



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

KAASUTURBIINIT ILMAILUKÄYTÖSSÄ

Henri Heusala

KONETEKNIikka

Kandidaatintyö 2023

TIIVISTELMÄ

Kaasuturbiinit ilmailukäytössä

Henri Heusala

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 19 s. + 0 liitettä

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Emil Kurvinen

Työ on tehty tutkielmana kandidaatin tutkintoa varten. Aiheena on kaasuturbiinit ilmailukäytössä. Tutkielman tavoitteena on selvittää kaasuturbiinien kehityshistoriaa sekä käyttöä ja kehitystä nykypäivänä. Työssä käsitellään erilaisia kaasuturbiineja ja niiden käyttökohteita, sekä kehitystä.

Asiasanat: kaasuturbiini, suihkumoottori, ilmailu

ABSTRACT

Gas turbines in aviation use

Henri Heusala

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2023, 19 p. + 0 appendixes

Supervisor(s) at the university: Emil Kurvinen

This paper has been done as research for my bachelor's degree. The subject chosen for this paper is gas turbines in aviation use. The goal for this research is to look at the design history of gas turbine engines and their use and development in modern times. This paper consists of information about different types of gas turbines and their use-cases and development.

Keywords: Gas turbine, jet engine, aviation

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
2 TIETOA JA HISTORIAA	6
2.1 Historiaa	6
2.2 Moottorityypit	7
2.3 Vikaantuminen	9
3 VERTAILU	12
4 TULOKSET	15
5 YHTEENVETO	17
LÄHDELUETTELO	

1 JOHDANTO

Lentoliikenteen pääasiallisena voimanlähteenä jo pitkään toimineet kaasuturbiinimoottorit ovat kehittyneet tehoiltaan ja teknisiltä ratkaisuiltaan vuosikymmenten saatossa paljon. Tässä työssä käydään läpi niiden kehityshistoriaa toisen maailmansodan ajalta nykyaikaan asti, sekä niiden eri tyyppisiä, alkupään yksinkertaisista yksiakselisista aksiaaliturbiineista aina nykyajan moniakselisiin ohivirtaussuihkumoottoreihin sekä akseliturbiineihin. Työssä myös vertaillaan miten ne ovat muuttuneet teknisiltä ominaisuuksiltaan, kuten paino, teho sekä huollettavuus ja käyttökulut. Työssä pyrin selvittämään kaasuturbiinien kehityksen vaiheita alun sotilaskäyttöön suunniteltujen moottoreiden soveltamisesta siviili-ilmailuun ja näiden eri haarojen kehitystä eri kehitysfilosofian pohjalta, siviili-ilmailun hyötysuhteen ja päästöjen pienennyksen tavoittelu ja sotilasilmailun tehojen kasvattaminen. Lisäksi vertaillaan eri moottoreita ja niiden suorituskykyä.

2 TIETOA JA HISTORIAA

Kappaleessa käydään läpi suihkumoottoreiden kehityshistoriaa, niiden ominaisuuksia ja eri tyyppisiä, sekä vikaantumismekanismeja.

2.1 Historiaa

Ensimmäinen patenti nykyaikaisella termodynaamisella periaatteella toimivasta kaasuturbiinista annettiin vuonna 1791 englantilaiselle John Barberille. Tämän patentin moottorissa oli samat peruskomponentit kuin nykyisissä kaasuturbiineissa: kompressori, palotila sekä turbiini. Patentin laite on kuitenkin erittäin yksinkertainen, sekä se toimii eri tavalla kuin nykyajan käytössä olevat aksiaali- sekä radiaaliturbiinit. (El-Sayed, 2017)

Toisen maailmansodan aikaan suihkumoottorit kehittyivät merkittävästi. Ennen tätä niitä käytettiin vain laboratorio-oloissa testikäytössä. Sodan aikana kuitenkin kehitystarve kasvoi, sekä niiden käyttö sotilaskäytössä alkoi. Suihkumoottoreita alettiin kehittää korvaamaan mäntämoottoreita, sillä niiden tehopotentiali oli erittäin suuri. Niiden avulla pystyttiin jo sodan lopussa saavuttamaan parempi suorituskyky kuin mäntämoottoreilla. Niillä pystyttiin lentämään nopeampaa ja korkeammalla, kuin vastaavilla mäntämoottoreilla. (El-Sayed, 2017)

Suihkumoottoreiden käyttö lentoliikenteessä johti etenkin parempaan polttoainetalouteen, sekä matkustusmukavuuteen tasaisemman ja hiljaisemman käynnin vuoksi. Myös lentokoneen nopeus ja kantama kasvoi suihkumoottoreiden ansiosta. (Peeters, 2005)

Ensimmäinen sarjatuotantosuihkuhävittäjä oli saksalaisten kehittämä Messerschmitt Me 262. Kyseinen kone käytti moottorinaan kahta Junkers Jumo 004B suihkumoottoria. Tämä moottori oli asennuskohteensa tapaan ensimmäinen sarjatuotettu suihkumoottori operatiivisessa käytössä. Tämä moottori oli laajimmin toisessa maailmansodassa käytetty suihkumoottori. (El-Sayed, 2017)

Myös muut maat, kuten Yhdysvallat, Englanti sekä Neuvostoliitto kehittivät sodan loppupuolella omia suihkumoottoreitaan vastaamaan Saksan suihkuhävittäjää. Yhdysvalloissa Brittien suunnitelmien pohjalta kehitettiin I-16 moottori. General Electricin tekemää moottoria käytettiin Bell XP-59 koneessa. Britit itse kehittivät omien suunnitelmiansa pohjalta Nene-moottorin, jota myytiin myös Neuvostoliitolle. (El-Sayed, 2017)

Myös potkuriturbiinit kehitettiin pian suihkumoottoreiden käytön aloituksen jälkeen. Tässä moottorityypissä kaasuturbiini pyörittää akselia, jonka avulla voima saadaan siirrettyä erilliselle potkurille. Näitä käytetään nykyään mäntämoottoreiden sijaan melkein kaikissa ilmailukohteissa pienimpiä lentokoneita lukuun ottamatta. Potkuriturbiinilla saavutetaan pienempi polttoaineen kulutus kuin pelkällä suihkumoottorilla säilyttäen kuitenkin luotettavuuden. Näitä käytetään myös helikoptereissa voimanlähteenä. (El-Sayed, 2017)

2.2 Moottorityypit

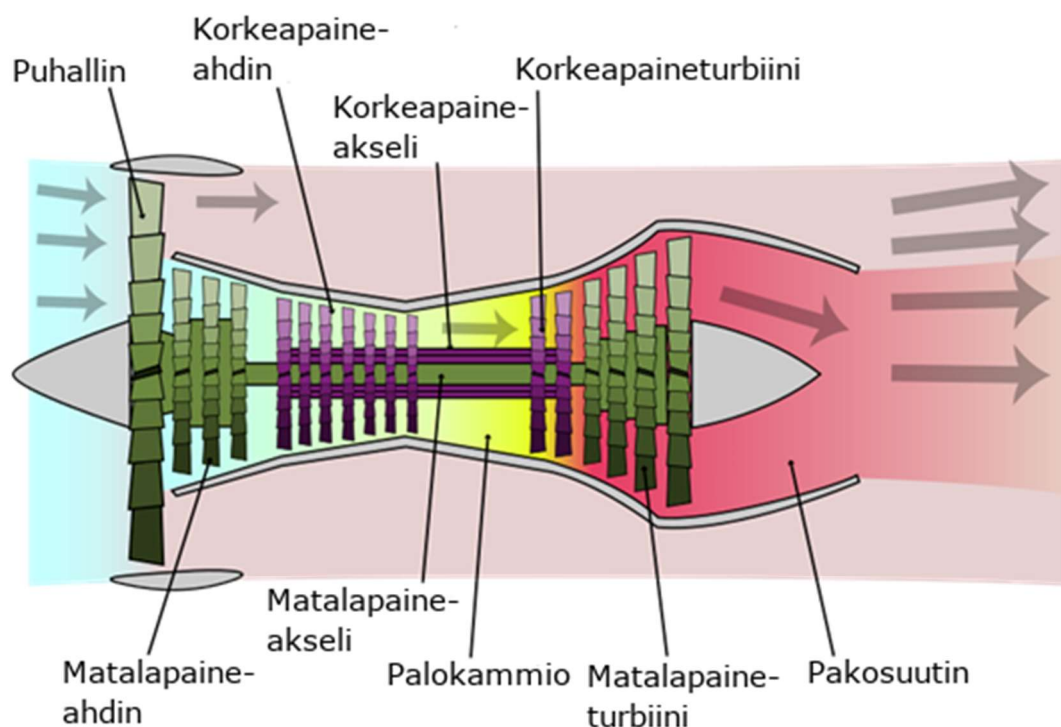
Kaasuturbiinit voidaan jakaa alaryhmiin niiden rakenteiden perusteella. Suihkumoottoreita on aksiaali- ja radiaalimoottoreina. Näissä nimi kertoo, miten ilma liikkuu moottorin sisällä. Aksiaaliturbiinissa ilma kulkee suoraa kanavaa ahtimen, palokammion ja turbiinin läpi. Radiaaliturbiini on enemmän mäntämoottoreista tutun turboahtimen tyylinen, jossa ilma ahdetaan ”ulospäin” moottorin akselistä. Polttokammiot ovat moottorin ahtimen ja turbiinin ulkokehällä.

Suihkumoottoreihin voidaan myös lisätä jälkipoltin, joka suihkuttaa polttoainetta moottorin jälkeiseen ilmavirtaan, jossa se sytytetään ja pidetään liekkiä yllä liekinpitimillä. Tällöin moottorin takana olevan muuttuvan suutinkartion avulla voidaan tuottaa huomattava lisätyöntövoima, kuitenkin huomattavasti lisääntyneen polttoainekulutuksen hinnalla. Jälkipoltinta käytetään erityisesti sotilaskäyttöön

tarkoitetuissa lentokoneissa, ja ainoa siviilikäytössä käytetty jälkipoltin oli yliäänimatkustajakoneessa Concordessa.

Myös ydinreaktorin tuottaman lämmön avulla toimivia kaasuturbiineja on kokeiltu ilmailukäyttöön, mutta kaikki projektit on hylätty turvallisuussyiden takia.

Nykyaikana suurin osa käytössä olevista moottoreista ovat ohivirtaussuihkumoottoreita, joissa moottorin läpi kulkee kaksi erillistä ilmavirtaa. Kuvassa 1 mukailten (Aainsqatsi, 2008) nähdään hyvin tämä rakenne, etuosassa oleva puhallin siirtää ilmaa muun moottorin ohi. Tällöin saadaan parannettua huomattavasti hyötysuhdetta, sillä suurempi määrä ilmaa saadaan liikutettua moottorissa, ilman että polttoaineensyöttöä pitää lisätä samassa suhteessa. Näitä on käytössä vielä kahta eri alatyyppeä: Suuren ja pienen ohivirtauksen moottoreita. Tämä kertoo karkeasti, kuinka paljon ilmaa kulkee moottorin läpi suhteessa siihen, kuinka paljon ilmaa kulkee itse voimaa tuottavan moottoriosan läpi.



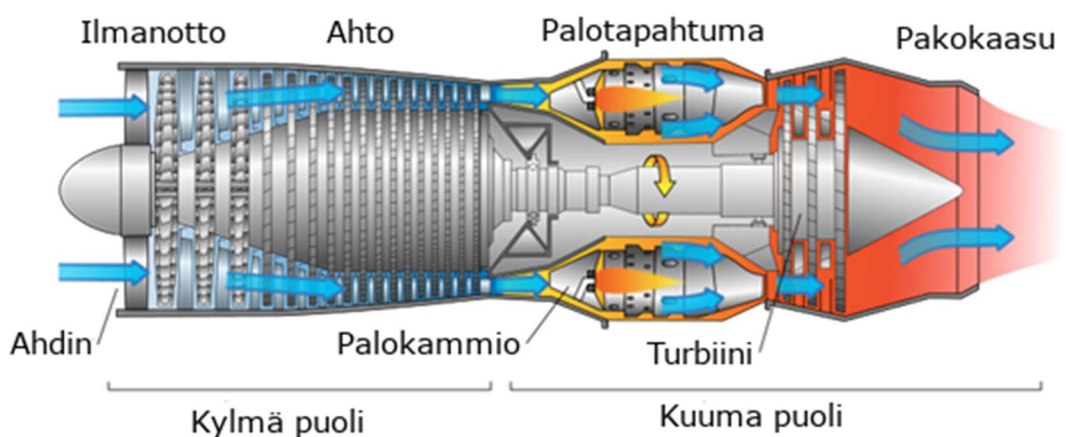
Kuva 1: Ohivirtaussuihkumoottorin kaavio

Käyttö jakaantuu hyvin selkeästi sotilas- ja siviilikäyttöön näiden moottoreiden välillä. Pienen ohivirtauksen moottoreita käytetään pääasiassa sotilaskäytössä, kun taas suuren

ohivirtauksen moottoreita käytetään pääasiassa siviili-ilmailussa. Tämä jako perustuu moottoreiden tehontuottoon sekä polttoainenkulutukseen. Pienen ohivirtauksen moottoreista saadaan painoon nähden paljon tehoa, kun taas suuren ohivirtauksen moottoreissa on hyvä taloudellisuus. Siviili-ilmailussa on nykyaikana tapahtunut paljon kehitystä juuri polttoainetalouden ja päästöjen saralla, sillä lentoliikenteen päästöt ovat olleet paljon puheenaiheena nykyaikana.

Aksiaaliturbiineissa voidaan myös käyttää moniakselista rakennetta, jolloin turbiinin ja ahtimen yhdistävät akselit ovat jaettu kahteen osaan, jotka kulkevat sisäkkäin. Tällöin saadaan eroteltua matala- ja korkeapainepuoli moottorissa, jotka pyörivät toisistaan riippumattomasti. Tällä saavutetaan parempi hyötysuhde, sillä ilmaa voidaan ahtaa tehokkaammin kaksivaiheisen rakenteen avulla, sillä korkeapaineahdin pystyy vielä ahtamaan ilmaa lisää.

Kuvassa 2 mukailten (Dahl, 2007) nähdään ohivirtauksettoman yksiakselisen aksiaaliturbiinin rakenne. Tässä kaikki ilma kulkee ahtimen läpi polttimille, sekä sen jälkeen turbiinin kautta poistuu moottorin takaosasta tuottaen työntövoimaa. Moottorin toiminta perustuu ilman kiertoon, polttimien avulla ilma laajenee, ja pyörittää turbiinia, joka akselin kautta pyörittää ahtimia joiden avulla moottoriin saadaan lisää ilmaa.



Kuva 2: Aksiaaliturbiinin kaavio

2.3 Vikaantuminen

Nykyaikaiset ilmailukäytössä olevat turbiinimoottorit luullaan yleensä erityisen luotettaviksi sekä huoltovapaiksi. Luotettavuus kuitenkin tulee suurimmaksi osaksi tarkoista huolto- sekä tarkastusaikatauluista, joiden avulla pystytään tarkasti seuraamaan moottorin eri komponenttien kuntoa. Tarkoilla tarkastuksilla havaitaan myös epänormaalit vauriot, jolloin niiden aiheuttamat pahemmat vauriot saadaan estettyä. Tällöin saadaan aikaan se, että käytössä tapahtumien rikkojen määrä on alhainen. (Carter, 2005)

Eniten vikaantuvat osat kaasuturbiinimoottoreissa ovat turbiinin ja ahtimen siivet, sekä staattorisiivet. Nämä osat joutuvat kestäämään erittäin rajuja lämpötilamuutoksia, sekä niiden täytyy kestää moottorin toiminnasta aiheutuvat pyörintävoimat. Nämä lämpötilan muutokset aiheuttavat materiaalien väsymistä, joka johtaa osan rikkoutumiseen. Etenkin turbiinin siivekkeet joutuvat kestäämään polttimen aiheuttamaa erittäin kuumaa lämpötilaa. (Carter, 2005)

Mekaanista vahinkoa moottoreille aiheuttaa yleensä moottorin sisään joutuneet kappaleet maasta, tai linnut. Myös lentokoneen rungosta tai moottorin etuosasta irronneet jääkappaleet voivat joutua moottoriin ja aiheuttaa vahinkoa. Riippuen moottorin sisään joutuneen kappaleen materiaalista ja koosta, vahinko voi jäädä pieneksi tai tuhota koko moottorin. Pienenkin kiven aiheuttama painauma moottorin lavassa täytyy kuitenkin huoltaa esimerkiksi hiomalla se pyöreäksi, sillä teräväreunaunen lommo aiheuttaa stressikeskittymän materiaaliin, joka voi toimia lähtöpisteenä särölle. Myös pyörivien osien tasapaino voi häiriintyä, jos jokin sen osista vääntyy tai ilmavirta häiriintyy merkittävästi jonkin komponentin kohdalla. (Mishra ym., 2015)

Moottorin turbiinipuolen siivekkeissä myös yksi osien elinikää rajoittava tekijä on materiaalin viruminen. Materiaalin lämpökestävyys on näissä komponenteissa erittäin tärkeää, sillä niiden ominaisuuksien täytyy pysyä samana koko lämpötilaskaalan läpi. Komponenteissa on nykyään ilmajähdytys, jossa ilmavirta ohjataan siivekkeen pinnan yli pienistä rei'istä. Tämä luo eristävän ilmakerroksen osan pintaan, joka estää erittäin kuumaa moottorin ilmavirtaa pääsemästä suoraan kontaktiin pinnan kanssa. Viruminen

näkyä yleensä näissä osissa pituuden muutoksena. Turbiinin siivekkeet pitenevät käytössä, jolloin niiden käyttöikä rajoittuu, sillä pituuden muutos voi aiheuttaa pyörivän siivekkeen osumisen moottorin ulkokehälle. (Carter, 2005)

Myös laakerivikoja esiintyy turbiinimoottoreissa, mutta ne ovat harvinaisempia kuin moottorin siivekkeisiin liittyvät viat, noin 7% kaikista vioista. Nämä voivat johtua etenkin öljyn kunnosta, sekä moottorin käyttöolosuhteista kuten lämpötilasta. Laakereiden kuntoa tarkkaillaan magneettisilla tunnistimilla, jotka tunnistavat laakereista irtoavia pieniä partikkeleita. Myös öljyn suodatus on tärkeää, jotta epäpuhtauksien pääsy laakeripinnoille saadaan estettyä. Laakeriviat voivat aiheuttaa monenlaisia oireita moottorin käytöksessä. Etenkin epätasapainosta johtuvaa värinää, sekä moottorin siivekkeiden osumista moottorin ulkokehälle. Öljyn lämpötila on myös tarkkailtava, sillä yleensä vaurioitunut laakeri nostaa öljyn lämpötilaa. (Mishra ym., 2015)

Korroosio voi myös olla yksi vaurioita aiheuttava tekijä jos operoidaan paljon veden lähellä, tai muuten kosteissa olosuhteissa. Etenkin lentotukialukset, jotka toimivat lähellä suolaista merivettä, altistavat sen kautta operoivat lentokoneet voimakkaalle korroosiolle. Moottoreita voidaan pestä suolaa ja muita epäpuhtauksia poistavalla pesulla, joka on erittäin tehokas minimoimaan korroosiota moottorin komponenteissa. Korroosio vaikuttaa moottorin toimintaan, sillä se luo aerodynaamisesti tärkeille pinnoille kertymiä, jotka vaikuttavat ilmavirtaukseen komponentin yli. Tämä voi aiheuttaa jopa moottorin toiminnan keskeytymisen, jos kertymät aiheuttavat tarpeeksi häiriötä virtaukselle. Muita oireita ovat myös tehon lasku ja toimintalämpötilan nousu. (Mishra, 2015)

3 VERTAILU

Suurimmat matkustajaliikennekäyttöön tarkoitettujen suihkumoottoreiden valmistajat ovat Pratt & Whitney, General Electric, CFM International ja Rolls-Royce. Näillä valmistajilla on noin 98% osuus markkinoista alalla. Alalle uusilla valmistajilla on erittäin pieni osuus myynnistä. Nämä neljä suurinta valmistajaa ovat hyvin tunnettuja ja luotettuja alalla, sekä niillä on pitkä historia moottoreiden valmistuksessa. Kaikki paitsi CFM International ovat perustettu 1900-luvun alussa. CFM International on uudempi General Electricin ja Safranin perustama yhteistyöyhtiö, joka perustettiin vuonna 1974. Safran on ranskalainen monialakonserni. (Aerotime Hub, 2022)

General Electricin kehittämät ja valmistamat GE90 ja GE9X moottorit edustavat markkinoiden uusinta huipputeknologiaa. CFM International taas valmistaa kehittyntä LEAP-moottoria. (Aerotime Hub, 2022)

Vertaillaan aluksi samassa koneessa käytettyä TF33 (JT3D) ja CFM56-2 moottoreita. Pratt & Whitneyyn kehittämä JT3D (sotilaskäytössä nimeltä TF33) oli yhtiön ensimmäinen tuotanto-ohivirtausmoottori, jonka kehitys alkoi 1950-luvun loppupuolella. Työntötehoa siitä löytyy 75616 N ja se painaa 1882 kg. Moottorin mitat ovat 3,5 metriä pitkä, 1,35 metriä leveä, sekä 1,4 metriä korkea. Moottori on pienen ohivirtauksen moottori, jossa nykypäivän standardien mukaan verrattain pieni määrä ilmaa ohittaa itse moottorin poltinosan. Sen ohivirtaussuhde on 1,4:1. (Aircraft Database) Moottori on jatkokehitys JT3C moottorista, johon lisättiin kaksivaiheinen puhallinosa. Tämän muutoksen pystyi tekemään myös jo käytössä oleviin moottoreihin muutossarjan avulla. Moottori oli laajassa käytössä siviili- sekä sotilaskoneissa. Yleisimmät lentokoneet joissa moottoria käytettiin olivat siviilipuolella Boeing 707 ja Douglas DC-8. Sotilaskoneita joihin moottori on asennettu ovat esimerkiksi Boeing B-52 pitkän kantaman pommikone, sekä siviilimallin 707:sta kehitetyt mallit, kuten KC-135 ilmatankkaus kone sekä E-3 Sentry tutka-alusta. Moottori on vielä tänäkin päivänä käytössä erityisesti kyseisissä sotilasilmalukoneissa Yhdysvaltain ilmavoimilla. (Pratt & Whitney) Moottoreiden käyttöikä alkaa lähetä loppuaan, joten niitä on myös ostettu käytöstä poistetuista siviilikoneista, jotta tärkeät sotilaskoneet saadaan pidettyä lentokuntoisina. Etenkin jo 50-

luvun alkupuolella käyttöönotetut B-52 alkavat olla uusien moottoreiden tarpeessa, sillä niiden käytön uskotaan jatkuvan jopa 2050 asti. Yhdysvaltain ilmavoimat on toteuttamassa näille malleille moottoriuudistuksen, jonka avulla saataisiin asennettua uudet ja paremmat moottorit. (Tirpak, 2023) General Electricin sekä Snecman yhteistyönä (CFM) 1970-luvun puolivälissä kehitetty CFM56 on erittäin laajassa käytössä vielä nykypäivänäkin, sekä mallin kehitys jatkuu edelleen. Moottorilla on yhteensä yli 900 miljoonaa lentotuntia. (CFM International) Alkusarjan CFM56-2 moottori tuottaa 97900 N työntövoiman. Moottori edustaa suuren ohivirtauksen mallia, jolla saavutetaan suurempi työntövoima pienemmällä polttoainenkulutuksella verrattuna pienen ohivirtauksen moottoreihin. Sen ohivirtaussuhde on 6:1. Moottorin mitat ovat 2,4m*1,8m*2.1m. (Aircraft Database) Moottorit ovat mallista riippuen noin 2000 kg:n painoisia. (National Air and Space Museum) Uusimmat mallit kuten CFM56-5B tuottaa jo 147000 N työntövoiman. (Delta TechOps)

Myös eri valmistajilta voidaan saada samaan koneeseen hyvin toisiaan vastaavat moottorivaihtoehdot. Näin on esimerkiksi käynyt Airbus A320neo perheen kanssa, jossa sekä CFM ja Pratt & Whitney ovat päässeet käyttämään omia moottoreita saman mallin lentokoneessa. Moottoreina toimivat LEAP-1A24 sekä PW1124G1-JM. Nämä mallit ovat hyvinkin toisiaan vastaavat, niiden kummankin suurin jatkuva työntövoima on noin 107 kN, sekä niiden paino on noin 2900 kg.

Taulukko 1:stä nähdään, että moottoreiden teho, sekä paino ovat kasvaneet niiden kehittyessä. Etenkin jos vertaillaan kahta saman sarjan moottoria, kuten CFM56-2 ja CFM56-5B, nähdään että teho on kasvanut. Kuitenkin vielä uudemmat 2010-luvulla kehitetyt moottorit ovat painavempia, mutta niiden teho on silti alhaisempi. Tämä johtuu osaksi konemallista, jolle moottorit ovat suunniteltu, sillä pienemmät koneet eivät tarvitse niin suurta tehoa. Painon nousua voi selittää moottoreiden koon kasvulla, etenkin puhallinosaa on haluttu suurentaa ohivirtaussuhteen kasvattamiseksi. Tämän avulla moottorin hyötysuhde kasvaa, koska pienempi osa moottorin liikuttamasta ilmasta kulkee itse moottorin ytimen läpi, jossa palotapahtuma sijaitsee, jolloin polttoaineen kulutusta ja päästöjä saadaan pienennettyä. Tämän muutoksen mahdollistaa kehitys moottoriteknologiassa, joka mahdollistaa itse moottorin ytimen hyötysuhteen

parantamisen, jolloin teho riittää isompien puhallinten pyörittämiseen. Taulukossa viimeisenä on myös pienlentokoneissa yleisesti käytetty Lycomingin valmistama mäntämoottori.

Taulukko 1: Moottoreiden vertailu

Malli	Valmistusvuosi	Teho N	Paino kg	Teho/painosuhte N/kg
Lycoming O-320-E2D (mäntämoottori)	1950-luku	2060	110	19
JT3D	1950-luku	75616	1882	40
CFM56-2	1970-luku	97900	2000	49
CFM56-5B	2000-luku	147000	2400	61
LEAP-1A24	2010-luku	107000	2900	37
PW1124G1-JM	2010-luku	107000	2900	37

4 TULOKSET

Uusia moottoritekologioita kehittämällä valmistajat pyrkivät vähentämään lentoliikenteen päästöjä sekä polttoaineenkulutusta. Monia uusia projekteja on aloitettu uusien innovatiivisten moottorien ja ratkaisujen kehittämistä varten. Moottoreiden ohivirtaussuhdetta pyritään kasvattamaan, sekä optimoimaan moottorin palotapahtumaa sekä ilman virtausta ahtimen ja turbiinin läpi. Myös ulkoisia puhaltimia on kehitetty, jossa moottori pyörittää kahta ulkoista vastakkain pyörivää lapaa, jolla pitäisi teoriassa pystyä saavuttamaan hiljaisempi käyntiääni sekä suurempi lentonopeus. Myös polttoainetalouden pitäisi parantua noin 25%-30%. Nämä kuitenkin ovat vain arvioita, sillä moottori ei ole vielä valmistunut kehityksestä. Puhaltimen nopeutta on myös yritetty optimoida laittamalla se erillisen vaihteiston perään, joka hidastaa sen nopeutta itse moottorit ytimeen verrattuna, joka parantaa puhaltimen hyötysuhdetta huomattavasti. Tällä on teoriassa mahdollista saavuttaa 20% etu kulutuksessa. Myös perinteisiä moottoreita kehittämällä on saavutettu 16% parannus polttoainetaloudessa. (Peeters, 2005)

TF33 ja CFM56-2 moottoreiden välinen tehoero on noin 27%, joista CFM on tehokkaampi. CFM on myös noin metrin lyhyempi, mutta sen leveys ja korkeus kasvaa, sillä suuremman ohivirtaussuhteen myötä moottorin puhaltimen koko kasvaa, joka kasvattaa moottorin ulkomittoja. (Aircraft Database) TF33 ja CFM56-2 moottoreiden vertailuun hyvä kohde on Yhdysvaltain Ilmavoimien käyttämä KC-135 Stratotanker ilmatankkaus kone, joka pohjautuu Boeing 707 matkustajakoneeseen. Kyseisessä konemallissa on aikojen saatossa käytetty kumpaakin TF33 sekä CFM56 moottoria. Moottoreiden taloudellisuuden vertailu itsenäisenä yksikkönä on hankalaa, sillä konemalli, johon moottori on asennettu, vaikuttaa paljon. Tässä kuitenkin voidaan vertailla moottoreiden toimintaa samassa konemallissa, jolloin saadaan tarkempaa tietoa itse moottoreiden toiminnan eroista. Moottoreiden polttoaineenkulutus laski keskiarvolta 27% vaihdettaessa vanhoista TF33 moottoreista uudempiin CFM56 moottoreihin. Myös moottoreiden melu laski 98% vähentäen huomattavasti lentokentän ympäristöön aiheutuvaa meluhaittaa. Myös koneen kantokapasiteetti lisääntyi tehonlisäyksen myötä. Kuitenkin nämä kyseiset CFM56-2 moottoritkin ovat jo 1980-luvulta asti käytössä olutta

mallia, joten vielä modernimmat versiot ovat tästäkin tehokkaampia ja taloudellisempia.
(Boeing)

Uusien moottoreiden kehityksessä täytyy myös ottaa huomioon niiden ostohinta ja käyttökustannukset, sekä käyttökohteet. Uusia moottoritekologioita voi joissain tapauksissa olla hankala saada myytyä lentokonevalmistajille, jos monimutkaisuuden takia niistä tulee liian kalliita. Ostohinnan lisäksi huolto- ja ylläpitokulut voivat olla niin kalliita monimutkaisilla moottoreilla, että niiden käyttö liikennelentokoneissa ei ole kannattavaa. Myös huoltoväli sekä luotettavuus voivat kärsiä monimutkaisista ratkaisuista. Tällöin voidaan päätyä käyttämään yksinkertaisempaa, mutta halvempaa sekä toimivaksi todettua mallia, vaikka polttoaineenkulutus olisi suurempi. Käyttökohteen valinta on myös tärkeää, sillä erikokoisissa lentokoneissa käytetään eritehoisia ja -kokoisia moottoreita. Jos jossain tietyssä segmentissä on paljon vaihtoehtoja, voi uusi moottori jäädä muiden vaihtoehtojen jalkoihin.

5 YHTEENVETO

Kaasuturbiinien kehitys ilmailukäyttöön alkoi laajassa mittakaavassa toisen maailmansodan aikaan sotilasilmailun käyttötarkoituksia varten. Sodan jälkeen kehitettyä teknologiaa alettiin myös soveltaa siviilikäyttöön sen monien hyötyjen ansiosta. Moottoreita kehitettiin monenlaisia eri käyttötarkoituksiin; aksiaali- ja radiaaliturbiineja isompiin ja nopeampiin lentokoneisiin, potkuriturbiineja pienempiin lentokoneisiin ja helikoptereihin, jälkipolttimella varustettuja malleja erittäin suuriin tehontarpeisiin, sekä taloudellisia vaihtoehtoja matkustajakoneisiin. Lentoliikenteen päästöt sekä polttoaineenkulutus ovat tänä päivänä erittäin tärkeä aihe, sillä matkustajalentoja lentää erittäin paljon kaiken aikaa, jolloin niiden päästöjä laskemalla saataisiin isoja ilmastollisia hyötyjä, sekä myös rahallisia säästöjä polttoaineen kulutuksen vähentämisen kautta.

Työssä tarkasteltiin kaasuturbiinien käyttöä ilmailukäytössä. Saatiin selville niiden historian vaiheita alkukehityksestä nykyaikaan. Selvitettiin myös käyttökohteita, sekä eri tyyppisiä ja niiden ominaisuuksia. Moottoreiden vikaantumismekanismia sekä huoltoon liittyviä seikkoja käytiin läpi. Moottoreiden vertailussa saatiin selville erityyppisten ja eri käyttökohteiden moottoreiden tehoja.

LÄHDELUETTELO

- Aainsqatsi, K. (6.5.2008). Turbofan operation - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turbofan_operation.svg?uselang=fi
- Aerotime hub. (14.10.2022). Who are the world's largest aircraft engine manufacturers? - <https://www.aerotime.aero/articles/32417-who-are-the-world-s-largest-aircraft-engine-manufacturers>
- Aircraft Database. (julkaisuaika tuntematon). CFM56-2 - <https://aircraft-database.com/database/engine-models/cfm56-2>
- Aircraft Database. (julkaisuaika tuntematon). JT3D - <https://aircraft-database.com/database/engine-models/jt3d-1>
- Boeing. (julkaisuaika tuntematon). KC-135 Stratotanker - <https://web.archive.org/web/20110629014517/http://www.boeing.com/defense-space/military/kc135-strat/index.html>
- Carter, T. (2004). Common failures in gas turbine blades. Engineering Failure Analysis, 12, 237-247 - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630704000792>
- CFM International. (julkaisuaika tuntematon). CFM56 - https://www.cfmaeroengines.com/wp-content/uploads/2019/12/Brochure_CFM56_2018.pdf

- Dahl, J. (16.12.2007). Jet engine - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet_engine.svg
- Delta TechOps. (julkaisuaika tuntematon). CFM56-5B Engine - <https://deltatechops.com/engines/cfm56-5b/>
- National Air and Space Museum. (julkaisuaika tuntematon). CFM International CFM56-2 Turbofan Engine - https://www.si.edu/object/cfm-international-cfm56-2-turbofan-engine%3Anasm_A19900042000
- National Air and Space Museum. (julkaisuaika tuntematon). Pratt & Whitney JT3D-1 Production Prototype Turbofan Engine - https://airandspace.si.edu/collection-objects/pratt-whitney-jt3d-1-production-prototype-turbofan-engine/nasm_A19721331000
- Peeters, P., Middel, J., Hoolhorst, A. (2005). Fuel efficiency of commercial aircraft. Transport & Environment - https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/05/2005-12_nlr_aviation_fuel_efficiency.pdf
- Pratt & Whitney. (julkaisuaika tuntematon). TF33 Engine - <https://www.prattwhitney.com/en/products/military-engines/tf33/>
- Tirpak, A. (5.4.2023). It's Official: The Re-Engineed B-52 Will be the B-52J. Air & Space Forces Magazine - <https://www.airandspaceforces.com/re-engined-b-52-b-52j/>