



# Suihkumoottorin pesujärjestelmän kehitysmahdollisuudet Finnairilla

Andreas Kivi

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2020

Konetekniikka  
Lentokonetekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka  
Lentokonetekniikka

KIVI, ANDREAS:

Suihkumoottorin pesujärjestelmän kehitysmahdollisuudet Finnairilla

Opinnäytetyö 62 sivua, joista liitteitä 6 sivua  
Toukokuu 2020

---

Opinnäytetyössä tutkitaan kehitysmahdollisuuksia Finnairin tämän hetkiseen suihkumoottorin pesujärjestelmään. Työssä tutkitaan tämänhetkistä järjestelmää käytännön tutkimuksella sekä lähdetutkimuksella ja verrataan tuloksia toisesta järjestelmästä saatuihin lähdetietoihin. Tämän tutkimuksen pohjalta luodaan myös parannusehdotus moottoripesujärjestelmään.

Finnairin tämän hetkisellemme järjestelmälle EcoPower® suoritettiin käytännön tutkimus, jossa pestiin General Electric CF6-80E1 -moottori ja kerättiin tietoa, kuinka paljon pesutapahtumaan käytetään aikaa, miten pesu käytännössä tehdään, mitä asioita pesussa tulee ottaa huomioon ja kuinka paljon yhden moottorin pesu vaatii työtä. Lisäksi CF6-80E1 - ja Rolls-Royce Trent XWB84 -moottoreiden lähdetietoja ja kirjallisuutta vertailtiin tämänhetkisen järjestelmän sekä Cyclean® -järjestelmä välillä. Lisäksi tutkimuksessa kartoitettiin Cyclean järjestelmän käyttömahdollisuuksia Finnairilla haastatteluihin perustuen.

Tuloksista käy ilmi Cycleanin käytettävyyden olevan paremmalla tasolla kuin tämän hetkisen laitteen EcoPowerin käytettävyys. Moottorin pesuun käytettävä aika vähenee Cycleania käyttämällä, sekä moottorin pesumahdollisuus asematasolla tuo merkittävän hyödyn, kun lentokonetta ei tarvitse jokaisella pesu kerralla hinata sisätiloihin pestäväksi. Moottorin suoritusarvoihin perehdyttäessä voidaan todeta pesujen vaikuttavan turbiinin kaasujen lämpötilaan, polttoaineen kulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin. Näihin perehtyvistä tutkimuksista voidaan päätellä moottorin pesun tärkeys ja millaisia muutoksia kyseisiin arvoihin voidaan saada useammalla pesukerralla. Moottorikohtaiset muutokset ovat riippuvaisia monesta muuttujasta ja jokaisen lentokoneen ja moottorin tarkkoja arvoja varten on kuitenkin tehtävä erillinen tarkempi tutkimus.

---

Asiasanat: suihkumoottori, moottoripesujärjestelmä, turbiini

## **ABSTRACT**

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

KIVI, ANDREAS:  
Improvement of Gas Turbine Engine Washing Methods in Use at Finnair

Bachelor's thesis 62 pages, appendices 6 pages  
May 2020

---

The purpose of this thesis was to conduct an applied research for Finnair on the improvement of gas turbine engine washing methods. The goal was to study methods that are in use right now by practical research, to review related written sources, and to compare these to a study of another gas turbine wash system. Finally, the goal was to develop suggestions for improving the washing methods in use at the company.

The practical research was conducted by washing a General Electric CF6-80E1 engine with the EcoPower® washing system in use at Finnair. Data were collected on how much one washing event for one engine took time, how the wash was performed in practice, what should be taken into consideration when washing, and how much one wash needs work. Furthermore, maintenance manuals and other written sources related to the CF6-80E1 and Rolls-Royce Trent XWB84 engine models were studied. A comparison between the EcoPower and Cycleclean® washing systems was also conducted on basis of maintenance manuals and other written sources. Also, interviews of Finnair and Finavia staff members were done to investigate the use potential of the Cycleclean system in the company.

Results show that Cycleclean has better usability than EcoPower. The results show that the time that is used to wash one engine is reduced by using Cycleclean. Also, the capability to wash on apron brings significant improvement when it is not necessary to pushback the aircraft every time to a maintenance hangar. When it comes to engine performance improvements, the results show that compressor wash improves turbine gas temperature, and reduces engine fuel consumption and the emissions that the engine produces. Moreover, it is clear that engine wash is important, and significant improvement could be made by washing regularly and more often. The performance status of an individual engine is dependent on many variables, and further research is required to acquire accurate, engine-specific data.

---

Key words: gas turbine engine, compressor wash, washing methods

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	8
2	FINNAIR .....	10
3	SUIHKUMOOTTORI .....	11
	3.1 Kaasuturbiinimoottori .....	11
	3.2 Toimintaperiaate .....	11
	3.3 Puhallinmoottorin rakenne .....	13
	3.3.1 Ahdin .....	14
	3.3.2 Turbiini.....	14
4	SUIHKUMOOTTORIN PESU.....	16
	4.1 Miksi suihkumoottoria pestään?.....	16
	4.2 Moottoripesunmenetelmät.....	17
	4.3 Moottoripesun vaikutus .....	17
5	LENTOKONEEN AIHEUTTAMAT PÄÄSTÖT .....	19
	5.1 Mistä päästöt koostuvat? .....	19
	5.2 Päästöjen laskeminen .....	19
	5.3 Esimerkki tuotettujen päästöjen määrästä .....	21
6	MOOTTORIN NYKYISEN VESIPESUMENETELMÄN TUTKIMINEN	23
	6.1 Käyttö Finnairin laivastolla .....	23
	6.1.1 CF6-moottorin vesipesu EcoPower-järjestelmällä .....	25
	6.1.2 Rolls-Royce Trent XWB -moottorin vesipesu .....	29
	6.2 Vesipesun hyödyt ja säännöllisyys .....	32
	6.2.1 Finnairin tutkimus pesulaitteen vaikutuksesta moottorin.....	34
	suoritusarvoihin .....	34
	6.2.2 Moottorin pesun vaikutus lennon hiilidioksidipäästöihin.....	37
	6.3 Yhteenveto nykyisestä moottorinpesumenetelmästä .....	37
7	MOOTTORIN UUDEN VESIPESUMAHDOLLISUUDEN TUTKIMINEN .....	39
	7.1 Lufthansa Technik Cyclean® .....	39
	7.2 Cycleanin huolto-ohjeiden erot nykyiseen järjestelmään.....	41
	7.3 Cyclean-pesun käytännön erot nykyiseen moottorinpesujärjestelmään verrattuna .....	45
	7.4 HAECO:n kokemukset Cyclean-moottorinpesulaitteesta .....	49
8	TULOKSET .....	50
9	POHDINTA .....	52
	LÄHTEET .....	54
	LIITTEET .....	57

Liite 1. Rolls-Royce notice to operators .....	57
Liite 2. Ahma ympäristö Oy testausseleste moottoripesuvedestä .....	60

## LYHENTEET JA TERMIT

a	kiihtyvyys, $m/s^2$
F	voima, N
m	massa, kg
$\dot{m}$	massavirta, kg/s
$v_1$	kaasun alkunopeus, m/s
$v_2$	kaasun loppunopeus, m/s
APU	auxiliar power unit, apuvoimalaite
ASU	air supply unit, ulkoinen apuvoimalaite
CCD	climb, cruise & descent, nousu, matkalento & liuku
DFF	delta fuel flow, delta polttoainevirtaus
ECU	electronic control unit, elektroninen ohjausyksikkö
EGT	exhaust gas temperature, pakokaasun lämpötila
EGTM	exhaust gas temperature margin, pakokaasun lämpötilämarginaali
FADEC	full authority digital engine controller, digitaalinen moottorinohjausjärjestelmä
HP	high pressure, korkeapaine
ICAO	International Civil Aviation Organization
ITT	interstage turbine temperature, turbiinin välikammion lämpötila
JACDEC	Jet Airliner Crash Data Evaluation Center
LP	low pressure, matalapaine
LTO	landing & takeoff, laskeutuminen & lentoonlähtö
PAH	polysykliset aromaattiset hiilivedyt
RFI	radiative forcing index, säteilypakoteindeksi
rpm	rounds per minute, kierrokset minuutissa
SFC	specific fuel consumption, ominais polttoaineenkulutus
TAC	total aircraft cycles, kokonaislentosyklien määrä
TGT	turbine gas temperature, turbiininkaasujenlämpötila
VSV	variable stator vanes, ahtimen säädettävien ohjainsiipien valvonta

VBV

variable bypass valves, säädettävien vuodatusventtiilien  
valvonta

# 1 JOHDANTO

Tämä tutkimus on tehty yhteistyössä Finnair Technical Services Oy:n kanssa. Finnairin on tarkoitus uudistaa lentokoneidensa suihkumoottorien pesumenetelmä ja tässä opinnäytetyössä tutkitaan, millaisia mahdollisuuksia Finnairilla olisi kehittää tämänhetkistä moottorinpesujärjestelmäänsä. Tämän opinnäytetyön on tarkoitus luoda Finnairin hankkeeseen materiaalia kahden suihkumoottorinpesujärjestelmän vertailulla.

Suihkumoottori likaantuu käytön aikana ja tämä vaikuttaa negatiivisesti moottorin teknisiin arvoihin, kuten suorituskykyyn ja moottorin käyttöikäen. Moottorin pesulla pyritään ennaltaehkäisemään moottorin ennen aikaista kulumista ja pitämään suorituskyky korkealla. Moottorin pesu vaikuttaa merkittävästi myös polttoaineen kulutukseen, hiilidioksidipäästöihin, moottorin elinikään ja huoltokustannuksiin.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Finnairin lentokoneiden suihkumoottoreiden pesujärjestelmän kehitysmahdollisuuksia. Työn tarkoituksena oli perehtyä tämänhetkiseen moottorinpesujärjestelmään sekä sen käytettävyyteen ja vaikutuksiin moottorin suorituskykyyn, sekä pohtia, kuinka näitä nykyisiä vaikutuksia voitaisiin parantaa ja miten muutokset saavutettaisiin. Tarkoituksena oli lähdekirjallisuuden ja henkilöhaastattelujen pohjautuen esittää ehdotus pesujärjestelmän parantamiseksi.

Tutkimusmenetelmänä työssä on käytetty kirjallisuusselvitystä ja lähdetietojen vertailua. Pesujärjestelmien käytettävyyttä ja vaikutusta moottorin suorituskykyyn on vertailtu perustuen kirjallisuuden ja ohjeiden tietoihin sekä käytännön tutkimustuloksiin. Esimerkiksi käytettävyydestä on moottorin pesuun käytetty aika ja miestyötuntien määrä laskettu lähdetietojen ja käytännön tutkimusten tulosten sekä kirjallisuuden perusteella.

Opinnäytetyö sisältää kuvauksen Finnairista, lentokoneen suihkumoottorista yleisellä tasolla ja moottorin pesusta. Opinnäytetyö rajataan niin, että siinä tutkitaan vaikutuksia kahteen suurimpaan Finnairin käyttämään moottorimalliin, jotka ovat

Airbus A330 -lentokoneen General Electric CF6–80E1 -moottori ja Airbus A350 -lentokoneen Rolls-Royce Trent XWB84 -moottori. Näihin kahteen moottorimalliin paneudutaan eniten, koska niillä operoidaan pitkänmatkanlentoja ja niiden polttoaineen kulutus sekä päästöt ovat suuremmat. Näihin moottorimallien pesuun tehdyt parannukset tuovat eniten hyötyä Finnairille polttoainekulutuksen, hiilidioksidipäästöjen ja huoltokustannusten vähenemisen. Tutkimuksessa esitellään Finnairin toimenpiteitä, tutkimuksia sekä pesujärjestelmien tietoja. Osa näistä tiedoista on salassa pidettäviä ja siksi todelliset tulokset on työstä piilotettu.

## 2 FINNAIR

Finnair Oyj on Suomen hallituksen omistuksessa oleva lentoyhtiö. Finnair on toiminut vuodesta 1923 lähtien ja tuolloin yhtiön nimi oli Aero. Finnair on yksi maailman vanhimmista edelleen toimivista lentoyhtiöistä. Ensimmäinen lentokone Junkers F13 otettiin käyttöön Saksasta vuonna 1924. Aero toimi myös talvisodan aikana 1939–1940 ja jatkosodan aikana 1941–1945, jolloin merkittävimpiä lentoja olivat sotalapsien evakuoinnit. Sodan jälkeen vuonna 1946 Suomen valtiosta tuli osakeyhtiön suurin omistaja ja virallisesti nimi muuttui Finnair Oyj -muotoon vuonna 1968. Finnair lennätti vuonna 2017 lähes 12 miljoonaa matkustajaa ja on valittu yhdeksänä vuotena Pohjois-Euroopan parhaaksi lentoyhtiöksi. (Finnair (a). 2019.) Lisäksi Finnair on valittu maailman turvallisimmaksi lentoyhtiöksi JACDEC -lento-onnettomuustutkinatoimiston vuoden 2019 listauksessa (JACDEC 2019).

Finnairin laivue koostuu yhteensä 83 lentokoneesta ja lisäksi viidestä tilatusta Airbus A350-900 -lentokoneesta. Airbus A32s -mallistoon kuuluu 37 lentokonetta, jotka ovat keskimatkankoneita Euroopan liikennöintiin. Embraer 190 -lentokoneita on 12 ja lyhyenmatkan- ATR 72-500 -potkuriturbiinimalleja 12 kappaletta. Pitkänmatkanlentokoneita on yhteensä 22 kappaletta ja niistä kahdeksan on Airbus A330-300 -malleja. Finnairin lippulaivalentokone on Airbus A350-900, joka on moderni ja yksi uusimmista lentokonemalleista maailmalla. Finnairilla on käytössä 14 A350 -lentokonetta ja viisi uutta on tilauksessa. (Finnair (b). 2019.) A350 sisältää erittäin edistynyttä teknologiaa ja sillä operoidaan ympäri maailmaa (Finnair (c). 2019).

### **3 SUIHKUMOOTTORI**

Tässä luvussa käydään läpi yleisesti, miten suihkumoottori toimii ja moottorinpesun kannalta oleellisimpia komponentteja. Luvussa esitellään kaasuturbiinimoottorin toimintaperiaate ja lakeja, joita moottoria tutkittaessa sovelletaan. Lisäksi luvussa esitellään yksityiskohtaisemmin puhallinmoottorin rakennetta.

#### **3.1 Kaasuturbiinimoottori**

Kaasuturbiinimoottori on laite, jolla pyritään siirtämään polttoaineesta saatu lämpöenergia käytettäväksi voimaksi, kuten mekaaniseksi voimaksi, apulaitteita pyörittäväksi voimaksi tai voimakkaaksi suihkuvirtaukseksi eli työntövoimaksi. Kaasuturbiinimoottoreita käytetään moneen eri tarkoitukseen, mutta yleisin näistä on lentokone, koska sen teho-painosuhte on korkea. Kaasuturbiinimoottori, jota lentokoneissa käytetään yleisimmin, on suihkumoottori. Suihkumoottorissa moottoriin imetään ilmaa suuresta imuaukosta, kaasun nopeutta kiihdytetään koko moottorin matkalla ja näin kasvatettu liike-energia suihkutetaan ulos. (Baskharone 2006, 1–26.)

Nopeuden kiihdyttämiseen käytettyä voimaa kohtaan muodostuu vastavoima Newtonin 3. lain, voiman ja vastavoiman lain (reaktiolaki) mukaisesti, Lain mukaan voimaa vastaan on yhtä suuri, mutta vastakkaissuuntainen voima ja tässä tilanteessa vastavoima eli reaktio on lentokoneeseen vaikuttava työntövoima (Jokinen & Koivisto 2008, 35–44).

#### **3.2 Toimintaperiaate**

Suihkumoottorin toimintaa voi verrata mäntämoottoriin toimintaperiaatteeseen. Mäntämoottorissa on neljä vaihetta niin sanottuja tahteja eli imu, puristus, palaminen ja pako. Suihkumoottorilla nämä tahdit ovat samanaikaisia ja muodostuvat moottorin eri osissa, kun taas mäntämoottorilla kaikki tapahtuu samassa tilassa mutta eri aikaan. Suihkumoottorilla imu tapahtuu moottorin imuaukolla, jossa yritetään saada mahdollisimman virheetöntä ilmavirtaa moottoriin. Imuaukon jälkeen ahdin paineistaa eli kasvattaa ilmamassan tiheyttä polttokammioon, jossa

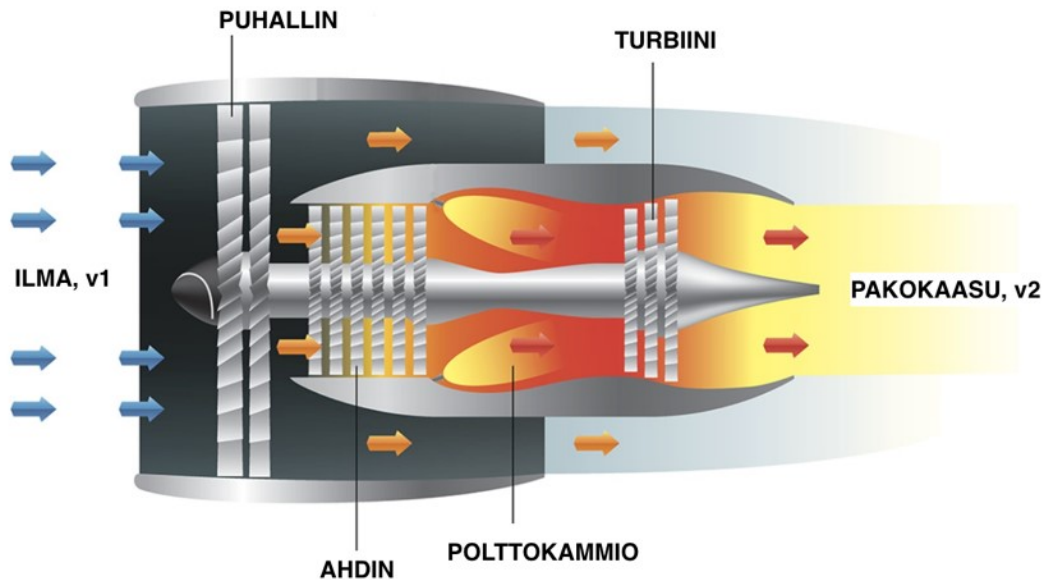
ilmaan sekoitetaan polttoaine ja seos poltetaan. Polttokammioista kasvanut lämpöenergia johdetaan turbiinille, jossa osa liike-energiasta kerätään talteen ja lopuksi virtaus johdetaan pakoaukon kautta ulos moottorista. (Jokinen & Koivisto 2008, 35–62.)

Suihkumoottori on kaasuturbiini, joka muodostaa voimansa liike-energian kasvattamisella. Tarkemmin suihkumoottori kasvattaa sen läpi kulkevan ilmamassan nopeutta ja näin luo voimaa. Kuten voimme todeta Newtonin 2. laista (kaava 1) voima on suoraan verrannollinen liikutettavaan massaan ja sille tuotettuun kiihtyvyyteen. Suihkumoottorissa massavirralle annetaan kiihtyvyys, eli ilmamassan alkunopeutta, jolla se virtaa sisään imuaukosta, kiihdytetään koko moottorin matkalla. Polttoaineen ja ilmamassan seoksen loppunopeus on korkeampi kuin ilmamassan alkunopeus, joten moottorin matkalla on siis tuotettu voimaa (kaava 2). (Jokinen & Koivisto 2008, 35–44.)

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

$$F = \dot{m} \cdot (v_2 - v_1) \quad (2)$$

Kaavasta (1) voidaan tulkita, että voimaa  $F$  tuotetaan antamalla massalle  $m$  kiihtyvyys  $a$ . Suihkumoottorissa sama voima tuotetaan ilmamassan  $\dot{m}$  kiihdyttämisellä (kaava 2). Imuaukosta imetään ilmapirtta moottoriin, jossa kaasun nopeus on sisään virtaavan ilman nopeus  $v_1$ . Ahdin paineistaa ilmamassaa polttokammioon, jolloin ilmamassan tilavuus pienenee ja tiheys kasvaa. Polttokammiossa ilmaseokseen suihkutetaan polttoainetta ja seos poltetaan. Tästä syntyy paljon lämpöenergiaa, mikä kasvattaa kaasun tilavuutta. Laajentunut kaasu johdetaan turbiinille, jossa osa laajentuneen kaasun ja lämpötilan energiasta muuttuu turbiinia pyörittäväksi liike-energiaksi, joka siirtää sen takaisin ahtimien pyörytykseen. Lopuksi turbiinin käyttämätön liike-energia suunnataan ulos moottorista pakoaukon kautta ja kaasun nopeus tässä pisteessä on kaasun loppunopeus  $v_2$  (Kuva 1). (Jokinen & Koivisto 2008, 35–62.)

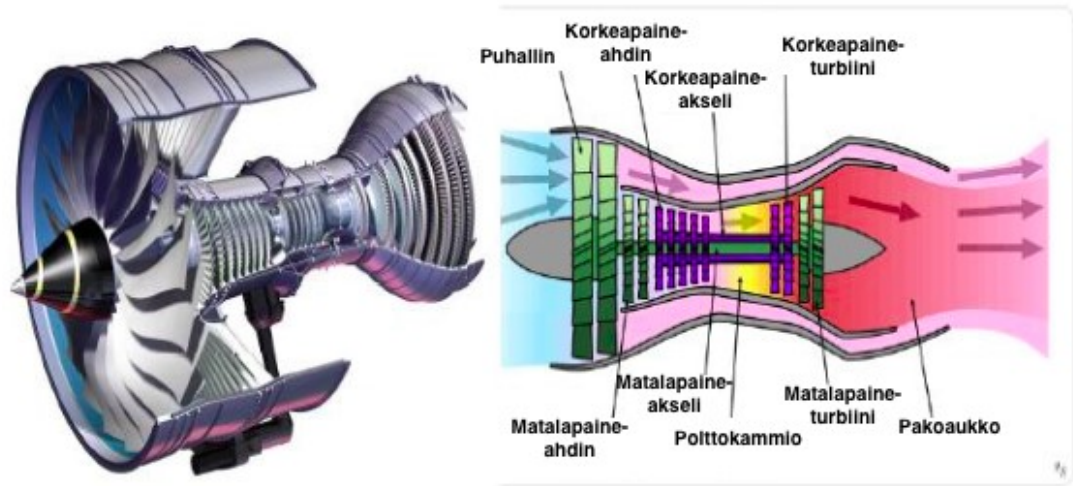


KUVA 1. Ohivirtausmoottorin ilmvirtaus (COSMOS 2017, muokattu)

### 3.3 Puhallinmoottorin rakenne

Puhallinmoottori eli ohivirtausmoottori on kaasuturbiinimoottori, jonka ahtimen edessä on puhallin. Tätä puhallinta voidaan toisaalta ajatella myös ahtimeksi, mutta sen ohi kulkevasta kaasuvirtauksesta eli ilmamassasta osa johdetaan suoraan perusmoottorin ohitse. Ohivirtaus tuottaa osan moottorin työntövoimasta ja riippuen moottorityypistä se voi olla jopa 85 %. (Jokinen & Koivisto 2008, 66.) Puhallinmoottorit eli ohivirtausmoottorit ovat yleisin isoissa ja keskikokoisissa liikennelentokoneissa käytetty moottorimalli. Pääsääntöisesti puhallinmoottorit ovat polttoainetehokkaita ja hiljaisia turbiinimoottoreita. Ne ovat ”Luotettavimpia moottoreita, joita on koskaan tuotettu” (El-sayed 2008, 215).

Kuvasta 2 nähdään, että ohivirtausmoottorin osiot koostuvat yleisimmin puhaltimesta, matalapaineahtimesta, korkeapaineahtimesta, polttokammioista, korkeapaineturbiinista, matalapaineturbiinista ja pakoaukosta.



KUVA 2. Ohivirtausmoottori (Häkkinen 2010, 26, muokattu)

### 3.3.1 Ahdin

Palamisesta vapautuvan energian määrä on verrannollinen kulutettuun ilmamäärään. Jos ilmamäärää ei suurenneta eli ahdettaisiin pienempään tilaan suurempaa määrää, energiaa ei tuotettaisi riittävästi moottorin pyörytykseen. Tästä syystä polttoaineen ja ilmamassan seosta paineistetaan, jotta määrätty tilavuusyksikköä kohden käsitelty ilmamäärä olisi mahdollisimman suuri. Ahtimen päätehtävä on siis tuottaa tarvittava ilmamäärä moottorin pyörytykseen. (Jokinen & Koivisto 2008, 105.)

Ahtimen painesuhde eli ahtimen paineen nostokyky on moottorin tärkeimpiä ominaisuuksia. Yleisesti voidaan sanoa, mitä korkeampi painesuhde on, sitä parempi moottorin termien hyötysuhde eli lämpötaloudellinen hyötysuhde on. Mitä korkeampiin hyötysuhteisiin tähdätään, sitä laadukkaampia materiaaleja ja tarkempaa suunnittelua ahtimelta vaaditaan. (Jokinen & Koivisto 2008, 114.)

### 3.3.2 Turbiini

Kaasuturbiinimoottorin turbiini on moottorin se osa, jolla tuotetaan voimaa ahtimelle ja ohivirtausmoottorilla myös puhaltimelle. Turbiinin tehtävä on synnyttää kineettistä energiaa polttokammioista suurilla nopeuksilla ulos suihkuavasta kaasusta. Kineettinen energia muutetaan akselia pyörittäviksi hevosvoimiksi, joilla

saadaan pyörittävää voimaa ahtimille. Jopa kolme neljäsosaa polttoaineen palamisesta tuotetusta energiasta tarvitaan ahtimien pyörykseen. (Kroes & Wild 1995, 297.)

Turbiinin siivet kaasuturbiinimoottoreissa on altistettu erittäin korkeille lämpötiloille, joten ne täytyy valmistaa korkeita lämpötiloja kestävästä metalleista ja niille on tehtävä erityisiä jäähdytystoimenpiteitä. Lämpötilan noustessa liian korkeaksi turbiinin siipiin alkaa syntyä lämpöhalkeamia ja jännitysmurtumia. Halkeamat ja murtumat ovat erittäin haitallisia moottorin toiminnan kannalta. Turbiinikiekkorakenteen tasapaino on erittäin kriittinen korkeitten pyörintänopeuksien vuoksi. Tästä syystä jokainen turbiinin siipi on tarkoin momenttipainotettu tasapainoon ja virheitä ei saa kiekon ja siipien rakenteissa syntyä. (Kroes & Wild 1995, 297–299.)

## 4 SUIHKUMOOTTORIN PESU

Tässä luvussa kerrotaan moottorin pesusta teoriassa. Luvussa käydään läpi yleisimmät moottorinpesumenetelmät sekä pesun vaikutukset moottorin suoritusarvoihin. Lisäksi kerrotaan, kuinka moottorin pesu suoritetaan yleisellä tasolla.

### 4.1 Miksi suihkumoottoria pestään?

Moottorin osiin, esimerkiksi ahtimen ja turbiinin siipiin, kerääntyy käytön aikana epäpuhtauksia. Epäpuhtauksien suuri määrä voi ruveta vaikuttamaan tietyssä pisteessä moottorin suorituskykyyn alentavasti. Palautuminen tästä pisteestä onnistuu moottorin pesulla, jossa siipien pinnalta poistetaan kovettunut suola, lika ja muut pinttyneet materiaalit. Pesu voidaan suorittaa joko sisäisellä tai ulkoisella pesulla. Moottorin ahtimelle pesu tehdään suihkuttamalla sen pesuohjeissa määrättyä nestettä moottorin imuaukkoon käyttämällä pesurengasta tai pidettävää suutinta (kuva 3). Turbiinin pesu suoritetaan samalla tavalla, mutta neste on johdettu polttokammiovaiheelle. (Kroes & Wild 1995, 522.)



KUVA 3. Moottorin vesipesu (Ferrero 2011)

Moottoripesu tehdään suihkumoottoreille usein ahtimen pesuna. Ahtimen pesu suoritetaan suihkuttamalla vettä tai pesuseosta imuaukolta moottoriin. Vettä tai pesuseosta suihkutetaan erillisellä suuttimella moottorin puhallinsiiville sekä ensimmäisen vaiheen ahtimelle moottoria samalla pyörittäen. Jokaiselle moottorille ja pesulaitteelle on valmistajan laatimat ohjeet moottorinpesuohjeet, joissa käydään läpi pesun kesto, suoritettavat toimenpiteet, nesteet pesua varten ja näitä tulee noudattaa moottoria pestäessä (Kroes & Wild 1995, 522).

## **4.2 Moottoripesunmenetelmät**

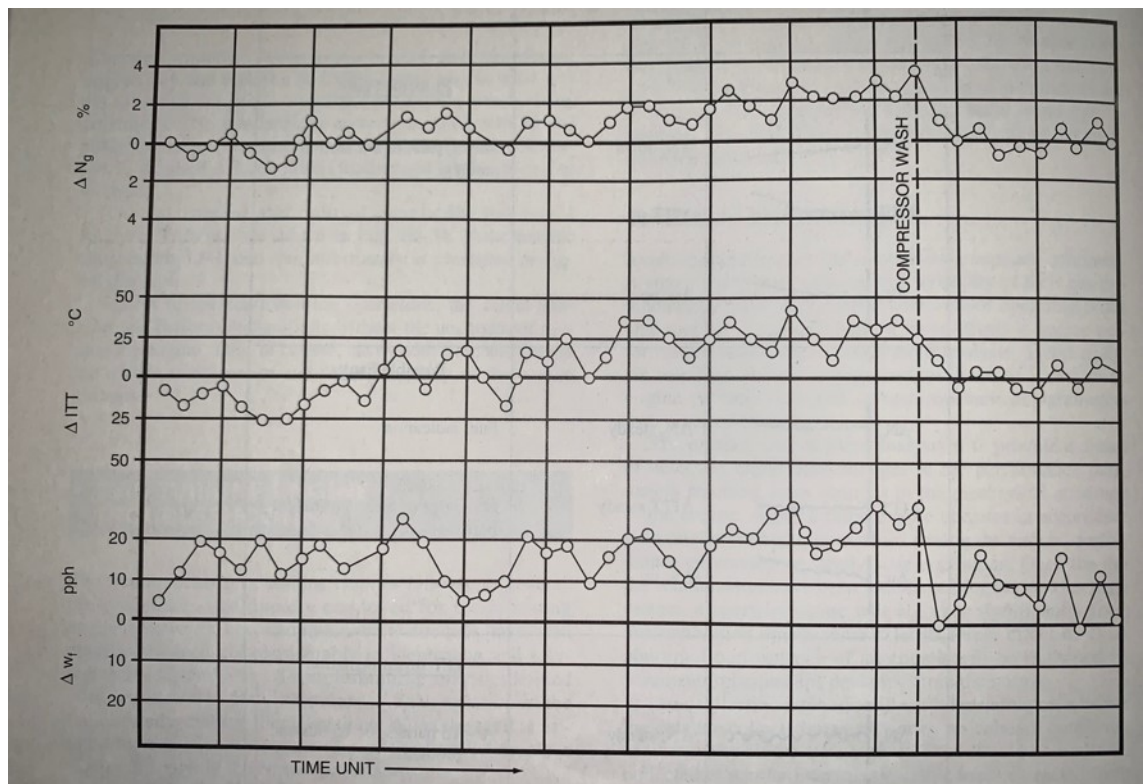
Sisäinen moottoripesu voidaan suorittaa kahdella metodilla. Moottoria voidaan pestä, kun sitä pyöritetään vain käynnistinmoottorilla, jolloin moottorin kierrokset nousevat vain 10–25 % rpm tai moottorin pesu voidaan tehdä joutokäyntinopeudella. Pelkällä starttimoottorilla pestäessä kierrokset nousevat 5 % ja pesuseos voidaan suihkuttaa moottorin imuaukkoon kierrosnopeuden kasvaessa. Suihkutus tulisi lopettaa kierrosten laskiessa takaisin 5 %:n tasolle. Ennen sisäistä pesua tulisi moottorista poistaa tai eristää ahtimelta johdatettavan vuotoilman liitokset sekä muut komponentit ja liitokset kontaminaation varalta. Yleiseen sääntöön nojaten käynnistysmoottoria ei saisi käyttää yli 30 sekuntia ja oikeaa jäähdytysaika tulisi noudattaa, ettei käynnistysmoottori ylikuumenisi pesun aikana. (Kroes & Wild 1995, 522.)

## **4.3 Moottoripesun vaikutus**

Ilmailualalla toimivat tahot pyrkivät jatkuvasti kehittämään kaasuturbiinimoottoreiden luotettavuutta. Lisäksi ne pyrkivät samanaikaisesti alentamaan käyttökustannuksia. Yksi tapa näiden molempien aikaansaamiseksi on moottorin suorituskyvyn monitorointi trendianalyysillä. Trendianalyysi pitää sisällään moottorin suorituskyvyn ja tiettyjen mekaanisten parametrien tallentamisen sekä niiden analysoinnin tietyn periodin sisällä. Pää tarkoitus tällä tutkimuksella ja seuraamisella on huomata merkittävät muutokset moottorin mekaanisessa kunnossa, kuten tuotetun tehon poikkeavuus normaalista. (Kroes & Wild 1995, 532–533.)

Moottorin eliniän aikana trendiparametrit paljastavat moottorin kunnan. Näiden trendilinjojen pysyessä stabiilina moottorin kunto voidaan olettaa normaaliksi.

Muutokset linjassa taas yleisimmin kuvaavat moottorin suorituskyvyn asteittaista huonontumista (Kroes & Wild 1995, 533). Kuvasta 4 voidaan tulkita ahtimen pesun (compressor wash) vaikutuksia kaasuturbiinimoottoriin. Välittömästi ahtimen pesun jälkeen ahtimen tarvittava nopeus ( $\Delta N_g$ ) pienenee, mikä tarkoittaa samanaikaisesti polttoaineenkulutuksen ( $\Delta W_f$ ) pienentymistä. Operoivalle taholle polttoaineenkulutuksen pienentyminen vaikuttaa merkittävästi kustannuksiin määrättyllä aikaperiodilla. Lisäksi matalapaine- ja korkeapaineturbiinien välinen lämpötila (interstage turbine temperature, ITT) laskee, mikä vaikuttaa moottorin elinikäodotukseen pidentämällä mahdollisten lämpövaurioiden ja rasiusten retikulaatioväliä. Lisäksi se kasvattaa moottorin käyttöikää eli siivessäoloaikaa (on wing time).



KUVA 4. Trend analysis, compressor contamination (Pratt & Whitney Canada Inc.; Kroes & Wild 1995, 532–533)

## 5 LENTOKONEEN AIHEUTTAMAT PÄÄSTÖT

Tässä luvussa käydään läpi teoriaa lentokoneen muodostamien päästöjen määrästä ja vaikutuksesta. Lisäksi kerrotaan, kuinka lentokoneen päästöt lasketaan ja miten niiden vaikutuksia mitataan. Luvussa lasketaan myös esimerkki Helsinki-Bangkok-välisellä lennolla syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrästä.

### 5.1 Mistä päästöt koostuvat?

Suurin osa lentoliikenteen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä aiheutuvat lentämisen aikana tapahtuvassa palamisprosessissa. Palamisprosessissa muodostuvat päästöt koostuvat suurimmaksi osaksi hiilidioksidista ( $\text{CO}_2$ ), joka on noin 70 % kokonaispäästöistä. Lisäksi kokonaispäästöt sisältävät 30 % vesihöyryä ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ja alle prosentin muita päästöjä, esimerkiksi typpimonoksidia ( $\text{NO}$ ), typpidioksidia ( $\text{NO}_2$ ), rikin oksideja ( $\text{SO}_x$ ), palamattomia tai osittain palaneita hiilivetyjä ( $\text{HC}$ ), häkkää ( $\text{CO}$ ) ja pienhiukkasia ( $\text{PM}$ ). (Niemistö, Nissinen, Soimakallio & Salo 2019, 22.)

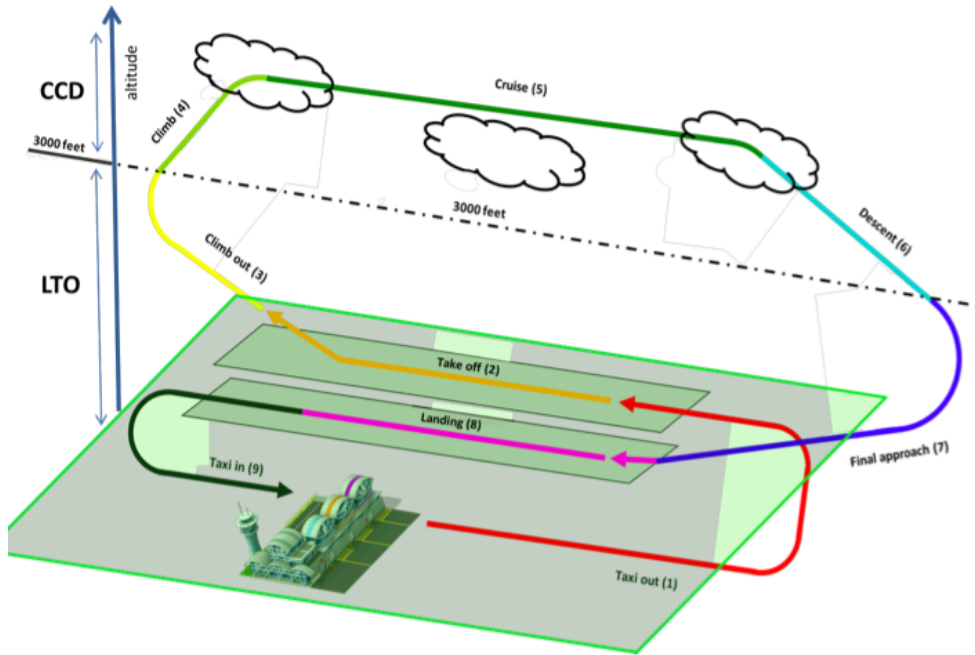
Valtaosa lentoliikenteen aiheuttamista päästöistä muodostuu matkalentokorkeuden ollessa 10–12 km. Hiilidioksidipäästöjen vaikutus ilmakehään on sama lentokorkeudesta riippumatta, mutta palamisreaktiossa syntyvien muiden päästöjen riippuvuus lentokorkeudesta ja vaikutus ilmakehään on monimutkaisempaa. Esimerkiksi typpimonoksidin ( $\text{NO}$ ) ja typpidioksidin ( $\text{NO}_2$ ) eli yhdessä typen oksidipäästöt ( $\text{NO}_x$ ) matkalentokorkeudessa tuottavat otsonia, joka lämmittää ilmakehää, mutta samalla vähentää ilmakehän metaanin määrää. (Finavia (a) 2020.)

### 5.2 Päästöjen laskeminen

Lentokoneen päästöjen vaikutus ilmakehään ja ilmastoon on monimutkainen prosessi, eikä kaikkia vaikutuksia ei vielä tunneta hyvin, mutta usein ilmailun kasvihuonepäästöt lasketaan ja esitetään vain polttoaineen palamisesta aiheutuneina hiilidioksidimäärinä. Kaikkien palamistuotteiden, kuten vesihöyryn ja typen oksidien, aiheuttamat yhteisvaikutukset ilmastoon voidaan arvioida esimerkiksi sätei-

lypakokertoimen eli Radiative Forcing -indeksin (RFI) avulla. Päästöjen eri yhdisteet jäävät ilmakehään eripituisiksi ajoiksi ja ilmakehän olosuhteet, kuten lämpötila ja muiden yhdisteiden pitoisuudet, vaikuttavat niiden yhteisvaikutusten muodostumiseen. Reaktiomekanismeja ei vielääkään tunneta tarkasti eikä RFI -indikaattorille ole onnistuttu muodostamaan yhtä yhteistä arvoa. Yleensä RFI -indikaattori liikkuu yhden ja viiden välillä. Uusissa tutkimuksissa ilmailussa on käytetty päästöjen kokonaisvaikutusten arviona noin kaksi kertaa suurempaa vaikutusta kuin pelkkien hiilidioksidipäästöjen vaikutukset. (Niemistö ym. 2019, 23.)

Ilmailun kokonaiskasvihuonepäästöt esitetään usein hiilidioksidin määränä. Hiilidioksidin määrä polttoainekiloa kohti on vakio, mutta typenoksidipäästöjen määrä riippuu palamisprosessista. (Hoffren, Laine & Renk 2006, 330.) Polttoaineen kulutukseen vaikuttavat moottorin kuormitus ja työntövoima lennon eri vaiheissa. Tämä huomioidaan myös päästöjen laskennassa. ICAO:n ohjeiden mukaisessa laskennassa lento jaetaan yhdeksään osaan, jotka kuvastavat lentovaiheita ja niissä tapahtuvaa polttoaineen kulutusta. Alle 3 000 jalan eli noin 900 metrin korkeudessa tapahtuvat lentovaiheet (1–3 ja 7–9) luokitellaan LTO-sykliin (Landing and Take off Cycle, laskeutuminen ja lento nousu) ja yli 3 000 jalan korkeudessa CCD-vaiheeseen (Climb, Cruise, Descent eli nousu-, matkalento- ja liukuvaihe) (Kuva 5). ICAO:n laskentaohjelmassa lennon jokaiselle vaiheelle on arvioitu tietty moottorin työntövoiman tarve ja sitä vastaava polttoaineen kulutus. (Niemistö ym. 2019, 23.)



KUVA 5. LTO ja CCD syklit (Eurocontrol 2016)

### 5.3 Esimerkki tuotettujen päästöjen määrästä

ICAO:n (2016) polttoainekulutus- ja päästölaskurin mukaan Helsinki-Bangkok-etäisyys  $s$  on 7 903 km ja lennon aikana kulutetun polttoaineen massa  $m$  noin 51 468 kg. Kerosiinin vapauttama energia  $Q$  on 43,5 MJ/kg ja hiilidioksidipäästöt  $CO_2$  on 71,5 kg/GJ (SenterNovem 2004, 5). Kaavalla (3) lasketaan lennon aikana kulutettu energia. Yhtälöllä (4) muutetaan megajoulet gigajouleiksi. Kaavalla (5) voidaan laskea tuotettujen hiilidioksidipäästöjen kokonaismäärän Helsinki-Bangkok-lennon aikana.

$$E_{kokonais} = m_{kerosiini} \cdot Q_{kerosiini} \quad (3)$$

$$10\text{MJ} = 10^{-2}\text{GJ} \quad (4)$$

$$CO_{2\text{kokonais}} = E_{kokonais} \cdot CO_{2\text{kerosiini}} \quad (5)$$

Kun edelliset lukuarvot sijoitetaan kaavoihin, saadaan Helsinki-Bangkok-lennon kokonaishiilidioksidipäästöiksi  $CO_{2\text{kokonais}}$  noin 160 078 kiloa. Suihkumoottorin pakokaasut sisältävät typen oksideja  $NO_x$  0,01–0,015 kg polttoainekiloa kohden

riippuen palamisprosessista (Hoffren ym. 2006, 330). Kun lukuarvot sijoitetaan kaavaan (6) saadaan Helsinki-Bangkok-lennon aikana tuotettujen typen oksidien kokonaismääräksi  $NO_{x_{kokonais}}$  514,68–772,02 kiloa.

$$NO_{x_{kokonais}} = m_{kerosiini} \cdot NO_{x_{kerosiini}} \quad (6)$$

## 6 MOOTTORIN NYKYISEN VESIPESUMENETELMÄN TUTKIMINEN

Tässä luvussa tutkitaan Finnairin tämänhetkistä moottorinpesumenetelmää kahdelle eri moottorille, CF6-80E1 ja Trent XWB84. Luvussa tutkitaan ohjeita ja lähdetietoja sekä kuinka moottorin pesu suoritetaan Finnairilla. Lisäksi luvussa tutkitaan pesun vaikutuksia moottorin suoritusarvoihin ja päästöihin.

### 6.1 Käyttö Finnairin laivastolla

EcoPower® on suihkumoottoreiden pesupalveluja tuottava toimija, jonka palveluja ostaa 65 lentoyhtiötä ja jolla on maailmanlaajuisesti yli 90 000 pesua suoritettuna (EcoPower 2020). Myös Finnairilla on EcoPowerin moottorinpesulaitteisto käytössään (kuva 6).



KUVA 6. EcoPower Finnairilla

Finnairilla EcoPower-vesipesujärjestelmää käytetään kaikkien sen laivastoon kuuluvien moottoreiden pesuun. Tässä työssä keskitytään kahteen isoimpaan moottorimalliin, jotka ovat General Electricin CF6-80E1 ja Rolls-Royce Trent XWB84. EcoPoweria käytetään suihkumoottorin pesuun ja pesu tehdään Finnairilla usein huoltohallissa. Pesun yhteydessä höyrystyvän veden mukana ympäröivään ilmaan voi kulkeutua epäpuhtauksia ja käytetyn veden mukana raskasmetalleja maastoon ja ympäristöön (liite 2), mikä vuoksi pesut suoritetaan usein Finnairin tapaan juuri sisätiloissa huoltohallissa ja pesun yhteydessä käytetään erillistä vedenkierrätysjärjestelmää, jolla epäpuhtaudet kerätään suodattimeen ja jäljelle jäänyt vesi kierrätetään takaisin EcoPowerin säiliöön. Tästä syystä vettä ei tarvitse ottaa talteen ja hävittää erikseen (kuva 7).



KUVA 7. EcoPowerin vedenkeräin

### 6.1.1 CF6-moottorin vesipesu EcoPower-järjestelmällä

Finnairin operoimassa Airbus A330 -lentokonemallissa on käytössä CF6–80E1 -moottorimalli, joka tuottaa 65 800–69 800 lbf:n työntövoiman ja on halkaisijaltaan 106–114 tuumaa. Pituudeltaan moottori on 168 tuumaa. (GE Aviation 2020.)

Ennen CF6–80E1 -moottorille tehtävää pesua pitää ECU:lta (electronic control unit) irrottaa kaksi linjaa, PS3 ja PS12. ECU:lta tulee irrottaa myös putket, ettei vesi pääse vahingoittamaan moottorin ohjausyksikköä. ECU on modernissa suihkumoottorissa toimiva ohjausyksikkö, jolla ohjataan moottorin toimintoja. FADEC (full authority digital engine controller) on ilma-aluksen ja sen moottorin säätö- ja valvontajärjestelmän välinen rajapinta ja sen keskeisin osa on elektroninen ohjausyksikkö ECU. (kuva 8) (Opetushallitus n.d.)



KUVA 8. CF6-moottorin ECU

Ennen moottorin pesun aloittamista CF6 -moottorin FADEC:iin tulee liittää sähköinen työkalu (HMU driver), jolla ajetaan VSV (variable stator vanes) auki ja VBV (variable bypass valves) kiinni. Tämä suoritetaan, jotta saadaan vettä ohjaamalla parempi pesutulos. (TASK 72-00-00-160-807 F.) Jotta päästään käsiksi FADEC:iin, on moottorin muotosuoja aukaistava (kuva 9).



KUVA 9. CF6-moottori pesutilanteessa

Tässä työssä moottorille suoritettiin pesu kolmessa vaiheessa suihkuttamalla moottoriin vettä noin 80 barin paineella ja 61,4 l/min virtausnopeudella. EcoPowerin suosituksen mukaisesti pesuveden lämpötila oli 66–71 °C, jotta saavutettaisiin paras pesutulos. Näiden kolmen pesuvaiheen välissä moottorin annettiin kuivua vaiheesta riippuen 5–10 minuuttia.

Moottoria pestäessä sitä pyöritettiin paineilmakäynnistimen avulla, jotta vesi kulkeutui perusmoottorin lävitse ahtimien- ja turbiininsiipien pyöriessä. Starttimoottoria sai käyttää kerrallaan maksimissaan viiden minuutin ajan ja pesutapahtuma, jossa suihkutettiin vettä, kesti ohjeen mukaisesti noin 35 minuuttia. (TASK 72-00-00-160-807 F.)

Suihkumoottori käynnistetään usein paineilmakäynnistimellä, joka vaatii paineilmaa pyörytykseen ja usein tämä ulkoinen paineilma tuotetaan APU:lla (auxiliar

power unit), toisella moottorilla tai ulkoisella ASU:lla (air supply unit) (Finnish national agency for education 2020). Tässä pesututkimuksessa CF6-moottorin käynnistimelle tuotettiin paineilmaa ulkoisella ASU:lla (kuva 10), mikä vaati yhden mekaanikon valvomaan ja käyttämään laitetta pesun aikana.



KUVA 10. Ulkoinen ASU

EcoPowerilla pestäessä vesi ohjataan moottoriin siihen liitettävällä suutinteli-neellä, joka kiinnitetään moottorin imuaukkoon (kuva 11). Suuttimen tarkoituk-sena on saada ohjattua vesisuihku mahdollisimman hyvin puhaltimen siipien ohitse perusmoottoriin, jota kutsutaan primäärivirtaukseksi ja on oleellinen osa pesutapahtumaa. Perusmoottorin ohitse menevä vesisuihku on sekundäärinen virtaus, mikä ei ole oleellinen osa pesua pesutapahtuman tehokkuuden kannalta.

EcoPowerin vesisäiliön tilavuus on noin 400 litraa ja tuosta vedestä suurin osa kiertää moottorin lävitse sitä pestäessä. Tässä työssä kolmen pesuvaiheen ai- kana vettä suihkutettiin muutaman minuutin pituisissa periodeissa ja vettä kul-

keutui moottorin läpi noin 300 litraa. Tästä määrästä suurin osa kierrätetään suodatinjärjestelmän kautta takaisin säiliöön, mutta paljon haihtuu myös sumuna ilmaan ja osa vedestä jää makaamaan moottorin rakenteisiin. Rakenteisiin jäänyt vesi poistettiin pesun jälkeen koekäyttämällä moottoria. CF6-moottorin pesun aikana hävinneen veden määrä mitattiin ja sen todettiin olleen noin 100 litraa alku- peräisestä 400 litran säiliöstä. Osa tästä vedestä haihtui höyrynä, osa jäi moottorin rakenteisiin ja osa liitosten ja suodattimien rakenteisiin.



KUVA 11. Pesusuutinteline kiinnitettyä moottorin imuaukkoon

Moottori pestään usein sisätiloissa, jolloin lämpötila ei laske alle 4,4 °C:een. Tällöin pesun voi suorittaa pelkkää vettä käyttäen. Ohjeen mukaan ulkoilman lämpötilan laskiessa alle 4,4 °C:een, mutta jäädessä yli -5 °C:een, tulisi veteen sekoittaa 25 % isopropanolia jäätymisen estämiseksi. Ulkoilman lämpötilan ollessa -5 °C – -10 °C tulisi veteen sekoittaa 35 % isopropanolia. (TASK 72–00–00–160–807 F.) Lisäksi talviolosuhteet vaikuttavat moottorin koekäyttöön pesun jälkeen. Ulkoilman lämpötilan ollessa alle 0 °C tulee koekäyttö suorittaa välittömästi, kun kone työnnetään sisätiloista ulos. Ulkolämpötilasta riippumatta moottorille on suoritettava koekäyttö ennen operointia ja vähintään 24 tunnin sisällä pesusta. (TASK 72–00–00–160–807 F.) Tässä tutkimuksessa koekäyttöön kului aikaa

noin 45 minuuttia ja ennen tätä oli odotettava käynnistinmoottorin jäähtymistä 30 minuuttia. Tämä on suoritettava, jokaisen pesun jälkeen jokaiselle moottorille, mikä kuluttaa aikaa ja polttoainetta. Yhteensä yhden moottorin pesun valmisteluihin, itse pesutapahtumaan ja koekäyttöön kului aikaa noin 4 tuntia 45 minuuttia ja työhön osallistui kolme mekaanikkoa. Tähän aikaan ei ole laskettu mukaan lentokoneen hinaukseen käytettyä aikaa.

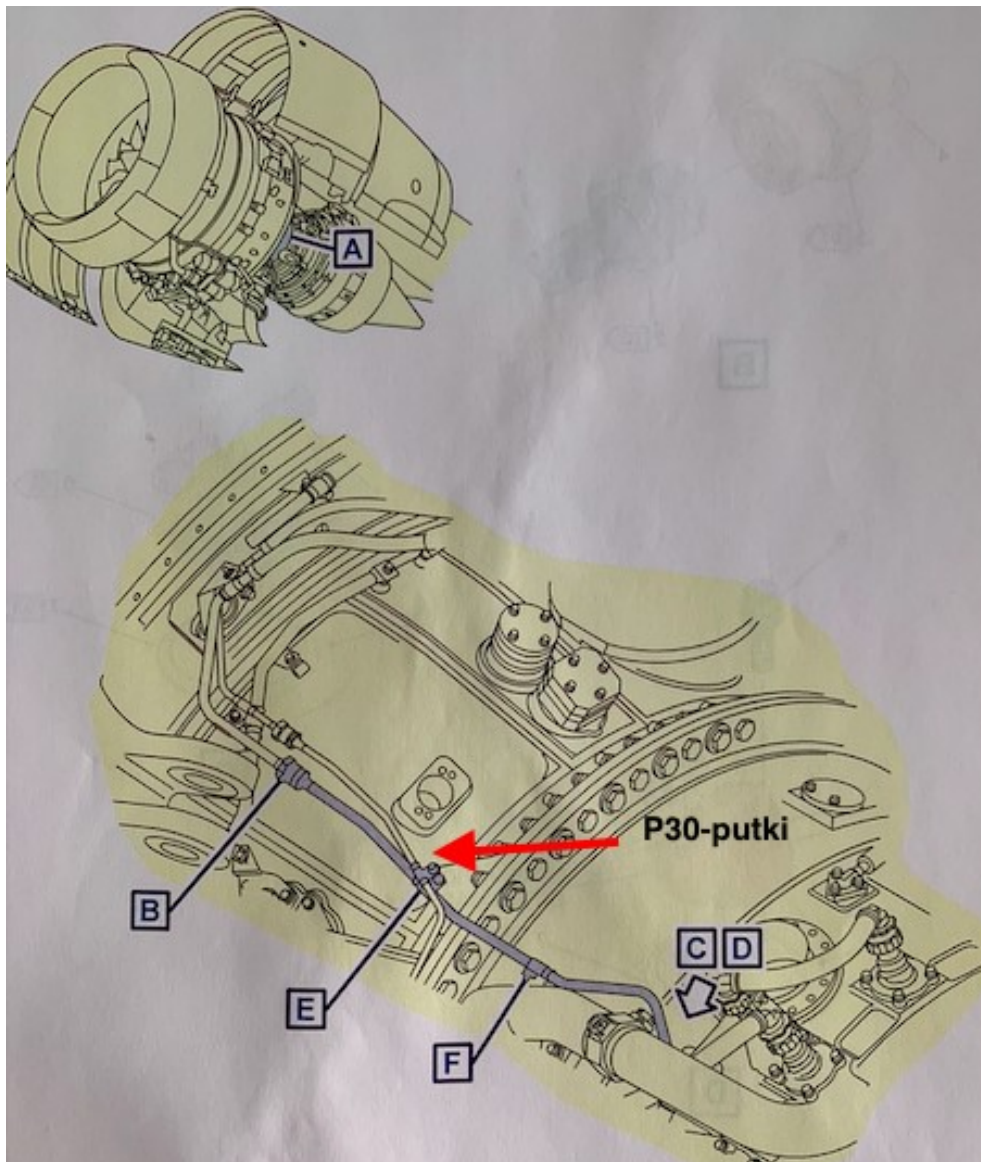
### **6.1.2 Rolls-Royce Trent XWB -moottorin vesipesu**

Rolls-Royce Trent XWB on Finnairin A350-lentokonemallissa käytetty moottori. RR Trent XWB-moottoreita on maailmanlaajuisesti käytössä ja tilauksessa yli 1 700 ja Rolls-Royce on jatkuvasti kasvattanut tuotantoaan (Rolls-Royce 2019). RR Trent XWB-moottori tuottaa 84 000–97 000 lbf:n työntövoiman ja sen puhaltimen halkaisija on 118 tuumaa (Rolls-Royce Trent XWB 2018). Rolls-Royce Trent XWB-moottori eroaa muista suihkumoottoreista omalaatuisella kolmiakselisella suunnittelullaan, jossa puhallinta pyörittää kuusi asteinen LP-turbiini, kahdeksan asteista IP-kompressoria pyörittää kaksi asteinen IP-turbiini ja kuusi asteista HP-ahdinta pyörittää yksi asteinen HP-turbiini (Royal aeronautical society 2017). Kuvassa 12 on Finnairin Airbus A350-900-lentokone ja Rolls-Royce Trent XWB-moottori.

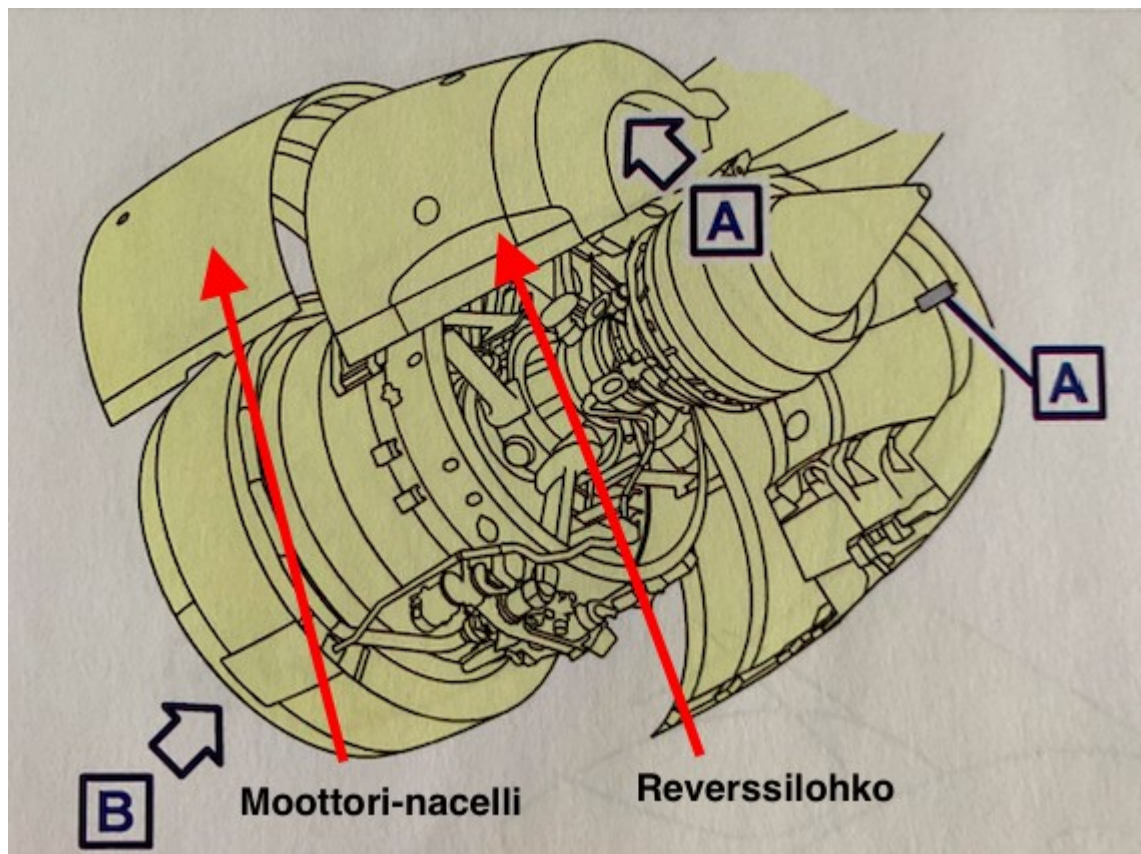


KUVA 12. Finnairin Airbus A350 (Siivet 2019)

Kun Rolls-Royce Trent XWB-moottoria pestään EcoPowerilla, käytetään sovelletusti Juniper-pesulaitteiston ohjetta (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250A-A). Juniper-pesulaitteisto on aikaisemmin Finnarin käytössä ollut pesulaitteisto ja Juniperin ohjetta käytetään EcoPowerilla pesemiseen, koska EcoPowerille ei ole tehty ohjeita Trent-moottorin pesemiseen. Ohjeen mukaan moottoripesun valmisteluun kuuluu moottorin P30-ilmaputken irrotus (kuva 13) ja tukkiminen. Tämä suoritetaan, jotta veden kulkeutuminen ja jäätyminen ilmaputkeen estetään. P30-linjan irrotukseen vaaditaan moottori-nacellin aukaisu sekä aikaa vievä reverssi-lohkon aukaisu (kuva 14).



KUVA 13. P30-ilmaputki (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250A-A)



KUVA 14. Trent XWB-moottori-nacelli ja reverssilohko avattuina (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250A-A)

Tässä tutkimuksessa pesu suoritettiin ohjeistuksen mukaisesti kolmessa vaiheessa ja jokaisessa vaiheessa vettä suihkutettiin moottoriin kahden minuutin ajan. Jokaisen vaiheen jälkeen moottorin annettiin valua 10 minuutin ajan. Viimeisen vaiheen jälkeen oli odotettava 30 minuuttia ennen kuin moottorille voi suorittaa koekäytön. (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250A-A.) Moottori pestään EcoPowerilla aina sisätiloissa, joten lentokone oli hinattava halliin ja hallista ulos koekäyttöä varten. Moottorille suoritettava P30-linjan irrotus oli hyvin aikaa vievää, mutta itse pesutapahtumaan kului noin 50 minuuttia muita ajankäyttöön vaikuttavia tekijöitä ei otettu huomioon.

Trent XWB84-moottorin pesuun käytettävää aikaa voidaan pitää verrattavissa CF6-80E1-moottoriin pesuun käytettyyn aikaan. Itse pesutapahtuma oli kestoltaan lähes saman mittainen ja valmistelut pitivät sisällään samoja toimenpiteitä. Myös koekäyttö on suoritettava molemmille moottoreille, ettei rakenteisiin jäänyt vesi jäädy tai aiheuta korroosiota. Erona sensijaan on Trentissä P30-linjan irrotus ja tukkiminen, johon vaaditaan reverssilohkon aukaisu. Molempien moottoreiden

pesuun vaaditaan kolme mekaanikkoa, koska sisätiloissa käytetään erillistä ASU:a käynnistinmoottorin pyörittämiseen. (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250A-A.)

## 6.2 Vesipesun hyödyt ja säännöllisyys

Rolls-Royce on lähettänyt 25.09.2018 Rolls-Roycen moottoreilla operoiville yhtiöille ilmoituksen (NTO no.:081), jossa kerrotaan moottoripesun hyödyistä ja annetaan suositukset pesukertojen määräksi. Ilmoituksessa kerrotaan päämoottorin ahtimeen kerääntyneen lian ja epäpuhtauksien kasvattavan moottorin rasi- tusta, turbiinin kaasujen lämpötilaa (TGT) ja ominaispolttoaineen kulutusta (SFC) (liite 1). (Rolls-Royce 2018.)

Rolls-Roycen omasta tutkimuksesta moottoreiden pesemisestä ja sen vaikutuk- sista TGT-marginaaliin, polttoaineenkulutukseen ja korkeapaine akselin nopeus- marginaaliin käy ilmi, että koko Trent-suihkumoottorilaivaston hyödyt ovat arviolta samalla tasolla. Rolls-Royce sai omassa pesututkimuksessaan selville, että 300 lentosyklin välein tehdyillä pesuilla TGT-marginaali kasvaa 8 °C ja keskiarvo 6 °C. Matkanopeudella polttoaineen kulutus pienenee 0,8 %. Keskiarvo paranee polttoaineen kulutuksessa 0,3 %. N3-marginaalin parannus on 0,6 % ja sen kes- kiarvo 0,3 %. (Rolls-Royce 2018.) TGT-marginaali kuvaa lentoonlähtötehoilla TGT:n huippuarvon ja TGT:n sertifioidun punaisenlinjanarvon erotusta, joka ku- vaa lämpötilan maksimiarvoa. Turbiininlämpötilan sertifioitu punainenlinja on läm- pötila, jota suihkumoottorin turbiininlämpötila ei saisi ylittää. TGT-marginaali ku- vaa suihkumoottorin siivessäoloaika (time on-wing) ja moottorin kuntoa. Mitä lähempänä TGT-marginaali on nolaa, sitä lähempänä turbiinin lämpötila on mak- simiarvoa. (Ackert 2015.)

Ahtimen siipien likaantuessa ahtimen hyötysuhde laskee ja suihkumoottorilta sa- man tehon tuottamiseen vaaditaan enemmän. Suihkumoottori kasvattaa polttoai- neen syöttämistä ja samalla moottorin lämpötilat nousevat. Tästä johtuu EGT- tai TGT-marginaalin nousu ahtimen likaantuessa. (Power engineering international 2008.)

Suurimmat moottorinpesun tuomat vaikutukset esiintyvät alueilla ja lentokentillä, joissa on korkeampi luonnonmukaisten epäpuhtauksien kuten hiekan pitoisuus ilmassa (liite 1). Taulukko 1 kuvaa ahtimen pesun vaikutuksia Trent-500-, Trent-700- ja Trent-800-moottorimalleille lentoonlähtötehoilla turbiinin lämpötilamarginaaliin (take-off TGT margin), matkalentonopeudella polttoaineenkulutukseen (cruise SFC) ja lentoonlähtötehoilla korkeapaine akselin pyörintänopeuteen (take-off HP shaft speed margin). Näitä arvoja voidaan pitää Rolls-Roycen mukaan samankaltaisina Trent XWB -moottorimallilla, jonka pesuun tässä työssä keskitytään (liite 1.) (Rolls-Royce 2018.)

TAULUKKO 1. Hyödyt Trent-laivastolla (liite 1) (Rolls-Royce 2018)

Moottorimalli	Parametrit	Odotettuhyöty		
		Minimi	Keskiarvo	Maksimi
Trent 500	Lentoonlähtö TGT-marginaali	2 °C	5 °C	7 °C
	Lentoonlähtö HP-akselin nopeusmarginaali	0,3 %	0,3 %	0,4 %
	Matkalentonopeudella ominaispolttoaineenkulutus	0,0 %	0,3 %	0,6 %
Trent 700	Lentoonlähtö TGT-marginaali	3 °C	6 °C	8 °C
	Lentoonlähtö HP-akselin nopeusmarginaali	0,1 %	0,3 %	0,6 %
	Matkalentonopeudella ominaispolttoaineenkulutus	0,1 %	0,3 %	0,5 %
Trent 800	Lentoonlähtö TGT-marginaali	2 °C	6 °C	8 °C
	Lentoonlähtö HP-akselin nopeusmarginaali	0,2 %	0,3 %	0,5 %
	Matkalentonopeudella ominaispolttoaineenkulutus	0,1 %	0,4 %	0,8 %

Minimoidakseen polttoaineen kulutusta Rolls-Royce on suositellut perusmoottoripesun ja puhaltimen puhdistuksen suoritettavaksi säännöllisesti. Optimaalinen pesusykli riippuu jokaisen moottorilla operoivan lentoyhtiön huoltokustannuksista, polttoainehinnoista ja muista yksilöllisistä vaikutuksista, kuten huoltojen

suunnittelusta. Rolls-Roycen tutkimuksen mukaan yleinen optimaalinen pesuväli olisi 300 lentosykliä (liite 1.) (Rolls-Royce 2018.)

Finnair toimii tämän suosituksen mukaisesti ja Trent-moottorit pestään 300 lentosyklin välein eli noin kaksi kertaa vuodessa. Lentosykli tarkoittaa yhden lennon suorittamista moottorin käynnistyksestä moottorin sammutukseen, minkä aikana suoritetaan lentoonlähtö ja laskeutuminen. Tutkimuksen mukainen TGT-marginaalin kasvatus 6 °C vaikuttaa moottorin on-wing-aikaan, joka kuvaa, kuinka kauan moottori on lentokoneessa käytössä ennen sen vaihtoa ja mikä moottorin yleiskunto on (Ackert 2015). Lisäksi vaikutukset näkyvät myös Finnairin polttoainekustannuksissa, koska Rolls-Roycen tutkimuksen mukaan polttoaineen kulutus pienenee ja polttoaineen kulutuksen pieneneminen tarkoittaa samalla hiilidioksidipäästöjen pienenemistä.

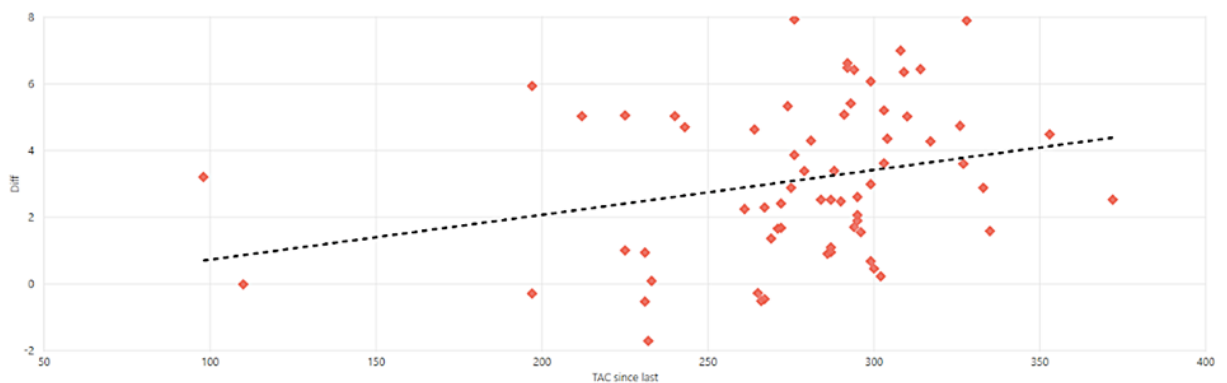
### **6.2.1 Finnairin tutkimus pesulaitteen vaikutuksesta moottorin suoritusarvoihin**

Finnairin sisäisessä tutkimuksessa tutkittiin kuinka usein tehdyt pesukerrat vaikuttavat positiivisesti marginaaliin ja samalla selvitettiin millainen vaikutus TGT-marginaalilla on ominaispolttoainekulutukseen. (Finnairin sisäinen tutkimus 2019.)

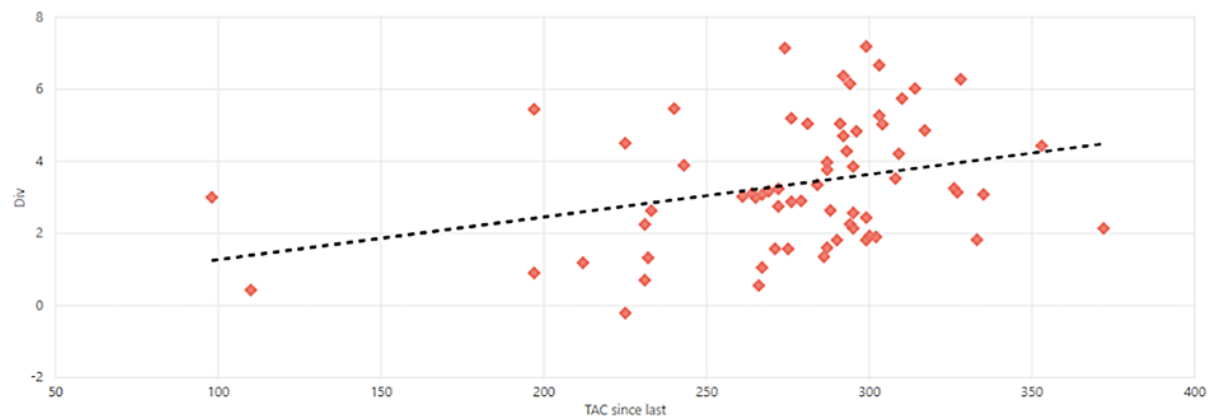
Tutkimuksessa tehtiin kaksi otosta ja ensimmäisessä tutkimuksessa Rolls-Royce Trent XWB -moottorille tehtiin moottorinpesuja EcoPowerilla 56, Juniperilla 27 ja Cycleanilla viisi kertaa. Tässä tutkittiin moottorin TGT-marginaalin kasvua, jokaisen pesukerran jälkeen ja TGT-marginaali kasvoi EcoPowerilla 3,41 °C, Juniperilla 2,99 °C ja Cycleanilla 3,03 °C. Kaikkien pesujen keskiarvo oli 3,26 °C:een kasvu TGT-marginaaliin. Toisella tutkinta kerralla TGT-marginaalin kasvun keskiarvo kaikkien pesujen kesken oli 3,48 °C. Näissä tutkimuksissa arvoja vertailtiin yksittäisen lentokoneen moottoreiden välillä. Tutkimuksessa selvisi myös pesun vaikutuksen TGT-marginaalin vaihtelevan pesuhetken mukaan. Esimerkiksi toisella tutkimuskerralla joului- ja kesäkuun välisenä aikana tehdyt pesut olivat vaikuttaneet eniten pesutulokseen. (Finnairin sisäinen tutkimus.) Tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä, että suihkumoottorin pesu vaikuttaa TGT-marginaalin ja

TGT-marginaali vaikuttaa polttoaineen kulutukseen. TGT-marginaalin suureminen vaikuttaa suihkumoottorin yleiskuntoon ja siivessäoloaikaan (Ackart 2015).

Tutkimuksen kahdesta eri mittauskerrasta ensimmäisessä jokaisen 275 lentosyklin jälkeen tehdyn pesun (kuvio 1), toisessa taas jokaisen 230 lentosyklin jälkeen tehdyn pesun vaikutus TGT-marginaaliin oli positiivinen (kuvio 2). Kuvaajissa TGT-marginaalin muutos (Diff) °C:na on esitetty suhteessa lentosyklar lukumäärään (TAC since last). (Finnairin sisäinen tutkimus 2019.)



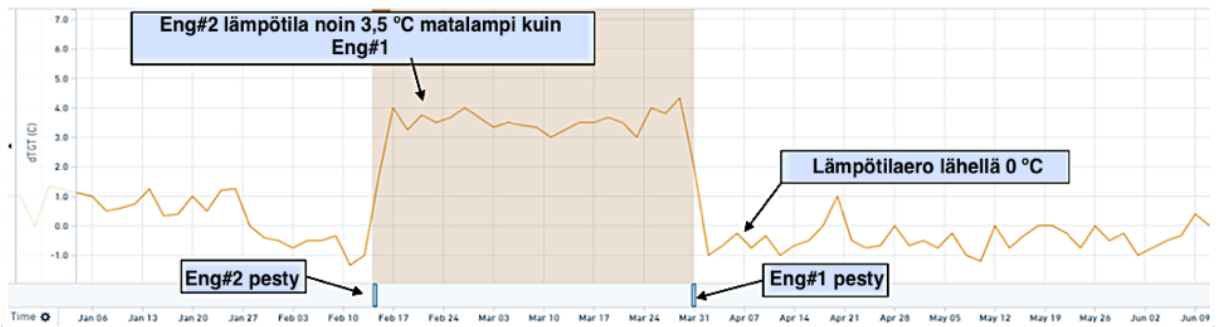
KUVIO 1. Pesukertojen vaikutus TGT-marginaaliin ensimmäisellä tutkimuskerralla (Finnairin sisäinen tutkimus 2019)



KUVIO 2. Pesukertojen vaikutus TGT-marginaaliin toisella tutkimuskerralla (Finnairin sisäinen tutkimus 2019)

Tutkimukset TGT-marginaalin ja polttoainekulutuksen välisestä riippuvuudesta osoittivat, että esimerkiksi vesipesun jälkeen TGT-marginaali paranee 3,5 °C (kuvio 3) ja esimerkiksi polttoaineen kulutus pienenee matkalentotoitoilla 23,5 kiloa tunnissa (kuvio 4). Kuviossa 3 pystyakselilla on TGT-lämpötilamuutos (°C)

ja vaaka-akselilla pesupäivämäärät. Kuvioissa 4 pystyakselilla on polttoaineenkulutuksen muutos (kg/h) ja vaaka-akselilla pesupäivämäärät. (Finnairin sisäinen tutkimus 2019.)



KUVIO 3. TGT-marginaali 1. moottorin ja 2. moottorin välillä (Finnairin sisäinen tutkimus 2019)



KUVIO 4. Polttoaineenvirtaus matkalentotehoilla 1.moottorin ja 2. moottorin välillä (Finnairin sisäinen tutkimus 2019)

Rolls-Roycen ja Finnairin tutkimustulosten perusteella voidaan tehdä päätelmä, että moottoripesut vaikuttavat moottorin TGT-marginaaliin Rolls-Roycen suosittelema 300 lentosyklin välein tehtävän pesun sijaan pesukertojen määrää näyttäisi Finnairin tutkimuksen perusteella voitavan kasvattaa ja syklien väliä pienentää, jotta päästäisiin entistä parempiin moottorin suorituskykyarvoihin. Nämä tutkimukset ovat kuitenkin suppeat ja tarkkojen kustannushyötyjen laskemiseen tarvittaisiin laajempi otanta pesujen vaikutuksesta. Lisäksi pesun tuomien hyötyjen selvittämisessä tulisi ottaa huomioon pesukertojen kustannukset, ja senhetkiset polttoainekustannukset sekä kuinka usein moottorin pesemiselle on todellisuudessa aikaa.

## 6.2.2 Moottorin pesun vaikutus lennon hiilidioksidipäästöihin

Finnairin tekemästä tutkimuksesta saadusta esimerkistä polttoaineenkulutuksen arvosta voidaan päätellä suuntaa antavasti moottorin pesun vaikutus lennon hiilidioksidipäästöihin. Helsinki-Bangkok-lennolla kulutettu polttoainemassa  $m_{\text{kerosiini}}$  on ICAO:n laskurin mukaan noin 51 468 kg (ICAO 2016). Finnairin sisäisen tutkimuksen (2019) esimerkissä moottoripesun jälkeen polttoaineenkulutus matkalentonopeudella laskee 23,5 kg/h, joka tarkoittaa noin kahdeksan tunnin lennolla Helsingistä Bangkokiin noin 188 kiloa. Lasku on 0,365 % ICAO:n laskurin arvioimasta kulutetun polttoaineen kokonaismassasta tällä matkalla. Luvussa 5.2 laskettiin esimerkkinä tuotettujen hiilidioksidipäästöjen määrästä Helsinki-Bangkok-lennon päästöt. Tämän lennon kokonaishiilidioksidipäästöjen  $CO_{2\text{kokonais}}$  0,365 %:n lasku laskisi koko lennon päästöjä noin 585 kg/lento.

Keskivertosuomalaisen hiilijalanjälki kertoo, kuinka paljon yksi henkilö aiheuttaa päästöjä, kuten hiilidioksidipäästöjä vuodessa ja se on noin 10 300 kiloa (Sitra 2019). Jos Finnair lentäisi Bangkokiin kaksi kertaa päivässä ja Bangkokista kaksi kertaa päivässä takaisin Suomeen, lentoja kertyisi vuodessa 1460 kappaletta. Jokaisella lennolla vähennettäisiin hiilidioksidipäästöjä 585 kiloa, tuottaisi se vuodessa 854 100 kiloa vähemmän hiilidioksidipäästöjä eli noin 83 keskivertosuomalaisen vuosittaisten hiilidioksidipäästöjen verran. Pitää kuitenkin huomioida, että laskelmat perustuvat ICAO:n standardin (ICAO 2016) mukaisiin arvoihin ja tutkimus (Finnairin sisäinen tutkimus 2019), jonka mukaan polttoainesäästöt on laskettu, ei ole riittävä lopullisen laskelmien tekemiseen sen vähäisten otantakerrojen vuoksi.

## 6.3 Yhteenveto nykyisestä moottorinpesumenetelmästä

Nykyisellä moottorinpesumenetelmällä pesuun kulutettava aika suunnitellaan osaksi hallihuoltoa, jonka pituus on vähintään kuusi tuntia. Pohjana tälle aika-arviolle käytetään AMM FIN TASK 72-00-00-160-807 F -huolto-ohjetta A330-lentokoneella ja AMM FIN TASK 72-00-00-100-001 F -huolto-ohjetta A350-lentokoneella. Finnairin tutkimukseen (Finnairin sisäinen tutkimus 2019) esimerkissä

EcoPowerilla tehdyssä pesussa saavutetaan TGT-marginaalin 3,3 °C:n parannus ja polttoainekulutuksen pienentyminen matkalentotehoilla 23,5 kiloa tunnissa. Tämä polttoainemäärä vastaa matkalentotehoilla noin 72,85 kilon hiilidioksidipäästöjen vähenemistä tunnissa.

## 7 MOOTTORIN UUDEN VESIPESUMAHDOLLISUUDEN TUTKIMINEN

Tässä luvussa tutkitaan, miten moottorin pesua voitaisiin parantaa Finnairilla. Luvussa kootaan yhteen, millaisia tuloksia Cycleanilla pesusta on saatu. Lisäksi käydään läpi, mitä eroa sen ja EcoPowerin pesuohjeissa on, minkälaiset ovat laitteiden käytännön erot ja kuinka Finnairilla voitaisiin hyödyntää Cycleania.

### 7.1 Lufthansa Technik Cyclean®

Lufthansa Technik Group on tuonut markkinoille Cyclean®-nimisen moottorinpesuteknologian (kuva 15). Moottoripesuja laitteella on toteutettu yli 90 000 kertaa onnistuneesti ja Cyclean on käytössä ympäri maailmaa. Cyclean tarjoaa palveluitaan muun muassa CF6-80E1 moottorille, sekä Rolls-Royce Trent XWB-moottorille. Cycleanissa yhtenä erona on sen patentoitu teknologia, jossa vesi suihkutetaan suoraan päämoottoriin puhaltimen siipien ohitse. (Lufthansa Technik (b) 2018.)



KUVA 15. Cyclean-moottorinpesujärjestelmä (LufffahrMagazin n.d.)

Tässä työssä Cycleanin käyttöä arvioidaan perustuen Lufthansa Technikin antamiin tietoihin ja vastauksiin koskien laitteistoa (Katiska 2020). Lufthansa Tech-

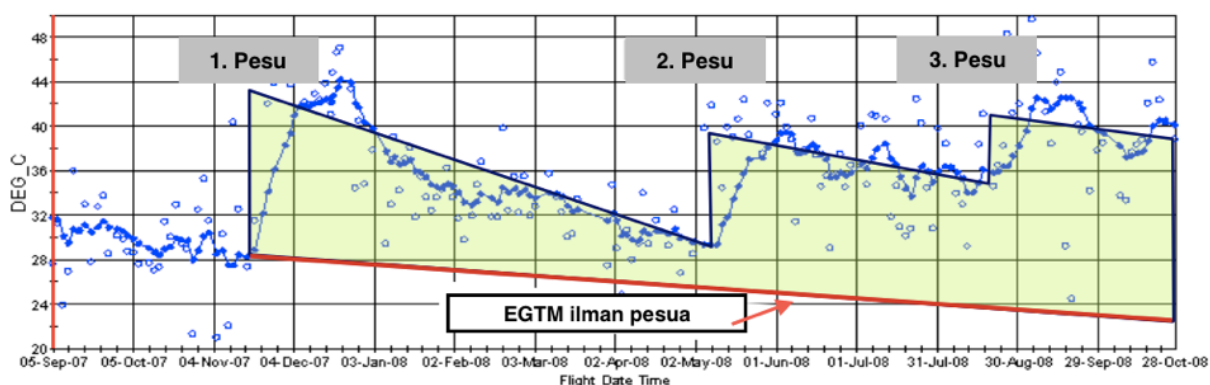
nikiltä voidaan tilata pesupalvelua, jota tarjotaan esimerkiksi Los Angelesin, Lontoon Heathrow'n ja Hongkongin lentoasemilla. Cycleanin voi myös vuokrata lentoyhtiön omaan käyttöön. (Lufthansa Technik (b) 2018.)

Lufthansa Technik on tuottanut tutkimuksen (Lufthansa Technik (a) 2019), jossa tutkitaan Cycleanilla tehtyjen pesujen vaikutuksia CF6-80C2-moottorin suoritusarvoihin. CF6-80C2-moottori käyttää samaa ahdin- ja turbiinikokonaisuutta kuin CF6-80E1, jota Finnair käyttää Airbus A330-lentokoneessaan. Myös CF6-80C2:n työntövoimaluokka 52 500–63 500 lbf liikkuu samassa luokassa kuin Finnairin käyttämän moottorin, minkä vuoksi pesutuloksia kyseisessä tilanteessa voitaisiin pitää vastaavina Finnairin CF6-80E1-moottoreilla. (General Electric company 2008.)

Tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä moottorin EGTM:n (Exhaust Gas Temperature Marginal) eli pakokaasujen lämpötilamarginaalin kasvaneen 14,3 °C ja moottorin DFF:n (Delta Fuel Flow) muutoksen eli polttoainekulutuksen vähentyneen -0,7 % (taulukko 2). Lisäksi voidaan kuviolla 6 havainnollistaa moottorin pakokaasujen lämpötilamarginaalin parantumista ja kuinka moottorin EGTM pienenee, jos sitä ei pestä. Kuvaajassa pystyakselilla on lämpötila (°C) ja vaakakselilla päivämäärä. (Lufthansa Technik (a) 2019.)

TAULUKKO 2. CF6-80C2-moottorin data-analyysi (Lufthansa Technik (a) 2019)

Moottorin sijainti	EGTM ennen pesua (°C)	EGTM pesun jälkeen (°C)	Muutos (%)	DFE ennen pesua (%)	DFE pesun jälkeen (%)	Muutos (%)
#4	35	48	13	4,5	4	-0,5
#1	16	36	20	2,5	1,9	-0,6
#2	27	37	10	-0,7	-1,5	-0,8
#4	28	44	16	1,7	1,3	-0,4
#3	26	41	15	4,6	3,8	-0,8
#3	46	67	21	-5,4	-6,7	-1,3
#2	49	62	13	0,3	-0,2	-0,5
#4	29	43	14	0,3	-0,3	-0,6
#1	29	41	12	1	-0,1	-1,1
#4	53	62	9	4	3,7	-0,3
<b><u>Keskiarvo</u></b>			<b><u>14,3</u></b>			<b><u>-0,7</u></b>



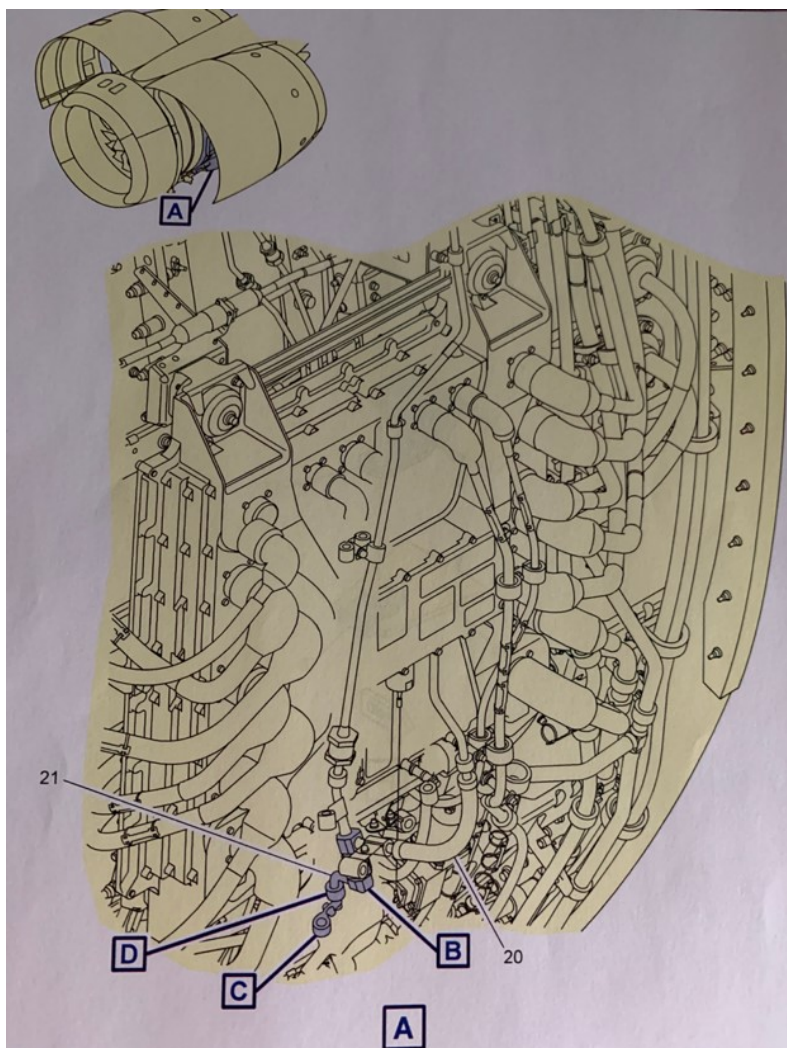
KUVIO 6. CF6-80C2-moottorin EGTM-analyysi (Lufthansa Technik (a) 2019, muokattu)

## 7.2 Cycleanin huolto-ohjeiden erot nykyiseen järjestelmään

Cycleanin pesuohjeessa (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250B-A) Trent XWB-moottorille IP- (Intermediate Pressure) ja HP- (High Pressure) ahtimille suoritettu pesutapahtuma kestää yhtä kauan kuin nykyisellä menetelmällä. Pesu tapahtuu kolmessa vaiheessa, joista kukin koostuu veden suihkutuksesta 120 sekunnin

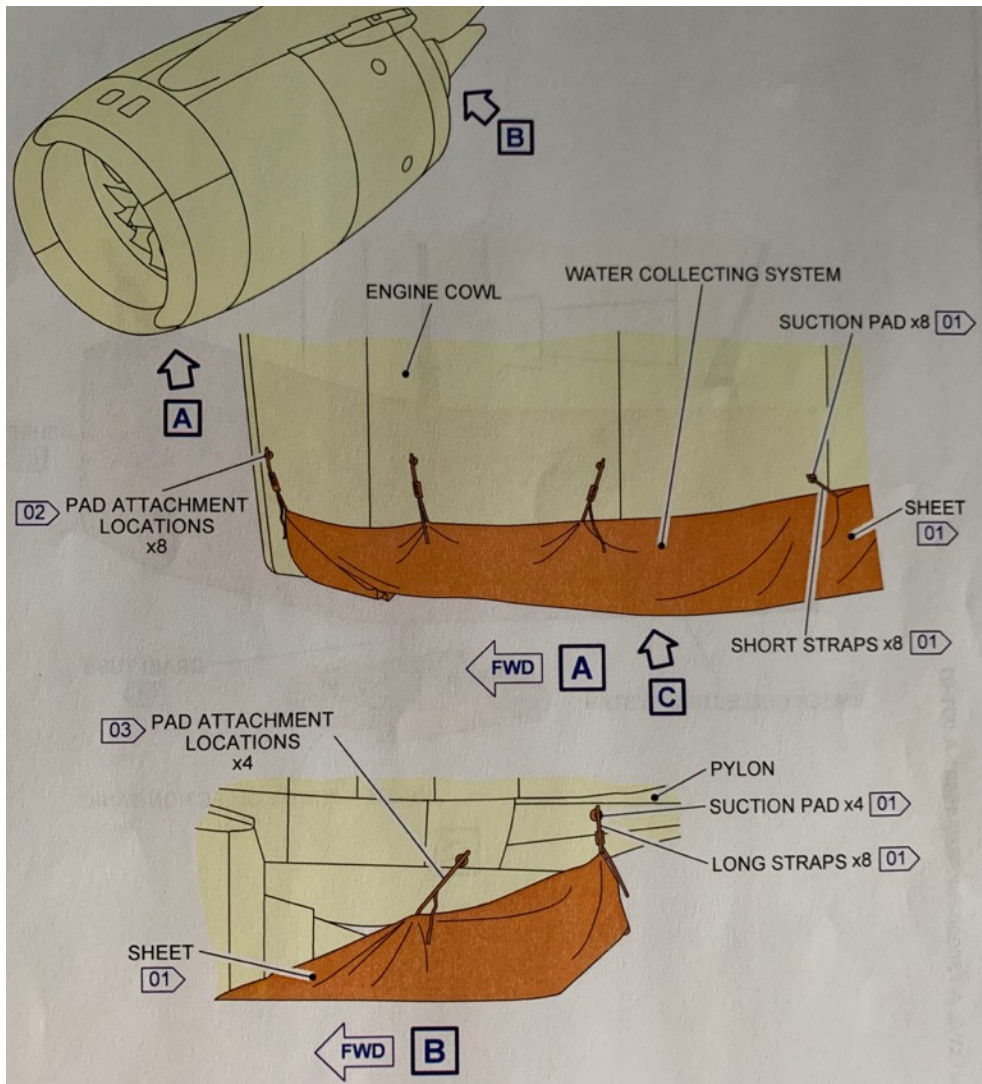
ajan ja 10 minuutin odotuksesta ennen seuraavaa vaihetta. Ohjeen mukainen pesutapahtuma kestää kokonaisuudessaan 26 minuuttia. Veden lämpötila on ohjeen mukaan 70 °C kuten nykyisessä EcoPower-pesussakin. Molempien ohjeiden mukaan odotetaan ennen koekäyttöä 30 minuuttia, jotta käynnistysmoottori jäähtyy.

Suurin toiminnallinen ero EcoPoweriin nähden Cyclecleanin ohjeessa on P30-ilmalinjan suojaaminen. Cyclecleanilla pestäessä P30-linjaa ei tarvitse irrottaa kokonaan, vaihtoehtoisesti Cyclecleanilla pestäessä voidaan sensijaan irrottaa P30-linjassa oleva vesiloukku, joka on numeroitu kuvaan 16 numerolla 21 ja moottorin reverssilohkoa ei tarvitse aukaista vaan riittää, että aukaisee moottori-nacellin.

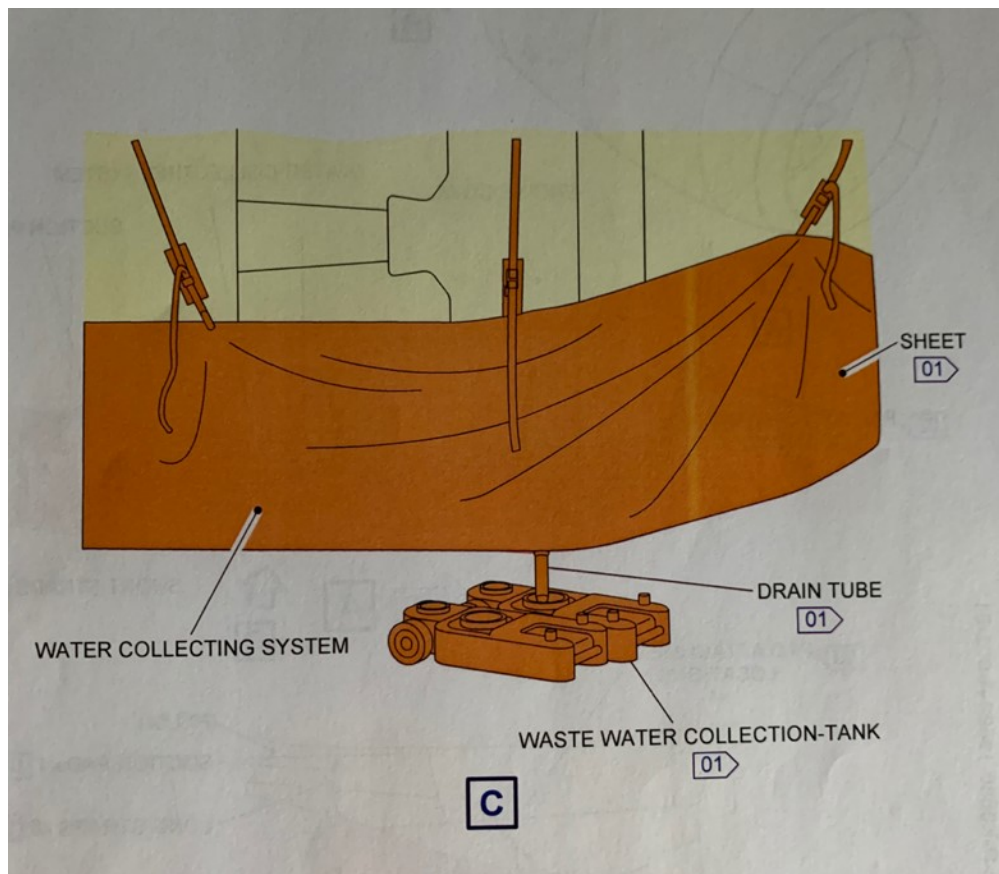


KUVA 16. P30-ilmalinjan vesiloukku (21) (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250B-A)

Toinen merkittävä ero laitteiden välillä on veden keräämistapa. EcoPowerilla pesäessä käytetään suodatinyksikköä, joka asetetaan moottorin taakse. Cycleanilla moottoriin kiinnitetään suoja (sheet) (kuva 17), joka kiinnittyy moottorin takaosaan (pylon) niin, että vesi saadaan ohjattua keräysastiaan (waste water collection-tank) (kuva 18). (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250B-A.)

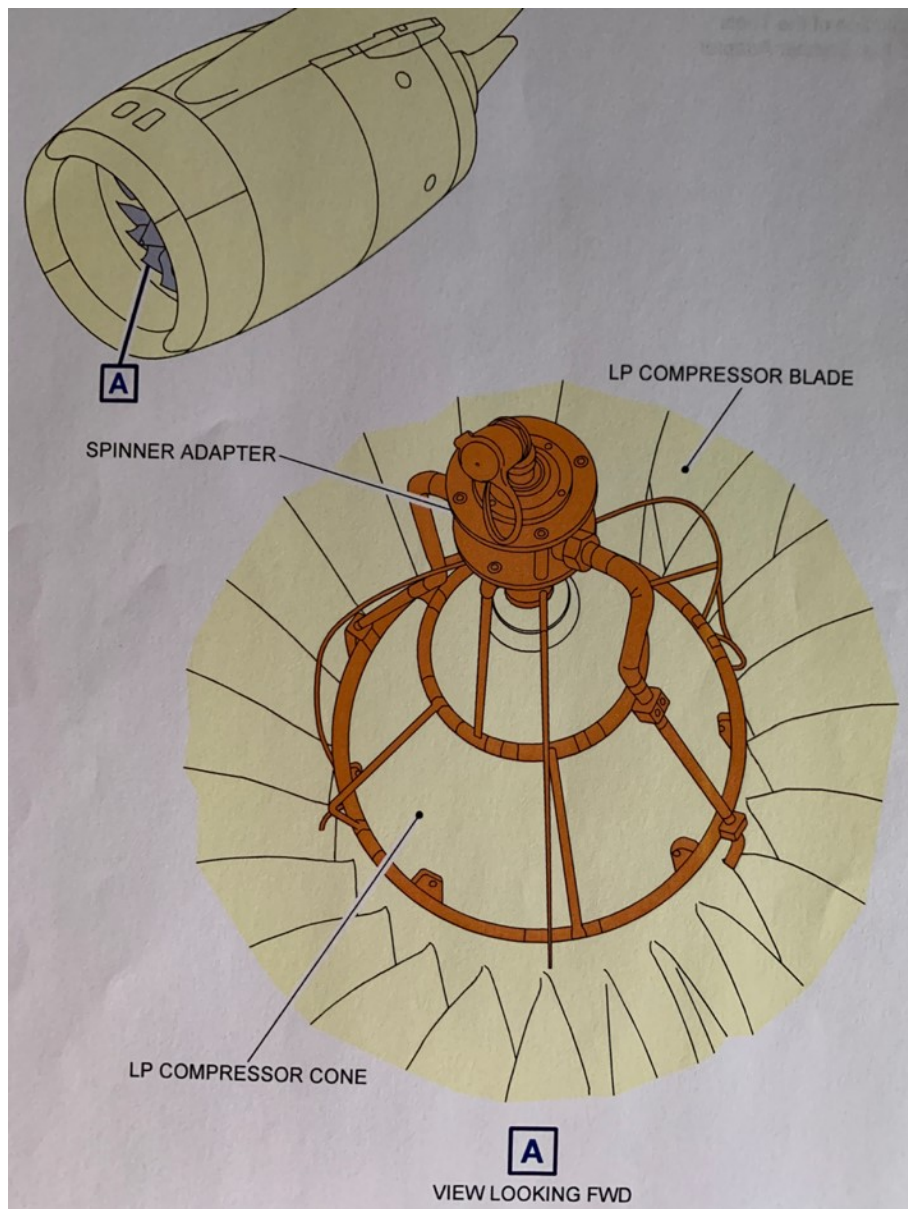


KUVA 17. Suojamuovi ja sen kiinnitys Cyclean-pesussa (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250B-A)



KUVA 18. Jäteveden keräysastia (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250B-A)

Itse pesuun käytettävä suutin (spinner adapter) kiinnitetään Cycleanilla suoraan moottorin spinneriin (LP compressor cone) kiinni (kuva 19) ja vesi ohjataan puhaltimen siipien (LP compressor blade) ohitse ahtimelle, kun taas EcoPowerilla suutinjärjestelmä on kiinni imuaukossa ja suihkuttaa vettä puhaltimen siipien etupuolelta.



KUVA 19. Spinneriin kiinnitettävä suutin järjestelmä (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250B-A)

### 7.3 Cyclean-pesun käytännön erot nykyiseen moottoripesujärjestelmään verrattuna

Tällä hetkellä Finnairilla käytettävän moottoripesujärjestelmän EcoPowerin lentokoneelta vaaditaan maa-aikaa vähintään kuusi tuntia ja lisäksi pestävä lentokone on hinattava huoltohalliin. Cycleanilla pesuja suoritetaan ympäri maailmaa ulkona asematasolla ja Helsinki-Vantaan lentoasemalla tämä voisi olla myös mahdollista tietyin reunaehdoin tuulennopeus ei saa ylittää 12 solmua ja kun ulkoilman lämpötila on alle 5 °C, veteen on sekoitettava jäänestöainetta (TASK A350-A-71-XX-

XX-02001-250B-A). Jäänestoaainetta yritetään kuitenkin usein välttää ja pesut pyritään suorittamaan yli 5 °C:een lämpötilassa jäänestoon käytettävistä lisäaineista aiheutuvista haitoista johtuen, kuten hajuhaitasta (Katiska 2020).

Ulkona asematasolla toiminnasta vastaa Finavia-lentoasemayhtiö, joka huolehtii lentoasemien turvallisuuteen ja käyttöön liittyvistä asioista. Finavia kehittää ja ylläpitää matkustustermiinaaleja ja lentoliikenteen tarvitsemää infrastruktuuria. (Finavia (b) 2020.) Finavian kanta moottorin pesemiseen jätevesien osalta on, että lentokoneen moottorin pesemiseen pätevät yleiset määräykset eli Vantaan kaupungin ympäristönsuojelumääräykset. (Kauppila 2020.)

Ajoneuvojen, veneiden, koneiden ja vastaavien laitteiden pesussa on noudatettava seuraavia säännöksiä: Pesuvedet on johdettava jätevesiviemäriin hiekan- ja öljynerotuskaivon kautta, mikäli 1. pesussa käytetään hiilivetyliuotinta sisältäviä pesuaineita tai 2. pesu on ammattimaista tai siihen verrattavaa usein toistuvaa. Pesussa syntyviä jätevesiä ei saa johtaa puhdistamattomina suoraan vesistöön. Ajoneuvojen, koneiden ja laitteiden pesu ja huolto on kielletty katu- tai tiealueella ja muilla yleisessä käytössä olevilla alueilla. (Vantaan kaupungin ympäristönsuojelumääräykset 1.3.2013/ 7§.)

Lakiin viitaten moottorin pesua pidetään ammattimaisena tai useasti toistuvana, joten pesusta syntyvä jätevesi on suodatettava ennen sen laskemista jätevesiviemäriin. Tätä varten Finnairin olisi järjestettävä vesien keräyspiste, jossa joko suodatetaan jätevesi tai toimitetaan se suodatettavaksi moottoripesun jälkeen, koska Cycleanissa ei ole erillistä veden suodatus- ja takaisinkierätyjärjestelmää.

Finavia on tutkinut moottoripesussa syntyvien pesuvesien epäpuhtauspitoisuuksien määrää (Ahma ympäristö Oy 2017) ja taulukosta 3 nähdään pesuveden arvojen muuttuminen pesuvaiheen alkupuolelta sen loppupuolelle. Taulukossa on esitetty ne moottorin pesuveden alkuaineet, jotka ovat muuttuneet merkittävimmin, pesuveden PH-arvo sekä PAH-yhdisteiden summa. PAH-yhdisteet ovat polttoaineen epätäydellisessä palamisessa syntyneitä polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä. PAH-yhdisteitä pääsee ilmaan kaikessa orgaanisen aineen palamisessa, esimerkiksi puun polttamisessa. (Ilmatieteen laitos n.d..) Tarkemmat pesuveden PAH-yhdistelmien jaotelmät ja useammat alkuainearvot löytyvät liitteestä 2 (Ahma ympäristö Oy 2017).

TAULUKKO 3. Moottoripesun pesuveden näytteenottotulokset (Ahma ympäristö Oy 2017, liite 2)

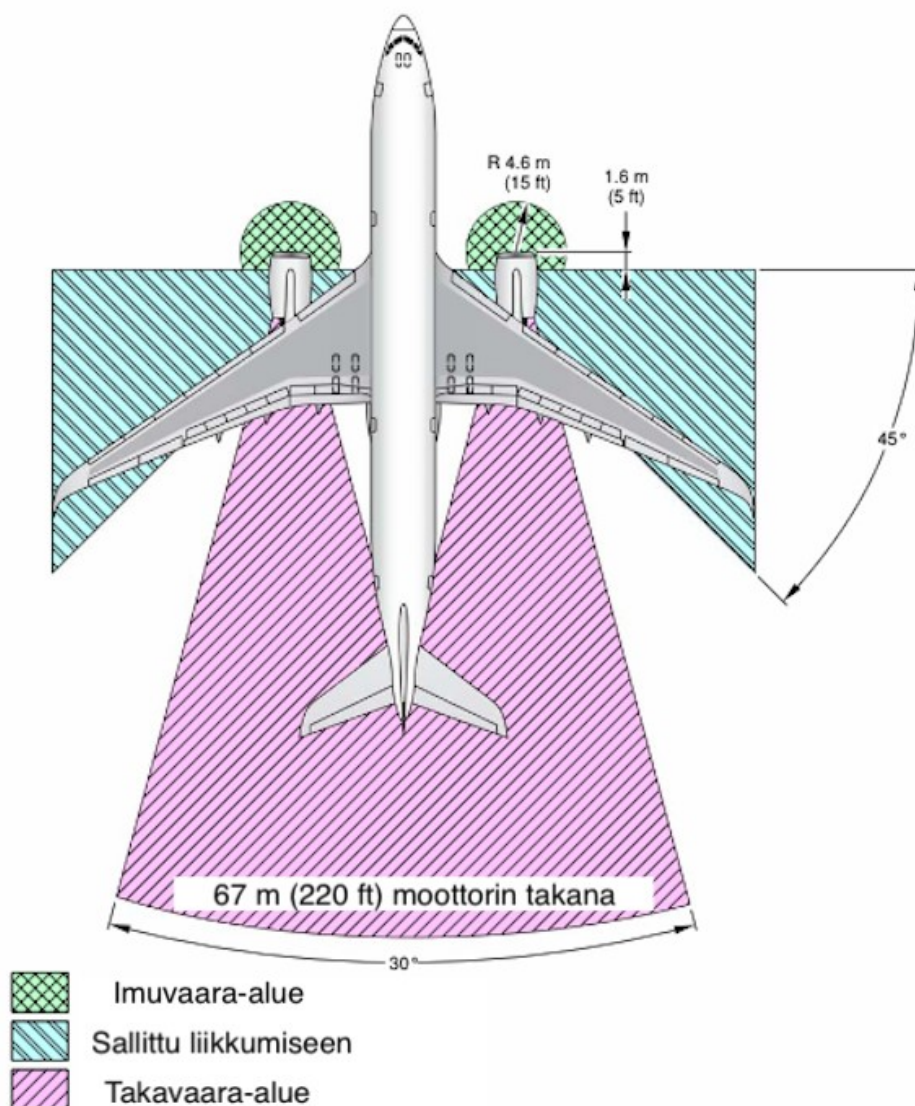
Tunnus	Yksikkö	1. Pesu	Toleranssi	2. Pesu	Toleranssi
pH		6,67	± 0,2 pH	5,86	± 0,2 pH
Alumiini, Al	mg/l	0,47	± 16 %	3,35	± 10 %
Koboltti, $C_O$	mg/l	0,097	± 15 %	2,84	± 10 %
Kalsium, $C_A$	mg/l	3,51	± 15 %	34,2	± 10 %
Kromi, Cr	mg/l	0,11	± 15 %	1,34	± 10 %
Rauta, Fe	mg/l	0,29	± 13 %	1,96	± 13 %
Mangaani, Mn	mg/l	0,031	± 25 %	0,45	± 8 %
Nikkeli, Ni	mg/l	0,49	± 10 %	14,3	± 10 %
Rikki, S	mg/l	9,72	± 15 %	101	± 10 %
Titaani, Ti	mg/l	0,092	± 15 %	0,62	± 15 %
Lyijy, Pb	mg/l	0,027	± 25 %	0,054	± 25 %
PAH Summa	µg/l	0,063	± 30 %	0,69	± 30 %

Cyclean-pesussa käytetään Lufthansa Technikin mukaan vain 40–120 litraa vettä pesukertaa kohden, koska pesusuutinjärjestelmä on kiinnitetty suoraan moottorin spinneriin ja näin saadaan vesi suihkutettua suoraan päämoottoriin puhallinsii-pien ohitse, jolloin vesisuihkusta suurin osa saataisiin tuotettua primäärivirtauk-sena. Tästä syystä Cycleanin kanssa ei tarvitse käyttää erikseen liikuteltavaa isoa suodatinyksikköä vaan pienempi jätevesisäiliö, johon pesun aikana käytet- tävä vesi kerätään, riittää. (Katiska 2020).

Moottoriin pakoaukon taakse kiinnitetään imukupeilla suoja, jota pitkin vesi ote- taan talteen jätevesisäiliöön (TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250A-A). Luft- hansa Technikin mukaan moottorin pesuun menee usealla moottorimallilla alle tunti aikaa ja moottorit voidaan pestä ulkona (Lufthansa Technik (b) 2020). Tämä on suurin ero tämänhetkiseen moottoripesuun Finnairilla. Cycleania käyttämällä olisi mahdollista suunnitella moottorin pesu tehtäväksi lentokoneen käynnön ai- kana, jolloin konetta ei tarvitsisi hinata asematason seisontapaikalta halliin ja pe- suun varattua aikaa voitaisiin merkittävästi lyhentää. Tämän avulla voisi myös pesukertoja mahdollisesti lisätä samalle aikavälille, jos tähän nähdään tarvetta.

Ulkona oltaessa voitaisiin käyttää lentokoneen omaa APU:a ja työ sitoisi tällöin vain kaksi mekaanikkoa kolmen sijasta.

Moottoria pestäessä moottoria pyöritetään käynnistinmoottoria käyttäen, mutta moottorin kierrokset nousevat vain noin 20 %. Airbusin manuaali ei anna moottorille erillisiä turvarajoja, kun sitä pyöritetään vain käynnistinmoottorilla, mutta moottoria pestäessä voitaisiin käyttää turvarajoja koekäyttöalueita joutokäynnillä (kuva 20), koska moottori on koekäytettävä pesun jälkeen. (Airbus 2019; TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250A-A.)



KUVA 20. Vaara-alueet joutokäyntiteholla (Airbus 2019, muokattu)

## 7.4 HAECO:n kokemukset Cyclean-moottorinpesulaitteesta

HAECO on Hong Kongin kansainvälisellä lentoasemalla sijaitseva yksi maailman suurimmista lentokoneiden huolto- ja korjausyrityksistä. HAECO on perustettu vuonna 1950 ja se omistaa 16 toimipistettä ympäri maailmaa. (HAECO 2020.) HAECO tekee joitain huoltoja myös Finnairin lentokoneille.

Yksi niistä toimipisteistä, joissa on mahdollista käyttää Cycleania moottorin pesemiseen, on Hong Kongissa sijaitseva HAECO. Finnairin Airbus A350 lentää Hong Kongiin ja siellä suoritetaan usein myös Finnairin lentokoneiden moottorinpesuja. Hong Kongiin lennettäessä lentokoneen maa-aika on usein niin pitkä, että siinä ajassa saa myös moottorin pesun ja tätä mahdollisuutta Finnair on hyödyntänyt.

Tässä työssä tiedusteltiin HAECO:n käyttökokemuksia Cycleanista Rolls-Royce Trent XWB-moottorille, jotta laitteen käytöstä saatiin käytännön kokemukseen perustuvaa tietoa, eivätkä tämän tutkimuksen johtopäätökset tulisi perustumaan vain palveluntuottajan omiin subjektiivisiin tuloksiin. HAECO:n kokeumuksen mukaan yhden moottorin pesuun kuluu 4,5 tuntia, mikä pitää sisällään starttimoottorin jäähtymisen ja koekäytön. Miestyötunteja käytetään yhden moottorin pesuun 12,5 tuntia. (Sh Cheung 2020.)

Työssä tutkittiin ja verrattiin käytetyn pesuveden määrää ja olisiko pesu mahdollista tuottaa asematasolla. HAECO:n käyttökokemuksien mukaan yhden RR Trent XWB-moottorin pesussa kertyy 70 litraa jätevettä (Sh Cheung 2020), joka täsmää myös Lufthansa Technikin luvattuihin arvoihin (Katiska 2020). HAECO suorittaa moottorin pesuja asematasolla myös lentokoneen seisontapaikoilla, mikä tarkoittaa, ettei lentokonetta käytännössä tarvitsisi hinata mihinkään. (Sh Cheung 2020.)

## 8 TULOKSET

Tällä hetkellä käytössä olevalla moottorinpesulaitteella eli EcoPowerilla lentokoneen moottorin pesemiseen kuluu aikaa Finnairilla noin viisi tuntia. Moottorin pesua varten on suunniteltu molemmille tärkeimmille käytössä oleville ja tässä työssä tarkastelluille moottorimalleille CF6-80E1 ja Trent XWB84 kuuden tunnin hallihuolto, jolloin lentokone on hinattava sisätiloihin ja moottoripesun jälkeen koekäyttöön. Moottorin pesun vaikutukset lentokoneen polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästömäärän laskettiin teoreettisesti ICAO-standardin mukaisilla polttoaineenkulutustiedoilla. Pesu suoritetaan 300 lentosyklin välein ja pesusta seuraa Finnairin sisäisen tutkimuksen (2019) esimerkissä keskimäärin 3,3 °C:een parannus TGT-marginaaliin sekä polttoainekulutuksen pienentyminen matkalentotehoilla 23,5 kiloa tunnissa. Tämä polttoainemäärä vastaa matkalentotehoilla hiilidioksidipäästöjen vähenemisen noin 72,85 kiloa tunnissa.

Mahdollisen uuden moottoripesujärjestelmän Cycleanin ja EcoPowerin huolto-ohjeita ja lähdetietoja vertailemalla selvitettiin, että Cycleanin käyttö lyhentäisi moottorinpesuun kuluvaan aikaan. Lisäksi moottorin pesu olisi mahdollista suorittaa ulkona asematasolla sen sijaan, että lentokone siirrettäisiin sisähalliin sitä varten, ja tämä mahdollistaisi moottorin pesun useammin tiheämmällä lentosyklikerrolla, jolloin olisi mahdollista saada entistä parempia tuloksia TGT-marginaaliin ja polttoaineenkulutukseen. Moottorin pesussa syntyvä jäteveden määrä olisi Cycleanilla nykyistä 60% pienempi, mutta jätevedelle olisi järjestettävä suodatus ennen sen laskemista jätevesiviemäriin. Cycleania käyttäen moottorinpesu voitaisiin tehdä vain kahden mekaanikon toimesta, jolloin pesussa säästettäisiin yhden mekaanikon kuuden tunnin työ määrää. Lufthansa Technikin tuottaman testin perusteella Cycleanilla tehty pesu parantaa moottorin EGT-marginaalia keskimäärin 14,3 °C ja lentokoneen polttoaineenkulutus pienenee keskimäärin 0,7 %.

HAECO:n käytännön kokemuksen perusteella Lufthansa Technikin antama 60 minuutin pesuaika ei pidä paikkansa vaan moottorin pesuun meni 4,5 tuntia kun mukaan luetaan pakollinen käynnistinmoottorin jäähdytys sekä koekäyttö. Miestyötunteja HAECOlla kertyy yhden moottorin pesussa noin 12,5 tuntia. Tämä on

noin 5,5 tuntia vähemmän mitä tässä tutkimuksessa käytettiin EcoPowerilla pestäessä. HAECO:n kokemukset todistivat pesun olevan mahdollista asematasolla lentokoneen seisontapaikalla mutta itse pesutapahtumaan kulutettava aika Haecolla ei vähentynyt niin paljon kuin palveluntarjoaja lupaa. Vedenkulutus on HAECO:n mukaan vähäistä ja jätevettä kertyy Trent XWB-moottoria pestäessä 70 litraa.

Kun verrattiin palveluntarjoajan ja Finnairin pesututkimusten tuloksia, päästiin moottorin suorituskykyarvoissa lähes samaan tulokseen Cyclean-pestulla. Jotta voitaisiin saada puolueeton tulos, tulisi pesumenetelmän vaihtamisen vaikutuksia tutkia paremmin. Tuloksista voidaan päätellä, että Cycleania käyttämällä pesutapahtuma helpottuisi käytännössä. Asematasolla tehtävä pesu olisi Cycleanilla mahdollista ja sen myötä olisi mahdollista tehdä useampi pesu vuodessa moottorikohtaisesti. Cycleanilla pestessä vähennettäisiin miestyötunteja ja käytettyä aikaa varsinkin, jos lentokonetta ei tarvitsisi hinata pesun takia. Tämä kuitenkin pätee vain ulkolämpötilan ollessa yli 5 °C ja tuulennopeuden ollessa alle 12 solmua.

Työn tuloksena suositellaan EcoPowerin korvaamista Cyclean-moottorinpesujärjestelmällä. Cyclean toisi Finnairille joustavuutta moottorinpesuun, vähentäisi miestyötunteja ja pesuun käytettyä aikaa. Ennen hankintapäätöstä tulisi kuitenkin tutkia moottorikohtaisia tarkkoja suoritusarvoja ja niiden vaihteluväliä, esimerkiksi vuodenajasta riippuvaa tulosta, eri moottorinpesujärjestelmillä laajemmalla otannalla, jotta merkittävä investointipäätös voitaisiin tehdä riittävän luotettavien ja laajojen tietojen pohjalta.

## 9 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä oli tavoitteena tehdä kattava tutkimus kahdesta eri lentokone moottoripesujärjestelmästä ja luoda tältä pohjalta parannusehdotus Finnairin nykyiselle pesujärjestelmälle. Tutkimuksessa keskityttiin kahden pesulaitteen vertailuun ja tarkoituksena oli tutkia molempien laitteiden käyttöä ja kuinka ne eroavat toisistaan. Tutkimuksen pohjalta voitiin luoda ehdotus uudesta moottoripesujärjestelmästä. Työn tuloksena voidaan todeta Cyclean-järjestelmän tuovan parannuksia pesutoimintaan, kuten moottorin pesuun kuluvaan aikaan ja pesujärjestelmän käytettävyyteen.

Opinnäytetyössä vertailtiin pesulaitteiden vaikutusta moottorin suoritusarvoihin lähdetietojen perusteella ja niistä saatua tulosta voidaan pitää suuntaa-antavana, mutta lähdetutkimusten vähäisten otantamäärien vuoksi tutkimustietoa ei voida pitää täysin luotettavana. Tarkoituksenmukaisia tarkkoja polttoaineenkulutusta sekä TGT- ja EGT-arvoja varten olisi tutkimustuloksia moottorin suoritusarvoista kerättävä suurempi määrä. Tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan ollut tarkoituksena tuottaa tarkkaa dataa polttoaineenkulutuksesta tai moottorin lämpötiloista, mutta niihin perustuen lisätutkimuksesta voisi olla hyötyä, kun kartoitetaan optimaalista pesukertojen määrää ja pesukierron pituutta. Polttoaineenkulutuksen laskemiseen on käytetty ICAO:n laskuria, joka on lähteenä erittäin luotettava ja tähän tietoon nojaten päästöt ja kulutus on mahdollista laskea yleisellä tasolla tarkastikin. Polttoaineenkulutus ja siitä johtuvat päästöt riippuvat kuitenkin hyvin paljon muuttuvista tekijöistä kuten lentokoneen massasta eli rahdin tai matkustajien määrästä sekä tuulen voimakkuudesta ja suunnasta. Tästä syystä jokaista lentoa ja lentoreittiä varten on suoritettava erilliset laskelmat, joista saadaan moottorikohtaiset tarkat polttoaineenkulutukset.

Opinnäytetyössä oli alun perin tarkoituksena tehdä Cycleanista tätä kattavampi tutkimus, jossa olisi toteutettu käytännössä Trent XWB -moottorin pesu mutta työn tekoaikaan vaikuttaneen koronaviruspandemian aiheuttamien matkustusrajoitusten ja lomautusten takia tämä käytännön osuus tutkimusta oli siirrettävä tulevaisuuteen. HAECO:n Cycleanin käyttötuloksista voidaan luoda hyviä vertailuar-

voja tuota tulevaa käytännön tutkimusta varten. Tällä tutkimusmenetelmällä tuloksien määrää voitaisiin kasvattaa ja se mahdollistaisi kattavamman kuvan saamisen laitteiston käyttömahdollisuuksista Finnairilla. Tässä opinnäytetyössä käytössä olleisiin lähdetietoihin sekä huolto-ohjeisiin perustuvalla vertailulla saatiin kuitenkin tehtyä riittävän kattava selvitys, jotta parannusehdotuksen luotettavuus voidaan todeta riittäväksi ja Finnair voi tehdä selvityksen tarvittavista lisätiedoista.

## LÄHTEET

Ackert, S. 2015. Engine maintenance management. [http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/engine\\_mx\\_management\\_madrid\\_may-12\\_2015.pdf](http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/engine_mx_management_madrid_may-12_2015.pdf) Haettu: 21.4.2020.

Ahma ympäristö Oy. 2017. Testausseleste.

Airbus. 2019. A350 Aircraft characteristics airport and maintenance planning.

Baskharone, A. 2006. Principles of turbomachinery in air-breathing engines. Ensimmäinen painos. Cambridge University Press.

COSMOS. 2017. How does a jet engine work?. <https://cosmosmagazine.com/technology/how-does-a-jet-engine-work> Haettu: 20.4.2020.

EcoPower. 2020. Company page. <http://www.ecopowerenginewash.com/index.php> Haettu: 1.4.2020.

El-Sayed, A. 2008. Aircraft propulsion and gas turbine engines. Ensimmäinen painos. Boca Raton: CRC press.

Eurocontrol. 2016. Method for estimating aviation fuel burnt and emissions in the framework of the EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-03/emep-eea-air-pollution-emission-inventory-method-v1.0.pdf> Haettu: 4.4.2020.

Ferrero, K. 2011. KC-135, C-5 engine water-wash test could reveal fuel savings. <http://rpdefense.over-blog.com/article-kc-135-c-5-engine-water-wash-test-could-reveal-fuel-savings-83702959.html> Haettu: 21.4.2020.

Finavia (a). 2020. lentoliikenne ja ilmasto. <https://www.finavia.fi/fi/lentoliikenne-ja-ilmasto> Haettu: 4.4.2020.

Finavia (b). 2020. Tietoa Finaviasta. <https://www.finavia.fi/fi/tietoa-finaviasta/finavia-yrityksena/visio-ja-strategia> Haettu: 10.4.2020.

Finnair (a). 2019. Yrityksen historia. <https://company.finnair.com/fi/finnair-yrityksena/historia> Haettu: 4.12.2019.

Finnair (b). 2019. Finnairin laivasto. <https://www.finnair.com/fi/fi/flights/fleet> Haettu: 4.12.2019.

Finnair (c). 2019. Tietoa Finnairista. <https://www.finnair.com/fi/fi/a350> Haettu: 4.12.2019.

Finnairin sisäinen tutkimus. 2019. Trent XWB gas path cleaning methods comparison.

Finnish national agency for education. 2020. Suihkumoottorit. <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/suihkumoottorit/kaynnistysjarjestelma.html> Haettu: 1.4.2020.

GE aviation. 2020. CFM6. <https://www.geaviation.com/commercial/engines/cf6-engine> Haettu: 1.4.2020.

General Electric Company. 2008. Model CF6-80C2. <https://web.archive.org/web/20081121124612/http://www.geaviation.com/engines/commercial/cf6/cf6-80c2.html> Haettu: 9.4.2020.

HAECO. 2020. <https://www.haeco.com/en/About-HAECO/About-Us> Haettu: 18.4.2020.

Hoffren, J., Laine, S. & Renk, L. 2006. Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka. 1. painos. Helsinki. WSOY Oppimateriaalit Oy.

ICAO. 2016. Carbon Emissions Calculator. <https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx> Haettu: 4.4.2020.

Ilmatieteen laitos. n.d. PAH-yhdisteet. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/pah-yhdisteet> Haettu: 10.4.2020.

Jacdec. 2019. Airline safety ranking. [https://www.jacdec.de/Order/2019\\_JACDEC\\_AIRLINE\\_RISK\\_RANKING-fx1\\_ENG.pdf](https://www.jacdec.de/Order/2019_JACDEC_AIRLINE_RISK_RANKING-fx1_ENG.pdf) Haettu: 4.12.2019.

Jokinen, J. & Koivisto, R. 2008. Suihkumoottorit. 2. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

Katiska, R. Powerplant engineer Finnair Technical Services Oy. 2020. LHT water based cyclean. Sähköpostiviesti. Luettu: 17.1.2020.

Kauppila, E. Vesienhallintapäällikkö Finavia Oyj. 2020. A350 moottorin pesu. Sähköpostiviesti. Luettu: 9.4.2020.

Kroes, M. & Wild, T. 1995. Aircraft powerplants. 7. painos. Columbus: Orion Place.

LuftfahrtMagazin. n.d. 40.000 Cyclean®- Triebwerkswäschen – auch für GP7200 des A380 <https://www.luftfahrtmagazin.de/technik/triebwerke/40-000-cyclean-triebwerkswaeschen-auch-fuer-gp7200-des-a380-190303.html> Haettu: 9.4.2020.

Lufthansa Technik (a). 2019. Cyclean engine wash effects. FRA T/EM24 document.

Lufthansa Technik (b). 2018. Cyclean engine wash. [https://www.lufthansa-technik.com/documents/100446/101433/Datasheet\\_Cyclean\\_Engine\\_Wash.pdf/dff6e369-aac8-4387-96b9-ae5bcf7d7f19](https://www.lufthansa-technik.com/documents/100446/101433/Datasheet_Cyclean_Engine_Wash.pdf/dff6e369-aac8-4387-96b9-ae5bcf7d7f19) Haettu: 9.4.2020.

Niemistö, J., Nissinen, A. Soimakallio, S. & Salo, M. 2019. Lentomatkustuksen päästöt – mistä lentoliikenteen päästöt syntyvät ja miten niitä voidaan vähentää?. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja 2 / 2019*.[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/292417/SYKEra\\_2\\_2019.pdf?sequence=6](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/292417/SYKEra_2_2019.pdf?sequence=6) Haettu: 4.4.2020.

Opetushallitus. n.d. <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/suihkumoottorit/fadec.html> Haettu: 14.5.2020.

Power engineering international. 2008. Compressor washing keeps gas turbines running like new. <https://www.powerengineeringint.com/coal-fired/equipment-coal-fired/compressor-washing-keeps-gas-turbines-running-like-new/> Haettu: 14.5.2020.

Rolls-Royce. 2018- Notice to operators No.:081.

Rolls-Royce. 2019. Rolls-Royce delivers 100th Trent XWB engine from Dahlenitz, Germany. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2019/07-03-2019-rr-delivers-hundredth-trent-xwb-engine-from-dahlenitz-germany.aspx> Haettu: 2.4.2020.

Rolls-Royce Trent XWB. 2018. <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/civil-aerospace-downloads/trent-xwb-informational.pdf> Haettu: 2.4.2020.

Royal aeronautical society. 2017. <http://www.loughborough-raes.org.uk/ewExternalFiles/170314%20Trent%20XWB-84-2.pdf> Haettu: 14.5.2020.

SenterNovem. 2004. The Netherlands: list of fuels and standard CO2 emission factors. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/10/Vreuls%202005%20NL%20Energiedragerlijst%20-%20Update.pdf> Haettu: 4.4.2020.

Sh Cheung, H. Aircraft maintenance controller. 2020. Cycle wash research. Sähköpostiviesti. Luettu: 18.4.2020.

Siivet. 2019. Finnairin Airbus A350 laajarunkomatjakone koukkii Turun lentonäytöksessä. <https://siivet.fi/ajankohtaista/finnairin-airbus-a350-laajarunkomatjakone-koukkii-turun-lentonaytoksessa/> Haettu: 2.4.2020.

SITRA. 2019. Keskivertosuomalaisen hiilijalanjälki. <https://www.sitra.fi/artikkelit/keskivertosuomalaisen-hiilijalanjalki/> Haettu: 4.4.2020.

TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250A-A. 2020. Airbus maintenance procedure.

TASK A350-A-71-XX-XX-02001-250B-A. 2020. Airbus maintenance procedure.

TASK 72–00–00–160–807 F. 2020. Finnair maintenance instruction A330.

Vantaan kaupungin ympäristösuojelumääräykset 1.3.2013/ 7§.

LIITTEET

Liite 1. Rolls-Royce notice to operators

1(3)

**NOTICE TO OPERATORS  
TRENT ENGINES  
NTO No.:081**



**Rolls-Royce**

**Issue No.:006 Date:25-09-18**

**TITLE: Engine Washing**

**Valid until: Indefinite**

**ATA Area: 72-00-00**

**EFFECTIVITY: Trent engines All marks**

**Reason for Issue**

Issue 6: To include Trent 7000 effectivity

**Purpose**

Evidence shows that the build-up of dirt and residue in the core compressor causes an increase in engine work load, Turbine Gas Temperature (TGT) and Specific Fuel Consumption (SFC). Engine Health Monitoring data and Test data shows that carrying out core compressor washing will increase take-off TGT margin and improve SFC. Table 1 shows the range of benefits for take-off TGT margin, cruise SFC and take-off HP shaft speed margin for Trent 500, Trent 700 and Trent 800. The data presented is based on in-service data, which covers a range of wash intervals.

Trent 900, Trent 1000, Trent XWB and Trent 7000 benefits will be at similar levels.

Across the Trent fleets, the benefit to TGT margin is up to 8°C (average is 6°C). The cruise fuel flow benefit is up to 0.8% (average is 0.3%). The N3 margin benefit is up to 0.6% (average is 0.3%). The benefits tend to be greater for frequent operation from airports where there is greater exposure to industrialisation or higher levels of natural contaminants, for example, sand.

**Page 1 of 3**

© 2018 Rolls-Royce plc

The information in this document is the property of Rolls-Royce plc and may not be copied, or communicated to a third party, or used, for any purpose other than that for which it is supplied without the express consent of Rolls-Royce plc. ( This does not preclude use by engine and aircraft operators for normal instructional maintenance or overhaul purposes ).

WI MS 6.2-8 (CL) Appendix 3 Issue 1

**NOTICE TO OPERATORS**  
**TRENT ENGINES**  
**NTO No.:081**  
**Issue No.:006 Date:25-09-18**



**Rolls-Royce**

**Aircraft Maintenance Manual References**

- A. A340-500/-600 (Trent 500)  
72-00-00-100-811-A, -812-A, -813-A, -814-A
- B. A330 (Trent 700)  
72-00-00-100-818-A, -819-A, -820-A, -821-A, -822-A, -823-A, -824-A, -825-A, -826-A, -827-A
- C. B777 (Trent 800)  
72-00-00-100-804-R00, -805-R00, -808-R00, -809-R00
- D. A380 (Trent 900)  
72-00-00-100-801-A, 802-A, -803-A, -804-A, 806-A, 807-A, 808-A, 809-A
- E. B787 (Trent 1000)  
72-00-00- 18A-258A-A, 19B-258A-A, 19C-258A-A, 29A-258A-A
- F. A350XWB (Trent XWB)  
A350-A-71-XX-XX-03001-250A-A, 02001-250A-A, 02001-250B-A
- G. A330neo (Trent 7000)  
72-00-00-100-840-A, 72-00-00-100-844-A, 72-35-34-100-801-A

**Action**

**- To minimise fuel consumption:**

Rolls-Royce recommends that core washing and cleaning of the fan is regularly carried out at a convenient opportunity. The optimum washing interval will vary based on each operator's stage length, fuel price, maintenance costs and scheduling, but analysis suggests that engine performance benefits are generally optimised with intervals at approximately **300 flight cycles**.

Rolls-Royce can help operators design an optimised wash programme tailored for their fleets. Operators are invited to contact their Rolls-Royce Field Service Representative or Customer Services Manager for advice on designing an engine washing strategy.

**- To maximise TGT margin:**

If washing is not already regularly carried out and TGT margin is trending at or below 5°C, it is recommended that core washing and cleaning of the fan is carried out at least twice: once at the next convenient opportunity, then once again 300 cycles later or when TGT margin is trending at zero (whichever occurs first).

**To maximise N3 Speed margin:**

If washing is not already regularly carried out and N3 speed margin is trending at 0%, it is recommended that core washing and cleaning of the fan is carried out.

# NOTICE TO OPERATORS TRENT ENGINES



# Rolls-Royce

## NTO No.:081

Issue No.:006 Date:25-09-18

### Notes:

- Cleaning of the fan OGV and bypass duct is not recommended and should only be carried out if visual inspection shows significant dirt build-up in these two areas. The majority of the benefit comes from the core and fan blade wash.
- As part of its On-Wing Care Service, Rolls-Royce can offer engine washing tailored to any engine and aircraft configuration. Please make contact via your Rolls-Royce Field Service Representative or your Customer Services Manager.

### Tables

Table 1

Engine Type	Parameter	Expected Benefit		
		Minimum	Average	Maximum
Trent 500	Take-off TGT margin	2°C	5°C	7°C
	Take-off HP shaft speed margin	0.3%	0.3%	0.4%
	Cruise SFC	0.0%	0.3%	0.4%
Trent 700	Take-off TGT margin	3°C	6°C	8°C
	Take-off HP shaft speed margin	0.1%	0.3%	0.6%
	Cruise SFC	0.1%	0.3%	0.5%
Trent 800	Take-off TGT margin	2°C	6°C	8°C
	Take-off HP shaft speed margin	0.2%	0.3%	0.5%
	Cruise SFC	0.1%	0.4%	0.8%

## Liite 2. Ahma ympäristö Oy testausseloste moottoripesuvedestä.

1(3)



Ahma ympäristö Oy  
Teollisuustie 6  
96320 Rovaniemi

Testausseloste

1 (3)  
Raporttinumero: 055611  
30.11.2017

Saaja:	Tilauksen tiedot:
Finavia Oyj	Asiakastunnus: 1482
Ostolaskut	Tilaustunnus: R-17-07102
PL 93	Tilauksen kuvaus: Finavia, Helsinki-Vantaan lentoaseman tarkkailu, Moottoripesu 13.11.17
001531 VANTAA	

<b>Näytetunnus:</b> R-17-07102-001	<b>Kuvaus:</b> Moottoripesu 1.			
<b>Näyte otettu:</b> 13.11.2017 12:30	<b>Vastaanottopvm:</b> 15.11.2017			<b>Tutkimus aloitettu:</b> 15.11.2017 0:00:00
<b>Näytetyyppi:</b> Vesi	<b>Näytteenottaja:</b> M			
<b>N.ottoaika:</b> Moottoripesu 1., 1				
Analysit	Yksikkö	Tulos U	LOQ	Menetelmä / Laboratorio
Haju (näytteenottaja)		Hajuton		
<b>Fysikaalis-kemialliset tutkimukset</b>				
pH *		6,67 ± 0,2 pH		SFS 3021:1979 / ROI
Kemiallinen hapenkulutus, CODCr *	mg O <sub>2</sub> /l	37 ± 30%	15	ISO 15705:2002 / ROI
Biologinen hapenkulutus BOD7 / ATU *	mg O <sub>2</sub> /l	7,0 ± 30%	2,0	SFS-EN 1899-1:1998 / ROI
<b>Alkuaineanalysit</b>				
Alumiini, Al *	mg/l	0,47 ± 16%	0,03	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Arseeni, As *	mg/l	<0,015 ± 25%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Boori, B *	mg/l	0,068 ± 15%	0,02	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Barium, Ba *	mg/l	0,012 ± 25%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Beryllium, Be	mg/l	<0,005 ± 22%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kalsium, Ca *	mg/l	3,51 ± 15%	0,05	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kadmium, Cd *	mg/l	0,003 ± 24%	0,002	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Koboltti, Co *	mg/l	0,097 ± 15%	0,003	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kromi, Cr *	mg/l	0,11 ± 15%	0,01	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kupari, Cu *	mg/l	0,25 ± 9%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Rauta, Fe *	mg/l	0,29 ± 13%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kalium, K *	mg/l	6,47 ± 15%	0,5	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Magnesium, Mg *	mg/l	1,0 ± 15%	0,025	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Mangaani, Mn *	mg/l	0,031 ± 25%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Molybdeeni, Mo	mg/l	0,15 ± 10%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Natrium, Na *	mg/l	9,55 ± 12%	0,25	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Nikkeli, Ni *	mg/l	0,49 ± 10%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Fosfori, P *	mg/l	0,15 ± 20%	0,05	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Lyijy, Pb *	mg/l	0,027 ± 25%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Rikki, S *	mg/l	9,72 ± 15%	0,25	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Antimoni, Sb *	mg/l	<0,015 ± 25%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Seleen, Se *	mg/l	<0,015 ± 25%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Tina, Sn	mg/l	<0,015 ± 20%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Titaani, Ti	mg/l	0,092 ± 15%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Vanadiini, V *	mg/l	0,010 ± 25%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Sinkki, Zn *	mg/l	0,50 ± 15%	0,01	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
<b>THC</b>				
> C10-C21 öljyhilivedyt	µg/l	<50	50	Sis. men., GC/MS, ISO 9377-2:2001 / ROI
> C21-C40 öljyhilivedyt	µg/l	<50	50	Sis. men., GC/MS, ISO 9377-2:2001 / ROI
Öljyhilivetyjen kok.pitoisuus, C10-C40 *	µg/l	<50 ± 35%	50	Sis. men., GC/MS, ISO 9377-2:2001 / ROI
<b>PAH</b>				
Naftaleeni	µg/l	0,013 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Asenaftaleeni *	µg/l	<0,0050 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Asenaftaleeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Fluoreeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Fenantreeni *	µg/l	0,0058 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Antraseeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI



Ahma ympäristö Oy  
Teollisuustie 6  
96320 Rovaniemi

## Testausseloste

2 (3)  
Raporttinumero: 055611  
30.11.2017

Analyytit	Yksikkö	Tulos U	LOQ	Menetelmä / Laboratorio
Fluoranteeni *	µg/l	0,012 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Pyreeni *	µg/l	0,026 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(a)antraseeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Kryseeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(b)fluoranteeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(k)fluoranteeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(a)pyreeni *	µg/l	<0,0015 ± 35%	0,0015	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Dibentso(a,h)antraseeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(ghi)peryleeni *	µg/l	0,0064 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
PAH summa	µg/l	0,063 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
<b>Näytetunnus:</b> R-17-07102-002				
<b>Näyte otettu:</b> 13.11.2017 12:30				
<b>Näytetyyppi:</b> Vesi				
<b>N.ottoaika:</b> Moottoripesu 2., 2				
<b>Kuvaus:</b>		Moottoripesu 2.		
<b>Vastaanottopvm:</b>		15.11.2017		
<b>Näytteenottaja:</b>		M		
<b>Tutkimus aloitettu:</b> 15.11.2017 0:00:00				
Analyytit	Yksikkö	Tulos U	LOQ	Menetelmä / Laboratorio
Haju (näytteenottaja)		Lievä kemikaalin haju		
<b>Fysikaalis-kemialliset tutkimukset</b>				
pH *		5,86 ± 0,2 pH yks.		SFS 3021:1979 / ROI
Kemiallinen hapenkulutus, CODCr *	mg O2/l	50 ± 20%	15	ISO 15705:2002 / ROI
Biologinen hapenkulutus BOD7 / ATU *	mg O2/l	52 ± 20%	2,0	SFS-EN 1899-1:1998 / ROI
<b>Alkuaineanalyytit</b>				
Alumiini, Al *	mg/l	3,35 ± 10%	0,03	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Arseeni, As *	mg/l	0,021 ± 25%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Boori, B *	mg/l	0,17 ± 15%	0,02	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Barium, Ba *	mg/l	0,13 ± 17%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Beryllium, Be	mg/l	<0,005 ± 22%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kalsium, Ca *	mg/l	34,2 ± 10%	0,05	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kadmium, Cd *	mg/l	0,009 ± 24%	0,002	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Koboltti, Co *	mg/l	2,84 ± 10%	0,003	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kromi, Cr *	mg/l	1,34 ± 10%	0,01	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kupari, Cu *	mg/l	0,64 ± 9%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Rauta, Fe *	mg/l	1,96 ± 13%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Kalium, K *	mg/l	22,7 ± 10%	0,5	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Magnesium, Mg *	mg/l	8,33 ± 10%	0,025	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Mangaani, Mn *	mg/l	0,45 ± 8%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Molybdeeni, Mo	mg/l	0,76 ± 10%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Natrium, Na *	mg/l	54,9 ± 12%	0,25	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Nikkeli, Ni *	mg/l	14,3 ± 10%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Fosfori, P *	mg/l	0,61 ± 10%	0,05	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Lyijy, Pb *	mg/l	0,054 ± 25%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Rikki, S *	mg/l	101 ± 10%	0,25	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Antimoni, Sb *	mg/l	<0,015 ± 25%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Seleen, Se *	mg/l	<0,015 ± 25%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Tina, Sn	mg/l	<0,015 ± 20%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Titaani, Ti	mg/l	0,62 ± 15%	0,015	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Vanadiini, V *	mg/l	0,050 ± 15%	0,005	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
Sinkki, Zn *	mg/l	1,16 ± 11%	0,01	SFS-EN ISO 11885:2009 / OUL
<b>THC</b>				
> C10-C21 öljyhiilivedyt	µg/l	600	50	Sis. men., GC/MS, ISO 9377-2:2001 / ROI
> C21-C40 öljyhiilivedyt	µg/l	<50	50	Sis. men., GC/MS, ISO 9377-2:2001 / ROI
Öljyhiilivetyjen kok.pitoisuus, C10-C40 *	µg/l	600 ± 20%	50	Sis. men., GC/MS, ISO 9377-2:2001 / ROI

3(3)



Ahma ympäristö Oy  
Teollisuustie 6  
96320 Rovaniemi

Testausseleoste

3 (3)  
Raporttinumero: 055611  
30.11.2017

Analysit	Yksikkö	Tulos U	LOQ	Menetelmä / Laboratorio
<b>PAH</b>				
Naftaleeni	µg/l	0,58 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Asenaftaleeni *	µg/l	0,013 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Asenaftaleeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Fluoreeni *	µg/l	0,034 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Fenantreeni *	µg/l	0,019 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Antraseeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Fluoranteeni *	µg/l	0,0063 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Pyreeni *	µg/l	0,012 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(a)antraseeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Kryseeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(b)fluoranteeni *	µg/l	0,023 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(k)fluoranteeni *	µg/l	0,0052 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(a)pyreeni *	µg/l	<0,0015 ± 35%	0,0015	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Dibentso(a,h)antraseeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
Bentso(ghi)peryleeni *	µg/l	<0,0050 ± 25%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI
PAH summa	µg/l	0,69 ± 30%	0,0050	Sis. men., GC/MS, ISO 28540:2011 / ROI

\* Menetelmä on akkreditoitu

U = Laajennettu mittausepävarmuus (k=2)

LOQ = Määritysraja

30.11.2017

Piia Hiltunen, Kemisti  
040 667 2377, piia.hiltunen@ahmagroup.com

Jakelu

Kauppila, Elina

Yhteyshenkilöt

Alkuaineanalytiikka: Ilkka Välimäki, 044 256 3322, ilkka.valimaki@ahmagroup.com

Fysikaalis-kemiallinen analytiikka (Rovaniemi): Piia Hiltunen, 040 667 2377, piia.hiltunen@ahmagroup.com

Orgaaninen analytiikka: Tarja Olli, 044 363 6614, tarja.oll@ahmagroup.com

Tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteessa mainituille näytteille.  
Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa on pyydettävä lupa Ahma ympäristö Oy:ltä.

Menetelmäviittausten lopussa olevien laboratoriotunnusten selitteet:  
OUL = Ahma ympäristö Oy, Sammonkatu 8, 90570 Oulu, p. 044 588 5260  
ROI = Ahma ympäristö Oy, Teollisuustie 6, 96320 Rovaniemi, p. 040 133 3800

Laboratorio on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T131. Kuvaus akkreditoinnista on saatavissa  
www.finas.fi tai laboratorion sivuilta. Lausunto ei kuulu akkreditoinnin piiriin.

