

Juho Halttunen

**POTKURITURBIINI- JA
DIESELMOOTTOREIDEN TEKNINEN
TARKASTELU JA VERTAILU
LENTOKONEKÄYTÖSSÄ**

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Väitöskirjatutkija Pirkka-Olavi Ulmanen
Tammikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Juho Halttunen: Potkuriturbiini- ja dieselmootoreiden tekninen tarkastelu ja vertailu
lentokonekäytössä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Konetekniikka
Tammikuu 2021

Työssä on tutkittu diesel- ja potkuriturbiinimootoreiden toimintaa. Tämän lisäksi on tutkittu, millaisia suoritusarvoja esiintyy potkuriturbiini- ja dieselmootorilentokoneissa ja miten nämä suoritusarvot eroavat toisistaan. Työssä on tutkittu myös Diamond DA42 ja Pilatus PC – 12NG lentokoneiden suoritusarvoja, sekä niissä käytettävien moottoreiden huoltotoimenpiteitä.

Työn tulokset viittaavat siihen, että potkuriturbiinilentokoneet ovat merkittävästi kalliimpia operoida ja hankkia kuin dieselmootorilentokoneet. Potkuriturbiinilentokoneiden suoritusarvot ovat dieselmootorilentokoneita parempia. Jos lentokoneelta vaaditaan suurta kuormankantokykyä, mutta suoritusarvoilta ei tarvitse päästä suorien suihkumootoreiden tasolle, on valittava potkuriturbiini. Dieselmootorit eivät sovellu suurten lentokoneiden voimanlähteiksi, koska moottorin painon ja tehon suhde pysyy suurin piirtein samana moottorin koon kasvaessa. Potkuriturbiinimoottorin painon kasvaessa potkuriturbiinin teho kasvaa painoon nähden. Tämän takia potkuriturbiinin koon kasvattaminen on huomattavasti kannattavampaa kuin dieselmootorin. Huomioitavaa tietenkin on, että työssä esiintyy vain kourallinen kummankin moottorityypin moottoria ja kummankin moottorityypin lentokonetta. Tulevaisuudessa isot dieselmootorilentokoneet kuten, Celera 500L saattavat korvata pienet potkuriturbiinilentokoneet.

Johtopäätöksenä työstä voi tehdä sen, että vaikka potkuriturbiinilentokoneet ovat kalliimpia operoida on niille kuitenkin tällä hetkellä tarvetta. Kun organisaatio, kuten lentoyhtiö tai viranomainen operoi useammalla potkuriturbiinilentokoneella, voidaan säästää moottorihuollon kustannuksissa yksittäisen lentokoneen kohdalla. Jos mäntämoottorilentokoneella ei päästä riittäviin suoritusarvoihin joudutaan etsimään ratkaisua toisen moottorityypin lentokoneista kustannuksien kasvamisesta huolimatta.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. DIESELMOOTTORIT	2
2.1 Toiminnan pääpiirteet.....	3
2.2 Yleisesti käytetyt dieselmoottorit	5
2.3 Dieselmoottorilentokoneet.....	6
3. POTKURITURBIINIMOOTTORIT.....	8
3.1 Toiminnan pääpiirteet.....	9
3.2 Yleisesti käytetyt potkuriturbiinimoottorit.....	11
3.3 Potkuriturbiinilentokoneet	12
4. VERTAILUA.....	15
4.1 Diesel- ja potkuriturbiinimoottoreiden vertailu	15
4.2 Diesel- ja potkuriturbiinilentokoneiden vertailu.....	16
5. DIAMOND DA42	17
5.1 Tekniset tiedot Diamond DA42.....	17
5.2 E4-sarjan dieselmoottorit	17
5.2.1 E4 ja E4P dieselmoottoreiden tekniset tiedot	18
5.2.2 Huoltotoimenpiteet E4 dieselmoottorille	18
5.3 Yhteenveto DA42 lentokoneesta ja sen moottorista	19
6. PILATUS PC – 12NG.....	21
6.1 Tekniset tiedot Pilatus PC-12NG.....	21
6.2 PT6-sarjan potkuriturbiinimoottorit.....	21
6.2.1 PT6-sarjan potkuriturbiinien teknisiä tietoja	22
6.2.2 Huoltotoimenpiteet potkuriturbiinimoottorille	22
6.3 Yhteenveto Pilatus PC – 12NG lentokoneesta ja sen moottorista	25
7. DA42 JA PC-12NGX LENTOKONEIDEN JA NIIDEN MOOTTOREIDEN VERTAILU	
26	
8. YHTEENVETO.....	28
JOHTOPÄÄTÖKSET.....	29
LÄHTEET	30

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	Sertifioitujen dieselmoottoareiden tietoja (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for TAE 125 series engine 2020, s. 6),(EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for DIESELJET TDA CR 2016, s. 5),(EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for Austro Engine E4 series engines 2015, s. 5),(EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for SR305 Serier 2019, s. 6),(CONTINENTAL AEROSPACE TECNOLOGIES, Continental CD-300 Jet-A),(EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for RED A03 2014, s. 4)	5
Taulukko 2.	Dieselmoottorilentokoneiden suoritusarvoja (DIAMNODAIRCRAFT DA42, 2020), (DIAMNODAIRCRAFT DA62, 2020), (Wikipedia Alenia Aermacchi Sky – Y, 2020), (DIAMNODAIRCRAFT DA50, 2020), (Wikipedia Yakovlev Yak – 152, 2021), (Otto Aviation CELERA-500L,2020)	7
Taulukko 3.	Yleisesti käytettyjä potkuriturbiinimoottoareita (Wikipedia Ivchenko AI – 450S, 2020), (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for M601/H80 series engine, 2017, s. 7), (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PT6A – 67 Series engines, 2019, s. 7), (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PW100 series engines, 2018, s. 8 – 9), (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for TP400 – D6 Engine, 2013, s. 4)	11
Taulukko 4.	Potkuriturbiinilentokoneiden toiminta-arvoja (DIAMNODAIRCRAFT DART 450, 2020), (Aerocompinc Comp Air 7), (Rob, 2020) (Pilatus - Aircrafts PC-12NGX, 2020), (ATR-72-600, 2015, s. 2.), (Wikipedia M400, 2021)	14
Taulukko 5.	DIAMOND DA42 ja Pilatus PC – 12NGX suoritusarvot rinnakkain	26
Taulukko 6.	Austro Engine E4 dieselmoottorin ja PT6A – 67P moottorin suoritusarvoja rinnakkain	27

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Dieselsykli termodynaamisesti esitetty paineen ja tilavuuden avulla (ei mittakaavassa). Muokattu kuvasta (Daidzic, N. et al. (2014) Diesel engines for light-to-medium helicopters and airplanes (Editorial). International journal of aviation, aeronautics, and aerospace. [Online] 1 (3), 2–. s. 6).....</i>	3
Kuva 2.	<i>Dieselsyklin neljä vaihetta kuvattuna moottorin liikkeenä.</i>	4
Kuva 3.	<i>Suihkumoottorin läpileikkaus. Muokattu kuvasta (Koivisto, R. & Jokinen, J. (2008) Suihkumoottorit. 2., tark. p. Helsinki: Opetushallitus. S. 36).....</i>	10
Kuva 4.	<i>Braytonin kiertoprosessi esitetty paineen ja tilavuuden avulla (ei mittakaavassa). Muokattu kuvasta (Koivisto, R. & Jokinen, J. (2008) Suihkumoottorit. 2., tark. p. Helsinki: Opetushallitus. s. 39).....</i>	11

1. JOHDANTO

Diesel- ja potkuriturbiinimoottoreista löytyy paljon niiden toimintaperiaatteita käsittelevää materiaalia. Kuitenkaan materiaalia etsiessä ei ole tullut vastaan kirjaa tai tutkimusta, jossa niiden eroja olisi selkeästi vertailtu. Aihe on tärkeä, koska tulevaisuudessa tullaan entistä enemmän tarkkailemaan moottoreiden päästöjä ja ekologisuutta, joka vaikuttaa taas moottorin elinkaarikustannuksiin. Aihetta kuuluu tutkia myös sen takia, että voidaan perustella päätöksiä, miksi halutaan valita juuri tietty moottorityyppi tiettyyn lentokoneeseen. Dieselmoottorit ja potkuriturbiinimoottorit jakavat suuren alueen, kun tarkastellaan moottoreiden toimintarajoja (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 28). Tämän työn tarkoituksena on selvittää moottoreiden eroja toimintaperiaatteeltaan ja millaisessa lentokonekäytössä eri moottorityyppejä kannattaa käyttää. Työssä tarkastellaan myös näille moottorityypeille tehtäviä yleisiä huoltotoimenpiteitä.

Työ on jaettu kahdeksaan osaan, joista ensimmäisessä tarkastellaan dieselmoottorin toimintaperiaatetta yleisesti, millaisia ovat tyypillisesti käytetyt dieselmoottorit ilmailukäytössä sekä sitä, millaisissa lentokoneissa dieselmoottoreita käytetään. Tämän jälkeen käydään läpi potkuriturbiinimoottorin toimintaperiaatetta yleisesti, millaisia ovat tyypillisesti käytetyt potkuriturbiinimoottorit ilmailukäytössä ja millaisissa lentokoneissa potkuriturbiinimoottoreita käytetään. Sitten vertaillaan diesel- ja potkuriturbiinimoottoreiden eroja sekä moottori, että lentokone tasolla.

Viidennessä osassa tarkastelen Diamond DA42 lentokoneen ominaisuuksia. Tarkastelen myös tässä lentokoneessa käytetyn Austro Engine E4 dieselmoottorin ominaisuuksia, sekä sen huoltotoimenpiteitä. Tämän jälkeen kuudennessa osassa tarkastelen Pilatus PC – 12 NG ominaisuuksia, sekä tämän lentokoneen käyttämän potkuriturbiinimoottorin ominaisuuksia ja huoltoja.

Seitsemännessä osassa vertailen valitsemani dieselmoottorilentokoneen DA42 ja potkuriturbiinilentokoneen PC – 12 NGX eroja lentokone ja moottori tasolla. Lopuksi kokoan kerätyt tiedot yhteen ja teen johtopäätöksiä diesel- ja potkuriturbiinimoottoreista, sekä lentokoneista, joissa eri moottorityyppejä käytetään.

2. DIESELMOOTTORIT

Dieselmoottorit ovat polttomoottoreita, jotka kehitettiin vuonna 1892. Dieselmoottorit eroavat tavallisista moottoreista siten, ettei niissä ole erillistä sytytystulppaa polttoaineen ja ilman seoksen sytyttämiseen. (Sanders 2007, s. 10) Lentokonekäytössä olevien dieselmoottoreiden puristussuhde on noin 18:1. Tällöin ilmanseoksen lämpötila nousee 500 – 600 celsiusasteiseksi (Daidzic et al. 2014, s. 5–7). Ensimmäistä kertaa dieselmoottoreita käytettiin lentokoneissa 1930-luvulla (Sanders 2007, s. 29).

Dieselmoottorit ovat hyvin houkuttelevia tehon lähteitä, koska niillä on pieni polttoaineen kulutus. Tämän lisäksi dieselmoottorit voivat käyttää useita erilaisia halpoja polttoaineita. Tämä onkin johtanut dieselmoottoreiden tutkimuksiin, joissa tutkitaan niiden soveltuvuutta lentokonekäytössä. Dieselmoottoreilla on myös kyky käyttää polttoaineena lentokerosiinia, joka tekeekin niistä hyvin soveltuvia siviili- ja sotilaskäyttöön. (Farokhi 2014, s. 286–287)

Uudet dieselmoottorit ovat kilpailukykyisiä hevosvoimiensa ja kokonsa puolesta vastaaviin ottomoottoreihin. Näiden dieselmoottoreiden teho on 100 – 400 hevosvoimaa ja niiden break – specific fuel consumption kulutus on 0.1 lb/hp/hr vähemmän kuin ottomoottoreilla. (Farokhi 2014, s. 287) Bsfk kulutus tarkoittaa, kuinka paljon moottori kuluttaa polttoainetta tunnin aikana yhtä hevosvoimaa kohden. Tämän yksikkö on kulutetun polttoaineen massa / hevosvoima / tunti.

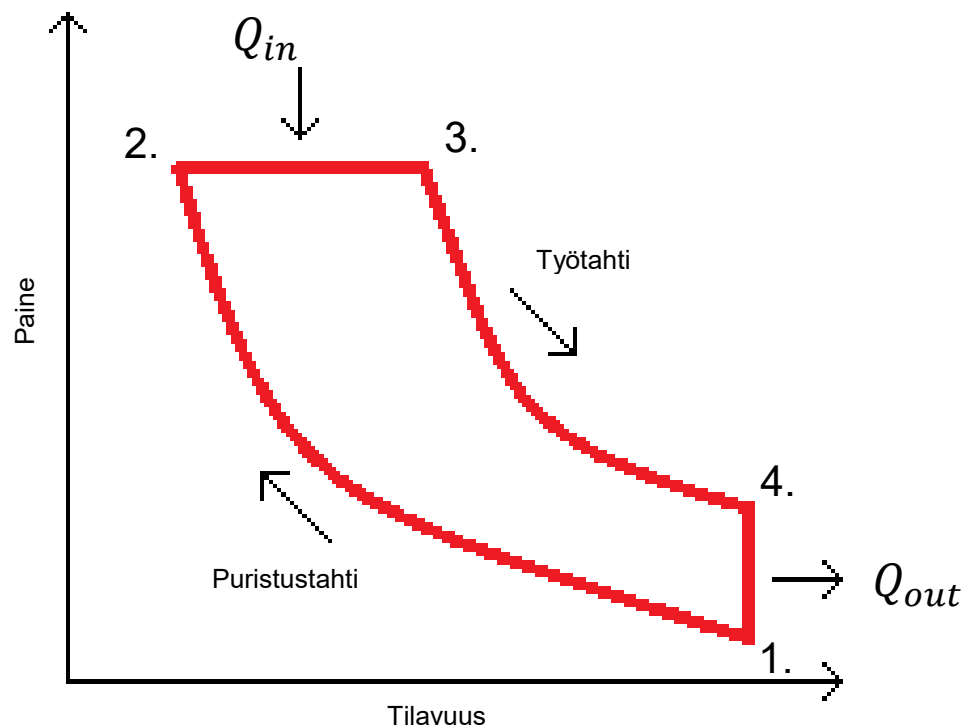
Dieselmoottoreiden hyviä puolia ovat polttoaineen helppo saatavuus, pieni polttoaineen kulutus (vähemmän kuin 0.4 lb/hp/h, muissa yleisesti käytetyissä vastaavissa ottomoottoreissa 0.57 lb/hp/h), pieni polttoaineen hinta, yksinkertainen polttoaineen syöttö, vähemmän pakokaasuja ja luotettavuus. Dieselmoottorin huonoja puolia ovat vaikea käynnistettävyyys matalissa lämpötiloissa, suurempi paino kuin vastaavissa ottomoottoreissa sekä korkeampi käyttölämpötila. (Farokhi 2014, s. 287–288)

Dieselmoottoreita on kaksi- ja nelitahtisia. Tässä työssä ei kuitenkaan tarkastella ollenkaan kaksitahtisia dieselmoottoreita, koska niitä käytetään pääosin vain suurten laivojen moottoreina. (Sanders 2007, s. 19)

2.1 Toiminnan pääpiirteet

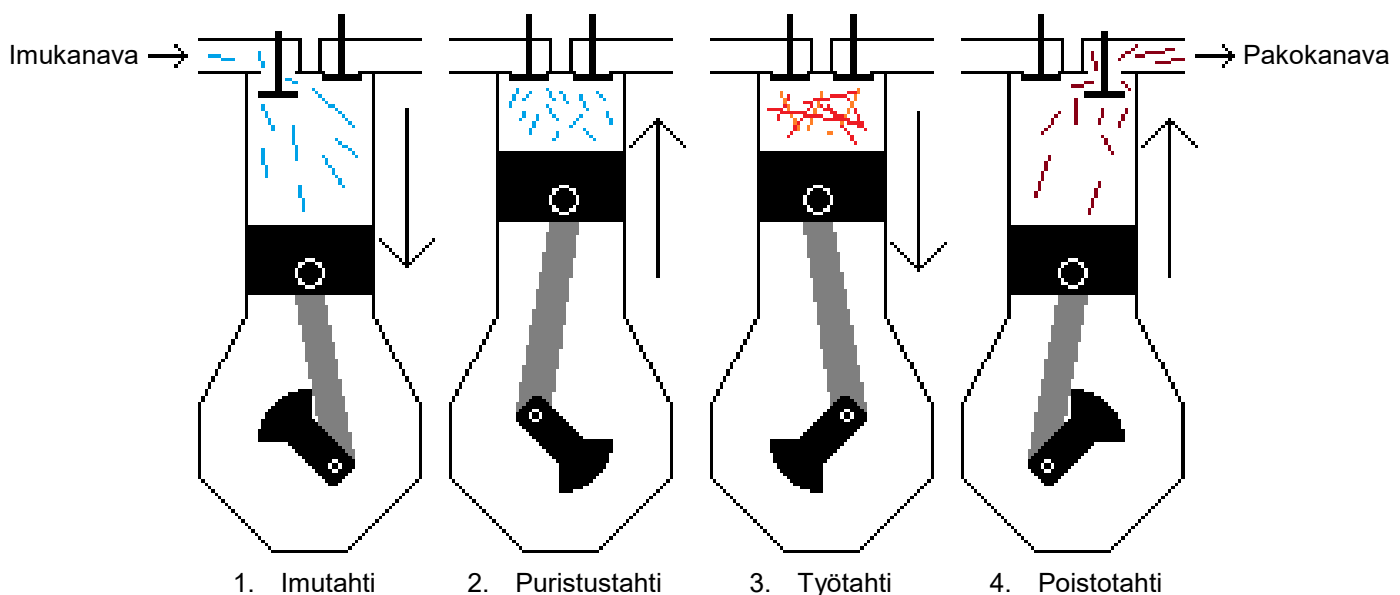
Dieselmoottorin toiminta perustuu termodynamiikan perusteisiin. Energiaa moottori saa polttoaineeseen sitoutuneesta kemiallisesta energiasta. Dieselmoottorin kiertoprosessin aikana moottorin sisällä tapahtuu tilamuutoksia. Kiertoprosessilla tarkoitetaan, että moottorissa toistuu samat vaiheet syklinä. Tilamuutoksella tarkoitetaan termodynaamista tilannetta, jossa useampi kuin yksi suure muuttuu. Näitä muuttuvia suureita ovat paine, lämpötila ja tilavuus. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 18 – 19)

Termodynamiikan Gay-Lussacin lain mukaan tilavuuden muutos on suoraan verrannollinen lämpötilaan. Tämän seurauksena tilavuuden pieneneminen kasvattaa lämpötilaa. Vastaavasti lämpötilan noustessa paine nousee, jos tilavuus pysyy vakiona. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 21 – 22) Nelitahtidieselmoottorin toiminta voidaan jakaa neljään vaiheeseen. Tätä dieselmoottorin toimintaa kutsutaan dieselsykliksi (Kuva 1) (Daidzic et al. 2014, s. 6).



Kuva 1. Dieselsykli termodynaamisesti esitetty paineen ja tilavuuden avulla (ei mittakaavassa). Muokattu kuvasta (Daidzic, N. et al. (2014) Diesel engines for light-to-medium helicopters and airplanes (Editorial). International journal of aviation, aeronautics, and aerospace. [Online] 1 (3), 2–. s. 6)

Nelitahtidieselmoottorin ensimmäistä vaihetta kutsutaan imutahtiksi. Tällöin imuventtiili aukeaa ja ilma menee imukanavaa pitkin sylinteriin, kun mäntä vetäytyy kampiakselia kohti. Toista vaihetta kutsutaan puristustahtiksi. Tässä vaiheessa mäntä liikkuu kampiakselista poispäin ja kasvattaa ilmanpainetta. Termodynamiikan lakien mukaan tästä seuraa ilman lämpötilan kasvaminen. Kolmatta vaihetta kutsutaan työtahtiksi. Tällöin mäntä on sylinterin yläosassa ja sylinteriin ruiskutetaan polttoainetta. Polttoaineseos syttyy kohonneen lämpötilan takia. Kun polttoaineseos palaa, se kasvattaa sylinterin sisällä olevaa painetta ja työntää mäntää kampiakselia kohti. Viimeistä vaihetta kutsutaan poistotahtiksi. Tässä vaiheessa pakokanava aukeaa ja päästää pakokaasut pois sylinteristä. Tämä männän ylös- ja alaspäin liikkuminen muutetaan pyöriväksi liikkeeksi kampiakselin avulla (Kuva 2). (Sanders 2007, s. 13) Kuvassa 2 oleva nuoli kertoo mihin suuntaan mäntä liikkuu. Kuvassa mäntä on musta neliskanttinen kappale, joka on yhdistetty harmaalla männänvarrella kampiakseliin. Kampiakseli on kuvan alaosassa oleva musta kappale, johon männänvarren toinen pää on kiinnittynyt.



Kuva 2. Dieselsyklin neljä vaihetta kuvattuna moottorin liikkeenä.

2.2 Yleisesti käytetyt dieselmoottorit

Sertifioituja dieselmoottoreita ilmailukäytössä ovat esimerkiksi TAE 125 sarjan moottorit, DIESELJET TDA CR, Austro Engine E4 sarjan moottorit, SR305 sarjan moottorit, Continental CD-300 Jet-A ja RED A03 sarjan moottorit. Edellä mainittujen moottoreiden tietoja on listattu taulukossa 1. Osaa taulukon 1 moottoreista käytetään taulukossa 2 esiintyvissä lentokoneissa.

Taulukko 1. *Sertifioitujen dieselmoottoreiden tietoja (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for TAE 125 series engine 2020, s. 6),(EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for DIESELJET TDA CR 2016, s. 5),(EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for Austro Engine E4 series engines 2015, s. 5),(EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for SR305 Series 2019, s. 6),(CONTINENTAL AEROSPACE TECHNOLOGIES, Continental CD-300 Jet-A),(EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for RED A03 2014, s. 4)*

Valmistaja	Malli	Jatkuva maksimiteho	Paino	Teho/Paino
Technify Motors	TAE 125-02-114	114 kW (153 hp)	134 kg	0.85 kW/kg
Austri Engine	E4	123.5 kW (165.6 hp)	185	0.67 kW/kg
Austro Engine	E4P	132 kW (177 hp)	185 kg	0.71 kW/kg
DieselJet	TDA CR 1.9 8V	118 kW (160 hp)	205 kg	0.58 kW/kg
SMA	SR305-260	194 kW (260 hp)	206 kg	0.94 kW/kg
Continental	CD-300 Jet-A	221 kW (296.4 hp)	248.5 kg	0.89 kW/kg
RED Aircraft	RED A03	368 kW (500 hp)	363kg	1.01 kW/kg

Yleisesti käytettyjen dieselmoottoreiden tehoalue on 114kW (153 hp) – 368 kW (500 hp). Moottoreiden paino on 134 – 362 kg. Tehon ja painon suhde on parhaimmillaan 1.01 kW/kg. Taulukossa 1 moottorit on asetettu sellaiseen järjestykseen, että painavin dieselmoottori on alhaalla ja kevyin ylhäällä. Taulukosta nähdään, ettei tehon ja painon suhde kasva, vaikka moottorin paino kasvaisi. Tehon ja painon suhteella tarkoitetaan paljonko moottori tuottaa tehoa yhtä kilogrammaa kohden. Tässä tarkastelussa täytyy huomioida, että tarkasteltujen moottoreiden lukumäärä on hyvin pieni.

2.3 Dieselmoottorilentokoneet

Dieselmoottoreiden käyttö on yleistynyt viimevuosien aikana merkittävästi. Tämän takia niitä voidaan sanoa uudeksi tulokkaaksi ilmailualalla (Daidzic et al. 2014, s. 15). Dieselmoottoreissa on monia hyviä puolia, kuten edellä on jo kerrottu.

Dieselmoottoreita käytetään pienissä yleisilmailulentokoneissa kuten DA40 – TDI, DA42 – IV, DA52 ja DA62. Taulukossa 1 listattuja moottoreita käytetään lentokoneissa Diamond DA42, Diamond DA62, Alenia Aeronautica Sky-y (UAV), DIAMOND DA50 ja Yak – 52. Taulukossa 2 on esitetty näiden lentokoneiden suoritusarvoja. Taulukko on esitetty sivulla 7. Taulukkoa 2 varten on tehty yksikkömuunnoksia seuraavasti:

Celera 500L lentokoneen kulutus on muutettu kaavan 1 mukaan haluttuun yksikköön. Otto Aviation on ilmoittanut Celera 500L kulutuksen 18-25 mi/gal. Tämä voidaan kaavan 1 mukaan muuttaa yksikköön l/h, kun tiedetään, että 1 gal= 3.79 l (UnitConverters.net, 2021), 1 mi = 1.609 km (Metric Conversions, 2021) ja taulukon 2 mukaan Celeran nopeus on 740 km/h.

$$\frac{V}{s} \times v_{nopeus} = \frac{3.79 \text{ l/gal}}{1.609 \text{ km/mi} \times X \text{ mi/gal}} \times 740 \text{ km/h} = \text{kulutus l/h} \quad (1)$$

Kaavassa V on polttoaineen tilavuus litroina. S on matka kilometreinä, jonka lentokone kulkee ja v_{nopeus} on nopeus. Kun X:n paikalle sijoitetaan 18 miles/gallona ja 25 miles/gallona saadaan tulokseksi 69.7 – 96.8 l/h.

Taulukon 2 tuloksista voidaan tehdä monia johtopäätöksiä. Tällä hetkellä tunnetuimpia dieselmoottorilla varustettuja koneita ovat Diamond Aircraftin valmistamat lentokoneet. Taulukossa esiintyvien Diamond -lentokoneiden maksiminopeus on 335 – 365 km/h. Näiden lentokoneiden matkalentopituus on 1389 – 2376 km ja nämä koneet kuluttavat polttoainetta 34.1 – 44.7 l/h. Taulukossa esiintyvien lentokoneiden lentonopeus on 260 – 740 km/h. Merkittävin ero on Celera 500L lentokoneen matkalentopituudessa. Sen matkalentopituus on moninkertainen muiden matkalentopituuteen verrattuna. Myös Celeran maksimilentokorkeus on muita huomattavasti suurempi.

Taulukko 2. *Dieselmoottorilentokoneiden suoritusarvoja (DIAMNODAIRCRAFT DA42, 2020), (DIAMNODAIRCRAFT DA62, 2020), (Wikipedia Alenia Aermacchi Sky – Y, 2020), (DIAMNODAIRCRAFT DA50, 2020), (Wikipedia Yakovlev Yak – 152, 2021), (Otto Aviation CELERA-500L,2020)*

Lentokone	Moottori	MTOW (maksimilento- lähtöpaino)	Kuormankantokyky	Maksimi lentonopeus	Maksimi lentokorkeus	Kulutus	Istuinpaikkoja	Maksimi matkalentopituus
DA42	2 kappaletta Austro Engine E4	1 999 kg	589 kg	365 km/h	5 486 m	39.4 l/h	4	2 250 km
DA62	2 kappaletta Austro Engine E4P	2 300 kg	710 kg	356 km/h	6 096 m	44.7 l/h	7	2 376 km
Sky-y	TDA CR 1.9 8V	1 200 kg	–	260 km/h (matkalento nopeus)	7 600 m	–	0	–
DA50	Continental CD-300 Jet-A	1 999 kg	559 kg	335 km/h	6 069 m	34.1 l/h	5	1 389 km
Yak-152	RED A03	1 490 kg	–	500 km/h	4 000 m	–	2	1 500 km
Celera 500L	RED A03	–	–	740 km/h (matkalento nopeus)	9 144 m	69.7 – 96.8 l/h	8	8 334 km

3. POTKURITURBIINIMOOTTORIT

Potkuriturbiinien kehittämisen aloitti Dr. Alan A. Griffithsin (1895 – 1963) vuonna 1925. Hän kehitti potkuriturbiinimoottoria tuulitunnelikoe vaiheeseen asti, mutta ilmailuteollisuus ei ollut kiinnostunut tästä uudesta moottorityypistä. Potkuriturbiinimoottorin kehitystyö keskeytyi Griffithsin sairastuttua masennukseen. Myöhemmin Frank Whittle (1907–1996) jatkoi potkuriturbiinimoottorin kehittämistä ja patentoi sen vuonna 1930. Molemmat kehittäjät olivat Iso-Britanniasta. Ensimmäinen potkuriturbiinimoottorin voimalla toimiva lentokone oli kaksimoottorinen Meteor F.1. Tällä ensimmäisellä potkuriturbiinilentokoneella lennettiin ensimmäisen kerran 20.08.1945. Moottoreina käytettiin Rolls Royce Derwent 2 -suihkumoottoreita, joihin oli alennusvaihteen avulla kiinnitetty potkuri. Ensimmäinen kuljetuskäytössä ollut potkuriturbiinilentokone Vickers Viscount V.630 lensi heinäkuussa vuonna 1958. Ensimmäinen kaupallinen potkuriturbiinilento lennettiin Lontoosta Honoveriin elokuussa vuonna 1951. Tämä lento lennettiin Douglas DC-3 lentokoneella ja lennon operoijana toimi British European Airways. Koneessa oli kaksi Rolls Royce Dart R. Da 3/505 -potkuriturbiinimoottoria. (Hitchens et al. 2015, s.31, 33)

Potkuriturbiinimoottorit ovat kaasuturbiineita, joista otetaan alennusvaihteen ja akselin avulla tehoa potkurille (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 67). Kaasuturbiinilla tarkoitetaan suihkumoottorin ahdinta, polttokammiota ja turbiinia (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 63). Kaasuturbiinina tällaisissa koneissa käytetään tavallista suihkumoottoria. Potkuriturbiinimoottori sopii koneisiin, joiden matkalentonopeusalue on 450 – 750 km/h. Tällaisen voimanlähteen ominaispolttoaineen kulutus on pienempi kuin muissa kaasuturbiinivoimalähteissä. Potkuriturbiini säilyttää tehonsa vielä 6 000 metrin korkeudessa. Potkuriturbiinin työntövoimasta 75 – 95 % tulee potkurista ja loput kaasuturbiinista. Potkuriturbiini on kevyempi kuin vastaavan kokoinen suihkumoottori. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 68)

Potkuriturbiinin hyviä ominaisuuksia ovat moottorin helppo käynnistettävyyden kylmänä ja kaasugeneraattorille välittyvä epäsuorasti potkurin vaihteiston värinä. Maassa liikkuesssa potkurin kierroslukua voidaan pitää pienenä, jolloin melutaso on mahdollisimman pieni ja tällöin potkurin eroosio on vähäistä. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 67)

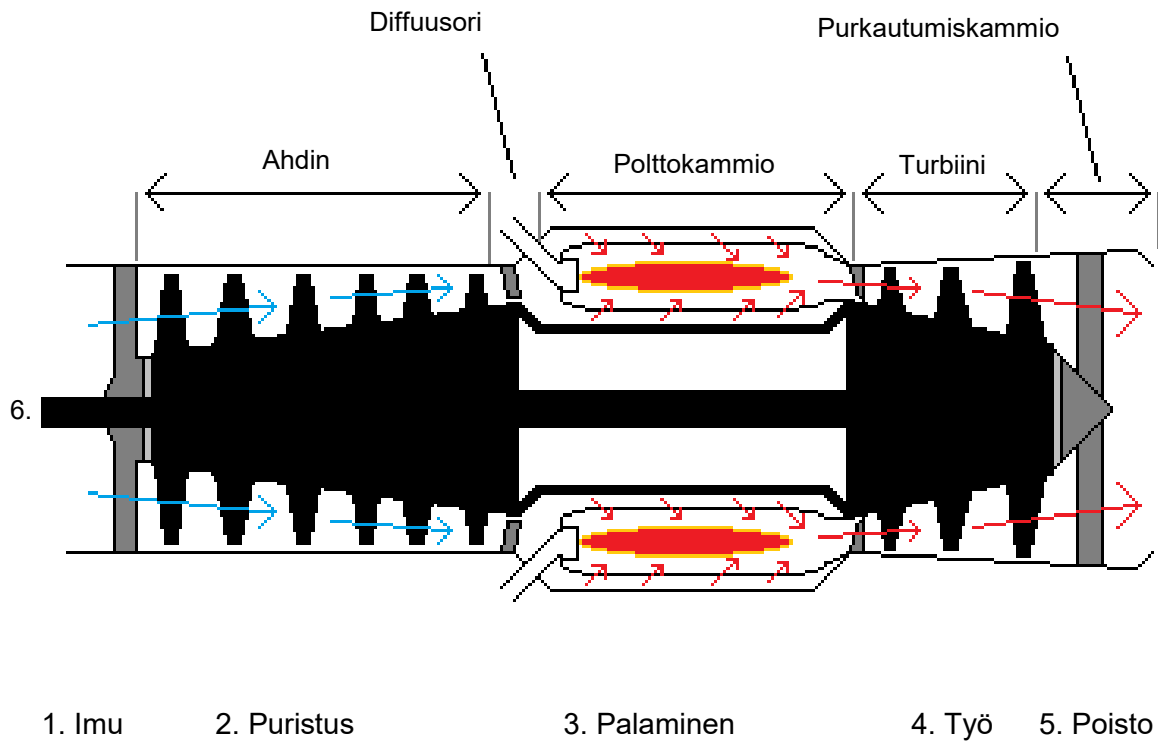
3.1 Toiminnan pääpiirteet

Potkuriturbiinimoottori saa tehonsa kaasuturbiinista. Kaasuturbiini tuottaa työntövoimaa lisäämällä ilmassalle liike-energiaa. Tämä tapahtuu paine- ja lämpöenergian avulla. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 35)

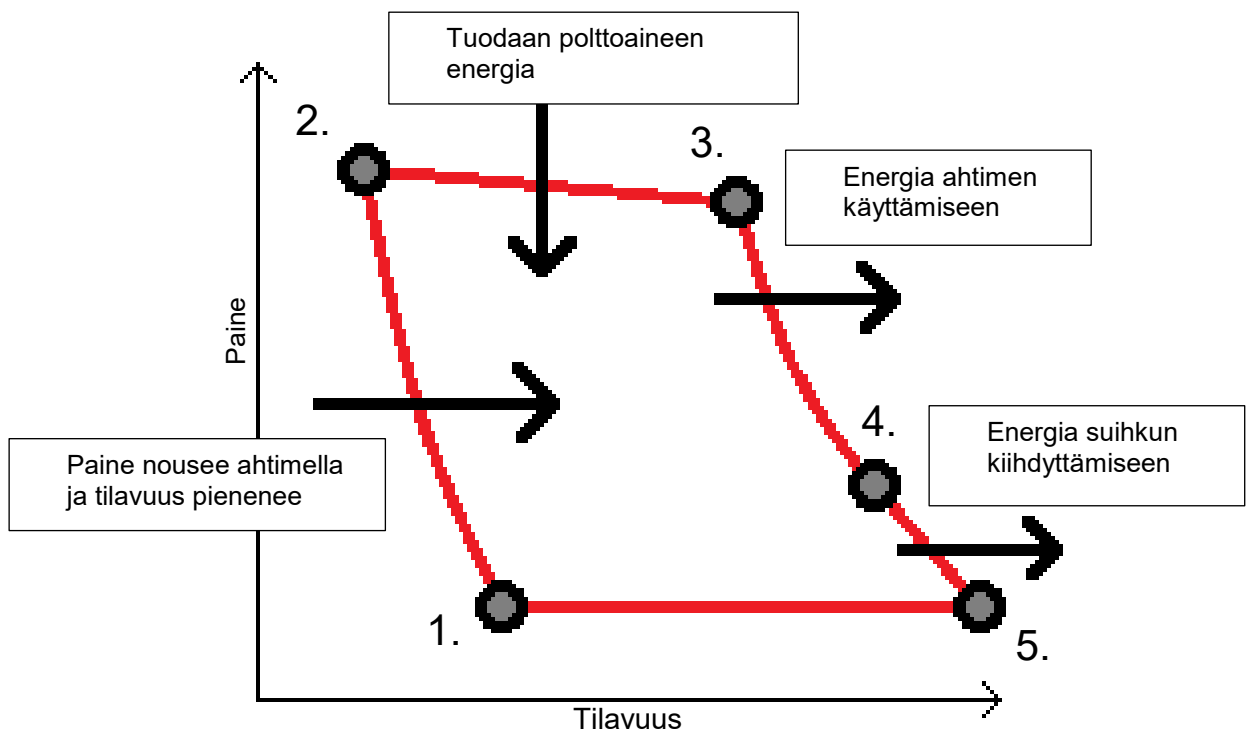
Kaasuturbiinin pääkomponentit ovat ahdin, polttokammio ja turbiini (Farokhi 2014, s 151). Tämän lisäksi potkuriturbiinissa on alennusvaihe ja potkuri (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 67). Potkuriturbiinin merkittävimmät rasitukset tapahtuvat kaasuturbiinin sisällä, jossa on suuria lämpötilan muutoksia ja suuria kierroslukuja. Etenkin roottorin siivet kokevat suurta rasitusta keskipakoisvoiman, aerodynaamisten voimien ja lämpötilan vaihteluiden takia. Suuren rasituksen takia moottorin valmistajan on määrättävä jokaiselle osalle maksimi käyttöaika, jota ei saa ylittää. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 202)

Suihkumoottori polttaa polttoainetta jatkuvana prosessina. Suihkumoottorin vaiheet voidaan jakaa viiteen osaan. Vaiheet ovat 1 imu, 2 puristus, 3 palaminen, 4 työ ja 5 poistovaihe. Suihkumoottorin sisällä jokaisessa osassa paine pysyy lähes vakiona. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 36)

Moottorin toimintavaiheet on esitetty kuvassa 3. Ensimmäisessä vaiheessa moottoriin pyritään tuomaan ilmassaa mahdollisimman laminaarisesti. Tämä tapahtuu imukanavan avulla. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 36) Laminaarisella virtauksella tarkoitetaan ilmapirtausta, jossa on mahdollisimman vähän pyörteitä. Toisessa vaiheessa ilmassa siirtyy ahtimelle, joka nostaa ilmanpaineen polttokammion paineeseen. Tätä vaihetta kutsutaan puristukseksi. Kolmannessa vaiheessa ilmassa kulkee laajenevaan diffuusoriosaan. Diffuusoriosassa ilman nopeus laskee ja staattinen paine nousee. Tämän jälkeen tulee polttokammio, jossa neljännesosaan ilmassaan sekoitetaan polttoainetta. Seoksen palaessa moottorissa olevan ilman lämpötila kasvaa. Ilman lämpötilan kasvaessa paine pysyy lähes vakiona ja termodynamiikan lakien mukaan tilavuus kasvaa. Neljännessä vaiheessa laajeneva kaasu johdetaan suutinsiipien kautta turbiinille, jossa osa energiasta käytetään ahtimen pyörittämiseen. Ylijäänyt liike-energia kasvattaa ilmassan nopeutta, mikä johdetaan viidennessä vaiheessa pois moottorista. (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 38-39) Kuvassa 3 on esitetty suihkumoottorin keskeisimmät osat. Kuvaan on merkattu luvulla 6 kohta, johon potkuriturbiinin alennusvaihe kiinnitettäisiin. Tätä suihkumoottorin prosessia kutsutaan Braytonin kiertoprosessiksi, joka on esitetty kuvassa 4.



Kuva 3. Suihkumoottorin läpileikkaus. Muokattu kuvasta (Koivisto, R. & Jokinen, J. (2008) Suihkumoottorit. 2., tark. p. Helsinki: Opetushallitus. S. 36)



Kuva 4. Braytonin kiertoprosessi esitetty paineen ja tilavuuden avulla (ei mittakaavassa). Muokattu kuvasta (Koivisto, R. & Jokinen, J. (2008) *Suihkumoottorit. 2., tark. p. Helsinki: Opetushallitus. s. 39*)

3.2 Yleisesti käytetyt potkuriturbiinimoottorit

Potkuriturbiineja käytetään voiman lähteenä lentokoneissa, joissa halutaan parempia suoritusarvoja kuin mäntämoottoreilla. Kuitenkaan potkuriturbiini ei kata niin suurta toiminta-aluetta kuin suorat suihkumoottorit (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 28).

Yleisesti käytössä olevia potkuriturbiinimoottoreja on PT-6 sarjan moottorit, M601D-1, TP400-D6, AI-450 S ja PW 127. Edellä mainittujen moottoreiden tietoja on listattu taulukossa 3.

Taulukko 3. *Yleisesti käytettyjä potkuriturbiinimoottoreita (Wikipedia Ivchenko AI – 450S, 2020), (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for M601/H80 series engine, 2017, s. 7), (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PT6A – 67 Series engines, 2019, s. 7), (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PW100 series engines, 2018, s. 8 – 9), (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for TP400 – D6 Engine, 2013, s. 4)*

Valmistaja	Malli	Jatkuva maksimiteho	Paino	Teho/Paino
Ivchenko-Progress	AI-450S	298 kW (400 hp)	120 kg	2.48 kW/kg
WALTER	M601D-1	490 kW (657 hp)	197 kg	2.49 kW/kg
Pratt & Whitney Canada	PT6A-67P	895 kW (1200 hp)	251.2 kg	3.56 kW/kg
Pratt & Whitney Canada	PW127	1864 kW (2500 hp)	480.8 kg	3.88 kW/kg
Europrop International	TP400-D6	7971 kW (10 691 hp)	1 965.1 kg	4.06 kW/kg

Taulukossa esitettyjen potkuriturbiinimoottoreiden teho on 298 kW (400hp) – 7 971 kW (10 691hp). Potkuriturbiinimoottoreiden paino on 120.0 – 1 965.1 kg. Paras tehon ja painon suhde saadaan suurimmalla potkuriturbiinimoottorilla. Taulukossa moottorit on asetettu sellaiseen järjestykseen, että painavin moottori on taulukon alaosassa ja kevyin moottori on taulukon yläosassa. Tästä voidaan selkeästi huomata, että tehon ja painon suhde kasvaa moottorin painon kasvaessa. Lentokonekäytössä tämä on hyvin haluttu

piirre, koska lentokoneista halutaan tehdä mahdollisimman kevyitä. Tässä tarkastelussa täytyy huomioida, että tarkasteltujen moottoreiden lukumäärä on hyvin pieni, kuten dieselmootoreissakin.

3.3 Potkuriturbiinilentokoneet

Potkuriturbiineja käytetään voimanlähteenä lentokoneissa, joissa halutaan suurempaa suorituskykyä kuin mäntämoottorilentokoneissa. Potkuriturbiinilentokoneet ei kuitenkaan kata niin suurta toiminta-aluetta kuin suorilla suihkumoottoreilla varustetut lentokoneet (Koivisto & Jokinen. 2008, s. 28).

Tällaisia potkuriturbiineilla varustettuja lentokoneita on esimerkiksi sotilaskäytössä oleva Pilatus PC-12, CASA C-295 ja Diamond DART 450. Tämän lisäksi potkuriturbiinikoneita käytetään laskuvarjohyppytoiminnassa kuten Comp Air 8 ja Twin Otter. Potkuriturbiinikoneita käytetään myös melko paljon lyhyenmatkan matkustajalentokoneissa kuten ATR-72. Taulukossa 4 on listattu potkuriturbiinilentokoneiden suoritusarvoja. Koneissa on käytössä taulukon 3 mukaisia potkuriturbiinimoottoreita. Taulukko 4 on esitetty sivulla 14. Taulukkoa 4 varten on tehty yksikkömuunnoksia seuraavasti:

ATR-72-600 kulutukseksi on ilmoitettu 762 kg/h (ATR-72-600, 2015). Tämä on muutettu yksikköön l/h kaavan 2 avulla.

$$762 \text{ kg/h} \times 1.25 \text{ l/kg} = 952.5 \text{ l/h} \quad (2)$$

Kaavaan sijoitettu 1.25 l/kg kertoo kuinka paljon yksi kilogramma Jet A polttoainetta vie tilavuutta litroina (Fuel Conversions).

Comp Air 7 kulutus on 37 – 40 gal/h (Aerocompinc Comp Air 7 performance). Tämä yksikkö muutetaan l/h kaavan 3 avulla.

$$\text{kulutus gal/h} \times 3.79 \text{ l/gal} = \text{kulutus l/h} \quad (3)$$

Kaavassa 3.79 l/gal tarkoittaa kuinka paljon 1 gallona on litroina (Fuel Conversions). Tulokseksi Comp Air 7 kulutukseksi saadaan 140.2 – 151.6 l/h.

Pilatus PC-12NGX kulutus on noin 518 lb/h (Rob, 2020). Yksikkömuunnos on tehty kaavalla 4.

$$518 \text{ lb/h} \times 0.57 \text{ l/lb} = 292.5 \text{ l/h} \quad (4)$$

Kaavassa 0.57 l/lb kertoo kuinka paljon 1 pauna Jet A polttoainetta vie tilavuutta litroina (Fuel Conversions).

Kaikissa ilmoitetuissa kulutuksissa täytyy huomioida kuitenkin se, että kulutukseen vaikuttaa merkittävästi monet muuttujat. Tämän takia taulukoissa esitetyt kulutukset ovat vain suuntaa antavia. Jos kulutuksia tulisi määritellä tarkasti, pitäisi tietää millaisessa tilanteessa ja olosuhteessa kulutus on mitattu.

Taulukon 4 arvoista voidaan tehdä monia johtopäätöksiä. Potkuriturbiinimoottoria käyttävien lentokoneiden maksimilento-ohjelmien vaihtelee merkittävästi. Taulukossa esiintyvän pienimmän koneen maksimilento-ohjelmien paino on 1 904 kg kun taas painavimman lentokoneen maksimilento-ohjelmien paino on 141 000 kg.

Potkuriturbiinikoneiden lentonopeus vaihtelee 370 – 700 km/h välillä. Hitain lentokone on DART 450 jonka maksimi lentonopeus on 370 km/h. Lentokoneista nopein on A400 ja tämän matkalentonopeus on 700 km/h. Taulukossa 4 esitetyt maksimi matkalentopituudet ovat 1 528 – 3 339 km. Konetyyppien paino vaihtelee suuresti, ja siksi niiden polttoaineen kulutus vaihtelee merkittävästi. Lentokoneiden kuormankantokyky on 662 – 37 000 kg.

Taulukko 4. Potkuriturbiinilentokoneiden toiminta-arvoja (DIAMNODAIRCRAFT DART 450, 2020), (Aerocompinc Comp Air 7), (Rob, 2020) (Pilatus - Aircrafts PC-12NGX, 2020), (ATR-72-600, 2015, s. 2.), (Wikipedia M400, 2021)

Lentokone	Moottori	MTOW (maksimilentoönlähtöpaino)	Kuorman kantokyky	Maksimi lentonopeus	Maksimi lentokorkeus	Kulutus	Istuin paikkoja	Maksimi matkalentopituus
DART 450	AI-450	2 400 kg	662 kg	370 km/h	7000 m (matkalento korkeus)	97 l/h (10 000 ft ja 372 km/h)	2	2816 km
Comp Air 7	M601D-1	2 087kg	930 kg	443 km/h (matkalentonopeus)	6400 m (metkalento korkeus)	140 – 152 l/h	6-7	1 685 km
Pilatus PC-12NGX	PT6A-67P	4 740 kg	1 014 kg	537 km/h	9 144 m	293 l/h	11	3 339 km
ATR-72-600	Kaksi kappaletta PW127	22 800 kg	7 500 kg	510 km/h (matkalento nopeus)	–	953 l/h	70	1 528 km
A400	Neljä kappaletta TP400-D6	141 000 kg	37 000 kg	700 km/h (matkalentonopeus)	9100 m	–	120	3 300 km

4. VERTAILUA

Seuraavaksi vertaillaan taulukoissa 1 ja 3 esiintyvien eri moottorityyppien välisiä eroja. Tämän lisäksi tarkastellaan taulukoissa 2 ja 4 esiintyviä moottorityypeiltään erilaisia lentokoneita toisiinsa.

4.1 Diesel- ja potkuriinimootoreiden vertailu

Taulukon 1 ja 3 arvoista huomataan monia eroavaisuuksia. Merkittävimpänä erona on moottorin teho painoon nähden. Potkuriinimootoreilla tehon suhde painoon on huomattavasti suurempi. Yhtä kilogrammaa kohden potkuriinimootorit tuottavat merkittävästi enemmän tehoa kuin dieselmootorit.

Huomattavaa on myös se, ettei dieselmootoreilla tehon ja painon suhde muutu merkittävästi moottorin painon kasvaessa. Taulukon 1 mukaan painavimmalla dieselmootorilla RED A03 tehon ja painon suhde on 1.01 kW/kg. Vastaavasti kevyimmällä dieselmootorilla TAE 125-02 - 114 tehon ja painon suhde on 0.85 kW/kg, joka on taulukon neljänneksi suurin arvo. Tarkasteltavia dieselmootoreita on seitsemän. Sen sijaan potkuriinimootoreista voi huomata, että tehon ja painon suhde kasvaa, kuin moottoreiden paino kasvaa. Potkuriinimootorit tuottavat merkittävästi enemmän tehoa painoon nähden. Pienin potkuriinimootori tuottaa 2.48 kW/kg ja suurin potkuriinimootori 4.06 kW/kg. Pienen otannan takia tämä voi olla sattumaa, mutta antaa kuitenkin vahvoja viitteitä, että potkuriinimootorin kasvattaminen on kannattavampaa kuin dieselmootorin.

Toinen merkittävä ero on se, että tehokkain potkuriinimootori tuottaa 10 681 hevosvoimaa, kun taas tehokkain taulukoitu dieselmootori tuottaa 500 hevosvoimaa. Lentokonekäytöstä ei löydy sellaisia dieselmootoreita, jotka olisivat yhtä tehokkaita kuin tarkasteltu tehokkain potkuriinimootori. Tämä johtuu siitä, että dieselmootorin tehon kasvaessa sen paino kasvaa merkittävästi enemmän kuin potkuriinimootorin.

4.2 Diesel- ja potkuriinilentokoneiden vertailu

Diesel- ja potkuriinimootorilla varustettujen lentokoneiden suoritusarvot eroavat toisistaan. Taulukoista 2 ja 4 voidaan huomata, että potkuriinilla varustettujen koneiden painavin lentokone on huomattavasti painavampi kuin painavin dieselmootorilla varustettu lentokone. Voidaan sanoa, että maksimilento-ohjelmien vaihtelu on huomattavasti suurempi potkuriinilentokoneilla kuin dieselmootorilentokoneilla. Potkuriinilentokoneita voidaan siis käyttää laajemmalla maksimilento-ohjelmien alueella kuin dieselmootoria.

Verrattessa saman kokoluokan lentokoneita, kuten DA42 -dieselmootorikonetta ja Comp Air 7 -potkuriinikonetta, voidaan huomata Comp Airin pystyvän kantamaan suurempaa hyötykuormaa, lentävän suuremmalla nopeudella, lakikorkeuden olevan suurempi sekä istuinpaikkoja olevan enemmän. Tämän lisäksi Comp Air kuluttaa merkittävästi enemmän polttoainetta kuin DA42. Comp Air ei myöskään pysty lentämään yhtä pitkää matkaa kuin DA42.

Vastaavasti saman painoluokan DA62 -dieselmootorikonetta ja DART 450 -potkuriinikonetta huomataan olevan varsin lähellä toisiaan kaikkia lentoarvoja tarkasteltaessa. DART 450 -koneen lentonopeus ja matkalentopituus ovat hieman suurempia kuin DA62 -koneen arvot. DA62 -koneessa on kuitenkin 5 istuinpaikkaa enemmän kuin DART 450 -koneessa. Lisäksi kulutus on noin 50 prosenttia DART 450 -koneen kulutuksesta, ja sen hyötykuorma on hieman enemmän kuin DART 450 -koneen. Nämä hieman odottamattomat arvot selittyvät osittain sillä, että DART 450 on suunniteltu taitolentoa varten. Koska kone on suunniteltu tällaista käyttöä varten, on sen rakenteet väistämättä painavampia kuin DA62 -koneessa. Tämä painon lisäys heikentää koneen muita ominaisuuksia. Koneet on suunniteltu täysin erilaiseen käyttötarkoitukseen.

5. DIAMOND DA42

Diamond Aircraft on vuonna 1981 perustettu lentokonetehdas. Nykyään yrityksellä on yli 1 000 työntekijää ympäri maailmaa. Diamond Aircraft valmistaa DA -mallin koneita kaksipaikkaisesta DA20 -koneesta seitsenpaikkaiseen DA62 -malliin. He valmistavat myös potkuriturbiinimoottorilla varustettua DART -sarjan lentokonetta. Sarjan koneet ovat kaksipaikkaisia taitolentoon soveltuvia lentokoneita. Diamond Aircraftin valmistamia lentokoneita on käytössä yli 5 000 kappaletta. Diamondin valmistamat lentokoneet DA40, DA42 ja DA62 käyttävät moottorina Austro Enginen valmistamia dieselmoottoreita, joista ei tule lyijypäästöjä. (Diamond Aircraft Company (2020))

Työssä tarkastellaan tarkemmin Diamond DA42 -koneen teknisiä tietoja, ja koneessa käytetyn Austro Engine E -sarjan moottorien teknisiä tietoja sekä E4 -moottorin teknisiä tietoja ja huoltoja.

5.1 Tekniset tiedot Diamond DA42

Diamond DA42 on neljäpaikkainen kevyt kaksimoottorinen lentokone. Siipien kärkiväli on 13.42 m, pituus 8.56 m, korkeus 2.49 m ja siipipinta-ala 16.29 m². Polttoainesäiliöihin mahtuu 189.2 l ja lisäpolttoainesäiliöihin 100 l polttoainetta. Koneen maksimilentoonlähtöpaino on 1 900 kg. Koneen paino ilman polttoainetta on 1 765 kg. Maksimi laskeutumispaino on 1 805 kg. (EASA TYPE – CERTIFICATE DATA SHEET for DA 42, 2013, s.17 – 19)

5.2 E4-sarjan dieselmoottorit

E4 -sarjan moottorit ovat Austro Enginen valmistamia dieselmoottoreita. Sarjaan kuuluu moottorit E4 ja E4P. E4 tunnetaan kaupallisesti nimellä AE300 ja E4P tunnetaan nimellä AE330. Moottoria AE300 käytetään mm. Diamond DA42 -lentokoneissa (EASA TYPE – CERTIFICATE DATA SHEET for DA 42 2013, s. 18). Moottoria AE330 käytetään mm. Diamond DA62 -lentokoneissa (EASA TYPE – CERTIFICATE DATA SHEET for DA 62 2017, s. 5).

5.2.1 E4 ja E4P dieselmoottoreiden tekniset tiedot

Austro engine E4 ja E4P -moottorit ovat jalostettu Mercedes-Benz OM640 -moottorista (AVweb's Austro Engine Factory Tour, 2012). Austro Enginellä on tarkoitus alkaa valmistaa omia moottorilohkoja, jolloin heidän ei tarvitsisi enää ostaa moottoreita ulkopuoliselta yritykseltä (Paul, 2019).

Austro Engine E4 on turboahdettu nelisyylinterinen dieselmoottori, joka painaa 186 kg. Moottorin maksimiteho on 123.5 kW (168hp). Moottori on nestejäähdytteinen ja sitä voidaan käyttää jatkuvasti maksimiteholla. Sen maksimivääntö on 512 Nm ja maksimi kierrosluku on 2300 rpm. Moottorin sylinterin tilavuus on 1 991 cm³. Moottorin korkeus on 574 mm, leveys 855 mm ja pituus 738 mm. Polttoaineena moottori voi käyttää lentokerosiinia ja Dieseliä (EN590). Maksimiteholla moottori kuluttaa 35 l/h ja 60 prosentin teholla 19 l/h. (Austro Engine Company, 2017, s.4 – 5)

Austro engine E4P on E4 -moottorista tehty tehokkaampi versio. Moottoria voidaan lentoonlähettäjä käyttää 132 kW (180hp) teholla. Moottorin jatkuva maksimiteho on 126 kW (171hp). Sen maksimivääntö on 550 Nm ja maksimi kierrosluku on 2300 rpm. Moottorin sylinterin tilavuus on 1 991 cm³. Moottorin mitat ovat samat kuin E4 -moottorilla. Polttoaineena moottori käyttää lentokerosiinia. Maksimiteholla moottori kuluttaa polttoainetta 39 l/h ja 60 prosentin teholla 21 l/h. (Austro Engine Company, 2017, s. 5)

Moottoreille E4 ja E4P Austro engine on määritellyt tunnin operointihinnaksi 23 euroa. Kaikilla E4 ja E4P -moottoreilla on yhteensä lennetty yli 1 000 000 tuntia. Moottoreita on käytössä yli 1500 kappaletta. Valmistaja on luvannut moottoreille MTBF (Mean Time Before Failure) ajaksi yli 100 000 tuntia. E4 ja E4P -moottoreille on sanottu TBO (Time Before Overhaul) ajaksi 1800 tuntia. MTBF tarkoittaa oletettua aikaa ennen kuin moottori hajoaa (SKYbrary 2017). TBO:lla tarkoitetaan aikaa peruskorjausten välillä. Kun moottori saavuttaa tämän käyttöajan, sille suoritetaan peruskorjaus. (Austro Engine Company, 2017, s. 4)

5.2.2 Huoltotoimenpiteet E4 dieselmoottorille

Austro Engine E4 on Mercedes-Benz OM640 -moottorin pohjalta jalostettu moottori ilmailukäyttöön. Moottorin jalostamatonta versiota käytetään autoissa. Moottorille tehtävät huoltotoimenpiteet ovat tämän takia hyvin samankaltaisia kuin auton

dieselmootorillekin tehtävät toimenpiteet. Erona on se, että huoltovälit on kerrottu käyttötunteina ja huoltotoimenpiteet ovat hyvin tarkasti listattuja.

Diamond DA42 -koneessa käytetyn dieselmootorin E4 huoltojaksot on jaettu 100, 300, 600, 1000 ja 1500 tunnin jaksoihin. Huoltojaksolla tarkoitetaan aikaa kahden samankaltaisen peräkkäisen huoltotoimenpiteen välillä. Huoltojaksoille on voitu tämän lisäksi antaa vielä lisäehtoja. Esimerkiksi jos 100 käyttötuntia ei täyty 12 kuukauden aikana, suoritetaan toimenpide silti. Sadan tunnin huollossa tehtäviä toimenpiteitä on jakohihnan, vaihteistoöljyn, öljynsuodattimen, pakoputken, jäähdytysjärjestelmän ja polttoainejärjestelmän tarkastaminen. Tämän lisäksi moottoriöljy, öljynsuodatin ja polttoaineen suodatin vaihdetaan. Kolmensadan tunnin huollossa tehtäviä toimenpiteitä ovat latausgeneraattorin ja polttoaineinjektorin tarkistus. Tämän lisäksi moottoriöljy, öljynsuodatin ja polttoaineensuodatin vaihdetaan. Kuudensadan tunnin huollossa vauhtipyörä tarkastetaan sekä vaihdetaan korkeapainepumppu ja jäähdytysneste. Tuhannen ja tuhattavuodensadan huolloissa on jakohihnan tarkastaminen. (Service information E4, 2015, s 2) (Austro Engine Operation Manual E4, 2016, s. 81)

Moottorin TBO ajaksi on määrätty 1 800 tuntia (Austro Engine Company, 2017, s. 3). 1 800 tunnin huollossa moottorin vaihteisto ja elektroninen ohjausyksikkö vaihdetaan (Service information E4, 2015, s 2). Tämä peruskorjaus moottorille maksaa 16 700 euroa (Diamond AIRCRAFT, 2013). Tieto on vuodelta 2013, jolloin moottorin TBO aika on ollut 1 500 tuntia. Tämän tiedon pohjalta moottorin peruskorjauksen voidaan arvioida olevan noin 16 000 euron luokkaa. Nykyisen 1 800 tunnin TBO ajan kanssa moottorin perushuollon hinta on noin 9 euroa lentotuntia kohden. Peruskorjauksessa moottoria ei korvata uudella, kuten kilpailijoiden moottorit, vaan ne huolletaan ja tämän jälkeen ne palautetaan asiakkaalle käyttöön (Paul, 2019).

5.3 Yhteenveto DA42 lentokoneesta ja sen moottorista

Diamond DA42 on kaksimoottorinen kevyt yleisilmailulentokone. Taulukon 2 mukaan sen suoritusarvoja ovat maksimilento-ohjainpaino 1 999 kg, kuorman kantokyky 589 kg, maksimi matkalentonopeus 365 km/h, maksimi lentokorkeus 5 486 m, kulutus 39.4 l/h, istuinpaikkoja 4 ja maksimi matkalentopituus 2 250 km.

Diamond DA42 -koneen hinta on noin 500 000 USD. Hinta-arvio on saatu 21.01.2021 controller.com -nettisivulla myynnissä olleiden koneiden keskiarvosta (Controller DIAMOND, 2021).

Diamond DA42 -koneen E4 -moottori on jalostettu ilmailukäyttöön Mercedes-Benz OM640 -moottorista. Moottorin hintaa voidaan arvioida lentokoneen hinnan avulla. Diamond DA42:ssa on kaksi E4 dieselmootoria. En usko, että yksittäisen moottorin hinta voisi olla yli 100 000 USD, koska koneen kokonaishinta on noin 500 000 USD. Moottorin arvo nousee, kun se jalostetaan lentokonekäyttöön. Jalostamatonta moottoria on käytössä autoissa, joiden hinta on noin 50 000 USD. Tämän hintaluokan autossa moottorin hinnaksi voidaan uskoakseni arvioida olevan noin 10 000 USD. Näin ollen E4 -moottorin hinnaksi voidaan arvioida 10 000 – 100 000 USD. Hintahaarukka on suuri, mutta mahdollistaa kuitenkin diesel- ja potkuriturbiinimoottoreiden välisen vertailun kappaleessa 7. E4 -moottorin TBO huolto maksaa noin 16 000 USD.

E4 -dieselmoottorista listattuja arvoja taulukossa 1 ovat teho 123.5 kW (165.6 hp), paino 185 kg ja tehon suhde painoon 0.67 kW/kg. Muihin tarkasteltuihin moottoreihin nähden E4-moottori on kokoluokaltaan pieni.

Moottorin huoltoajat on jaettu 100, 300, 600, 1000 ja 1500 tuntiin. Dieselmoottorin toimintaperiaatteen takia huoltotoimenpiteet ovat hyvin samankaltaisia kuin auton dieselmoottoreillekin. Tällaisia huoltotoimenpiteitä ovat esimerkiksi öljyn, öljynsuodattimen ja jäähdytysnesteen vaihdot.

6. PILATUS PC – 12NG

Pilatus PC-12NG on potkuriturbiinilla varustettu yksimoottorinen yhteyskone. Kahden lentäjän lisäksi koneeseen mahtuu kahdeksan matkustajaa. Koneita voidaan operoida myös yhdellä lentäjällä, jolloin toinen ohjaamopaikka vapautuu yhdelle matkustajalle. Koneen on valmistanut sveitsiläinen yritys Pilatus Aircrafts. Kone lensi ensilentonsa vuonna 1991. Koneessa on onnistuttu yhdistämään taloudellisuus hyvään hyötykuormaan ja hyviin sisätiloihin. Koneita on valmistettu eri versioina yli 1 500 kappaletta. Koneita käytetään ympäri maailmaa matkustajankuljetustehtävissä, sairaankuljetuskoneina, valvontakoneina, siviili-, sotilas- sekä viranomaiskäytössä. (Ilmavoimat Pilatus PC – 12NG, 2018, s. 1 – 2)

Työssä tarkastellaan Pilatus PC – 12NG teknisiä ominaisuuksia ja PC – 12NG:ssä käytettävän PT6 sarjan potkuriturbiinimoottoreiden teknisiä tietoja ja huoltotoimenpiteitä.

6.1 Tekniset tiedot Pilatus PC-12NG

Pilatus PC – 12NG siipien kärkiväli on 16.28 m. Pituutta koneella on 14.40 m ja korkeutta 4.26 m. Tyhjäpaino koneella on 2 600 kg ja suurin lentoonlähtöpaino on 4 760 kg. Koneen suurin matkalentonopeus on 519 km/h ja lakikorkeus on 9 144 m. Voimanlähteenä koneessa käytetään yhtä Pratt & Whitney Canada PT6A-67P potkuriturbiinia. Tämä moottori tuottaa tehoa 1 200 hp. Kone on pääasiassa metallirakenteinen. Ei-kantavissa rakenteissa on käytetty komposiittiosia. Koneen matkalentopituus voi olla kolmella matkustajalla jopa 2 890 km. (Ilmavoimat Pilatus PC-12NG, 2018, s. 1 – 2)

6.2 PT6-sarjan potkuriturbiinimoottorit

PT6-sarjan potkuriturbiinimoottorit on valmistanut yritys Pratt and Whitney Canada Corp. Moottori on saanut ensimmäisen EASA-tyyppihyväksynnän 31.03.1987. Moottorin ensimmäinen tyyppihyväksytty malli oli PT6A-66. Tämän jälkeen moottorista on kehitetty useita malleja, joista uusin malli PT6E-67XP, on saanut tyyppihyväksynnän 11.10.2019.

Tyyppihyväksytyjä malleja on tällä hetkellä 16 erilaista. (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PT6A – 67 Series engines, 2019, s. 4)

PT6A ja PT6E -sarjan moottorit ovat potkuriturbiinimoottoreita. Moottorin polttoaineen ohjausjärjestelmä on täysin hydromekaaninen, lukuun ottamatta PT6E-67XP moottoria, jossa polttoaineen ohjausjärjestelmä on sähköinen (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PT6A – 67 Series engines, 2019, s. 6).

6.2.1 PT6-sarjan potkuriturbiinien teknisiä tietoja

Moottorin eri mallien koko vaihtelee hieman. Pienimmät mallit ovat PT6A – 66 ja PT6A – 66B. Kummankin mallin paino on 206.8 kg. Maksimi jatkuva teho mallille PT6A-66 on 850 hp (634kW) ja mallille PT6A-66B on 951 hp (709 kW). Kummankin moottorin pituus on 1771.7mm ja halkaisija 466.1mm. Painavin ja myös tehokkain moottori on PT6E – 67XP. Tämän moottorin paino on 280.3 kg ja jatkuva maksimiteho on 1 200 hp (895 kW). Moottorin pituus on 1870.9 mm ja halkaisija 481.8 mm. Moottoreiden jatkuva operointilämpötila on 780 – 840 °C. (EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PT6A – 67 Series engines, 2019, s. 7 – 9)

6.2.2 Huoltotoimenpiteet potkuriturbiinimoottorille

Koska potkuriturbiinimoottorin voiman lähteenä toimii suihkumoottori, kerrotaan seuraavaksi suihkumoottorin huollosta. Jos suihkumoottorista pitää vaihtaa tai huoltaa merkittäviä osia, kutsutaan sitä peruskorjaukseksi. Peruskorjauksessa moottori puretaan ja siihen vaihdetaan kaikki osat, joissa käyttötuntimäärä on täyttynyt. Moottorin huoltoväleihin vaikuttaa käyttötunnin lisäksi syklien määrä. Yhtenä syklinä käytetään yhtä lentoa, joka koostuu moottorin käynnistyksestä, lennosta ja moottorin sammutuksesta. Esimerkiksi lentoyhtiöt, jotka operoivat lyhyillä lennoilla joutuvat käyttämään moottoreita peruskorjauksessa pienemmällä tuntimäärällä kuin lentoyhtiöt, jotka operoivat pitkillä matkoilla. (Crane 2018, s. 532)

Vaikka moottori lähetetäänkin osien vaihtoa varten usein peruskorjaukseen, tehdään sille käytön aikana myös monia huoltotoimenpiteitä, joiden tarkoituksena on varmistaa moottorin toiminta. Yleisellä tasolla suihkumoottorin (potkuriturbiinimoottorin) päivittäisiin huoltotoimenpiteisiin kuuluu metallisirpaleiden etsiminen silmämääräisesti.

Viidenkymmenen operointitunnin välein katsotaan tarkemmin, ettei moottorissa ole pieniä metallipalasia. Moottorin käynnistäminen kirjataan aina ylös. Kirjaukseen merkitään esimerkiksi ulkolämpötila, ilmanpaine ja maksimi pakokaasun lämpötila. Käytön aikana tarkkaillaan moottorista kuuluvia ääniä. Sadan tunnin välein vaihdetaan öljy ja samalla tarkastetaan öljyn spektrometrinen laatu. Lisäksi jokaisen 25 käyttötunnin välein öljyn laatu tarkistetaan. Tämän lisäksi kaikki muu tarpeellinen tieto kirjataan ylös. (Crane 2018, s. 532-533)

Modernit suihkumoottorit on rakennettu modulaarisiksi, joten niistä voidaan poistaa jokin osakokonaisuus ja vaihtaa se uuteen. Pienessä potkuriturbiinissa nämä moduulit voivat olla kaasuturbiini ja alennusvaihteisto. Isoissa suihkumoottoreissa moduuleja voivat olla ilmanottoaukko, ahtimen staattori, ahtimen lavat, diffuusori, alennusvaihteisto kaikille oheislaitteille, polttokammio, turbiinin staattori ja turbiinin roottori. Hajonnut moduuli voidaan lähettää moottorin valmistajalle korjattavaksi. Tämän moduloinnin avulla moottorin huoltoajat saadaan minimoitua. (Crane 2018, s. 533-534)

Koska suihkumoottorit ovat kalliita purkaa, niiden kuntoa tarkkaillaan erilaisten apuvälineiden avulla. Moottoreiden huolloissa käytetään apuvälineenä esimerkiksi boreskooppi ja fiberscope kameraa. Boreskooppi on laite, joka koostuu taipuisasta johdosta, jonka päässä on kamera. Johto on liitetty näyttöön, josta mekaanikko näkee kameran kuvan. Boreskooppeja on myös täysin optisia, jossa ei ole kameraa. Tällöin mekaanikko katsoo boreskoopissa olevaan linssiin, johon kuva muodostuu. Tällaisen laitteen avulla moottorin sisältä saadaan tarkkoja kuvia, joista voidaan tarkastella moottorin kuntoa. Boreskooppi varten moottoriin on tehty strategisiin paikkoihin luokkuja, joista boreskoopin pää voidaan työntää moottorin sisälle. Boreskooppeja on varustettu sekä jäykällä että taipuisalla varrella. (Crane 2018, s. 534-535)

Ennen lentoa suihkumoottorille tehtäviä rutiinitarkastuksia ovat tyypillisesti suojakotelon ulkopinnan kiinnityksen, imuaukon, ahtimen lapojen, suihkuputken alueen sekä moottoriöljyn määrän ja käynnistysöljyn määrän tarkastus. Tämän lisäksi ennen moottorin käynnistämistä sytytysjärjestelmä tarkastetaan kuuntelemalla naksahdus, sekä pyöritetään ahdinlavat kerran ympäri, jolloin epätavalliset äänet voidaan huomata. (Crane 2018, s. 536)

Moottorin ahdinroottorin puhtaus on erittäin tärkeää, koska pienetkin epäpuhtaudet voivat merkittävästi vähentää moottorin tehoa. Ahdinroottorin epäpuhtaus voi aiheuttaa pakokaasujen korkean lämpötilan. Ahdinroottoreita voidaan puhdistaa esimerkiksi hiekkapuhalluksella tai nestemäisellä pesulla. Hiekkapuhallus suoritetaan siten, että kriittiset paikat suojataan ja pehmeää hiekkapuhallusmateriaalia puhalletaan moottorin

ilmanottoaukkoon. Samaan aikaan moottoria pyöritetään starttimoottorilla. Yleisimmin ahtimen pesussa käytetään nestemäistä vaihtoehtoa. Nestemäisiä pesuja on kahdenlaisia: suolanpoistopesu sekä moottorin suorituskyvyn palauttava pesu. Jos moottoria käytetään paikoissa, jossa suolaa pääsee kerääntymään moottoriin, suositellaan sille tehtäväksi säännöllisin väliajoin suolanpoistopesu. Tällöin moottoria pyöritetään 15 – 20 prosentin teholla. Tämän jälkeen moottoriin suihkutetaan demineralisoitua vettä, jonka on tarkoitus puhdistaa moottori suolasta. Moottorin suorituskykyä palauttavassa pesussa suihkutetaan moottoriin veden lisäksi puhdistusainetta. Puhdistusaine irrottaa epäpuhtauksia ja ne kulkeutuvat moottorin läpi. Puhdistusaine jättää ahdinroottoreihin pinnan, jonka tarkoituksena on suojata moottoria ja ehkäistä korroosiota. Lopuksi moottori huuhdellaan demineralisoidulla vedellä, jonka tarkoituksena on huuhdella ylimääräinen puhdistusaine pois. Operaatioiden jälkeen moottorin annetaan käydä, jolloin moottori kuivuu. (Crane 2018, s. 536-537)

Ahtimen lapojen kunnosta on tarkat maininnat moottorin manuaalissa. Manuaalissa on kerrottu, milloin lapa on vaurioitunut liikaa. Jos ahtimen siipi on vaurioitunut liian pahasti, lähetetään ahdinmoduuli valmistajalle huoltoon. Moottorin polttoalueeseen kuuluu polttoainesuuttimet, polttokammio, turbiinin ilmantulo-ohjaimet, turbiinirengas ja -lavat sekä suihkuputki. Näiden alueiden tarkistus on määritelty moottorin käyttötuntien mukaan. Näiden alueiden tarkastukseen kuuluu moottorin suoritusarvojen tarkka kirjaaminen ennen ja jälkeen korjauksen. (Crane 2018, s. 536-538)

Edellä on kerrottu yleisesti suihkumoottorin huoltoon liittyvistä asioista. Seuraavaksi kerron tarkemmin erityisesti PT6 -sarjan moottoreiden huoltotoimenpiteistä.

PT6 -sarjan moottorin huoltovälit ovat 25, 50, 100, 125, 200, 250, 300, 400, 600 ja 1 000 tuntia. Huoltovälejä on tarkemmin jaoteltu moottorin manuaalissa. Jos esimerkiksi 200 käyttötuntia ei täyty 6 kuukauden aikana, suoritetaan huoltotoimenpide silti. Huoltomanuaalissa on tämän lisäksi kerrottu rutiinit sekä vähäiset huoltotoimenpiteet. Rutiinihuolto toimenpiteillä tarkoitetaan ennen lentoa tehtäviä tarkastuksia. Tällaisia toimenpiteitä ovat mm. öljyn, öljykorkin, polttoainejärjestelmän, polttoaineen ja öljyletkujen tarkastus. Vähäisillä huoltotoimenpiteillä tarkoitetaan toimenpiteitä, joita tehdään jatkuvasti muttei niin usein kuin rutiinihuoltotoimenpiteitä. Tällaisia toimenpiteitä ovat mm. polttoaineohjausjärjestelmän, öljynsuodattimen elementin, polttoainepumpun ja sen ulostulon suodattimen tarkastus. (PT6A – 60 SERIES TRAINING MANUAL, 2007, s. 238 – 239) PT6A – 67P -potkuriturbiinimoottorin TBO aika on 3500 h (PT6A – 60 SERIES TRAINING MANUAL, 2007, s. 156).

6.3 Yhteenveto Pilatus PC – 12NG lentokoneesta ja sen moottorista

Pilatus PC – 12NG on yhdellä PT6A – 67P potkuriturbiinilla varustettu yhteyskone. Kappaleessa 6.1 kerrottuja suoritusarvoja ovat maksimilentoonlähtöpaino 4 760 kg, maksimi matkalentonopeus 519 km/h, maksimi lentokorkeus 9 144 m, istuinpaikkoja 10 ja maksimi matkalento pituus 2 890 km. Taulukon 4 mukaan Pilatus PC – 12 NGX version suoritusarvoja ovat maksimilentoonlähtöpaino 4 740 kg, kuormankantokyky 1 014 kg, maksimi matkalentonopeus 527 km/h, maksimi lentokorkeus 9 144 m, kulutus 293 l/h, istuinpaikkoja 11 ja maksimi matkalentopituus 3 339 kilometriä. Koska PC – 12NGX on uudempi versio, eroaa tulokset hieman PC – 12NG tuloksista.

Pilatus PC – 12NG hinta on noin 3 000 000 USD. Hinta-arvio on saatu 21.01.2021 controller.com -nettisivulla myynnissä olleiden koneiden keskiarvoista (Controller Pilatus PC – 12, 2021). Vastaavasti uudemman PC – 12NGX:n hinta on noin 4 390 000 USD (Pilatus - Aircrafts PC – 12NGX media release, 2019).

PT6A – 68 moottori maksaa noin 969 000 USD. Moottorin hinnat vaihtelevat moottorityypeittäin. Potkuriturbiinin TBO huollot maksavat noin 500 000 USD (Powerweb PW PT6A, 2020).

PT6A – 67P -sarjan potkuriturbiinimoottorin suoritusarvoja taulukossa 3 ovat maksimi jatkuva teho 895 kW (1200 hp), paino 251.2 kg ja tehon suhde painoon 3.56 kW/kg. Tarkasteltuihin potkuriturbiinimoottoreihin nähden moottori on kokoluokaltaan kolmanneksi kevyin.

PT6 -sarjan moottorin huoltovälit ovat 25, 50, 100, 125, 200, 250, 300, 400, 600 ja 1 000 tuntia. Huolloissa painotetaan erityisesti moottorin kunnan tarkastelua ja erilaisten vioittumien etsimistä turbiinin lavoista. Koska potkuriturbiinimoottorit ovat toiminnaltaan monimutkaisia, vaaditaan mekaanikolta erityistä osaamista niiden korjaamiseen.

7. DA42 JA PC-12NGX LENTOKONEIDEN JA NIIDEN MOOTTOREIDEN VERTAILU

Konetyypeiltään ja käyttötarkoituksiltaan Pilatus PC – 12NGX ja Diamond DA42 ovat hyvin erilaisia. Pilatusta käytetään yhteyskoneena, kun taas Diamonia käytetään yleisilmailukoneena. Taulukoiden 2 ja 3 tiedoista voidaan todeta Pilatus PC – 12 NGX olevan suorituskykyisempi kone kuin Diamond DA42. PC – 12NGX on myös selkeästi isompi kone kuin DA42. Taulukkoon 5 on merkattu rinnakkain kummankin lentokoneen oleelliset suoritusarvot. Taulukkoon on myös laitettu koneiden hinta-arvio.

Taulukko 5. *DIAMOND DA42 ja Pilatus PC – 12NGX suoritusarvot rinnakkain*

Suoritusarvo	DIAMOND DA42	Pilatus PC – 12NGX
MTOW	1 999 kg	4 740 kg
Kuormankantokyky	589 kg	1 014 kg
Maksimi lentonopeus	365 km/h	537 km/h
Maksimi lentokorkeus	5 486 m	9 144 m
Kulutus	39 l/h	293 l/h
Istuinpaikkoja	4	11
Maksimi matkalentopituus	2 250 km	3 339 km
Hinta-arvio	500 000 USD	4 390 000 USD

Taulukon 5 tuloksista nähdään, että Pilatus PC – 12NGX suorituskykyisempi kuin Diamond DA42. Suorituskykynsä ja kokonsa vuoksi Pilatus kuitenkin kuluttaa huomattavasti enemmän polttoainetta, kuten taulukosta nähdään. Osittain Pilatuksen parempi suorituskyky selittyy koneen suuremmalla koolla. Esimerkiksi kuormankantokyky ja istuinpaikkojen määrä kasvaa maksimilento-olähtöpainon kasvaessa. Pilatuksen maksimi lentonopeus on noin 50 prosenttia suurempi kuin DA42 -koneella. Potkuriturbiinimoottori mahdollistaa Pilatukselle merkittävästi korkeamman maksimi lentokorkeuden, joka on noin 65 prosenttia suurempi kuin Diamondilla.

Moottoreiden vertailun kannalta on huomioitava moottoreiden toiminnan erilaisuus. Potkuriturbiini on merkittävästi tehokkaampi kuin dieselmoottori. Taulukossa 6 on merkattu rinnakkain Austro Engine E4 -dieselmoottorin ja PT6A – 67P - potkuriturbiinimoottorin suoritusarvoja. Taulukkoon on myös merkattu arvio yksittäisen moottorin hinnasta. PT6A – 67P hinnan voidaan olettaa olevan hyvin lähellä PT6A – 68

moottorin hintaa, koska kyseessä on eri malli samasta moottorista. Samoin näiden potkuriturbiinimoottoreiden TBO-huollon hinnan voidaan ajatella olevan lähellä toisiaan.

Taulukko 6. *Austro Engine E4 dieselmoottorin ja PT6A – 67P moottorin suoritusarvoja rinnakkain*

Suoritusarvo	Austro Engine E4	PT6A – 67P
Teho	123.5 kW (165.6 hp)	895 kW (1200 hp)
Paino	185 kg	251.2 kg
Teho/Paino	0.67 kW	3.56 kW
TBO-hinta	16 000 USD	500 000 USD (PT6A – 68)
Hinta-arvio	10 000 – 100 000 USD	969 000 USD (PT6A – 68)

Taulukosta 6 voidaan laskea potkuriturbiinimoottorin olevan noin seitsemän kertaa tehokkaampi kuin dieselmoottorin. Potkuriturbiini on noin 40 prosenttia painavampi kuin dieselmoottori. Tehon ja painon suhde on yli viisinkertainen potkuriturbiinin hyväksi. Hinta-arviot ovat hyvin epätarkkoja, mutta voidaan kuitenkin huomata, että potkuriturbiinin hinta on moninkertainen dieselmoottoriin verrattuna. Samoin TBO-huollon hinta on moninkertainen.

Suoritusarvojen lisäksi merkillepantavaa on moottorien huoltojen eroavaisuus. Koska potkuriturbiinin toiminta perustuu jatkuvaan prosessiin, on turbiinissa esiintyvät rasiot merkittävästi suurempia kuin dieselmoottorissa, jossa toiminta tapahtuu sykleinä. Koska toimintaperiaate on täysin erilainen, ovat moottoreille tehtävät huollot merkittävästi erilaisia. Dieselmoottorin huollot ovat samankaltaisia, kuin autonmoottoreille tehtävät toimenpiteet. Potkuriturbiinille tehtävissä huolloissa painotetaan moottorin kunnon tarkkailua, jossa etsitään murtumia tai muita fyysisiä vioittumia. Kummankin moottorin huollon suorittaa siihen erikoistunut mekaanikko. Potkuriturbiinimoottoreiden huoltovälit ovat lyhyempiä kuin dieselmoottoreiden. Päivittäiseen lentotoimintaan liittyviä tarkastuksia on potkuriturbiinimoottoreilla enemmän kuin dieselmoottoreilla. Nämä ovat syitä siihen, miksi potkuriturbiinimoottoreiden huoltokustannukset sekä käyttökustannukset ovat merkittävästi dieselmoottoreiden kustannuksia suuremmat.

8. YHTEENVETO

Kappaleessa 7 kerrotut asiat puoltavat, että potkuriturbiinilentokone on merkittävästi kalliimpi operoida kuin dieselmoottorilentokone. Potkuriturbiinilentokoneiden maksimilento-ohjelmien skaala on merkittävästi diesellentokoneita suurempi. Kuten aiemmin kävi ilmi, potkuriturbiinin kasvattaminen on merkittävästi kannattavampaa kuin dieselmoottorin. Potkuriturbiinimoottorien operointialue on dieselmoottorilentokoneisiin verrattuna suurempi.

Kun puhutaan diesel- ja potkuriturbiinimoottoreista lentokonekäytössä, täytyy muistaa, että moottorin valinta on täysin sidottuna lentokonetyyppiin. Kukin lentokonetyyppi on lähtökohtaisesti suunniteltu jollekin tietylle moottorityypille. Lentokone- ja moottorityyppi yhdessä määrittävät millaisia suoritusarvoja voidaan lentokoneelta saada. Täten yksittäisen dieselmoottorin ja yksittäisen potkuriturbiinin vertailu on hieman irrelevanttia. Käyttöönottokustannuksissa yksittäinen potkuriturbiini ja potkuriturbiinilla varustettu lentokone on merkittävästi kalliimpi kuin yksittäinen dieselmoottori ja dieselmoottorilla varustettu lentokone. Koneiden hintaeroa kasvattaa se, että potkuriturbiinia käytetään suorituskykyisemmissä koneissa. Kun lentokoneen moottori mahdollistaa suorituskykyisemmän toiminta-alueen, vaaditaan myös lentokoneen muilta rakenteilta enemmän. Tästä esimerkkinä lentokoneen paineistus. Suurin osa potkuriturbiinimoottorilentokoneista on paineistettuja, kun taas dieselmoottorilentokoneista suurin osa ei ole. Tämä tuo lisähintaa potkuriturbiinilentokoneille.

Tämän lisäksi elinkaaren aikana tehtävät huollot moottoreille erottavat niitä toisistaan. Potkuriturbiinimoottoreille huoltoja on merkittävästi tiheämmin kuin dieselmoottoreilla. Potkuriturbiinimoottorin huolloissa keskitytään usein moottorin kunnan tarkkailuun.

Dieselmoottorilentokoneita käytetään usein yleisilmailussa ja koulutusikäisessä. Potkuriturbiinilentokoneita käytetään yleisesti lentoliikenneoperoinnissa. Lentoyhtiö, joka operoi monella potkuriturbiinilentokoneella säästää merkittävästi yhden moottorin huoltokustannuksissa verrattuna siihen, että omistaisi vain yhden potkuriturbiini lentokoneen. On siis merkittävästi halvempaa operoida monella potkuriturbiinikoneella, kun tarkastellaan yksittäisen moottorin huoltokustannuksia.

Tällä hetkellä koneiden toimintaa erottaa eniten moottorin koon ja tehon suhde. Kun lentokoneelta vaaditaan suurta kuormankantokykyä ei voida enää käyttää perinteisiä mäntämoottoreita.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Potkuriturbiini- ja dieselmoottorilentokoneet operoivat täysin eri kategoriassa. Dieselmoottorilla varustetut lentokoneet eivät pärjää potkuriturbiinilentokoneille suoritusarvoja vertaillessa. Nykyään moottorin valinta määrittää täysin sen mitä suoritusarvoja lentokoneelta voidaan odottaa. Potkuriturbiinikonetta käytetään, kun halutaan suorituskykyä ja dieselmoottoria käytetään lentokoneissa, joissa halutaan painottaa taloudellisuutta. Tämä selkeä jako kuitenkin tulee pienenemään tulevaisuudessa.

Taulukossa 2 esitetty Celera 500L kuvaa mahdollista tulevaisuuden dieselmoottorilentokonetta. Tästä koneesta on tehty vasta yksi prototyyppi, joka lensi ensilentonsa vuonna 2019. Otto Aviationin on tarkoitus hakea vuonna 2021 – 2022 lentokoneelle tyyppihyväksyntää ja vuonna 2023 – 2025 tyyppihyväksynnän saatuaan rakentaa tehtaita, joista valmistuisi ensimmäiset myytävät lentokoneet. (Otto Aviation Celera-500L, 2020)

Otto Aviationin kertomien suoritusarvojen toteutuessa suunnitelmien mukaan ja lentokoneen sertifiointin onnistuessa on mahdollista, että tästä uudesta konetyypistä tulee merkittävä suuntaviiva muille tulevaisuudessa kehitettäville saman kokoluokan lentokoneille. Tämän tapahtuessa on mahdollista, että kymmenen vuoden päästä pieniä potkuriturbiinilentokoneita alettaisiin korvaamaan isoilla dieselmoottoreilla varustetuilla lentokoneilla. Haasteena kuitenkin on edelleen tehokkaan lentokonekäyttöön soveltuvan dieselmoottorin tekeminen tehon ja painon huonon suhteen takia. Dieselmoottorit ovat kuitenkin varsin uusi tulokas ilmailualalla edelleen. Celeran 500L:än mahdollisista suoritusarvoista voi arvioida, ettei dieselmoottorin kapasiteettia ole vielä täysin käytetty ilmailusektorilla.

LÄHTEET

Carlucci, A. P. et al. (2015). Supercharging system behavior for high altitude operation of an aircraft 2-stroke Diesel engine. Energy conversion and management. [Online] 101470–480.

Crane, D; Foulk, J; Jerry, J & Scroggins, D (2018). Aviation Maintenance Technician. La Vergne: Aviation Supplies and Academics, Inc.

Daidzic, N. et al. (2014). Diesel engines for light-to-medium helicopters and airplanes (Editorial). International journal of aviation, aeronautics, and aerospace. [Online] 1 (3), 2–.

Farokhi, S. (2014). Aircraft propulsion . 2nd ed. Chichester, England: Wiley.

Hitchens, F. (2015) Propeller Aerodynamics: The History, Aerodynamics & Operation of Aircraft Propellers. Luton, Bedfordshire: Andrews UK Ltd.

Koivisto, R. & Jokinen, J. (2008). Suihkumoottorit . 2., tark. p. Helsinki: Opetushallitus.

Sanders, F. (2007). Diesel mechanics. 1st ed. Chandni Chowk, Delhi: Global Media.

ATR-72-600 (2015). Haettu osoitteesta <https://skybrary.aero/bookshelf/books/3696.pdf>

Austro Engine Company (2017). Haettu osoitteesta https://www.diamondaircraft.com/fileadmin/diamondaircraft/documents/press-kit/AE_Company.pdf

AVweb. 2012. “Austro Engine Factory Tour.” YouTube video, 0:18, julkaistu 10.5. <https://www.youtube.com/watch?v=kRL-2033lok>

Aerocompinc Comp Air 7. Haettu osoitteesta http://www.aerocompinc.com/airplanes/CA7/ca7turbine_3.htm

Aerocompinc Comp Air 7 performance. Haettu osoitteesta <http://www.aerocompinc.com/airplanes/CA7/CA7perform.htm>

Austro Engine Operation Manual E4 (2016). Haettu osoitteesta 5.11.2020 <https://austroengine.at/uploads/pdf/MME40804r25.pdf>

Controller Diamond (2021). Tieto haettu 21.1.2021 osoitteesta <https://www.controller.com/listings/search?Manufacturer=DIAMOND&ScopeCategoryIDs=13>

CONTINENTAL AEROSPACE TECHNOLOGIES, Continental CD-300 Jet-A (2021). Haettu osoitteesta <http://www.continental.aero/diesel/engines/cd300.aspx>

Controller Pilatus PC – 12 (2021). Tieto haettu 21.1.2021 osoitteesta <https://www.controller.com/listings/for-sale/pilatus/turboprop-aircraft/8>

DIAMONDAIRCRAFT DA42 (2020a). DA42 tech-specs. Haettu osoitteesta <https://www.diamondaircraft.com/en/private-pilots/aircraft/da42/tech-specs/>

DIAMONDAIRCRAFT DA62 (2020b). DA62 tech-specs. Haettu osoitteesta <https://www.diamondaircraft.com/en/private-pilots/aircraft/da62/overview/>

DIAMONDAIRCRAFT DA50 (2020c). DA50 tech-specs. Haettu osoitteesta <https://www.diamondaircraft.com/en/private-pilots/aircraft/da50/tech-specs/>

DIAMONDAIRCRAFT DART 450 (2020d). Haettu osoitteesta <https://www.diamondaircraft.com/en/special-mission/aircraft/dart/tech-specs/>

Diamond AIRCRAFT. 2013. "1500 hours TBO for Austro Engine's AE300." Viimeksi muokattu 25.2. <https://www.diamondaircraft.com/en/about-diamond/newsroom/news/article/1500-hours-tbo-for-austro-engines-ae300/>

Diamond Aircraft Company (2020). Haettu osoitteesta https://www.diamondaircraft.com/fileadmin/diamondaircraft/documents/press-kit/Diamond_Aircraft_Company_2020_SCREEN.pdf

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for TAE 125 series engine (2020). Haettu osoitteesta https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/E.055%20TCDS_TAE125_issue_13_0.pdf

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for DIESELJET TDA CR (2016). Haettu osoitteesta https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/E.079%20TCDS_issue03_20160803_1.0.pdf

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for Austro Engine E4 series engines (2015). Haettu osoitteesta https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20TCDS%20E.200%20issue%2007_%2020150326_1.0.pdf

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for SR305 Serier (2019). Haettu osoitteesta <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/E.076%20TCDS%20Issue%2008.pdf>

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for RED A03 (2014). Haettu osoitteesta https://web.archive.org/web/20160910092255/http://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/EASA_E_150_TCDS_REDA03_issue%2001_20141219_1.pdf

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for M601/H80 series engine (2017). Haettu osoitteesta <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20TCDS%20E.070%20issue%2008.pdf>

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PT6A – 67 Series engines (2019). Haettu osoitteesta

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/PT6A_67%20Series%20Issue%202005_20191011.pdf

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for PW100 series engines (2018). Haettu osoitteesta

<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20IM.E.041%20TCDS%20Issue%204.pdf>

EASA TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for TP400 – D6 Engine (2013). Haettu osoitteesta

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-TCDS-E.033_Europrop_International_GmbH_TP400--D6_engine-04-04092013.pdf

EASA TYPE – CERTIFICATE DATA SHEET for DA 42 (2013). Haettu osoitteesta

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/certification-type-certificates-docs-aircraft-EASA-TCDS-A.005_Diamond_DA_42_and_variant-22-14062013.pdf

EASA TYPE – CERTIFICATE DATA SHEET for DA 62 (2017). Haettu osoitteesta

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/TCDS_EASA_IM.A.629_DA62-issue-5.pdf

Fuel Conversions. Haettu osoitteesta <http://mye6b.com/Fuel/>

Ilmavoimat Pilatus PC-12NG (2018). Haettu osoitteesta

https://ilmavoimat.fi/documents/1951206/2016308/Ilmavoimat+-+konetyyppitietoja+Pilatus+PC-12+NG+%281_18%29.pdf/573280da-50ea-4060-8e9c-953f83946ede/Ilmavoimat+-+konetyyppitietoja+Pilatus+PC-12+NG+%281_18%29.pdf

Metric Conversions (2021). Haettu osoitteesta [https://www.metric-](https://www.metric-conversions.org/length/miles-to-kilometers.htm)

[conversions.org/length/miles-to-kilometers.htm](https://www.metric-conversions.org/length/miles-to-kilometers.htm)

Otto Aviation Celera-500L (2020). Celera 500L technology. Haettu osoitteesta

<https://www.ottoaviation.com/technology>

Pilatus - Aircrafts PC – 12NGX (2020). Haettu osoitteesta [https://www.pilatus-](https://www.pilatus-aircraft.com/en/fly/pc-12)

[aircraft.com/en/fly/pc-12](https://www.pilatus-aircraft.com/en/fly/pc-12)

Pilatus - Aircrafts PC – 12NGX media release (2019). Haettu osoitteesta

<https://www.pilatus-aircraft.com/en/news-events/media-release/the-world-s-best-turboprop-better-than-ever-pilatus-reveals-the-pc-12-ngx>

Pail, B. (2019). Austro Moves To building Its Own Core Engine. Haettu osoitteesta

<https://www.avweb.com/recent-updates/business-military/austro-moves-to-building-its-own-core-engine/>.

PT6A – 60 SERIES TRAINING MANUAL (2007). Haettu osoitteesta

<https://mikeklochcfi.files.wordpress.com/2018/08/training-pt6a-60-series.pdf>

Powerweb PW PT6A (2020). Haettu osoitteesta <http://www.fi-powerweb.com/Engine/PW-CANADA-PT6A.html>

Rob, M (2020). We Fly: Pilatus PC-12 NGX. Haettu osoitteesta <https://www.flyingmag.com/story/aircraft/we-fly-pilatus-pc-12-ngx/>

SKYbrary. 2017. "Mean Time Between Failure (MTBF)." Viimeksi muokattu 20.7. [https://www.skybrary.aero/index.php/Mean_Time_Between_Failure_\(MTBF\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Mean_Time_Between_Failure_(MTBF))

Service information E4 (2015). Haettu osoitteesta <https://austroengine.at/uploads/pdf/SIE4001r2.pdf>

UnitConverters.net (2021). Haettu osoitteesta <https://www.unitconverters.net/volume/gallons-to-liters.htm>

Wikipedia Alenia Aermacchi Sky – Y, 2020). Haettu osoitteesta https://en.wikipedia.org/wiki/Alenia_Aermacchi_Sky-Y

Wikipedia Yakovlev Yak – 152, 2021. Haettu osoitteesta https://en.wikipedia.org/wiki/Yakovlev_Yak-152

Wikipedia Ivchenko AI – 450S (2020). Haettu osoitteesta https://en.wikipedia.org/wiki/Ivchenko-Progress_AI-450S

Wikipedia M400 (2021). Haettu osoitteesta https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A400M_Atlas