Type-Certificated sata sheet: EASA.E.036 for Trent 1000 series engines. 30.4.2019. European Union Aviation Safety Agency. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 28.8.2022]. Saatavissa: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/TCDS%20E%20036%20issue%2015.pdf>
- EASA 2021. ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. 7/2021. EASA. [Online-tietokanta]. [Viitattu: 30.8.2022]. Saatavissa: <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
- EIA. U.S. Gulf Coast Kerosene-Type Jet Fuel Spot Price FOB. 31.8.2022. U.S. Energy Information Administration. [Online-tietokanta]. [Viitattu: 31.8.2022]. Saatavissa: [https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/EER\\_EPJK\\_PF4\\_RGC\\_DPGD.htm](https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/EER_EPJK_PF4_RGC_DPGD.htm)
- Giurgiutiu, V. & Harris, G. 2016. *Structural health monitoring of aerospace composites*. Amsterdam, Netherlands: Academic Press. 445 s. ISBN: 978-0-12-409605-9.
- Gomez, A. & Smith, H. 2019. Liquid hydrogen fuel tanks for commercial aviation: Structural sizing and stress analysis. *Aerospace science and technology*. Vol. 95. ISSN 1270-9638. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 1.9.2022]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963818304139>
- Karakoç, T. H., Colpan, C. O., Şöhret, Y., SpringerLink. 2018. *Advances in Sustainable Aviation*. Cham: Springer International Publishing. 298 s. ISBN 978-3-319-67134-5
- Kottas A. T. Bozoudis M. N. Madas M. A. 2020. Turbofan aero-engine efficiency evaluation: An integrated approach using VSBM two-stage network DEA. *Omega*. Vol.92. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 30.7.2022]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048319306486>

Krishnan, K. S. G., Bertram O., Seibel O. 2017. Review of hybrid laminar flow control systems. *Progress in aerospace sciences*. Vol. 93. S. 24–52. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 20.8.2022]. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0376042117300404?via%3Dihub>

Kundu, A. K. 2010. *Aircraft Design*. Cambridge University Press. 599 s. ISBN 978-0-521-88516-4.

Loh, C. 2022. Why Don't Airbus Aircraft Have Serrated Engine Covers?. *Simple Flying*. 29.11.2022. [Verkkolehti]. [Viitattu: 20.8.2022]. Saatavissa: <https://simpleflying.com/airbus-no-serrated-engine-covers/>

Markets and Markets. 2022. *Business Jets Market by Aircraft Type (Light, Mid-Sized, Large, Airliner), Systems (OEM Systems, Aftermarket Systems), End-Use (Private User, Operator), Point of Sale (OEM, Aftermarket), Services, Range and Region - Global Forecast to 2030*. Market Research Report AS 2713, 7/2022. [Verkkosivu]. [Viitattu: 29.8.2022]. Saatavissa: [https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/business-jet-market-33698426.html?gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oeyvJQywk--sTW0rAww2K6tq2TTqT9ZFORv72awWbVyr78Fty9XrLahoCHIYQAvD\\_BwE](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/business-jet-market-33698426.html?gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oeyvJQywk--sTW0rAww2K6tq2TTqT9ZFORv72awWbVyr78Fty9XrLahoCHIYQAvD_BwE)

Mordor Intelligence LPP. 2021. *Commercial Aircraft Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027)*. ReportLinker, 12/2021. [Verkkosivu]. [Viitattu: 29.8.2022]. Saatavissa: [https://www.reportlinker.com/p06028452/Commercial-Aircraft-Landing-Gear-Market-Growth-Trends-COVID-19-Impact-and-Forecasts.html?utm\\_source=GNW](https://www.reportlinker.com/p06028452/Commercial-Aircraft-Landing-Gear-Market-Growth-Trends-COVID-19-Impact-and-Forecasts.html?utm_source=GNW)

Morgan, M. J. Shapiro, H. N. Boettner, D. D. Bailly, M. B. 2014. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 8. Painos. John Wiley & Sons, Ltd. 1042 s. ISBN: 978-1-118-41293-0.

NASA. 2015. *Ubiquitous Supercritical Wing Design Cuts Billions in Fuel Costs*. NASA Spinoff. [Verkkosivu]. [Viitattu: 28.8.2022]. Saatavissa: [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2015/t\\_2.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2015/t_2.html)

NASA. 2018. *NASA Technologies Significantly Reduce Aircraft Noise*. NASA. [Verkkosivu]. [Viitattu: 31.8.2022]. Saatavissa: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-technologies-significantly-reduce-aircraft-noise>

- NASA. 2022. Afterburning Jet Thrust. NASA. [Verkkosivu]. [Viitattu: 31.7.2022]. Saatavissa: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/turbab.html>
- Rolls-Royce. 2015. *The Jet Engine*. 5. Painos. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd on behalf Rolls-Royce plc. 288 s. ISBN: 9781119065999.
- Sforza, P. M. 2014. *Commercial airplane design principles*. 1st edition. Oxford. [England]: Butterworth-Heinemann. 583 s. ISBN: 978-0-12-419953-8
- Siluyanova, M. V. & Gyazova, M. M. 2020. Condition-Based Economic Assessment of Airplane Engines. *Russian engineering research*. Vol 40:8. S.663–665. ISSN 1068-798X. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 20.8.2022]. Saatavissa: <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/article/10.3103/S1068798X20080213>
- Tabatabaian, M. & Rajput, R. K. 2018. *Advanced thermodynamics: fundamentals, mathematics, applications*. Dullles, Virginia: Mercury Learning and Information. 849 s. ISBN 978-1-936420-27-8
- Youssef K. M., Zaddach A. J., Niu C., Douglas L., Koch. I. & C. 2015. A Novel Low-Density, High-Hardness, High-entropy Alloy with Closepacked Single-phase Nanocrystalline Structures. *Materials Research Letters*. Vol. 3:2. S.95–99 [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 20.8.2022]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.985855>
- Zhao, K. Okolo, P. Neri, E. Chen, P. Kennedy, J. Bennett, G. J. 2020. Noise reduction technologies for aircraft landing gear-A bibliographic review. *Progress in aerospace sciences*. Vol. 112. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 1.9.2022]. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0376042119300338?via%3Dihub>