



Akseliturbiinimoottorien kunnonvalvonta

Moottorin tehokoe ja trendianalyysi

Miira Leppäkoski

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2022

Konetekniikka
Lentokonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Lentokonetekniikka

LEPPÄKOSKI, MIIRO:
Akseliturbiinimoottorien kunnonvalvonta
Moottorin tehokoe ja trendianalyysi

Opinnäytetyö 44 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Toukokuu 2022

Ilmailussa turvallisuus ja jatkuva tekninen kehittyminen ovat alan keskeisimpiä prioriteetteja. Kunnonvalvonnan oikeanlaisella suorittamisella mahdollistetaan laitteiden oikea-aikainen huoltaminen sekä maksimoidaan helikopterin taivaalla vietetty aika. Hyvällä kunnonvalvonnalla voidaan poistaa turha huoltaminen ja keskittyä niihin laitteisiin ja koneisiin, jotka todellisuudessa sitä vaativat.

Opinnäytetyössä tutkittiin, miten Rajavartiolaitoksen akseliturbiinimoottoreiden kunnonvalvontamenetelmiä voidaan kehittää. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, millaisia kunnonvalvontamenetelmiä on olemassa, ja mitkä niistä soveltuvat parhaiten Rajavartiolaitoksen käyttöön. Lisäksi opinnäytetyössä tutkittiin sitä, onko Super Puma -helikopterin moottorin tehokokeesta saatavan datan avulla mahdollista muodostaa trendianalyysiä Excel-ohjelmistolla. Työn teoriaosuudessa syvennyttiin akseliturbiinimoottoreiden rakenteeseen, toimintaan sekä tutustuttiin metodeihin, joilla niiden kunnonvalvontaa voidaan suorittaa. Työssä esiteltiin myös kunnossapitoon ja kunnonvalvontaan liittyviä keskeisiä käsitteitä. Työssä paneuduttiin erityisesti moottorin tehokokeisiin ja niiden suorittamisesta saadun datan analysointiin.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voitiin todeta, että akseliturbiinimoottorien kunnonvalvontamenetelmistä parhaiten Rajavartiolaitoksen käyttöön soveltuvat moottorin tehokoe ja sen tulosten perusteella muodostettava trendianalyysi. Tutkimusosuudessa kuitenkin havaittiin, että Super Puma -helikopterin osalta moottorin tehokokeesta saatavan datan avulla ei ole mahdollista muodostaa sellaista trendianalyysiä, josta moottorin vikamekanismin tunnistaminen olisi mahdollista. Vaikka Excel-ohjelmiston avulla trendianalyysin muodostaminen ei välttämättä ole mahdollista, helpottaa tehokokeiden systemaattisempi suorittaminen ja raportointi moottorien kunnon seuranta.

Kunnonvalvonnan tason parantamiseksi laivueelle kehitettiin uusi ohjeistus, jota seuraamalla kunnonvalvonnan tasoa pyritään kehittämään tulevaisuudessa. Tulevaisuudessa kunnonvalvonnan tasoa voitaisiin parantaa ottamalla testikäyttöön Engine Health Monitoring -ohjelma, jonka avulla Super Puman moottorien tehokokeesta saatavaa dataa voitaisiin analysoida paremmin. Myös voiteluaineanalyysimenetelmällä voitaisiin täydentää moottorien kunnosta saatavaa tietoa.

Asiasanat: kunnonvalvonta, akseliturbiinimoottori, tehokoe, trendianalyysi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Aircraft Engineering

LEPPÄKOSKI, MIIRO:
Health Monitoring of Turboshaft Engines
Engine Power Check and Trend Analysis

Bachelor's thesis 44 pages, appendices 3 pages
May 2022

This thesis examines how health monitoring systems can be developed regarding turboshaft engines in the Finnish Border Guard's use. The purpose of the study is to find out what kind of health monitoring systems there are and which of them could be suitable for the Finnish Border Guard. The thesis also examines if it is possible to formulate trend analysis with Excel software based on the data retrieved from the engine power checks of Super Puma helicopters.

The thesis reached a conclusion that the best suitable health monitoring systems for the Finnish Border Guard were engine power check and trend analysis. It was also examined if trend analysis could be formulated based on the engine power check data. After the testing it was possible to say that useful trend analysis could not be formulated with Excel software based on the data in question.

To further improve the quality of engine health monitoring in the Finnish Border Guard, new instructions about engine power check were made. In addition, it could be possible to formulate useful trend analysis if software designed to analyse engine power check results were tested. Another way to improve engine health monitoring in the Finnish Border Guard could be the use of lubricant analysis.

Key words: engine health monitoring, turboshaft engine, power check, trend analysis

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	RAJAVARTIOLAITOS.....	8
	2.1 Vartiolentolaivue.....	8
	2.2 Laivueen ilma-aluskalusto.....	9
3	AKSELITURBIINIMOOTTORI.....	12
	3.1 Rakenne.....	12
	3.2 Toimintaperiaate	13
4	KUNNOSSAPITO	16
	4.1 Ennakoiva kunnossapito	16
	4.2 Korjaava kunnossapito.....	17
5	KUNNONVALVONTA	18
	5.1 Kunnonvalvonnan lähtökohdat ja vikaantumismekanismit	18
	5.2 Kunnonvalvonnan suunnittelun lähtökohdat.....	19
	5.3 Kunnonvalvonnan tason määritelmä	20
6	KUNNONVALVONTAMENETELMÄT	22
	6.1 Lämpötilojen mittaus	23
	6.2 Moottorin tehokoe	24
	6.3 Trendianalyysi.....	25
	6.4 Vikailmaisimet	26
	6.5 Voiteluaineanalyysi	27
	6.6 Väriämittaus	29
7	MOOTTORIN TEHOKOE JA TRENDIANALYYSI.....	31
	7.1 Vääntömomenttimarginaali	31
	7.2 Moottorin lämpökuormitus.....	34
	7.3 Tehokokeen suorittamisen ohjeistus.....	36
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	37
	8.1 Tutkimusongelmien analysointi tutkimustulosten perusteella	37
	8.1.1 Trendianalyysitutkimuksen tulokset.....	37
	8.1.2 Kunnonvalvonnan kehitys.....	38
	8.2 Tutkimuksen onnistuminen, laatu ja rajoitteet	38
	LÄHTEET.....	40
	LIITTEET	42
	Liite 1. Matkapäiväkirjan sivu	42
	Liite 2. Teknillinen ilmoitus	43

LYHENTEET JA TERMIT

EGT	Exhaust Gas Temperature
EHM	Engine Health Monitoring
Hp	Pressure Altitude
ITT	Inter Turbine Temperature
LH	Left Hand
N1	Gas Generator Speed
NR	Rotor Speed
OAT	Outside Air Temperature
RH	Right Hand
TIT	Turbine Inlet Temperature
TOT	Turbine Outlet Temperature
TRQ	Engine Torque

1 JOHDANTO

Ilmailussa turvallisuus ja jatkuva tekninen kehittyminen ovat alan keskeisimpiä prioriteetteja. Jatkuvalle kehitymiselle pystytään varmistamaan entistä turvallisempi ja taloudellisempi toiminta. Kunnonvalvonnan oikeanlaisella suorittamisella mahdollistetaan laitteiden oikea-aikainen huoltaminen sekä maksimoidaan helikopterin taivaalla vietetty aika. Hyvällä kunnonvalvonnalla voidaan poistaa turha huoltaminen ja keskittyä niihin laitteisiin ja koneisiin, jotka todellisuudessa sitä vaativat.

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Rajavartiolaitoksen kanssa. Vatiolentolaivueella on käytössä kolme eri helikopterityyppiä, joiden voimanlähteenä toimii akseliturbiinimoottori. Tästä syystä tässä tutkimuksessa keskitytään akseliturbiinimoottoreihin sekä niiden kunnonvalvontaa koskeviin erityispiirteisiin. Moottorien suuren määrän takia ne aiheuttavat myös huomattavan osan koptereiden käyttökustannuksista. Laitoksella on todettu ongelmaksi kunnonvalvonnan oikeanlaisen tason määrittäminen ja millä tavoin saatua dataa voitaisiin hyödyntää. Suurimpia ongelmia ovat olleet moottorien yllättävät vikaantumiset sekä niiden aiheuttamat suuret korjauskustannukset. Laitoksella on tarkat ennalta määritetyt budjetit, joten suuret yllättävät kustannukset aiheuttavat huomattavasti ongelmia.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia kirjallisuuden avulla nykypäivän metodeja akseliturbiinimoottorien kunnonvalvonnasta sekä sitä, millä menetelmillä niiden kuntotaso voidaan aktiivisesti seurata. Tämän lisäksi tavoitteena on luoda Rajavartiolaitokselle ohjeistus, jonka avulla akseliturbiinimoottoreiden kuntotaso voidaan seurata systemaattisesti moottorien kunnosta saatavan datan perusteella. Työssä haetaan vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Millaisia kunnonvalvontamenetelmiä akseliturbiinimoottorien kunnonvalvontaan on olemassa?
2. Mitkä näistä kunnonvalvontamenetelmistä soveltuisivat Rajavartiolaitoksen käyttöön?
3. Voidaanko tällä hetkellä Super Puma helikoptereille suoritettavien tehokkeiden tulosten avulla muodostaa trendianalyysiä Excel-ohjelmistolla?

Ensimmäiseksi opinnäytetyössä esitellään Rajavartiolaitosta organisaationa sekä tutkimuksen viitekehyksenä. Organisaation esittelyn jälkeen opinnäytetyö sisältää kirjallisuuskatsauksen liittyen akseliturbiinimoottoreiden toimintaan, rakenteeseen sekä kunnonvalvontaan. Työn tutkimuksellisessa osuudessa analysoidaan Vartiolentolaivueen Super Puma helikopterityypin moottorien tehokkeesta saatavaa dataa, jonka perusteella pyritään rakentamaan trendianalyysiä moottoreiden tämänhetkisestä kunnosta. Analyysiin perustuen on tarkoitus luoda uusi ohjeistus laitoksen akseliturbiinimoottorien kunnonvalvontaan. Tutkimus on rajattu koskemaan vain Super Puma helikopterimallin moottoreita, mutta Rajavartiolaitokselle luotavassa ohjeistuksessa otetaan huomioon myös muut organisaation käytössä olevat helikopterityypit. Työn lopuksi tarkastellaan tutkimuskysymyksiä kirjallisuuden sekä tutkimustulosten analyysin valossa sekä pohditaan, kuinka hyvin tutkimuksen tavoitteet saavutettiin.

2 RAJAVARTIOLAITOS

Rajavartiolaitos on sisäministeriön alainen sotilaallisesti järjestäytynyt organisaatio, jonka tehtävänä on vastata osaltaan Suomen sisäisestä turvallisuudesta. Laitoksen päätehtäviin kuuluu rajavalvonta maalla ja merellä sekä rajatarkastukset kaikilla rajanylityspaikoilla, muun muassa satamissa, lentoasemilla sekä maarojoilla. Lakisääteisiin tehtäviin kuuluu myös meripelastus, ympäristövahinkojen torjunta, rikostorjunta sekä sotilaallinen maanpuolustus. Rajavartiolaitos osallistuu myös EU:n alueella tapahtuviin rajavalvontaoperaatioihin sekä ympäristönvalvontaan koko Itämeren alueella. Laitoksen tehtävistä vastaa yhteensä kahdeksan eri hallintoyksikköä: Kaakkois-Suomen, Pohjois-Karjalan, Kainuun ja Lapin rajavartiostot, Suomenlahden ja Länsi-Suomen merivartiostot, Vartiolentolaivue sekä Raja- ja merivartiokoulu. Raja- ja merivartiokoulun tehtävänä on kouluttaa raja- ja merivartijat, antaa henkilökunnalle jatkokoulutusta sekä vastata varusmiehille annettavasta erikoisrajajääkärikoulutuksesta. (Raja 2020.)

2.1 Vartiolentolaivue

Vartiolentolaivueen tehtävänä on toteuttaa Rajavartiolaitoksen tehtävien vaatima lentotoiminta tehtävän mukaan helikopterilla tai lentokoneella. Ilma-alusten päätehtävinä on meripelastus, ympäristönvalvonta ja rajavalvonta sekä maalla että merellä. Laivueella on käytössä kolme tukikohtaa, jotka sijaitsevat Helsingissä, Turussa sekä Rovaniemellä. Kaikissa tukikohdissa pidetään jatkuvaa meripelastusvalmiutta. Laivueen kalustolla tuetaan myös yhteistoimintaviranomaisia muun muassa sairaankuljetuksissa, etsintä- ja pelastustehtävissä sekä metsäpalojen sammutuksissa. Vartiolentolaivue vastaa ilma-alustensa lentokelpoisuudesta sekä niiden vaatimasta huoltotyöstä itsenäisesti ja osittain ostopalveluna. Laivueen päähuoltoasema sijaitsee Helsinki-Vantaan lentoasemalla, jossa suoritetaan pääsääntöisesti kaluston vaatima huoltotoiminta. Toimipisteessä sijaitsee myös lentokelpoisuus- ja logistiikkajaostot sekä Vartiolentolaivueen esikunta. (Raja 2020.)

2.2 Laivueen ilma-aluskalusto

Laivueella on käytössä neljä eri ilma-alustyyppiä, joilla kaikilla on eri käyttötarkoitukset sekä toiminta-alueet. Rovaniemelle sijoitetut kopterit ovat tyypiltään AB/B 412 meripelastuskoptereita (Kuva 1). Helikopterin voimanlähteenä toimii Pratt & Whitney PT6T-3D, jonka kaksi moottoria tuottaa yhteensä 1 044 kW lentoonläh- tötehoa ja 843 kW jatkuvaa tehoa. Helikopterin maksimilentonopeus on 259 km/h ja matkalentonopeus on 226 km/h. Sen toimintasäde on noin 800 km, se painaa 2 920 kg ja suurin lentoonläh- töpaino on 5 398 kg. Koptereita on laivueen käytössä tällä hetkellä kolme kappaletta. Sen miehistöön kuuluu neljä jäsentä: kaksi len- täjää, mekaanikko sekä pintapelastaja. Kopteria käytetään pääsääntöisesti et- sintä- ja pelastustehtäviin. (Raja 2020.)



KUVA 1. AB/B 412 Meripelastuskopteri (Flyfinland 2019)

Toinen helikopterityyppi on AS332L1e Super Puma (Kuva 2), joita on laitoksen käytössä viisi kappaletta. Kyseessä ovat laivueen isoimmat ja raskaimmat meri- pelastuskopterit, jotka operoivat Turusta sekä Helsingistä. Helikopterin voiman- lähteenä toimii kaksi Safran Makila 1A1 akseliturbiinimoottoria, jotka tuottavat kumpikin 1 376 kW tehon. Koneen maksimilentonopeus on 277 km/h ja matka- lentonopeus on 247 km/h. Sen toimintasäde on 1000 km, se painaa noin 5 500 kg ja suurin lentoonläh- töpaino on 8 600 kg. Super Pumat ovat laivueen moder- neimmat helikopterit ja niiden suurin työllistäjä on meripelastus. Niiden miehis- töön kuuluu viisi jäsentä: kaksi lentäjää, mekaanikko, pintapelastaja sekä ensi- hoitaja. (Raja 2020.)



KUVA 2. AS 332L1e Super Puma Meripelastuskopteri (Ilmailumuseo 2017)

Kolmas ja pienin kopterityyppi on AW 119 Koala- helikopteri, joita on käytössä neljä kappaletta (Kuva 3). Kopterit on sijoitettu Helsinkiin ja Rovaniemelle. Koala on yksimoottorinen helikopteri, jonka voimanlähteenä toimii Pratt & Whitneyn valmistama PT6 B37A akseliturbiinimoottori, joka tuottaa 747 kW tehon. Kopterin suurin sallittu nopeus on 282 km/h ja matkalentonopeus on 244 km/h. Sen toimintasäde on noin 750 km, se painaa noin 1 500 kg ja suurin lentoonlähtöpaino on 2 850 kg. Kopterin miehistöön kuuluu kaksi jäsentä: lentäjä sekä mekaanikko. Kopterin ensisijainen käyttökohde on rajojen valvonta sekä etsintätehtävät. (Raja 2020.)



KUVA 3. AW 119 Koala Valvontahelikopteri (Lentoposti 2013)

Laivueella on käytössä myös lentokoneita. Kyseessä on DO 228 Dornier- valvontakone, joita on laivueella kaksi kappaletta (Kuva 4). Molemmat koneet operoivat Turun tukikohdasta käsin. Kyseessä on kaksimoottorinen lentokone, jonka voimanlähteinä toimii kaksi Honeywell TPE331-10GP potkuriturbiinimoottoria. Moottorit tuottavat kumpikin 579 kW tehon. Lentokoneen suurin sallittu nopeus on 518 km/h ja sen matkalentonopeus on 403 km/h. Koneen toimintasäde on noin 1 250 km, se painaa 3 900 kg ja suurin lentoonlätöpaino on 6 575 kg. Miehistöön kuuluu 3–4 henkilöä riippuen tehtävästä: kaksi lentäjää, mekaanikko sekä operaatordi. Aluksen tärkeimpänä tehtävänä on merialueiden sekä ympäristön valvonta. (Raja 2020.)



KUVA 4. Dornier Do 228 Valvontalentokone (Ilmailua 2017)

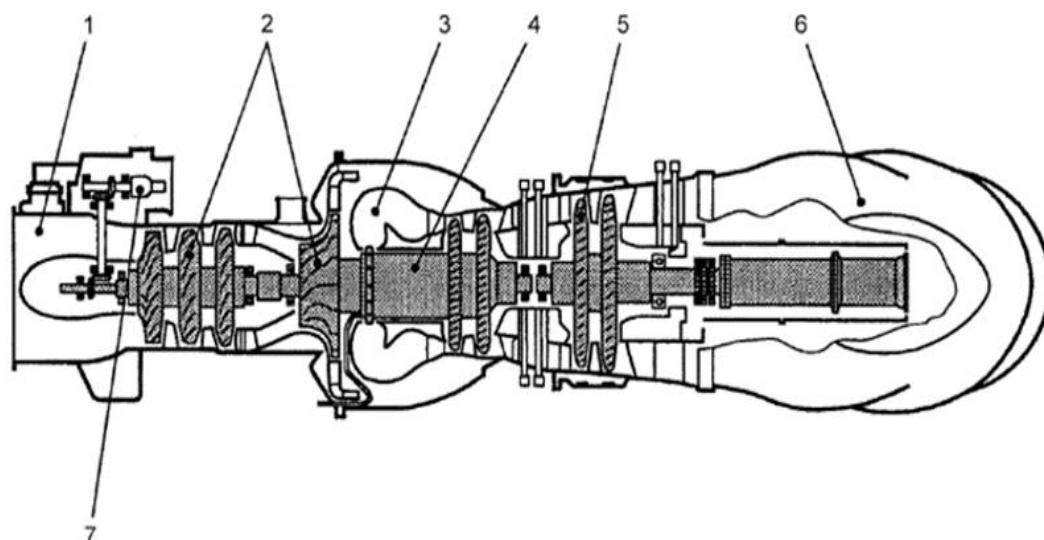
3 AKSELITURBIINIMOOTTORI

Pois lukien pienimmät 1–3 paikkaiset helikopterit, nykyään valmistettavien kopterien voimanlähteenä toimii kaasuturbiinimoottori. Verrattaessa mäntämoottoriin kaasuturbiinin teho/paino suhde on huomattavasti parempi, ja sen huoltojaksot ovat pidempiä sekä toiminnallisesti luotettavampia. (Raunio 1989, 85.) Koptereissa olevia kaasuturbiineja nimitetään akseliturbiinimoottoreiksi, koska moottorista saatava teho otetaan ulos akselilla, joka taas pyörittää voimansiirtoa (Raunio 2000, 10–1).

3.1 Rakenne

Akseliturbiinimoottori on hyvin samankaltainen kuin potkuriturbiinimoottori. Ilmaluksissa akseliturbiinimoottori käyttää ulostuloakselia, jolla pyöritetään helikopterin roottoria. (Koivisto & Jokinen 2008, 69.) Tyypillisin moottorisovellus kaasuturbiinikoptereissa on vapaaturbiinimoottori. Tällaisessa moottorissa työturbiini on yhdistetty voimansiirtoon, mutta työturbiinin ja kaasugeneraattoriturbiinin välillä ei ole mekaanista yhteyttä. (Raunio 1989, 85.) On olemassa myös suoravetoisia kiinteällä akselilla olevia akseliturbiinimoottoreita. Tällaisissa sovelluksissa täytyy lisätä kytkin moottorin ja vaihteiston väliin. Tämän kaltaiset toteutukset ovat kuitenkin harvinaisempia, johtuen monimoottorisovelluksien haasteellisesta toteuttamisesta. Vapaaturbiinimoottorien kaasugeneraattorin kierrosluku vaihtelee tehontarpeen mukaan, mutta suoravetoisessa se pysyy normaalisti vakiokierroksilla. (Raunio 2000, 10–1.)

Akseliturbiinimoottori koostuu pääkomponenteista, jotka ovat imuaukko, ahdin, polttokammio, kaasugeneraattoriturbiini, työturbiini ja pakoputki (Turbomeca 2004, 3.5). Näiden lisäksi moottoriin kuuluu apulaitevaihteisto, ilmankierto-, polttoaine-, öljy-, sytytys- ja tehonsäätöjärjestelmät (Raunio 2000, 10–1). Kuviossa 1 on esitetty Safran Makila 1A1 akseliturbiinimoottori ja sen komponentit.



1.Imuaukko 2.Ahdin 3.Polttokammio 4.Kaasugeneraattorin turbiini 5.Työturbiini 6.Pakoputki 7.Apulaitevaihteisto

KUVIO 1. Makila 1A1 Akseliturbiinimoottori (Safran Maintenance manual 2014, muokattu)

Akseliturbiinimoottorit voidaan rakentaa esimerkiksi moduulirakenteella tai niin kutsutulla paluuvirtauspolttokammiolla. Moduulirakentamisella mahdollistetaan moottorin purkamisen useisiin osakokoonpanoihin, jotka ovat täysin vaihdettavissa. Moduulit ovat itsenäisiä kokonaisuuksia, ja tämän ansiosta ne ovat helposti irrotettavissa muista moduuleista ilman erikoistyövälineitä tai henkilöstöä. (Turbomeca 2004, 182.) Modulaarisen suunnittelun etuna on myös se, että vaurioitunut moduuli voidaan vaihtaa ilman, että koko moottori lähetetään korjattavaksi. Lisäksi se helpottaa moottorin sisäosien tarkastettavuutta. Eri moottoriyksiköiden moduulit ovat täysin vaihtokelpoisia keskenään. (Raunio 2000, 10–19.) Modulaarisuus mahdollistaa myös yksilöllisen perustarkastusjakson asettamisen jokaiselle moduulille (Turbomeca 2004, 182). Paluuvirtauskammiolla rakennetut moottorit saadaan rakennettua hyvin lyhyeksi. Tämän lisäksi sovelluksessa ahtiimen ja turbiinin välinen akseli on jäykkä ja lyhyt. Paluuvirtauskammiomoottorissa painehäviö on kuitenkin suurempi kuin suorassa polttokammiossa. Painehäviöt ovat tyypillisesti noin 4–5 % luokkaa. (Raunio 2000, 10–7.)

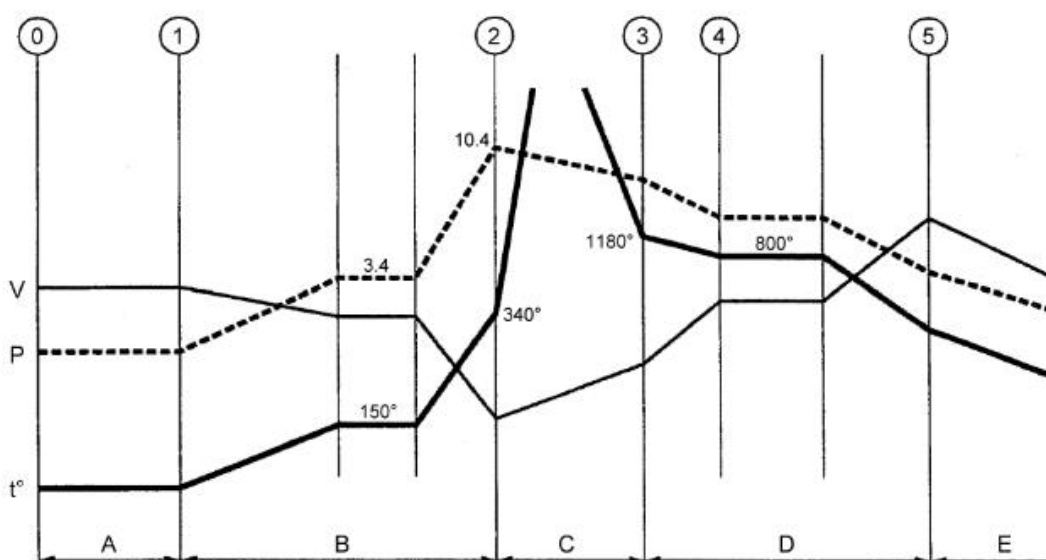
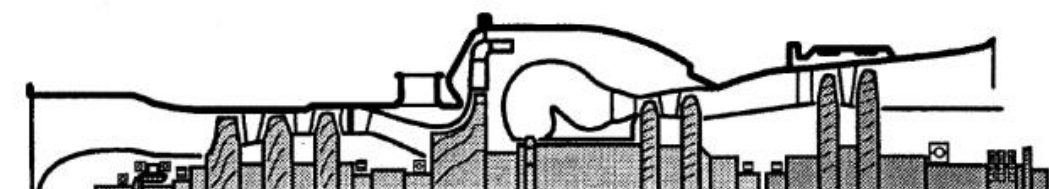
3.2 Toimintaperiaate

Akseliturbiinimoottorin tarkoitus on muuttaa polttoaineessa ja ilmassa oleva kemiallinen energia mekaaniseksi voimaksi akselille (Turbomeca 2004, 3.2). Prosessi pitää sisällään sisäänoton, puristuksen, polton, laajennuksen ja tehon siirron (Turbomeca 2004, 3.6). Moottorissa olevat kaasugeneraattorin ahdin ja turbiini ovat samalla akselilla. Koptereissa olevat ahtimet ovat tyypeiltään aksiaali- ja radiaaliahtimia ja niiden tehtävä on puristaa sisään tulevaa ilmaa. Ahtimien tehokkuutta kuvataan painesuhteella, joka on ahtimen jälkeisen ilman paineen suhde ahtimeen tulevan ilman paineeseen. Radiaaliahtimella saadaan parempi painesuhde verrattaessa aksiaaliahtimeen. Moottorin taloudellisuus kasvaa painesuhteen kasvaessa, kunhan muut moottorin ominaisuudet eivät muutu. (Raunio 2000, 10–3.) Aksiaaliahtimen materiaaleina käytetään titaani-, alumiini- ja terässeoksia. Titaani- ja terässeoksilla saadaan korkeimmat lämpötilankesto-ominaisuudet. Titaania voidaan käyttää noin 400 °C ja ruostumatonta terästä jopa 1 000 °C lämpötiloissa ennen kuin niiden lujuusominaisuudet heikkenevät merkittävästi. (Raunio 2000, 10–4.) Radiaaliahdin on rakenteeltaan tukeva ja lisäksi se kestää hyvin vierasesineitä. Ahdinpyörän tarkoitus on kiihdyttää virtausta ja ohjata se kiinteisiin laajeneviin kanaviin. Kanavissa virtaus hidastuu sekä sen paine kasvaa. Ahdinpyörän keskeltä sisään tulevan ilman nopeus kiihtyy keskipakovoiman vaikutuksesta. Siipien välissä paine kasvaa, joka hidastaa virtausnopeuden suunnilleen samalle tasolle kuin sisään tullessa. Radiaaliahtimien materiaaleina käytetään tyypillisesti alumiini- ja titaaniseoksia. (Raunio 2000, 10–6.)

Moottorin teho synnytetään polttokammiossa tapahtuvalla palamisella. Helikoptereissa käytettävän lentopetrolin teoreettisesti suurimman hyötysuhteen antava seossuhde on 1:15. Tällöin liekin lämpötila on noin 2 000–3 000 °C astetta, joka riippuu tulonilman lämpötilasta, polttoaineen lämpöarvosta, palamisen hyötysuhteesta sekä seossuhteesta. (Raunio 2000, 10–6.) Jotta komponentit kestävät korkeaa lämpötilaa on kaasuvirtausta tarpeen jäähdyttää. Jäähdyttäminen toteutetaan ohjaamalla polttokammion vaipan ohi ilmaa. (Raunio 2000, 10–7.)

Polttokammioon syötetty ilman ja polttoaineen seos syttyy ja purkautuu laajetesaan turbiiniin, joka pyörittää kaasunkehittäjäturbiinia sekä apulaitteita. Ahtimen pyörittämisen ylläpitämiseen käytettävä teho on suuri, tyypillisesti noin 60–70 % koko prosessin tuottamasta energiasta. (Raunio 2000, 10–9.) Ylimääräiseksi jäänyt kaasu pitää sisällään vielä energiaa ja sen tehtävä on pyörittää työturbiinia,

joka on taas yhdistetty mekaanisesti voimansiirtoon. Pakoputkeen päätyvä kaasuvirtaus pitää sisällään niin vähän energiaa, että sen työntövoima on helikoptereissa hyvin merkityksetön. Se saattaa aiheuttaa suurilla lentonopeuksilla jopa ilmanvastusta. (Raunio 2000, 10–2.) Kuviossa 2 on esitetty Safran Makila-moottorin virtaussuureet V nopeus, P (bar) paine ja t° (C°) lämpötila moottorin käydessä.



KUVIO 2. Safran Makila- moottorin suureet (Safran Maintenance manual 2014)

Kuvasta voidaan todeta eri moduulien toiminta ja tehtävät. Ilman tullessa sisään ahdin pyrkii nostamaan painetta ja samalla sen lämpötila kasvaa, mutta nopeus hidastuu. Paine on korkeimmillaan juuri ennen sytytystä polttokammiossa, jonka jälkeen lämpötila kasvaa maksimiarvoonsa. Palamisen jälkeen virtauksen nopeus kasvaa ja paine laskee. Työturbiini pyrkii käyttämään kaiken mahdollisen energian virtauksesta, jotta poltetusta polttoaineesta saadaan mahdollisimman paljon tehoa roottorin pyörittämiseen.

4 KUNNOSSAPITO

Kunnossapito on käsitteenä hyvin laaja ja monitasoinen (Kunnossapito n.d). Kunnossapidon pääsääntöinen tehtävä on huolehtia siitä, että käytettävät koneet ja moottorit ovat jatkuvasti käyttökunnossa. Kunnossapito määritelläänkin standardissa PSK 6201 seuraavasti: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon koko sen elinjakson aikana”. (Mikkonen 2009, 26.) On siis tärkeää, että kunnossapitoa ei ajatella kuluna tai pakollisena hukkana vaan tärkeänä prosessina, joka täytyy tuntea hyvin. Tämä tarkoittaa siis, että organisaatiolla tai laitoksella on oltava selkeä näkemys siitä, millaista suorituskykyä laitteelta odotetaan. Suorituskyky taas määrittää sen, millaista tasoa ja tuloksia kunnossapidolla halutaan. Kunnossapitoon ei siis varsinaisesti kuulu ne toimenpiteet, joilla pyritään nostamaan laitteen suorituskykyä alkuperäisestä. On kuitenkin hyvä muistaa, että kunnonvalvonnan yksi tehtävistä on huomata niitä toimenpiteitä, joilla voidaan ongelmia ratkaista ja täten parantaa laitteen suorituskykyä entisestään. (Mikkonen 2009, 26.) Suurin osa koneen huollosta nykypäivänä on joko reaktiivista, eli korjataan tai vaihdetaan laitteita sen vikaantumisen jälkeen, tai sokeasti ennakoivaa, eli oletetaan suorituskyvyn heikentyvän tietyn ajanjakson jälkeen. Ihminen olettaa usein, että koneet hajoavat yhtäkkiä, mutta todellisuudessa ne käyvät yleensä mitattavissa olevan huononemisprosessin läpi ennen tätä. (Lee 2006.)

4.1 Ennakoiva kunnossapito

Ennakoivan kunnossapidon tärkein tehtävä on pyrkiä estämään yllättävät vikaantumiset sekä vauriot. Tämän avulla pystytään välttämään äkilliset käyttökatkokset sekä lisäämään käytettävyyttä. Kunnossapito itsessään ja siihen käytetyt uudet komponentit sekä varaosat ovat jo merkittävä kustannus, mutta sitäkin korkeammat taloudelliset kustannukset syntyvät, kun käytettävät koneet eivät ole käytävissä tai ne eivät toimi halutulla tavalla. (Mikkonen 2009, 139.) Ennakoivaan

kunnossapitoon kuuluvat lisäksi mittaava kunnossapito sekä ehkäisevä kunnossapito (ABB 2000, 3). Mittaavan kunnossapidon tarkoitus on tutkia koneiden käyttökuntoa käyttämällä siihen soveltuvia mittavälineitä. Näitä ovat esimerkiksi melun tai tehonkulutuksen mittaaminen. Ehkäisevän kunnossapidon tarkoitus on pitää yllä laitteen käyttöominaisuuksia, palauttaa koneen heikentynyt toimintakyky vika edeltävälle tasolle tai estää vian tai vaurion syntyminen (Mikkonen 2009, 97). Ehkäisevään kunnossapitoon kuuluu lisäksi myös määräaikaiset kunnossapidon toimenpiteet, kunnonvalvonta sekä kuntoon perustuva suunniteltu korjaus (Mikkonen 2009, 41). Ennakoivalla toiminnalla saadaan luotua myös turvallisuutta lisääviä vaikutuksia. Ennakoiva kunnossapito on keskittynyt entistä enemmän oikea-aikaisiin huoltoihin määräaikaishuoltojen sijaan. Tällä tavoin huoltojen sisältö ja ajankohta voidaan määrittellä suurelta osin erilaisten tarkastusten sekä kunnonvalvontamittauksien avulla. (ABB 2000, 3.)

4.2 Korjaava kunnossapito

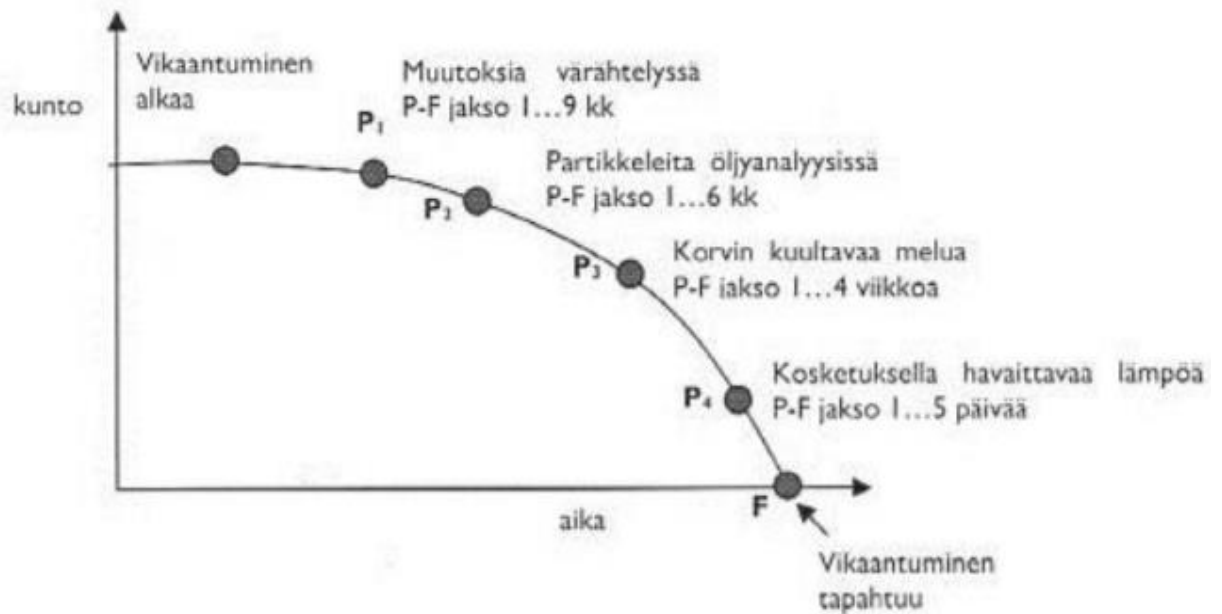
Korjaava kunnossapito tarkoittaa käytännössä sitä, että laite korjataan tai huolletaan vian jo synnyttyä (ABB 2000, 3). Korjaavan toimenpiteen tarkoitus on siis palauttaa laitteen normaali toimintakunto (Mikkonen 2009, 99). Tyypillisesti vikaantumisen aiheuttaa toimintaan katkoksen ja pysäyttää toiminnan. Yllättävä käyttökatkos aiheuttaa tavallisesti suuremmat kustannukset, kuin itse korjaaminen. Tästä syystä tavallisesti kriittisille laitteille on olemassa varalaitte lyhentämään vikatilanteen kestoja. Varalaitteita on kuitenkin usein vaikea järjestää kaikille laitteille sekä ne aiheuttavat merkittävästi kustannuksia itsessään. (ABB 2000, 3.) Moottorien ja laitteiden vikaantumisista syntyvä korjaava kunnossapito aiheuttaa suurimmat kustannukset ja menetykset, joten on tärkeää kehittää uusia ja kehittyneempiä menetelmiä ongelmien ratkaisemiseen (ABB 2000, 1).

5 KUNNONVALVONTA

Kunnonvalvonnalla on suuri merkitys laitteiden ja moottoreiden toimintaan. Toiminnan ja tuotannon ominaispiirteet määrittävät millainen kunnossapidon taso vaaditaan ja on käyttäjälle tarkoituksenmukainen. Siksi kunnossapidon merkitys onkin tärkeää ymmärtää hyvin. Kunnonvalvonnan puutteet näkyvätkin usein alentuneena suoritus- tai laaduntuottokykynä. Lisäksi korjaaminen on usein erittäin kallista, mikäli alkavia vikaantumisia ei todeta tarpeeksi ajoissa. Kunnossapidon huolelliseen suunnitteluun onkin tärkeää keskittyä ja kiinnittää paljon huomiota laitoksissa, jossa on tuottavaa toimintaa. (Mikkonen 2009, 139.)

5.1 Kunnonvalvonnan lähtökohdat ja vikaantumismekanismit

Koneiden ja laitteiden todennäköisyys vikaantua ei riipu juurikaan niiden käytöstä. Tästä syystä laitteiden ikä ei vaikuta juurikaan niiden vikaantumismekanismiin. Vikaantumismekanismilla tarkoitetaan sellaista rikkoutumiseen johtavaa fyysistä prosessia, kuten esimerkiksi murtumaa, kulumista tai syöpymistä, joka on havaittavissa joko aistein tai mittauksilla. Suurin osa tapahtuvista laiterikoista tapahtuukin satunnaisesti. Väitetään, että jopa 80 % tapahtuvista vaurioista on enemmän tai vähemmän satunnaista. (Mikkonen 2009, 141.) Laitteiden kuntoa täytyy valvoa menetelmillä, joiden avulla voidaan havaita tarpeeksi luotettavasti mahdolliset viat sekä voidaan seurata niiden kehittymistä. Kunnonvalvontamittauksilla pyritään havaitsemaan laitteiden vikaantuminen ennen, kun vika pääsee niin pitkälle, että se johtaa koneen pysähtymiseen. (ABB 2000, 2.) Kuviossa 3 näkyy esimerkki laakerivian aiheuttamasta oireilusta P-F käyränä. Käyrän on tarkoitus kertoa laitteen kuntotason muutos tietyn ajan kuluessa. P on piste, jolloin vika havaitaan ja piste F on hetki, jossa vikaantuminen tapahtuu. Jos vaurioitumista pystytään ennustamaan, voidaan se mahdollisesti estää kokonaan tai ainakin suuremmat seuraukset voidaan poistaa. (Mikkonen 2009, 140.) P-F-jakson pituus riippuu valvontaan käytetystä menetelmästä sekä tekniikasta. Suunnitteluvaiheessa pystytäänkin erilaisilla menetelmä- sekä parametrivalinnoilla siirtämään pistettä P lähemmäksi aikaa, milloin vikaantuminen alkaa. (Mikkonen 2009, 141.)



KUVIO 3. Esimerkki laakerin vikaantumisesta (Mikkonen 2009, 141)

Optimaalisessa tilanteessa tunnetaankin kaikkien eri laitteiden ja vikamuotojen käyrän muoto ja tämän perusteella pystytään valitsemaan oikea valvontamenetelmä. Tämän avulla saadaan tarpeeksi aikaa korjauksen tai huollon suunnitteluun vikaantumisen alkamisen ja varsinaisen vikaantumisen välille. Perusoletta-
mus on se, että jokaista vikaantumista ennakoit mitattava tai aistittava muutos koneen käyttäytymisessä. Tämän jälkeen seuraa jakso, jonka aikana vikaantumisen oireita voidaan seurata ja lopullinen vikaantuminen voidaan ennustaa. Mitä paremmin mahdolliset vikaantumismekanismit tiedostetaan, sen paremmin pystytään määrittämään tarvittavat kunnonvalvontamenetelmät sekä valvottavat suuret. (Mikkonen 2009, 140.)

5.2 Kunnonvalvonnan suunnittelun lähtökohdat

Kunnonvalvonnan suunnittelun lähtökohdat määrittävät koneiden ja laitteiden vikaantuvat komponentit eli todennäköiset vikaantumismekanismit. Nämä mekanismit määrittävät millaisia menetelmiä ja kunnonvalvontatekniikoita eri suureiden seuraamiseen käytetään. Vikaantumisnopeudella voidaan taas määrittää miten ja millaisella aikataululla valvontaa tulee toteuttaa. Jotta kunnonvalvonnasta saadaan mahdollisimman kokonaisvaltaista, laitteiden ja komponenttien kuntoa

täytyy valvoa monilla erilaisilla tekniikoilla. Tyypillisimmät kunnonvalvontatavat ovat värähtelymittaukset, lämpötilojen seuranta, voiteluaineanalyysit, erilaiset visuaaliset tarkastukset sekä trendianalyysit. (Mikkonen 2009, 162.) Kunnonvalvonnan suunnittelun kulmakivet ovat:

- Määrittää organisaation laitteiden kriittisyys sekä kriittisten laitteiden kunnonvalvonnan tarve.
- Selvittää laitekohtaisesti soveltuvat menetelmät kunnonvalvontaan.
- Arvioida tekninen toteutus.
- Sijoittaa ne laitteet valvonnan piiriin, joille kunnonvalvonta on taloudellisesti järkevä toteuttaa.
- Laatia valituille laitteille kunnonvalvontasuunnitelma, joka kattaa mittausvälit, tekniikat ja menetelmät sekä käytännön toteuttamisen.

Jos organisaatio on tehnyt aikaisemmin kunnonvalvontaa, aloitetaan suunnittelu nykyisen toiminnan kartoittamisella. Määrittämisen jälkeen voidaan arvioida, täsmääkö toimintatavat ja asetetut tavoitteet keskenään. On tärkeää arvioida, kannattaako olemassa olevaa kehittää vai onko kannattavampaa suorittaa suurempaa kehitystyötä. Suunnitelman on hyvä pitää sisällään suoritettavat tarkastukset sekä mittaukset ja mitkä laitteet mitataan ja kuinka usein. Suunnitelman päivittäminen on myös tärkeää, kun kehitystyöstä saadaan uutta informaatiota. (Mikkonen 2009, 162.)

5.3 Kunnonvalvonnan tason määritelmä

Kunnonvalvonnassa on tärkeää, että kaikille komponenteille määritellään taso, joka on niille riittävä. Täytyy selvittää, voiko kunnonvalvonnan toteuttaa yksinkertaisilla mittauksilla tai tarkastuksilla, jotka täyttävät tavoitteet. Jos näin ei voida tehdä, laitteeseen täytyy soveltaa tarkempaa valvontaa. Yksinkertaisten mittausmenetelmien tarkoituksena on karsia pois ne koneet, jotka eivät vaadi tarkkaa analysointia. Jos vikaantumismekanismit ovat sen tyyppisiä, että niihin ei voida käyttää pelkästään jotain tiettyä menetelmää tai tekniikkaa, täytyy arvioida, voidaanko menetelmiä mahdollisesti yhdistää. Lähtökohta on kuitenkin se, että mittaus- ja tarkastustuloksista täytyy saada luotettava reaaliaikainen tieto laitteen

sen hetkisestä kunnosta. Kunnonvalvonta on silloin aina järkevää, kun se on taloudellisempaa kuin laitteen rikkoutumisen aiheuttamat kustannukset. (Mikkonen 2009, 163.)

6 KUNNONVALVONTAMENETELMÄT

Akseliturbiinimoottoreiden kunnonvalvontaa voidaan suorittaa monin eri tavoin. Menetelminä käytetään anturitietoihin perustuvaa sekä ihmisen suorittamaa fyysistä tai visuaalista työtä. Ihmisen tekemät suoritukset ovat lähinnä tarkastuksia ja mittauksia, joita tehdään huoltojen yhteydessä tai perustuen valmistajien manuaaleihin ja käsikirjoihin. Tällaisia ovat esimerkiksi öljyn tai magneettitulppien tarkastukset, värinätasojen mittaamiset sekä muut ulkopuoliset tarkastukset. Moottorin sisäisten komponenttien kuten ahtimien tarkastukset voidaan suorittaa boroskooppiä hyödyntäen. Laitteella päästään tarkastamaan moottorin kunto pienestä reiästä ilman, että moottoria tarvitsee erikseen purkaa. Tällä tavoin saadaan hyvä kuva siitä, onko moottorissa kulumaa tai muuta fyysistä vauriota. Magneettitulppien tarkoitus on kerätä moottorista mahdollisesti irronnut magneettinen lastu tai muu metallinen materiaali. (Wild 2018). Tulppia on olemassa mekaanisia sekä sähköisiä. Sähköisen tulpan tarkoitus on indikoida varoitusvalona, jos lastua on syystä tai toisesta muodostunut.

Sensoreilta sekä antureilta saatava data on huomattavasti parempi kunnonvalvontaväline verrattuna ihmisen suorittamaan kunnonvalvontaan. Antureilta saatu tieto on luotettavampaa, sekä usein vika tai ongelma pystytään huomaamaan nopeammin. Haluttu data riippuu hieman moottorista, mutta näitä ovat yleensä pakokaasujen lämpötilat (EGT), ahtimien kierrosnopeudet (N1 ja N2), öljynpaineet, polttoaineen virtausnopeus ja vääntömomentti. (Mustagime 2018.) Esimerkiksi jos EGT-arvo alkaa nousemaan huomattavasti verrattuna normaaliarvoon, voidaan päätellä, että moottori on vikaantumassa. On siis tärkeää, että kunnonvalvonnassa ei luoteta pelkästään ihmisen tekemään työhön vaan moottorin arvoja seurataan tarpeeksi useasti.

Ilmailussa kunnonvalvontamenetelmien tarkoitus on alentaa huoltokustannuksia, vähentää polttoaineenkulutusta sekä lisätä turvallisuutta ja käyttövarmuutta. (Mustagime 2018.) Kaasuturbiinimoottorit tuottavat ilma-aluksille halutun tehon, nopeuden sekä nostovoiman, ja tästä syystä niiden moottorit ovatkin erittäin tärkeitä jo pelkästään lentoturvallisuuden kannalta. Nykypäivän ilma-alusten moot-

toreista tehdään turvallisempia lisäämällä ohjausparametrien ja antureiden määrää. Koska moottorit toimivat hyvin korkeissa lämpötiloissa, paineissa ja suurilla nopeuksilla, on tärkeää, että niitä käytetään niiden fyysisissä rajoissa. Ajan kuluessa moottorit alkavat näyttämään kulumisen ja repeytymisen merkkejä. Pieni vika lennon aikana ei estä moottorin käyttöä, mutta havaitsematon vika voi johtaa suurempaan ongelmaan. Ja jos näitä suurempia vikoja ei huomioida, se voi johtaa korkeisiin huoltokustannuksiin tai jopa onnettomuuksiin. (Mustagime 2018.)

6.1 Lämpötilojen mittaus

Lämpötilojen mittaaminen on yleisesti käytettävä mittausmenetelmä akseliturbiinimoottoreissa. Kappaleen lämpötila kasvaa, kun siihen tuodaan lisää energiaa. Erilaiset kappaleet ja materiaalit vaativatkin erisuuruisen määrän energiaa samansuuruisen lämpötilamuutoksen aikaansaamiseksi. (Mikkonen 2009, 439.) Polttokammiossa tapahtuvan lämpötilan kasvun tulisi olla mahdollisimman korkea. Lämpötilaa joudutaan kuitenkin rajoittamaan moottorin kestävyys takia. Korkeat lämpötilat voivat johtaa moottorin rappeutumiseen ja kulumiseen. Jatkuvat rajojen ylittävät lämpötilat aiheuttaisivat moottorin komponenteille virumista sekä termistä väsymistä, jonka takia niiden elinikä jäisi epätaloudellisen lyhyeksi. Lämpötilan mittaamiseen käytetään eri arvoja riippuen moottorinvalmistajasta. (Raunio 2000, 10–21.) Näitä on esimerkiksi TOT, TIT, ITT ja EGT.

Pakokaasujen lämpötilojen seuraamisella voidaan määrittää moottorin suorituskyky. Lentäjien tulee kiinnittää huomiota arvoon, koska määritetyn rajan pienikin ylittäminen voi vahingoittaa moottorin komponentteja tai lyhentää niiden käyttöikä. Tästä syystä on tärkeää pitää lämpötila-arvo mahdollisimman alhaisena. Lämpötilojen muutoksilla voidaan havaita monia erityyppisiä ongelmia moottorissa. Ahtimen likaantuminen, tiivisteen vuotaminen ja lisääntyneet välykset ovat yksi syy lämpötilan kasvamiseen. (Mustagime 2018.) Pakokaasujen lämpötilat ovat myös verrattavissa suoraan polttoaineenvirtaukseen. Polttoaineen virtauksen kasvattaminen kasvattaa palamisen määrää ja sitä kautta nostaa palokaasujen lämpötilaa. Jos polttoaineen kulumisen lisääntyminen ei kasvata lämpötilaa, voidaan todeta ongelma polttoaineen syötössä. (Wild 2018.)

6.2 Moottorin tehokoe

On luonnollista, että akseliturbiinimoottoreiden suorituskyky heikkenee ajan kuluessa. Tämän havaitsemiseksi ilma-aluksen valmistaja on määritellyt, että lentomiehistön on suoritettava säännöllisesti moottorin tehokokeita. Näiden avulla pystytään havaitsemaan milloin moottorin kuntotaso alkaa hiipumaan ja on tehtävä toimenpiteitä tämän estämiseksi. Tämä antaa tärkeää tietoa myös lentäjille, jotta he tietävät moottoreiden tuottavan tarpeeksi tehoa tarpeen vaatiessa. (Pratt & Whitney 2019.) Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi kaksimoottorisessa kopterissa toisen moottorin vikatilanteet. Tehokokeen avulla voidaan määrittää molempien moottorien yksilöllinen tehon tuotto. Tämän avulla tiedetään, että tuottaako vikatilanteessa yksi moottori tarpeeksi tehoa, jotta kopteri saadaan turvallisesti laskuun.

Tehokoe olisi hyvä tehdä mahdollisimman useasti, jotta kuntotason määrittelystä saadaan mahdollisimman tarkka. Aikavälit vaihtelevat hieman riippuen moottorin valmistajasta ja operaattorin omasta määrittelystä. Tähän saattavat vaikuttaa myös mahdolliset huolenpitosopimukset, jotka palveluntuottaja määrittelee. Tyyppillisesti sopimuksissa määritellään minimitaso, jota operaattori voi halutessaan tiukentaa, jos haluaa tarkempaa analyysiä. (Pratt & Whitney 2019.)

Ohjeistus tehokokeen suorittamiseen on määritelty kunkin kopterin lentokäsikirjassa. Manuaali antaa selkeän ohjeistuksen ja tavan, miten koe tehdään. Tehokoe voidaan tehdä hyödyntäen eri lentotiloja. Vaihtoehtoja ovat esimerkiksi leijunta tai lennossa suoritettava koe. (Pratt & Whitney 2005.) Tehokokeessa kerätään erilaisia parametrejä moottorin toiminnasta, joiden avulla pystytään moottorin toimintakyky määrittämään. Super Puma -helikopterissa tällaisia parametrejä ovat:

- Painekorkeus: Hp (ft)
- Moottorin vääntömomentti: TRQ (%)
- Moottorin nopeus: NR (rpm)
- Kaasugeneraattorin nopeus: N1 (%)
- Lämpötila: OAT (°C)

Nämä parametrit kerätään talteen esimerkiksi matkapäiväkirjaan, josta ne ovat helposti luettavissa. Taulukossa 1 on esitetty esimerkkiarvoja tehokokeesta.

TAULUKKO 1. Esimerkkiarvoja tehokokeesta (AS332L1e Flight manual 2020)

1. N1	92,4 % (30700 rpm)
2. OAT	+20 °C
3. Hp	4200 ft
4. TRQ	35,5 %
5. NR	268 rpm (101,1 %)

6.3 Trendianalyysi

Ilmailussa eri organisaatiot ja käyttäjät pyrkivät jatkuvasti kehittämään moottoreiden huoltovarmuutta ja samalla alentamaan käyttökustannuksia. Tämän takia kehitetään jatkuvasti metodeja, joilla voidaan seurata reaaliajassa moottorin toimintaa. Trendien seuranta tai trendi on kaaviotekniikka, jolla havaitaan fyysisten tai liiketoimintaprosessin vaihtelut ja poikkeamat ajan funktiona. Se on yleisimmin käytetty tekniikka vian havaitsemiseen ja koneen kuntotason määrittämiseen. (Link 2009, 227.) Moottoreiden kunnonvalvonnasta käytetään tyypillisesti lyhennettä EHM, joka tulee sanoista Engine Health Monitoring. Trendianalyysin avulla voidaan seurata kaasuturbiinimoottorin kuntotasoja sekä suorituskykyä. Analyysin ensisijainen tavoite on tarjota mahdollisuus havaita merkittäviä muutoksia suorituskykyparametreissa, jotka johtuvat muutoksista moottorin mekaanisessa kunnossa. (Wild 2018.) Moottorin toimintatilan tunnusomaisten parametrien trendiennuste auttaa optimoimaan moottorin ohjausta niin, että moottorin toimintatila voidaan ymmärtää ja ennustaa paremmin. (Mei 2020.) Kaasuturbiinimoottori toimii ennalta määritettyjen suhteiden mukaisesti eri suorituskykyparametrien välillä vakaan tilan olosuhteissa. Kun parametrien alkuperäiset suhteet on määritetty, seurattava moottori ei poikkea merkittävästi tästä, elleivät ulkoiset voimat siihen vaikuta. (Wild 2018.) Arvojen normaalista poikkeamasta voidaan huomata, milloin seurattava moottori alkaa indikoimaan kunnonhuonontumisen merkkejä. Nämä merkit jäävät helposti lentomiehistöltä huomaamatta, sillä suurta vaikutusta suorituskykyyn ei ole.

Tiedonkeruumenetelmät vaihtelevat hyvin paljon sen mukaan minkä tasoista trendiä halutaan, millä tavalla halutut tiedot kerätään ja kuinka paljon lennetään. Tiedot voidaan kerätä esimerkiksi käsin matkapäiväkirjaan tai suoraan ilma-aluksen tietokoneelta. Tärkeintä on, että tiedot kerätään tarpeeksi usein, jotta haluttu trendi voidaan määrittää. Tietojen keräämisen tapoihin vaikuttaa paljon myös laivaston koko. Jos koneita on vähän, käsin kerääminen on kustannustehokkain tapa, jos dataa keräävää järjestelmää ei ole. Lennolta saatu data voidaan syöttää trendianalyysityökaluun jälkikäteen. Laivaston ollessa suuri, tiedot kerätään muistitikulle, josta ne ovat nopeasti syötettävissä järjestelmään. Kaupallisissa lentoyhtiöissä tämä on hyvin yleinen tapa tehdä trendiseurantaa. Moottorin kunnon trendivalvontamenettely on suoritettava huolellisesti ja aloitettava heti moottorin asennuksen tai huollon jälkeen. Tällä varmistetaan se, että tiedot ovat tarpeeksi luotettavia. (Mistic 2002.)

EHM on siis ennakoiva tekniikka, jonka tarkoituksena on pystyä ennakoimaan paremmin, milloin jokin voi mennä pieleen. Näin voidaan välttää mahdollinen uhka, ennen kuin se ehtii kehittyä todelliseksi ongelmaksi. Tekniikan avulla pystytään seuraamaan moottorin kuntoa reaaliajassa tai heti lennon jälkeen. EHM antaa operaattorille mahdollisuuden tehdä tietoisempia päätöksiä moottorin käytöstä, auttaa ennakoimaan huollon tarvetta sekä antaa käyttäjälleen tietoisuutta mahdollisista tulevista huolloista. (Wild 2018.) Tämä auttaa operaattoreita suunnittelemaan moottoreiden isoja huoltoja siten, että huoltoon pystytään varautumaan paremmin ajallisesti sekä taloudellisesti. Analyysin tuloksia voidaan myös käyttää joidenkin aiemmin suunnitteleamattomien huoltotoimenpiteiden ajoittamiseen. Esimerkiksi moottorin pesun tarve voidaan ilmoittaa, joka voi auttaa palauttamaan parametriarvot normaalille tasolle. (Mistic 2002.)

6.4 Vikailmaisimet

Turbiinimoottoreiden vianetsinnässä noudatetaan tyypillisesti mäntämoottoreissa käytettyjä menetelmiä. On kuitenkin kehitetty uusia ja parempia tekniikoita, jotka auttavat huomattavasti teknisten ongelmien ratkaisemisessa ja tunnistamisessa. Vianetsintä voidaankin määritellä vikailmoitusten havaitsemiseksi ja ilmoituksen

aiheuttaman vian eristämiseksi. Kun vika voidaan tunnistaa ja eristää, korjaaminen on vain oikeiden toimenpiteiden soveltamista. (Wild 2018.)

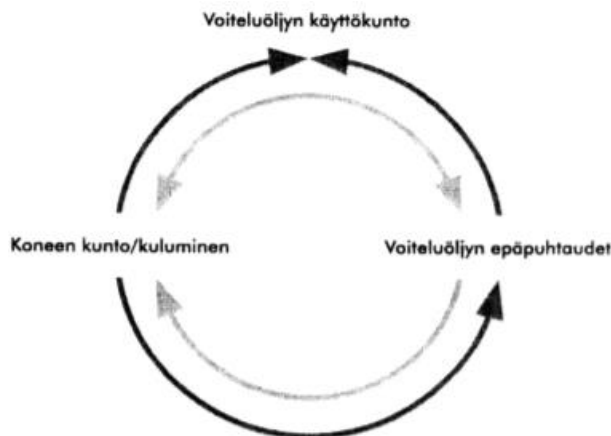
Vikailmaisimia ovat kaikki helikopterissa tai lentokoneessa olevat laitteet ja instrumentit, jotka voivat viestiä miehistön jäsenille moottorin toiminnassa ilmenevästä ongelmasta. Nämä indikaattorit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, jotka ovat normaalit moottoreiden toiminnan valvontaan käytettävät laitteet ja erikoislaitteet, jotka on suunniteltu havaitsemaan merkkejä vioista, joita mittarit eivät välttämättä paljasta. Normaaleja instrumentteja ovat kierroslukumittarit, öljyn lämpö- ja painemittarit, moottorin painesuhdemittari sekä vääntömomenttimittarit. Näiden lisäksi ilma-alukseen voidaan asentaa joitakin sisäänrakennettuja vianetsintälaitteita. (Wild 2018.) Laitteet riippuvat koneen käyttötarkoituksesta ja operaattorin tarpeista riippuen siitä, minkälaista informaatiota tarvitaan ja mikä on oman operoinnin kannalta merkityksellistä. Tällaisia parametreja voi olla esimerkiksi polttoaineenvirtaus sekä värähtelyanturit.

6.5 Voiteluaineanalyysi

Ilma-alusten moottoreissa on monia liikkuvia osia, toiset pyörivät ja toiset liikkuvat edestakaisin. Liikkeen tyypistä riippumatta, jokaista liikkuvaa osaa on ohjattava liikkeessään tai pidettävä tietyssä asennossa liikkeen aikana. Toistensa suhteen liikkuvien pintojen välinen kosketus tuottaa kitkaa, joka kuluttaa energiaa. Tämän lisäksi liikkuvien osien välinen kitka aiheuttaa kulumista. Kahden kiinteän pinnan välisen kitkan määrä riippuu pitkälti toisen pinnan hankauksesta toista vasten, pintojen kunnosta, materiaalista, kosketusliikkeen luonteesta sekä pintojen kantamasta kuormasta. Voiteluaineella pystytään lisäämään osien väliin voitelukalvo, joka vähentää kulumista sekä pienentää tehohäviötä. Tällä tavalla kosketuksissa olevien pintojen välinen metallikitka korvataan pienemmällä sisäisellä kitkalla voiteluaineen sisällä. Vain nestemäiset voiteluaineet, joilla on suuri taipumus tarttua metalliin pystyvät saavuttamaan tämän tarkoituksen. Ilma-alusten moottoreissa moottoriöljyn tärkeimmät ominaisuudet ovat sen leimahduspiste, viskositeetti, jähmettymispiste sekä aineen kemiallinen stabiilius. Näille ominaisuuksille voidaan tehdä erilaisia testejä jalostamolla ja kentällä. Tyypillisiä jalos-

tamolla testattuja ominaisuuksia ovat painovoima, väri, samepiste, hiili- ja tuhka- jäännös, hapettuminen, saostuminen, korroosio, neutralointi sekä öljyisyys. (Wild 2018.)

Voiteluaineet ovat tärkeä osa moottoria ja sen toimintaa, ja niiden kuntoa analysoimalla voidaankin saada tärkeää tietoa moottorin kunnosta. (Mikkonen 2009, 428) Voiteluaineanalyysi on analyttinen prosessi, jota tietyissä rajoissa käytettynä voidaan hyödyntää joidenkin moottoriongelmiin tunnistamiseen. Analyysin tarkoitus on saada mahdollinen vika selville ennen, kun se ilmenee toiminnallisena vikana. (Wild 2018). Analysoimalla voiteluaineista otettuja näytteitä saadaan tärkeää tietoa moottorin ja voiteluaineen kunnosta sekä siinä olevista epäpuhtauksista. Analyysin voi suorittaa voitelu- ja hydraulioöljylle sekä voitelurasvalle riippuen laitteen käyttötarkoituksesta. (Mikkonen 2009, 428.) Kuviossa 4 nähdään miten voiteluaineen käyttökunto, voitelun epäpuhtaudet sekä koneen kunto vaikuttavat toisiinsa. Epäpuhtaudet voiteluaineessa lisäävät kulumista sekä huonontavat öljyn kuntoa. Kun öljyn kunto heikentyy, heikentää se voitelua ja tämä lisää laitteen kulumista. Kasvava kulumisen ja öljyn tason heikkeneminen taas lisää epäpuhtauksia. (Mikkonen 2009, 428.)



KUVIO 4. Voiteluaineen keskeiset riippuvuussuhteet (Mikkonen 2009, 428)

Öljynkuntoanalyysi voidaan jakaa kahteen perusalueeseen: Ensimmäinen määrittää kuluneiden metallien määrän öljynäytteessä ja toinen testi tunnistaa suuret epäpuhtaudet. Kulutusmetallit ovat hyvin pieniä metallihiukkasia, jotka ovat kulumineet pois moottorin käydessä. Tunnistamalla kunkin metallin ja sen määrän voidaan analysoida, onko sitä liikaa ja mistä moottorin osasta se on peräisin. Kulu-

vien metallien määrä öljyssä mitataan tyypillisesti miljoonasosina (ppm). Miljoonasosilla kuvataan suhteellista määrää metallia nesteessä. Esimerkiksi 10 000 ppm on 1 %. Metallihiukkaset ovat paljon pienempiä mitä öljynsuodatin pystyy poistamaan, joten tästä syystä ne jäävät öljyyn. Suuremmat hiukkaset jäävät suodattimeen. Näiden suurempien hiukkasten analysointi on toinen tärkeä osa voiteluaineanalyysiä. Yleisimmät menetelmät kuluviin metallien analysointiin ovat atomiabsorptio ja optinen emissiospektrometria. Atomiabsorptiossa öljynäyte poltetaan korkeassa lämpötilassa. Tämän jälkeen laitteilla voidaan havaita, kuinka paljon energiaa on imeytynyt tietystä alkuaineesta ja tämän aineen määrä miljoonasosina saadaan selville. Optinen emissiospektrometria perustuu myös polttamiseen, mutta siinä mitataan säteilevän valon eri tasoja. Menetelmän tarkkuus ei ole yhtä tarkka, mutta menetelmällä saadaan alle minuutissa analyysi miljoonasosien tarkkuudella. Analysoinnista saatu tieto riippuu paljon siitä tiedosta, jotka koskevat moottorin historiaa ennen näytteenottoa. Moottorin käyttötuntien kasvaessa, joidenkin materiaalien määrä öljyssä kasvaa. Lukemaan voi vaikuttaa myös puhtaan öljyn lisääminen sekä täydellinen öljynvaihto. (Wild 2018.)

6.6 Väriämittaus

Kaikki pyörivät laitteet ja koneet, kuten moottorit, värähtelevät käydessään. Voimia, jotka voivat aiheuttaa moottorin värinän, kutsutaan herätteiksi. Herätteet ovat erilaisia dynaamisia voimia, jotka voivat johtua laitteen normaalista toiminnasta, asennuksen tai valmistuksen epätarkkuuksista tai vikaantumisista. (Mikkonen 2009, 223.) Värähtelymittaukset ovat yleisesti käytössä pyörivien laitteiden ja moottoreiden mittauksessa käytettävä työkalu. Väriäntiedon käytön yleinen periaate on, että vikojen alkaessa järjestelmän liikkeen dynamiikka muuttuu, mikä johtaa erilaisiin värähtelykuvioihin verrattaessa täysin kunnossa olevaan järjestelmään. Epätasapaino voi johtua pyörivien moottorinosien kuten ahtimien tai laakerien vikaantumisesta. Lisäksi luonnollinen kulumisen ja korroosio voivat johtaa massan uudelleen jakautumiseen ajan myötä ja siten vaikuttaa moottorin epätasapainoon (Matthaiou 2018). Väriäntmittauksia voidaan suorittaa esimerkiksi ennen ja jälkeen moottorin asentamisen ja irrotuksen tai kiinteillä antureilla.

Värinä ei vaikuta yksissään vain moottorin kuntoon, vaan korkeat värinäarvot vaikuttavat hyvin paljon myös koneen muihin rakenteisiin sekä laitteisiin. Helikopterissa liiallinen värinä voi aiheuttaa vaaraa kopterille itselleen sekä sisällä oleville miehistön jäsenille. Siksi on tärkeää, että tunnistetaan värinän tyyppi sekä sen alkuperä ongelmien poistamiseksi. Kaikilla rakenteilla on omat ominaistajuudet, joilla ne pyrkivät herätteen vaikutuksesta värähtelemään (Mikkonen 2009, 224). Tavallisesti värinäherätteen aiheuttaja helikopterissa on roottori ja siksi onkin tärkeää erottaa roottorin ja moottorin värinä toisistaan.

7 MOOTTORIN TEHOKOE JA TRENDIANALYYSI

Kirjallisuuskatsauksen perusteella Rajavartiolaitoksen käyttöön parhaiten soveltuvat kunnonvalvontamenetelmät ovat moottorin tehokoe ja sen tulokseen perustuva trendianalyysi. Näitä kahta kunnonvalvontamenetelmää voidaan parhaiten hyödyntää olemassa olevan datan ja resurssien puitteissa. Lisäksi trendianalyysi on menetelmänä jo käytössä AW 119 Koala- helikopterityypillä, jossa moottorin tehokokeen datan avulla tehdään trendianalyysiä CAMPEHM- ohjelmistolla.

Seuraavaksi opinnäytetyössä suoritetaan havainnollistava tutkimus sen selvittämiseksi, voidaanko laivueen käytössä olevien Super Puma- helikopterien moottoreiden tehokokeista saatavan datan avulla muodostaa trendianalyysiä Excel-ohjelmistolla. Tutkimus on rajattu koskemaan vain Super Puma- helikopterimallin moottorin tehokoeetta, sillä Super Puma- helikoptereilla lennetään suhteessa eniten. Lisäksi AW 119 Koala- helikoptereilla on voimassa moottorien huolenpitosopimus, johon kunnonvalvonta perustuu, eli kunnonvalvonta on ulkoistettua. AB/B 412 -helikopterit taas ovat tulevaisuudessa poistuvaa kalustoa.

Tutkimuksen aineistodata on kerätty Super Puma -helikoptereiden matkapäiväkirjoista, joihin lentomiehistö on kirjannut moottorin tehokokeen arvot. Tutkimus on suoritettu keräämällä matkapäiväkirjoista moottoreiden tehokokeiden arvot viimeisen kahden vuoden ajalta ja selvittämällä lentokäsikirjasta löytyvään kaavioon piirtäen tehokokeen tulokset trendianalyysin luomiseksi. Trendikäyrää on pyritty luomaan sekä vääntömomenttimarginaalin että moottorin lämpökuormituksesta saatavien arvojen perusteella. Sekä vääntömomenttimarginaaliarvot että lämpökuormitusarvot perustuvat moottorin tehokokeen arvoihin.

7.1 Vääntömomenttimarginaali

Tutkimuksen raakadatana on siis käytetty matkapäiväkirjoihin (Liite 1) kirjattua dataa moottorin tehokokeesta. Matkapäiväkirjassa ei ole tietoa siitä, mitkä moottorit ovat kiinni kyseisessä kopterissa, joten tieto pitää kerätä laivueen käyttä-

mästä huollonhallintajärjestelmästä. Päiväkirjassa on vain kopterin rekisteritunnus, joten sen hetkiset moottoritiedot täytyy kerätä ensimmäiseksi. Moottoreita on vaihdettu ajan saatossa koneesta toiseen. Oikean tiedon saamiseksi täytyy kerätä dataa siitä, mikä moottori on ollut missäkin koneessa halutulla ajanjaksolla. Taulukossa 2 ovat moottorit ja niiden sijainti viimeiseltä kahdelta vuodelta.

TAULUKKO 2. Moottorit sekä niiden sijainti

SERIAL							
2063	INSTALL OH-HVI LH	REMOVE QUARANTINE					
	2.4.2015	26.10.2021					
2064	STOCK	INSTALL OH-HVG LH					
	22.11.2017	5.3.2020					
2098	INSTALL OH-HVG RH	REMOVE QUARANTINE		INSTALL OH-HVP RH			
	22.5.2015	25.4.2021		26.8.2021			
2099	INSTALL OH-HVQ LH	REMOVE QUARANTINE		INSTALL OH-HVF LH			
	18.5.2018	11.11.2021		23.11.2021			
2150	STOCK	INSTALL TO OH-HVI LH					
	27.2.2020	26.10.2021					
2410	INSTALL OH-HVF LH	REMOVE QUARANTINE	INSTALL OH-HVF LH	REMOVE QUARANTINE			
	23.11.2018	1.10.2020	1.10.2020	5.8.2021			
2493	STOCK		INSTALL OH-HVI RH				
	14.5.2019		9.7.2021				
2494	INSTALL OH-HVF RH	REMOVE QUARANTINE	INSTALL OH-HVF RH				
	23.11.2018	2.8.2021	21.11.2021				
9173	INSTALL OH-HVP LH						
	18.3.2015						
9176	INSTALL OH-HVP RH	REMOVE QUARANTINE	INSTALL OH-HVG RH				
	11.11.2015	14.4.2021	24.4.2021				
9179	INSTALL OH-HVI RH	REMOVE QUARANTINE	INSTALL OH-HVQ LH				
	14.2.2019	9.7.2021					
9182	INSTALL OH-HVQ RH						
	18.12.2015						

Kun moottoreiden sijainti halutulla ajanjaksolla oli selvitetty, voitiin kerätä tehokkeen data. Päiväkirjoista etsittiin ne lennot, jolloin tehokoe on suoritettu. Tehokkeen tulokset on arkistoitu paperiversiona, joten ensiksi ne muutettiin sähköisiksi versioiksi. Taulukossa 3 on esitetty matkapäiväkirjoista kerättyä dataa. Viimevuosina suoritettavat modifikaatioprojektit ovat vaikuttaneet siihen, että kaikista koneista ei löytynyt dataa systemaattisesti edellisiltä vuosilta. Lisäksi käytössä on varamoottoreita, joista ei ole dataa saatavissa. Moottorit on numeroitu siten, että moottori 1 on vasen (LH) ja moottori 2 on oikea (RH).

TAULUKKO 3. Tehokokeen dataa

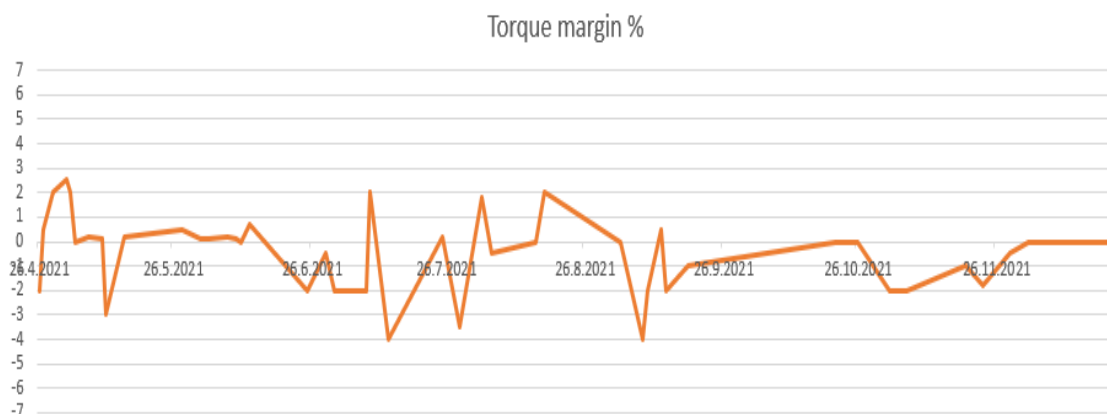
12.9.2020		OH-HVG					
				NG/N1	ITT/T4/TOT	TQ	WF
PRESSURE ALT	GROSS WEIGHT	KIAS	ENGINE 1	91,2	610	34,5	242
4300	8250	122					
OAT	e°	NR	ENGINE 2	90,7	580	33,5	234
3,5	16,5	270					

Kun kaikki data oli kerätty, voitiin jokaisen tehokokeen tulos selvittää erikseen määrittämällä moottorin vääntömomenttimarginaali lentokäsikirjasta löytyvän kaavion avulla. Kaaviossa on jokaiselle suurelle oma lohkonsa, josta se luetaan. Ensiksi luettiin kaasugeneraattorin nopeus kaavion lohkon yksi vasemmasta reunasta, josta saatiin ensimmäinen piste. Lohkossa yksi on esitetty lisäksi OAT-lämpötila viivoina, joista saatiin luettua piste kaksi. Lohkossa kolme on esitetty painekorkeus viivoina ja asteikolle piirrettiin piste kolme. Tämän jälkeen pisteet yksi, kaksi ja kolme yhdistettiin ja pisteestä kolme piirrettiin suora lohkoon neljä. Tämän jälkeen lohkon kaksi oikeasta reunasta luettiin moottorin vääntö, joka on piste neljä. Lohkossa on esitetty myös moottorin pyörimisnopeus, josta saatiin luettua piste viisi. Lopuksi pisteet neljä ja viisi yhdistettiin ja pisteestä viisi piirrettiin suora lohkoon neljä. Suora piirrettiin siten, että se leikkaa suoran, joka on piirretty pisteestä kolme. Näiden pisteiden leikkauspiste on moottorin vääntömomenttimarginaali prosentteina. Näitä prosenttiarvoja käytetään trendikäyrän muodostamiseen. Lohkossa neljä on asteikko, josta voidaan lukea, onko tehokoe mennyt läpi vai ei. Marginaalin ollessa plussan puolella on tulos hyväksyttävissä. Mitä lähempänä arvoa nolla ollaan, sitä tarkemmin moottorin toimintaa on seurattava. Taulukossa 4 on esitetty moottorin numero 2064 tehokokeiden lopputuloksia.

TAULUKKO 4. Moottorin sarjanumero 2064 tehokokeentuloksia

Päivämäärä	Tehokokeen tulos (%)	Sallituissa rajoissa
26.4.2021	-2	Ei
27.4.2021	0,5	Kyllä
29.4.2021	2	Kyllä
2.5.2021	2,5	Kyllä
3.5.2021	2	Kyllä

Kun kaikki tulokset oli kerätty taulukkoon, voitiin arvojen ja päivämäärien avulla määrittää trendikäyrä Excel-ohjelmistolla. Kuviossa 5 on esitetty moottorin 2064 vääntömomenttimarginaali trendikäyränä. Y-akselilla näkyy tehokokeen tulos ja X-akselilla on suorituspäivämäärä.



KUVIO 5. Moottorin sarjanumero 2064 vääntömomenttimarginaali

7.2 Moottorin lämpökuormitus

Tehokokeen dataa voidaan käyttää myös moottorin lämpökuormituksen määrittämiseksi. Kyseisen arvon saamiseksi käytetään lentokäsikirjasta löytyvää kaaviota, joka on samankaltainen kuin vääntömomenttimarginaalin määrittämiseen käytetty aiemmin esitelty kaavio. Lämpökuormituksen määrittämiseksi tarvitaan kaasugeneraattorin kierrosnopeus (N1 %), ulkoilman lämpötila (OAT) sekä turbiniin ulostulolämpötila (TOT). Nämä arvot kerätään matkapäiväkirjaan tehokokeen suorittamisen yhteydessä. Taulukossa 5 on esitetty arvoja lämpökuormituskokeen suorittamiseen.

TAULUKKO 5. Esimerkkiarvoja lämpökuormitus kokeen suorittamiseen

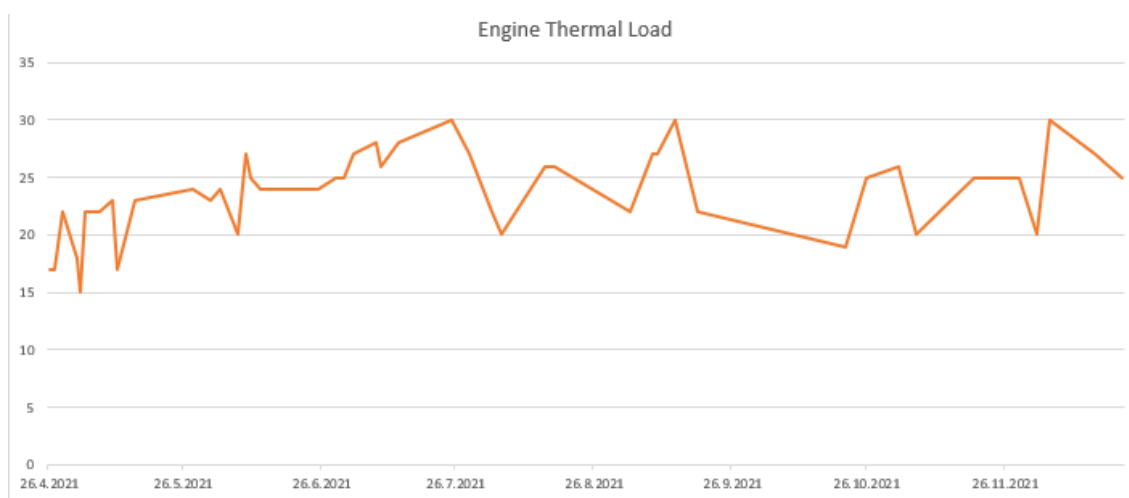
1. N1 (%)	91,2 %
2. OAT	+3,5 °C
3. TOT	+610 °C

Lämpökuormitusarvon määrittäminen aloitettiin lukemalla kaavion vasemmasta reunasta moottorin kierrosnopeus, josta saatiin piste yksi. Tämän jälkeen pisteestä vedettiin viiva käyrästään, josta luettiin haluttu ulkoilman lämpötila, joka on piste kaksi. Pisteestä kaksi vedettiin suora alas. Viimeiseksi kaaviosta luettiin turbiinin ulostulolämpötila, piste kolme. Pisteestä kolme vedettiin suora, jonka jälkeen pisteen kaksi ja kolme leikkauspiste näytti moottorin lämpökuormitusarvon. Arvon ollessa plussan puolella on tulos sallituissa rajoissa ja koe on hyväksytysti suoritettu. Taulukossa 6 on moottorin sarjanumero 2064 lämpökuormituskokeen tuloksia.

TAULUKKO 6. Moottorin sarjanumero 2064, lämpökuormituskokeen tuloksia

Päivämäärä	Lämpökuormitus	Sallituissa rajoissa
26.4.2021	17	Kyllä
27.4.2021	17	Kyllä
29.4.2021	22	Kyllä
2.5.2021	22	Kyllä
3.5.2021	18	Kyllä

Kun kaikki arvot oli kerätty, määritettiin Excel-ohjelmistoa hyödyntämällä moottorin lämpökuormituksen trendikäyrä. Kuviossa 6 on esitetty moottorin 2064 lämpökuormituksen trendikäyrä. Y-akselilla on lämpökuormituskokeen tulos ja X-akselilla on suorituspäivämäärä.



KUVIO 6. Moottorin sarjanumero 2064 lämpökuormitus trendianalyysinä

7.3 Tehokokeen suorittamisen ohjeistus

Tehokokeen suorittamisen uudelleen ohjeistamisella pyritään keräämään toimintatavat yhteen niin, että ne olisivat helpommin löydettävissä ja sovellettavissa. Ohjeistuksen on tarkoitus olla lentokäsikirjoista löytyvien ohjeiden tukena sekä korostaa käyttäjille ohjeiden mukaisen toiminnan tärkeyttä. Ohjeistuksen täytyy yhtenäistää nykyiset toimintatavat siten, että ne palvelisivat organisaatiota paremmin ja tehokokeet vastaisivat enemmän haluttua toimintatasoa. Uudet toimintatavat kirjataan teknilliseen ilmoitukseen (liite 2), jotta siitä saadaan virallinen. Teknistä ilmoitusta voidaan käyttää myös sen viestimiseksi organisaatiolle, miksi tehokokeita on tärkeää tehdä ja miksi ne ovat tärkeitä koko organisaatiolle. Ohjeistusta voidaan käyttää lentomiestien apuvälineenä oikeiden toimenpiteiden muistamiseksi sekä tekniikalle helpottamaan oikeiden toimenpideohjeiden löytämistä. Ohjeeseen on kirjattu toimenpiteet tilanteessa, jossa tehokoe ei syystä tai toisesta mene läpi.

Nykyisten ohjeiden mukaan tehokoe pitäisi AB/B 412 kalustossa tehdä päivittäin. Tämä on kuitenkin haastavaa, sillä hälytystehtävien yhteydessä kokeen tekeminen ei ole järkevää. Ohjetta tarkennetaan siten, että tehokoe suoritetaan jatkossa aina, kun on suunniteltua lentotoimintaa. Harjoitus- ja valvontalentojen yhteydessä miehistöllä on enemmän aikaa keskittyä tehokokeen tekemiseen, joten tuloksista saadaan luotettavampia.

AS332 kalustossa tehokokeen epävirallinen ohjeistus on ollut tehokokeen suorittaminen joka toinen lentopäivä. Tässä on ollut kuitenkin suurta vaihtelua toteutuksessa. Jos koneella tehdään vain päivystysluontoisia tehtäviä, jäävät tehokokeet helposti tekemättä. Tästä syystä niiden suorittaminen on tarkoituksenmukaista saada suunniteltujen lentotehtävien yhteyteen. Uuden ohjeistuksen mukaan tehokoe on suoritettava päivittäin aina, kun on suunniteltua lentotoimintaa.

AW 119 kalustossa suurin määrittävä tekijä tehokokeiden suorittamiseen on voimassa oleva moottoreiden huolenpitosopimus. Sopimus määrittää sen, kuinka usein kokeet tehdään ja miten haluttua dataa pitää käyttää. Ohjeistuksen mukaan tehokoe suoritetaan joka toinen lentopäivä ja tulokset kirjataan ohjelmistoon matkapäiväkirjoista.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

8.1 Tutkimusongelmien analysointi tutkimustulosten perusteella

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin sitä, millaisia kunnonvalvontamenetelmiä akseli-turbiinimoottoreille on olemassa, ja mitkä näistä menetelmistä soveltuisivat parhaiten Rajavartiolaitoksen käyttöön. Ongelmaa lähdettiin ratkomaan tutkimalla kirjallisuutta ja aiempaa tutkimusta kunnossapidosta, kunnonvalvonnasta sekä erilaisista kunnonvalvontameteodeista. Rajavartiolaitoksen näkökulmasta sopivimpana kirjallisuudesta nousivat esiin moottorin tehokoe ja sen tulosten perusteella muodostettu trendianalyysi. Nämä kaksi yhdistettiin tutkimuksen empiirisessä osuudessa, jossa ratkottiin tutkimuksen kolmatta tutkimusongelmaa. Opinnäytetyön toisessa osassa tutkittiin matkapäiväkirjoista saadun datan avulla sitä, voidaanko Super Puma -helikopterin moottorin tehokokeen perusteella saata- vista arvoista muodostaa trendianalyysiä Excel- ohjelmistolla.

8.1.1 Trendianalyysitutkimuksen tulokset

Tutkimuksen tulosten analyysin jälkeen voidaan todeta, että Super Puman osalta nykyisen datan avulla ei voida määrittää sellaista trendianalyysiä Excel-ohjelmistolla, josta moottorin toimintakuntoa tai huoltotarvetta olisi mahdollista ennakoita. Tutkimusdatan avulla voitiin muodostaa trendikäyrä, mutta trendikäyrästä ei pystytty toteamaan moottorin vikaantumismekanismia. Tutkimusdatan perusteella luotu trendikäyrä käyttäytyy liian epäsäännöllisesti, jotta siitä olisi mahdollista lukea trendiä.

Trendikäyrän epäsäännöllisyys johtuu esimerkiksi siitä, että moottoreiden tehokokeita on suoritettu liian epäsäännöllisesti. Trendianalyysi voisi olla mahdollista muodostaa, jos moottoreille suoritettaisiin tehokokeita aktiivisemmin uuden ohjeistuksen mukaisesti. Datan laadun parantamiseksi tehokoeita suorittaessa olisi tarpeellista kirjata ylös tulokseen mahdollisesti vaikuttavat näkökohdat, kuten sääolosuhteet. Koska trendikäyrään ja trendin luettavuuteen vaikuttavat myös

moottoreille tehtävät huolto- ja vaihtotoimenpiteet, tulisi laajemman trendianalyysin muodostamiseksi olla luotettavaa dataa myös näistä. Moottoreille tehdyt toimenpiteet olisi saatava tehokokeen tuloksen yhteyteen, jotta esimerkiksi moottorin pesun vaikutus tulokseen olisi huomattavissa.

8.1.2 Kunnonvalvonnan kehitys

Kunnonvalvonnan tasoon liittyvää ongelmaa tulee lähestyä siitä näkökulmasta, mitä dataa moottorien kunnosta Rajavartiolaitoksella on saatavissa. Kirjallisuuden ja aiemman tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että tehokokeiden aktiivisempi suorittaminen moottoreille sekä tehokokeista saatavan datan taulukointi esimerkiksi Excel- ohjelmistoon parantaisi moottorien kunnonvalvonnan tasoa Rajavartiolaitoksessa. Vaikka trendianalyysin muodostaminen Excel- taulukkoon kerättyjen tehokokeen tulosten perusteella ei olekaan välttämättä mahdollista, helpottaa systemaattisemmin kerätty ja raportoitu data moottorien kuntotason seuranta. Super Puman osalta tehokokeesta saatavaa dataa voitaisiin hyödyntää vielä monipuolisemmin, jos datan analysointiin käytettäisiin siihen tarkoitettua ohjelmistoa, joka pystyisi ottamaan huomioon erilaisia muuttujia. Esimerkiksi moottorivalmistaja Safranilla on Engine Health Monitoring- ohjelmisto, jonka testikäyttöönotto voisi parantaa moottorien kunnonvalvonnan laatua ja helpottaa kuntotason seuranta. Tästä ei kuitenkaan ole varmuutta, sillä ohjelmistoa ei ole aiemmin testattu eikä sitä varten tarvittavan datan luonne ole selvillä.

Toinen tapa parantaa laivueen kunnonvalvontaprosessia olisi ottaa käyttöön Makila 1A1 moottoreille tarkoitettu voiteluaineanalyysi, jota on käsitelty opinnäytetyön teoriaosuudessa. Voiteluaineanalyysiä voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää esimerkiksi moottoreihin sekä vaihteistoihin. Voiteluaineanalyysiin liittyvää prosessia voitaisiin tutkia tarkemmin tulevaisuudessa sen laivueelle tarjoaman potentiaalilin määrittämiseksi.

8.2 Tutkimuksen onnistuminen, laatu ja rajoitteet

Kun tutkimusta arvioidaan kokonaisuutena, voidaan todeta, että tutkimustavoitteet saavutettiin osittain. Rajavartiolaitoksen moottoreiden kunnonvalvonnalle saatiin esitettyä teorian perusteella kehitysehdotuksia sekä kunnonvalvonnan merkitystä saatiin korostettua koko organisaatiolle. Ennako-odotusta trendianalyysin onnistumisesta ei kuitenkaan saatu täytettyä, sillä trendikäyrästä ei voitu tehdä trendianalyysiä. Trendianalyysin onnistumista tulevaisuudessa ei kuitenkaan voida poissulkea, sillä systemaattisemman datan keräämisen sekä raportoinnin avulla tulevaisuudessa trendianalyysin muodostaminen on mahdollista. Tutkimuksen avulla onnistuttiin myös osoittamaan sellaisia kehityskohtia moottorin tehokokeeseen liittyen, jotka voivat parantaa trendianalyysin onnistumisen todennäköisyyttä tulevaisuudessa.

Tutkimuksen rajoitteiksi muodostuivat aika, resurssit sekä datan laatu. Opinnäytetyö suoritetaan normaalisti noin puolen vuoden aikajaksolla, ja siksi esimerkiksi useampien muuttujien ottaminen analyysiin ei ollut mahdollista. Tutkimuksen tulokset olisivat voineet olla erilaisia, jos datan analysointiin olisi ollut mahdollista hyödyntää kehittyneempää ohjelmistoa, kuten moottorivalmistaja Safranin Health Monitoring- ohjelmistoa.

Myös datan laatu muodostaa tutkimukselle rajoitteen. Ensinäkin, tehokokeen tulokseen vaikuttaa se, kuinka tarkasti ohjeiden mukaan kopterin lentomiehistö suorittaa tehokokeen. Jos tehokoe suoritetaan ohjeistuksesta poikkeavalla tavalla, voivat tulokset antaa väärän kuvan moottorin kunnosta. Koska lentomiehistö kirjaa tehokokeen tulokset käsin matkapäiväkirjaan, inhimillinen erehdys on mahdollinen datan laadun heikentäjä. Trendianalyysin määrittämiseen on tässä tutkimuksessa käytetty lentokäsikirjassa olevaa liitettä, johon piirretään, joten näissä tuloksissa on myös mahdollisuus inhimilliselle erehdykselle. Esimerkiksi suorien mahdollinen vinoon piirtäminen ja kynän jäljen paksuus voivat vaikuttaa lopputulokseen. Lisäksi arvojen tarkka lukeminen aiheuttaa haastetta - tutkimuksessa käytetyt kaaviot on suunniteltu siten, että esimerkiksi lämpötilan lukeminen kaaviosta asteen tarkkuudella ei ole mahdollista. Lisäksi lopputulokselle on olemassa asteikko välille -4 ja +4, joten vain tähän väliin osuvat arvot ovat tarkemmin arvioitavissa.

LÄHTEET

Raunio, J. 2000. Helikopterin rakenteet ja järjestelmät. Helsinki: Oy Edita Ab.

Raunio, J. 1989. Helikopteriteoria. 2. Helsinki: Valtion painantakeskus.

Koivisto, R & Jokinen, J. 2008. 2. Suihkumoottorit. Tampere: Juvenes Print.

Turbomeca. 2004. Gas turbine engines. Tarnos: DSO/TPF Centre D`instruction

Turbomeca. 2004. Makila 1 A 1. Tarnos: DSO/TPF Centre D`instruction

Mikkonen, H & Miettinen, J & Leinonen, P & Jantunen, E & Kokko, V & Riutta, E. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Kerava: Savion kirjapaino Oy.

Lee, L & Ni, J & Djurdjanovic, D & Qiu, H & Liao, H. 2006. Intelligent prognostics tools and e-maintenance. Science Direct. Viitattu 04.12.2021. <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0166361506000522?via%3Dihub>

Matthaiou, I & Khandelwan, B & Antoniodou, I. 2017. Vibration monitoring of gas turbine engines. Frontiers. Viitattu 08.12.2021. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2017.00054/full>

Wild, T. 2018. Aircraft powerplants. McGraw-Hill Education. Viitattu 13.12.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www-accessengineeringlibrary-com.lib-proxy.tuni.fi/content/book/9781259835704>

Raja. 2020. Tietoa meistä. Verkkosivu. Viitattu 15.12.2021. <https://raja.fi/tietoa-meista>

Mei, L & Benkuan, W & Datong, L. 2020. A digital twin modeling method for turbofan engine real-time test data analysis and performance monitoring. IEEE Xplore. Viitattu 18.12.2021. <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/9296643>

Mustagime, T & Bülent, K. 2018. Aircraft gas turbine engine health monitoring system by real flight data. International journal of aerospace engineering. Viitattu 18.12.2021. <https://www.hindawi.com/journals/ijae/2018/9570873/>

Safran helicopter engines. 2014. Maintenance manual. Task 72-00-00-870-801-01.

Ilmailumuseo. 2017. Kaivopuiston lentonäytöksessä nähdään vartiolentolaivueen meripelastusesitys. Viitattu 14.1.2022 https://ilmailumuseo.fi/kaivari_03/

Lentoposti. 2013. Rajan Koalan ohjaamossa savua Rovaniemellä. Viitattu 14.1.2022 http://www.lentoposti.fi/uutiset/rajan_koalan_ohjaamossa_savua_rovaniemella

ABB TTT-Käsikirja. 2000. Kunnonvalvonta ja huolto. Viitattu 28.18.2021. http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf

Link, C. 2009. Aircraft engine controls design, systems analysis, and health monitoring. American institute of aeronautics and astronautics, Inc.

Flyfinland. 2019. Border Guard-Finland Agusta-bell AB 412EP. Viitattu 14.1.2022 <https://www.flyfinland.fi/view/28135>

Mistic, D Elersek, L. 2002. Examination of applicability og engine condition trend monitoring to Bell 2068 III helicopter. Viitattu 2.1.2022. https://www.researchgate.net/publication/293785337_Examination_of_Applicability_of_Engine_Condition_Trend_Monitoring_to_Bell_2068_III_Helicopter

Ilmailua. 2017. Vartiolentolaivue aloittaa operatiivisen lentotoiminnan modernisoidulla Dornier 228-valvontalentokoneella. Viitattu 14.1.2022 <https://www.ilmailua.uutisparkki.com/?p=2388>

Pratt & Whitney. 2019. 3 Tips for monitoring helicopter engine power. Pratt & Whitney customer service. Viitattu 6.1.2022. <https://www.pwc.ca/en/airtime-blog/articles/technical-tips/3-tips-for-monitoring-helicopter-engine-power>

AS332L1e Flight manual. Rev 14, 20-40. 2020. Section 4.9. Engine power check.

Kunnossapito menestystekijä. n.d. Opetushallitus. Viitattu 16.1.2022. <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet.html>

Pratt & Whitney. 2005. PT6T-3/6 Training manual. A United technologies Company. Pratt & Whitney Canada corp.

LIITTEET

Liite 1. Matkapäiväkirjan sivu

THE FINNISH BORDER GUARD Air Patrol Squadron FLMG.0035		A/C TYPE		REGISTRATION		DATE		SHEET NUMBER												
				OH-		.20		1												
PREFLIGHT					POSTFLIGHT															
LOG	FUEL ADDED [liters]	DEPARTURE FUEL	CDR PREFLIGHT ACCEPTANCE SIGNATURE*	PIC	CoP	CREW	POB	FROM	TO	TIME [UTC] TAKE OFF	TIME [UTC] LANDING	FLIGHT TIME	LDGS	STARTS LH RH	END LH RH	HOIST H E	FAST ROPE LH RH	ARRIVAL FUEL	DEFECT REPORT	CDR SIGN
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
*CDR PREFLIGHT ACCEPTANCE SIGNATURE CONFIRMS CORRECT COMPLETION OF PREFLIGHT INSPECTION AND GROUND ANTI/DE-ICING, ACCEPTANCE OF AIRCRAFT AND DEFECT STATE AND SUFFICIENT FUEL AND OIL FOR THE PLANNED FLIGHT.										TOTAL THIS LOG										
										PREVIOUS										
										TO NEXT LOG										
POWER ASSURANCE										WIND	TTT/TA/TOT	TQ	WF	MAX ALLOWABLE	WITHIN LIMITS	SIGN				
PRESSURE ALT.	GROSS WEIGHT	IAS	ENGINE 1											NI	YES / NO					
DAT	IF	SR	ENGINE 2											ITT	YES / NO					
NOTES					CERTIFICATE OF RELEASE TO SERVICE															
LOG GROUND ANTI/DE-ICING DETAILS (START TIME, FLUID TYPE AND MIX RATIO)					CERTIFIES THAT THE WORK SPECIFIED, EXCEPT AS OTHERWISE SPECIFIED, WAS CARRIED OUT IN ACCORDANCE WITH GEN M3-12 AND IN RECOGNITION OF THE ORGANISATION'S EASA PART-145 APPROVAL, AND IN RESPECT TO THAT WORK THE AIRCRAFT/AIRCRAFT COMPONENT IS CONSIDERED READY FOR RELEASE TO SERVICE.															
					MAINTENANCE ACTION	A/C IT	DATE	TIME [UTC]	CRS SIGNATURE (EASA Part 145 approval number, authentication number)											
					MAINTENANCE ACTION	A/C IT	DATE	TIME [UTC]	CRS SIGNATURE (EASA Part 145 approval number, authentication number)											
					MAINTENANCE ACTION	A/C IT	DATE	TIME [UTC]	CRS SIGNATURE (EASA Part 145 approval number, authentication number)											
					MAINTENANCE ACTION	A/C IT	DATE	TIME [UTC]	CRS SIGNATURE (EASA Part 145 approval number, authentication number)											
					MAINTENANCE ACTION	A/C IT	DATE	TIME [UTC]	CRS SIGNATURE (EASA Part 145 approval number, authentication number)											
FLUIDS ADDED	SYSTEM	QUANTITY	MAINTENANCE ACTION		A/C IT	DATE	TIME [UTC]	CRS SIGNATURE (EASA Part 145 approval number, authentication number)												
			T. A. CHECK		1	2	3	4	5	6										
NOTE1 A33321 T.A. CHECK SIGNATURE IS CRS SIGNATURE																				

Liite 2. Teknillinen ilmoitus

1 (2)



RAJAVARTIOLAITOS
VARTIOLENTOLAIVUE

TEKNILLINEN ILMOITUS (TI)

FI.145.0033

1. PERUSTIEDOT

1.1 TI numero	190
1.2 Aihe	EPC - Engine Power Checks
1.3 Koskee	AB/B 412, AS332, AW 119
1.4 Lähdeaineisto	AB/B 412-FM, AS332L1e FM, Koala 119-FM,
1.5 Voimassaolo	Toistaiseksi

2. ASIA

2.1 Yleistä	Moottorien tehokokeet ovat organisaation tapa kerätä dataa moottorien kunnosta. Datan avulla pyritään todentamaan ongelmakohdat aikaisemmin, jotta saadaan aikaa reagoida. Tästä syystä on siis tärkeää, että ne suoritetaan täsmällisesti ohjeistuksen mukaan.
2.2 Toimenpiteet	<p>AB/B 412</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tehokoe suoritetaan päivittäin aina kun on suunniteltua lentotoimintaa. Ohjeet kokeen suorittamisesta löytyvät lentokäsikirjasta AB412EP-FM kohdasta 4.1. - Tehokokeen arvot ja lopputulos kirjataan matkapäiväkirjaan ja otetaan kantaa, menikö koe läpi vai ei. - Jos koe ei mene läpi, ensimmäinen epäonnistuminen ei aiheuta toimenpiteitä. Sääolosuhteet voivat vaikuttaa tulokseen siten, että koetta ei saada läpi. - Jos koe epäonnistuu seuraavalla kerralla, kirjoitetaan Defect report, jonka perusteella huolto-organisaatio ryhtyy tarvittaviin toimenpiteisiin. Ohjeet löytyvät EMM 72-00-00. <p>AS332</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tehokoe suoritetaan päivittäin aina kun on suunniteltua lentotoimintaa. Ohjeet kokeen suorittamisesta löytyvät lentokäsikirjasta kohdasta 4.9. - Tehokokeen arvot ja lopputulos kirjataan matkapäiväkirjaan ja otetaan kantaa, menikö koe läpi vai ei. - Lentokelpoisuusjaos kirjaa kokeen lopputuloksen projektikansioista löytyvään EPC-taulukkoon. - Jos koe ei mene läpi, ensimmäinen epäonnistuminen ei aiheuta toimenpiteitä. Sääolosuhteet voivat vaikuttaa tulokseen siten, että koetta ei saada läpi. - Jos koe epäonnistuu seuraavalla kerralla, kirjoitetaan Defect report, jonka perusteella huolto-organisaatio ryhtyy tarvittaviin toimenpiteisiin. Ohjeet löytyvät Negative in-flight power margin: MFI 77-20-00-102, sekä Makila 1A1 Troubleshooting 71-00-06-280-802-A01, 71-00-06-814-813-A01. Negative thermal margin: MFI 77-20-00-103, sekä Makila 1A1 Troubleshooting 71-00-06-280-801-A01, 71-00-06-814-812-A01 <p>AW 119</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tehokokeen suorittaminen on määritelty voimassa olevassa moottorin huolenpitosopimuksessa. Tehokoe tehdään joka toinen lentopäivä. Ohjeet kokeen suorittamiseen löytyy lentokäsikirjasta 119-FM 4-4.

(jatkuu)



	<ul style="list-style-type: none">- Tehokokeen arvot ja lopputulos kirjataan matkapäiväkirjaan ja otetaan kantaa, menikö koe läpi vai ei.- Kokeen data syötetään CAMPEHM-järjestelmään lentokelpoisuusjakson toimesta, joka huolehtii tuloksien analysoinnista ja mahdollisista toimenpiteistä kokeen epäonnistuessa.
2.3 Rajoitukset	Ei rajoituksia.
2.4 Liitteet	Ei liitteitä.

3. HYVÄKSYNTÄ

3.1 Paikka ja päivämäärä	
3.2 Allekirjoitus ja nimenselvennys	