

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

ENERGIATEKNIikka

Michaela Hissa

**TYÖKONEDIESELMOOTTORIN SUORITUSARVO- JA PÄÄSTÖTULOKSIA
UUSIUTUVIN JA PERINTEISIN POLTTOAINEIN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi tekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Vaasassa 31.7.2015

Työn valvoja

Seppo Niemi

Työn ohjaaja

Katriina Sirviö

ALKULAUSE

Tämä tutkielma on tehty osana kansallista Future Combustion Power Plant -tutkimusohjelmaa, jonka tavoitteena on varmistaa, että suomalainen polttomoottoriteollisuus pystyy ylläpitämään johtavan asemansa globaaleilla markkinoilla vaatimusten tiukentuessa.

Haluan kiittää professori Seppo Niemeä mielenkiintoisesta tutkimusaiheesta sekä erityisesti kannustavasta ja ymmärtäväisestä ohjauksesta tutkielmani teossa. Kipinä moottoritekniikan pariin syttyi toden teolla asiantuntevista ja mielenkiintoisista luennoistasi.

Haluan kiittää myös laboratorioinsinööri Olav Nilssonia, tutkimusavustaja Markus Uuppoa ja kemisti Katriina Sirviötä korvaamattomasta avusta moottoriajajien aikana ja niiden jälkeen.

Ison kiitoksen ansaitsevat myös kotijoukot, jotka ovat kannustaneet minua monin eri tavoin. Ilman teitä tätä tutkielmaa ei olisi kirjoitettu.

Vaasassa 31.7.2015

Michaela Hissa

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
KÄSITE- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	8
ABSTRACT	9
1 JOHDANTO	10
2 POLTTOAINESTANDARDIT JA PÄÄSTÖMÄÄRÄYKSET	13
2.1 EN 590 ja EN 14214	13
2.2 EU Stage III A/US Tier 3 ja EU Stage III B/US Tier 4A	16
2.3 IMO Tier I–III	17
3 MITTAUSJÄRJESTELYT	18
3.1 Tutkimusmoottori	20
3.2 Mittalaitteet	22
3.2.1 Horiba WT300 -pyörrevirtadynamometri	22
3.2.2 Päästökomponenttien mittalaitteet	22
3.2.3 Lämpötilojen ja paineiden mittalaitteet sekä mittauspisteet	26
4 POLTTOAINEET	29
4.1 Eläinperäinen biodiesel	29
4.2 Kaladiesel ja kalaöljy	30
4.3 Vetykäsitelty 100 % uusiutuva diesel	30
4.4 Polttoaineiden ominaisuudet	32
5 TULOKSET	35
5.1 Polttoainevertailu	36
5.1.1 Pakokaasun lämpötila ja ahtopaine	36
5.1.2 Sylinteripaine ja lämmönvapautuminen	39
5.1.3 Savutus	52
5.1.4 Typen oksidit	54
5.1.5 Hiilimonoksidit	55
5.1.6 Hiilivedyt	57
5.1.7 Pienhiukkaset	58
5.2 Suutinvertailu	62
5.2.1 Pakokaasun lämpötila ja ahtopaine	63
5.2.2 Sylinteripaine ja lämmönvapautuminen	67
5.2.3 Savutus	78
5.2.4 Typen oksidit	80
5.2.5 Hiilimonoksidit	82
5.2.6 Hiilivedyt	83
5.2.7 Pienhiukkaset	84
5.3 Dieselöljyn ja kalaöljyn vertailu	96

5.3.1	Pakokaasun lämpötila ja ahtopaine	97
5.3.2	Sylinteripaineet ja lämmönvapautuminen	98
5.3.3	Savutus	106
5.3.4	Typen oksidit	106
5.3.5	Hiilimonoksidit	107
5.3.6	Hiilivedyt	108
5.3.7	Pienhiukkaset	109
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	115
6.1	Polttoainevertailu	115
6.2	Suutinvertailu	118
6.3	Dieselöljyn ja kalaöljyn vertailu	121
7	YHTEENVETO	124
	LÄHDELUETTELO	127
	LIITTEET	130

KÄSITE- JA LYHENNELUETTELO

AFME	Animal Fat based Methyl Ester, eläinperäinen biodiesel
BMEP	Brake Mean Effective Pressure, tehollinen keskipaine
CO	Carbon Monoxide, hiilimonoksidi
CO ₂	Carbon Dioxide, hiilidioksidi
DFO	Diesel Fuel Oil, vähärikkinen dieselöljy
ECA	Emission Control Areas, muita tiukemmin valvottuja merialueita päästöjen osalta
EN14214	Polttoainestandardi biodieseleille
EN590	Polttoainestandardi dieselpolttoaineelle
EU Stage III	Euroopan Unionin päästömääräys
FCEP	Future Combustion Engine Power Plant, suomalainen tutkimusohjelma
FISH	Kalanperkuujätteistä valmistettu esteröity biodiesel
FISHOIL	Kalanperkuujätteistä valmistettu esteröimätön öljy
FSN	Filter Smoke Number, savutusta mittaava suure
HC	Hydrocarbon, hiilivety
HF-suutin	High Flow rate -suutin, jossa suuri tilavuusvirta

HVO	Hydrotreated Vegetable Oil, vetykäsitelty uusiutuva polttoaine
IMO	International Maritime Organization, Kansainvälinen merenkulkujärjestö
IMO Tier I–III	Merialueiden NO _x -päästöstandardi
ISO 8178	Standardi, joka määrittelee off-road-polttomootoreiden kuormituspisteet ja kuormituspisteiden painokertoimet
LabView	Graafinen suunnittelualusta
LF-suutin	Low Flow rate -suutin, jossa pieni tilavuusvirta
Main	Polttoaineen pääruiskutus
NO	Nitrogen Monoxide, typpimonoksidi
NO _x	Nitrogen Oxides, typen oksidit
NRSC	Non-Road Steady Cycle, työkonedieselmoottorin kahdeksanvaiheinen mittaussykli
O ₂	Oxygen, happimolekyyli
Pilot	Polttoaineen esiruiskutus
PM	Particle Matter, pienhiukkaset
Post	Polttoaineen jälkiruiskutus
SCR	Selective Catalytic Reduction, selektiivinen katalyyttinen pelkistys

SO _x	Sulphur Oxides, rikkioksidit
US EPA	United States Environmental Protection Agency, Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto
US Tier 3 & 4A	Yhdysvaltojen päästömääräys
Win EEM3	Elektroninen moottorinohjausjärjestelmän hallintaohjelma

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Michaela Hissa
Diplomityön nimi:	Työkonedieselmoottorin suoritusarvo- ja päästötuloksia uusiutuvien ja perinteisten polttoaineiden
Valvoja:	Professori Seppo Niemi
Ohjaaja:	Kemisti Katriina Sirviö
Tutkinto:	Diplomi-insinööri
Koulutusohjelma:	Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma
Suunta:	Energiatekniikka
Opintojen aloitusvuosi:	2006
Diplomityön valmistumisvuosi:	2015

Sivumäärä: 181

TIIVISTELMÄ

Tutkielma on osa Future Combustion Power Plant (FCEP) -tutkimusohjelmaa, jonka tavoitteena on varmistaa, että suomalainen polttomoottoriteollisuus pystyy ylläpitämään johtavan asemansa globaaleilla markkinoilla. Tutkielman tavoitteena oli Vaasan yliopistossa mallinnetun työkonedieselmoottorin simulointimallin verifiointiseksi ajaa suoritusarvo- ja päästömittauksia vähärikkisellä dieselpolttoaineella (DFO), kalanperkuujätteistä valmistetulla esteröidyllä biodieselillä (FISH) sekä raaka-alla kalaöljyllä (FISHOIL), eläinperäisellä biodieselillä (AFME) ja vetykäsitellyllä uusiutuvalla dieselillä (HVO). Mittauksia tehtiin myös erilaisin ruiskutuslaitteilla. Tutkimusajot suoritettiin Vaasan Energiainstituutin polttomoottorilaboratoriossa AGCO Power 44 CWA -työkonedieselmoottorilla. Moottoriajoissa kiinnitettiin huomiota moottorin yleiseen toimintaan, mekaanisiin ja termisiin kuormituksiin, polttoaineen syttymis- ja palamisominaisuuksiin sekä hiukkas- ja kaasumaisiin päästöihin.

Polttoainevertailussa ajettiin DFO:lla, FISH:llä, AFME:lla ja HVO:lla. Esimerkkituloksina DFO aiheutti yleisesti eniten päästöjä (savutus, hiilivedyt, häkä). FISH tuotti eniten NO_x-päästöjä. HVO syyti hyvin korkean setaaniarvon vuoksi.

Suutinvertailussa käytettiin neljää eri suutinmallia: standardisuuttimet, 6- ja 10-reikäiset suuren virtauksen (HF) -suuttimet sekä 8-reikäiset pienen virtauksen (LF) -suuttimet, joiden suutinkarttaa muokattiin moottorin käynnissä pysymiseksi. Tämän vuoksi tulokset eivät ole vertailukelpoiset, vaikka ne esitetään yhdessä. Yleisesti 8-reikäisten LF-suuttimien syttymisjättämä oli lyhin ja seoksen muodostus hyvä erityisesti osakuormilla, mikä saattoi johtua juuri suutinkartan muokkauksesta.

Kalaöljyn korkean viskoosin vuoksi sitä ajettiin 6-reikäisillä HF-suuttimilla. Kaikkia kuormituspisteitä ei kalaöljyllä saavutettu, joten lisävertailun vuoksi lisättiin yksi kuormituspiste.

Mittaustuloksia saatiin riittävästi, mutta tarkempia pienhiukkasmassatuloksia olisi kuitenkin tarvittu. Tulevia moottoriajoja ajatellen tulisi kiinnittää enemmän huomiota ruiskutusajoihin ja -määriin sekä pienhiukkasmassan keräykseen. Kiinnostavaa lisätietoa toisi mm. ruiskutuslaitteiden ja pienhiukkasten kokojen välinen korrelaatioanalyysi, johon tutkielmasta löytyisi valmis aineisto.

AVAINSANAT: Dieselmoottori, uusiutuvat polttoaineet, pakokaasupäästöt, lämmönvapautuminen, ruiskutuslaitteet

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author:	Michaela Hissa
Topic of the Thesis:	High-speed engine results with various renewable fuels
Supervisor:	Professor Seppo Niemi
Instructor:	Chemist Katriina Sirviö
Degree:	Master of Science in Technology
Degree Programme:	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
Major of Subject:	Energy Technology
Year of Entering the University:	2006
Year of Completing the Thesis:	2015

Pages: 181

ABSTRACT

This Master's thesis is part of the Future Combustion Power Plant (FCEP) -research program which main target is to confirm that Finnish combustion engine industry remains it's leading position on global markets. Main target of this thesis was to collect high-speed engine data with different fuels for prediction model development. The fuels were Diesel Fuel Oil (DFO), Animal Fat based Methyl Ester (AFME), Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), biodiesel from fish wastes (FISH) and raw fishoil (FISHOIL). For additional details tests was also made using different injector tips. The tests with a high-speed common-rail off-road diesel engine (AGCO Power 44 CWA) were performed in the Internal Combustion Engine (ICE) Laboratory of Vaasa Energy Institute. In the study, the engine general performance, pressures and temperatures ignition and combustion characteristics, as well as gaseous and particle emissions were observed.

There was compared DFO, FISH, AFME and HVO. For example results DFO produced most smoke, HC- and CO-emissions. FISH produced most NO_x. HVO had high cetane number and was ignited best.

In comparison between injector tips was used four different tip types: standard tips, 6- and 10-hole high flow rate (HF) -tips and 8-hole low flow rate (LF) -tips. Some changes were made to duration maps for 8-hole LF-tips to keep engine running. Due to that 8-hole LF-tips' results was not comparable but is showed together with other results. Generally the ignition delay of the 8-hole LF-tips was shortest and air-fuel mix was good especially with small loads.

Due to fishoil's high viscosity, tests were made with 6-hole HF-tips. Only few modes were able to reach with FISHOIL and one extra mode was added.

Main target of the thesis was to collect data enough for prediction model. Target was achieved. Though more specific particle matter results was missed. In the future, more attention should be paid to injection timing, injection quantity and to the measurement of particle matter. Examining the correlation between injector tips and particle sizes would give new interesting additional information.

KEYWORDS: Diesel engine, renewable fuels, exhaust emissions, heat release rate, injector tips

1 JOHDANTO

Öljyvarantojen hupeneminen ja ilmastonmuutos ovat herättäneet ihmiset toimimaan maapallon puolesta. Ilmastonmuutoksesta johtuen Euroopan Unionin tavoitteena on vuoteen 2020 mennessä vähentää kasvihuonekaasuja 20 %, parantaa energiatehokkuutta 20 % ja saada käytettävästä energiasta 20 % uusiutuvista energialähteistä. Haasteita tuovat ilmastonmuutoksen ja fossiilisten polttoaineiden hupenemisen lisäksi lakisääteiset tiukentuvat päästörajoitukset. Esimerkiksi vuoteen 2016 mennessä tulisi merialueilla vähentää typenoksideja (NO_x) lähes 80 % nykyiseen verrattuna (IMO Tier III). (Kytö 2012).

Tiukkojen tavoitteiden saavuttamiseen vaaditaan sekä polttomoottoritekniikalta että polttoaineilta uusia innovatiivisia ratkaisuja. Polttomoottoritekniikassa kehitettäviä kohteita ovat muun muassa palamisprosessi, komponentit, ruiskutus, turboahtaminen, hybriditekniikka sekä moottoreiden valmistus ja kierrätys. NO_x -päästöjä pyritään vähentämään mm. optimoimalla moottorin ja jälkikäsitteilytekniikoiden yhdistelmiä ja kehittämällä SCR-menetelmiä (selektiivinen katalyyttinen pelkistys). Pesumenetelmiä kehitetään rikkioksidien (SO_x) ja suotimia pienhiukkasten (particle matter, PM) vähentämiseksi. Fossiilisten polttoaineiden tilalle tarvitaan hyvälaatuisia uusiutuvia nestemäisiä ja kaasupolttoaineita. (Kytö 2012).

Future Combustion Engine Power Plant –tutkimusohjelman (FCEP) tavoitteena on varmistaa, että suomalainen polttomoottoriteollisuus pystyy ylläpitämään johtavan asemansa globaaleilla markkinoilla. Ohjelma tukee suomalaisia yrityksiä ja tutkimuslaitoksia kehittämään tutkimusvälineistöä, tietotaitoa, teknologioita ja tuotteita vastaamaan tulevaisuuden markkinoiden vaatimuksia mm. päästöjen osalta. FCEP- ohjelmassa 17 suomalaista yritystä ja tutkimuslaitosta tekevät yhteistyötä kuudessa eri kategoriassa; WP1: Advanced combustion, WP2: Energy efficiency, WP3: Emission control, WP4: Fuel flexibility, WP5: Intelligent automation and control ja WP6: Strategic research environment. (Kytö 2012).

Tämä tutkielma on tehty osana FCEP-tutkimusohjelman WP4- eli Fuel flexibility -kategoriaa, jossa yhteistyötä tekevät Teknologian tutkimuskeskus VTT, AGCO Power Oy, Gasum Oy, Wärtsilä Finland Oy sekä Vaasan yliopisto. Tavoitteena on laajentaa

polttoainevalikoimaa, kehittää moottoreiden suorituskyvyn ja päästöjen ennustemetodeja sekä kehittää moottoreiden valmiuksia käyttää vaihtoehtoisia polttoaineita.

Vaasan yliopistossa on mallinnettu nopeakäyntisen moottorin toimintaa eri polttoaineilla. Tämän tutkielman tavoitteena oli mallien tueksi ja verifioimiseksi ajaa moottorilla suoritusarvo- ja päästömittauksia tavanomaisella vähärikkisellä dieselpolttoaineella sekä erilaisilla biopolttoaineilla. Lisätiedon saamiseksi mittauksia tehtiin myös erilaisin ruisku-tussuuttimin.

Moottoriajot suoritettiin nopeakäyntisellä common rail -työkonedieselmoottorilla Vaasan Energiainstituutin polttomoottorilaboratoriossa, jota hallinnoi Yrkeshögskolan Novia. Koska moottori oli työkonedieselmoottori, sitä ajettiin ISO 8178 -normin kahdeksan-vaiheisen C1-mittaussyklin mukaisesti (Non-Road Steady Cycle, NRSC).

Tutkittavien polttoaineiden valinnassa kiinnitettiin huomiota polttoaineen käyttöpotentiaaliin ja siihen, miten ne täyttävät kestäväen kehityksen vaatimukset. Lisäksi valintaan vaikutti polttoaineen ominaisuuksien sopivuus verifioimaan mallintamiseen tarvittavia ennustemetodeja. Polttoaineet toimitettiin eri valmistajilta. Kuten fossiilisilla polttoaineilla, myös uusiutuvilla polttoaineilla käytetty raaka-aine vaikuttaa polttoaineen ominaisuuksiin. Mallinnuksen avulla pyritään ennustamaan polttoaineiden ominaisuuksien vaikutusta moottorin suoritusarvoihin ja päästöihin.

Valitut polttoaineet olivat vähärikkinen dieselöljy (diesel fuel oil, DFO), eläinperäinen biodiesel (animal fat based methyl ester, AFME), kalanperkuujätteistä valmistettu esteröity biodiesel (FISH), kalanperkuujätteistä valmistettu esteröimätön raaka kalaöljy (FISH-OIL) sekä vetykäsitelty uusiutuva diesel (hydrotreated vegetable oil, HVO).

Moottoriajoissa kiinnitettiin huomiota moottorin yleiseen toimintaan, mekaanisiin ja termisiin kuormituksiin, polttoaineen syttymis- ja palamisominaisuuksiin sekä hiukkas- ja kaasumaisiin päästöihin. Moottoriin tehdyt polttoainekohtaiset säädöt moottorin tasaisen käynnin saavuttamiseksi otettiin tutkielman raportoinnissa huomioon.

Tutkielmassa käsitellään aluksi nykyiset polttoainestandardit EN590 dieselpolttoaineelle, EN14214:2012 biodieseleille sekä päästömääräykset Euroopassa ja Yhdysvalloissa; EU

Stage III A/US Tier 3 ja EU Stage III B/US Tier 4A. Lisäksi esitellään merialueiden oma NO_x-päästöstandardi IMO Tier I–III. Luvussa 3 käsitellään moottoriajoja varten tehdyt mittausjärjestelyt. Luvussa käydään läpi ISO 8178 -standardi, jokaista mittausajoa edeltävät toimenpiteet laboratoriossa, tutkimusmoottorin kokoonpano sekä käytetyt mittalaitteet. Seuraavassa luvussa käsitellään valitut polttoaineet ja niiden ominaisuuksia sekä valmistustavat. Luvussa 5 esitellään moottoriajoista saadut mittaustulokset niin polttoainevertailun kuin ruiskutussuutinvertailun osalta. Tutkielman lopussa pohditaan tuloksia sekä käsitellään parannusehdotuksia tulevia moottoriajoja varten.

2 POLTTOAINESTANDARDIT JA PÄÄSTÖMÄÄRÄYKSET

Polttoainestandardi EN 590 määrittelee Euroopassa myydyn dieselpolttoaineen laadun. Biopolttoaineiden yleistyessä rinnalle otettiin vuonna 2004 myös biodieseleille tarkoitettu EN 14214 -standardi. Päästömääräyksillä pyritään puolestaan alentamaan moottoreiden pakokaasu- ja hiukkaspäästöjä maailmanlaajuisesti.

2.1 EN 590 ja EN 14214

Ensimmäisen kerran polttoainestandardi EN 590:1993 astui voimaan tammikuussa 1993. Standardia on uudistettu korottamalla setaanilukua ja alentamalla sallittua rikki- ja rikkihappopitoisuutta. Vuonna 1993 dieselpolttoaine sai sisältää 0,2 % rikkiä ja setaaniluvun oli vähintään oltava 49. Uusimman tammikuussa 2009 voimaan tulleen standardin EN 590:2009 mukaan setaaniluvun on vähintään oltava 51 ja rikkihappopitoisuuden alle 0,001 % (10 mg/kg): puhutaan vähärikkisestä dieselpolttoaineesta. Vuodesta 2011 lähtien myös työkoneissa käytettävältä dieselpolttoaineelta on vaadittu vähärikkisyyttä. Taulukossa 1 esitellään EN 590:2009 -standardi kokonaisuudessaan. (DieselNet 2012a).

EN 14214:2012 on maaliskuussa 2012 voimaan tullut biodieselstandardi FAME-biodieseleille (Fatty Acid Methyl Ester, rasvahapon metyyliesteri). FAME-tyyppisiin biodieseleihin luokitellaan eläin- ja kasvipärisistä öljyistä transesteröintiprosessilla valmistetut polttoaineet, joissa on käytetty metanolia esterin muodostamiseksi. Tutkielmassa ajetuista polttoaineista AFME ja FISH luokitellaan biodieseleiksi. HVO-polttoainetta valmistettaessa ei ole käytetty metanolia, vaan vetyä. Sitä ei luokitella biodieseliksi, eikä biodieselstandardi koske sitä. FISHOIL on kalanperkuujätteistä puristettu esteröimätön öljy. Uusin voimassa oleva biodieselstandardi on vuodelta 2012. Taulukossa 2 esitellään EN 14214:2012 -standardi kokonaisuudessaan. (DieselNet 2013c).

Taulukko 1. EN 590:2009 -polttoainestandardi (DieselNet 2013c).

Property	Unit	Limits	
		Minimum	Maximum
Cetane number		51.0	
Cetane index		46.0	
Density at 15°C	kg/m ³	820.0	845.0
Polycyclic aromatic hydrocarbons	% (m/m)		11.0
Sulfur content	mg/kg		10.0
Flash point	°C	Above 55	
Carbon residue (on 10% distillation residue)	% (m/m)		0.30
Ash content	% (m/m)		0.01
Water content	mg/kg		200
Total contamination	mg/kg		24.0
Copper strip corrosion (3h at 50°C)	rating	Class 1	
Fatty acid methyl ester (FAME) content	% (V/V)		7.0
Oxidation stability	g/m ³		25
	h	20.0	
Lubricity, corrected wear scar diameter (wsd 1.4) at 60°C	µm		460
Distillation	% (V/V) recovered at 250 °C	% (V/V)	<65
	% (V/V) recovered at 350 °C	% (V/V)	85.0

Taulukko 2. EN 14214:2012 -biodieselstandardi (DieselNet 2013c).

Property	Unit	Limits	
		Minimum	Maximum
Ester content	% (m/m)	96.5	
Density at 15°C	kg/m ³	860	900
Viscosity at 40°C	mm ² /s	3.5	5.0
Flash point	°C	>101	
Sulfur content	mg/kg		10
Cetane number		51.0	
Sulfated ash content	% (m/m)		0.02
Water content	mg/kg		500
Total contamination	mg/kg		24
Copper strip corrosion, max	rating	Class 1	
Oxidation stability	h	8	
Acid value	mg KOH/g		0.5
Iodine value	g Iod / 100g		120
Linolenic Acid Methylester	% (m/m)		12
Polyunsaturated (>=4 Double bonds) Methylester	% (m/m)		1
Methanol content	% (m/m)		0.2
Monoglyceride content	% (m/m)		0.7
Diglyceride content	% (m/m)		0.2
Triglyceride content	% (m/m)		0.2
Free Glycerine	% (m/m)		0.02
Total Glycerine	% (m/m)		0.25
Group I metals (Na+K)	mg/kg		5
Group II metals (CA+Mg)	mg/kg		5
Phosphorus content	mg/kg		4

2.2 EU Stage III A/US Tier 3 ja EU Stage III B/US Tier 4A

Päästöstandardeilla pyritään kontrolloimaan käytössä olevien moottoreiden päästö-
pitoisuuksia. Standardit määrittelevät rajat hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöille sekä ty-
pen oksideille ja pienhiukkasille. Rajojen tiukentuessa jatkuvasti vaaditaan moottori-
teknologioilta uusia innovatiivisia ratkaisuja päästöjen pienentämiseksi.

Yhdysvalloissa päästörajoituksista vastaa United States Environmental Protection Agen-
cy, US EPA. Siellä uuden moottorin tulee täyttää US Tier 4A -standardi, joka vastaa Eu-
roopan päästöstandardia EU Stage III B:tä.

Valmistaja ilmoittaa tutkielman moottorin, AGCO Power 44 CWA, täyttävän EU Stage
III A- ja US Tier 3 -päästöstandardit. Alla olevissa taulukoissa (3–4) esitellään sekä Yh-
dysvaltojen että Euroopan kaksi viimeisintä päästöstandardia.

Taulukko 3. EU Stage III A ja US Tier 3 päästöstandardit työkonedieselmoottoreille.
(DieselNet 2013a, 2013b & US EPA 2013).

Engine Power	Stage/ Tier	Year	CO	NMHC+NO _x	PM
kW			g/kWh		
75 ≤ kW < 130	Stage III A	2007.01	5.0	4.0	0.3
	Tier 3	2007– 2011	5.0	4.0	0.3

Taulukko 4. EU Stage III B ja US Tier 4A -päästöstandardit työkonedieselmoottoreille.
(DieselNet 2013a, 2013b & US EPA 2013).

Engine Power	Stage/ Tier	Year	CO	HC	NO _x	PM
kW			g/kWh			
75 ≤ kW < 130	Stage III B	2012.01	5.0	0.19	3.3	0.025
56 ≤ kW < 130	Tier 4A	2012– 2014*	5.0	0.19	0.40	0.02

* PM/CO: full compliance from 2012; NO_x/HC: Option 1 (if banked Tier 2 credits used) – 50% engines
must comply in 2012–2013; Option 2 (if no Tier 2 credits claimed) – 25% engines must comply in 2012–
2014, with full compliance from 2014.12.31.

Euroopan Unionin päästöstandardi Stage IV on määrätty astuvan voimaan lokakuussa 2014. Neljännen tason päästöstandardissa 56–130 kilowatin tehoalueen välillä olevien moottoreiden päästörajoitukset muuttuvat vain typen oksidien kohdalla nykyisestä 3,3 g/kWh:sta 0,4 g/kWh:aan. Muut rajoitukset pysyvät Stage III B:n tasolla.

2.3 IMO Tier I–III

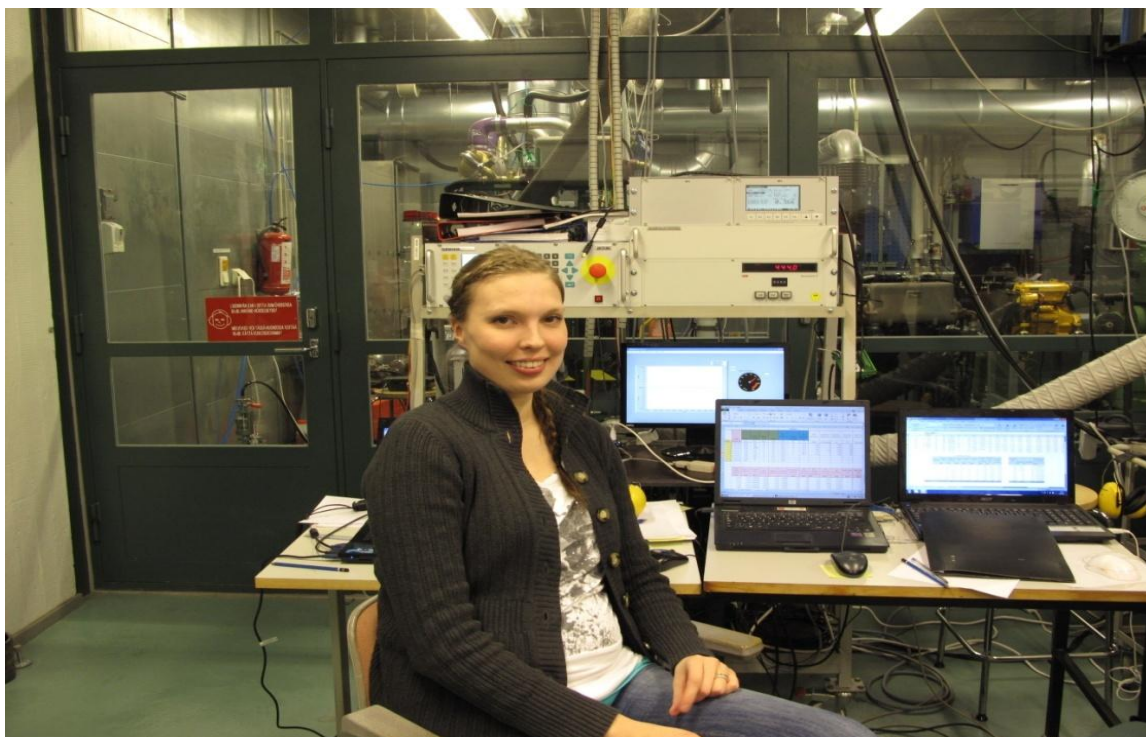
IMO (International Maritime Organization) Tier I–III ovat maailmanlaajuisia merialueiden päästöstandardeja koskien typenoksideja (NO_x). Päästöstandardin raja-arvot riippuvat moottorin pyörintänopeudesta (rpm). Tier III -standardi koskee vain ECA-alueita (Emission Control Areas). ECA-alueisiin kuuluvat typenoksidien osalta Pohjois-Amerikan ECA-alueet, mukaan lukien suurin osa Yhdysvaltojen ja Kanadan rannikosta sekä Karibian ECA-alueet, mukaan lukien Puerto Rico ja Yhdysvaltain Neitsytsaaret. Kuten taulukosta 5 huomataan, vuoteen 2021 mennessä tulee merialueiden moottoreiden typenoksidipäästöjen vähentyä lähes 80 % nykyiseen verrattuna ECA-alueilla. (IMO 2013a, 2013b).

Taulukko 5. IMO Tier I–III typenoksidien päästöstandardi merialueille. (IMO 2013).

Tier	Ship construction date on or after	Total weighted cycle emission limit (g/kWh)		
		n = engine's rated speed (rpm)		
		n < 130	n = 130–1999	n > 2000
I	1 January 2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$ e.g., 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 January 2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$ e.g., 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 January 2021	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$ e.g., 720 rpm – 2.4	2.0

3 MITTAUSJÄRJESTELYT

Moottoriajot suoritettiin kevään 2012 aikana Tutkimuskeskus Technobothnian polttomoottorilaboratoriossa, jota hallinnoi Yrkeshögskolan Novia. Kuvassa 1 nähdään laboratorioympäristöä mittausajojen aikana.



Kuva 1. Tutkimuskeskus Technobothnian polttomoottorilaboratorio keväällä 2012.

Tutkimus aloitettiin ajamalla polttoainevertailu moottorin standardisuuttimilla. Polttoainevertailu suoritettiin vähärikkisen dieselin (DFO, diesel fuel oil), esteröidyn kala-dieselin (FISH), eläinperäisen biodieselin (AFME, animal fat based methyl ester) sekä vetykäsittelyn, 100 % uusiutuvista raaka-aineista valmistetun dieselin (HVO, hydrotreated vegetable oil) välillä. Näiden mittauksen jälkeen moottoriin vaihdettiin ruiskutus-suuttimet, ja suutinvertailu ajettiin tavallisella vähärikkisellä dieselpolttoaineella. Suuttimia oli neljää eri mallia. Lopuksi ajettiin suurimmat reiät omaavilla suuttimilla polttoaineena raakaa, esteröimätöntä kalaöljyä (FISHOIL). Suuttimien valinta perustui kalaöljyn suureen kinemaattiseen viskositeettiin, taulukko 10. Kalaöljyllä tehdyt mittaukset jätettiin viimeiseksi moottoririkon riskin vuoksi.

Tutkimusajot suoritettiin ISO 8178-4 -standardin C1-syklin mukaan. Standardi määrittelee off-road -polttomoottereiden kuormituspisteet (non-road steady cycle, NRSC) ja kuormituspisteiden painokertoimet (taulukko 6). Maksimikuormituspisteet oli määritelty siten, että ne pystyttiin saavuttamaan kaikilla polttoaineilla. Esteröimättömällä kalaöljyllä ei kuitenkaan pystytty saavuttamaan kaikkia kuormituspisteitä, joten vertailupisteiden saamiseksi lisättiin kuormituspiste; 1500 rpm, 25 % kuorma.

Taulukko 6. ISO 8178-4 -standardin mukaiset kuormituspisteet. (DieselNet 2012a).

Mode	Speed	Torque	Weighting factor
#	rpm	%	#
1	2200	100	0.15
2		75	0.15
3		50	0.15
4		10	0.10
5	1500	100	0.10
6		75	0.10
7		50	0.10
8	850	0	0.15

Pienhiukkasten massan määrittämiseksi kuormituspisteiden kestoa pidennettiin 14 tai 21 minuuttiin. Näin saatiin Dekatin PM 10 -hiukkasmassaimpaktoriin johdettua kauemmin pakokaasua, jotta hiukkasmassa suureni tarpeeksi tarkkaa punnitusta varten.

Hiukkasmassan määrittämisessä oli ongelmia, eikä luotettavia mittaustuloksia voida esittää. Tulokset on kuitenkin esitetty liitteessä 14. Hiukkasmassa kerättiin laimennetusta pakokaasusta, halkaisijaltaan 1–1000 nm hiukkasista. Pienhiukkasia kerättiin impaktorin suodatinpaperiin aluksi 10 tai 15 minuutin ajan riippuen kuormituspisteen painokertoimesta. Ensimmäisen mittausajon jälkeen DFO:lla huomattiin, että hiukkasmassaa ei kertynyt tarpeeksi luotettavan tuloksen saamiseksi ja hiukkasten keräysaikaa pidennettiin 14 tai 21 minuuttiin. Hiukkasmassa laskettiin ennen mittausta puunitun suodatinpaperin alkuarvon ja mittauksen päätyttyä puunitun suodatinpaperin erotuksena. Mittauksiin epäsuotuisasti

vaikuttivat suodatinpaperien säilytys huoneilmassa (huoneilman kosteus) ja vaa'an riittämätön tarkkuus pelkälle suodatinpaperille. Huoneilman kosteuden imeytyminen suodatinpapereihin pyrittiin estämään säilyttämällä suodatinpapereita eksikaattorissa. Tulokset eivät juurikaan muuttuneet. Suodatinpaperin käsittelyä pyrittiin vähentämään ja vaa'an vaeltamista minimoimaan nostamalla suodatinpaperin massaa punnitsemalla se muovisten suodatinpaperin pidikkeiden kanssa. Muoviset pidikkeet kuitenkin aiheuttivat vaakaan staattisesta sähköstä johtuvia häiriöitä.

Ennen jokaista moottoriajoa mittauslaitteet kalibroitiin ja niiden annettiin lämmitä valmistajan ilmoittaman ajan. Lisäksi Dekatin PM 10 -hiukkasmassaimpaktori valmisteltiin laittamalla sisälle puhdas punnittu suodatinpaperi sekä lisäämällä Impactor Foil Grease AG-10 Apiezon-1 -rasvalla rasvatut, alumiiniset keräysfoliot estämään partikkelien kimpoamista pois mittalaitteesta. Ajoa ennen tehtiin myös moottorin perustarkistus, jossa katsottiin mm. öljyn määrä ja lämpötilat sekä moottorin lämpötilat. Juuri ennen mittausajon alkamista tarkistettiin myös, että pakokaasun lämpötila vastasi edellisen mittauksen pakokaasun lämpötilaa.

Mittau tulokset kirjattiin Excel- taulukkoon, jonka suunnittelusta ja toteutuksesta vastasi tutkimusavustaja Markus Uuppo. Liitteissä 1–8 on esitetty tutkimustulokset Uupon luoman tiedonkeruupohjan mukaisesti. Sylinteripaineiden ja hiukkasanalyysin tulokset tallennettiin erillisiin Excel-tiedostoihin.

3.1 Tutkimusmoottori

Tutkimusmoottorina käytettiin AGCO Power 44 CWA -dieselmoottoria. Moottori on kolmannen sukupolven 4-sylinterinen, turboahdettu, ahtoilman välijäähdytyksellä varustettu common rail -työkonedieselmoottori. Moottorin tarkemmat tekniset tiedot löytyvät taulukosta 7.

Taulukko 7. Tutkimusmoottorin tekniset tiedot (AGCO Power Oy 2012).

Engine Type	AGCO Power 44 CWA
Rated power (kW)	96
Nominal speed (rpm)	2200
Rated torque (Nm)	610
At speed (rpm)	1500
Number of cylinders	4
Displacement (litres)	4.4
Cylinder bore (mm)	108
Stroke (mm)	120
Rotation direction (seen from flywheel end)	CCW
Aspiration	Turbocharged and charged air cooled
Type of intercooler	Air to air
Emission certification	EU Stage III A/ US Tier 3
Injection system	Common Rail

Polttoainetta ruiskutettiin yhteispaineruiskutusjärjestelmällä, common rail. Järjestelmän ansiosta polttoaineen ruiskutuksen aloituksen ajankohta, ruiskutusaine sekä ruiskutusmäärät ovat säädettävissä. Common rail -järjestelmä mahdollistaa polttoaineen ruiskutuksen jakamisen viiteen osaan yhden työkierron aikana: ennen pääruiskutusta ovat esiruiskutukset (pilot1 ja pilot2), sitten tulevat pääruiskutus (main1), jälkimmäinen pääruiskutus (main2) sekä jälkiruiskutus (post). (AGCO Power Oy 2012).

Ruiskutusparametrit säädettiin Win EEM3 -elektronisella moottorinohjausjärjestelmän hallintaohjelmalla. Syötetyt parametrit tallennetaan ohjelmassa erillisiin karttoihin, kuten ns. savukarttaan, jossa määritellään suurin sallittu polttoainemäärä kullakin ahtopaineella ja pyörintänopeudella. Näin estetään moottorin savutus ja pyritään optimoimaan ilma-polttoaine-seossuhde. Myös kaikkien ruiskutusvaiheiden ajoitusta hallitaan omilla kartoilla, ja ruiskutusmäärää ohjataan ns. duraatiokartan (ts. suutinkartan) avulla. Haluttu ruiskutusmäärä muodostuu käytetystä ruiskutusaineesta ja suuttimen aukioloajasta. Lisäksi

moottorin käynnistykseen on oma karttansa, jossa määritellään ruiskutusmäärä pyörintänopeuden ja moottorin lämpötilan mukaan. Suutinvertailussa suutinkarttaa jouduttiin muokkaamaan 8-reikäisten Low Flow rate (LF) -suuttimien kohdalla. Ilman kartanmuokkausta moottori ei olisi pysynyt käynnissä.

3.2 Mittalaitteet

Mittauksissa käytettiin VEI:n polttomoottorilaboratorion laitteistoa. Moottorista mitattiin päästökomponentteja sekä useita lämpötiloja ja paineita. Kuvaan 2 on merkitty numeroin tutkimusajoissa käytetyt nähtävillä olevat mittalaitteet. Kuvassa esiintyvät vasemmalta oikealle laboratorioinsinööri Olav Nilsson, kirjoittaja ja tutkimusavustaja Markus Uuppo. Kaavio tutkimuslaitteistosta esitetään kuvassa 3.

3.2.1 Horiba WT300 -pyörrevirtadynamometri

Moottori kytkettiin Horiban WT300 -pyörrevirtadynamometriin. Dynamometriä säädettiin valvomosta LabView-ohjelmalla. Pyörrevirtajarrun jäähtytykseen käytettiin vesijohdovettä. Dynamometrin tarkemmat tekniset tiedot löytyvät taulukosta 8.

3.2.2 Päästökomponenttien mittalaitteet

Pakokaasujen päästömittaukset suoritettiin useilla eri mittalaitteilla, taulukko 9. Mitattavia suureita olivat hiilimonoksidi (CO), hiilidioksidi (CO₂), happi (O₂), typpimonoksidi (NO), typen oksidit (NO_x) sekä hiilivedyt (HC) ja pienhiukkaset (PM).



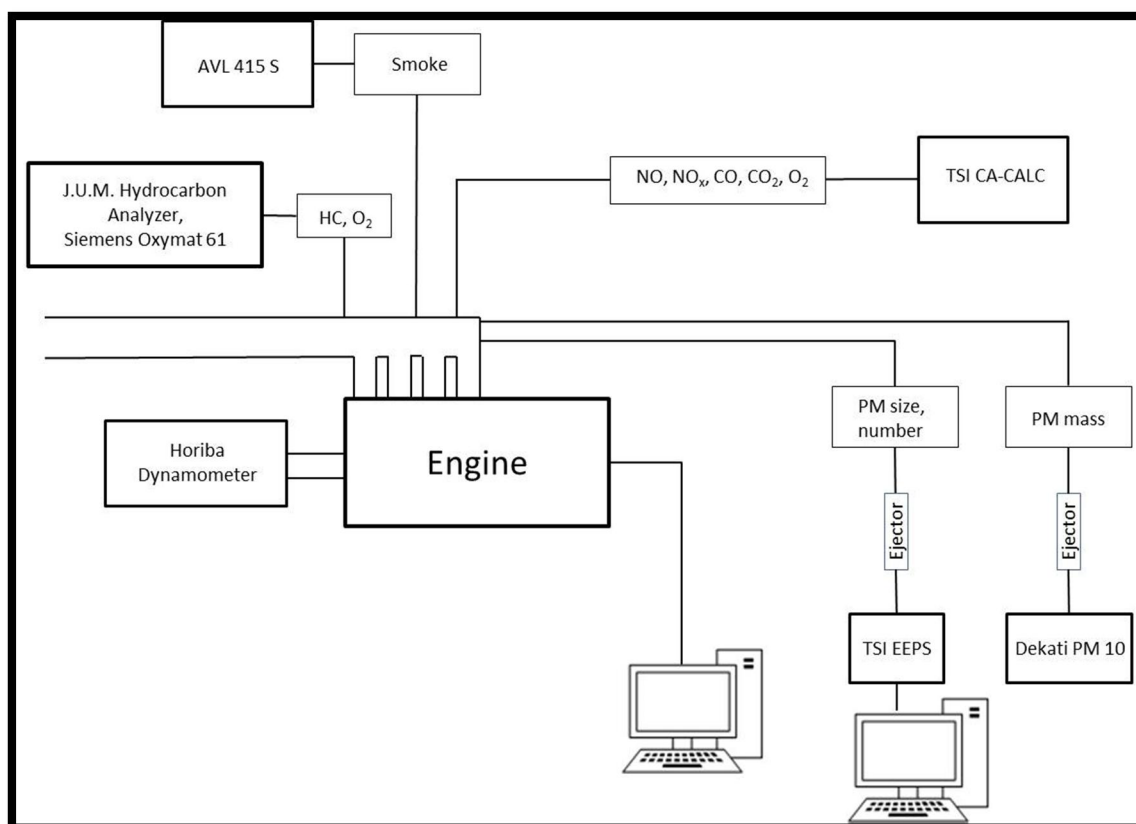
Kuva 2. Osa moottoriajoissa tarvittavista tutkimuslaitteista: 1. AVL 415 S-savutusmittari, 2. Kistler KiBox Cockpit -indikaattori, 3. ABB Sensyflow FMT700-P - ilmanmassavirtamittari, 4. Win EEM3 -elektroninen moottorinohjausjärjestelmän hallintaohjelma, 5. TSI EEPS 3090 -hiukkasanalysaattori, 6. Horiba WT300 -pyörrevirtadynamometriin liitetty ohjausyksikkö.

Taulukko 8. Pyörrevirtadynamometrin tekniset tiedot (HORIBA 2012).

Dynamometer Type	Horiba WT300
Rated power (kW)	300
Rated torque (Nm)	1200
Maximum speed (rpm)	7500
Moment of inertia (kgm ²)	0.49
Weight (kg)	670

Taulukko 9. Päästömittauksissa käytetyt mittalaitteet.

Parameter	Analyzer
CO	TSI CA-6203 CA-CALC Combustion Analyzer
CO ₂	TSI CA-6203 CA-CALC Combustion Analyzer
O ₂	Siemens Oxymat 61 Oxygen Analyzer, room air as zero gas and nitrogen as span gas TSI CA-6203 CA-CALC Combustion Analyzer
NO	TSI CA-6203 CA-CALC Combustion Analyzer
NO _x	TSI CA-6203 CA-CALC Combustion Analyzer
HC	J.U.M. Total Hydrocarbon Analyzer HFID VE 7, nitrogen as zero gas and methane as span gas
PM size and number	TSI EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer) 3090, size range 6-560 nm
PM mass	Dekati PM10 Impactor, one or two stage dilution by air



Kuva 3. Tutkimuslaitteiston kaavio.

Hiilimonoksidin, hiilidioksidin, hapen, typpimonoksidin ja typen oksidien mittaamiseen käytettiin TSI CA-6203 CA-CALC -analysointilaitetta. Analysointilaitteella mitataan hiilimonoksidin, hapen ja typpimonoksidin sähkökemiallisen kennon avulla. Analysointilaitteeseen tuleva mitattava kaasu reagoi tunnistinelektrodin pinnalla. Esimerkiksi hiilimonoksidi oksidoidaan hiilidioksidiksi (1). (Raami 2003:20–21 & TSI 2012:3).



Reaktiossa vapautuneet elektronit tuottavat sähkövirran, jonka määrä tunnistinelektrodissa on suhteessa hiilimonoksidin määrään. Elektronivirtaa vahvistetaan ja hiilimonoksidipitoisuus saadaan mitattua. Vastaelektrodin pinnalla happi ja tunnistinelektrodin pinnalla tapahtuneessa reaktiossa vapautuneet protonit (H^+) ja elektronit (e^-) reagoivat muodostaen vettä (2). CA-CALC -analysointilaitteella laskee mitatuista arvoista mm. hiilidioksidin (CO_2) ja typenoksidien (NO_x) määrän. (Raami 2003:20–21 & TSI 2012:3).



Toisena mittalaitteena hapen määrittämiseen käytettiin paramagneettista Siemensin Oxymat 61 O_2 -mittaria. Analysointilaitteella käytetään huoneilmaa nollakaasuna ja typpeä spankaasuna. Kalibroitaessa analysointilaitteen tulee näyttää huoneilmalla nollapisteessä 20,95 % ja spankaasulla eli typellä 0 %. Ilmamäärän määrittämiseen käytettiin ABB:n Sensyflow FMT700-P -massavirtamittaria.

Hiukkasmassaa kerättiin laimennetusta pakokaasusta Dekatin PM10-hiukkasimpaktorin avulla. Impaktori pystyy keräämään 0–10 μm suuruiset hiukkaset. Tämän tutkielman mittauksissa suodatettiin 2,5–10 μm suuruiset hiukkaset pois ja kerättiin 1–1 000 nm suuruiset hiukkaset. Pakokaasu johdettiin lämmitettävän ja lämmittämättömän laimentimen läpi. Laimennos oli 64-kertainen. Laimennetun pakokaasun pienhiukkaset kerääntyivät 14 tai 21 minuuttia impaktorin suodatinpaperiin riippuen kuormituspisteestä. Aika mitattiin sekuntikellolla. Hiukkasten kimpoamista alumiinisista keräysfolioista pyrittiin vähentämään levittämällä niihin Impactor Foil Grease AG-10 Apiezon-1 -rasvaa. Ohjeessa rasva liuotetaan hiilitetrakloridiin (Apiezon-1 5 g/100 ml hiilitetrakloridi), mutta tässä tutkimuksessa rasva liuotettiin asetoniin. Vaikka rasva ei asetoniin täysin liuen-

nutkaan, ei hiilitetrakloridia käytetty sen myrkyllisyyden ja syöpää aiheuttavien tekijöiden vuoksi. Ennen mittauksen alkua suodatinpaperi punnittiin tarkasti ja mittauservoa verrattiin referenssiarvoon. Mittauksen päätyttyä suodatinpaperi punnittiin uudelleen ja laskettiin pienhiukkasten massa suodatinpaperin massa-arvojen erotuksesta.

Hiukkasten kokojakauma mitattiin TSI EEPS 3090 -hiukkasanalysaattorilla laimennetusta pakokaasusta. Ennen jokaista mittausta hiukkasanalysaattori kalibroitiin puhtasilmasuodattimen avulla. Kokojakaumaa mitattiin 3 minuutin ajan jokaisessa mittauspisteessä. Mittattava kokojakauma oli 6–300 nm, joten pääosin puhutaan ultrapienistä hiukkasista (< 0,1 µm). Tämän kokoluokan hiukkasten aiheuttamista terveyshaitoista ihmiselle tiedetään vain vähän. (Huttunen 2012). Analysaattoria ohjattiin tietokoneelta mittalaitteen omalla Engine Exhaust Particle Sizer -ohjelmalla. Laimennuskertoimena käytettiin 406, mutta tutkimusajojen jälkeen kävi ilmi, että valmistajan antama laimennuskertoimen oli väärä. Laimennoksen olisi pitänyt olla 122-kertainen. Tutkielman hiukkasten kokojakaumien tulokset on laskettu oikealla 122-kertaisella laimennoksella.

Moottorin savutus mitattiin AVL 415 S -savutusmittarilla. Mittaustulosten suurena käytettiin mittalaitteen omaa suuretta FSN eli Filter Smoke Number. FSN-arvot ovat vertailukelpoisia vain keskenään.

3.2.3 Lämpötilojen ja paineiden mittalaitteet sekä mittauspisteet

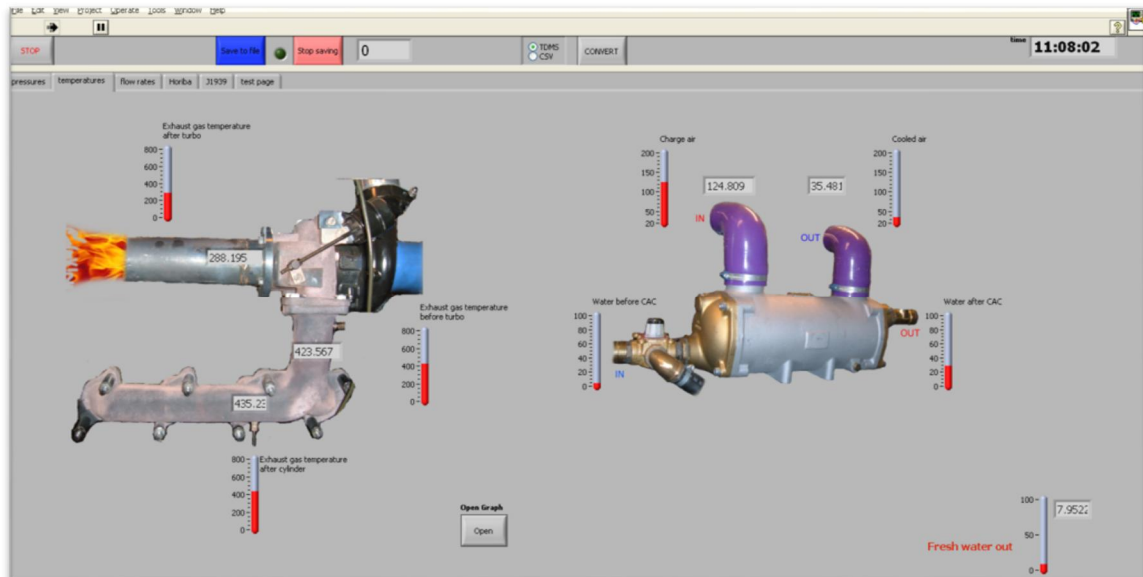
Moottorin sylinteripaineet ja lämmönvapautuminen mitattiin Kistler KiBox Cockpit -indikaattorilla yhdestä sylinteristä. Sylinteripaineesta otettiin 100 näytettä jokaisesta kuormituspisteestä. Tuloksien laskennassa on käytetty 100 näytteen keskiarvoa.

Lämpötila-antureina käytettiin K-tyypin termopareja. Niissä positiivisena napana toimii nikkeli-kupari-seos ja negatiivisena napana nikkeli-alumiini-seos. Mittausalue on -200–1100 °C. (Pietiko Oy 2009:2).

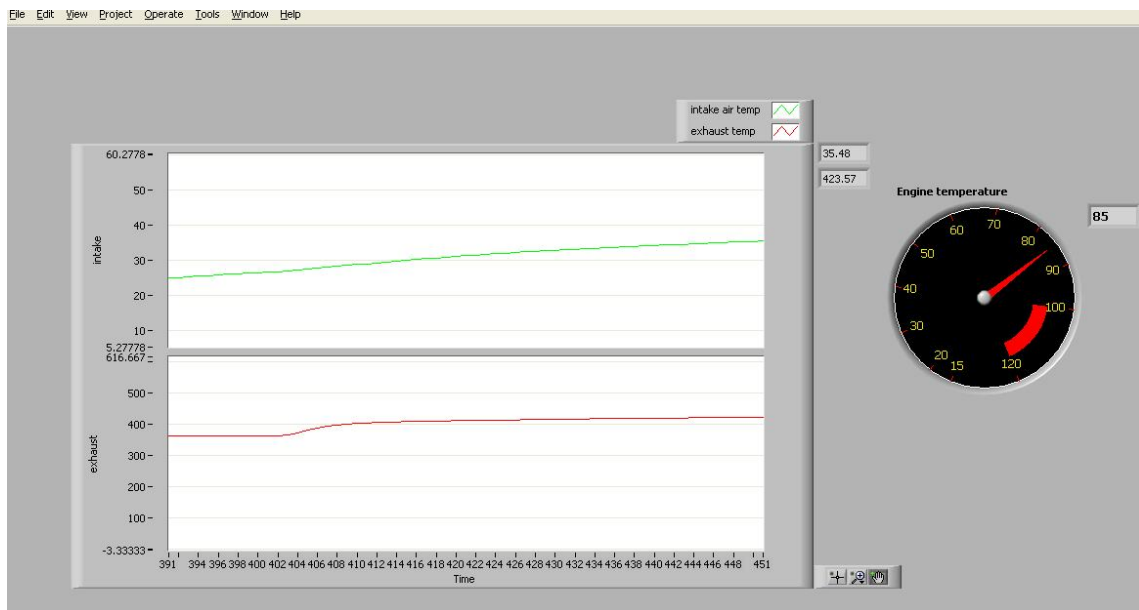
Mittauspisteinä olivat pakokaasun lämpötila sylinterin 2 jälkeen (Exhaust gas temperature after cylinder 2) sekä ennen turboa (Exhaust gas temperature before turbo) ja turbon jälkeen (Exhaust gas temperature after turbo). Lämpötila-anturit oli sijoitettu moottorin pakosarjaan siten, että ”Exhaust gas temperature after cylinder 2” mittasi heti kakkos-

sylinterin jälkeisen pakokaasun lämpötilan. Erona ”Exhaust gas temperature before turbo” -anturin antamaan mittaustulokseen on, että jälkimmäinen on kaikkien sylintereiden jälkeisen pakokaasun lämpötilan keskiarvo.

Välijäähdyttimestä mitattiin sisäänmenevän ja ulostulevan jäähdytysveden lämpötilat sekä ahdetun ilman lämpötila ennen välijäähdytintä ja sen jälkeen. Lisäksi moottorin lämpötilaa seurattiin jatkuvasti. Kuvassa 4 nähdään LabView-ohjelman avulla tarkasteltavat lämpötilojen mittauspisteet. Kuvassa 5 taas on esitetty graafisesti ahdetun sisäänottoilman ja turboa edeltävän pakokaasun lämpötilat sekä moottorin lämpötila.

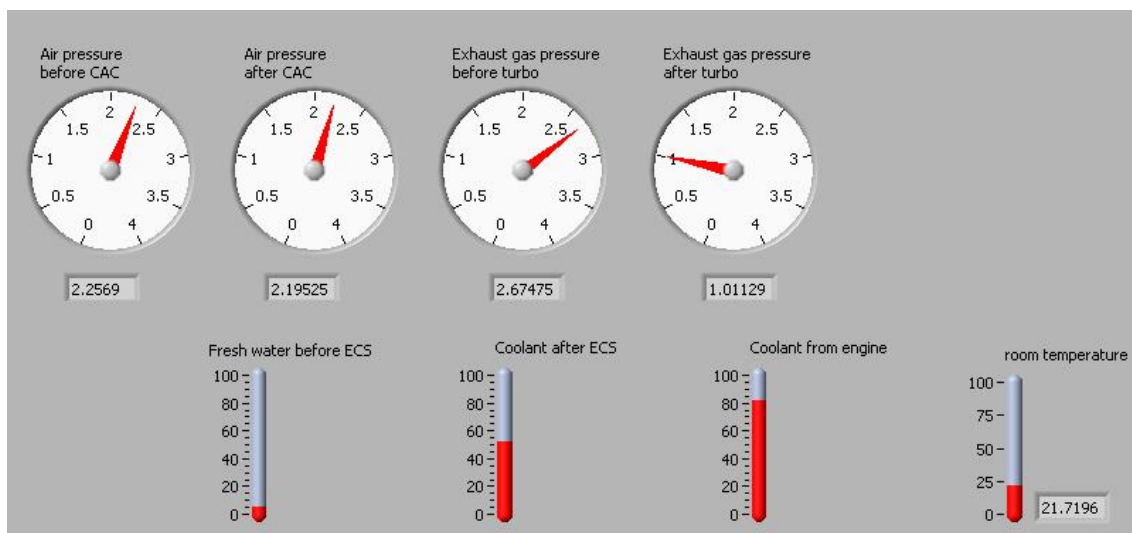


Kuva 4. Lämpötilojen mittauspisteet.



Kuva 5. Imusarjan ja turboa edeltävän pakokaasun lämpötilojen graafiset esitykset LabView-ohjelmassa.

Paineantureina käytettiin teollisuusantureita, jotka antoivat 4–20 mA virtaviestin painealueella 0–4 bar. Mittauspisteinä olivat ilmanpaine ennen välijäähdytintä ja sen jälkeen, pakokaasun paine ennen ja jälkeen turbon sekä puhtaan veden paine ennen ja jälkeen lämmönvaihtimen (ECS). Lisäksi kuvassa 6 on moottorin jäähdytysnesteen lämpötila sekä moottorihuoneen lämpötila.



Kuva 6. Paineiden ja lämpötilojen mittauspisteet LabView-ohjelmassa.

4 POLTTOAINEET

Moottoria ajettiin yhteensä viidellä eri polttoaineella (DFO, AFME, HVO, FISH, FISH-OIL). Moottoripolttoöljy oli vähärikkinen diesel (DFO), eläinperäinen biodiesel (AFME), esteröity kaladiesel (FISH), raaka esteröimätön kalaöljy (FISHOIL) ja uusiutuvista raaka-aineista valmistettu vetykäsitelty diesel (HVO). Kuvassa 7 on esitetty käytetyt polttoaineet lukuunottamatta HVO:ta, joka oli kirkasta.



Kuva 7. Ajoissa käytetyt polttoaineet vasemmalta oikealle ovat AFME, DFO, FISH ja FISHOIL. Kuvasta puuttuu HVO.

4.1 Eläinperäinen biodiesel

Eläinperäisen biodieselin raaka-aineena käytetään eläinrasvaa, joka saadaan ainoastaan sivutuotteista. Näin ollen siihen ei käytetä elintarvikkeiden raaka-aineita. Biodiesel on rikittömä polttoainetta, joka valmistetaan n.s. batch-prosessorissa, eikä valmistukseen tarvita vettä. Menetelmä säästää ympäristöä, ja saatu biodiesel vähentää kasvihuonepäästöjä yli 80 % verrattuna fossiilisten polttoaineiden päästöihin. Öljy on luonnontuote, joka hajoo erittäin nopeasti, jos sitä pääsee valumaan luontoon tai vesistöön. Biodiesel tilattiin Ab Feora Oy:ltä. (Ab Feora Oy 2013).

4.2 Kaladiesel ja kalaöljy

Kaladiesel on peräisin kirjolohen perkuujätteestä ja sopii sellaisenaan käytettäväksi dieselmootoreissa. Tavoitteena on ollut, että kalanperkuujätteen määrä vähentyy ja samalla saadaan tuotettua uusiutuvaa polttoainetta kalastusaluksiin. Öljyä tuotetaan 400 litraa päivittäin ja prosessissa tarvittavien kemikaalien kustannukset ovat n. 20 snt/litra. Kustannuksia nostaa valtiolle maksettava polttoainevero 38 snt/litra. Laiteinvestointien on laskettu kuitenkin maksavan itsensä takaisin 5–6 vuodessa. Ahvenanmaalla syntyy vuosittain 1200 tonnia kalanperkuujätettä, josta saataisiin tehtyä 500 tonnia biodieseliä. Ainoastaan valmistusprosessissa syntyville ylijäämäproteiineille (mm. gelatiini, insuliini ja albumiini) ei ole keksitty käyttökohdetta. Konkreettisesti käytössä kaladiesel on jo ahvenanmaalaisissa paikallisbusseissa, jotka omistaa kuljetusliike Röde Orm. Kaladiesel ja kalaöljy tilattiin Ahvenanmaalta kalanviljelylaitos Storfjärdens Fisk Ab:lta. (Laine 2011:9–10; Broström & Sjöblom 2012).

Kaladieselin valmistusprosessissa kalaöljy erotellaan teurastusjätteestä muurahaishapon ja antioksidanttien avulla. Öljy lämmitetään 45–60 °C lämpötilaan ja seokseen lisätään metanolia ja lipeää. Sivutuotteena syntyy glyseriiniä (15–20 %), joka eriytyy tankin pohjaan ja biodiesel jää kellumaan. Diesel pestään veden ja ilman avulla, mistä syntyy sivutuotteena saippuaa. Saippua pumpataan pois ja diesel lämmitetään 110 °C lämpötilaan, jolloin vesijäämät saadaan haihdutettua pois. Kaladieselin ja kalaöljyn tarkemmat ominaisuudet on esitetty taulukossa 10. (Broström ym. 2012).

4.3 Vetykäsittely 100 % uusiutuva diesel

Kasvi- ja eläinrasvojen vetykäsittely on vaihtoehto vaihtoesteröinnille tuotettaessa biopohjaista dieselöljyä. Vetykäsittelyjä dieseleitä kutsutaankin uusiutuviksi dieselöljyiksi, kun vaihtoesteröintimenetelmällä valmistettuja dieseleitä kutsutaan biodieseleiksi.

Kemiallisesti HVO (hydrotreated vegetable oil) on parafiinihiilivetyjen sekoitus eikä sisällä rikkiä, happea, typpeä eikä aromaatteja. HVO-polttoaineen kylmäominaisuuksia voidaan muokata ympäristön vaatimuksien mukaiseksi säätämällä prosessia tai lisäaineil-

la. HVO-polttoaine sytty nopeasti suuren setaaniluvun ansiosta, mikä vähentää käynnistyksen yhteydessä esiintyvää kylmäsavutusta. Lisäksi moottorin käyntiäänä vaimenee ja puhtaamman palamisen ansiosta päästöjä syntyy vähemmän. (Aatola, Larmi, Mikkonen & Sarjovaara 2009:1251–1252).

HVO-polttoainetta voidaan valmistaa monenlaisista öljyistä ilman, että polttoaineen laadusta jouduttaisiin tinkimään. Käytettäviä kasviöljyjä ovat mm. rypsiöljy, auringonkukkaöljy, soijaöljy ja palmuöljy. Mainittujen kasviöljyjen käyttö kuitenkin kilpailee ruoan tuotannon kanssa, joten ruoaksi kelpaamattomat kasvit ja levät tulevat olemaan tulevaisuuden öljyn lähteitä (esimerkiksi jatropha). Myös eläinperäinen rasva sopii HVO-polttoaineen raaka-aineeksi. (Aatola ym. 2009:1251–1252).

HVO-polttoaineen tuotantoprosessissa ensimmäinen vaihe on esikäsitely, jossa raaka-aineet laitetaan syöttösäiliöön ja käsitellään 75-prosenttisella fosforihapolla, 50-prosenttisellä natriumhydroksidilla ja vedellä. Esikäsitellyn seoksen rasvahapot vedytetään n-parafiineiksi. Vedytysvaiheen katalyytteinä käytetään rikinpoistokatalyyttejä, kuten Ni-Mo/Al₂O₃ tai CoMo/Al₂O₃. Seuraavassa vaiheessa n-parafiinit isomeroidaan edelleen haaraketjuisiksi parafiineiksi. Isomeroinnin avulla hiilivetyjen seokseen saadaan hyvät kylmäominaisuudet. Isomeroinnissa n-parafiinin molekyyli­rakennetta käsitellään katalyytin (esim. Pt/SAPO-11/Al₂O₃) avulla siten, että hiilten kokonaismäärä säilyy suurena ja hiiliketjuun syntyy metyylihaaroja. Lopuksi saatu tuote stabiloidaan. Valmistus­prosessissa ei tarvita lisäkemikaaleja, kuten metanolia triglyseridin hajottamiseen, eikä sivutuotteena synny glyserolia. (Siitonen & Stade 2006:5–7; Aatola ym. 2009:1251–1252).

HVO-polttoaineet koostuvat hiilivedyistä, joten niiden tulee täyttää tavanomaiset dieselille asetetut vaatimukset (EN 590). Esteröintimenetelmällä valmistettujen FAME-polttoaineiden (fatty acid methyl esters) tulee sen sijaan täyttää biopolttoainestandardi EN 14214, joka ei koske HVO-polttoaineita. (Aatola ym. 2009:1251–1252).

4.4 Polttoaineiden ominaisuudet

Ajoissa käytetyt polttoaine-erät analysoitiin Neste Oil Oyj:n Naantalin tutkimuslaboratoriossa (tulostiedote liitteessä 9). Taulukkoon 10 on kerätty polttoaineiden analysointitulokset. Mittauksissa kävi ilmi, että kalaöljy oli liian viskoosia setaanilukumäärittukseen. HVO-polttoaineen analyysituloksia ei julkaistu valmistajan pyynnöstä.

Taulukko 10. Polttoaineiden ominaisuuksia.

		DFO	AFME	FISH	FISHOIL	HVO	Method
C	wt-%	86.1	76.5	77.3	77.2	84.4	ASTMD5291
H	wt-%	13.7	12.3	12	11.5	14.9	ASTMD5291
N	wt-%	0.192	0.185	0.168	0.132	-	ASTMD5291
S	mg/kg	3.3	19	1.9	2.1	<1	ENISO20846
Ash, 775 °C	wt-%	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	ENISO6245
Cetane number		54.1	59.4	51	*	81.7	ASTMD6890
HHV	MJ/kg	45.93	39.73	39.82	39.50	-	-
HHV/VY	MJ/kg	45.78	39.91	39.75	40.19	-	-

* FISHOIL was too viscose for measuring cetane number.

Kaladieselistä (FISH), kalaöljystä (FISHOIL) ja eläinperäisestä biodieselistä (AFME) analysoitiin rasvahappokoostumukset Eurofins Scientific Finland Oy:n Rasion tutkimuslaboratoriossa. Rasvahappokoostumukset ovat osittain taulukossa 11 (tutkimustodistukset ovat liitteissä 10–12). Analyyseistä saatiin myös laskennalliset jodiluvut. Eläinperäisen biodieselin jodiluku oli pienin (79). Kaladieselillä sekä kalaöljyllä arvo oli 132.

DFO:n, AFME:n, FISH:n ja FISHOIL:in ylemmät lämpöarvot analysoitiin pommikalorimetrillä Tutkimuskeskus Technobothnian Ympäristö- ja laboratoriotekniikan laboratoriossa. Vertailun vuoksi lämpöarvomittaukset tehtiin myös toisen laboratorion laitteilla. Tulokset on esitetty taulukon 10 lopussa. Tutkitun HVO:n valmistajan ilmoittama alempi lämpöarvo oli 43,93 MJ/kg. Lisäksi muita Tutkimuskeskus Technobothnian Ympäristö- ja laboratoriotekniikan laboratoriossa tehtyjä mittaustuloksia löytyy liitteestä 13.

Setaaniluku ilmoittaa dieselpolttoaineen syttymisherkkyyden. Moottorin palotilaan ruiskutettu polttoaine syttyy viiveen jälkeen korkean paineen ja lämpötilan vaikutuksesta. Lyhyt viive tarkoittaa, että polttoaine syttyy nopeasti palotilaan ruiskuttamisen jälkeen ja polttoaineella on suuri setaaniluku. Pidemmän viiveen ja pienemmän setaaniluvun omaava polttoaine aiheuttaa melua ja nopea paineen nousu voi rasittaa moottoria. Myös päästöt saattavat lisääntyä. Dieselpolttoaineilla setaaniluku vaihtelee tavallisesti välillä 40–55 asteikolla 0–100. Kuten taulukosta 10 huomataan, HVO:n setaaniluku (81,7) oli huomattavasti suurempi kuin muiden polttoaineiden. (Neste Oil 2012).

Taulukko 11. Kaladieselin, kalaöljyn ja eläinperäisen biodieselin rasvahappokoostumukset.

Fatty acid		AFME	FISH	FISHOIL
12:0	%	0.1	-	-
14:0	%	2.4	3.1	3.0
i-15:1	%	0.1	0.1	0.1
ai-15:1	%	0.1	-	-
14:1 cis	%	0.2	-	-
15:0	%	0.2	0.3	0.2
i-16:0	%	0.1	-	-
16:0	%	16.8	11.3	11.2
16:1 cis	%	7.4	4.5	4.5
16:4 n-3 cis	%	-	0.3	0.3
17:0	%	0.4	0.2	0.2
17:1	%	0.3	0.1	0.1
18:0	%	8.1	2.6	2.6
18:1 cis	%	48.0	33.3	33.5
18:2 n-6 cis	%	9.7	16.6	17.6
18:2 other isomers	%	0.6	0.8	0.8
20:0	%	0.1	0.2	0.2
20:1	%	0.9	3.1	2.9
18:3 n-3 cis (ALA)	%	1.2	3.6	3.4
18:4 n-3 cis (SDA)	%	-	0.9	0.8
20:2 n-6 cis	%	0.3	0.8	0.9
22:0	%	-	0.1	0.1
22:1	%	0.2	2.8	2.5
20:3 n-3 cis	%	0.1	0.3	0.3
20:3 n-6 cis	%	-	0.2	0.2
20:4 n-6 cis	%	0.3	0.3	0.3
20:4 n-3 cis	%	0.2	0.8	0.8
20:5 n-3 cis (EPA)	%	0.3	3.5	3.3
24:1	%	-	0.3	0.3
22:5 n-3 cis (DPA)	%	0.4	1.6	1.6
22:6 n-3 (DHA)	%	0.9	6.4	6.4
Saturated fatty acids total	%	28.4	18.1	18.0
Monounsaturated fatty acids total	%	57.1	44.2	43.9
Polyunsaturated fatty acids total	%	14.1	36.8	37.4
Iodine		79.3	131.8	132.0

5 TULOKSET

Tutkielmassa pyrittiin ensisijaisesti selvittämään vähärikkisen dieselpolttoaineen (DFO), esteröidyn kaladieselin (FISH), eläinperäisen biodieselin (AFME) sekä vetykäsitellyn dieselin (HVO) ominaisuuksien eroavaisuudet ajettaessa tutkimusmoottorilla.

Mittaus tuloksia pyritään hyödyntämään moottorin simulointimallissa. Mallin avulla voidaan jatkossa hankkia suuntaa-antavia suoritusarvo- ja päästötuloksia lyhyessä ajassa useiden mittauspäivien sijasta syöttämällä malliin halutun polttoaineen ominaisuudet.

Mallinnustiedon lisäämiseksi tutkittiin myös neljän erilaisen ruiskutussuutinsarjan vaikutuksia mitattaviin suureisiin samalla työkonedieselmoottorilla. Suutinvertailu suoritettiin käyttäen polttoaineena vähärikkistä dieseliä, mutta suurimmat ruiskutusreiät omaavilla suuttimilla ajettiin myös raakaa, esteröimätöntä kalaöljyä (FISHOIL). Suuren viskositeetin vuoksi moottorilla pystyttiin kalaöljyllä ajamaan vain syklin kuormistuspisteet 4, 7 ja 8. Lisäinformaation saamiseksi lisättiin yksi mittauspiste: 1500 kierrosta minuutissa 25 % kuormalla. Mittausajot sijoituivat vuoden 2012 loppupalveen ja kevääseen taulukon 12 mukaisesti.

Taulukko 12. Mittausajojen ajankohdat.

Fuel	Measurement date
DFO	15.2.2012
FISH	22.2.2012
AFME	29.2.2012
HVO	12.4.2012
DFO, 8 LF	25.4.2012
DFO, 10 HF	2.5.2012
DFO, 6 HF	8.5.2012
FISHOIL, 6 HF	9.5.2012

5.1 Polttoainevertailu

Polttoainevertailussa ajettiin neljää eri polttoainetta: DFO, FISH, AFME ja HVO. Vähärikkisellä dieselpolttoaineella ajettiin kaksi mittausajoa, mutta vertailuun otettiin vain ensimmäinen mittausajo. Valinta perustui siihen, että jälkimmäisessä mittausajossa tuli ongelmia hiukkasten kokojakaumaa mittaavan hiukkanalysointilaitteen kanssa. Näin ollen toisesta DFO:n mittausajosta ei ollut saatavilla EEPS-tuloksia.

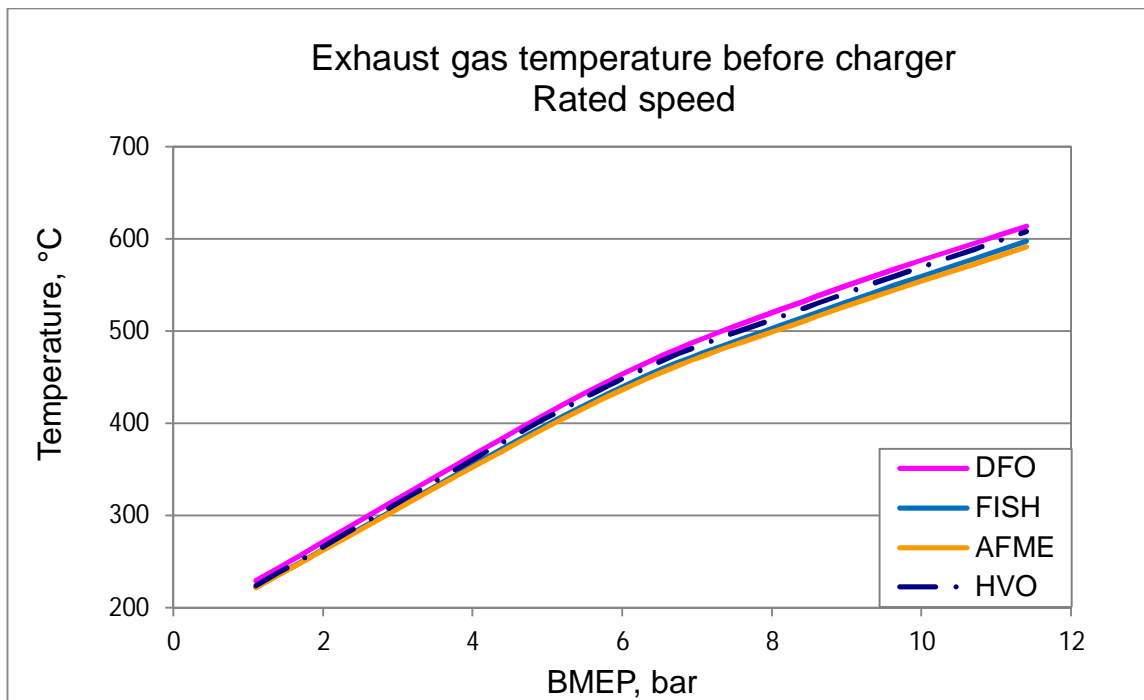
Vertailussa keskityttiin moottorin sylinteripaineisiin, sylintereissä tapahtuvaan lämmönvapautumiseen, savutukseen, pakokaasun typen oksideihin, hiilimonoksidi- ja hiilivety- päästöihin sekä pienhiukkasten lukumäärään. Myös pakokaasun lämpötilaa ennen ahdinta sekä ahtopainetta välijäähdyttimen jälkeen vertailtiin tarkemmin.

5.1.1 Pakokaasun lämpötila ja ahtopaine

Pakokaasun lämpötila on mitattu sylinterien jälkeen, ennen ahdinta. Pääsääntöisesti DFO:lla ajettaessa lämpötila oli korkeampi kuin muilla polttoaineilla. AFME:lla taas mitattiin alhaisimmat lämpötilat niin nimellis- kuin välinopeudellakin.

Nopeudella 2200 r/min polttoaineiden väliset pakokaasun lämpötilaerot eivät olleet kovin suuria (kuva 8). Täydellä kuormalla DFO:lla oli korkein lämpötila n. 610 °C ja AFME:lla alhaisin n. 590 °C. Toisessa kuormitusasteessa (75 % kuorma) lämpötila kohosi DFO:lla n. 540 asteeseen ja AFME:lla taas n. 520 asteeseen. Puolella kuormalla DFO:lla saatiin lämpötilan arvoksi n. 440 °C ja AFME:lla n. 430 °C. Viimeisellä kuormitusasteella (10 % kuorma) DFO:lla pakokaasun lämpötila oli n. 230 °C ja AFME:lla n. 220 °C.

Välinopeudella pakokaasun lämpötila ennen ahdinta oli korkeampi kaikilla polttoaineilla kuin nimellishopeudella (kuva 9). Täydellä kuormalla DFO:lla pakokaasun lämpötilaksi mitattiin n. 650 °C, HVO:lla n. 640 °C, FISH:illä n. 630 °C ja AFME:lla n. 620 °C. Seuraavassa kuormitusasteessa (75 % kuorma) DFO:lla saatiin arvo n. 580 °C ja AFME:lla n. 560 °C sekä 50 % kuormalla DFO:lla n. 490 °C ja AFME:lla n. 480 °C.



Kuva 8. Pakokaasun lämpötila ennen ahdinta nopeudella 2200 r/min.

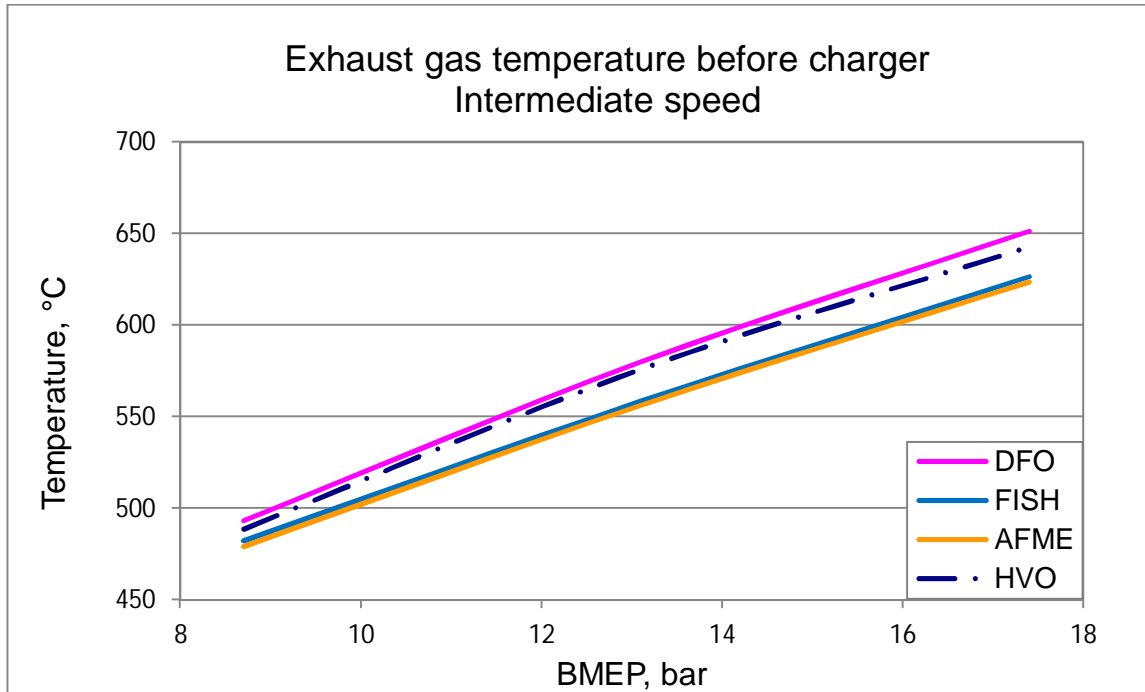
Kuvassa 10 on esitetty ahtopaine nopeudella 2200 rpm välijäähdyttimen jälkeen. Ahtopaineissa ei ollut merkittäviä eroja ajettaessa eri polttoaineilla. Ensimmäisessä kuormituspisteessä (100 % kuorma) kaikilla polttoaineilla ahtopaine oli n. 2,4 bar. Ennen välijäähdytintä ahtopaine oli kaikilla polttoaineilla n. 0,07 bar:ia korkeampi.

Toisessa kuormituspisteessä (75% kuorma) ahtopaine oli kaikilla polttoaineilla n. 2,1 bar, 50 % kuormalla 1,7 bar ja 10 % kuormalla n. 1,1 bar. Näissä kuormituspisteissä jäähdytetyn ja jäähdyttämättömän ahtopaineen erotus oli n. 0,02–0,06 bar:ia kasvaen kuorman kasvaessa.

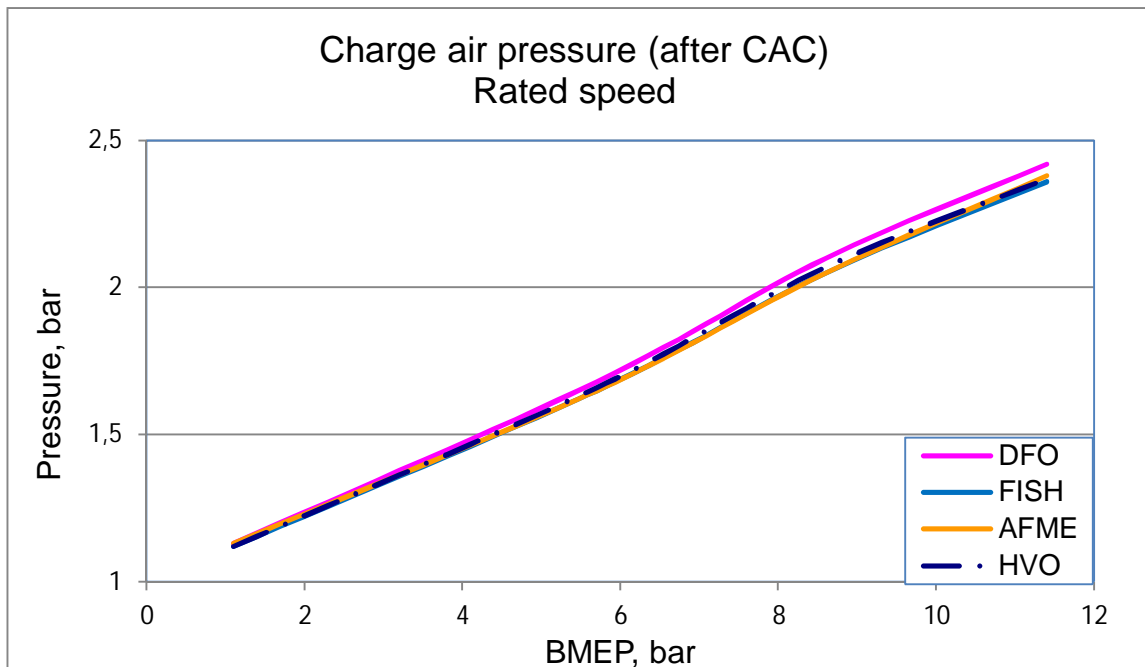
Välinopeudella ahtopaine oli 100 % kuormalla DFO:lla korkein 2,4 bar, muilla polttoaineilla taas 2,3 bar (kuva 11). Kuten nimellinopeudella, myös välinopeudella jäähdyttämättömän ja jäähdytetyn ahtoilman paine-ero oli ensimmäisessä kuormituspisteessä n. 0,07 bar.

Seuraavassa kuormituspisteessä (75 % kuorma) ahtopaine oli FISH:llä n. 1,9 bar ja muilla n. 2,0 bar. Nopeudella 1500 rpm viimeisessä kuormituspisteessä (50 % kuorma) ahto-

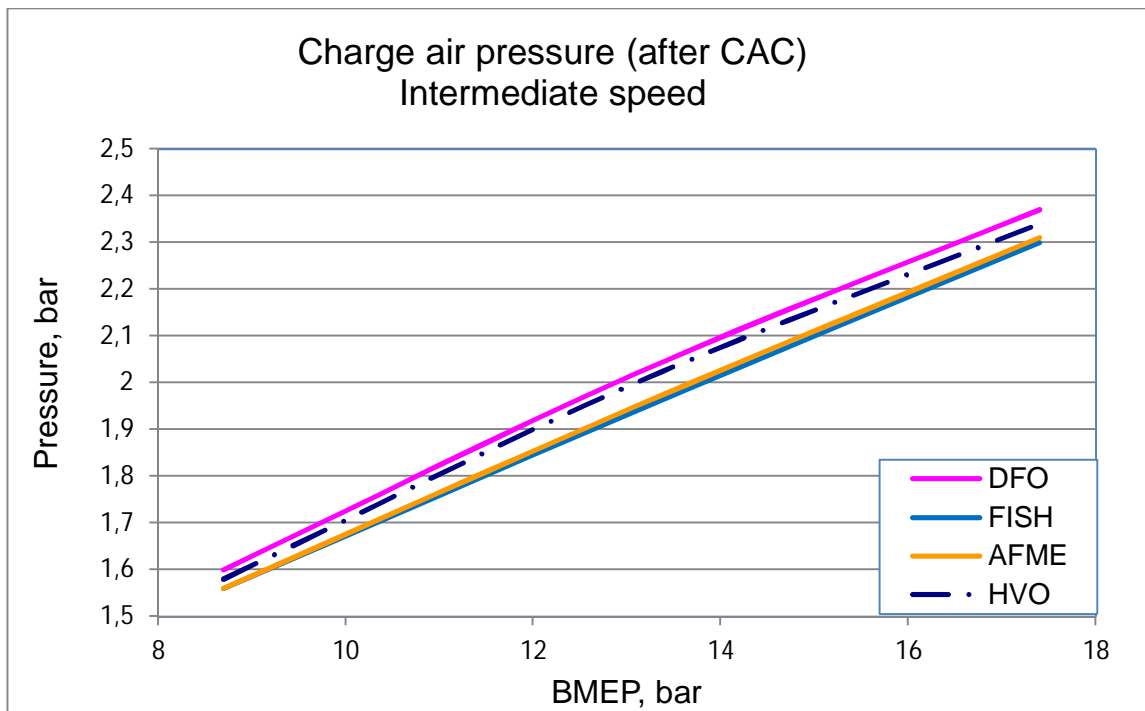
paine oli kaikilla polttoaineilla n. 1,6 bar. Ennen välijäähdytintä ahtopaine oli n. 0,04–0,06 bar korkeampi.



Kuva 9. Pakokaasun lämpötila ennen ahdinta nopeudella 1500 r/min.



Kuva 10. Ahtopaine välijäähdyttimen jälkeen nopeudella 2200 r/min.



Kuva 11. Ahtopaine välijäähdyttimen jälkeen nopeudella 1500 r/min.

5.1.2 Sylinteripaine ja lämmönvapautuminen

Sylinteripaineesta otettiin 100 näytettä jokaisesta kuormi-tuspisteestä. Tulosten laskennassa on käytetty 100 näytteen keskiarvoa. Sylinteripainetulokset on esitetty bareina kammengkulman astetta kohden ja lämmönvapautuminen jouleina kammengkulman astetta kohden.

Sylinteripaineiden kuvaajista huomataan, että puristuksen maksimipaine esiintyy hieman ennen yläkuolokohtaa. Erityisesti tämä näkyy 100 % ja 75 % kuormilla, joissa palaminen alkaa vasta yläkuolokohdan jälkeen. Tarkemmin sylinteripaineita tutkittaessa todettiin, että puristuspaineen maksimiarvo oli -2 kammengkulma-asteen kohdalla moottorin käydessä 1000 kierrosta minuutissa. Tämä ei vaikuttanut saatuihin mittaustuloksiin, mutta on hyvä ottaa huomioon tuloksia tarkasteltaessa.

Taulukossa 13 on esitetty polttoaineiden ruiskutusajankohdat kammengkulma-asteissa täydellä kuormalla. Nimellisa nopeudella kaikkien polttoaineiden esiruiskutukset (pilot) olivat samassa kohdassa eli -9° CA. Ensimmäinen pääruiskutus (main 1) alkoi -4 asteen kohdalla jatkuen 17 asteeseen asti. Ensimmäisessä pääruiskutuksessa DFO:ta ruiskutettiin n.

82 mg, HVO:ta n. 83 mg sekä AFME:a n. 91 mg ja FISH:iä n. 90 mg. Kahdenkymmenen asteen kohdalla lämmönvapautuminen oli nopeinta, n. 95 joulea kammengkulma-astetta kohden. Toinen pääruiskutus (main 2) oli 31 asteen kohdalla, jolloin myös lämmönvapautumisessa nähtiin toinen huippu. Lämpöä vapautui vajaa 90 joulea kammengkulma-astetta kohden. Tämän jälkeen lämmönvapautuminen hidastui (liite 15).

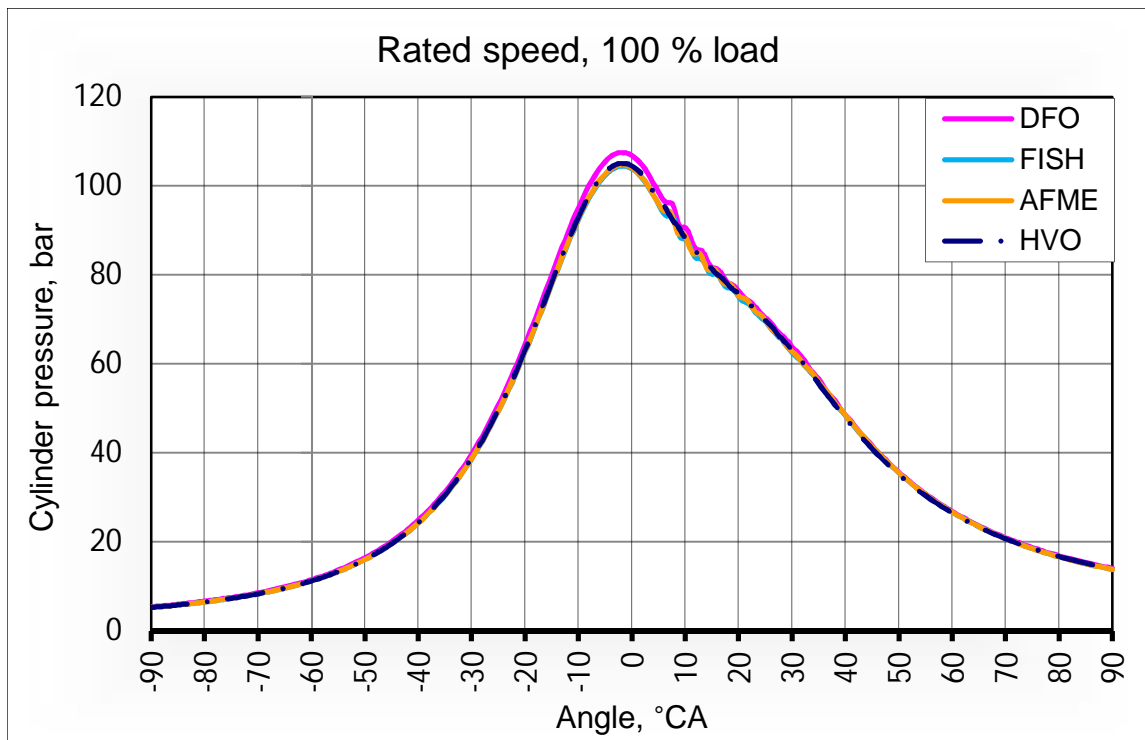
Taulukko 13. Ruiskutusajankohdat täydellä kuormalla.

Injection timing, 100 % load						
(° CA)	Rated speed			Intermediate speed		
	Pilot	Main 1	Main 2	Pilot	Main 1	Main 2
DFO	-9	-4-16	30	-8-(-5)	-2-22	31-33
HVO	-9	-4-17	31	-8-(-5)	-2-22	31-33
AFME	-9	-4-18	32	-10-(-7)	-4-22	32
FISH	-9	-4-18	32	-10-(-7)	-4-22	32

Kuvassa 12 on esitetty sylinteripaineet nimellinopeudella 100 % kuormalla. Paineet eivät juurikaan riippuneet käytettävästä polttoaineesta. DFO aiheutti hieman suuremman maksimipaineen kuin muut polttoaineet (n. 110 bar).

Kaikissa lämmönvapautumista esittävässä kuvissa havaitaan, että lämpöä sitoutuu ennen palamisprosessin alkamista polttoaineen höyrystyessä ja sylinteripaineen noustessa. Lämmönvapautumiskuvaaja nimellinopeudella ja täydellä kuormalla on liitteessä 15. Moottorin käynti ei ollut kovin vakaata ja derivaatta oli levoton kaikilla polttoaineilla.

Välinopeudella 100 % kuormalla DFO:n ja HVO:n painekäyrät vastasivat toisiaan, kun taas FISH:n ja AFME:n painekäyrät erosivat kahdesta edellisestä yläkuolokohdan jälkeen. Maksimipaine DFO:lla oli n. 120 bar (kuva 13).

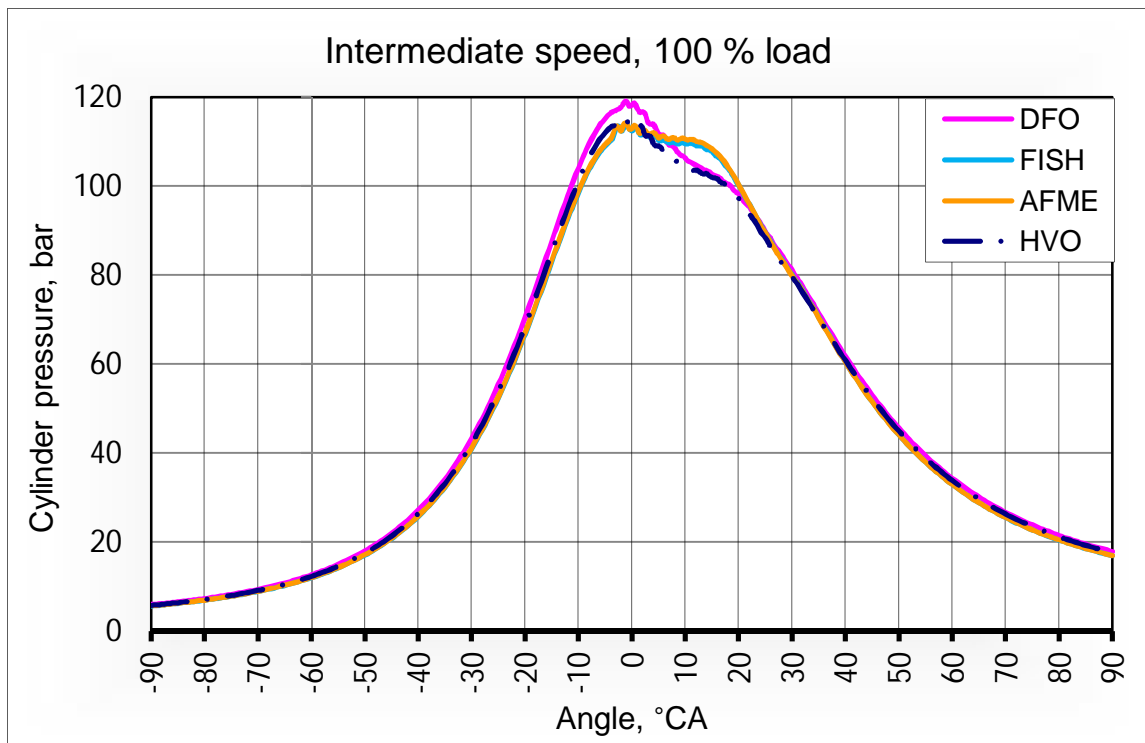


Kuva 12. Sylinteripaineet nimellisnopeudella 100 % kuormalla.

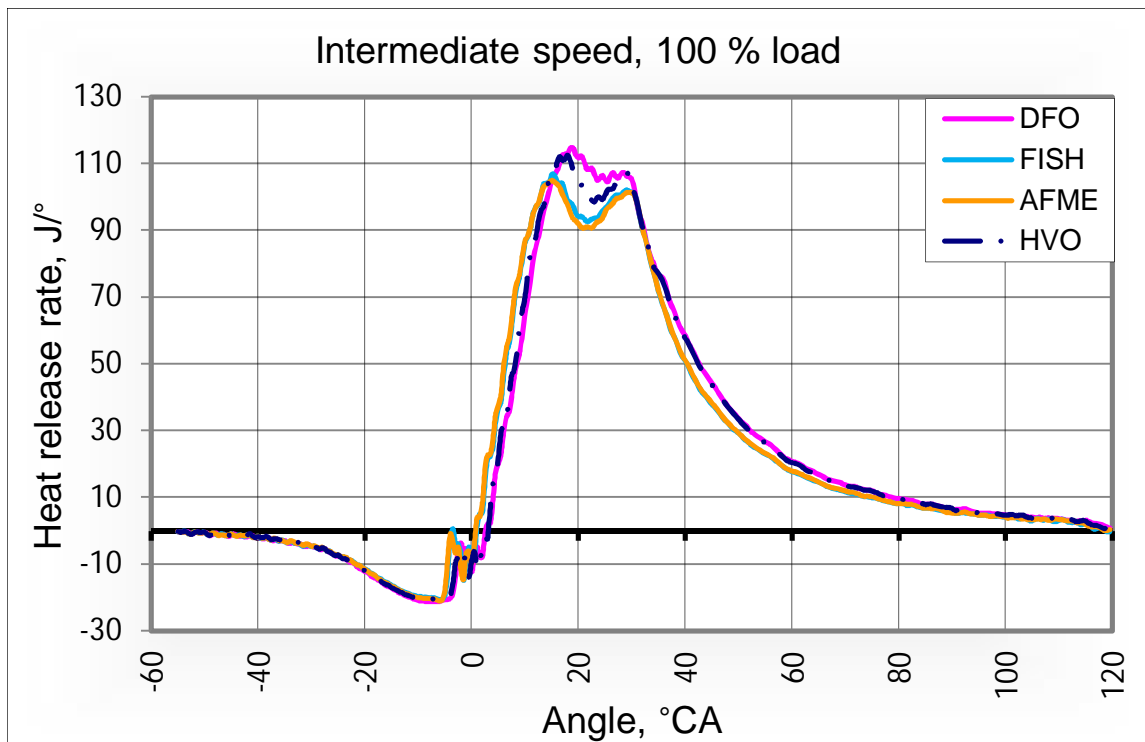
Lämmönvapautumiskuvaajassa välinopeudella ja täydellä kuormalla (kuva 14) FISH ja AFME muodostavat toisen käyrän sekä DFO ja HVO toisen. FISH:llä ja AFME:lla esiruiskutus alkoi -10 kammukulma-asteen kohdalla jatkuen -7 asteeseen eli lämmönvapautuminen alkoi aiemmin kuin DFO:lla ja HVO:lla [-8-(-5) °CA]. Myös ensimmäinen pääruiskutus alkoi FISH:llä ja AFME:lla aikaisemmin (-4-22 °CA). Ruiskutusmäärissä oli hieman eroa. AFME:a ja FISH:iä ruiskutettiin ensimmäisessä pääruiskutuksessa n. 127 mg, HVO:ta n. 114 mg ja DFO:ta n. 112 mg. Lämmönvapautumisen maksiminopeus oli HVO:lla n. 113 joulea kammukulma-astetta kohden pääruiskutuksen aikana eli 18 asteen kohdalla. Toinen huippu nähtiin toisen pääruiskutuksen kohdalla (n. 29 °CA), jolloin HVO vapautti n. 110 J/°CA. Yhteensä polttoainetta ruiskutettiin AFME:lla n. 130 mg, FISH:llä n.129 mg, HVO:lla n. 117 mg ja DFO:lla n. 115 mg.

Taulukossa 14 on esitetty polttoaineiden ruiskutusajankohdat kammukulma-asteissa moottorin käydessä 2200 kierrosta minuutissa 75 prosentin kuormalla. Kaikkien polttoaineiden esiruiskutukset olivat samassa kohdassa eli -8 ° CA (kuva 16). Ensimmäinen pääruiskutus alkoi -3 asteen kohdalla jatkuen 13 asteeseen asti DFO:lla sekä HVO:lla ja 15 asteeseen asti AFME:lla ja FISH:illä. Ruiskutettavan polttoaineen määrä ensimmäisessä

pääruiskutuksessa vaihteli n. 60–70 milligramman välillä. Estereitä ruiskutettiin eniten ja DFO:ta vähiten. Kuvan 16 ensimmäinen lämmönvapautumispiikki oli n. 10 asteen kohdalla, jolloin FISH:illä vapautui lämpöä n. 54 J/° CA. Kahdenkymmenenviiden asteen kohdalla lämmönvapautuminen oli nopeinta n. 91 joulea kammukulma-astetta kohden (AFME). Toinen pääruiskutus oli 27 asteen kohdalla. Tämän jälkeen lämmönvapautuminen hidastui.



Kuva 13. Sylinteripaineet välinopeudella 100 % kuormalla.

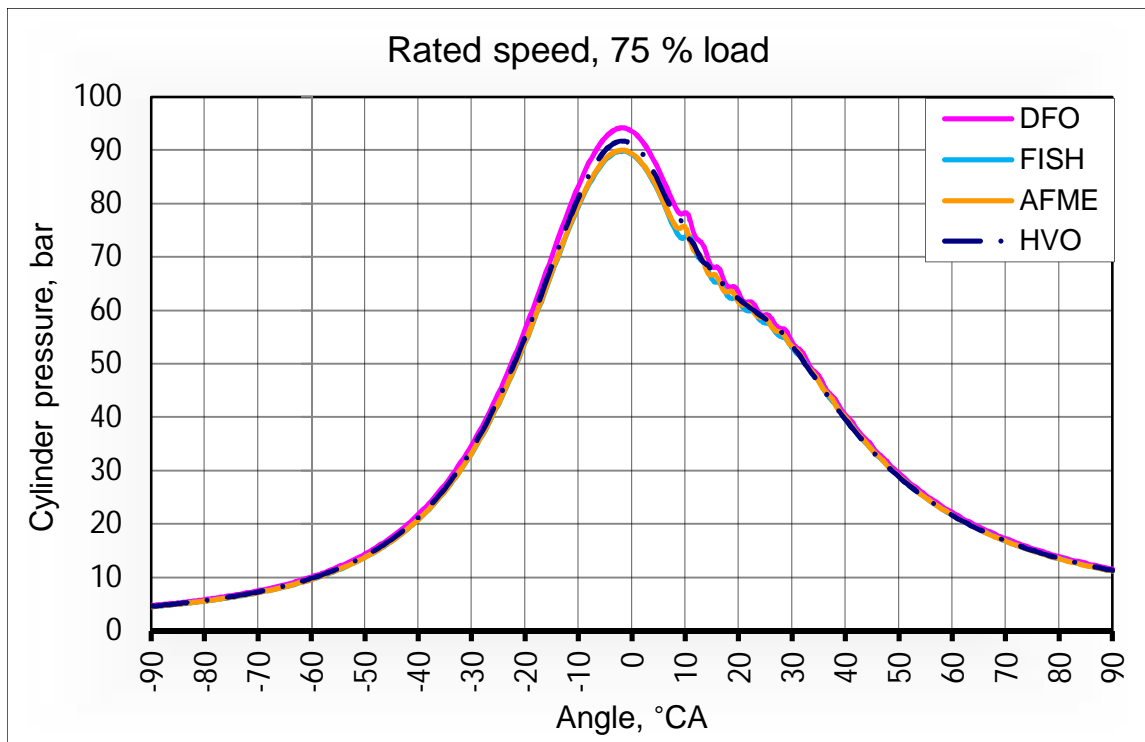


Kuva 14. Lämmönvapautuminen välinopeudella 100 % kuormalla.

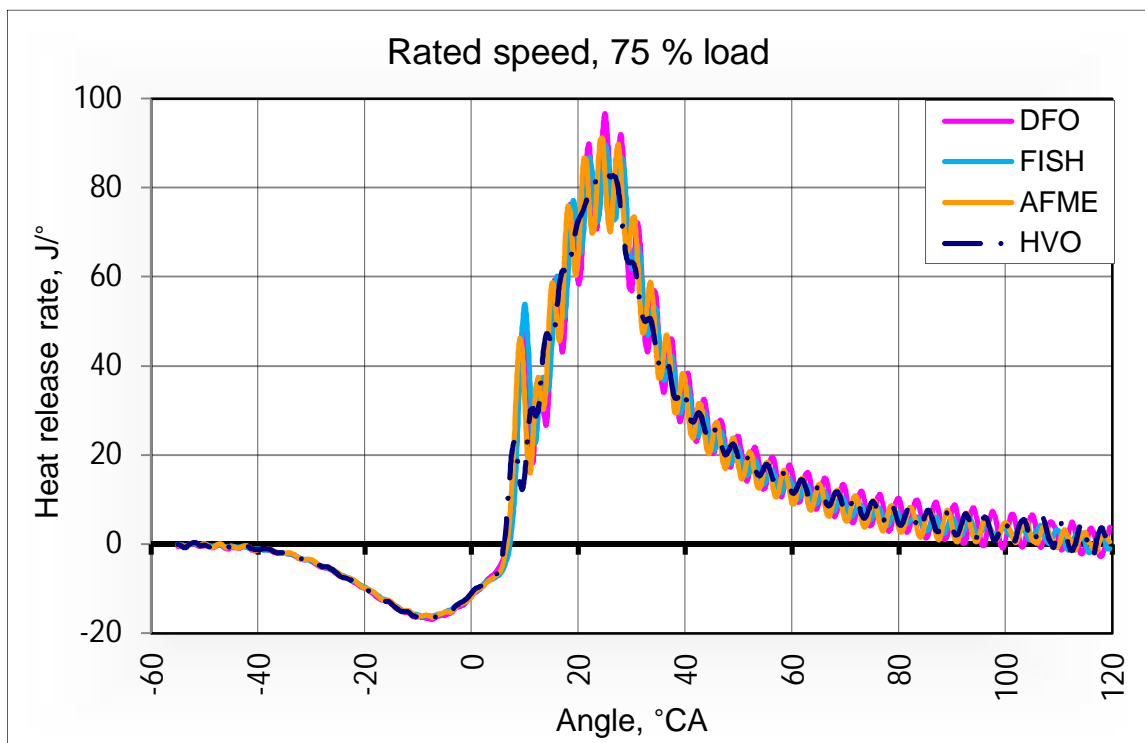
Taulukko 14. Ruiskutusajankohdat 75 % kuormalla.

Injection timing, 75 % load						
(° CA)	Rated speed			Intermediate speed		
	Pilot	Main 1	Main 2	Pilot	Main 1	Main 2
DFO	-8	-3-13	27	-8-(-5)	-2-18	27-30
HVO	-8	-3-13	27	-9-(-5)	-2-18	27-30
AFME	-8	-3-15	29	-10-(-6)	-3-18	27-30
FISH	-8	-3-15	28	-10-(-6)	-3-18	27-30

Nimellisopeudella 75 % kuormalla sylinteripaineet olivat lähes identtiset maksimipaine-
aluetta lukuunottamatta (kuva 15). DFO:n maksimipaine oli n. 94 bar, kun FISH:in ja
AFME:n oli n. 90 bar.

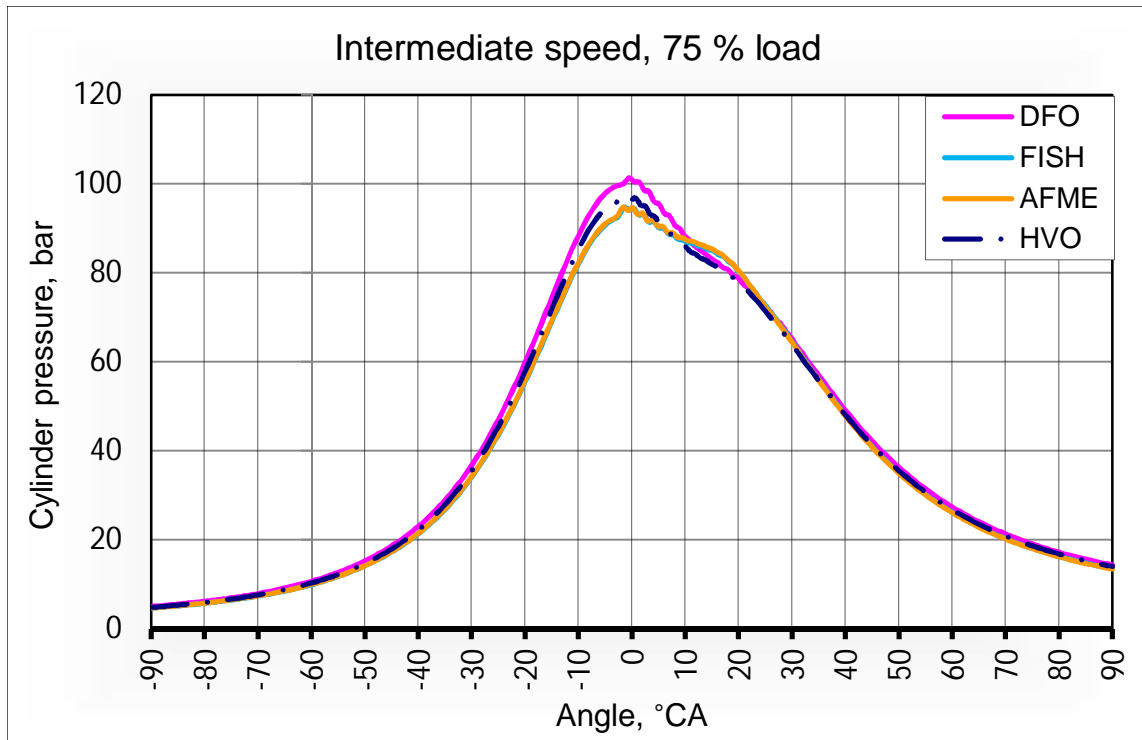


Kuva 15. Sylinteripaineet nimellisnopeudella 75 % kuormalla.



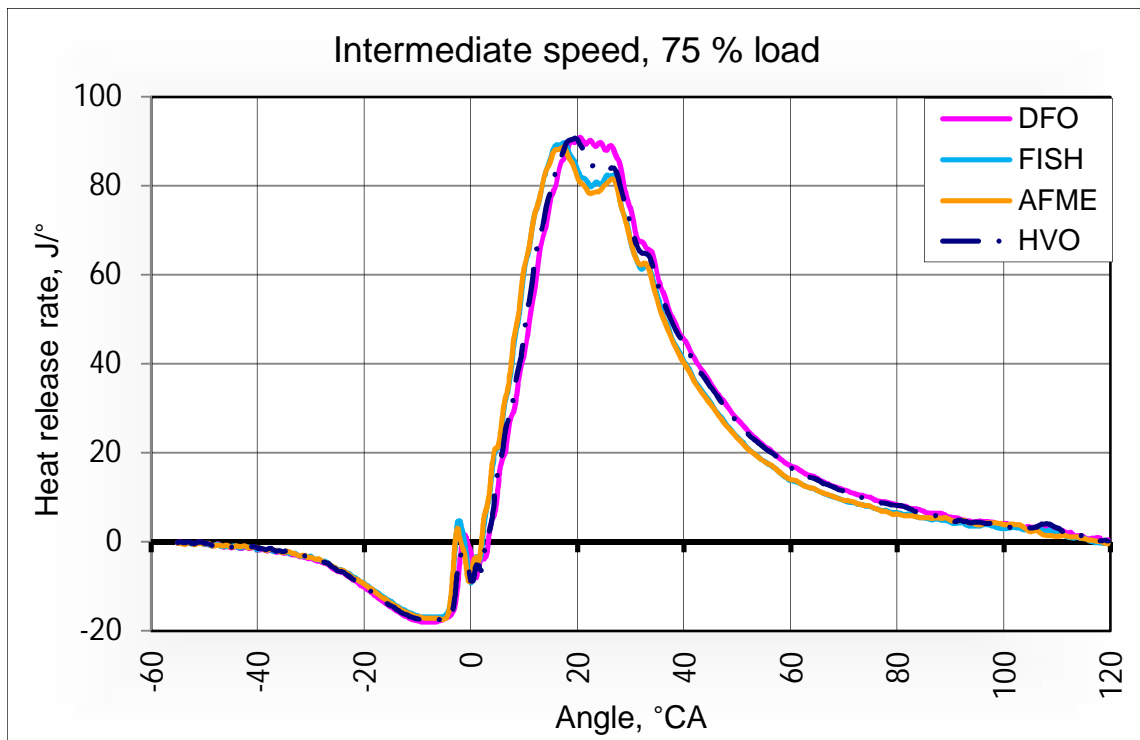
Kuva 16. Lämmönvapautuminen nimellisnopeudella 75 % kuormalla.

DFO:lla oli jälleen korkein sylinterin maksimipaine yläkuolokohdassa (n. 100 bar) nopeudella 1500 kierrosta minuutissa, 75 % kuormalla (kuva 17). Pienimmät paineet yläkuolokohdassa olivat AFME:lla ja FISH:illä (94 bar).



Kuva 17. Sylinteripaineet välinopeudella 75 % kuormalla.

Lämmönvapautumiskuvaajassa välinopeudella 75 % kuormalla (kuva 18) FISH ja AFME muodostavat jälleen toisen käyrän, DFO ja HVO toisen. FISH:illä ja AFME:lla esiruiskutus alkoi -10 kammukulma-asteen kohdalla jatkuen -6 asteeseen, DFO:lla ja HVO:lla alkoi hieman myöhemmin [-8–(-5)° CA]. Ensimmäinen pääruiskutus alkoi kaikilla polttoaineilla hyvin yht'aikaa vain asteen erolla. AFME:a sekä FISH:ä ruiskutettiin ensimmäisessä pääruiskutuksessa n. 4 mg enemmän kuin DFO:ta ja HVO:ta. Lämmönvapautumisen maksiminopeus oli DFO:lla n. 91 joulea kammukulma-astetta kohden 19 asteen kohdalla. Toinen huippu nähtiin juuri ennen toista pääruiskutusta, jolloin DFO:lla vapautui 85 J/° CA. Yhteensä polttoainetta ruiskutettiin FISH:illä ja AFME:lla n. 96 mg, HVO:lla n. 88 mg ja DFO:lla n. 87 mg. Kuvasta 18 nähdään myös, että lämmönvapautumishuippujen notkahduksesta päätellen AFME- ja FISH-polttoaineet paloivat nopeammin kuin erityisesti DFO.



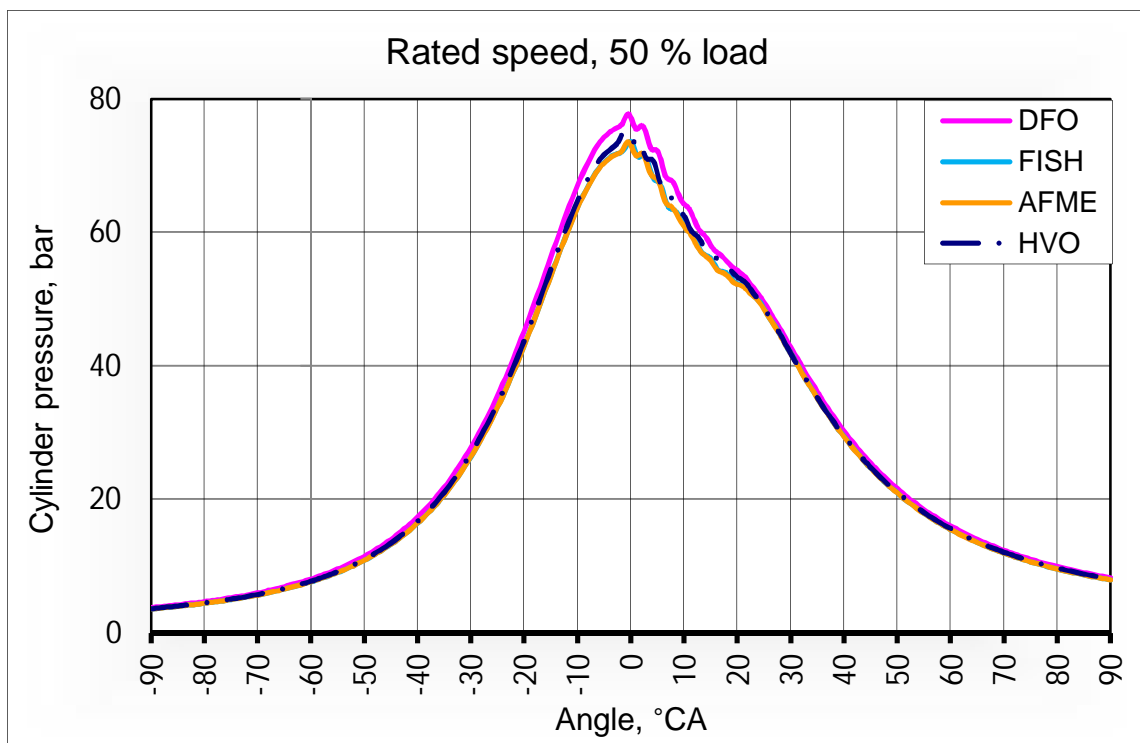
Kuva 18. Lämmönvapautuminen välinopeudella 75 % kuormalla.

Taulukossa 15 on esitetty polttoaineiden ruiskutusajankohdat kammukulma-asteissa puolella kuormalla. Nopeudella 2200 r/min kaikkien polttoaineiden ruiskutukset tapahtuivat hyvin yht'aikaa. Ainoastaan ensimmäinen pääruiskutus kesti AFME:lla ja FISH:illä asteen kauemmin kuin DFO:lla ja HVO:lla. Lisäksi toinen pääruiskutus oli AFME:lla ja FISH:illä myös asteen myöhemmin. Yhteensä polttoainetta ruiskutettiin 44–50 mg, joista estereitä ruiskutettiin eniten ja DFO:ta vähiten. Kuvan 20 lämmönvapautumispiikki oli n. 20 asteen kohdalla, jolloin FISH:iä käytettäessä lämpöä vapautui nopeimmillaan n. 72 J/° CA.

Sylinteripaineet nimellisnopeudella ja puolella kuormalla ajettaessa olivat jälleen hyvin yhtenäiset keskenään (kuva 19). Pientä poikkeamaa oli ainoastaan yläkuolokohdassa, jossa DFO:lla ja HVO:lla saavutettiin korkeammat paineet kuin AFME:lla ja FISH:illä.

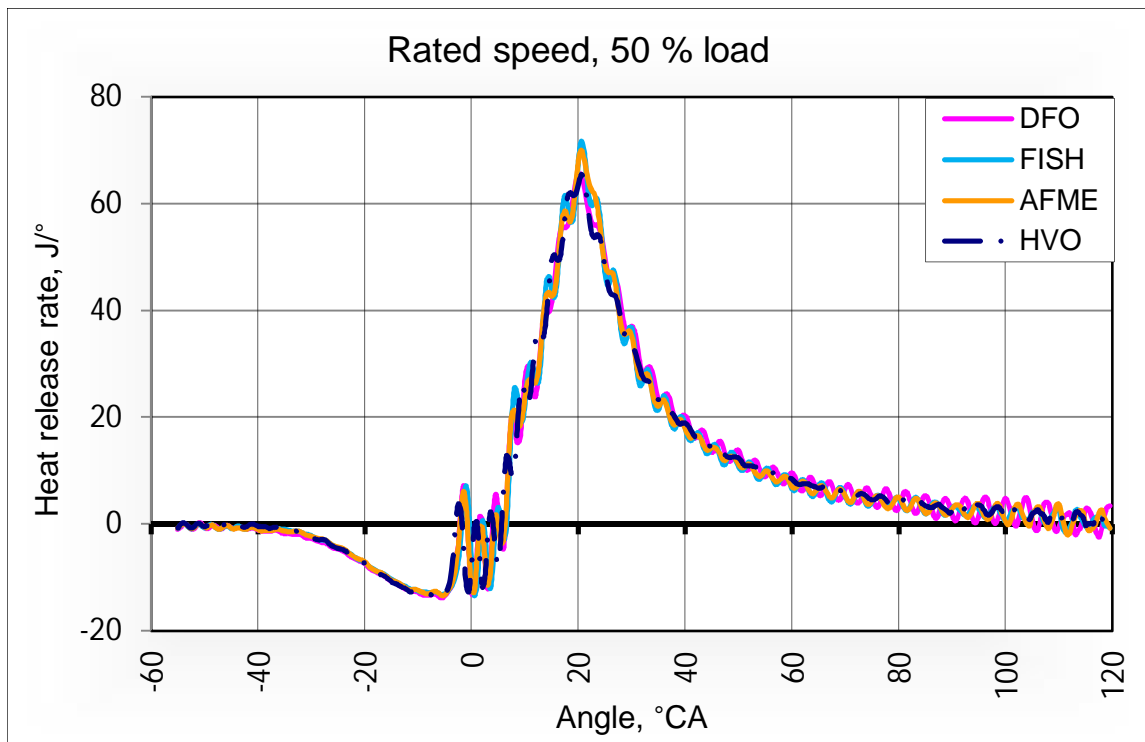
Taulukko 15. Ruiskutusajankohdat 50 % kuormalla.

Injection timing, 50 % load						
(° CA)	Rated speed			Intermediate speed		
	Pilot	Main 1	Main 2	Pilot	Main 1	Main 2
DFO	-13-(-9)	-4-8	22	-9-(-5)	-2-10	20-24
HVO	-13-(-9)	-4-8	22	-9-(-5)	-2-10	20-24
AFME	-13-(-9)	-4-9	23	-9-(-5)	-2-12	21-26
FISH	-13-(-9)	-4-9	23	-9-(-5)	-2-12	22-26



Kuva 19. Sylinteripaineet nimellisnopeudella 50 % kuormalla.

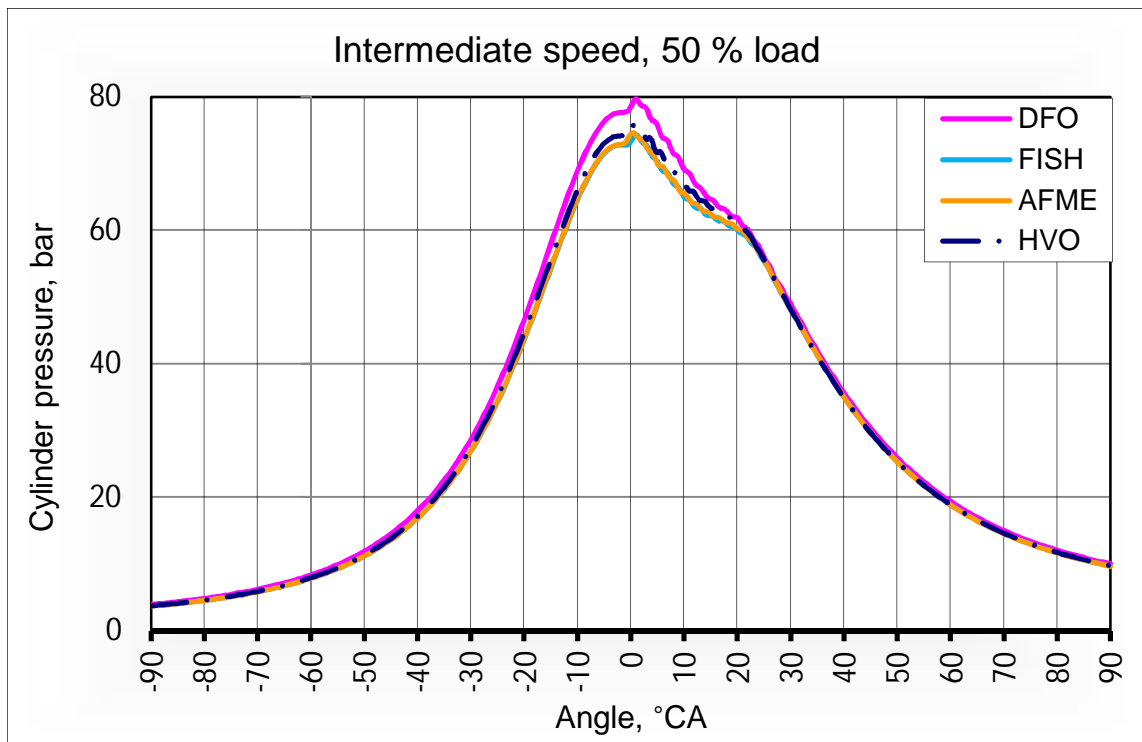
Moottorin käydessä 1500 kierrosta minuutissa 50 % kuormalla sylinteripaineet olivat jälleen keskenään samankaltaiset. Poikkeamat olivat edellisten kuormitusasteiden tavoin yläkuolokohdassa (kuva 21). Nimellisnopeudella ajettaessa mitattuihin sylinteripaineisiin verrattuna maksimipaineet olivat lähellä toisiaan, mutta toisen pääruiskutuksen aikaan välinopeudella sylinteripaineet pysyivät yli 60 bar:in. Nimellisnopeudella toisen pääruiskutuksen aikaan sylinteripaineet olivat 50 bar tuntumassa (kuva 19).



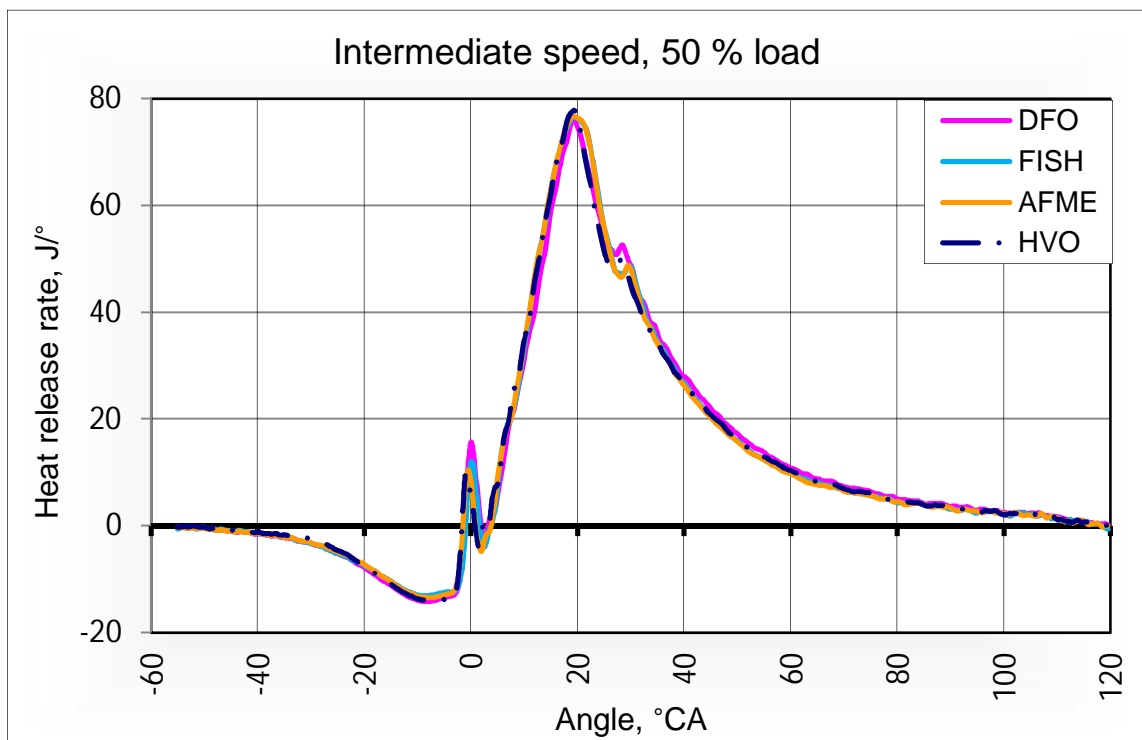
Kuva 20. Lämmönvapautuminen 50 % kuormalla nopeudella 2200 r/min.

Nopeudella 1500 r/min kaikkien polttoaineiden ruiskutukset tapahtuivat jälleen hyvin yht'aikaa (taulukko 15). Ensimmäinen pääruiskutus kesti AFME:lla ja FISH:llä kaksi astetta kauemmin kuin DFO:lla ja HVO:lla. Lisäksi toinen pääruiskutus alkoi AFME:lla ja FISH:llä asteen myöhemmin ja kesti kaksi astetta kauemmin. Yhteensä polttoainetta ruiskutettiin 57–65 mg. Lämmönvapautuminen oli nopeinta n. 19 asteen kohdalla, jolloin DFO:lla ja HVO:lla lämpöä vapautui n. 78 J/° CA (kuva 22).

Sylinteripaineet nimellisnopeudella 10 % kuormalla ajettaessa olivat edelleen hyvin samankaltaiset (kuva 23). Edellisiin kuormituspisteisiin verrattuna yläkuolokohtaan eroavaisuuksien lisäksi paineet tekevät pientä sahausliikettä. Tätä liikettä tapahtuu kaikilla polttoaineilla ensimmäisen pääruiskutuksen aikana ja sen jälkeen. Ruiskutusajankohdat 10 % kuormituspisteessä on esitetty taulukossa 16. Suurin paine mitattiin DFO:lla (n. 55 bar) aste ennen yläkuolokohtaa.



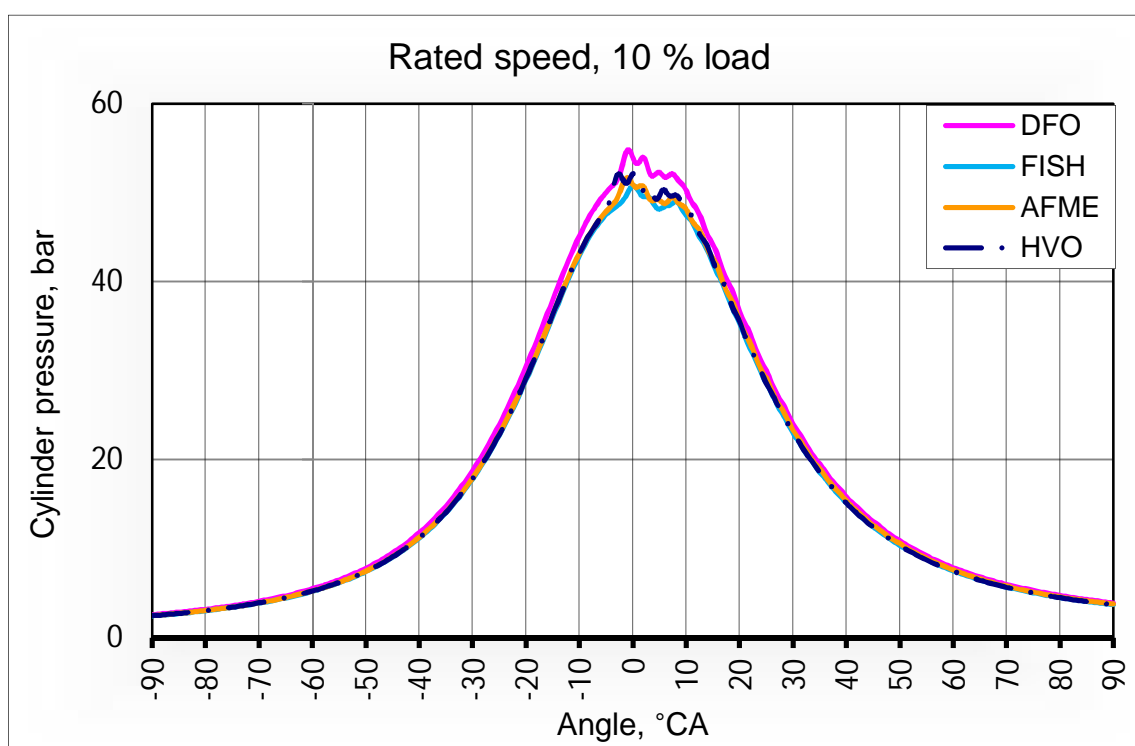
Kuva 21. Sylinteripaineet 50 % kuormalla, 1500 r/min.



Kuva 22. Lämmönvapautuminen välinopeudella 50 % kuormalla.

Taulukko 16. Ruiskutusajankohdat 10 % kuormalla.

Injection timing, 10 % load			
(° CA)	Rated speed		
	Pilot	Main 1	Main 2
DFO	-18-(-13)	-8-(-2)	13
HVO	-18-(-13)	-8-(-1)	13
AFME	-18-(-13)	-8-0	13
FISH	-18-(-13)	-8-(-1)	13



Kuva 23. Sylinteripaineet nimellisa nopeudella 10 % kuormalla.

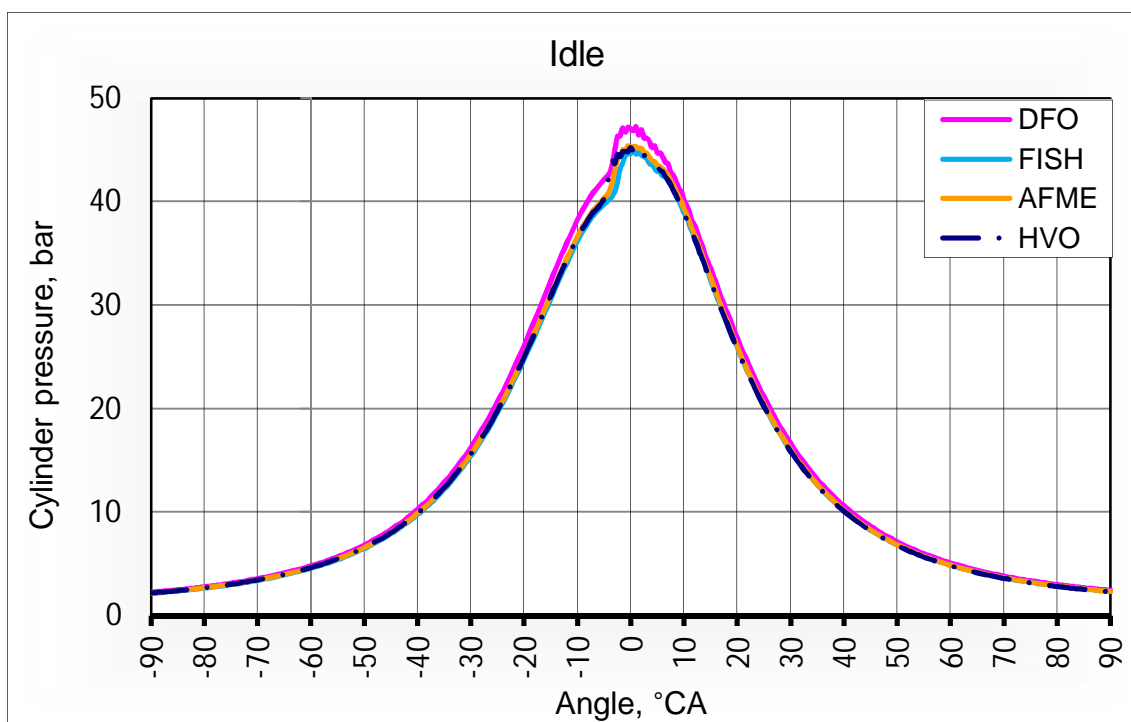
Liitteessä 16 on esitetty lämmönvapautumiskuvaaja nimellisa nopeudella ja 10 % kuormalla. Suurella nopeudella ja pienellä kuormalla moottorin käynti ei ollut kovin vakaata ja derivaatta oli levoton.

Joutokäynnillä sylinteripaineiden eroavaisuudet pysyivät edellisten kuormitusasteiden kaltaisina. Maksimipaineet olivat DFO:lla n. 47 bar yläkuolokohdassa, jolloin muiden polttoaineiden paineet olivat n. 45 bar (kuva 24).

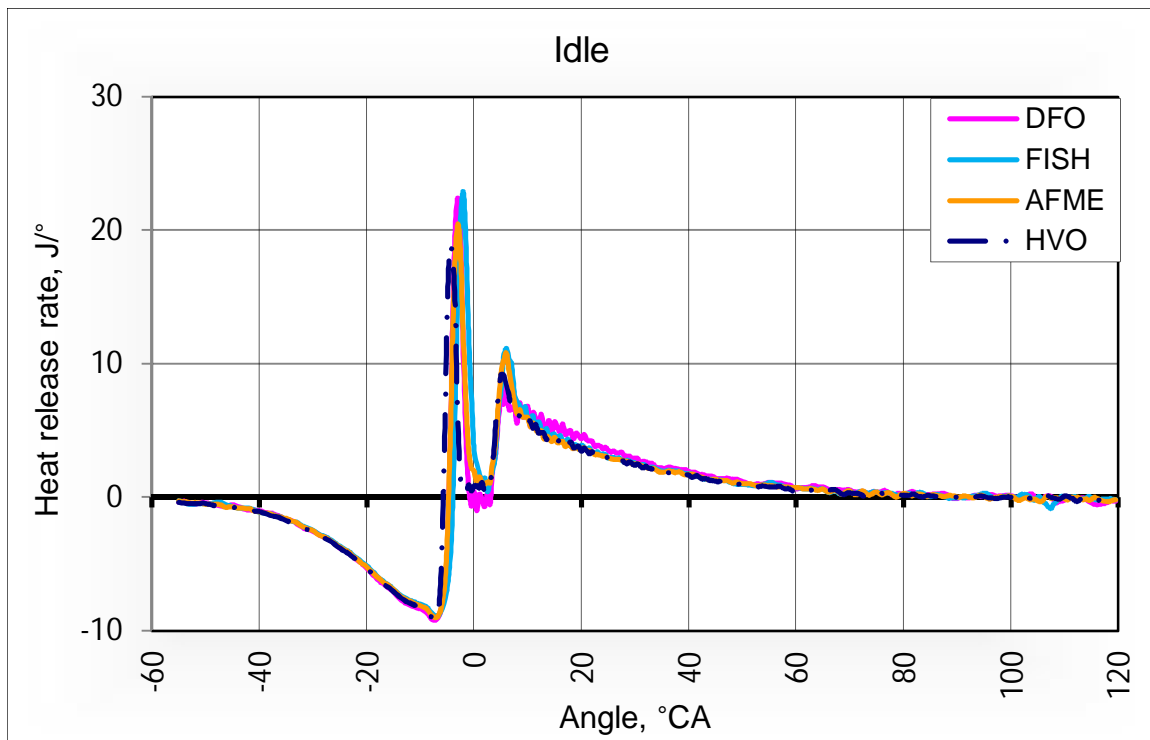
Taulukosta 17 nähdään, että kaikkien polttoaineiden ruiskutusajankohdat olivat joutokäynnillä identtiset ja lyhyet. Vaikka polttoaineet ruiskutettiin yht'aikaa, huomataan kuvasta 25, että korkean setaaniluvun omaava HVO (setaaniluku 81,7) syttyi hieman muita polttoaineita aikaisemmin. Polttoaineita ruiskutettiin työkierron aikana 7–8 mg.

Taulukko 17. Ruiskutusajankohdat joutokäynnillä.

Injection timing, idle	
	All fuels (° CA)
Pilot	-10–(-8)
Main 1	-6–(-5)
Main 2	1–3



Kuva 24. Sylinteripaineet joutokäynnillä.



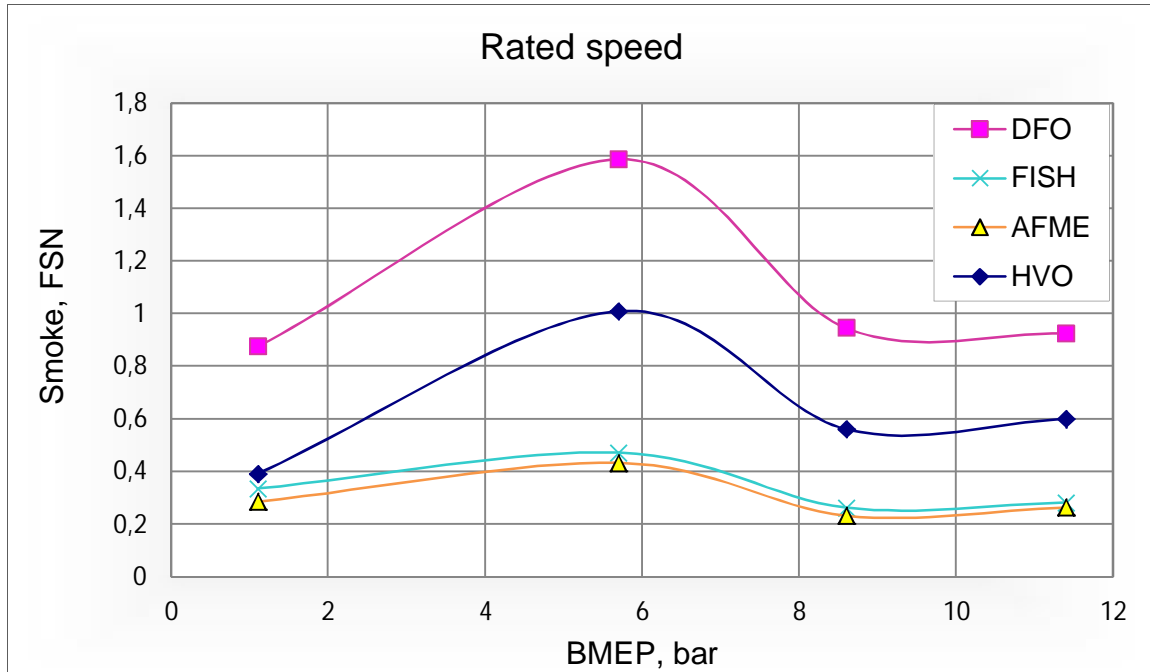
Kuva 25. Lämmönvapautuminen joutokäynnillä.

5.1.3 Savutus

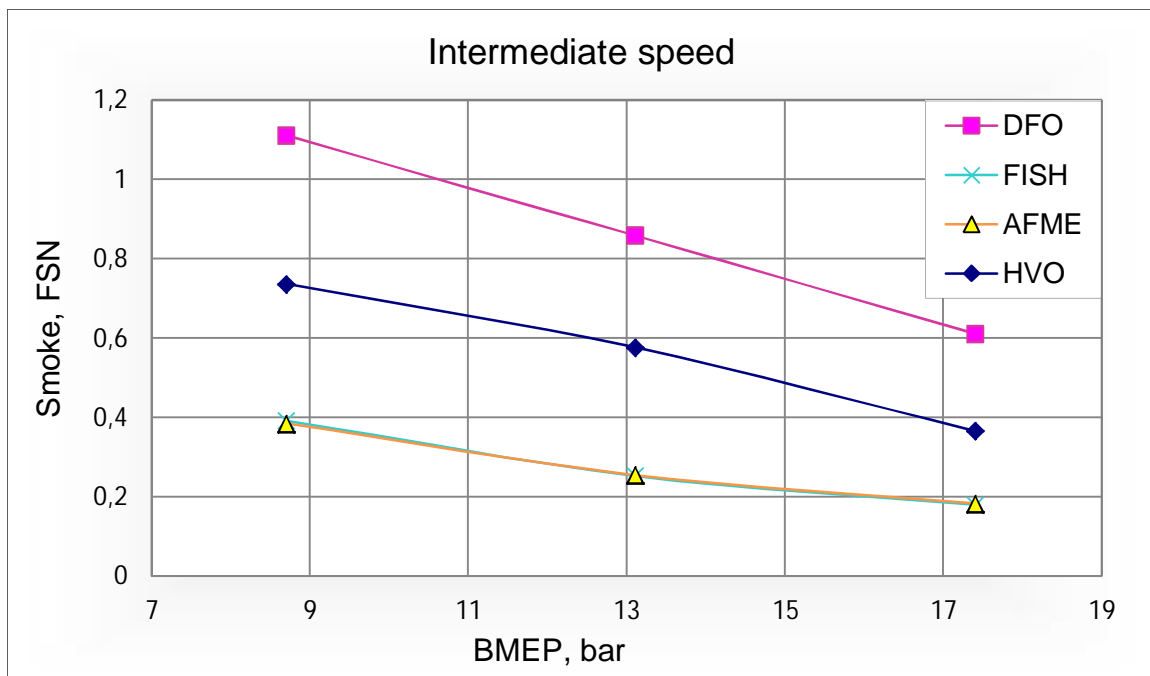
DFO savutti huomattavasti enemmän kuin esteröidyt biopolttoaineet AFME ja FISH. Vetykäsittelyn HVO-polttoaineen savutus oli edellisten arvojen välissä kaikissa kuormitusasteissa. Selkeästi havaittavissa oli myös se, että AFME- ja FISH-polttoaineiden savutusarvot olivat kaikissa kuormitusasteissa lähes samat. Nopeudella 2200 rpm DFO:n savutusarvo oli korkein 50 % kuormalla saaden arvon 1,6 (FSN). Samassa pisteessä HVO:n savutusarvo oli 1,0 (FSN), AFME:n 0,4 (FSN) ja FISH:in 0,5 (FSN). Alhaisin savutusarvo saavutettiin AFME:lla 75 % kuormalla (8,6 bar) ollen 0,2 (FSN). Tässä kuormitusasteessa FISH sai arvon 0,3 (FSN), HVO 0,6 (FSN) ja DFO 1,0 (FSN), kuva 26.

Välinopeudella (1500 rpm) savutusarvot laskivat puolesta kuormasta lähtien suoraviivaisesti tehollisen keskipaineen noustessa. Kuten nimellisnopeudella, myös välinopeudella DFO oli eniten savuttava polttoaine. Vähiten savuttivat jälleen AFME ja FISH, joiden keskinäisissä savutusarvoissa oli vain sadasosan eroja. Täydellä kuormalla AFME ja FISH savuttivat vähiten, 0,2 (FSN). HVO:n arvo täydellä kuormalla välinopeudella oli 0,4 (FSN) ja DFO:n 0,6 (FSN). Suurimmat savutusarvot välinopeudella mitattiin 50 %

kuormalla, jolloin DFO sai arvon 1,1 (FSN), HVO 0,6 (FSN) sekä AFME ja FISH arvon 0,4 (FSN) (kuva 27).



Kuva 26. Polttoaineiden savutusarvot (FSN) nimellispoivedella.

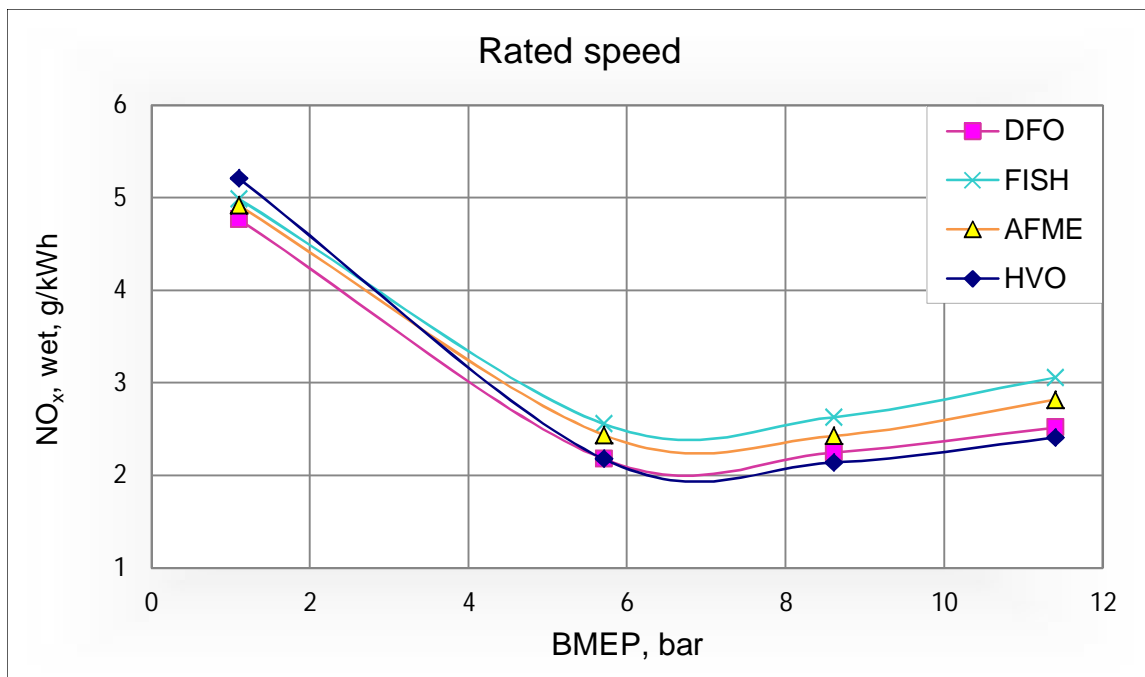


Kuva 27. Polttoaineiden savutusarvot välinopeudella tehollisen keskipaineen funktiona.

5.1.4 Typen oksidit

Tutkielmassa typen oksidit mitattiin kuivasta pakokaasusta. Työssä esitetyt arvot ovat kahden mittauskerran keskiarvoja, ja ne on muunnettu vastaamaan kostea pakokaasua.

Nimelliskoivudella (2200 rpm) pienellä kuormalla (1,1 bar, 10 % kuorma) HVO tuotti suurimmat typen oksidien ominaispäästöt (n. 5,2 g/kWh). Samassa pisteessä FISH:in ominaispäästöt olivat n. 5,0 g/kWh, AFME:n n. 4,9 g/kWh sekä DFO:n n. 4,8 g/kWh. Moottorin kuorman kasvaessa 50 %:iin FISH tuottikin eniten typen oksideja (n. 2,6 g/kWh) ja DFO sekä HVO vähiten (n. 2,2 g/kWh). Alhaisin arvo n. 2,1 g/kWh mitattiin ajettaessa HVO:lla 75 % kuormalla. Täydellä kuormalla FISH:in typen oksidien ominaispäästöt olivat suurimmat n. 3,1 g/kWh ja HVO:n pienimmät n. 2,4 g/kWh (kuva 28).

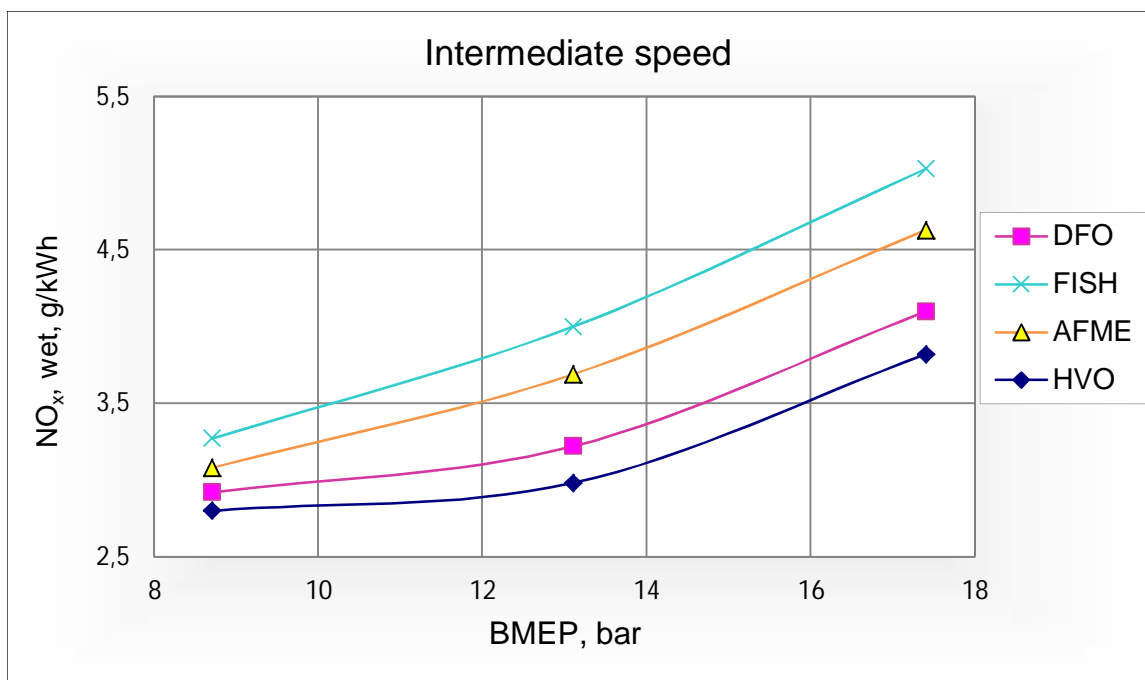


Kuva 28. Typen oksidien määrä määrässä pakokaasussa moottorin nimelliskoivudella.

Väliniskoivudella (1500 rpm) ajettaessa typen oksidien mittaustuloksien erot polttoaineiden välillä olivat selkeämmät kuin nimelliskoivudella. Väliniskoivudella FISH tuotti eniten typen oksideja kaikissa kuormitusasteissa. Pienimmät tulokset saatiin kaikissa kuormitusasteissa HVO:lla. Toiseksi pienimmät mittaustulokset olivat DFO:lla, ja toiseksi suurimmat arvot saatiin AFME:lla. Pienin mittaustulos, 2,8 g/kWh, saatiin HVO:lla 50 %

kuormalla. Tällöin FISH sai arvon 3,3 g/kWh. Korkein mittaustulos, 5,0 g/kWh, rekisteröitiin 100 % kuormalla ajettaessa FISH:llä, tällöin HVO sai arvon 3,8 g/kWh (kuva 29).

Vaikka mittaustuloksia ei voi suoraan verrata päästöstandardeihin, voidaan nähdä, että nimellinopeudella, 10 % kuormalla, kaikki mitattavat polttoaineet ylittivät sallitut typen oksidien päästöraajat; 4,0 g/kWh (EU Stage III A ja US Tier 3). Välinopeudella päästöraja saavutettiin kaladieselini (FISH) osalta jo 75 % kuormalla. HVO oli ainoa polttoaine, joka ei ylittänyt päästörajaa välinopeudella ja 100 % kuormalla.



Kuva 29. Typen oksidien määrä määrässä pakokaasussa moottorin nimellinopeudella.

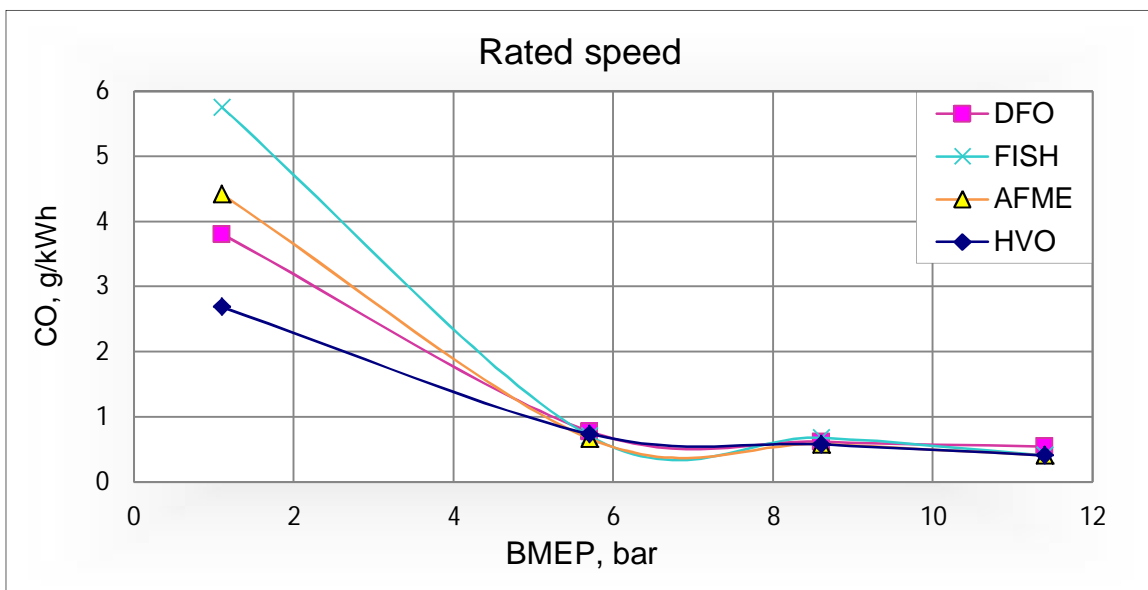
5.1.5 Hiilimonoksidit

Hiilimonoksidi mitattiin kuivasta pakokaasusta. Työssä esitetyt arvot ovat kahden mittauksen keskiarvoja ja ne on muunnettu vastaamaan kostea pakokaasua.

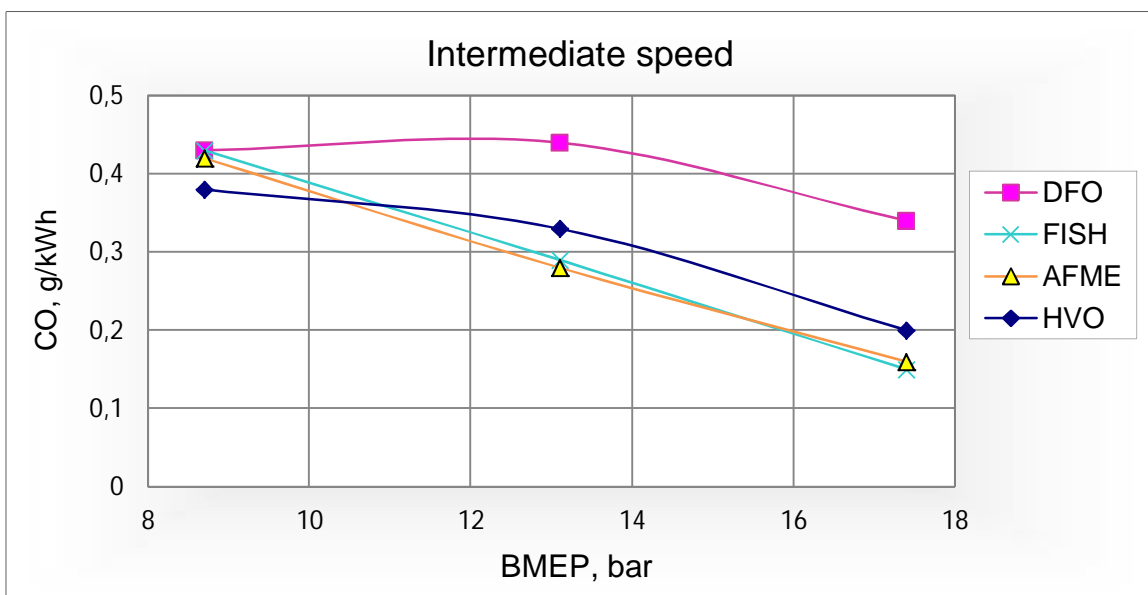
Nopeudella 2200 r/min korkeimmat hiilimonoksidi- eli häkäarvot mitattiin FISH-polttoaineella 10 % kuormalla ollen 5,8 g/kWh. Tässä kuormitusasteessa AFME sai arvon 4,4 g/kWh, DFO 3,8 g/kWh ja HVO 2,7 g/kWh. Suuremmilla kuormituksilla hiilimonoksidipäästöt olivat lähempänä toisiaan ja jäivät alle arvon 1 g/kWh. Pienimmät lukemat nimel-

lisnopeudella ja täydellä kuormalla saivat FISH, AFME ja HVO (0,4 g/kWh), DFO sai arvon 0,6 g/kWh (kuva 30).

Välinopeudella ja puolella kuormalla kaikki polttoaineet olivat 0,05 gramman per kWh sisällä. Suuremmilla kuormilla DFO tuotti eniten hiilimonoksidipäästöjä sekä FISH ja AFME vähiten. Suurimmat erot havaittiin täydellä kuormalla, jolloin DFO sai arvon 0,34 g/kWh, HVO 0,20 g/kWh sekä FISH ja AFME arvon 0,15 g/kWh (kuva 31).



Kuva 30. Hiilimonoksidipäästöt nimellisnopeudella.

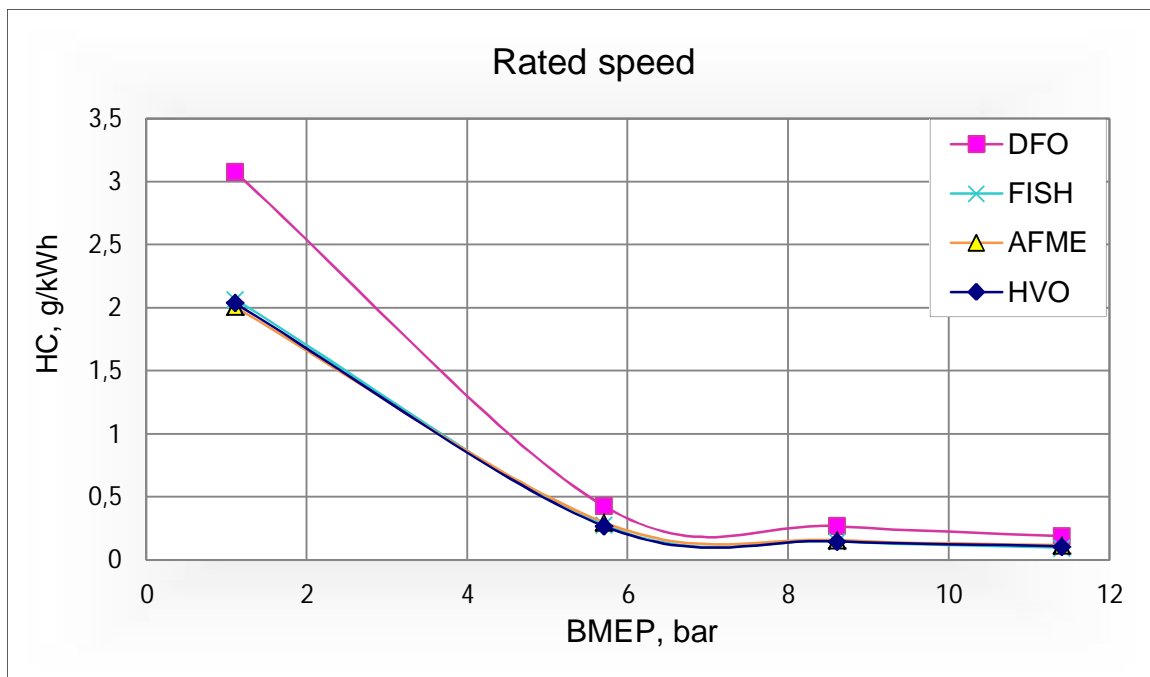


Kuva 31. Hiilimonoksidipäästöt välinopeudella.

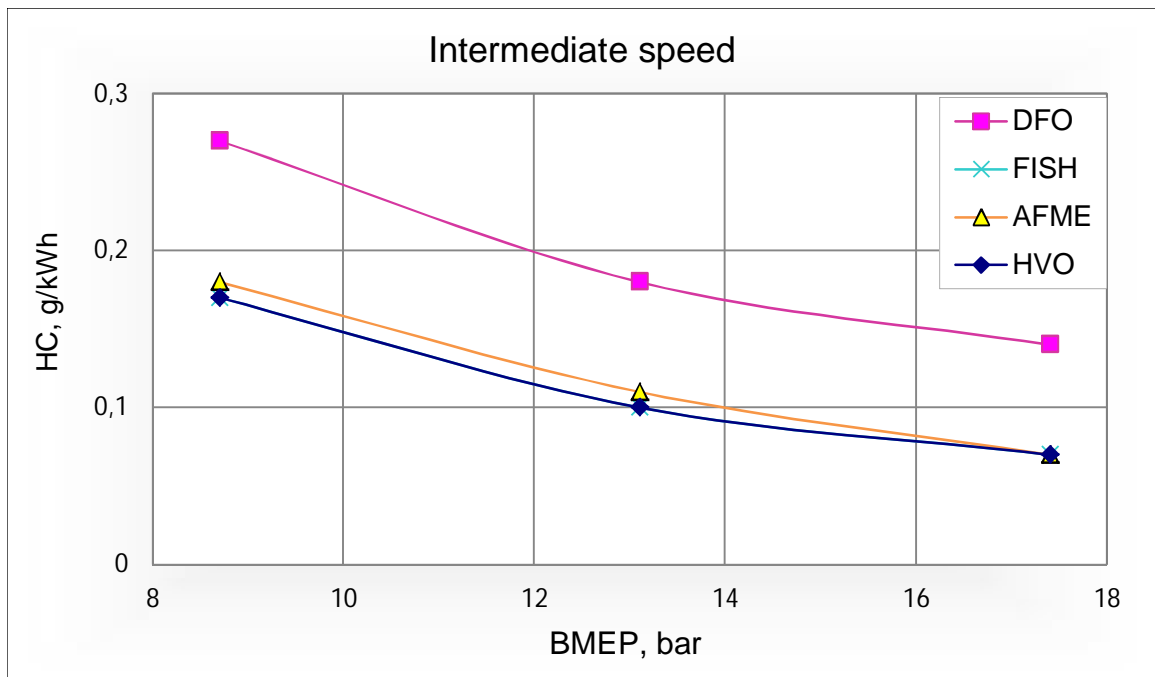
5.1.6 Hiilivedyt

Hiilivedyt mitattiin kosteasta pakokaasusta. Kuvassa 32 on esitetty hiilivetyypäästöt moottorin käydessä nopeudella 2200 r/min, jolloin DFO tuotti eniten hiilivetyjä (3,1 g/kWh) 10 % kuormalla. Tässä pisteessä muut polttoaineet tuottivat hiilivetyypäästöjä n. 1 g/kWh vähemmän. Suuremmilla kuormilla hiilivetyjen mitatut arvot jäivät lukeman 0,5 g/kWh alle kaikilla polttoaineilla DFO:n kuitenkin tuottaessa niitä eniten.

Kuvassa 33 on esitetty hiilivetyypäästöt moottorin käydessä 1500 r/min, jolloin DFO tuotti jälleen eniten hiilivetyjä (0,27 g/kWh) 50 % kuormalla. AFME:lla ajettaessa samassa pisteessä hiilivetyjä syntyi 0,18 grammaa kilowattituntia kohden ja FISH:illä sekä HVO:lla 0,17 g/kWh. Toisessa kuormituspisteessä (75 % kuorma) hiilivetyjä syntyi DFO:lla 0,18 g/kWh, AFME:lla 0,11 g/kWh sekä FISH:illä ja HVO:lla 0,10 g/kWh. Täydellä kuormala DFO tuotti hiilivetyjä 0,14 g/kWh ja muut polttoaineet noin puolet siitä.



Kuva 32. Hiilivetyypäästöt nimellisnopeudella.



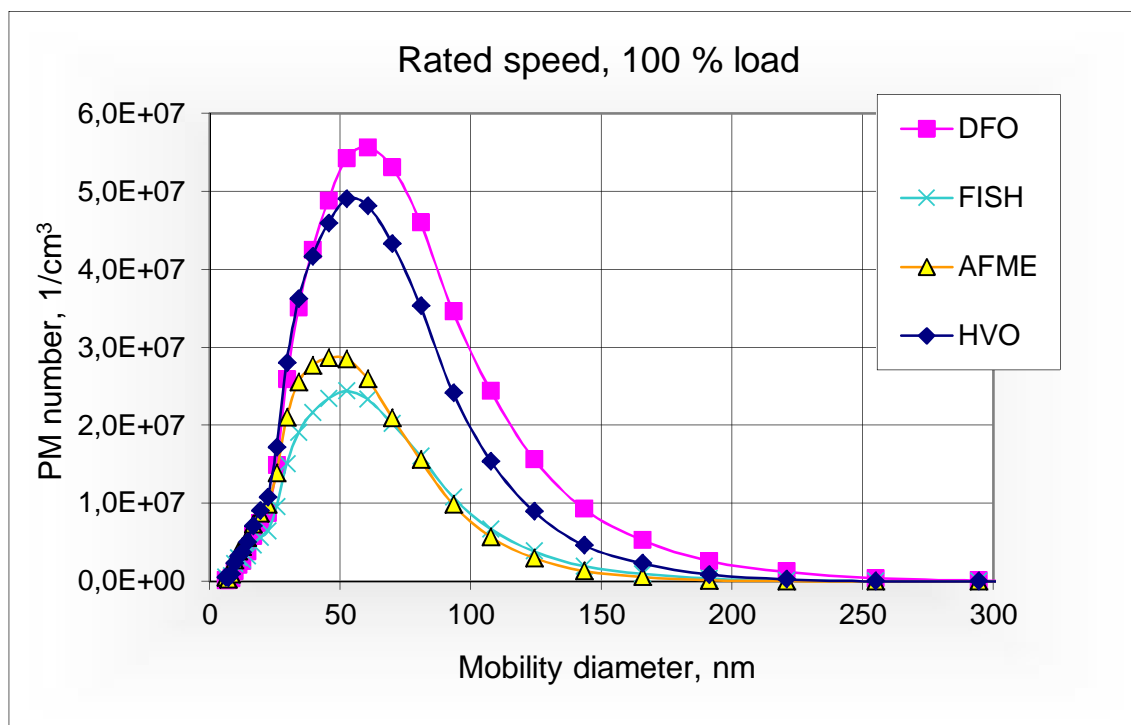
Kuva 33. Hiilivetypäästöt välinopeudella.

5.1.7 Pienhiukkaset

Pienhiukkasten kokojakauma mitattiin laimennetusta pakokaasusta. Tutkielmassa on tarkasteltu halkaisijaltaan 6–300 nm kokoisia hiukkasia, sillä yli 300 nm hiukkasia oli pakokaasussa yleensä varsin vähän. Hiukkasmassa kerättiin laimennetusta pakokaasusta. Tutkielman hiukkasmassamittauksissa kerättiin nanokokoluokan hiukkasmassaa eli 1–1000 nm suuruiset hiukkaset. Johtopäätökset-luvussa käsitellään hiukkasmassan mittausprosessin parannusehdotukset tulevia moottoriajoja ajatellen. Mitattujen hiukkasmassojen vertailukelvottomat, mutta kenties suuntaa-antavat punnitustulokset ovat liitteessä 14.

Nopeudella 2200 r/min ja täydellä kuormalla ajettaessa DFO tuotti eniten 50–100 nm kokoisia hiukkasia. Vähiten saman kokoluokan hiukkasia tuotti FISH, mutta myös AFME tuotti lähes yhtä vähän. Kuten kuvasta 34 huomataan, DFO tuotti eniten halkaisijaltaan n. 60 nm kokoisia hiukkasia (n. 56 miljoonaa kappaletta kuutiokesanmittassa).

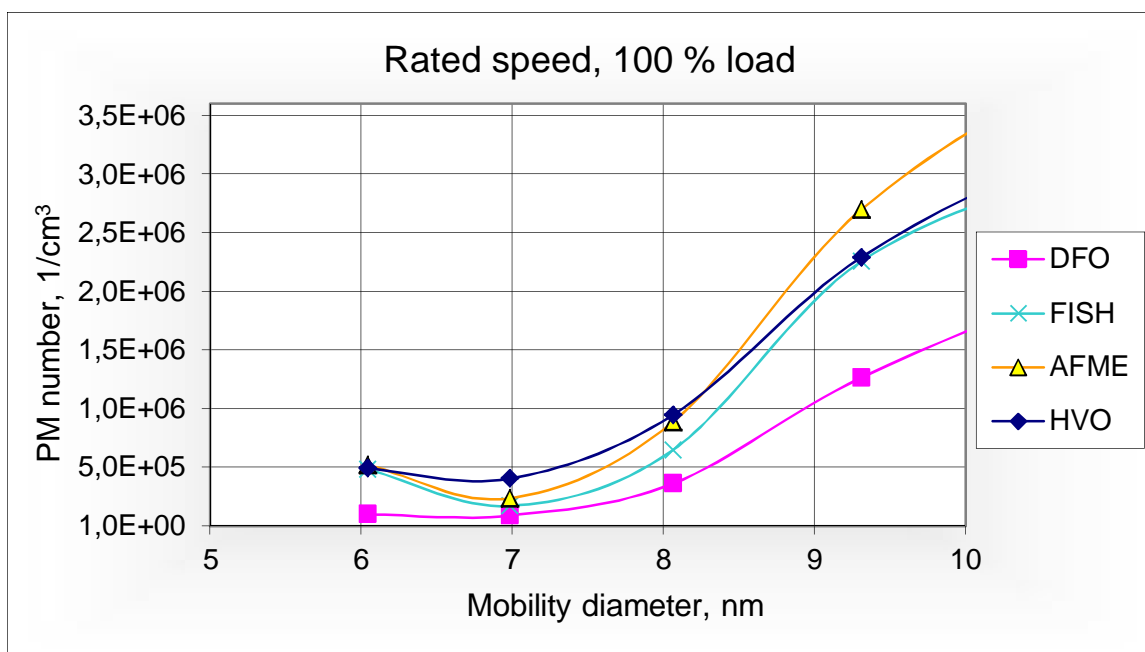
Tarkasteltaessa lähemmin halkaisijaltaan 6–10 nm hiukkasia (kuva 35) huomataan, että 6–8 nm kokoisia hiukkasia tuottikin eniten HVO ja vähiten DFO. Noin 9–10 nm kokoisia hiukkasia tuotti selvästi eniten taas AFME (2,7 milj./cm³) ja vähiten DFO (1,3 milj./cm³).



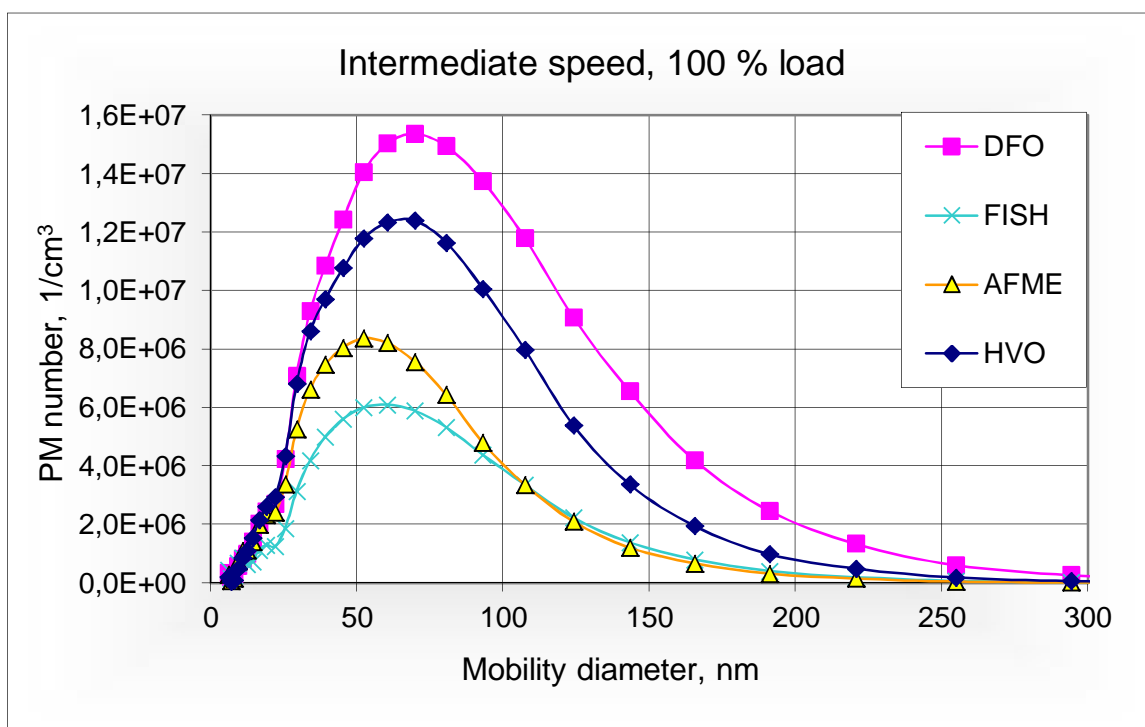
Kuva 34. Pienhiukkasten kokojakauma nimellispoiveudella ja 100 % kuormalla.

Välinopeudella ja täydellä kuormalla pienhiukkasten kokojakauma on hyvin samankaltainen kuin nimellispoiveudellakin (kuva 36). DFO ja HVO tuottivat eniten n. 70 nm kokoisia hiukkasia (DFO 15 milj./cm³, HVO 12 milj./cm³).

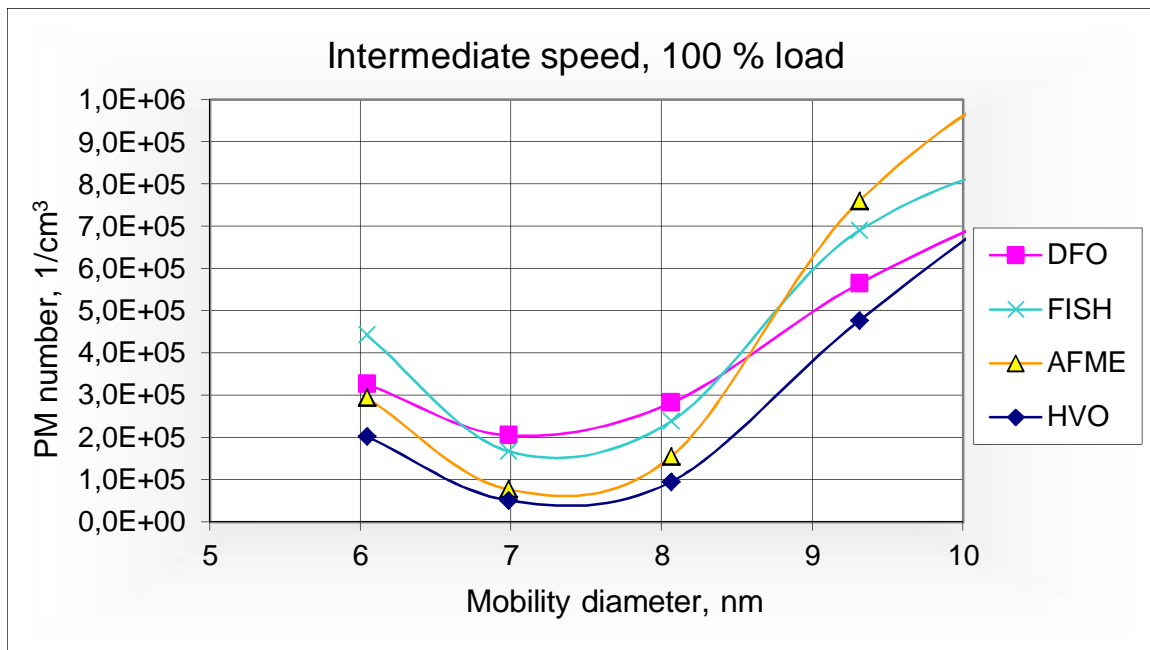
Alle 10 nm kokoisten pienhiukkasten kokojakaumaa tarkasteltaessa kuvasta 37 huomataan, että 7–8 nm hiukkasia tuotettiin vähiten. Eniten 6 nm kokoisia hiukkasia tuotti FISH, n. 0,4 milj./cm³ ja vähiten HVO, n. 0,2 milj./cm³. AFME tuotti eniten 9–10 nm hiukkasia (n. 0,8 milj./cm³) ja HVO vähiten, n. 0,5 milj./cm³.



Kuva 35. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä nimellisa nopeudella ja 100 % kuormalla.



Kuva 36. Pienhiukkasten kokojakauma välinopeudella ja 100 % kuormalla.

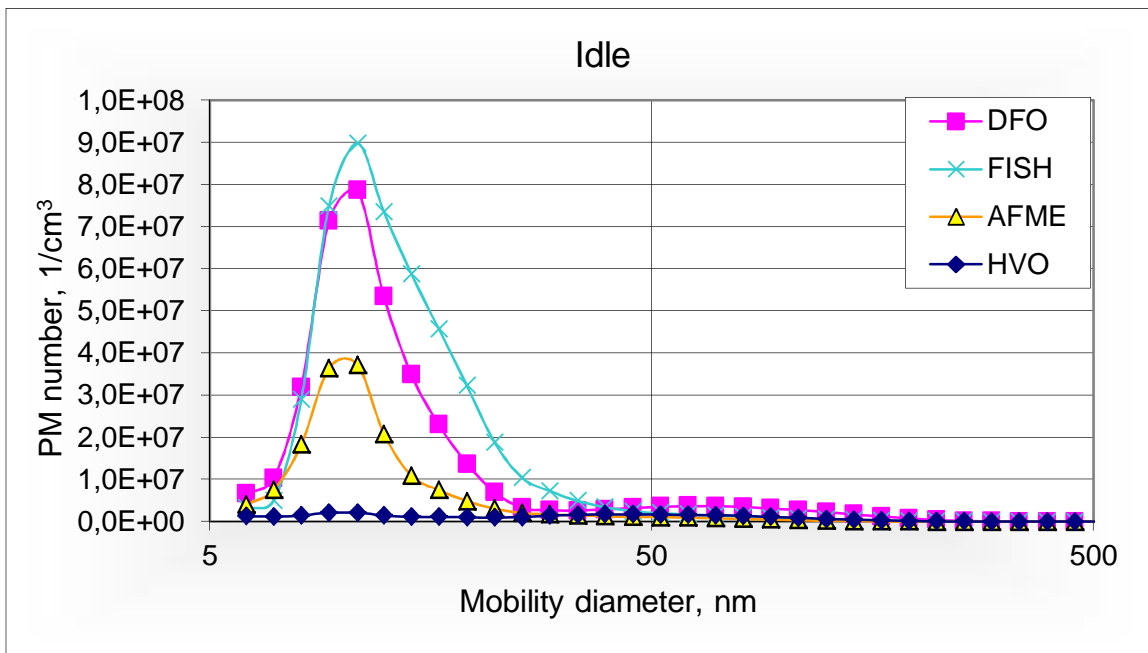


Kuva 37. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä välinopeudella ja 100 % kuormalla.

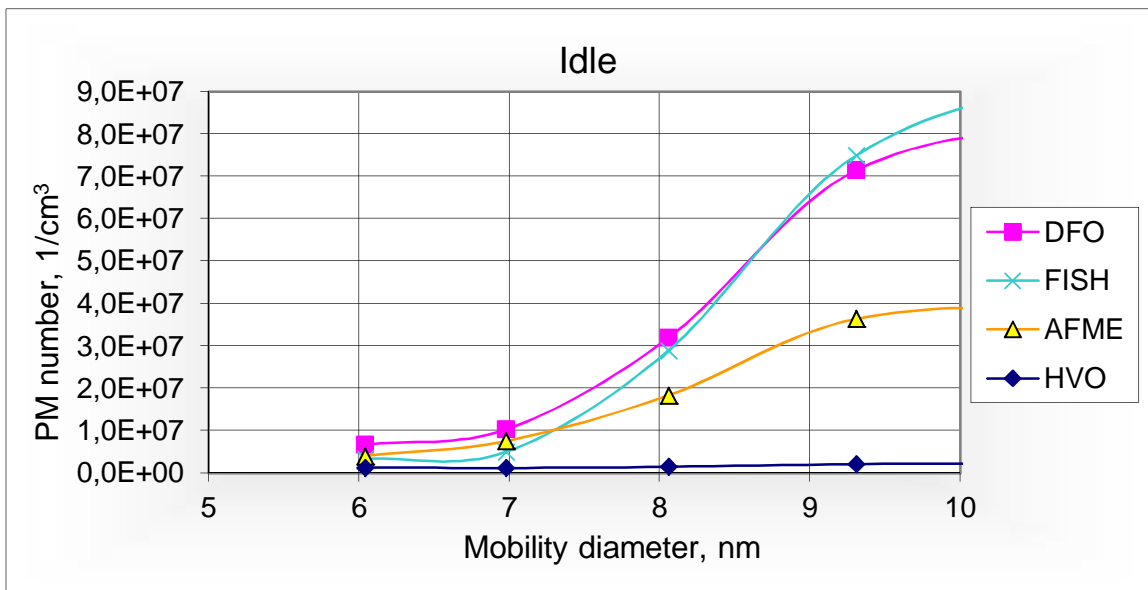
Pienhiukkasten kokojakaumakuvaajat niin nimellis- kuin välinopeuksilla kuormilla 75 %, 50 % ja 10 % löytyvät liitteistä 17–21. Yleisesti eniten 50–100 nm hiukkasia tuotti DFO, kuten täyden kuorman kuvaajistakin havaittiin. Vähiten saman kokoluokan hiukkasia tuotti yleensä FISH, mutta AFME tuotti vähiten 50 % ja 10 % kuormilla nopeudella 2200 r/min ajettaessa. Yleensä AFME ja FISH tuottivat eniten 8–10 nm hiukkasia sekä DFO ja HVO vähiten. Poikkeus oli 75 % kuorma välinopeudella, jolloin HVO tuotti toiseksi eniten 8–10 nm hiukkasia yhdessä FISH:in kanssa. Eniten tuotti AFME ja vähiten DFO.

Joutokäynnillä kuvassa 38 nähdään poikkeus, sillä FISH tuotti eniten halkaisijaltaan n. 11 nm pienhiukkasia (n. 90 milj./cm³). HVO:lla syntyi selvästi vähiten alle 20 nm hiukkasia. DFO tuotti eniten 50–100 nm hiukkasia, kuten aikaisemmissa kuormitus-pisteissä (n. 70 nm, n. 3,7 milj./cm³). Tällöin FISH ja HVO tuottivat toiseksi eniten (n. 1,5 milj./cm³) ja AFME vähiten (n. 0,8 milj./cm³).

Tarkemmin katsottaessa alle 10 nm hiukkasten jakaumaa kuvasta 39 huomataan, että joutokäynnillä DFO tuottikin toiseksi eniten n. 9 nm hiukkasia (n. 71 milj./cm³) poiketen aiemmin kuormitus-pisteistä. AFME tuotti samassa kokoluokassa n. 36 milj./cm³ ja HVO vain n. 2,0 milj./cm³.



Kuva 38. Pienhiukkasten kokojakauma joutokäynnillä.



Kuva 39. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä joutokäynnillä.

5.2 Suutinvertailu

Suutinvertailussa ajettiin neljällä eri polttoaineen ruiskutussuutinsarjalla. Ensimmäinen sarja oli moottorissa valmiina (std). Muut sarjat olivat 8-reikäinen low flow rate (LF) -

suutin, 10-reikäinen high flow rate (HF) -suutin ja 6-reikäinen HF-suutin. Suutinvertailussa käytettävä polttoaine oli vähärikkinen dieselöljy (DFO).

Kahdeksanreikäisillä pienen virtauksen suuttimilla ajettaessa jouduttiin muokkaamaan suutinkarttaa, jotta moottori pysyi käynnissä. Tästä johtuen 8-reikäisiä LF-suuttimia ei voi suoraan verrata muihin suuttimiin. Tässä tutkielmassa tulokset on kuitenkin esitetty yhdessä muiden suutintuloksien kanssa.

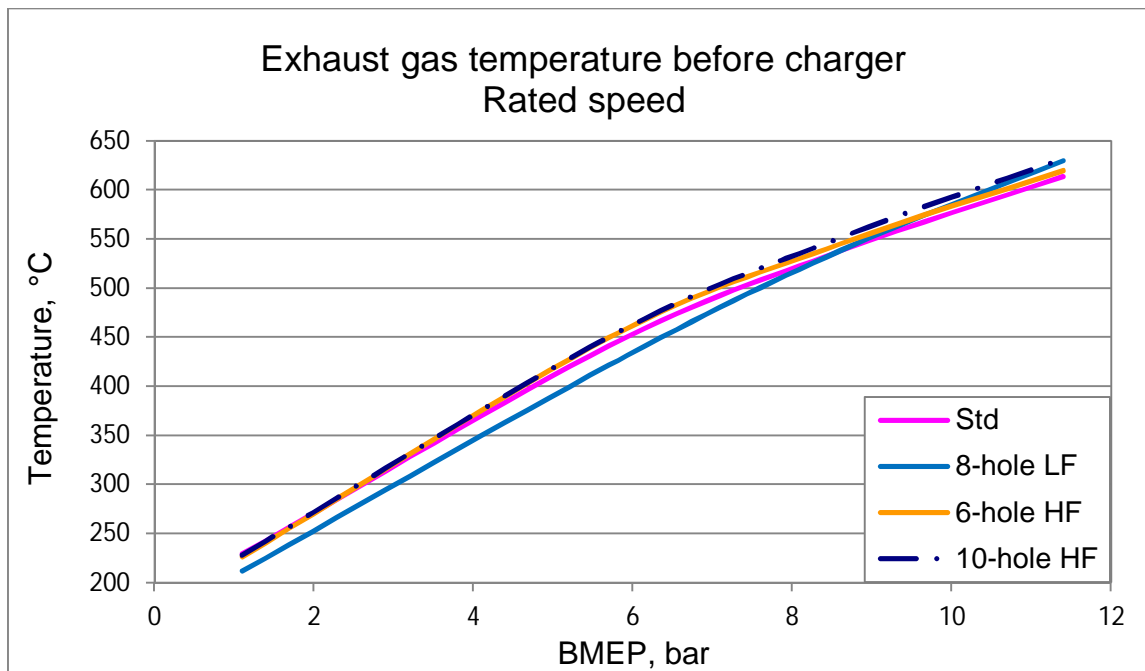
Kuusireikäisillä HF-suuttimilla ajettiin myös kalaöljyllä (FISHOIL). Käytettävän suutinsarjan valintaan vaikutti kalaöljyn korkea viskositeetti. Moottoririkon mahdollisuuden varalta kalaöljyllä ajettiin viimeinen mittausajo.

Vertailussa keskityttiin moottorin sylinteripaineisiin, sylintereissä tapahtuvaan lämmönvapautumiseen, savutukseen, pakokaasun tyyppien oksideihin, hiilimonoksidi- ja hiilivety-päästöihin sekä pienhiukkasten lukumäärään ja massaan. Myös pakokaasun lämpötilaa ennen ahdinta sekä imuilman painetta välijäähdyttimen jälkeen vertailtiin muita tarkemmin.

5.2.1 Pakokaasun lämpötila ja ahtopaine

Pakokaasun lämpötila mitattiin sylinterien jälkeen, ennen ahdinta. Pääsääntöisesti 10-reikäisillä HF-suuttimilla ajettaessa lämpötila oli korkeampi kuin muilla suuttimilla.

Nopeudella 2200 r/min suuttimien väliset pakokaasun lämpötilaerot eivät olleet kovin suuria (kuva 40). Täydellä kuormalla 10-reikäisillä HF- ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla olivat korkeimmat lämpötilat n. 630 °C ja tässä pisteessä standardisuuttimilla alhaisin n. 610 °C. Toisessa kuormituspisteessä (75 % kuorma) lämpötila kohosi 6- ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla n. 550 asteeseen ja 8-reikäisillä LF- ja standardisuuttimilla taas n. 540 asteeseen. Puolella kuormalla 6- ja 10-reikäisillä HF- sekä standardisuuttimilla pakokaasun lämpötila laski edellisestä n. 100 °C ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. 120 °C. Viimeisellä kuormituspisteellä (10 % kuorma) 8-reikäisillä LF-suuttimilla pakokaasun lämpötila oli n. 210 °C ja muilla n. 230 °C.

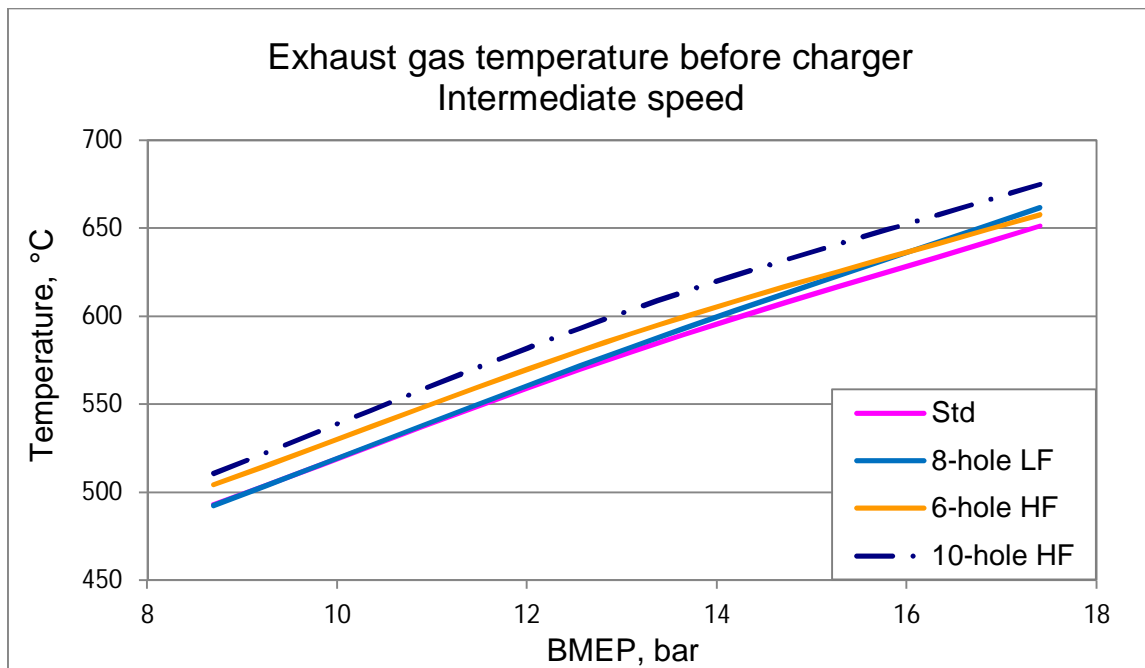


Kuva 40. Pakokaasun lämpötilat ennen ahdinta nopeudella 2200 r/min.

Välinopeudella täydellä kuormalla 10-reikäisillä HF-suuttimilla pakokaasun lämpötilaksi mitattiin n. 680 °C, 8-reikäisillä LF- ja 6-reikäisillä HF-suuttimilla n. 660 °C sekä standardisuuttimilla n. 650 °C (kuva 41). Seuraavassa kuormitusasteessa (75 % kuorma) 10-reikäisillä HF-suuttimilla saatiin lämpötilan arvoksi n. 600 °C, 6-reikäisillä HF-suuttimilla n. 590 °C sekä 8-reikäisillä LF- ja standardisuuttimilla n. 580 °C. Puolella kuormalla kaikilla suuttimilla pakokaasun lämpötila laski n. 90 °C.

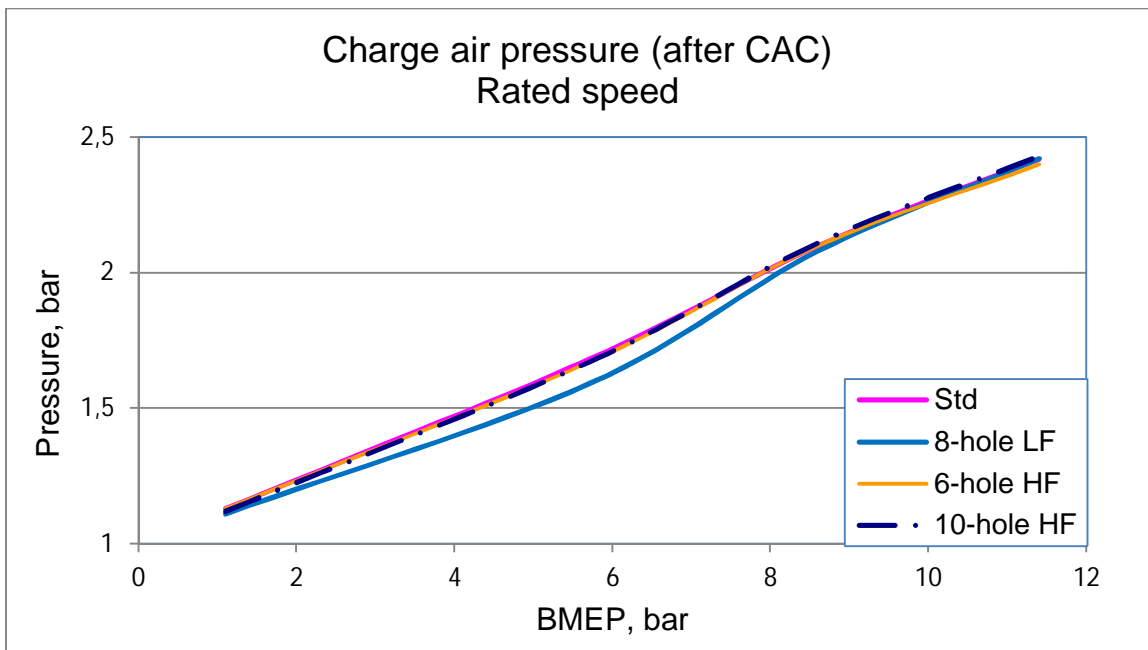
Kuvassa 42 on esitetty ahtopaine nopeudella 2200 rpm välijäähdyttimen jälkeen. Ahtopaineissa ei ollut suuria eroja ajettaessa eri suuttimilla. Ainoastaan 50 % kuormalla 8-reikäisillä LF-suuttimilla ahtopaine oli n. 0,1 bar:ia pienempi kuin muilla suuttimilla. Ensimmäisessä kuormitusasteessa (100 % kuorma) kaikilla suuttimilla ahtopaine oli n. 2,4 bar. Ennen välijäähdytintä ahtopaine oli kaikilla suuttimilla n. 0,07 bar:ia korkeampi.

Toisessa kuormitusasteessa (75 % kuorma) ahtopaine oli kaikilla suuttimilla n. 2,1 bar, ja 10 % kuormalla n. 1,1 bar. Näissä kuormitusasteissa jäähdytetyn ja jäähdyttämättömän ahtopaineen erotus oli n. 0,02–0,06 bar:ia kasvaen kuorman suuressa.

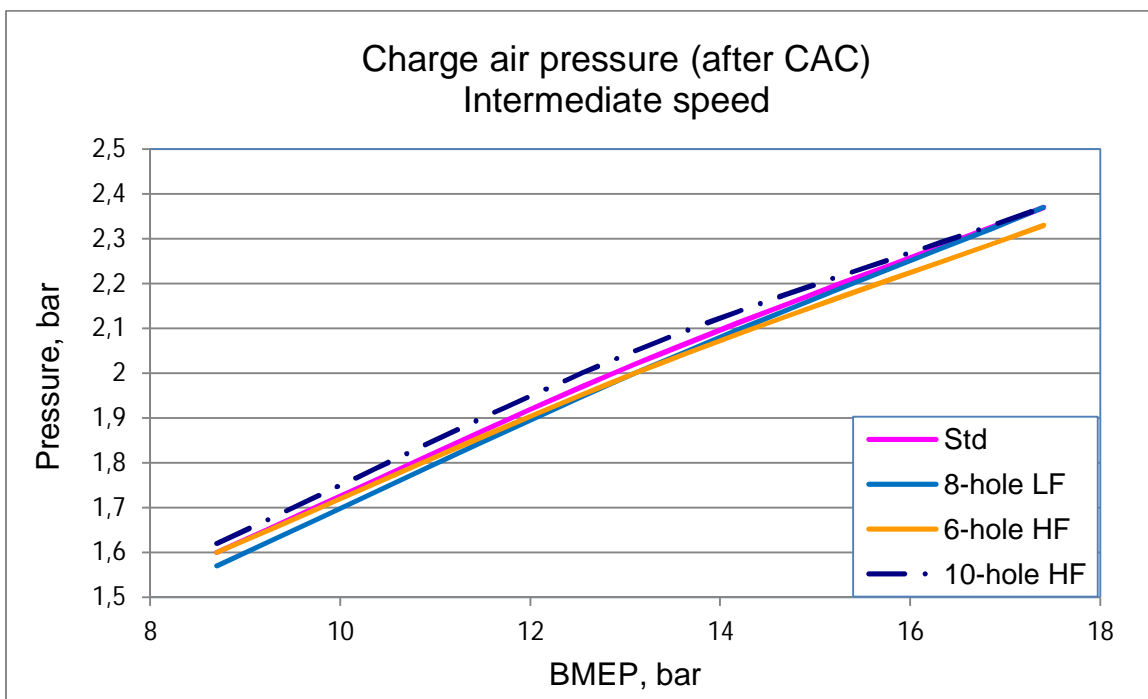


Kuva 41. Pakokaasun lämpötilat ennen ahdinta nopeudella 1500 r/min.

Välinopeudella ahtopaine oli 100 % kuormalla 6 HF-suuttimilla n. 2,3 bar, muilla suuttimilla n. 2,4 bar (kuva 43). Välinopeudella jäähdyttämättömän ja jäähdytetyn ahtopaineen erotus ensimmäisessä kuormitusasteessa oli n. 0,08 bar. Seuraavassa kuormitusasteessa (75 % kuorma) ahtopaine oli kaikilla suuttimilla n. 2,0 bar. Nopeudella 1500 r/min viimeisessä kuormitusasteessa (50 % kuorma) ahtopaine oli kaikilla suuttimilla n. 1,6 bar. Ennen välijäähdytintä ahtopaine oli n. 0,04–0,06 bar korkeampi.



Kuva 42. Ahtopaine välijäähdyttimen jälkeen nopeudella 2200 r/min.



Kuva 43. Ahtopaine välijäähdyttimen jälkeen nopeudella 1500 r/min.

5.2.2 Sylinteripaine ja lämmönvapautuminen

Kuten polttoainevertailussa todettiin, puristuspaineen maksimiarvo oli -2 kammukulma-asteen kohdalla moottorin käydessä 1000 kierrosta minuutissa. Erityisesti tämä näkyy 100 % ja 75 % kuormilla, joissa palaminen alkoi vasta yläkuolokohdan jälkeen.

Taulukossa 18 on esitetty suuttimien ruiskutusajankohdat kammukulma-asteissa täydellä kuormalla. Nimellisnopeudella kaikkien ruiskutussuuttimien esiruiskutukset (pilot) alkoivat samassa kohdassa eli -9 °CA. Ensimmäinen pääruiskutus (main 1) alkoi -4 asteen kohdalla jatkuen 16 asteeseen asti 6-reikäisillä HF-suuttimilla, 17 asteeseen asti 10-reikäisillä HF-suuttimilla ja 28 asteeseen asti 8-reikäisillä LF-suuttimilla. Standardisuuttimilla pääruiskutus kesti jakson -4–16 astetta (taulukko 13). Ruiskutettavan polttoaineen määrä ensimmäisessä pääruiskutuksessa oli n. 82 mg standardisuuttimilla. Kahdeksanreikäisillä LF-suuttimilla polttoainetta ruiskutettiin n. 85 mg, 6- ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla n. 86 mg. Toinen pääruiskutus (main 2) oli 30 ja 31 asteen kohdalla 6- ja 10-reikäisillä HF- sekä standardisuuttimilla. Kahdeksanreikäisillä LF-suuttimilla toinen pääruiskutus alkoi vasta 42 kammukulma-asteen kohdalla. Kaikilla suuttimilla toisen pääruiskutuksen aikana polttoainetta kului vain 0,1 mg. Eniten polttoainetta kului työkierron aikana 6-reikäisillä HF-suuttimilla.

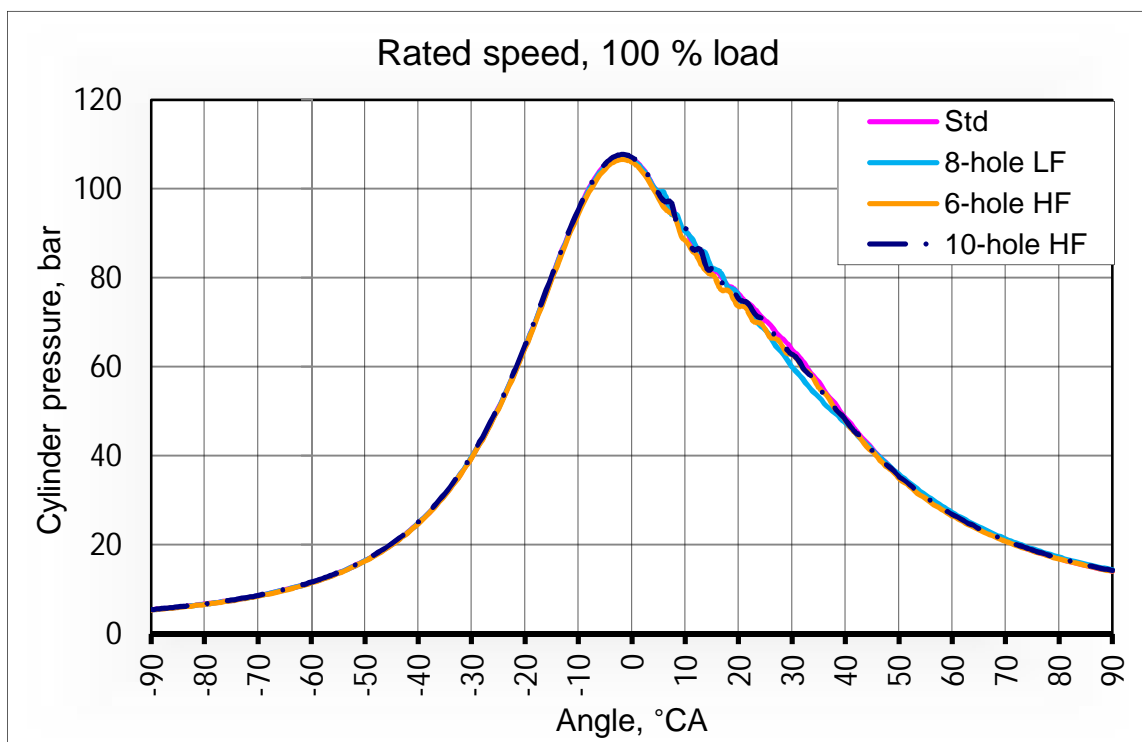
Taulukko 18. Suutinvertailun ruiskutussajankohdat 100 % kuormalla.

Injection timing, 100 % load						
(° CA)	Rated speed			Intermediate speed		
	Pilot	Main 1	Main 2	Pilot	Main 1	Main 2
8 LF	-9	-4-24	38	-10-(-7)	-4-30	39
6 HF	-9	-4-17	31	-8-(-6)	-2-22	31
10 HF	-9	-4-17	31	-8-(-6)	-2-22	31
STD	-9	-4-16	30	-8-(-5)	-2-22	31-33

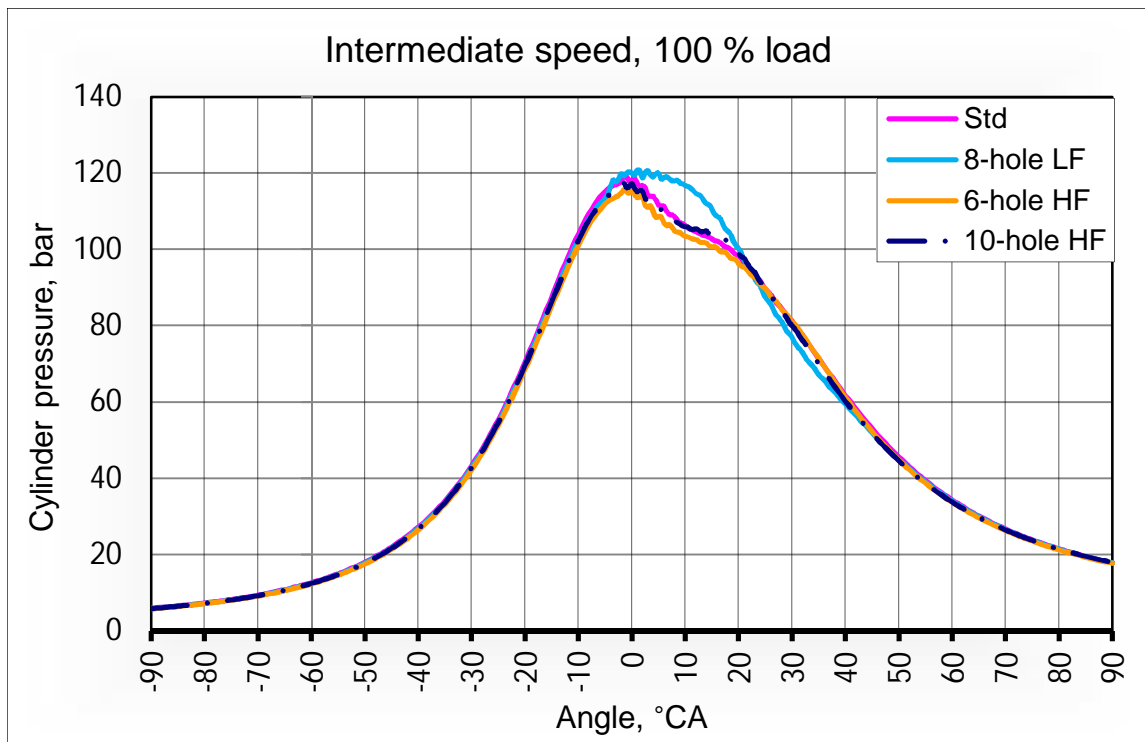
Kuvassa 44 on esitetty sylinteripaineet nimellisnopeudella 100 % kuormalla. Paineet eivät juurikaan olleet riippuvaisia käytettävistä suuttimista. Maksimipaine kaikilla suuttimilla oli n. 110 bar -2 kammankulma-asteen kohdalla (puristuspaaine).

Välinopeuden täydellä kuormalla, 8-reikäisten LF-suuttimien sylinteripaineet olivat korkeammat kuin muiden suuttimien paineet -4–20 kammankulma-asteen välillä (kuva 45). Tämä erotus selittyy 8-reikäisten LF-suuttimien polttoainemäärällä ensimmäisen pääruiskutuksen aikana: polttoainetta ruiskutettiin n. 8–14 mg enemmän kuin muilla suuttimilla. Tosin ruiskutusaikakin oli 10 astetta pidempi kuin muilla suuttimilla (taulukko 18).

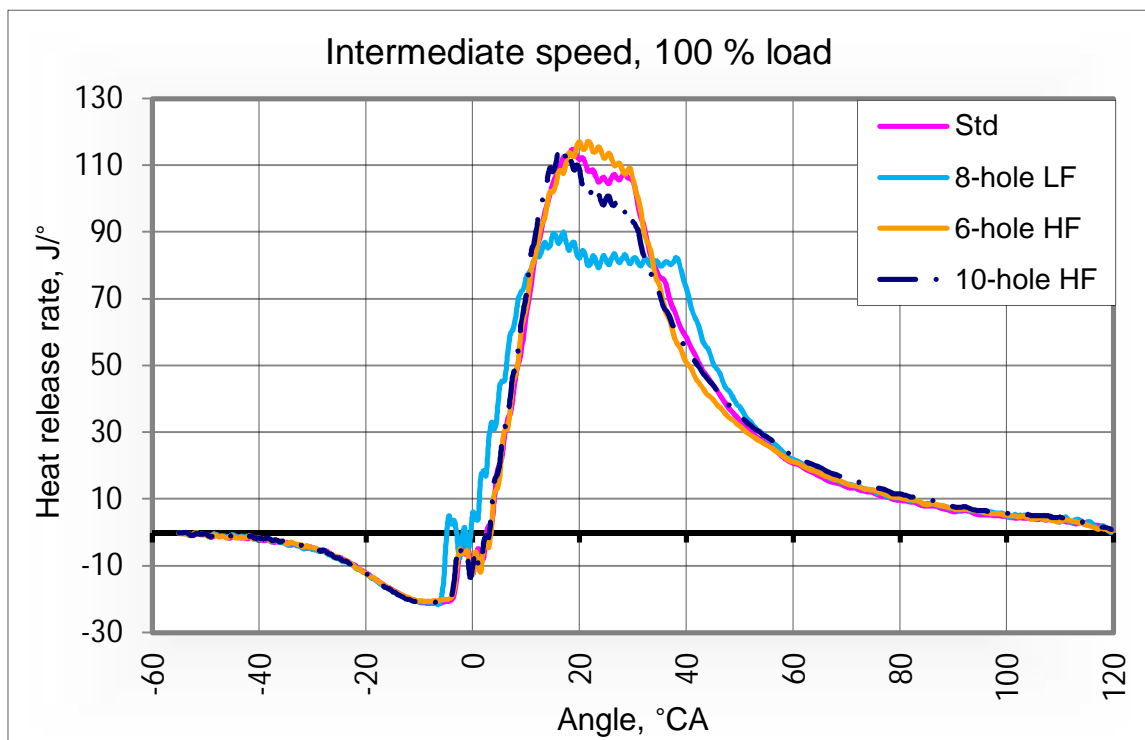
Liitteessä 22 on esitetty lämmönvapautumiskuvaaja nimellisnopeudella ja 100 % kuormalla. Moottorin käynti ei ollut kovin vakaata ja derivaatta oli levoton. Kuvassa 46 on esitetty lämmönvapautuminen täydellä kuormalla nopeudella 1500 r/min. Kahdeksanreikäisillä LF-suuttimilla esiruiskutus alkoi -10 asteen kohdalla jatkuen kolmen asteen ajan. Muilla suuttimilla esiruiskutus alkoi -8 asteen kohdalla jatkuen 2 tai 3 asteen ajan (taulukko 18).



Kuva 44. Sylinteripaineet nimellisnopeudella ja 100 % kuormalla.



Kuva 45. Sylinteripaineet välinopeudella ja 100 % kuormalla.



Kuva 46. Lämmönvapautuminen välinopeudella 100 % kuormalla.

Taulukossa 19 on esitetty suuttimien ruiskutusajankohdat kammenkulma-asteissa 75 % kuormalla. Nimellisopeudella kaikkien ruiskutussuuttimien esiruiskutukset alkoivat samassa kohdassa eli -8 °CA. Ensimmäinen pääruiskutus alkoi -3 asteen kohdalla jatkuen 14 asteeseen asti 6-reikäisillä ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla ja 18 asteeseen asti 8-reikäisillä LF-suuttimilla. Standardisuuttimilla pääruiskutus kesti välin -3–13 kammenkulma-astetta (taulukko 13). Ruiskutettavan polttoaineen määrä ensimmäisessä pääruiskutuksessa oli n. 62 mg standardisuuttimilla. Kahdeksanreikäisillä LF-suuttimilla polttoainetta ruiskutettiin n. 63 mg, 10-reikäisillä HF-suuttimilla n. 66 mg ja 6-reikäisillä HF-suuttimilla n. 67 mg. Toinen pääruiskutus oli 27 ja 28 asteen kohdalla 6- ja 10-reikäisillä HF- sekä standardisuuttimilla. Kahdeksanreikäisillä LF-suuttimilla toinen pääruiskutus alkoi 32 kammenkulma-asteen kohdalla. Kaikilla suuttimilla toisen pääruiskutuksen aikana polttoainetta kului 0,1 mg. Eniten polttoainetta ruiskutettiin yhden työkierron aikana yhteensä 6-reikäisillä HF-suuttimilla, n. 67 mg.

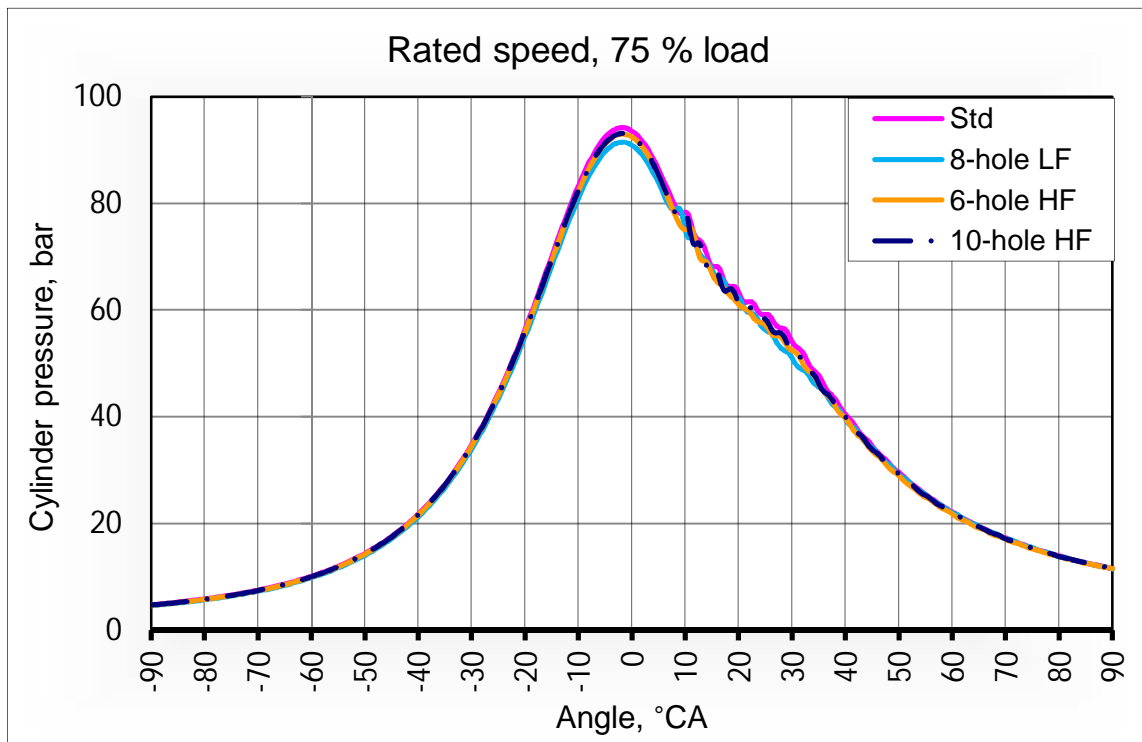
Taulukko 19. Suutinvertailun ruiskutusajankohdat 75 % kuormalla.

Injection timing, 75 % load						
(° CA)	Rated speed			Intermediate speed		
	Pilot	Main 1	Main 2	Pilot	Main 1	Main 2
8 LF	-8	-3–18	32	-9–(-6)	-3–24	33–37
6 HF	-8	-3–14	28	-9–(-5)	-2–18	28–31
10 HF	-8	-3–14	27	-9–(-5)	-2–18	28–31
STD	-8	-3–13	27	-9–(-5)	-2–18	27–30

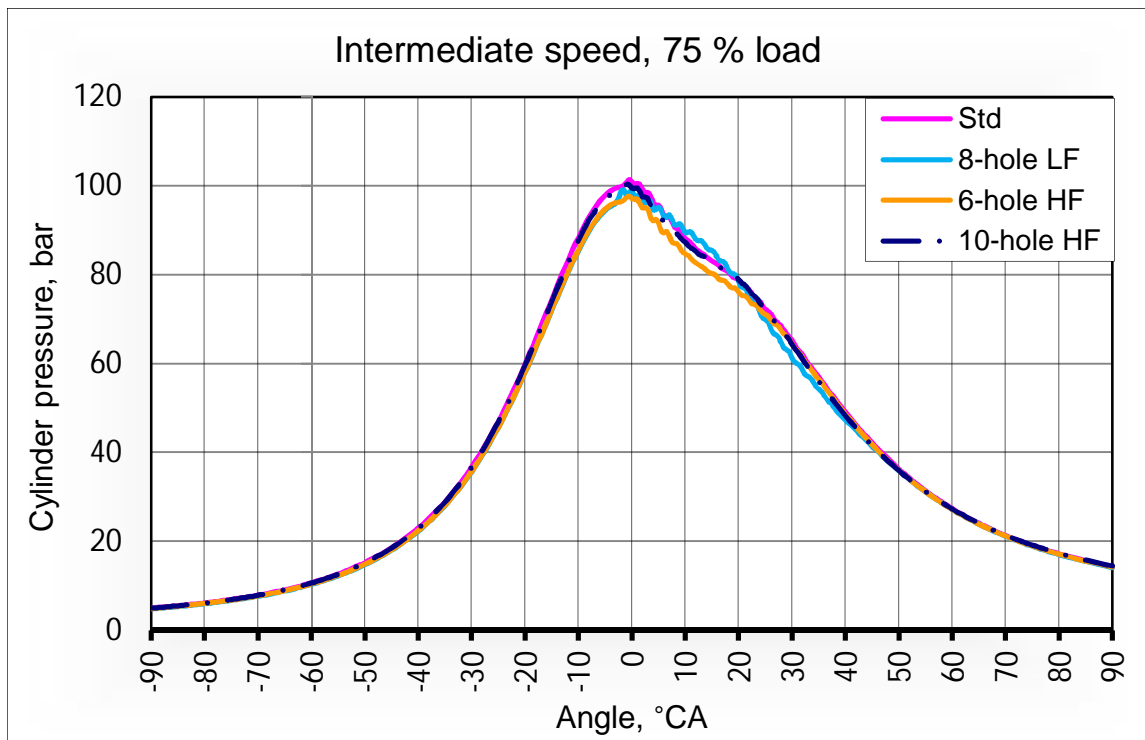
Kuvassa 47 on esitetty sylinteripaineet nimellisopeudella 75 % kuormalla. Paineet eivät juurikaan olleet riippuvaisia käytettävistä suuttimista. Maksimipaine standardisuuttimilla oli n. 94 bar, 6- ja 10-reikäisillä HF-suttimilla n. 93 bar ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. 92 bar -2 kammenkulma-asteen kohdalla (puristuspaineita). Pientä eroavaisuutta paineissa oli nähtävissä n. 24–35 kammenkulma-asteen välillä, jolloin 8-reikäisten LF-suuttimien ensimmäinen pääruiskutus oli juuri loppunut. Toinen pääruiskutus sijoittui 6- ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla 28–31 asteen välille ja 8-reikäisten LF-suuttimien toinen pääruiskutus oli 33 ja 37 asteen välillä. Suurin paine-ero havaittiin 28 kammenkulma-

asteen kohdalla standardisuuttimien (n. 57 bar) ja 8-reikäisten LF-suuttimien (n. 53 bar) välillä. Lämmönvapautumiskuvaaja nimellinopeudella ja 75 % kuormalla on liitteessä 23.

Nopeudella 1500 r/min ja 75 % kuormalla sylinteripaineet erosivat hieman toisistaan -10 asteesta lähtien (kuva 48). Maksimipaine oli standardisuuttimilla n. 101 bar yläkuolokohdassa, 6-reikäisillä HF-suuttimilla n. 98 bar -0,5 asteen kohdalla, 10-reikäisillä HF-suuttimilla n. 100 bar -0,5 asteen kohdalla ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. 99 bar -1,5 asteen kohdalla. Suurin paine-ero suuttimien välillä oli 11 kammengkulma-asteen kohdalla (ensimmäisen pääruiskutuksen aikana, taulukko 19), jolloin 8-reikäisillä LF-suuttimilla sylinteripaine oli n. 6 bar korkeampi kuin 6-reikäisillä HF-suuttimilla (84 bar).

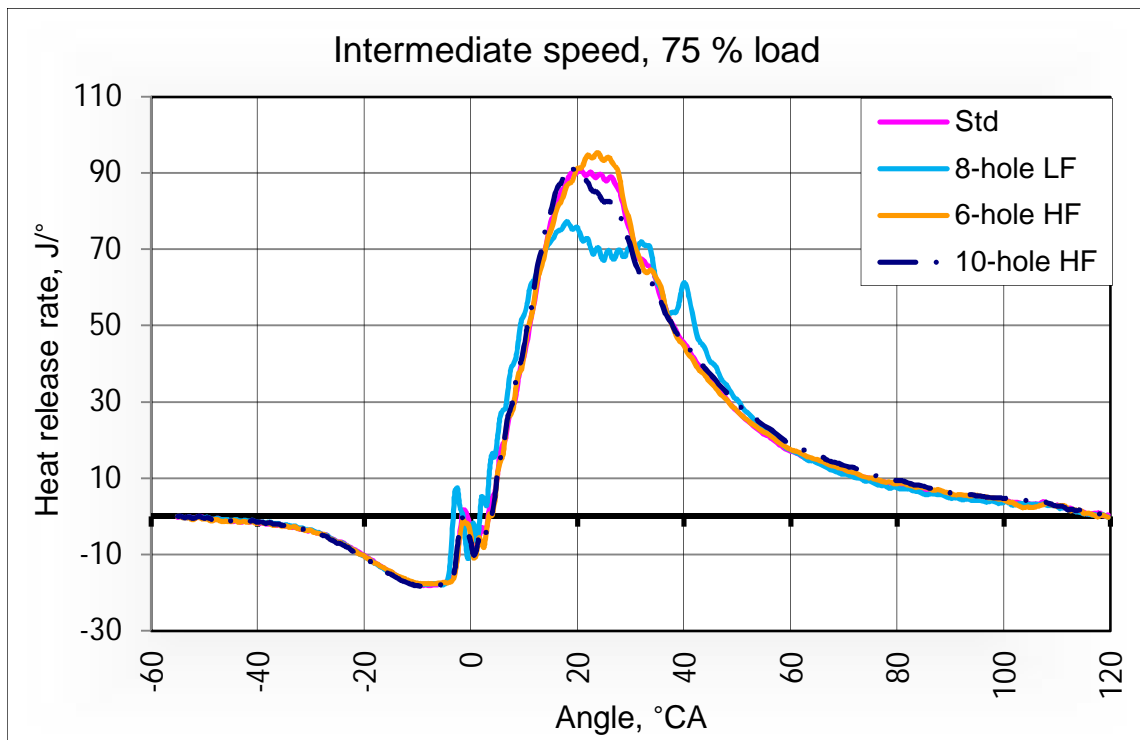


Kuva 47. Sylinteripaineet nimellinopeudella ja 75 % kuormalla.



Kuva 48. Sylinteripaineet välinopeudella ja 75 % kuormalla.

Välinopeudella esiruiskutus alkoi -9 asteen kohdalla jatkuen 3–4 asteen ajan (taulukko 19). Kuvasta 49 huomataan, että 8-reikäisillä LF-suuttimilla syyttymisjättämä oli lyhin. Lämpöä vapautui nopeimmin 18 kammengkulma-asteen kohdalla (1. pääruiskutuksen aikana), n. 77 joulea kammengkulma-astetta kohti. Standardisuuttimilla ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla lämpöä vapautui nopeimmin kaksi astetta myöhemmin (heti 1. pääruiskutuksen loputtua), n. 91 J/° CA. Kuusireikäisillä HF-suuttimilla lämpöä vapautui nopeimmin vasta 24 kammengkulma-asteen kohdalla (kuusi astetta 1. pääruiskutuksen lopusta ja 4 astetta ennen 2. pääruiskutuksen aloitusta), n. 95 J/° CA. Erityispiirteenä nähdään 8-reikäisten LF-suuttimien lämmönvapautumispiikki 40 kammengkulma-asteen kohdalla (kolme astetta 2. pääruiskutuksen loppumisesta). Tällöin lämpöä vapautui n. 61 J/° CA eli n. 16 J/° CA nopeammin kuin muilla suuttimilla. Eniten polttoainetta ruiskutettiin palotilaan yhden työkierron aikana 8-reikäisillä LF-suuttimilla (n. 93 mg) ja vähiten standardisuuttimilla (n. 87 mg).



Kuva 49. Lämmönvapautuminen välinopeudella 75 % kuormalla.

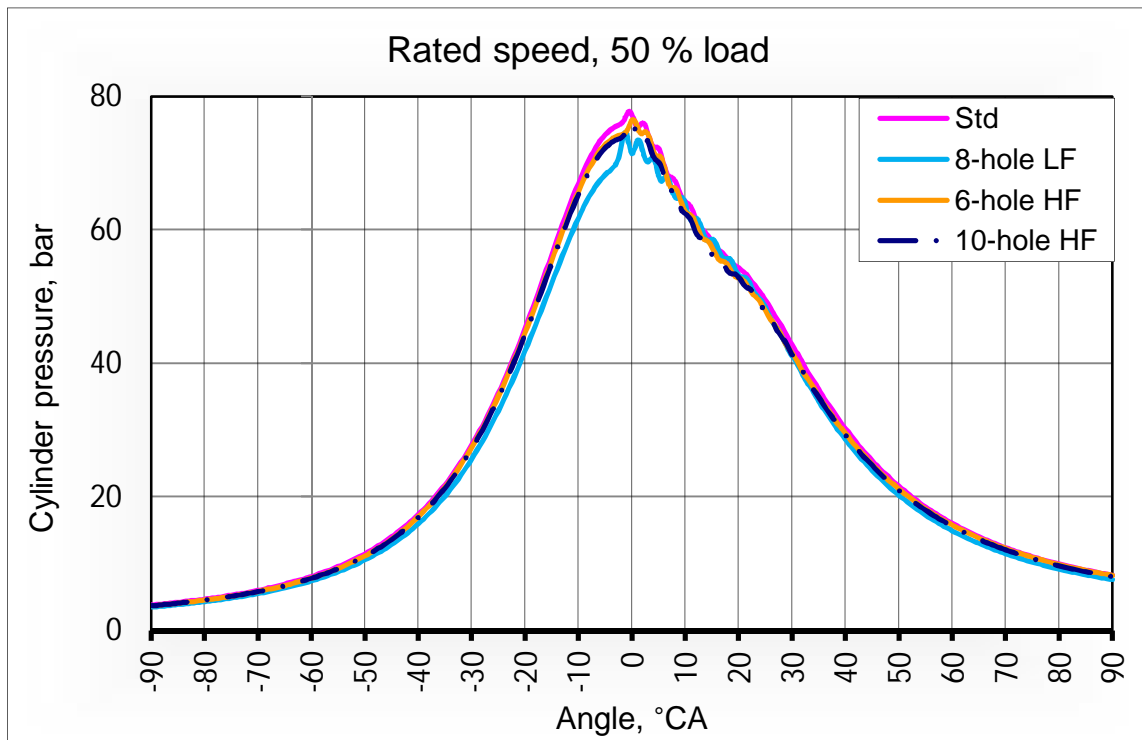
Taulukossa 20 on esitetty ruiskutusajankohdat 50 % kuormalla. Nopeudella 2200 r/min ensimmäisenä esiruiskutus alkoi 8-reikäisillä LF-suuttimilla (14 °CA) jatkuen -9 asteeseen. Standardisuuttimilla sekä kuusi- ja kymmenreikäisillä HF-suuttimilla esiruiskutus kesti -13–(-9) °CA. Liitteessä 24 on esitetty lämmönvapautumiskuvaaja nimellisnopeudella ja 50 % kuormalla. Kahdeksanreikäisillä LF-suuttimilla oli selkeä piikki -2,5 asteen kohdalla (ensimmäisen pääruiskutuksen aikana), jolloin lämpöä vapautui jopa 90 % per aste nopeammin kuin muilla suuttimilla.

Nimellispyörintänopeudella ensimmäinen pääruiskutus sijoittui -4 ja 9 asteen välille kaikilla suuttimilla. Tällä välillä mitattiin myös sylinteripaineiden maksimi-arvot kaikilla suuttimilla (kuva 50). Standardisuuttimilla oli korkein maksimipaine n. 78 bar, -0,5 °CA, ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla matalin n. 74 bar, -1 °CA. Muiden suuttimien maksimipaineet jäivät näiden kahden arvon väliin.

Välinopeudella sylinteripaineiden maksimi-arvo oli suurin standardisuuttimilla (n. 80 bar, 1 °CA) ja matalin 6-reikäisillä HF-suuttimilla (n. 76 bar, 0 °CA). Pienet erot sylinteripaineiden välillä jatkuivat noin 25 kammenkulma-asteeseen asti (kuva 51).

Taulukko 20. Suutinvertailun ruiskutusajankohdat 50 % kuormalla.

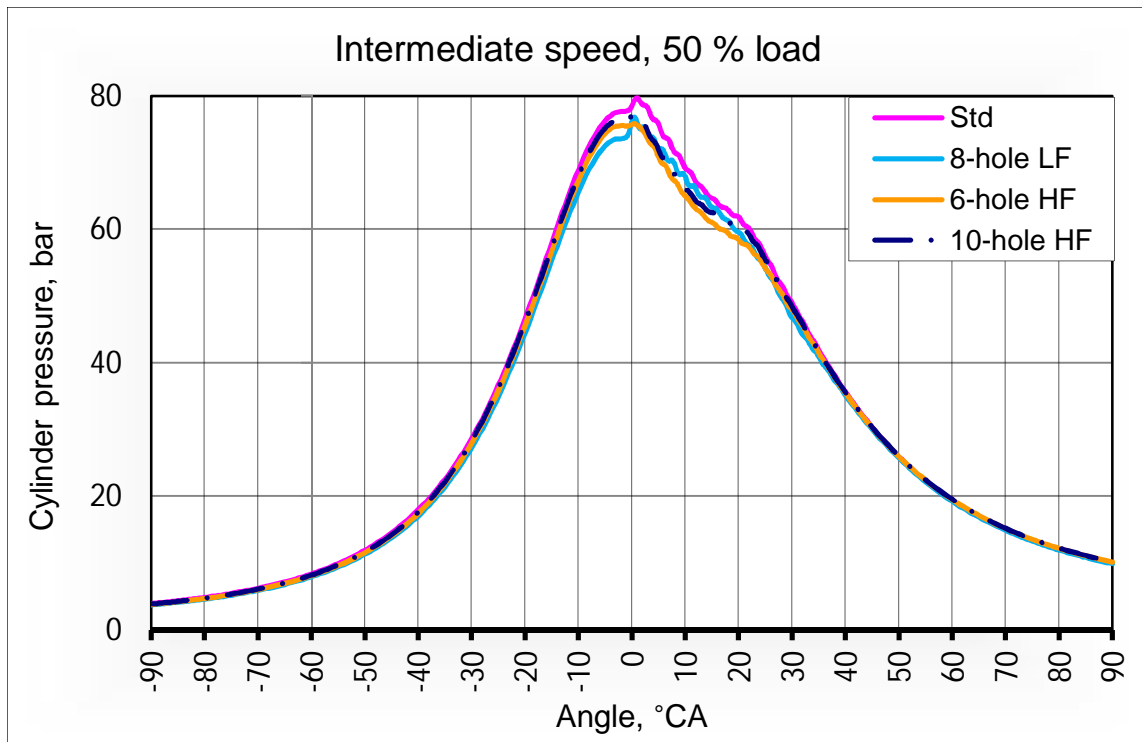
Injection timing, 50 % load						
(° CA)	Rated speed			Intermediate speed		
	Pilot	Main 1	Main 2	Pilot	Main 1	Main 2
8 LF	-14-(-9)	-4-8	22	-9-(-5)	-2-14	23-29
6 HF	-13-(-9)	-4-9	22	-9-(-5)	-2-11	21-25
10 HF	-13-(-9)	-4-8	22	-9-(-5)	-2-11	21-25
STD	-13-(-9)	-4-8	22	-9-(-5)	-2-10	20-24



Kuva 50. Sylinteripaineet nimellisnopeudella ja 50 % kuormalla.

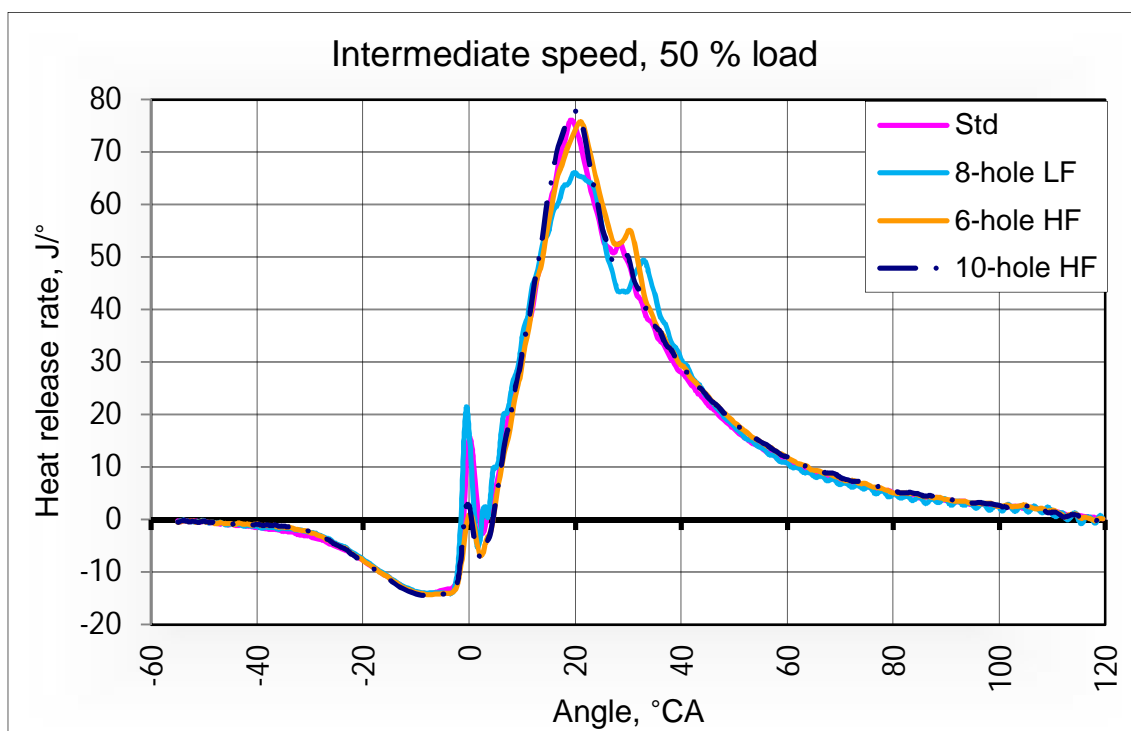
Nopeuden 1500 r/min puolen kuorman lämmönvapautumiskuvaajasta nähdään, kuva 52, että standardisuuttimilla ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla oli lämmönvapautumispiikki -0,5-0 °CA kohdalla. Lämpöä vapautui 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. 22 J/° CA (puoli astetta ennen yläkuolokohtaa) ja standardisuuttimilla 16 J/° CA (yläkuolokohdassa). Noin 20 kammikulma-asteen kohdalla lämpöä vapautui kaikilla suuttimilla nopeimmin, standardisuuttimilla n. 78 J/° CA, 6-reikäisillä HF-suuttimilla n. 76 J/° CA, 10-reikäisillä

HF-suuttimilla n. $78 \text{ J}/^\circ \text{CA}$ ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. $66 \text{ J}/^\circ \text{CA}$. Toisen pääruiskutuksen aiheuttama lämmönvapautuminen nähtiin noin 30 kammengkulma-asteen kohdalla selkeästi 6- ja 8-reikäisillä suuttimilla. Muilla suuttimilla piikki oli pienempi ja hieman aikaisemmin.



Kuva 51. Sylinteripaineet välinopeudella 50 % kuormalla.

Kymmenen prosentin kuormalla ja nimellisnopeudella kaikilla suuttimilla ruiskutukset tapahtuivat hyvin samoihin aikoihin, taulukko 21. Standardisuuttimilla ja 6-reikäisillä HF-suuttimilla ruiskutettiin polttoainetta yhteensä n. 16 mg. Kymmenreikäisillä HF-suuttimilla polttoainetta ruiskutettiin yhteensä n. 15 mg ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. 14 mg.

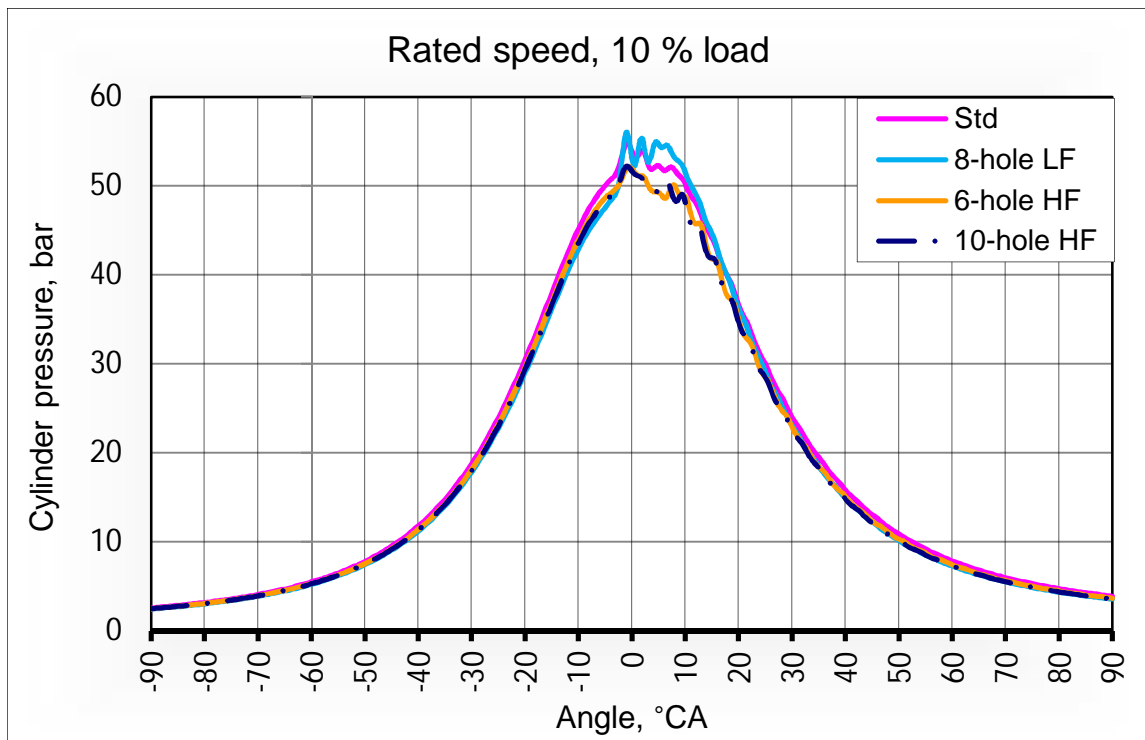


Kuva 52. Lämmönvapautuminen välinopeudella 50 % kuormalla.

Taulukko 21. Suutinvertailun ruiskutusajankohdat 10 % kuormalla.

Injection timing, 10 % load			
(° CA)	Rated speed		
	Pilot	Main 1	Main 2
8 LF	-18-(-13)	-8-(-2)	12
6 HF	-18-(-13)	-8-(-1)	13
10 HF	-18-(-13)	-8-(-1)	12
STD	-18-(-13)	-8-(-1)	13

Sylinteripaineissa huomattiin 10 % kuormalla yläkuolokohdan tuntumassa pientä sahausliikettä kaikilla suuttimilla (kuva 53). Korkein maksimipaine mitattiin 8-reikäisillä LF-suuttimilla 56 bar (-1 °CA). Standardisuuttimilla mitattiin maksimipaineeksi 55 bar (-1 °CA) sekä 6- ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla 52 bar (-1 °CA). Lämmönvapautumiskuvaaja nimellinopeudella ja 10 % kuormalla on liitteessä 25.



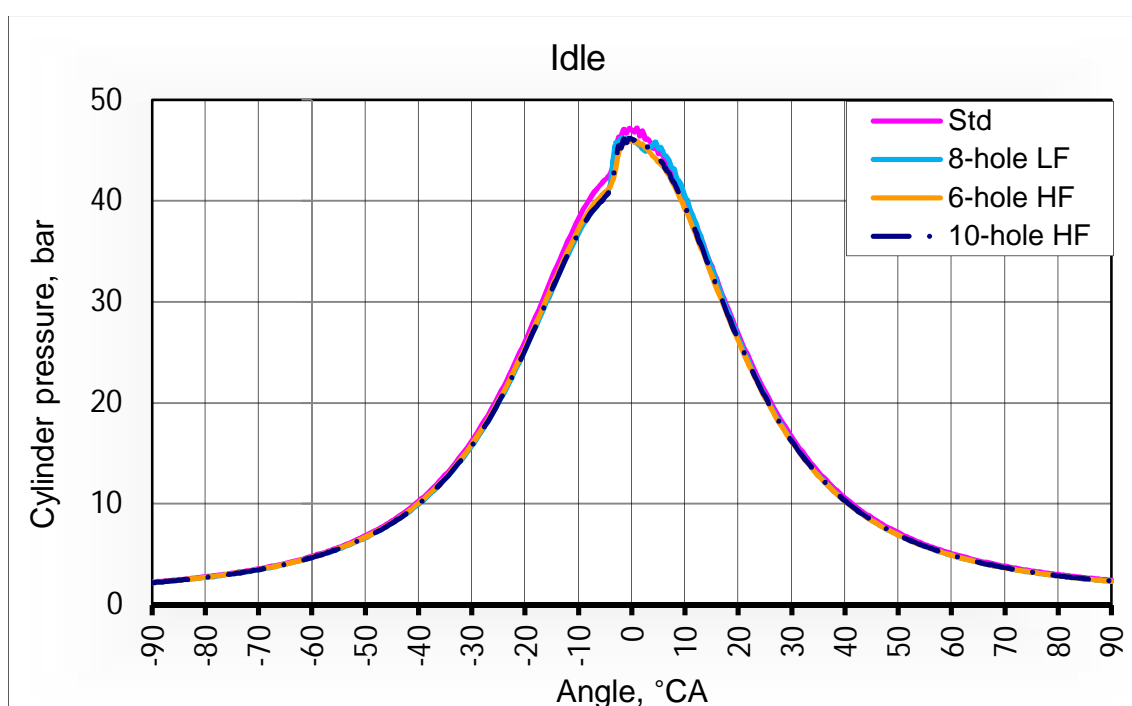
Kuva 53. Sylinteripaineet nimellisnopeudella 10 % kuormalla.

Joutokäynnillä ruiskutusajankohdat olivat 6- ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla samat, taulukko 22. Kahdeksanreikäisten LF-suuttimien ruiskutukset erosivat pääruiskutuksien osalta kahdesta edellisestä; ensimmäinen pääruiskutus oli vain yhden kammengkulma-asteen pituinen, ja 2. pääruiskutuksessa ruiskutus alkoi asteen ennen yläkuoloa ja jatkuu kaksi astetta. Muilla suuttimilla ruiskutettiin polttoainetta n. 8 mg työkierron aikana, mutta 8-reikäisillä LF-suuttimilla polttoainetta kului vain n. 5 mg. Tämä johtui mahdollisesti 8-reikäisten suuttimien hyvästä seoksenmuodostuksesta.

Sylinteripaineet olivat lähellä toisiaan kaikilla suuttimilla, kuva 54. Korkein maksimipaine mitattiin standardisuuttimilla (47 bar, 1 °CA). Joutokäynnin lämmönvapautumiskuvaaja löytyy liitteestä 26.

Taulukko 22. Ruiskutusajankohdat joutokäynnillä suutinvertailussa.

Injection timing, idle			
(° CA)	Pilot	Main 1	Main 2
8 LF	-10(-8)	-6	-1-1
6 HF	-10(-8)	-6(-4)	1-3
10 HF	-10(-8)	-6(-4)	1-3
STD	-10(-8)	-6(-5)	1-3

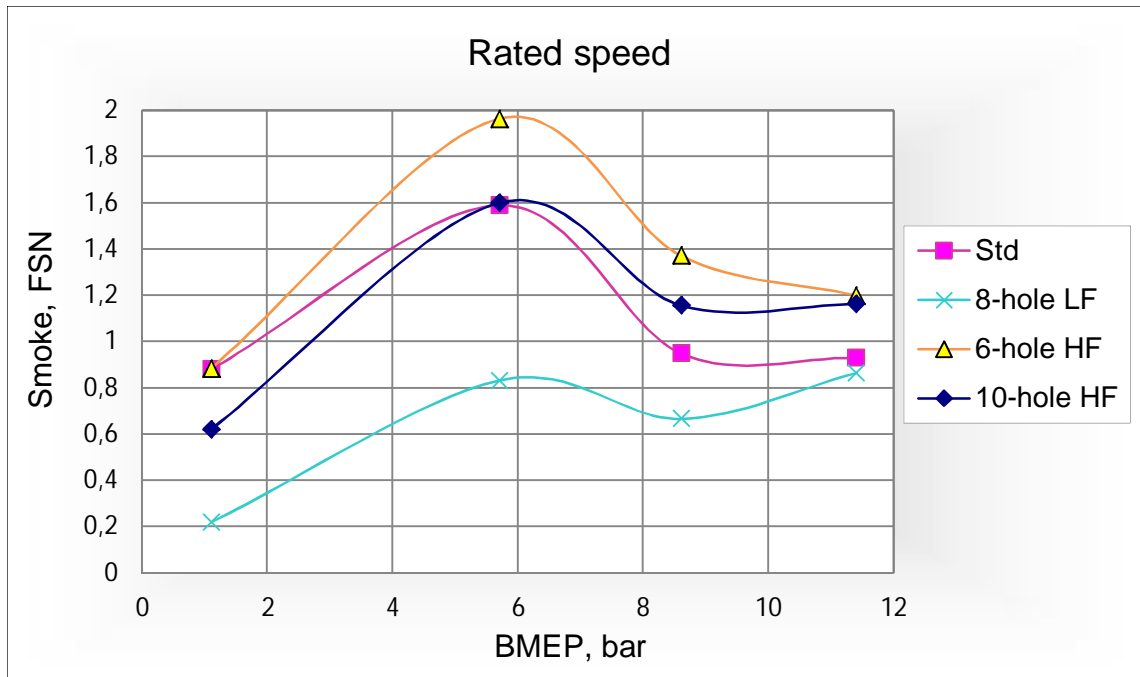


Kuva 54. Sylinteripaineet joutokäynnillä.

5.2.3 Savutus

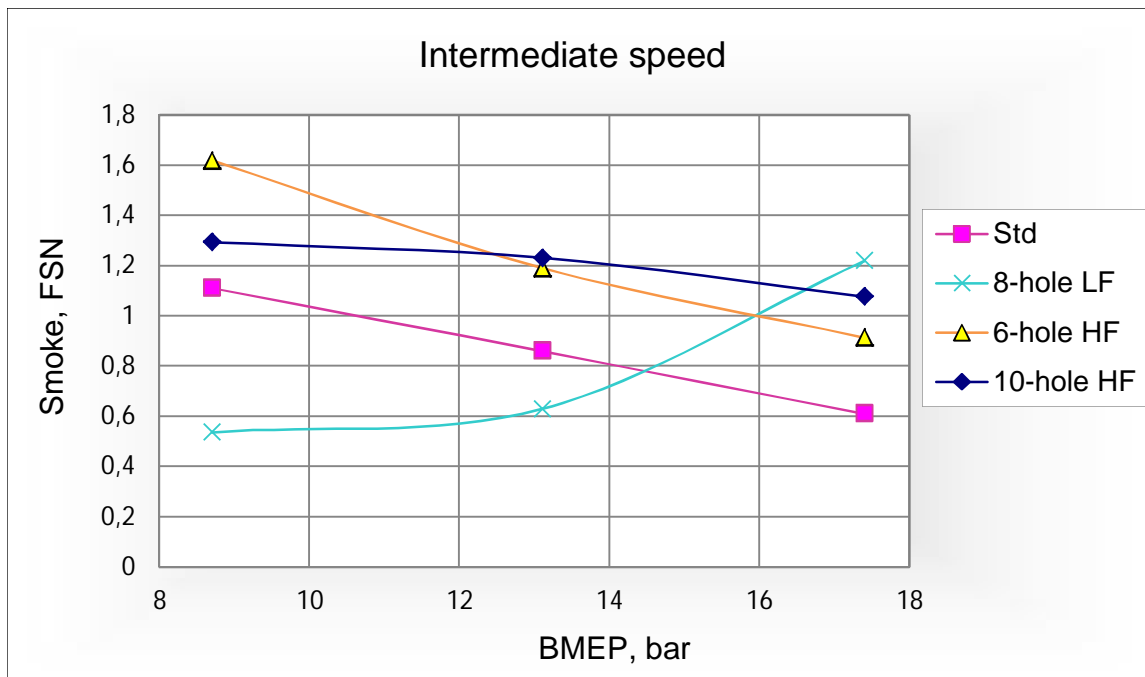
Kuvasta 55 huomataan, että 6-reikäisillä HF-suuttimilla moottori savutti nimellisnopeudella kaikissa kuormituspisteissä eniten ja 8-reikäiset LF-suuttimet vähiten. Savutus oli 6-reikäisillä HF-suuttimilla suurimmillaan 50 % kuormalla ollen n. 2,0 (FSN). Samassa pisteessä 10-reikäisillä HF-suuttimilla savutusarvo oli n. 1,6 (FSN), standardisuuttimilla samoin n. 1,6 (FSN) ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. 0,8 (FSN). Vähiten savutusta aiheuttivat 8-reikäiset LF-suuttimet 10 % kuormalla (n. 0,2 FSN), jolloin 10-reikäisillä HF-

suuttimilla savutusarvo oli n. 0,6 (FSN) ja 6-reikäisillä HF- sekä standardisuuttimilla n. 0,9 (FSN). Kahdeksanreikäisten LF-suuttimien vähäinen savutus oli mahdollisesti seurausta suuttimien hyvästä seoksenmuodostuksesta.



Kuva 55. Savutusarvot nimellispoiveudella.

Välinpoiveudella (1500 rpm) savutusarvot pääasiassa laskivat suoraviivaisesti tehollisen keskipaineen noustessa, mutta 8-reikäisillä LF-suuttimilla savutusarvot nousivat (kuva 56). Puolella kuormalla eniten savutusta aiheuttivat 6-reikäiset HF-suuttimet (n. 1,6 FSN) ja vähiten 8-reikäiset LF-suuttimet (n. 0,5 FSN). Seitsemänkymmenenviiden prosentin kuormalla eniten savutusta aiheuttivat 10-reikäiset HF-suuttimet (n. 1,2 FSN) ja vähiten edelleen 8-reikäiset LF-suuttimet (n. 0,6 FSN), mutta täydellä kuormalla 8-reikäiset LF-suuttimet tuottivatkin korkeimman savutusarvon (n. 1,2 FSN) ja standardisuuttimet pienimmän (n. 0,6 FSN).



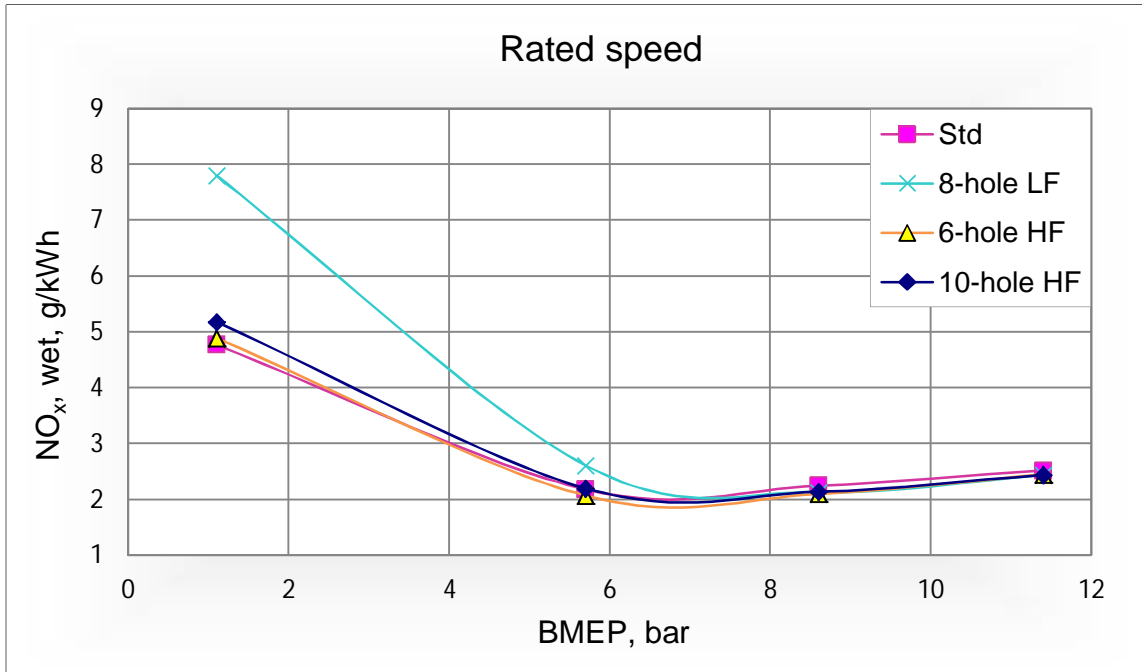
Kuva 56. Savutusarvot välinopeudella.

5.2.4 Typen oksidit

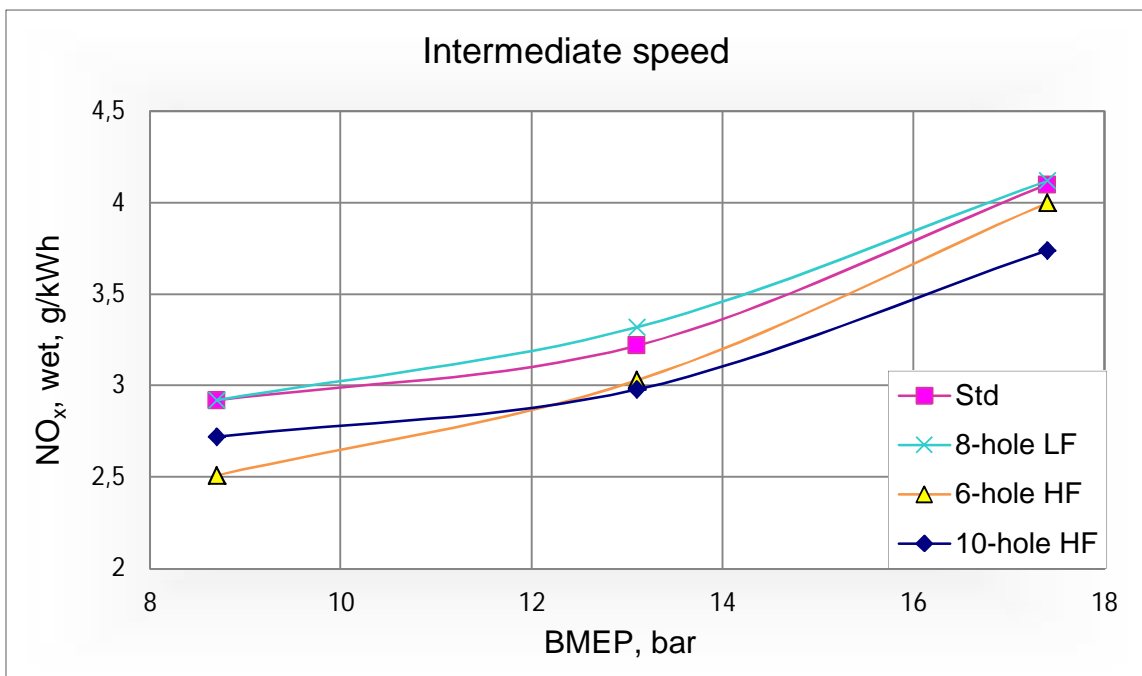
Nimellisopeudella typen oksidien ominaispäästöt olivat hyvin yhtä suurina poikkeuksena 8-reikäiset LF-suuttimet (kuva 57). Pienellä kuormalla (10 %) 8-reikäiset LF-suuttimet aiheuttivat huomattavasti suuremmat NO_x -päästöt (n. 7,8 g/kWh) kuin muut suuttimet (n. 4,8–5,2 g/kWh). Puolella kuormalla erot tasaantuivat ja kaikkien suuttimien NO_x -arvot olivat n. 2,1–2,6 g/kWh:n välillä. Täydellä ja 75 % kuormalla typen oksidien ominaispäästöt olivat kaikilla suuttimilla lähes samat (n. 2,1 g/kWh 75 % kuormalla ja n. 2,5 g/kWh 100 % kuormalla).

Välinopeudella (1500 rpm) ajettaessa typen oksidien mittaustuloksien erot suuttimien välillä olivat selvemmät kuin nimellisopeudella (kuva 58). Välinopeudella 8-reikäiset LF-suuttimet aiheuttivat eniten typen oksideja kaikissa kuormitusasteissa. Pienimmät päästöt saatiin 10 % kuormalla 6-reikäisillä HF-suuttimilla ja muissa kuormitusasteissa 10-reikäisillä HF-suuttimilla. Alhaisin mittaustulos, n. 2,5 g/kWh, saatiin 6-reikäisillä HF-suuttimilla 10 % kuormalla. Tällöin 8-reikäisillä LF-suuttimilla ja standardisuuttimilla mitattiin n. 2,9 g/kWh. Suurin NO_x -päästö, n. 4,1 g/kWh, mitattiin 100 % kuormalla.

ajettaessa 8-reikäisillä LF-suuttimilla ja standardisuuttimilla. Tällöin 10-reikäisillä HF-suuttimilla saatiin arvo n. 3,7 g/kWh.



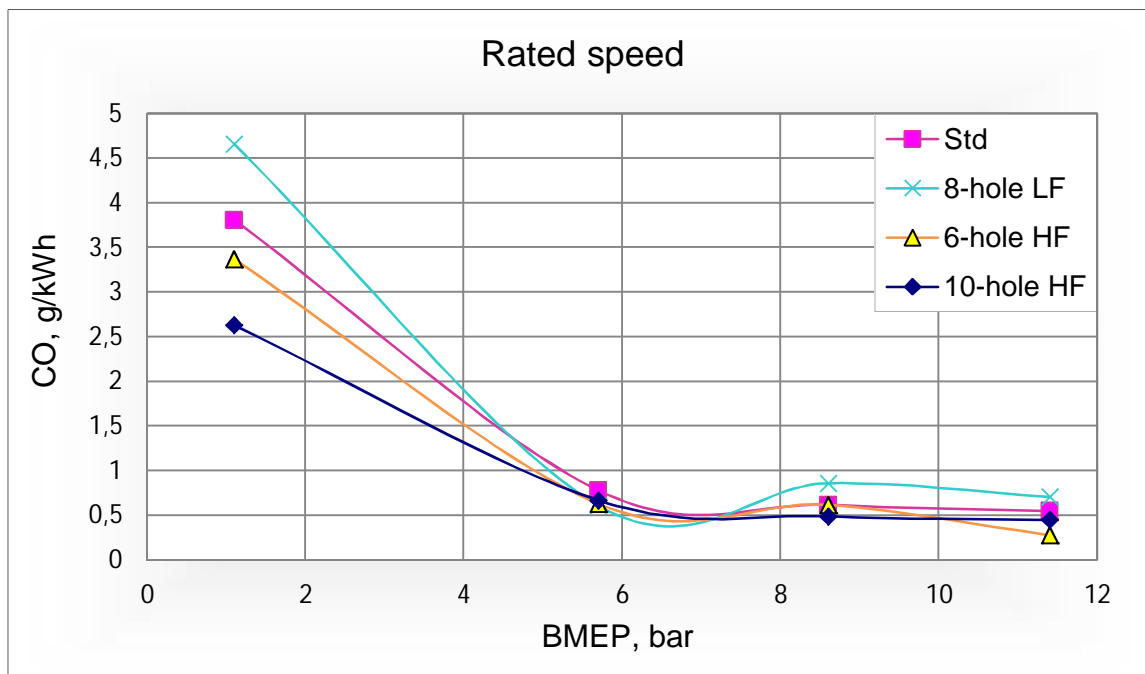
Kuva 57. Typenoksidit nimellisa nopeudella.



Kuva 58. Typenoksidit välinopeudella.

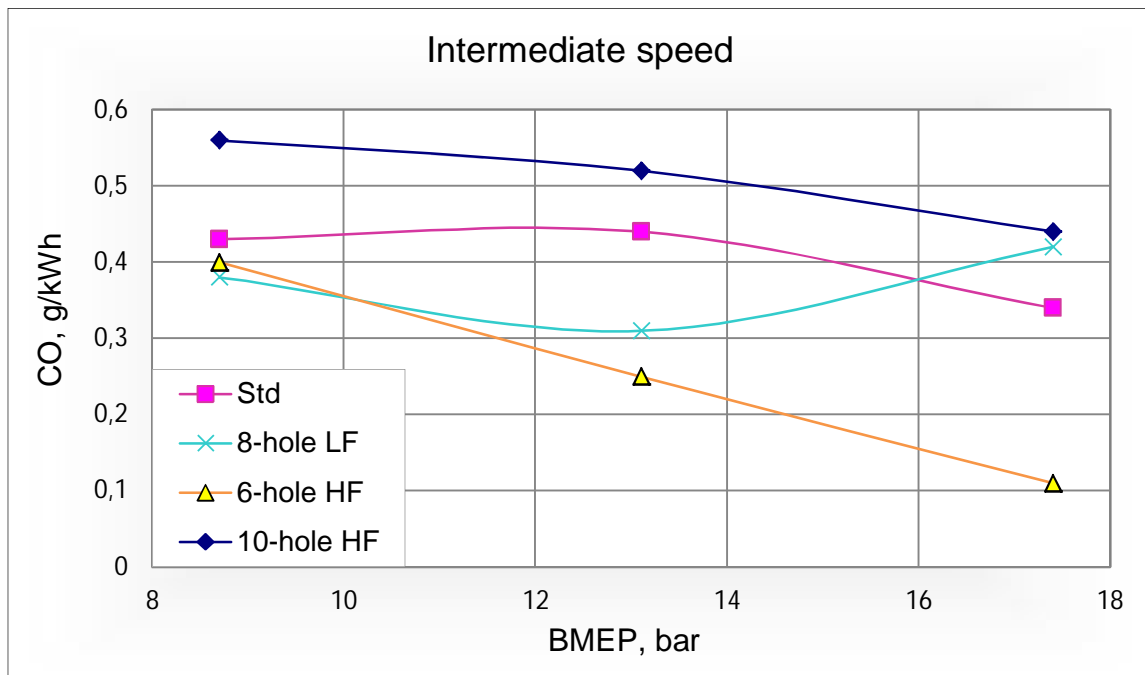
5.2.5 Hiilimonoksidit

Nopeudella 2200 r/min korkeimmat hiilimonoksidi- eli häkäarvot mitattiin 8-reikäisillä LF-suuttimilla 10 % kuormalla ollen n. 4,7 g/kWh (kuva 59). Tässä kuormituspisteessä standardisuuttimilla saatiin arvo n. 3,8 g/kWh, 6-reikäisillä HF-suuttimilla n. 3,4 g/kWh ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla n. 2,7 g/kWh. Suuremmilla kuormituksilla hiilimonoksidipäästöt olivat lähempänä toisiaan ja alle 1 g/kWh. Pienin arvo nimellisa nopeudella ja täydellä kuormalla saatiin 6-reikäisillä HF-suuttimilla (n. 0,3 g/kWh), 8-reikäisillä LF-suuttimilla mitattiin n. 0,7 g/kWh.



Kuva 59. Hiilimonoksidipäästöt nimellisa nopeudella.

Välinopeudella kaikkien suuttimien häkäpäästöt olivat alle 0,6 g/kWh (kuva 60). Täydellä kuormalla 6-reikäisillä HF-suuttimilla mitattiin pienimmät hiilimonoksidipäästöt (n. 0,1 g/kWh). Tällöin 8-reikäisillä LF-suuttimilla ja 10-reikäisillä HF-suuttimilla saatiin arvo n. 0,4 g/kWh. Suurimmat häkäpäästöt mitattiin 50 % kuormalla 10-reikäisillä HF-suuttimilla, tällöin 8-reikäisillä LF-suuttimilla mitattiin arvo n. 0,4 g/kWh.

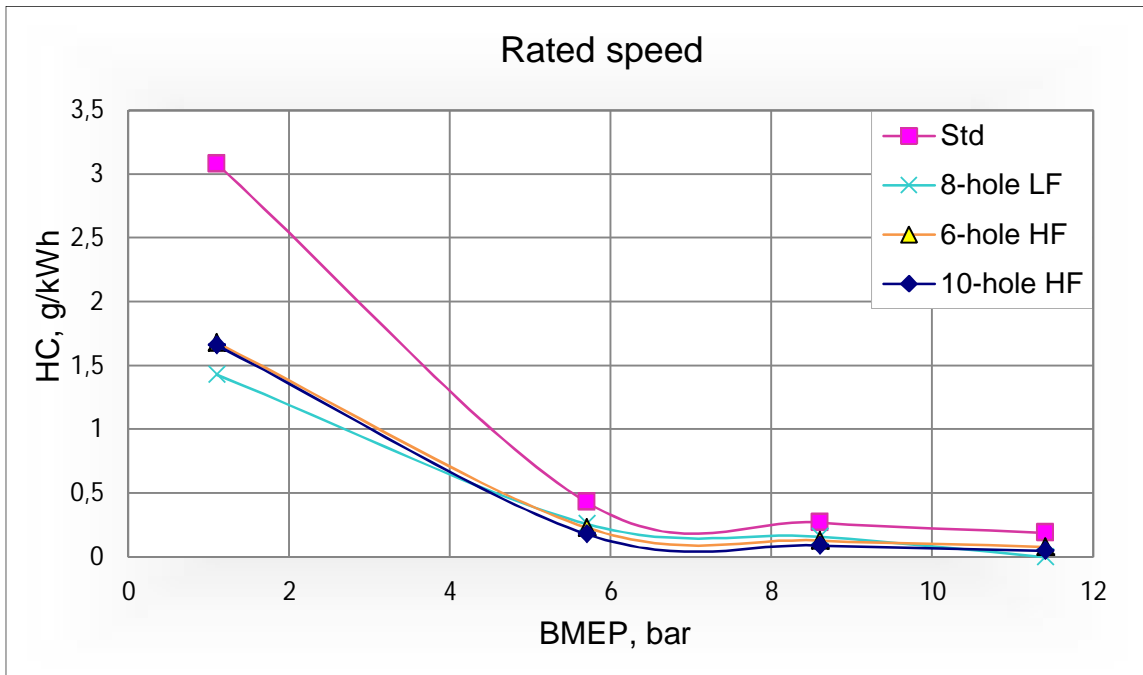


Kuva 60. Hiilimonoksidipäästöt välinopeudella.

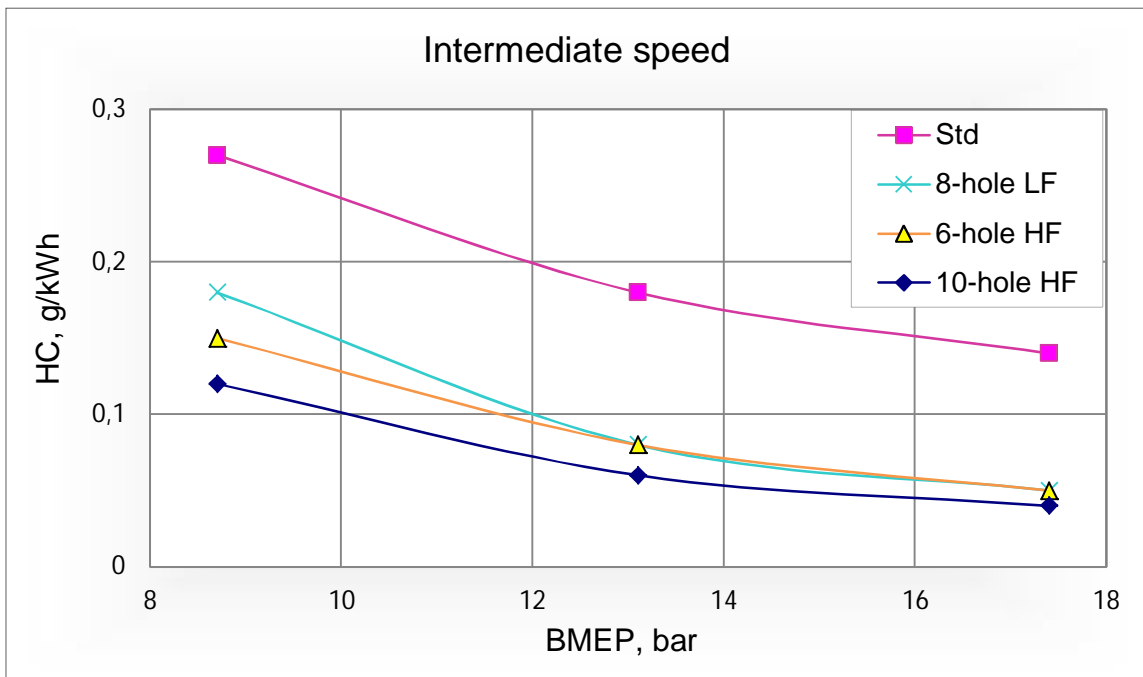
5.2.6 Hiilivedyt

Kuvassa 61 on esitetty hiilivetyypäästöt moottorin käydessä nopeudella 2200 r/min, jolloin standardisuuttimilla syntyi eniten hiilivetyjä (3,1 g/kWh) 10 % kuormalla. Tässä pisteessä muilla suuttimilla syntyi hiilivetyypäästöjä n. 1,3 g/kWh vähemmän. Suuremmilla kuormilla hiilivetyypäästöt jäivät pienemmiksi kuin 0,5 g/kWh kaikilla suuttimilla standardisuuttimien kuitenkin tuottaessa niitä eniten.

Kuvassa 62 on esitetty hiilivetyypäästöt moottorin käydessä 1500 r/min, jolloin standardisuuttimet aiheuttivat jälleen eniten hiilivetyjä (n. 0,27 g/kWh) 50 % kuormalla. Kahdeksanreikäisillä LF-suuttimilla samassa pisteessä syntyi hiilivetyjä n. 0,18 g/kWh ja 6-reikäisillä HF-suuttimilla n. 0,15 g/kWh sekä 10-reikäisillä HF-suuttimilla 0,12 g/kWh. Toisessa kuormituspisteessä (75 % kuorma) hiilivetyjä syntyi standardisuuttimilla n. 0,18 g/kWh, 8-reikäisillä LF-suuttimilla ja 6-reikäisillä HF-suuttimilla n. 0,08 g/kWh sekä 10-reikäisillä HF-suuttimilla 0,06 g/kWh. Täydellä kuormalla standardisuuttimilla syntyi hiilivetyjä 0,14 g/kWh ja muilla suuttimilla n. 0,05 g/kWh.



Kuva 61. Hiilivetypäästöt nimellinopeudella.



Kuva 62. Hiilivetypäästöt välinopeudella.

5.2.7 Pienhiukkaset

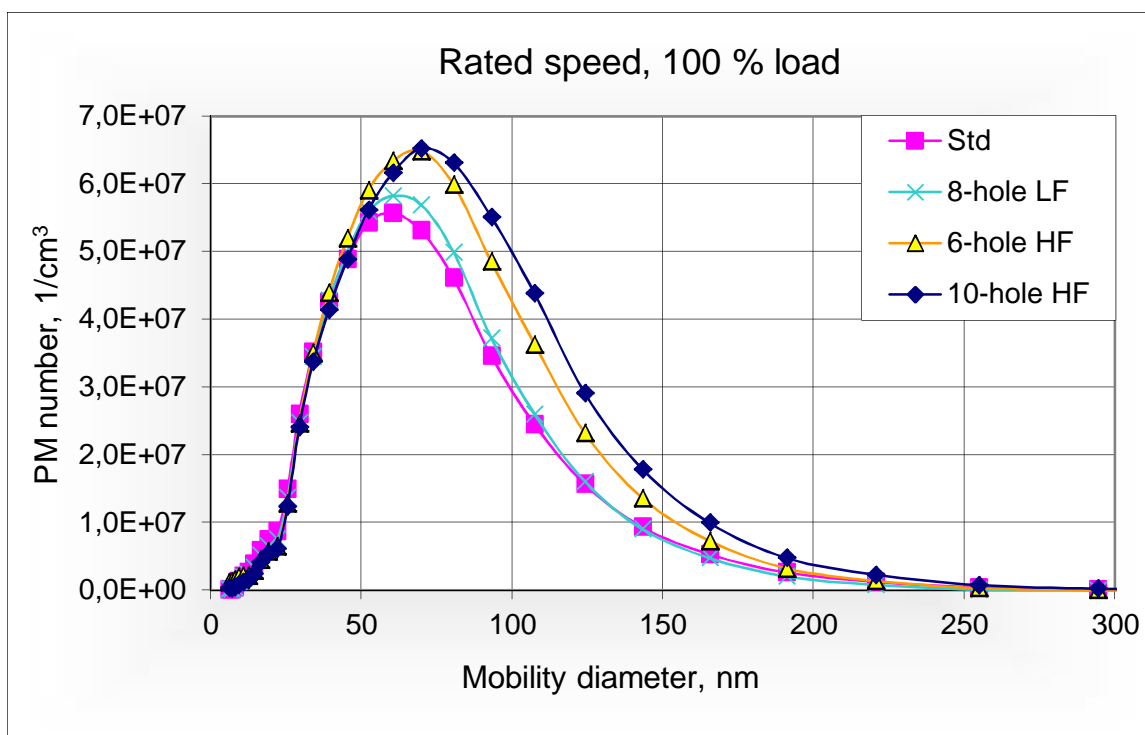
Nopeudella 2200 r/min ja täydellä kuormalla ajettaessa 6- ja 10-reikäiset HF-suuttimet tuottivat eniten 50–100 nm kokoisia hiukkasia. Vähiten saman kokoluokan hiukkasia

syntyi standardisuuttimilla. Kuten kuvasta 63 huomataan, HF-suuttimet tuottivat eniten halkaisijaltaan n. 70 nm kokoisia hiukkasia (n. 65 milj./cm³), 8-reikäiset LF-suuttimet ja standardisuuttimet tuottivat eniten n. 60 nm kokoisia hiukkasia (8-hole LF 58 milj./cm³, std 55 milj./cm³).

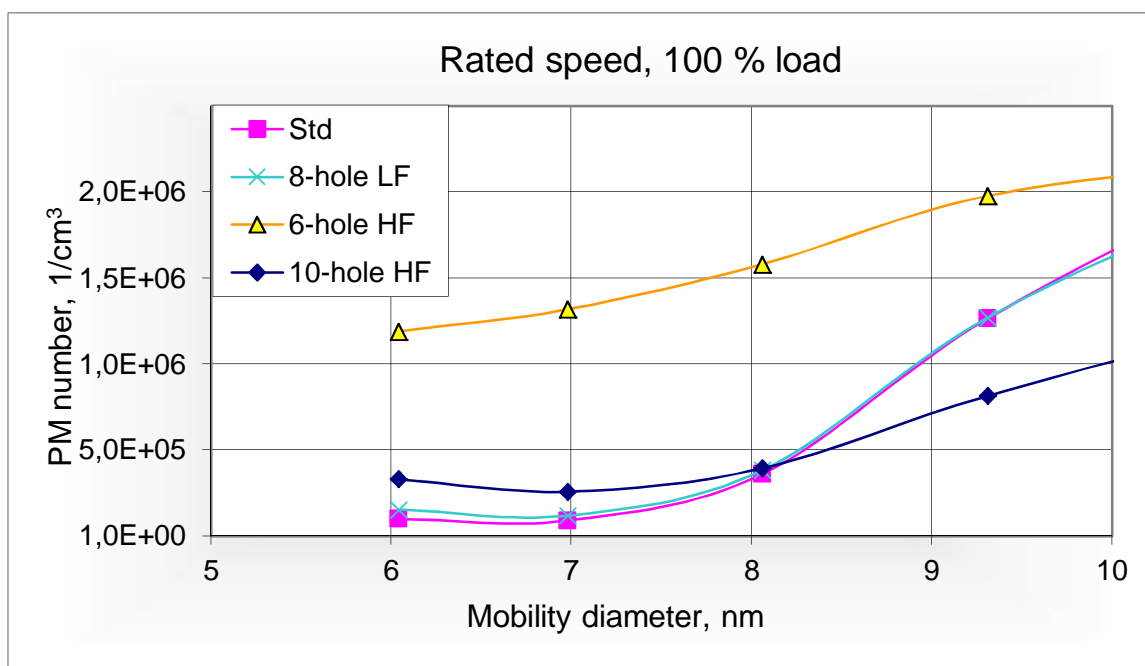
Tarkasteltaessa lähemmin halkaisijaltaan 6–10 nm hiukkasia (kuva 64) huomataan, että näitä hiukkasia tuottivat eniten 6-reikäiset HF-suuttimet ja vähiten taas 8-reikäiset LF-suuttimet ja standardisuuttimet. Noin 9–10 nm kokoisia hiukkasia tuottivat selvästi eniten edelleen 6-reikäiset HF-suuttimet (n. 2,0 milj./cm³), mutta vähiten 10-reikäiset HF-suuttimet (0,8 milj./cm³).

Välinopeudella ja täydellä kuormalla pienhiukkasten kokojakauma oli selkeästi erilainen kuin nimellinopeudella. Erityisesti 10-reikäisten HF-suuttimien kokojakauma poikkesi muista (kuva 65). Nyt 8-reikäiset LF-suuttimet tuottivat eniten n. 90 nm kokoisia hiukkasia (n. 46 milj./cm³). Toiseksi eniten syntyi halkaisijaltaan n. 120 nm hiukkasia 10-reikäisillä HF-suuttimilla (n. 34 milj./cm³). Kuusireikäisillä HF-suuttimilla syntyi eniten n. 80 nm halkaisijaltaan olevia hiukkasia n. 20 milj./cm³ ja standardisuuttimilla syntyi eniten halkaisijaltaan n. 70 nm olevia hiukkasia (n. 15 milj./cm³).

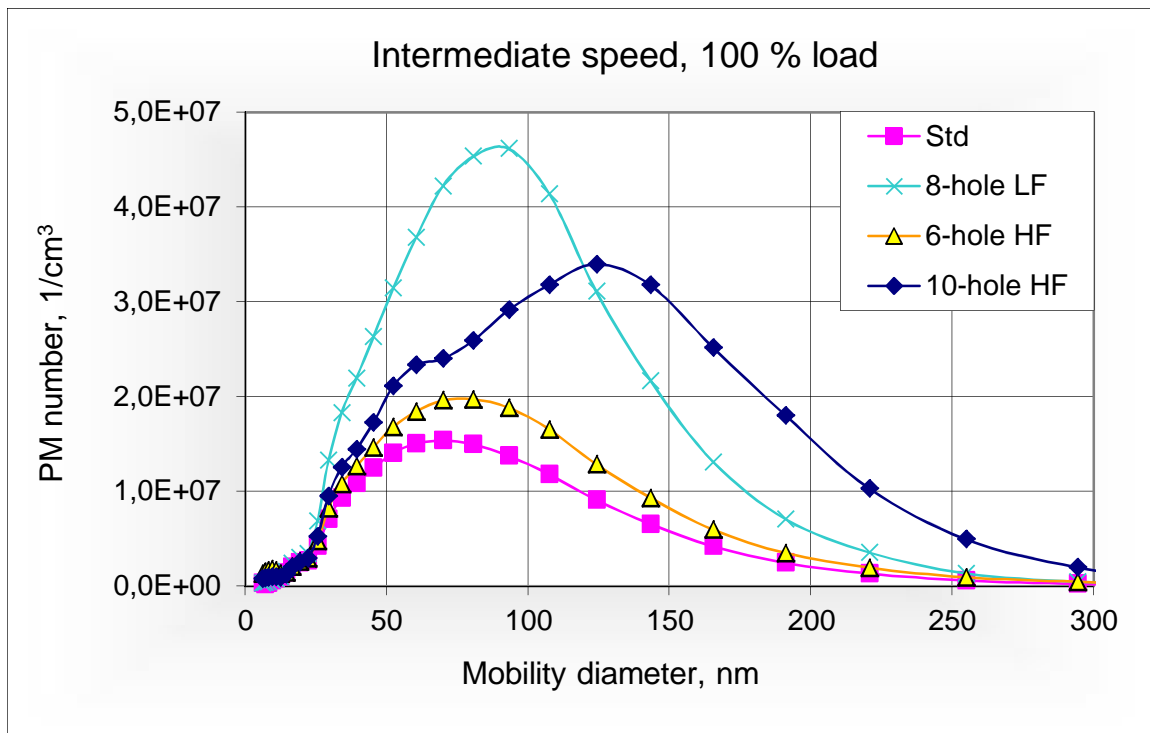
Tarkasteltaessa kuvaa 66 huomataan, että 6-reikäiset HF-suuttimet tuottivat eniten alle 10 nm pienhiukkasia. Vähiten alle 10 nm kokoisia hiukkasia syntyi standardisuuttimilla. Eniten n. 9 nm kokoisia hiukkasia tuottivat siis 6-reikäiset HF-suuttimet, n. 1,8 milj./cm³ ja vähiten standardisuuttimet, n. 0,6 milj./cm³. Vähiten syntyi n. 7 nm hiukkasia standardisuuttimilla (0,2 milj./cm³).



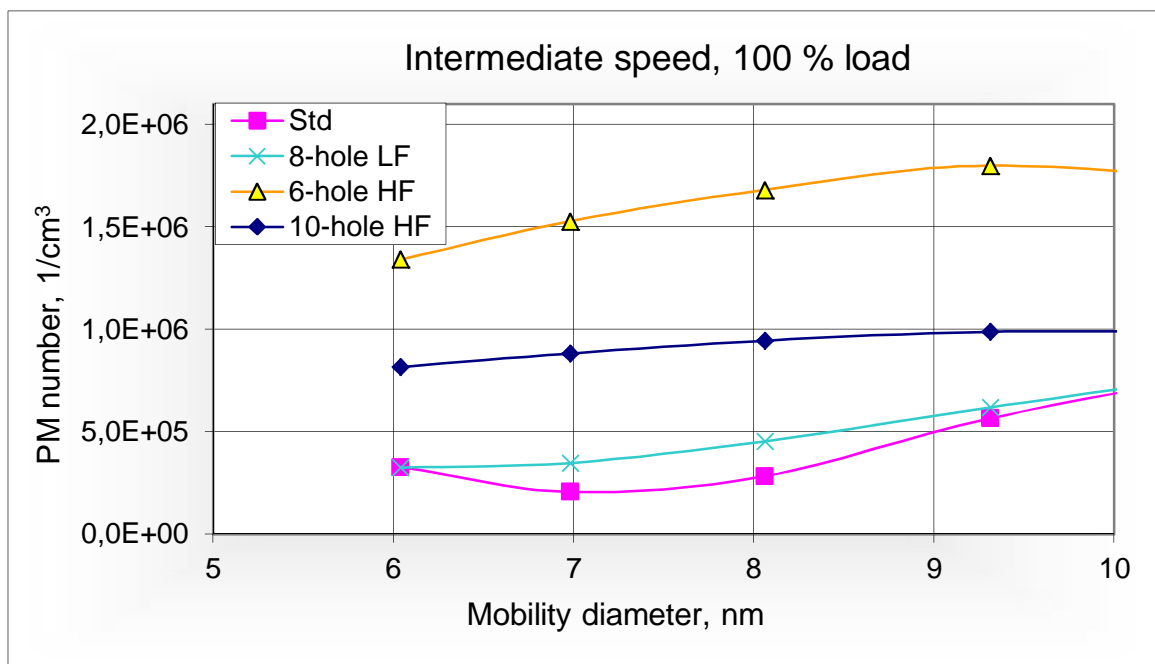
Kuva 63. Pienhiukkasten kokojakauma nimellispoivedella ja 100 % kuormalla.



Kuva 64. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä nimellispoivedella ja 100 % kuormalla.



Kuva 65. Pienhiukkasten kokojakauma välinopeudella ja 100 % kuormalla.



Kuva 66. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä välinopeudella ja 100 % kuormalla.

Nopeudella 2200 r/min ja 75 % kuormalla syntyi eniten halkaisijaltaan n. 70 nm kokoisia hiukkasia 6-reikäisillä HF-suuttimilla (n. 91 milj./cm³), kuva 67. Kymmenreikäisillä HF-

suuttimilla syntyi myös eniten n. 70 nm hiukkasia (n. 75 milj./cm³). Standardisuuttimilla syntyi eniten n. 60 nm hiukkasia (n. 73 milj./cm³) ja myös 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. 59 milj./cm³.

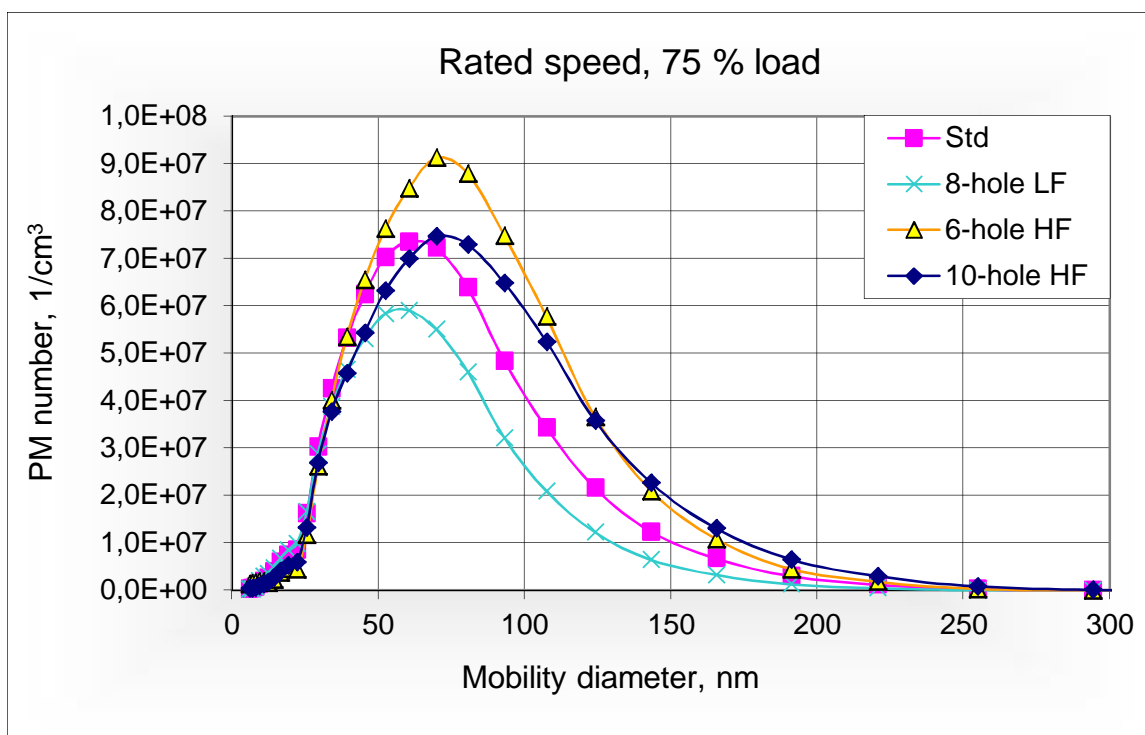
Halkaisijaltaan alle 10 nm hiukkasia tarkasteltaessa kuvasta 68 nähdään, että jälleen 6-reikäiset HF-suuttimet tuottivat eniten 6–8 nm hiukkasia. Eniten kuitenkin syntyi n. 9 nm hiukkasia 8-reikäisillä LF-suuttimilla ja 6-reikäisillä HF-suuttimilla (n. 1,9 milj./cm³). Vähiten syntyi n. 6 nm hiukkasia standardisuuttimilla ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla (n. 0,2 milj./cm³).

Nopeudella 1500 r/min 75 % kuormalla nimellisa nopeudesta poiketen eniten pienhiukkasia tuottivat 10-reikäiset HF-suuttimet (n. 120 nm, n. 43 milj./cm³), kuva 69. Toiseksi eniten syntyi halkaisijaltaan n. 80 nm hiukkasia 6-reikäisillä HF-suuttimilla. Standardisuuttimilla ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla syntyi eniten n. 70 nm hiukkasia (std n. 27 milj./cm³ ja 8-hole LF (24 milj./cm³).

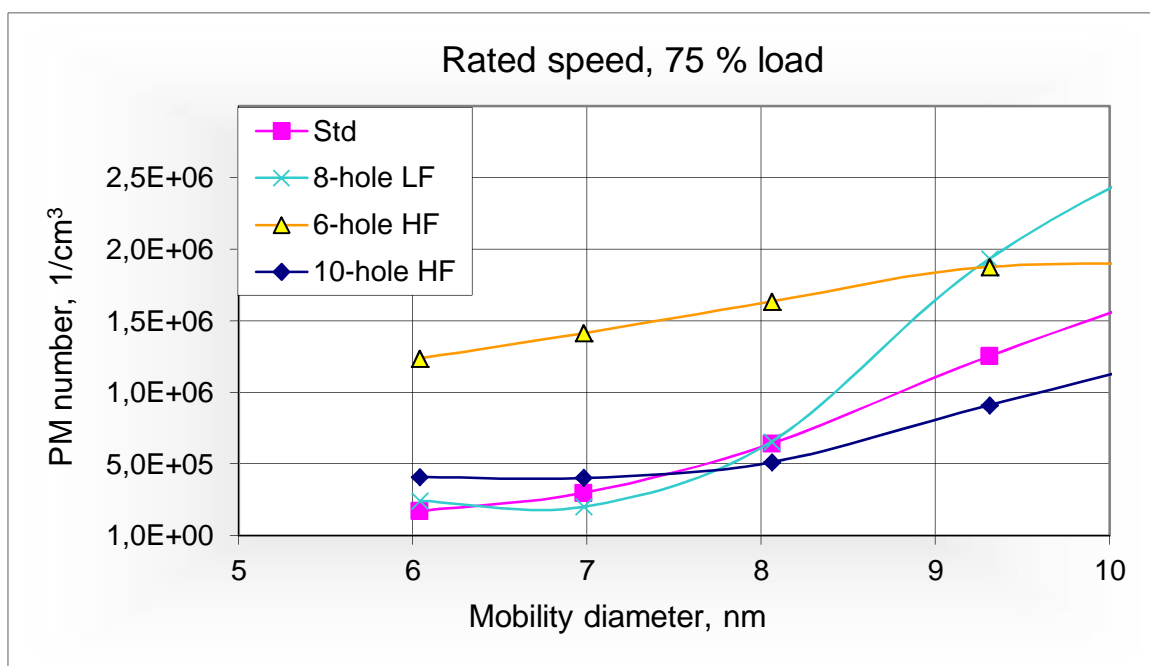
Alle 10 nm hiukkasia syntyi vähiten standardisuuttimilla, halkaisijaltaan n. 7 nm hiukkasia n. 0,2 milj./cm³, kuva 70. Eniten syntyi alle 10 nm hiukkasia 6-reikäisillä HF-suuttimilla, joilla syntyi n. 9 nm hiukkasia 1,7 milj./cm³.

Nimellisa nopeudella ja puolella kuormalla syntyi eniten n. 90 nm hiukkasia 6-reikäisillä HF-suuttimilla, n. 128 milj./cm³ (kuva 71). Myös 10-reikäisillä HF-suuttimilla syntyi eniten n. 90 nm hiukkasia (n. 103 milj./cm³). Standardisuuttimilla syntyi eniten n. 80 nm hiukkasia, (n. 101 milj./cm³) ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla n. 60 nm hiukkasia (n. 62 milj./cm³).

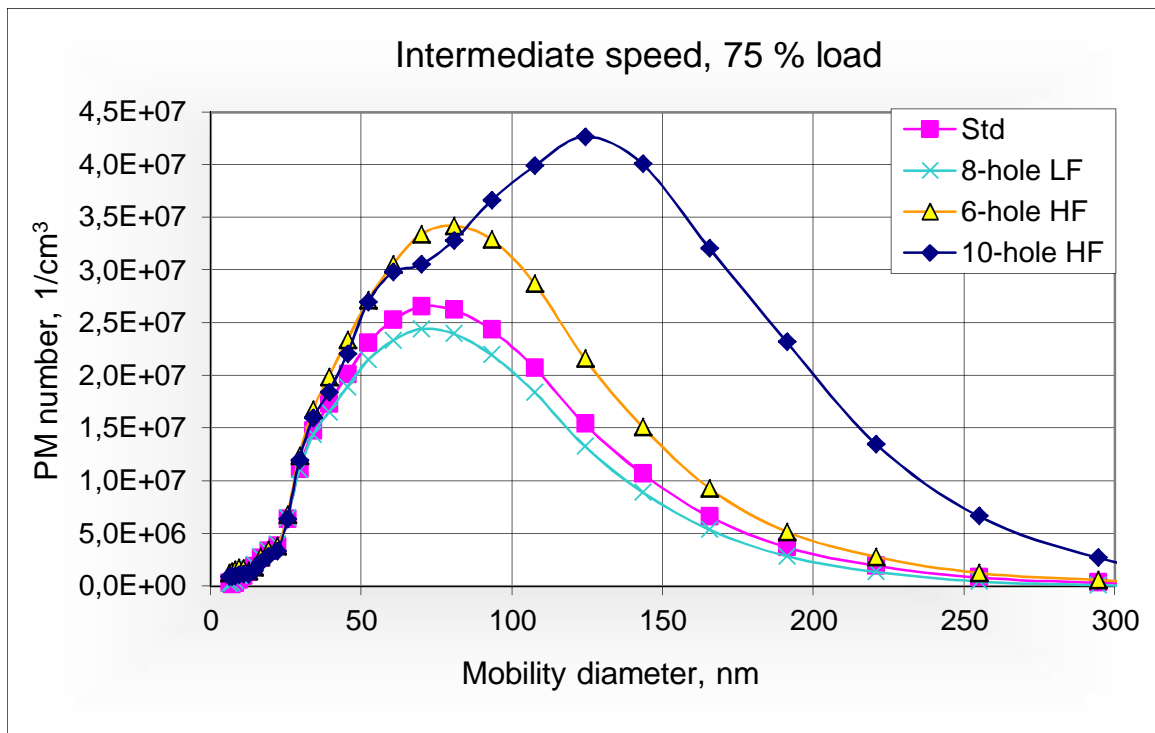
Kuvasta 72 nähdään, että jälleen eniten alle 10 nm hiukkasia tuottivat 6-reikäiset HF-suuttimet. Vähiten taas 6 ja 8 nm välillä olevia pienhiukkasia tuottivat 8-reikäiset LF-suuttimet. Noin 9 nm kokoisia hiukkasia vähiten tuottivat kuitenkin standardisuuttimet. Eniten syntyi siis n. 6 nm hiukkasia (n. 1,7 milj./cm³) 6-reikäisillä HF-suuttimilla ja vähiten n. 7 nm hiukkasia (n. 0,2 milj./cm³) 8-reikäisillä LF-suuttimilla.



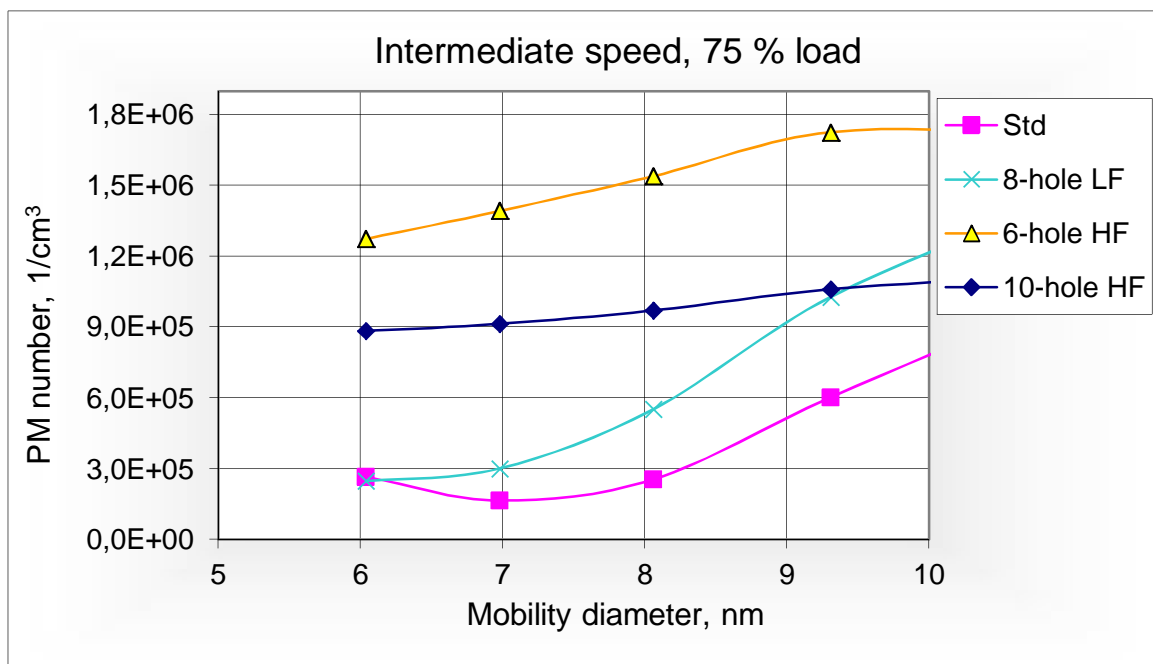
Kuva 67. Pienhiukkasten kokojakauma nimellispoeedella ja 75 % kuormalla.



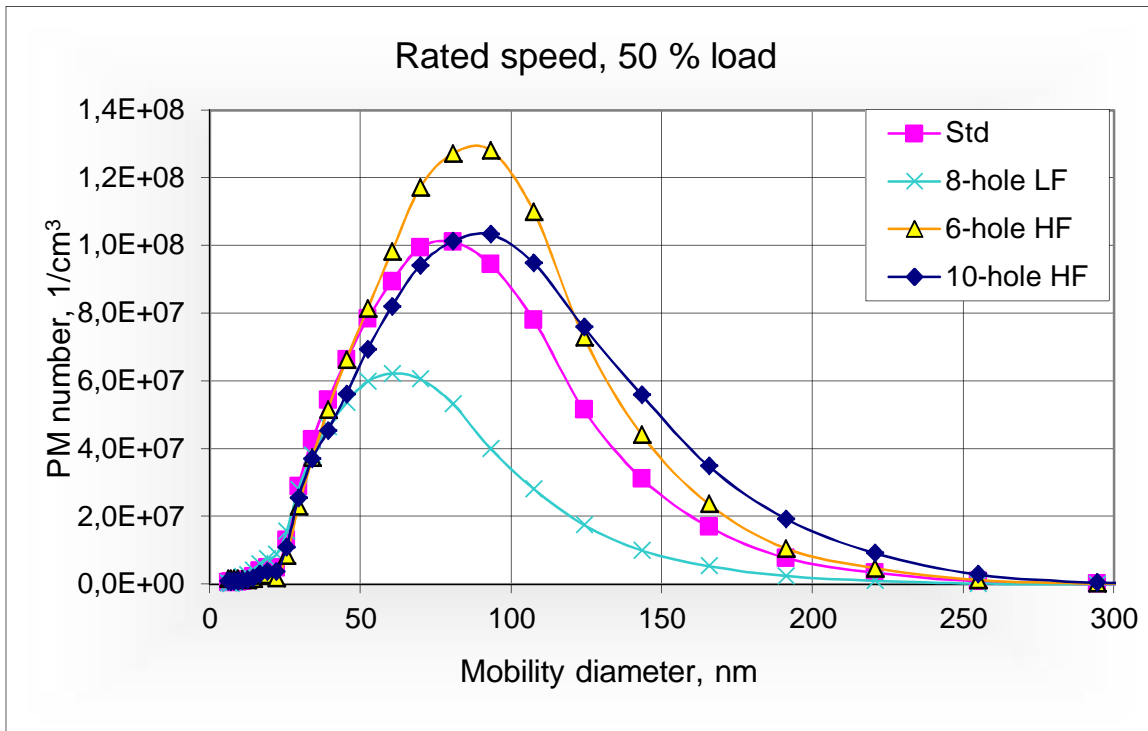
Kuva 68. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä nimellispoeedella ja 75 % kuormalla.



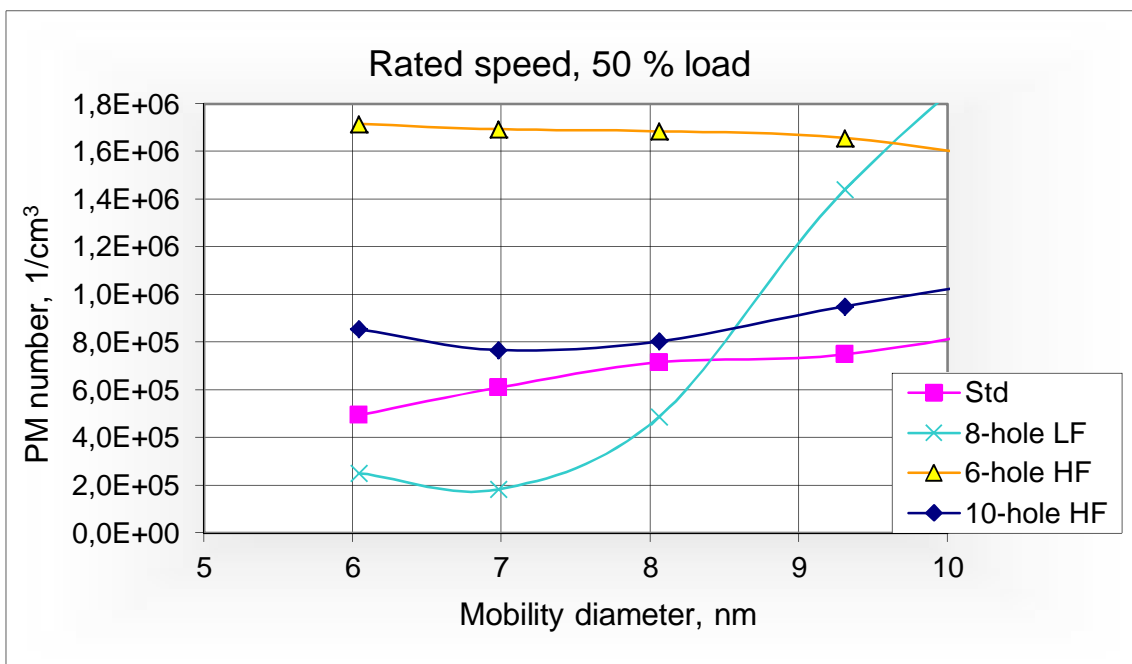
Kuva 69. Pienhiukkasten kokojakauma välinopeudella ja 75 % kuormalla.



Kuva 70. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä välinopeudella ja 75 % kuormalla.



Kuva 71. Pienhiukkasten kokojakauma nimellispoiveudella ja 50 % kuormalla.



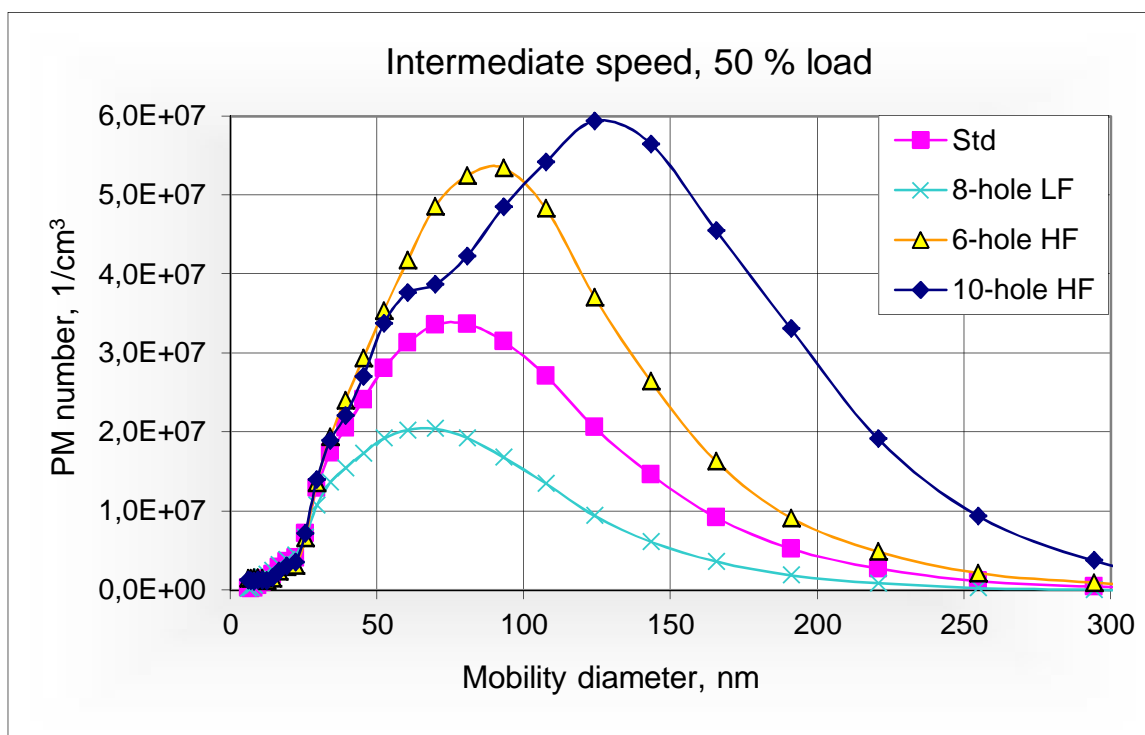
Kuva 72. Pienhiukkasten kokojakauma 6–10 nm välillä nimellispoiveudella ja 50 % kuormalla.

Välinopeudella ja puolella kuormalla 10-reikäiset HF-suuttimet tuottivat eniten n. 120 nm hiukkasia (n. 59 milj./cm³), kuva 73. Kuten aikaisemmissakin kuormitusasteissa, 6-reikäiset HF-suuttimet tuottivat eniten n. 90 nm hiukkasia (n. 53 milj./cm³), standardisuuttimet n. 80 nm hiukkasia (n. 34 milj./cm³) ja 8-reikäiset LF-suuttimet n. 70 nm hiukkasia (n. 20 milj./cm³).

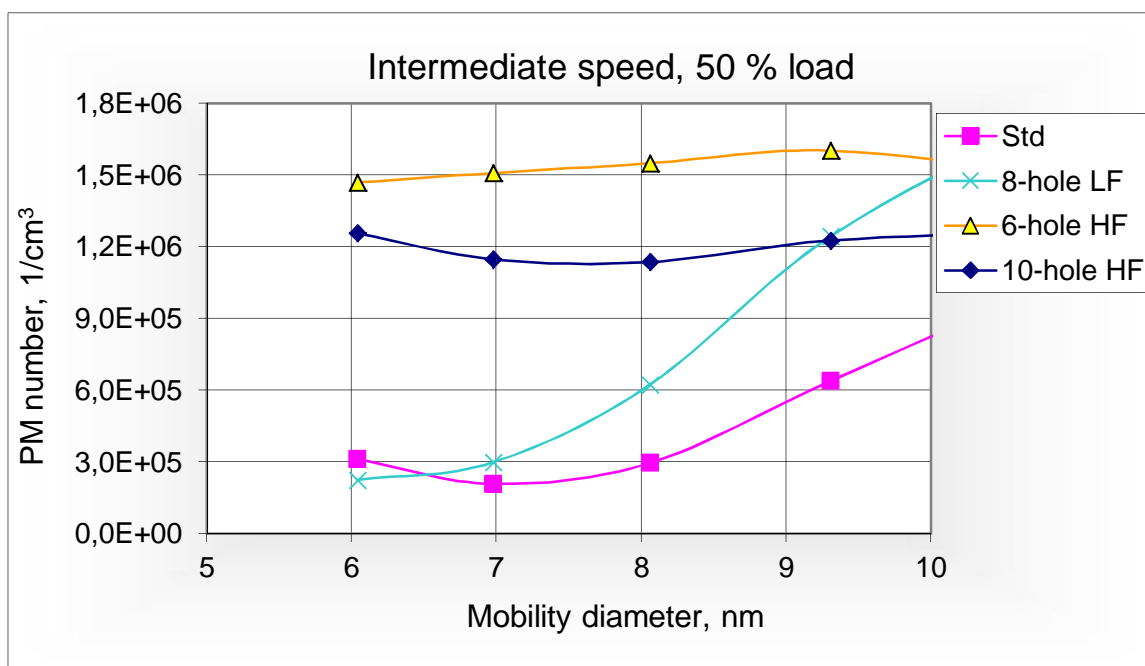
Alle 10 nm hiukkasia tuottivat eniten 6-reikäiset HF-suuttimet (n. 9 nm, n. 1,6 milj./cm³) ja vähiten standardisuuttimet (n. 7 nm, n. 0,2 milj. /cm³), kuva 74. Poikkeuksen muodostivat n. 6 nm hiukkaset, joita 8-reikäiset LF-suuttimet tuottivat vähiten, mutta niillä syntyi n. 9 nm hiukkasia toiseksi eniten.

Nopeudella 2200 r/min ja 10 % kuormalla 6-reikäiset HF-suuttimet tuottivat edelleen eniten pienhiukkasia, mutta kutakuinkin yhtä paljon tuottivat myös standardisuuttimet, kuva 75. Eniten syntyi n. 70 nm hiukkasia (6-hole HF n. 65 milj./cm³ ja std n. 62 milj./cm³). Kymmenreikäiset HF-suuttimet tuottivat eniten n. 60 nm hiukkasia (n. 42 milj./cm³) ja 8-reikäiset LF-suuttimet n. 50 nm hiukkasia (n. 21 milj./cm³).

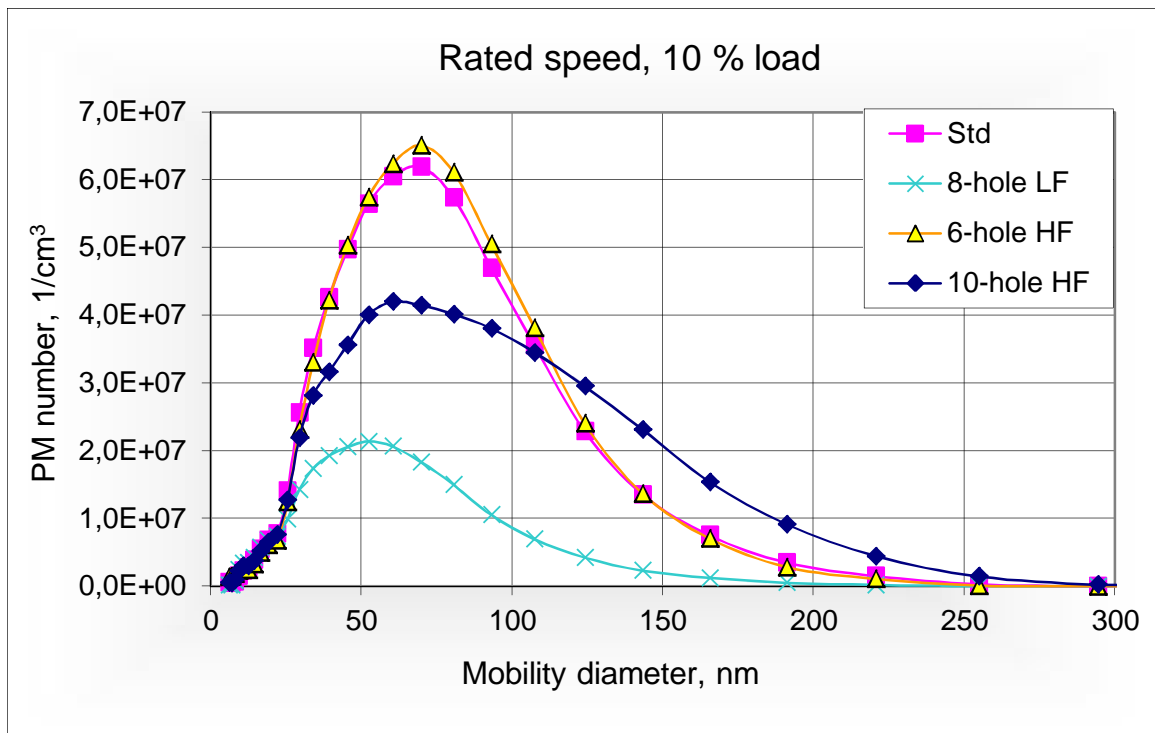
Kuvasta 76 nähdään, että 6–7 nm hiukkasia syntyi tällä kuormalla selvästi vähiten 8-reikäisillä LF-suuttimilla (n. 0,1 milj./cm³), 6-reikäisillä HF-suuttimilla eniten (n. 6 nm n. 1,4 milj./cm³ ja n. 7 nm n. 1,5 milj./cm³). Halkaisijaltaan kahdeksan nanometriä olevia hiukkasia syntyi vähiten taas standardisuuttimilla (n. 0,6 milj./cm³) ja eniten 6-reikäisillä HF-suuttimilla (n. 1,8 milj./cm³). Noin 9 nm hiukkasia mitattiin eniten 8-reikäisillä LF-suuttimilla ja 6-reikäisillä HF-suuttimilla (n. 2,4 milj./cm³), lähelle nousivat myös 10-reikäisten HF-suuttimien pienhiukkasmäärät (n. 2,2 milj./cm³). Vähiten n. 9 nm hiukkasia tuottivat standardisuuttimet n. 1,5 milj./cm³.



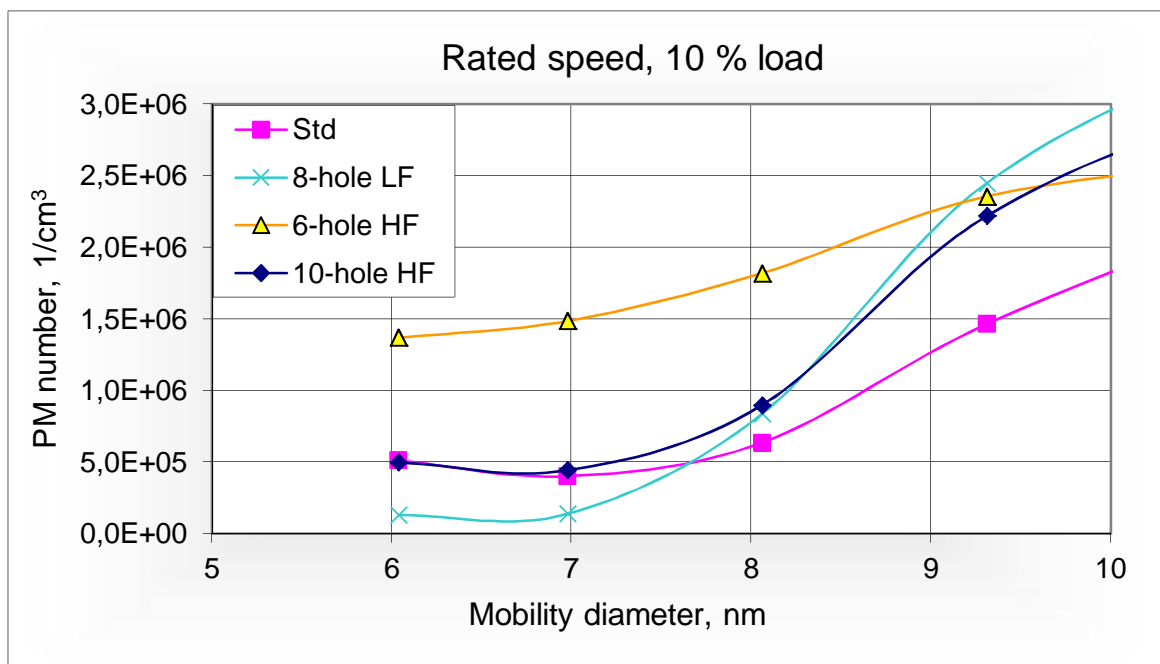
Kuva 73. Pienhiukkasten kokojakauma välinopeudella ja 50 % kuormalla.



Kuva 74. Pienhiukkasten kokojakauma 6–10 nm välillä välinopeudella ja 50 % kuormalla.



Kuva 75. Pienhiukkasten kokojakauma nimellisopeudella ja 10 % kuormalla.

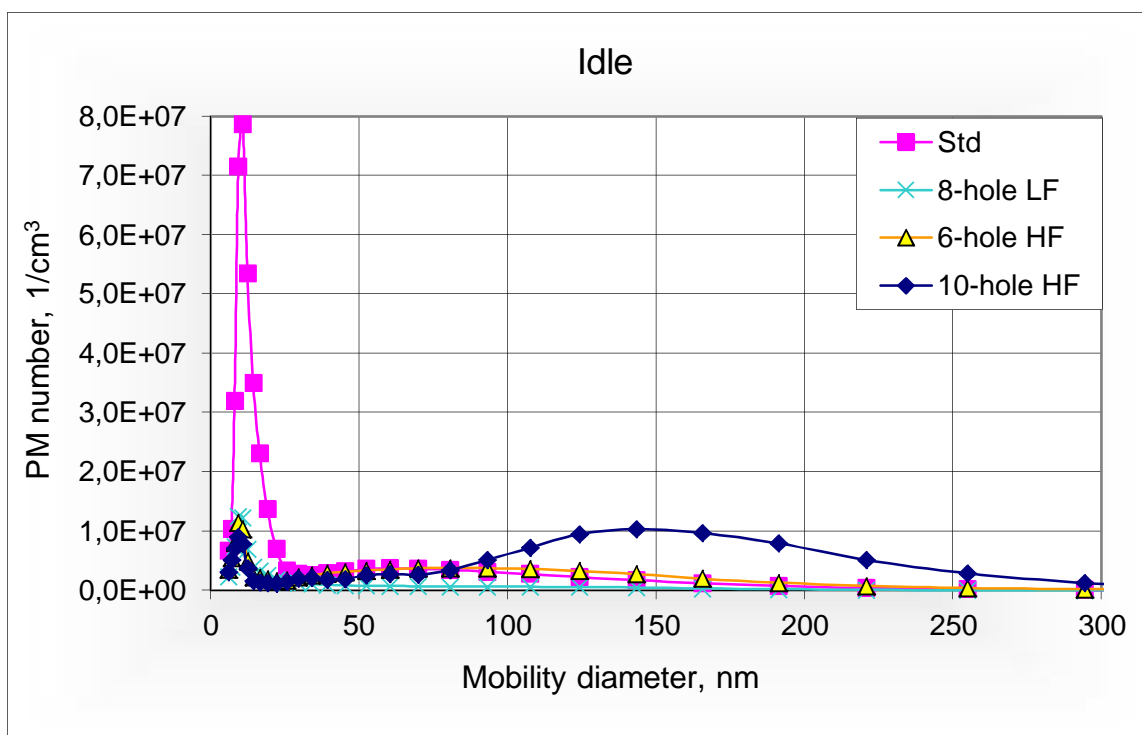


Kuva 76. Pienhiukkasten kokojakauma 6–10 nm välillä nimellisopeudella ja 10 % kuormalla.

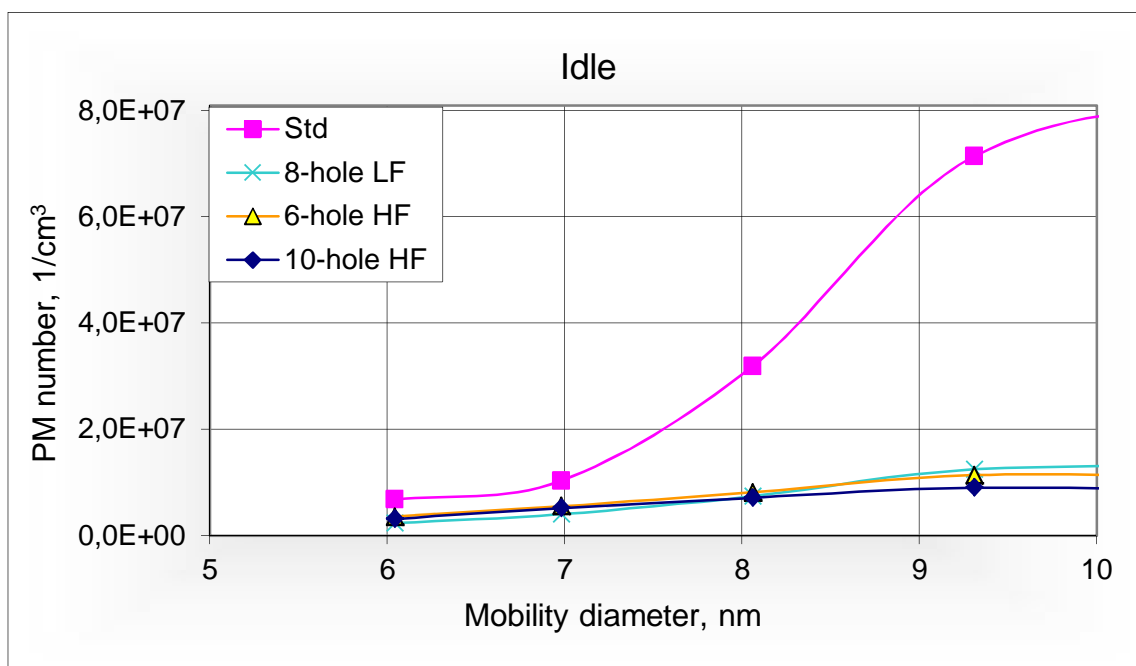
Joutokäynnillä syntyi huomattavasti eniten n. 11 nm hiukkasia standardisuuttimilla (n. 79 milj./cm³), kuva 77. Muut suuttimet tuottivat n. 11 nm hiukkasia n. 11 milj./cm³. Kym-

menreikäisillä HF-suuttimilla syntyi alle 10 nm hiukkasten lisäksi n. 140 nm hiukkasia n. 10 milj./cm³.

Standardisuuttimet tuottivat eniten kaikkia alle 10 nm hiukkasia joutokäynnillä, kuva 78. Halkaisijaltaan n. 6 nm hiukkasia syntyi standarsisuuttimilla n. 6,7 milj./cm³ ja muilla suuttimilla n. 3,1 milj./cm³. Noin 7 nm hiukkasia syntyi standardisuuttimilla n. 10 milj./cm³ ja muilla suuttimilla n. 5,0 milj./cm³. Standardisuuttimet tuottivat n. 8 nm hiukkasia n. 32 milj./cm³ ja muut suutimet n. 7,1 milj./cm³. Noin 9 nm hiukkasia syntyi selvästi eniten alle 10 nm hiukkasista, n. 71 milj./cm³ standardisuuttimilla. Muut suuttimet tuottivat n. 9 nm hiukkasia 9–12 milj./cm³.



Kuva 77. Pienhiukkasten kokojakauma joutokäynnillä.



Kuva 78. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä joutokäynnillä.

5.3 Dieselöljyn ja kalaöljyn vertailu

Kalaöljyn moottoriajot tehtiin viimeisenä öljyn viskositeetin vuoksi, koska raa'alla kalaöljyllä ajaminen olisi voinut aiheuttaa moottoririkon. Öljyn huonon juoksevuuden takia jouduttiin polttoainesäiliö nostamaan ylemmäs, jotta saatiin gravitaatiovoiman avulla autettua polttoainepumppua toimittamaan polttoaine moottorille.

Polttoainesäiliön nostamisesta huolimatta vain neljä kuormituspistettä saatiin ajettua. Pistteet olivat 10 % kuorma nopeudella 2200 rpm, 50 % ja 25 % kuormat nopeudella 1500 rpm sekä joutokäynti. Nopeudella 1500 rpm ajettu 25 % kuormituspiste oli ylimääräinen laajemman vertailutiedon saamiseksi. Ylimääräinen kuormituspiste ajettiin myös dieselöljyllä.

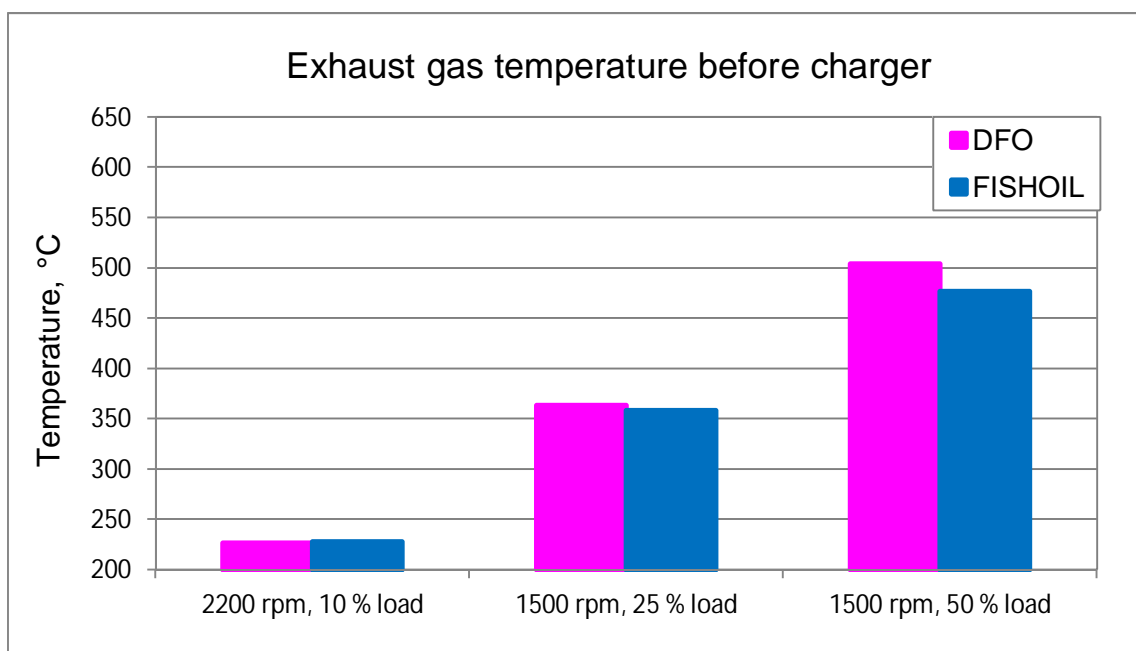
Suuren viskositeetin vuoksi ruiskutuspuuttimiksi valittiin 6-reikäiset HF-suuttimet, joissa oli vähiten reikiä ja suuri läpivirtaama. Reikien halkaisija oli suurin.

Vertailussa keskityttiin moottorin sylinteripaineisiin, sylintereissä tapahtuvaan lämmönvapautumiseen, savutukseen, pakokaasun typen oksideihin, hiilimonoksidi- ja hiilivety-

päästöihin sekä pienhiukkasten lukumäärään ja massaan. Myös pakokaasun lämpötilaa ennen ahdinta sekä imuilman painetta välijäähdyttimen jälkeen vertailtiin muita suureita tarkemmin.

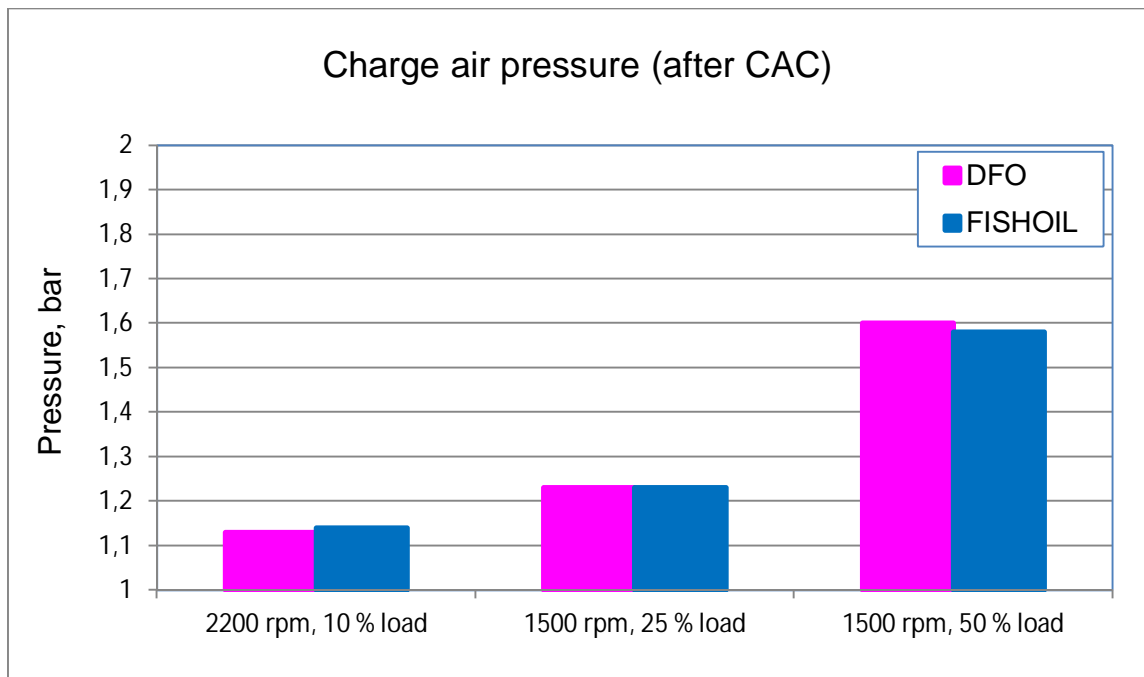
5.3.1 Pakokaasun lämpötila ja ahtopaine

Pakokaasun lämpötila mitattiin sylinterien jälkeen ennen ahdinta. Kalaöljyn ja dieselöljyn pakokaasujen lämpötilat eivät eronneet toisistaan kovinkaan paljon, kuva 79. Tehollisen keskipaineen (BMEP) ollessa n. 4 bar pakokaasun lämpötila alkoi olla hieman korkeampi dieselöljyllä kuin kalaöljyllä. Noin 9 bar:n kohdalla lämpötilojen erotus oli n. 30 °C.



Kuva 79. Pakokaasun lämpötila ennen ahdinta nimellisa nopeudella 10 % kuormalla sekä välinopeudella 25 % ja 50 % kuormilla.

Ahtopaineissa ei juurikaan ollut eroavaisuuksia kalaöljyn ja dieselöljyn välillä, kuva 80. Nimellisa nopeudella 10 % kuormalla ahtopaineeksi mitattiin molemmilla polttoaineilla välijäähdyttimen jälkeen n. 1,1 bar. Välinopeudella ja ylimääräisessä 25 % kuormalla ajettussa pisteessä ahtopaine oli molemmilla polttoaineilla n. 1,2 bar. Puolella kuormalla ja nopeudella 1500 r/min ahtopaine oli molemmilla polttoaineilla n. 1,6 bar.



Kuva 80. Ahtopaine välijäähdyttimen jälkeen nimellisnopeudella 10 % kuormalla sekä välinopeudella 25 % ja 50 % kuormilla.

5.3.2 Sylinteripaineet ja lämmönvapautuminen

Kuten edellisissä polttoaine- ja suutinvertailuissa todettiin, puristuspaineen maksimiarvo oli -2 kammenkulma-asteen kohdalla moottorin käydessä 1000 kierrosta minuutissa. Tämä ei vaikuttanut saatuihin mittaustuloksiin.

Taulukossa 23 on esitetty polttoaineiden ruiskutusajankohdat kammenkulma-asteissa nimellisnopeudella ja 10 % kuormalla. Ruiskutusajankohdat olivat muuten samat, mutta ensimmäinen pääruiskutus kesti kalaöljyllä yhden kammenkulma-asteen kauemmin kuin dieselillä. Dieselillä sylinteripaine oli asteen verran ruiskutuksen päättymisen jälkeen korkeimmillaan (0 ° CA, n. 52 bar), kuva 81. Kalaöljyllä sylinteripaine oli korkeimmillaan -2 kammenkulma-asteen kohdalla ollen n. 50 bar (puristusaine). Yhteensä kalaöljyä ruiskutettiin yhden työkierron aikana n. 19 mg ja dieseliä n. 16 mg.

Lämmönvapautumiskuvaajasta, kuva 82, nähdään, että dieselillä syntyi huomattava lämmönvapautumispiikki ensimmäisen pääruiskutuksen aikana. Toinen huippu nähtiin 7 kammenkulma-asteen kohdalla, jolloin lämpöä vapautui n. 38 J/°CA. Kalaöljyn esiruis-

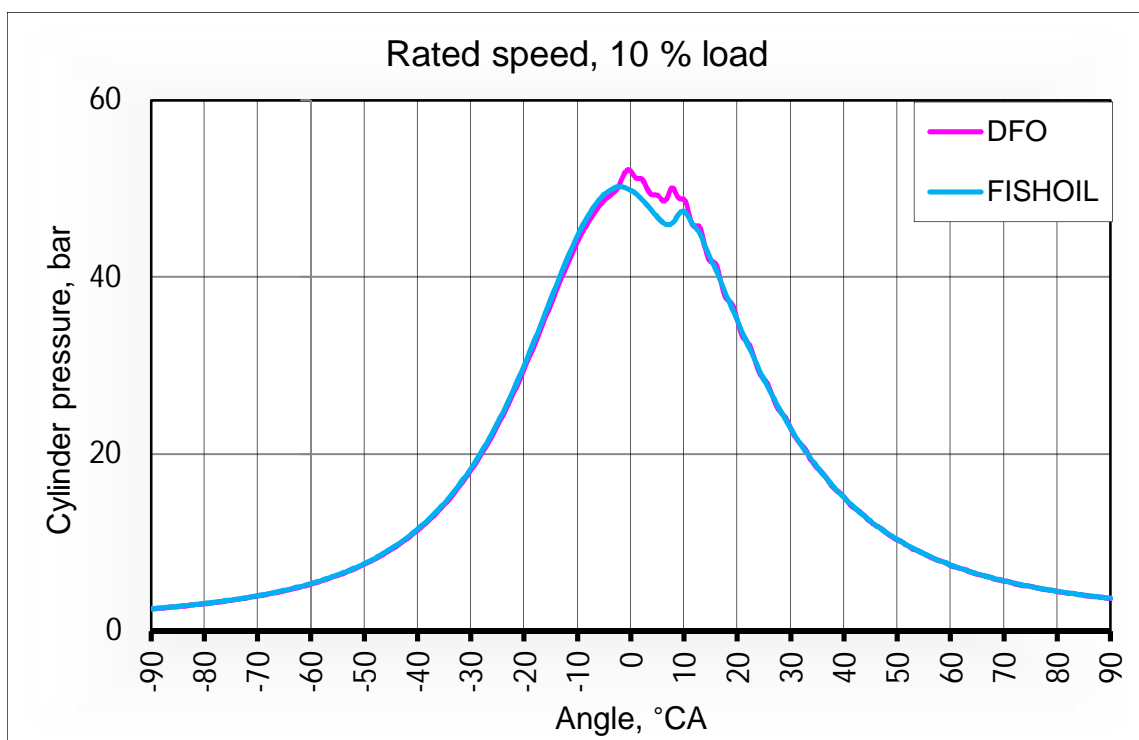
kutus ei syttynyt kunnolla, jolloin pääruiskutukseen jäi enemmän polttoainetta. Lämpöä vapautui kalaöljyllä nopeimmin 9 kammenkulma-asteen kohdalla (n. 45 J/°CA). Toisen pääruiskutuksen jälkeen derivaatta oli levoton dieselillä, kalaöljyllä tasaisempi.

Taulukko 23. Ruiskutusajankohdat nimellisnopeudella, 10 % kuormalla.

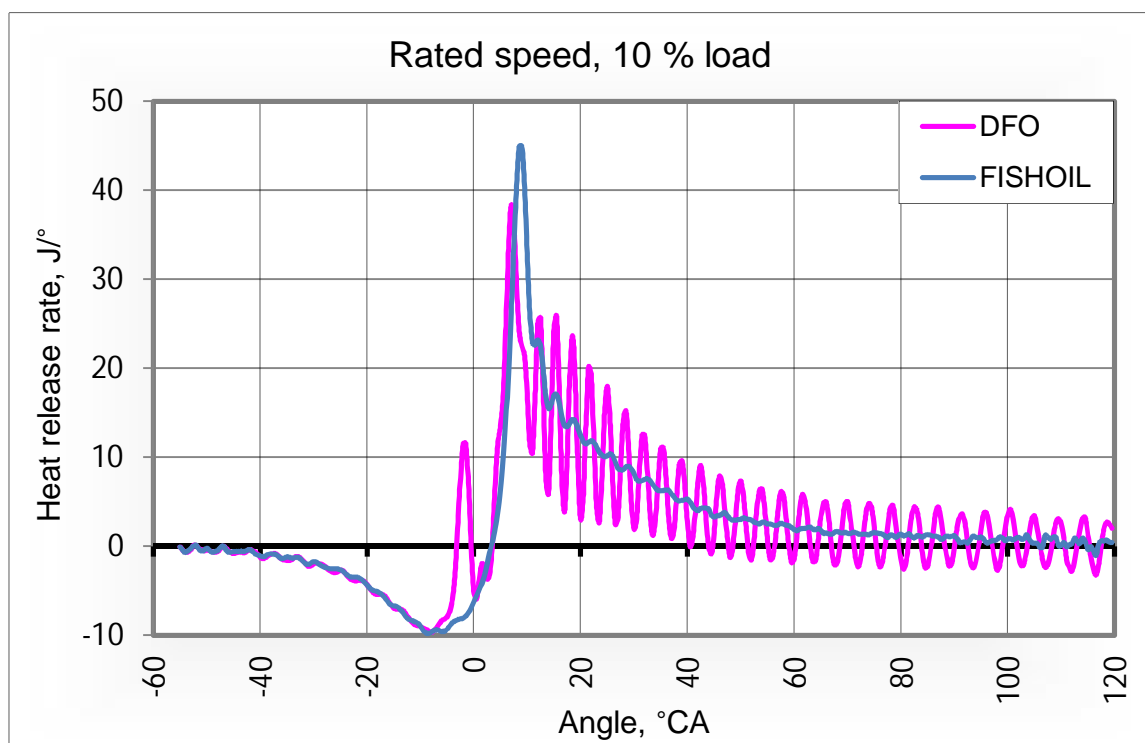
Injection timing, rated speed, 10 % load			
(° CA)	Pilot	Main 1	Main 2
FISHOIL	-18-(-13)	-8-0	13
DFO	-18-(-13)	-8-(-1)	13

Välinopeuden puolikuormalla ruiskutusajankohdat erosivat hieman enemmän toisistaan, taulukko 24. Esiruiskutus oli asteen lyhyempi kalaöljyllä [-9-(-6) °CA], mutta ensimmäinen pääruiskutus oli 3 kammenkulma-astetta pidempi (-3-13 °CA). Molemmilla polttoaineilla 2. pääruiskutus oli 4 kammenkulma-asteen pituinen, dieselillä alkaen astetta aikaisemmin kuin kalaöljyllä. Yhteensä kalaöljyä ruiskutettiin yhden työkierron aikana n. 69 mg ja dieseliä n. 62 mg.

Sylinteripaineissa ei ollut suuriakaan eroavaisuuksia polttoaineiden välillä, kuva 83. Suurin sylinteripaine oli dieselillä 0,5 °CA:n kohdalla ollen n. 76 bar. Kalaöljyllä korkein sylinteripaine mitattiin -2 kammenkulma-asteen kohdalla ollen n. 75 bar (puristusaine).



Kuva 81. Sylinteripaineet nopeudella 2200 rpm ja 10 % kuormalla.

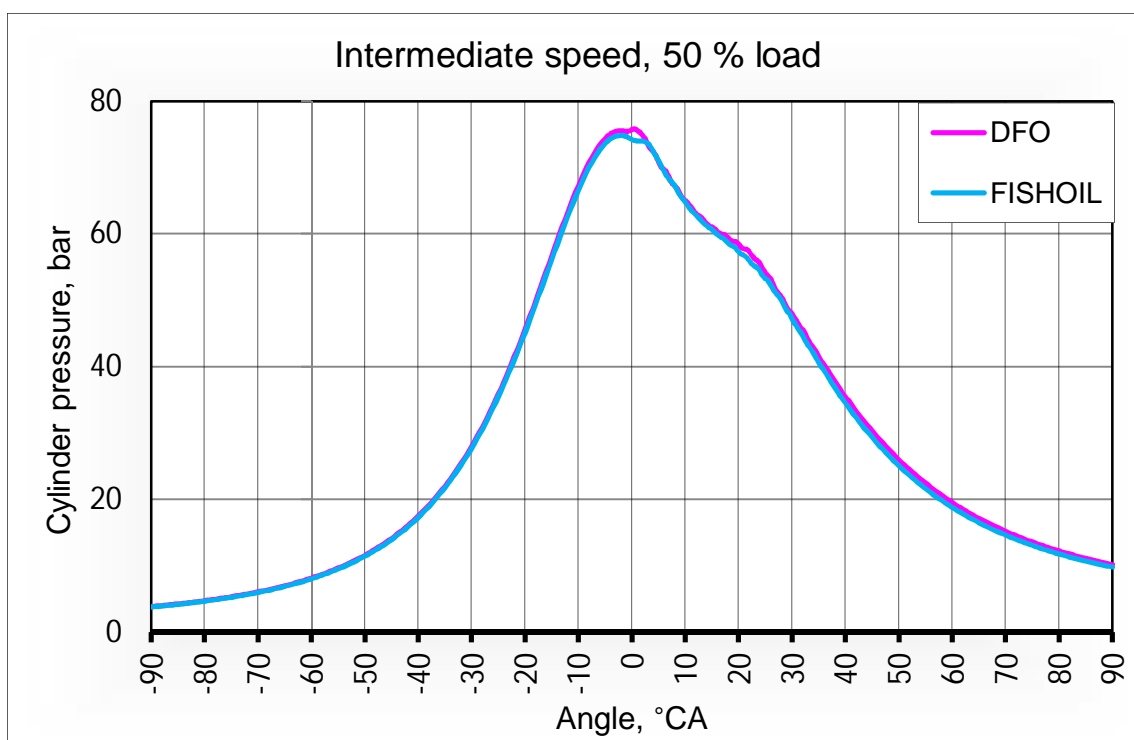


Kuva 82. Lämmönvapautuminen nimellinopeudella 10 % kuormalla.

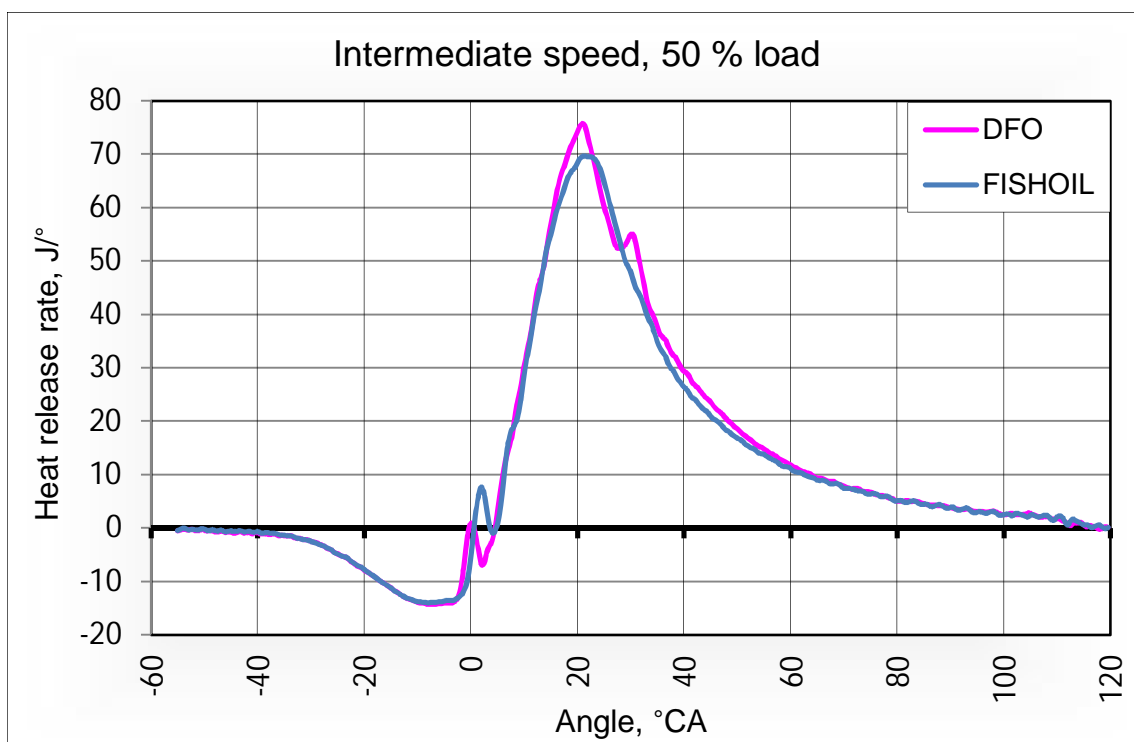
Taulukko 24. Ruiskutusajankohdat välinopeudella, 50 % kuormalla.

Injection timing, intermediate speed, 50 % load			
(° CA)	Pilot	Main 1	Main 2
FISHOIL	-9-(-6)	-3-13	22-26
DFO	-9-(-5)	-2-11	21-25

Lämmönvapautumiskuvaajasta (kuva 84) huomataan, että dieselillä saattoi olla vähän lyhyempi sytytysjättämä kuin kalaöljyllä, koska esiruiskutukset alkoivat yhtä aikaa. Esi-ruiskutuksen aikana dieseliä ruiskutettiin n. 2,6 mg ja kalaöljyä n. 3,5 mg. Nopeimmin lämpöä vapautui 21 °CA:n kohdalla dieselillä n. 76 J/° CA ja kalaöljyllä n. 70 J/° CA. Dieselillä nähtiin vielä pieni lämmönvapautumispiikki 30 kammukulma-asteen kohdalla (n. 55 J/° CA).



Kuva 83. Sylinteripaineet nopeudella 1500 rpm ja 50 % kuormalla.



Kuva 84. Lämmönvapautuminen välinopeudella 50 % kuormalla.

Lisäpisteessä nopeudella 1500 r/min ja 25 % kuormalla ruiskutuksajankohdissa oli hie- man eroavaisuuksia polttoaineiden välillä, taulukko 25. Esiruiskutus alkoi dieselillä as- teen aikaisemmin kuin kalaöljyllä, molempien ruiskutuksien jatkuessa -8 kammengkulma- asteeseen. Ensimmäinen pääruiskutus alkoi dieselillä myös asteen aikai- semmin kuin ka- laöljyllä loppuen myös astetta aikaisemmin (-5–4 °CA). Toinen pää-ruiskutus kesti diese- lillä välin 13–18 °CA ja kalaöljyllä 15–19 °CA. Yhteensä kalaöljyä ruiskutettiin yhden työkierron aikana n. 43 mg ja dieseliä n. 34 mg.

Sylinteripaineissa polttoaineiden välillä ei ollut eroavaisuuksia kuin 0–20 kammenkulma-asteen välillä, kuva 85. Kalaöljyllä sylinteripaineen maksimiarvo oli kaksi astetta ennen yläkuolo kohtaa ollen n. 56 bar (puristusaine) ja dieselillä 0,5 °CA:n kohdalla ol- len n. 58 bar.

Lämmönvapautumiskuvaajasta (kuva 86) nähdään, että dieselillä sytytysjättämä vaikutti olevan huomattavasti lyhyempi kuin kalaöljyllä. Tämä näkyi pienenä piikkinä yläkuolo- kohdassa. Kalaöljystä vapautui lämpöä nopeimmin 13,5 kammengkulma-asteen kohdalla (n. 41 J/° CA) ja dieselistä 10,5 kammengkulma-asteen kohdalla (n. 41 J/° CA). Toisesta

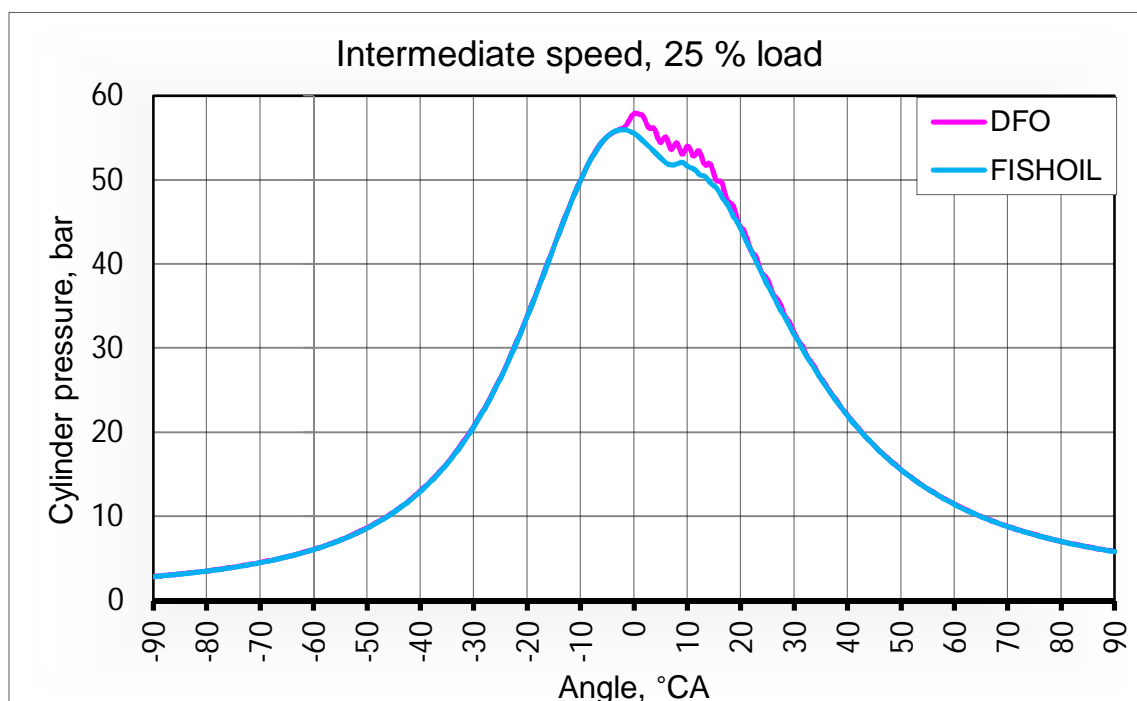
pääruiskutuksesta johtuva lämmönvapautuminen erottui dieselillä paremmin kuin kalaöljyllä noin 25 °CA:n kohdalla.

Taulukko 25. Ruiskutusajankohdat välinopeudella, 25 % kuormalla.

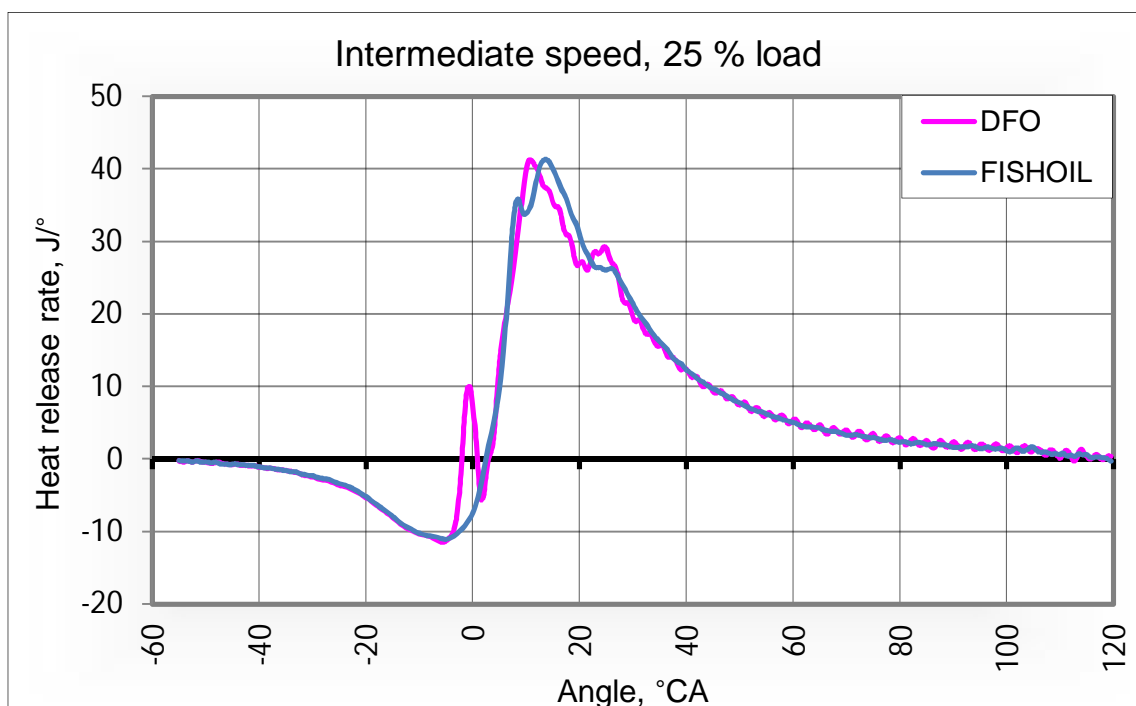
Injection timing, intermediate speed, 25 % load			
(° CA)	Pilot	Main 1	Main 2
FISHOIL	-11-(-8)	-4-5	15-19
DFO	-12-(-8)	-5-4	13-18

Joutokäynnillä ruiskutusajankohdat olivat samat molemmilla polttoaineilla, taulukko 26. Yhteensä kalaöljyä ruiskutettiin yhden työkierron aikana n. 10 mg ja dieseliä n. 8 mg.

Sylinteripaineissa havaittiin yläkuolokohdan tuntumassa pieni ero dieselin ja kalaöljyn välillä, kuva 87. Dieselillä maksimipaine mitattiin yläkuolokohdassa ollen n. 46 bar ja kalaöljyllä 3,5 °CA:n kohdalla ollen n. 44 bar.



Kuva 85. Sylinteripaineet nopeudella 1500 rpm ja 25 % kuormalla.

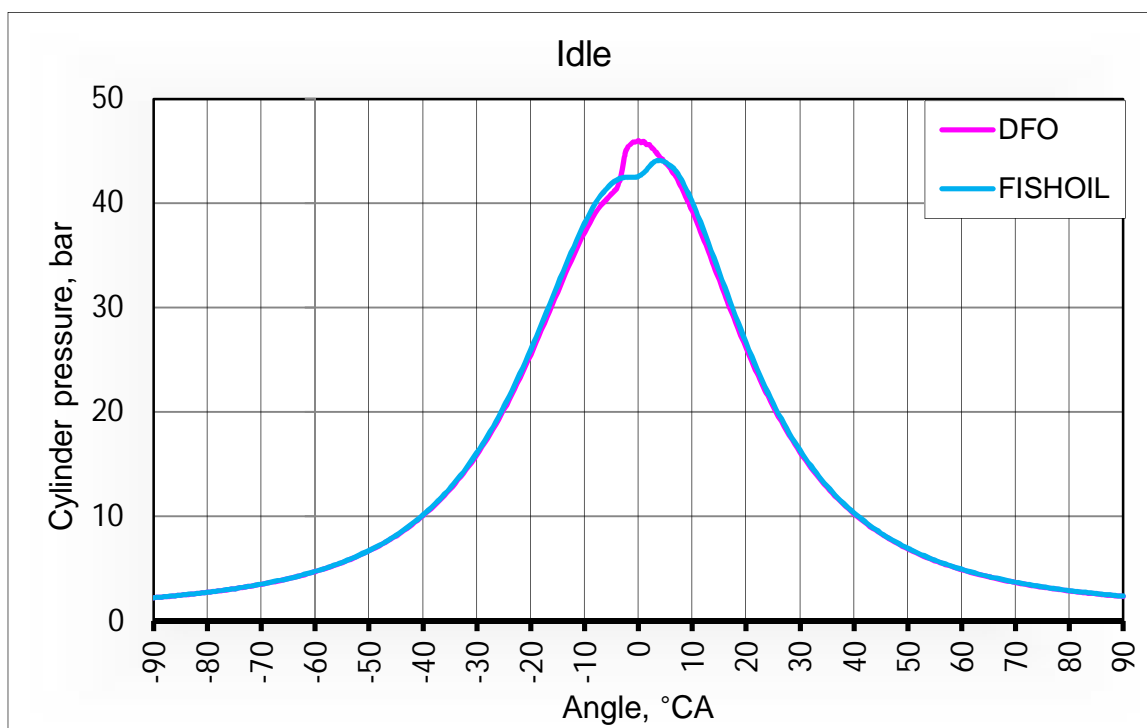


Kuva 86. Lämmönvapautuminen välinopeudella 25 % kuormalla.

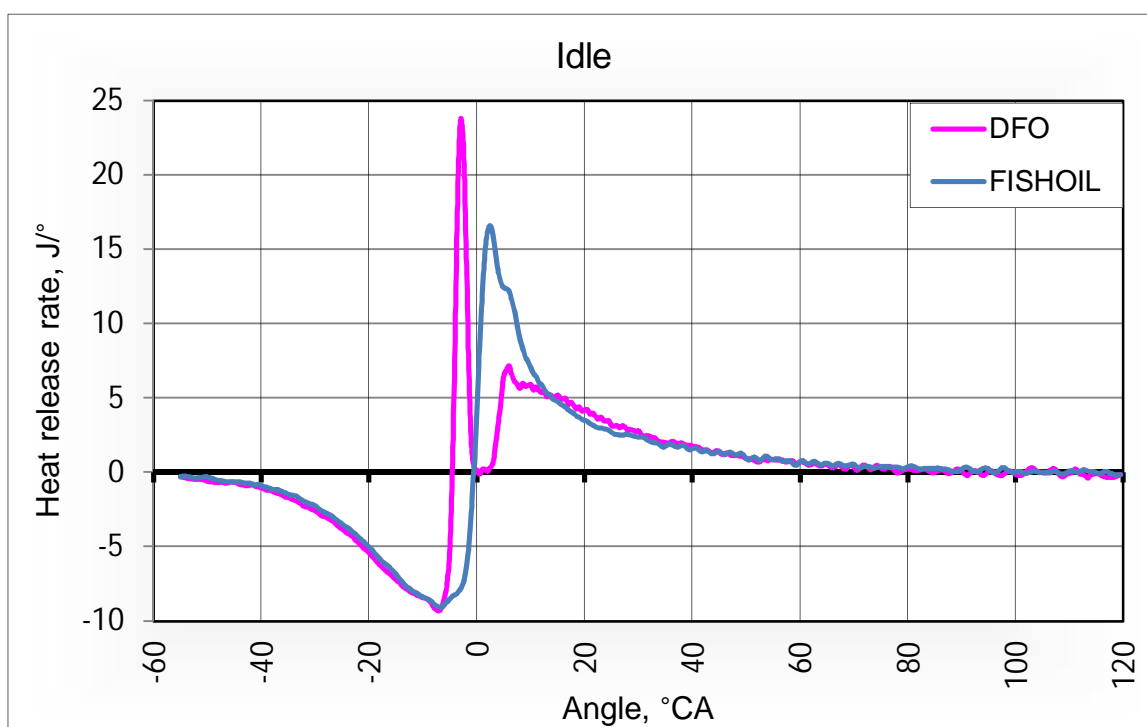
Taulukko 26. Ruiskutusajankohdat joutokäynnillä.

Injection timing, intermediate speed, 25 % load			
(° CA)	Pilot	Main 1	Main 2
FISHOIL	-10–(-8)	-6–(-4)	1–3
DFO	-10–(-8)	-6–(-4)	1–3

Joutokäynnillä dieselin sytytysjättämä oli huomattavasti lyhyempi kuin kalaöljyllä, kuva 88. Kalaöljystä vapautui lämpöä tasaisemmin ja lämmönvapautumiskäyrä laski tasaisesti. Diesel puolestaan paloi aikaisemmin ja lämpöä vapautui nopeimmin -3 °CA:n kohdalla (n. 24 J/°CA). Kalaöljyllä vapautti lämpöä nopeimmin 2,5 kammukulma-asteen kohdalla (n. 17 J/°CA).



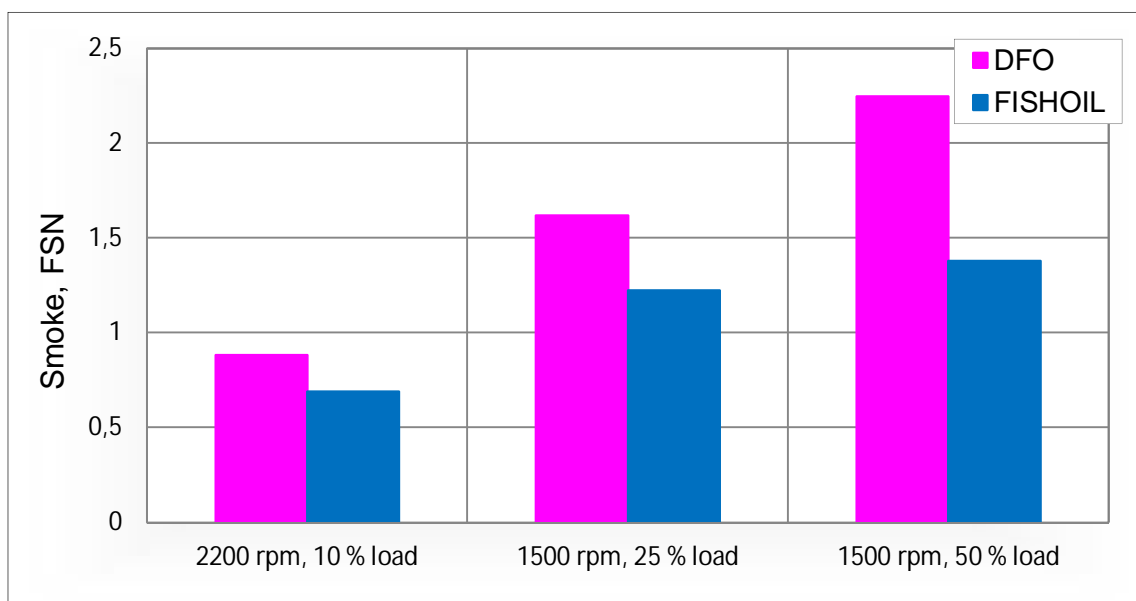
Kuva 87. Sylinteripaineet joutokäynnillä.



Kuva 88. Lämmönvapautuminen joutokäynnillä.

5.3.3 Savutus

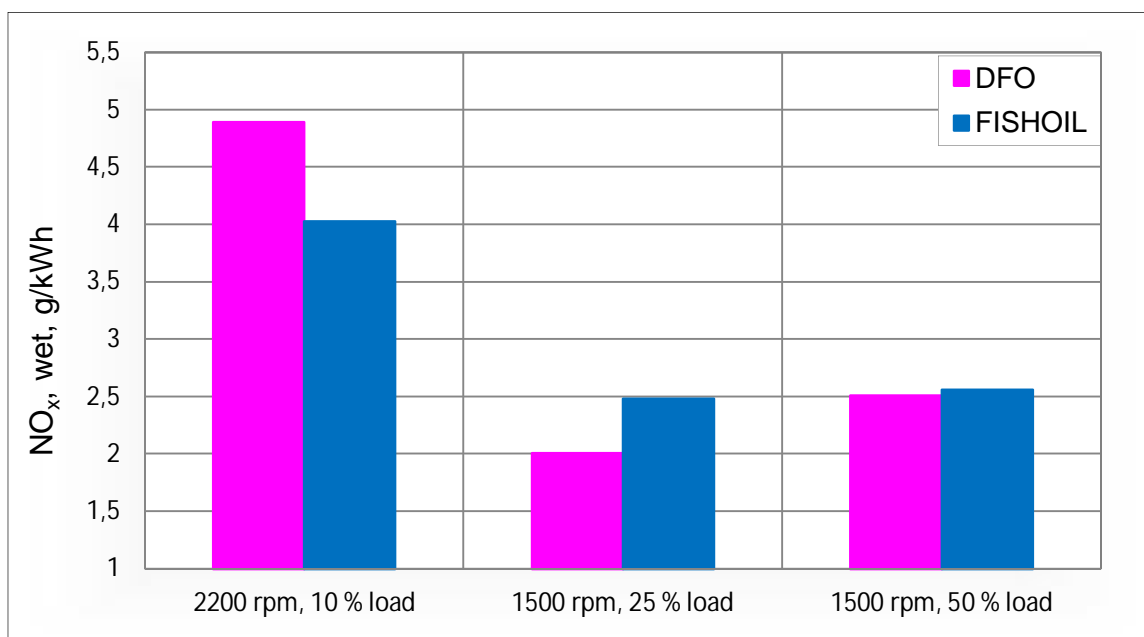
Kuten kuvasta 89 nähdään, diesel savutti enemmän kaikissa kuormitusasteissa kuin kalaöljy. Nimellisa nopeudella ja 10 % kuormalla dieselin savutusarvo oli n. 0,8 (FSN) ja kalaöljyn n. 0,7 (FSN). Lisäasteessa välinopeudella ja 25 % kuormalla dieselin savutusarvo oli n. 1,6 (FSN) ja kalaöljyn n. 1,2 (FSN). Nopeudella 1500 r/min ja 50 % kuormalla dieselin savutusarvo oli n. 2,2 (FSN) ja kalaöljyn n. 1,4 (FSN).



Kuva 89. Savutusarvot nimellisa nopeudella 10 % kuormituksella sekä välinopeudella 25 % ja 50 % kuormituksilla.

5.3.4 Typen oksidit

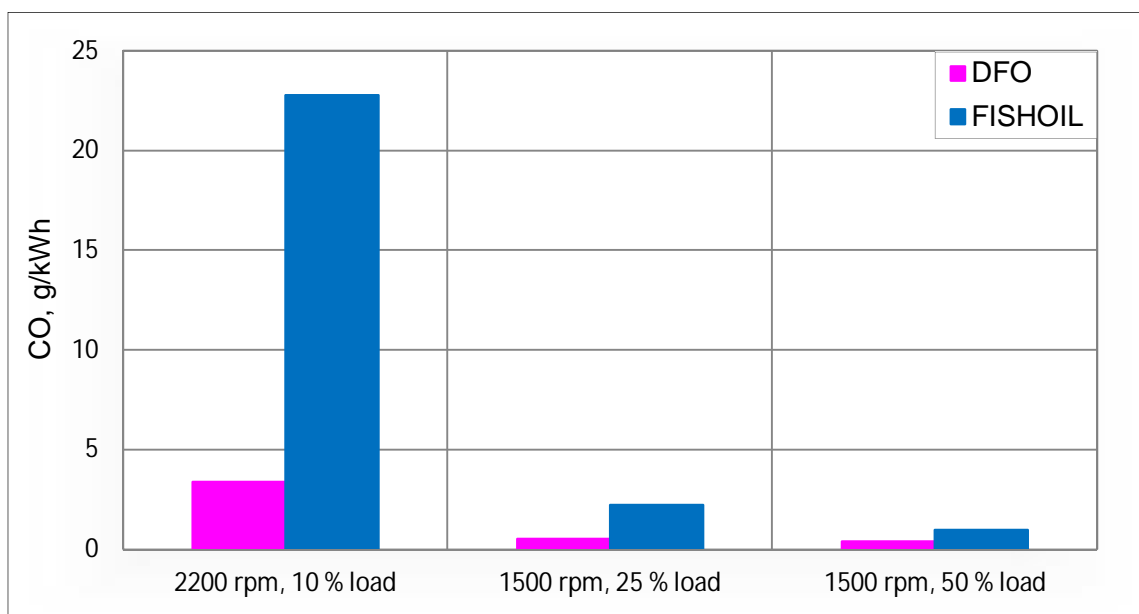
Nopeudella 2200 r/min ja 10 % kuormalla NO_x -päästöjä syntyi dieselillä n. 4,9 g/kWh ja kalaöljyllä n. 4,0 g/kWh, kuva 90. Välinopeudella ja 25 % kuormalla kalaöljyllä syntyi enemmän NO_x -päästöjä (n. 2,5 g/kWh) kuin dieselillä (n. 2,0 g/kWh). Nopeudella 1500 r/min ja 50 % kuormalla kalaöljyllä syntyi typen oksideja kuvan 90 mukaan hieman enemmän kuin dieselillä.



Kuva 90. Typen oksidit nimellispoiveudella 10 % kuormalla sekä välinoiveudella 25 % ja 50 % kuormilla.

5.3.5 Hiilimonoksidit

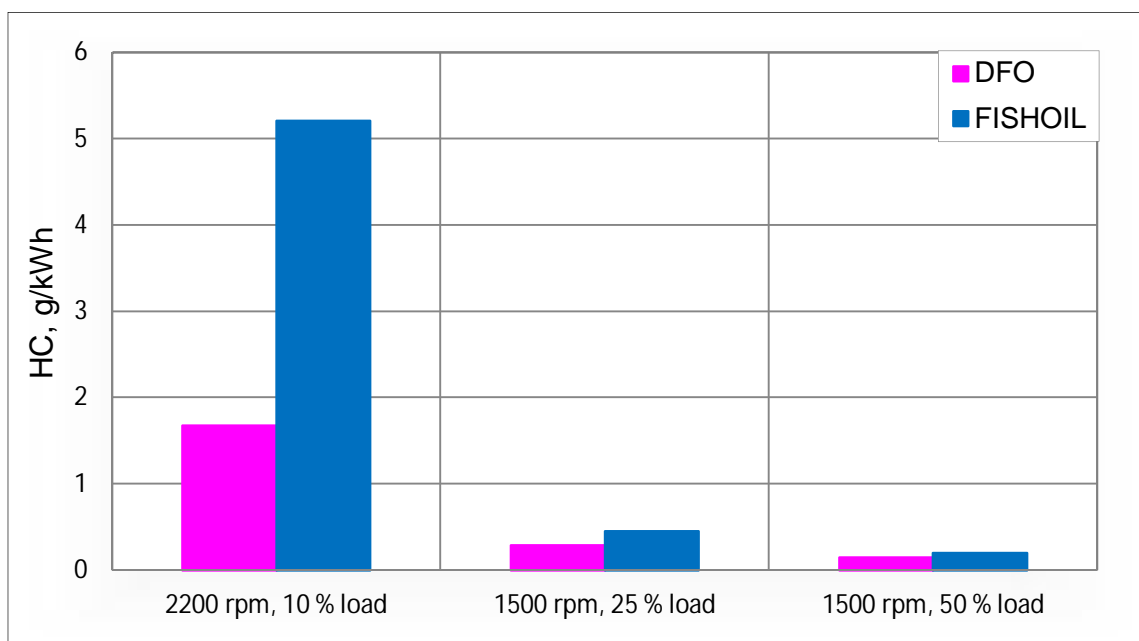
Nimellispoiveudella ja 10 % kuormalla syntyi kalaöljyllä huomattavasti enemmän CO-päästöjä (n. 23 g/kWh) kuin dieselillä (n. 3,4 g/kWh), kuva 91. Välinoiveudella ja 25 % kuormalla ero oli pienempi ja kalaöljyllä häkäpäästöjä syntyi n. 2,2 g/kWh sekä dieselillä n. 0,5 g/kWh. Noiveudella 1500 r/min ja 50 % kuormalla CO-päästöjä syntyi kalaöljyllä n. 1 g/kWh ja dieselillä n. 0,4 g/kWh. Runsas CO on merkki siitä, että kalaöljy palaa huomommin kuin diesel tai ainakin seoksenmuodostus oli heikompa.



Kuva 91. Hiilimonoksidipäästöt nimellisnopeudella 10 % kuormalla sekä välinopeudella 25 % ja 50 % kuormilla.

5.3.6 Hiilivedyt

Hiilivetyjä syntyi eniten nimellisnopeudella, 10 % kuormalla ja kalaöljyllä (n. 5,2 g/kWh). Tällöin dieselillä mitattiin n. 1,7 grammaa hiilivetyjä per kilowattitunti, kuva 92. Välinopeudella ja 25 % kuormalla hiilivetyjä syntyi kalaöljyllä n. 0,5 g/kWh ja dieselillä n. 0,3 g/kWh. Nopeudella 1500 r/min ja puolella kuormalla HC-päästöjä mitattiin sekä kalaöljyllä ajettaessa että dieselillä n. 0,2 g/kWh.

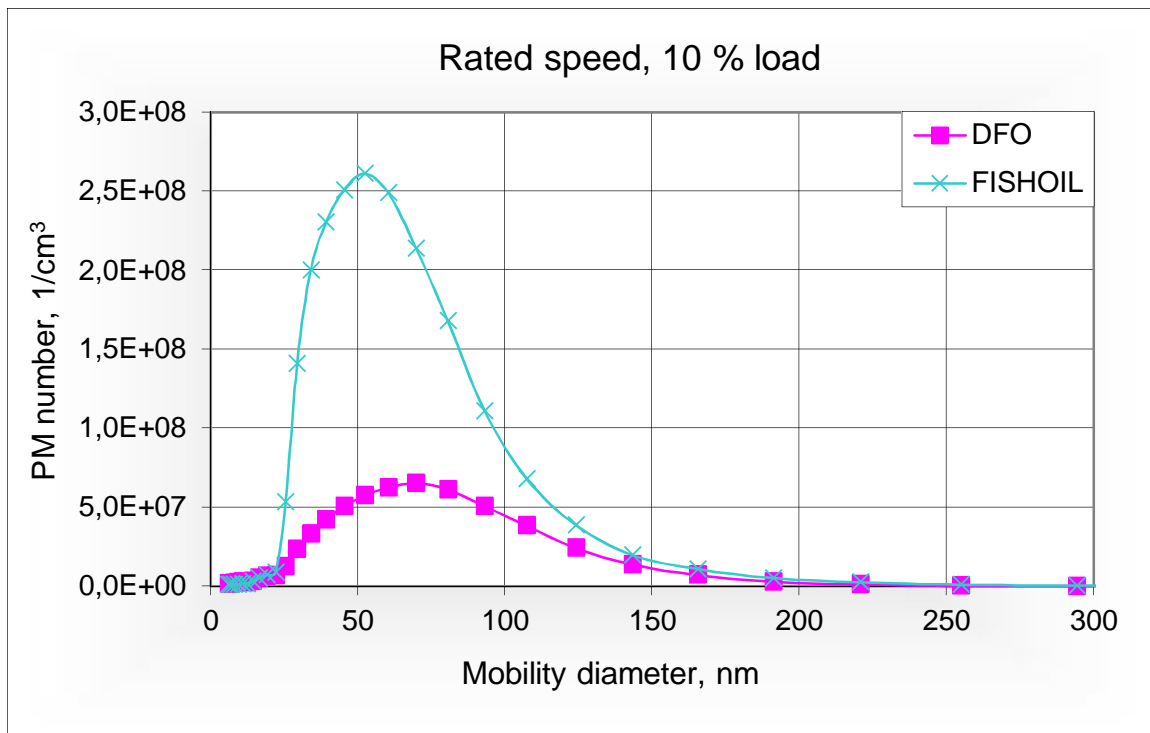


Kuva 92. Hiilivetyypäästöt nimellinopeudella 10 % kuormalla sekä välinopeudella 25 % ja 50 % kuormilla.

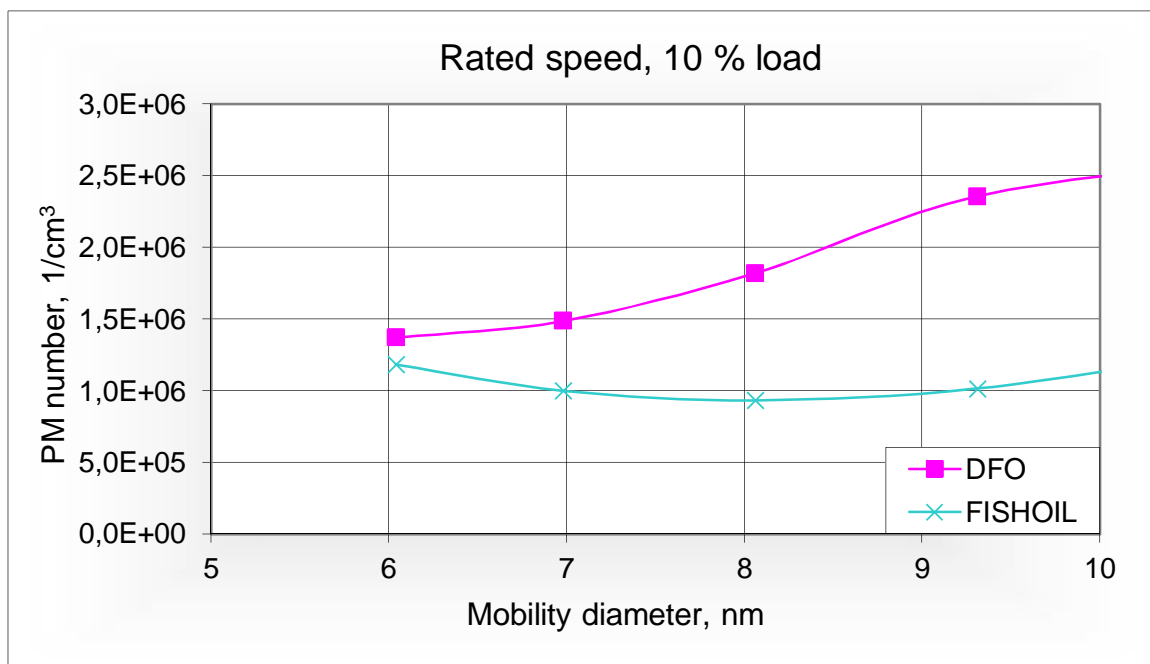
5.3.7 Pienhiukkaset

Nimellinopeudella ja 10 % kuormalla syntyi selkeästi eniten halkaisijaltaan n. 50 nm hiukkasia ajettaessa kalaöljyllä (n. 260 milj./cm³), kuva 93. Dieselillä ajettaessa syntyi eniten n. 70 nm hiukkasia (n. 65 milj./cm³).

Alle 10 nm hiukkasia tarkasteltaessa kuvasta 94 nähdään, että dieselillä ajettaessa niitä syntyi eniten. Halkaisijaltaan n. 9 nm hiukkasia mitattiin dieselillä n. 2,4 milj./cm³ ja kalaöljyllä n. 1,0 milj./cm³. Alle 10 nm hiukkasista eniten syntyi kalaöljyllä halkaisijaltaan n. 6 nm hiukkasia (1,2 milj./cm³), joita syntyi taas dieselillä n. 1,4 milj./cm³. Kaikkiaan vähiten alle 10 nm hiukkasista syntyi 8 nm hiukkasia kalaöljyllä (n. 0,9 milj./cm³).



Kuva 93. Pienhiukkasten kokojakauma nimellispoiteudella 10 % kuormalla.



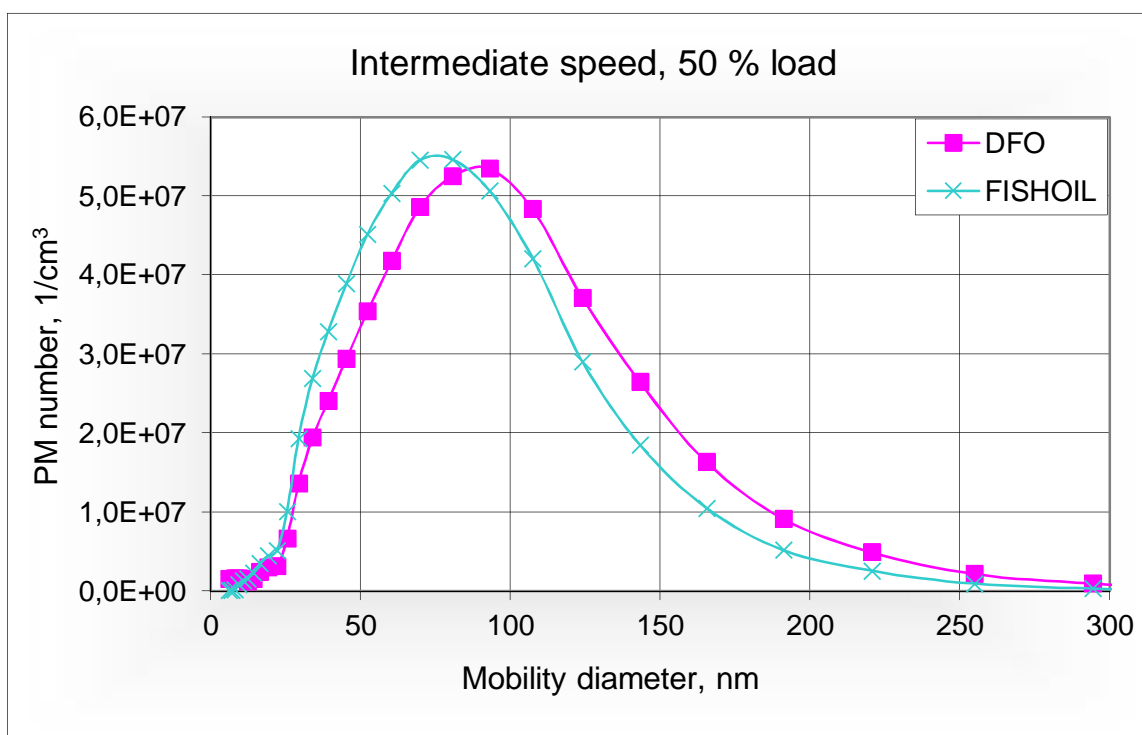
Kuva 94. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä nimellispoiteudella 10 % kuormalla.

Välinoiteudella ja 50 % kuormalla kalaöljyllä syntyi eniten halkaisijaltaan n. 80 nm hiukkasia (n. 55 milj./cm³) ja dieselillä n. 90 nm hiukkasia (n. 53 milj./cm³), kuva 95. Alle 10

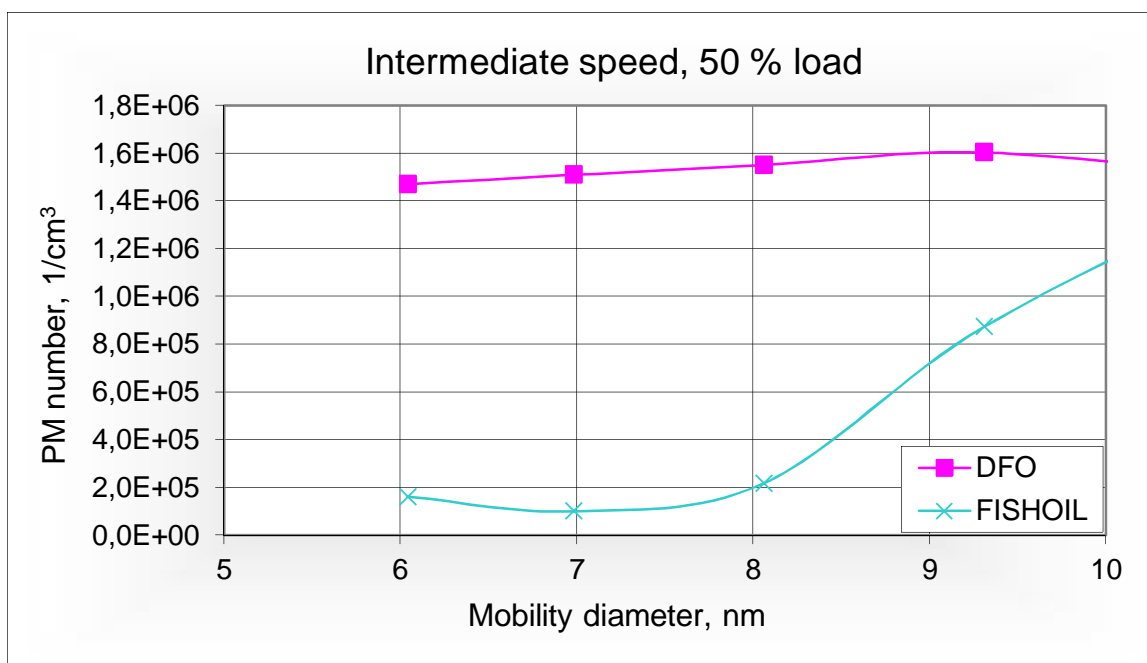
nm hiukkasia syntyi huomattavasti enemmän dieselillä kuin kalaöljyllä, kuva 96. Vähiten syntyi halkaisijaltaan n. 7 nm hiukkasia kalaöljyllä (n. 0,1 milj./cm³). Dieselillä niitä syntyi n. 1,5 milj./cm³. Eniten alle 10 nm hiukkasista syntyi n. 9 nm hiukkasia dieselillä n. 1,6 milj./cm³ ja kalaöljyllä n. 0,9 milj./cm³.

Lisäpisteessä välinopeudella ja 25 % kuormalla mitattiin selkeästi eniten dieselillä halkaisijaltaan n. 90 nm hiukkasia (n. 85 milj./cm³), kuva 97. Kalaöljyllä syntyi taas eniten n. 80 nm hiukkasia (n. 58 milj./cm³). Kuvasta 98 nähdään, että halkaisijaltaan alle 10 nm hiukkasista vähiten syntyi n. 7 nm hiukkasia (dieselillä n. 0,2 milj./cm³ ja kalaöljyllä n. 0,1 milj./cm³). Eniten taas mitattiin halkaisijaltaan n. 9 nm hiukkasia molemmilla polttoaineilla n. 0,5 milj./cm³.

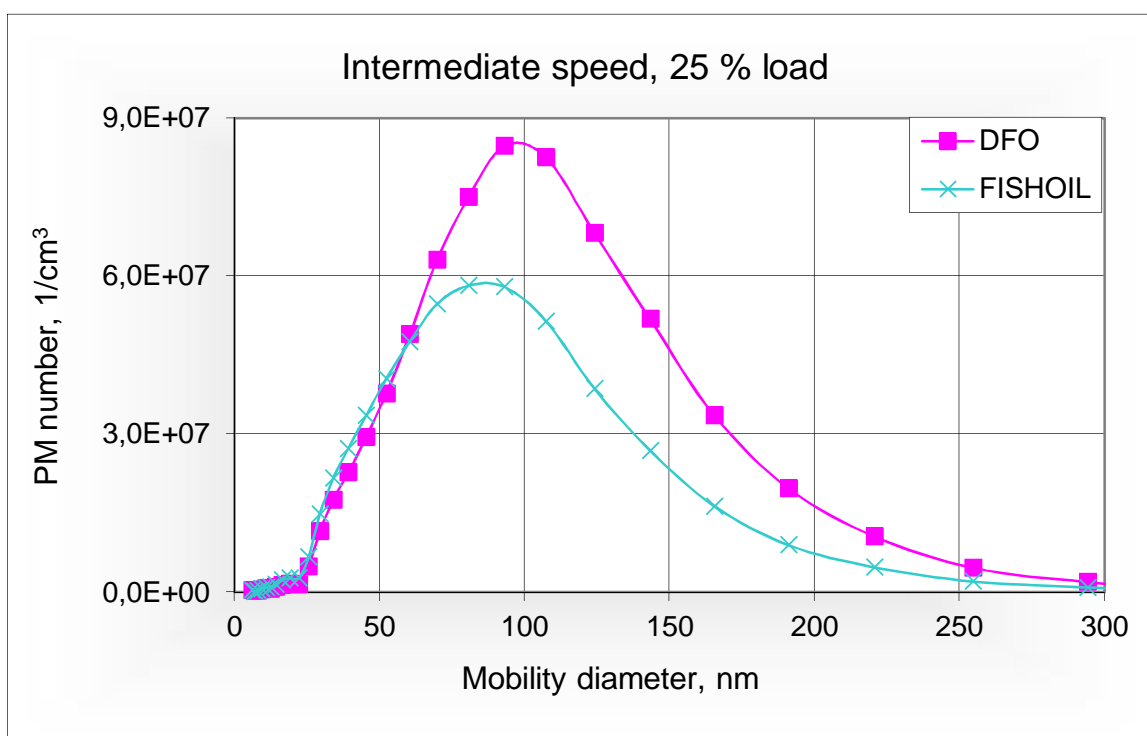
Joutokäynnillä mitattiin huomattavasti eniten halkaisijaltaan n. 34 nm hiukkasia ajettaessa kalaöljyllä (n. 265 milj./cm³), kuva 99. Halkaisijaltaan alle 10 nm hiukkasia syntyi edelleen eniten dieselillä, kuva 100. Kaikista alle 10 nm hiukkasista vähiten syntyi n. 7 nm hiukkasia kalaöljyllä (n. 0,2 milj./cm³). Eniten taas mitattiin halkaisijaltaan n. 9 nm hiukkasia dieselillä (n. 11 milj./cm³).



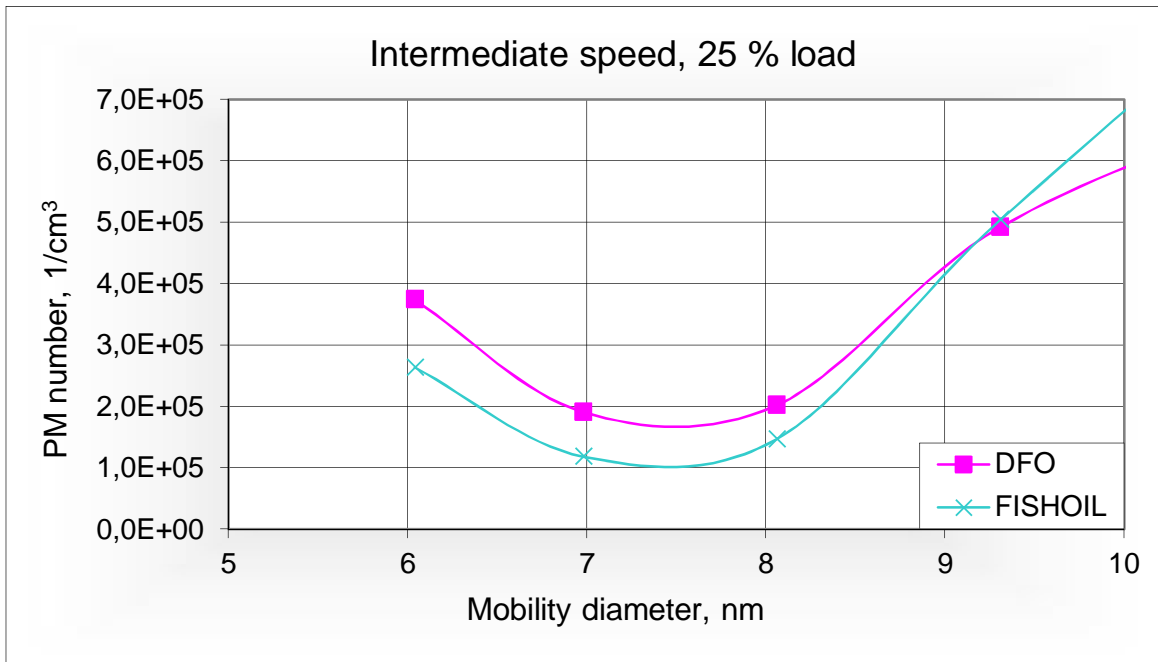
Kuva 95. Pienhiukkasten kokojakauma välinopeudella 50 % kuormalla.



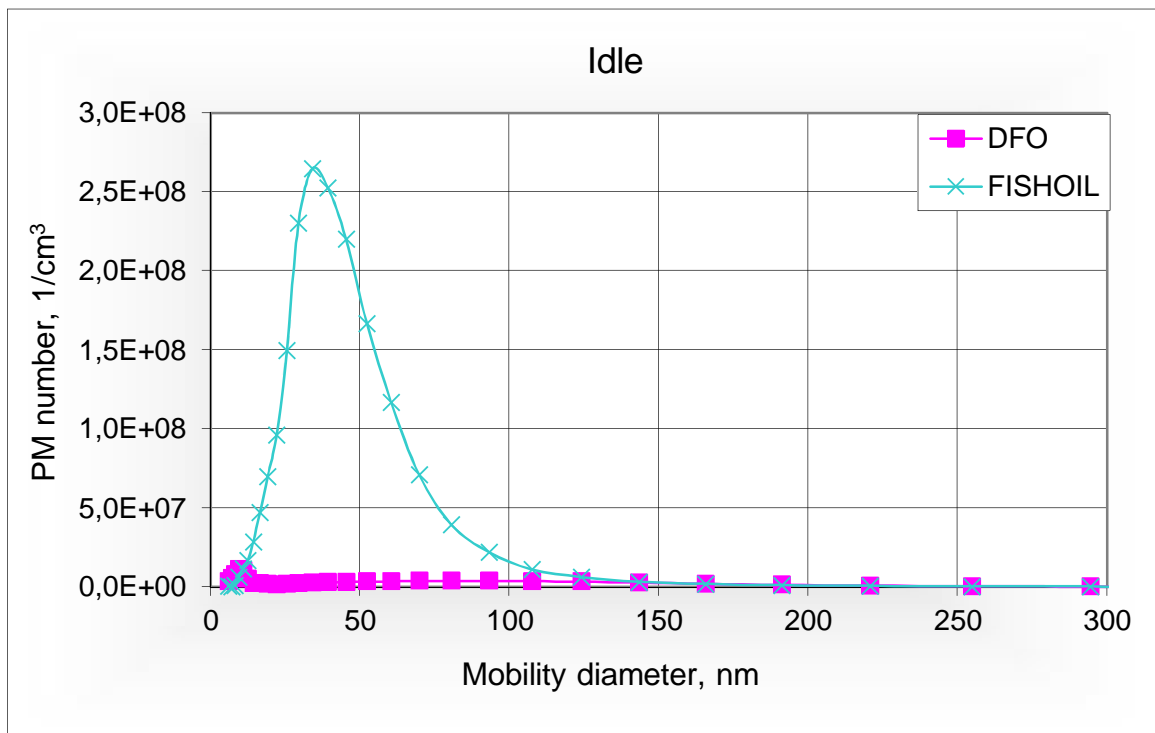
Kuva 96. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä välinopeudella ja 50 % kuormalla.



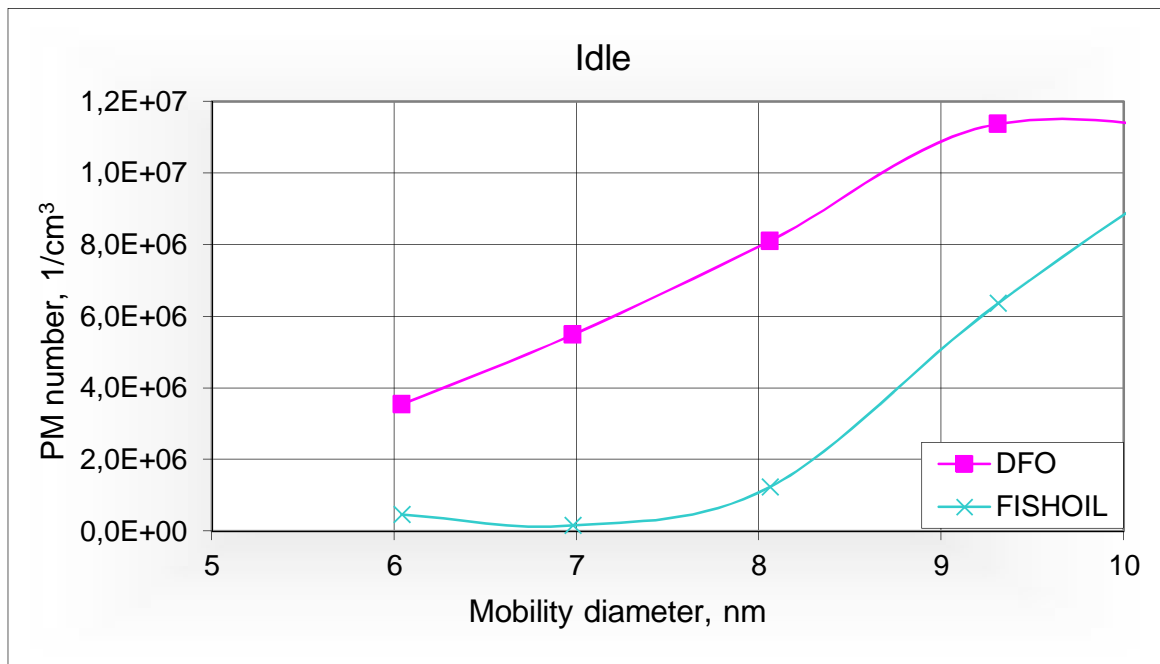
Kuva 97. Pienhiukkasten kokojakauma välinopeudella 25 % kuormalla.



Kuva 98. Pienhiukkasten kokojakauma 6–10 nm välillä välinopeudella ja 25 % kuormalla.



Kuva 99. Pienhiukkasten kokojakauma joutokäynnillä.



Kuva 100. Pienhiukkasten kokojakauma 6 ja 10 nm välillä joutokäynnillä.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli kerätä mahdollisimman paljon mittausinformaatiota moottoriajoista AGCO Power 44 CWA -työkonedieselmoottorilla. Saatuja tuloksia on hyödynnetty moottorin simulointimallin luomisessa. Tavoite saavutettiin: mitattustuloksia saatiin riittävästi simulointimallia varten. Tarkempia pienhiukkasmassatuloksia olisi kuitenkin tarvittu.

Polttoainevertailussa mittausajoja tehtiin neljällä eri polttoaineella: vähärikkinen diesel (DFO), eläinperäinen biodiesel (AFME), esteröity kaladiesel (FISH) ja vetykäsitelty uusiutuva diesel (HVO). Lisäksi tehtiin mittausajo esteröimättömällä kalaöljyllä (FISH-OIL), jota verrattiin vähärikkiseen dieseliin.

Ensimmäisenä tutkielmassa vertailtiin polttoaineiden ominaisuuksia. CHN-analyysissä selvisi, että DFO sisälsi eniten hiiltä ja typpeä. Raaka kalaöljy sisälsi vähiten vetyä ja HVO-polttoaineen jälkeen toiseksi vähiten myös typpeä. Eläinperäinen biodiesel sisälsi huomattavasti muita polttoaineita enemmän rikkiä (19 mg/kg), mutta sen setaaniluku oli toiseksi paras. Vetykäsitellyn uusiutuvan dieselin setaaniluku oli selkeästi korkein ja rikkipitoisuus pienin, eikä se sisältänyt lainkaan typpeä.

Kaladieselistä, kalaöljystä ja eläinperäisestä biodieselistä tutkittiin myös rasvahappokoostumukset. Eläinperäinen biodiesel, kaladiesel ja kalaöljy sisälsivät runsaasti erilaisia rasvahappoja, taulukko 11 sekä liitteet 10–12. AFME sisälsi huomattavasti enemmän tyydyttyneitä rasvahappoja kuin kalaperäiset polttoaineet. Polttoaineanalyyseistä laskettiin myös jodiluku: AFME n. 79 g/100g sekä FISH ja FISHOIL n. 132 g/100g.

6.1 Polttoainevertailu

Polttoainevertailussa tarkasteltiin ensimmäisenä pakokaasun lämpötilaa sylinterien jälkeen, ennen ahdinta, ja ahtopainetta välijäähdyttimen jälkeen. Pääsääntöisesti DFO:lla ajettaessa pakokaasun lämpötila oli korkeampi kuin muilla polttoaineilla. AFME:lla taas mitattiin alhaisimmat lämpötilat niin nimellis- kuin välinopeudellakin. Ahtopaineissa sen

sijaan ei ollut merkittäviä eroja eri polttoaineilla ajettaessa. Esimerkiksi nimellisnopeudella ja täydellä kuormalla ahtopaine oli kaikilla polttoaineilla n. 2,4 bar. Välinopeudella ja täydellä kuormalla DFO:lla ahtopaine oli saman n. 2,4 bar kuin nimellisnopeudellakin. Muilla polttoaineilla ahtopaine oli välinopeudella n. 2,3 bar.

Sylinteripaineiden tulokset olivat sadan näytteen keskiarvoja. Tarkemmin sylinteripaineita tutkittaessa huomattiin, että puristuspuheen maksimiarvo oli -2 kammukulma-asteen kohdalla moottorin käydessä 1000 kierrosta minuutissa. Yleensä puristuspuheen maksimiarvo on sijoittunut yläkuolokohtaan eli 0 kammukulma-asteen kohdalle. Tämä otettiin huomioon tuloksia arvioitaessa.

Sylinteripaineita ja lämmönvapautumista tarkasteltaessa on hyvä tietää myös polttoaineiden ruiskutusajankohdat. Ajankohtia tutkittaessa pystyttiin polttoaineet jakamaan kahteen ryhmään: DFO ja HVO sekä AFME ja FISH. Ryhmissä polttoaineiden ruiskutukset tapahtuivat lähes yhtä aikaa kaikissa kuormituspisteissä. Tämä johtui polttoaineiden samanlaisista ominaisuuksista keskenään. Ensimmäisen pääruiskutuksen (Main1) tulisi olla kaikilla polttoaineilla sama, jotta mittausajot olisivat täysin vertailukelpoiset. Pieniä eroja kuitenkin havaittiin ja jälkikäteen ruiskutusajoituksia ei pystynyt korjaamaan. Tulevia mittausajoja ajatellen tulisi myös ruiskutusajoituksia seurata tarkemmin jo mittausajon aikana moottorinohjausjärjestelmän hallintaohjelman EEM:in kautta.

Yleisesti sylinteripaineissa DFO:lla oli korkein maksimipaine n. -1 kammukulma-asteen kohdalla. Muilla polttoaineilla maksimipaine oli samassa kohdassa, mutta vain matalampi. Poikkeuksena moottorin käydessä nopeudella 1500 r/min täydellä kuormalla, jolloin FISH- ja AFME-polttoaineiden painekäyrät erosivat DFO:n ja HVO:n käyrästä n. 15 kammukulma-asteen kohdalla ollen FISH:llä ja AFME:lla korkeampi kuin DFO:lla ja HVO:lla. Syy eroavaisuuteen oli polttoaineiden ruiskutusmäärissä ja -ajankohdissa. Myös lämmönvapautumiskuvaaja erosi muista samassa kuormituspisteessä. Yleisesti estereitä ruiskutettiin yhden työkierron aikana n. 12 % enemmän kuin DFO:ta. HVO:ta ruiskutettiin yleensä n. 2 % enemmän kuin DFO:ta. Poikkeuksena nimellisnopeudella ajettu 10 % kuorma, jolloin HVO:ta ruiskutettiin n. 7 % vähemmän kuin DFO:ta. Joutokäynnillä HVO syttyi hyvin korkean setaaniarvon vuoksi.

Diesel savutti huomattavasti enemmän kuin esteröidyt biopolttoaineet AFME ja FISH. Vetykäsittelyn HVO-polttoaineen savutus oli edellisten arvojen välissä kaikissa kuormituspisteissä. Selkeästi havaittavissa oli myös se, että AFME- ja FISH-polttoaineiden savutusarvot olivat kaikissa kuormituspisteissä lähes samat.

Typhen oksidit mitattiin kuivasta pakokaasusta ja esitetyt tulokset ovat kahden mittauskerran keskiarvoja. Tulokset on muunnettu vastaamaan kosteaa pakokaasua. Nimellisenopeudella pienellä kuormalla HVO tuotti eniten typhen oksideja. Suuremmilla kuormilla taas FISH tuotti eniten typhen oksidipäästöjä. Välinopeudella FISH tuotti eniten typhen oksidipäästöjä kaikissa kuormituspisteissä. Pienimmät mittaustulokset saatiin kaikissa kuormituspisteissä HVO:lla.

Kuten typhen oksidit myös hiilimonoksidit mitattiin kuivasta pakokaasusta. Tulokset ovat kahden mittauskerran keskiarvoja ja ne on muunnettu vastaamaan kosteaa pakokaasua. Nimellisenopeudella suurin hiilimonoksidiarvo mitattiin FISH-polttoaineella pienellä kuormalla. Pienin häkäarvo mitattiin FISH-, AFME- ja HVO-polttoaineilla täydellä kuormalla. Välinopeudella hiilimonoksidia syntyi eniten puolella kuormalla ajettaessa DFO:lla. Vähiten täydellä kuormalla ajettaessa estereillä. Happipitoiset esterit siis tuottavat vähemmän häkää kuin DFO, mutta pienillä kuormilla seoksenmuodostus voi olla huonompaa kuin DFO:lla ja siksi myös CO-pitoisuudet nousevat.

Hiilivedyt mitattiin märästä pakokaasusta. Kaikissa kuormituspisteissä DFO tuotti eniten hiilivetyjä. Muiden polttoaineiden hiilivetyypäästöt olivat keskenään hyvin lähellä toisiinsa.

Pienhiukkasten kokojakauma mitattiin laimennetusta pakokaasusta ja tutkielmassa tarkasteltiin halkaisijaltaan 6–300 nm hiukkasia. Myös hiukkasmassa kerättiin laimennetusta pakokaasusta, halkaisijaltaan 1–1000 nm hiukkasista. Hiukkasmassojen keräyksessä ja punnituksessa kuitenkin epäonnistuttiin. Mittauksiin epäsuotuisasti vaikuttivat suodatinpaperien säilytys huoneilmassa (huoneilman kosteus) ja vaa'an riittämätön tarkkuus pelkälle suodatinpaperille. Huoneilman kosteuden imeytyminen suodatinpapereihin pyrittiin estämään säilyttämällä suodatinpapereita eksikaattorissa. Tulokset eivät juurikaan muuttuneet. Suodatinpaperin käsittelyä pyrittiin vähentämään ja vaa'an vaeltamista minimoimaan.

maan nostamalla suodatinpaperin massaa punnitsemalla se muovisten suodatinpaperin pidikkeiden kanssa. Muoviset pidikkeet kuitenkin aiheuttivat vaakaan staattisesta sähköstä johtuvia häiriöitä.

Kemistin kanssa päädyttiin seuraavia mittausajoja ajatellen ratkaisuun, että punnitukset tulisi tehdä laimentamattomasta pakokaasusta käyttäen eksikaattorissa säilytettäviä suodatinpapereita ja punnitsemalla ne ilman muovisia pidikkeitä tarvittavan tarkkuuden omaavalla vaa'alla. Mittauksen tulee tällöin olla kuuma, jotta suodatinpapereihin ei lauhdu vettä ja raskaita hiilivetyjä ajon aikana. Lisäksi vaakaa mahdollisesti häiritsevä staattinen sähkö pyrittäisiin poistamaan ESD-maton avulla punnitustilassa.

Yleisesti eniten 50–100 nm pienhiukkasia tuotti DFO ja vähiten niitä syntyi estereillä. DFO tuotti eniten 60–70 nm hiukkasia ja esterit 50–60 nm hiukkasia. Alle 10 nm hiukkasia tuotti vähiten HVO ja eniten esterit. Pienistä hiukkasista eniten syntyi 9 nm hiukkasia AFME:lla sekä FISH:llä ja vähiten 7 nm hiukkasia DFO:lla sekä HVO:lla. Joutokäynnillä nähtiin poikkeus, jolloin FISH tuotti kokonaisuudessaan eniten pienhiukkasia.

6.2 Suutinvertailu

Suutinvertailussa AGCO Power 44 CWA -työkonedieselmoottoria ajettiin neljällä eri polttoaineen ruiskutus-suutinsarjalla. Ensimmäinen sarja oli moottorissa valmiina (std). Muut sarjat olivat 8-reikäinen low flow rate (LF) -suutin sekä 6- ja 10-reikäiset high flow rate (HF) -suuttimet. Suutinvertailussa käytettävä polttoaine oli vähärikkinen dieselöljy (DFO).

Kahdeksanreikäisillä pienen virtauksen suuttimilla ajettaessa jouduttiin muokkaamaan suutinkarttaa, jotta moottori pysyi käynnissä. Tästä johtuen 8-reikäisiä LF-suuttimia ei voi täysin verrata muihin suuttimiin. Tässä tutkielmassa tulokset on kuitenkin esitetty yhdessä muiden suutintuloksien kanssa.

Suutinvertailussa tarkasteltiin myös ensimmäisenä pakokaasun lämpötilaa sylinterien jälkeen, ennen ahdinta ja ahtopainetta välijäähdyttimen jälkeen. Pääsääntöisesti 10-

reikäisillä HF-suuttimilla ajettaessa pakokaasun lämpötila oli korkeampi kuin muilla suuttimilla. Kahdeksanreikäisillä LF-suuttimilla taas mitattiin alhaisimmat lämpötilat niin nimellis- kuin välinopeudellakin muutamaa poikkeusta lukuunottamatta. Pakokaasun lämpötiloissa oli enintään n. 20 °C:n ero pienimmän ja suurimman arvon välillä kaikissa kuormituspisteissä.

Ahtopaineissa 8-reikäisten LF-suuttimien arvot olivat alhaisemmat kuin muiden suuttimien arvot nimellisnopeudella. Välinopeudella ahtopaineiden arvot hajosivat enemmän kuin nimellisnopeudella, mutta erot paineiden välillä olivat pieniä.

Sylinteripaineiden tulokset olivat sadan näytteen keskiarvoja. Kuten polttoainevertailussa todettiin, puristuspuheen maksimiarvo oli -2 kammenkulma-asteen kohdalla moottorin käydessä 1000 kierrosta minuutissa. Tämä otettiin huomioon tuloksia tarkasteltaessa.

Ruiskutusajankohtia tutkittaessa 6- ja 10-reikäisten HF-suuttimien ruiskutukset olivat yht'aikaisia. Standardisuuttimien ruiskutusajoitukset erosivat vain hieman edellisistä. Kahdeksanreikäisien LF-suuttimien ruiskutusajankohdat erosivat muista johtuen siitä, että ruiskutuskarttoja jouduttiin muokkaamaan. Kuten polttoainevertailussa, myös suutinvertailussa ensimmäisen pääruiskutuksen (Main1) tulisi olla kaikilla suuttimilla sama, jotta mittausajot olisivat täysin vertailukelpoiset. Suutinvertailussa ei ensimmäisen pääruiskutuksen kohdalla ollut kuin asteen eroja ruiskutuksien kestoissa muuten, mutta 8-reikäisillä LF-suuttimilla ruiskutusjakso oli muita pitempi pienen virtaaman takia.

Täydellä kuormalla sylinteripaineet olivat nimellisnopeudella kaikilla suuttimilla samat (n. 110 bar). Välinopeudella maksimipaine oli niin ikään hyvin sama kaikilla suuttimilla (n. 120 bar). Myös joutokäynnillä sylinteripaineet olivat yhtenäiset.

Nimellisnopeudella ajettaessa täydellä ja 75 % kuormilla lämmönvapautumiskuvaajista huomattiin, että moottorin käynti ei ollut kovin vakaata ja derivaatta oli levoton. Välinopeudella täydellä ja 75 % kuormilla taas 8-reikäisillä LF-suuttimilla syttymisjättämä oli selvästi lyhin ja polttoainetta ruiskutettiin palotilaan yhden työkierron aikana eniten. LF-suuttimilla huomattiin lämmönvapautumispiikki heti 2. pääruiskutuksen jäl-keen. Tämä johtui siitä, että 8-reikäisistä LF-suuttimista virtasi polttoainetta sen verran hitaasti, että

toiseen pääruiskutukseen jäi vielä ruiskutettavaa momentin ylläpitämiseksi. Eli suuttimien lyhyt syttymisjättämä hidasti lämmönvapautumista ensimmäisen pääruiskutuksen aikana. Puolella kuormalla ja välinopeudella lämpöä vapautui nopeimmin 10-reikäisillä HF-suuttimilla. Hitaimmin lämpöä vapautui 8-reikäisillä LF-suuttimilla.

Kuusireikäiset HF-suuttimet aiheuttivat savutusta eniten. Alhaisimmat arvot mitattiin 8-reikäisillä LF-suuttimilla. Tämä kertoo suuttimien hyvästä seoksenmuodostuksesta erityisesti osakuormilla, mutta täytyy ottaa huomioon myös se, että LF-suuttimien suutin-karttaa muokattiin. Nimellis- ja välinopeudella eniten savutusta aiheuttivat 6-reikäiset HF-suuttimet puolella kuormalla. Vähiten savutusta aiheuttivat 8-reikäiset LF-suuttimet pienellä kuormalla. Välinopeudella 8-reikäisten LF-suuttimien savutusarvo nousi huomattavasti täydellä kuormalla. Tämä johtui mahdollisesti siitä, että ruiskutus jatkui täydellä kuormalla liian pitkälle ja hiukkaset eivät ehtineet palamaan pois.

Typen oksidit mitattiin kuivasta pakokaasusta ja esitetyt tulokset ovat kahden mittauskerran keskiarvoja. Tulokset muunnettiin vastaamaan kosteaa pakokaasua. Nimellisnopeudella eniten typen oksidipäästöjä syntyi 8-reikäisillä LF-suuttimilla pienellä kuormalla. Muilla suuttimilla arvot olivat lähellä toisiaan ja olivat alhaisimmat puolella kuormalla. Välinopeudella korkeimmat typen oksidipäästöt mitattiin standardisuuttimilla ja 8-reikäisillä LF-suuttimilla täydellä kuormalla. Alhaisimmat päästötulokset mitattiin välinopeudella ja puolella kuormalla 6-reikäisillä HF-suuttimilla.

Kuten typen oksidit, myös hiilimonoksidit mitattiin kuivasta pakokaasusta. Tulokset ovat kahden mittauskerran keskiarvoja ja muunnettiin vastaamaan kosteaa pakokaasua. Nimellisnopeudella hiilimonoksidiarvot olivat korkeimmillaan pienellä kuormalla 8-reikäisillä LF-suuttimilla. Välinopeudella korkeimmat CO-päästöt mitattiin kaikissa pisteissä 10-reikäisillä HF-suuttimilla (puolella kuormalla korkein arvo). Alhaisin CO-arvo mitattiin täydellä kuormalla molemmilla nopeuksilla 6-reikäisillä HF-suuttimilla.

Hiilivedyt mitattiin kosteasta pakokaasusta. Kaikissa kuormituspisteissä standardisuuttimet tuottivat eniten hiilivetyjä. Muiden suuttimien hiilivetypäästöt olivat keskenään hyvin lähellä toisiaan nimellisnopeudella. Välinopeudella vähiten hiilivetypäästöjä syntyi 10-reikäisillä HF-suuttimilla.

Pienhiukkasten kokojakauma mitattiin laimennetusta pakokaasusta ja tutkielmassa on tarkasteltu halkaisijaltaan 6–300 nm hiukkasia. Nimellisa nopeudella eniten pienhiukkasia tuottivat 6-reikäiset HF-suuttimet (70–90 nm) ja vähiten 8-reikäiset LF-suuttimet (50–60 nm). Alle 10 nm hiukkasia tuottivat niin ikään eniten 6-reikäiset HF-suuttimet poikkeuksena 75 % ja 10 % kuormat, jolloin 8-reikäisillä LF-suuttimilla syntyi 9 nm hiukkasia eniten. Vähiten alle 10 nm hiukkasia tuottivat standardisuuttimet ja 8-reikäiset LF-suuttimet.

Välinopeudella ja täydellä kuormalla LF-suuttimet tuottivatkin eniten kooltaan 90 nm hiukkasia ja standardisuuttimet vähiten. Muilla kuormilla LF-suuttimet tuottivat jälleen vähiten pienhiukkasia (halkaisijaltaan n. 70 nm). Tämä saattoi johtua LF-suuttimien kohdalla tehdyistä muutoksista suutinkartassa. Seitsemänkymmennenviiden prosentin ja 50 prosentin kuormilla eniten 120 nm hiukkasia aiheuttivat 10-reikäiset HF-suuttimet. Alle 10 nm hiukkasia tuottivat eniten jälleen 6-reikäiset HF-suuttimet (n. 9 nm) ja vähiten standardisuuttimet (n. 7 nm).

Erityisesti joutokäynnillä pienhiukkasjakaumasta erottui 10-reikäisten HF-suuttimien käyrän nousu n. 140 nm kokoisten hiukkasten kohdalla. Muilla suuttimilla hiukkasia syntyi eniten 9–11 nm kokoluokissa, standardisuuttimilla eniten (n. 11 nm). Yhdeksän nanometrinen hiukkasia syntyi myös eniten standardisuuttimilla. Vähiten syntyi 6 nm hiukkasia kaikilla muilla suuttimilla paitsi standardisuuttimilla.

Hiukkasmassojen vertailukelpoisia tuloksia ei pystytty tutkielmassa esittämään. Parannusehdotukset hiukkasmassan keräykseen liittyen tulevia moottoriajoja ajatellen käsiteltiin polttoainevertailun yhteydessä.

6.3 Dieselöljyn ja kalaöljyn vertailu

Kalaöljyn moottoriajot tehtiin viimeisenä polttoaineen suuren viskositeetin vuoksi, koska raa'alla kalaöljyllä ajaminen olisi voinut aiheuttaa moottoririkon. Polttoainesäiliö jouduttiin nostamaan alkuperäistä korkeammalle, jotta polttoainepumppu saatiin gravitaatiovoiman avulla toimittamaan riittävästi polttoainetta moottorille. Polttoainesäiliön nostamisesta huolimatta vain neljä kuormituspistettä saatiin ajettua kuormien ollessa melko

pieniä. Suuren viskositeetin vuoksi ruiskutussuuttimiksi valittiin 6-reikäiset HF-suuttimet, joissa oli vähiten reikiä ja suuri läpivirtaama.

Kalaöljyn ja dieselöljyn pakokaasujen lämpötilat eivät eronneet toisistaan kovinkaan paljon. Kuorman suuretessa pakokaasun lämpötila alkoi olla hieman korkeampi dieselöljyllä kuin kalaöljyllä. Ahtopaineissa ei ollut merkittäviä eroja ajettaessa eri polttoaineilla.

Sylinteripaineiden tulokset olivat sadan näytteen keskiarvoja. Sylinteripaine oli dieselillä korkeimmillaan yläkuolokohdassa. Kalaöljyllä taas sylinteripaineet olivat korkeimmillaan puristuspuheen kohdalla. Kalaöljystä vapautui lämpöä nopeimmillaan hiukan myöhemmin kuin dieselöljystä.

Kalaöljyn ja dieselin ruiskutusajankohdissa oli vain pieniä eroja. Yleisesti DFO:lla oli korkeampi sylinteripaine pienillä kuormilla kuin kalaöljyllä. Puolella kuormalla ja välinopeudella sylinteripaineet olivat yhtäläiset. Nimellinopeudella pienellä kuormalla kalaöljyn esiruiskutus ei syttynyt kunnolla ja polttoainetta jäi enemmän pääruiskutukseen. Tästä johtuen lämpöä vapautui nopeammin kalaöljyllä ajettaessa kuin dieselillä. Muilla kuormilla oli selkeästi nähtävissä, että DFO:lla syttymisjättämä oli lyhyempi ja siitä vapautui lämpöä nopeammin kuin FISHOIL:sta. Lisäpisteessä molemmista polttoaineista vapautui kuitenkin lämpöä yhtänopeasti. Tämä oli mahdollisesti seurausta siitä, että FISHOIL:in esiruiskutus paloi niin myöhään, että se yhdistyi ensimmäiseen pääruiskutukseen. Kaikissa kuormituspisteissä FISHOIL:ia ruiskutettiin yhden työkierron aikana palotilaan enemmän kuin DFO:ta.

Diesel savutti huomattavasti enemmän kuin raaka kalaöljy kaikissa kuormituspisteissä. Erot suurenevät kuorman kasvaessa. Pienellä kuormalla nimellinopeudella DFO tuotti hieman enemmän NO_x-päästöjä kuin FISHOIL. Välinopeudella erot olivat pienempiä kalaöljyn tuottaessa NO_x-päästöjä enemmän kuin dieselin.

Seoksen muodostus kalaöljyllä oli huonoa pienillä kuormilla lämpötilojen ollessa matalat. Tästä johtuen kalaöljyllä syntyi 3-kertainen määrä hiilivetypäästöjä dieseliin verrattuna. Samoin kävi myös hiilimonoksidipäästöjen kanssa. Kuorman kasvaessa alkaa polttoaine-

suihkun laatu ja seoksenmuodostus kalaöljyllä parantua, ja sekä HC- että CO-päästöt alenevat lähes DFO:n tasolle.

Yleisesti suuria pienhiukkasia (halkaisija yli 10 nm) syntyi eniten kalaöljyllä, kun taas alle 10 nm hiukkasia syntyi eniten dieselillä. Nimellinopeudella pienellä kuormalla syntyi selkeästi eniten halkaisijaltaan n. 50 nm hiukkasia ajettaessa kalaöljyllä ja n. 70 nm hiukkasia ajettaessa dieselillä. Alle 10 nm hiukkasista vähiten syntyi 8 nm hiukkasia kalaöljyllä ja eniten 9 nm hiukkasia dieselillä.

Välinopeudella kalaöljyllä syntyi eniten halkaisijaltaan n. 80 nm hiukkasia ja dieselillä taas n. 90 nm hiukkasia. Alle 10 nm hiukkasista syntyi eniten 9 nm hiukkasia ja vähiten 7 nm hiukkasia. Joutokäynnillä mitattiin huomattavasti eniten halkaisijaltaan n. 34 nm hiukkasia ajettaessa kalaöljyllä. Alle 10 nm hiukkasista eniten syntyi jälleen 9 nm hiukkasia DFO:lla ja vähiten 7 nm hiukkasia FISHOIL:illa.

7 YHTEENVETO

Future Combustion Engine Power Plant (FCEP) -tutkimusohjelman tavoitteena on varmistaa, että suomalainen polttomoottoriteollisuus pystyy ylläpitämään johtavan asemansa globaaleilla markkinoilla vaatimusten kiristyessä. Tämä tutkielma on osa FCEP-tutkimusohjelman WP 4 eli Fuel flexibility -kategoriaa, jonka tavoitteena on laajentaa polttoainevalikoimaa, kehittää moottoreiden suorituskyvyn ja päästöjen ennustemetodeja sekä kehittää moottoreiden valmiuksia käyttää vaihtoehtoisia polttoaineita. Tutkielman tavoitteena oli Vaasan yliopistossa mallinnetun nopeakäyntisen työkonedieselmoottorin simulointimallien tueksi ja verifioimiseksi ajaa suoritusarvo- ja päästömittauksia tavanomaisella vähärikkisellä dieselpolttoaineella sekä erilaisilla biopolttoaineilla. Lisätiedon saamiseksi mittauksia tehtiin myös erilaisin ruiskutus-suuttimin.

Polttoainevertailu suoritettiin vähärikkisen dieselöljyn (DFO), kalanperkuujätteistä valmistetun estreröidyn biodieselin (FISH), eläinperäisen biodieselin (AFME) sekä vetykäsitellyn uusiutuvan dieselpolttoaineen (HVO) kesken. Näiden mittausten jälkeen moottoriin vaihdettiin ruiskutus-suuttimet, ja suutinvertailu ajettiin dieselpolttoaineella. Suuttimia oli neljää eri mallia: standardisuuttimet, 6- ja 10-reikäiset high flow rate (HF) -suuttimet ja 8-reikäiset low flow rate (LF) -suuttimet. Lopuksi ajettiin 6-reikäisillä HF-suuttimilla raakaa, esteröimätöntä kalaöljyä (FISHOIL).

Tutkimusajot suoritettiin Tutkimuskeskus Technobothnian polttomoottorilaboratoriossa nopeakäyntisellä AGCO Power 44 CWA common rail -työkonedieselmoottorilla. Moottorilla ajettiin ISO 8178 -normin kahdeksanvaiheisen C1-mittaussyklin mukaisesti (NRSC). Maksimikuormituspisteet määriteltiin siten, että ne pystyttiin saavuttamaan kaikilla polttoaineilla. Esteröimättömällä kalaöljyllä ei kuitenkaan pystytty saavuttamaan kaikkia kuormituspisteitä, joten vertailupisteiden saamiseksi lisättiin yksi kuormituspiste välino-peudelle. Lisäksi pienhiukkasten massan määrittämiseksi kuormituspisteiden kestoa pidennettiin, jotta hiukkasimpaktoriin saatiin johdettua kauemmin pakokaasua ja hiukkas-massaa kasvatettua tarkkaa punnitusta varten. Hiukkasmassojen vertailukelpoisia tuloksia ei kuitenkaan pystytty tutkielmassa esittämään.

Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet olivat valmiina polttomoottorilaboratoriossa. Moottorista mitattiin päästökomponentteja sekä useita lämpötiloja ja paineita. Moottori kytkettiin pyörrevirtadynamometriin, jota säädettiin valvomosta. Suutinvertailussa jouduttiin muokkaamaan 8-reikäisten LF-suuttimien suutinkarttaa moottorin pitämiseksi käynnissä. Tämän vuoksi 8-reikäisten LF-suuttimien mittaustuloksia ei voi suoraan verrata muiden suuttimien tuloksiin. Tutkielmassa tulokset esitettiin kuitenkin yhdessä.

Polttoaineiden ominaisuuksia vertailtaessa selvisi, että DFO sisälsi eniten hiiltä ja typpeä. FISHOIL sisälsi vähiten vetyä ja HVO-polttoaineen jälkeen toiseksi vähiten typpeä. AFME sisälsi muita polttoaineita huomattavasti enemmän rikkiä, mutta sen setaaniluku oli toiseksi paras. HVO:n setaaniluku oli selkeästi korkein ja rikkipitoisuus pienin, eikä se sisältänyt ollenkaan typpeä tai happea. Esterit sisälsivät runsaasti erilaisia rasvahappoja. AFME sisälsi huomattavasti enemmän tyydyttyneitä rasvahappoja kuin kalaperäiset polttoaineet.

Polttoainevertailussa pääsääntöisesti DFO:lla ajettaessa pakokaasun lämpötila oli korkeampi kuin muilla polttoaineilla. Yleisesti sylinteripaineissa DFO:lla oli korkein maksimipaine. Estereitä ruiskutettiin enemmän kuin DFO:ta, HVO:ta vain hieman enemmän kuin DFO:ta. HVO syttyi hyvin erityisesti joutokäynnillä korkean setaaniarvon vuoksi.

Päästöjä tarkasteltaessa DFO savutti huomattavasti enemmän kuin esterit. Oli selkeästi havaittavissa, että AFME:n ja FISH:n savutusarvot olivat kaikissa kuormitusasteissa lähes samat. DFO tuotti myös eniten hiilivetyjä. FISH tuotti eniten typen oksideja kaikissa kuormitusasteissa poikkeuksena nimellisnopeudella ja pienellä kuormalla ajettu piste. Tässä pisteessä HVO tuotti eniten typen oksideja, joskin muissa pisteissä niitä syntyi juuri HVO:lla vähiten. Happipitoiset esterit tuottivat vähemmän häkää kuin DFO, mutta pienillä kuormilla seoksenmuodostus voi olla huonompaa kuin DFO:lla ja siksi myös CO-pitoisuudet nousivat. Yleisesti eniten yli 10 nm pienhiukkasia syntyi DFO:lla ja vähiten estereillä. Alle 10 nm hiukkasia syntyi taas eniten estereillä ja vähiten DFO:lla sekä HVO:lla.

Suutinvertailussa pääsääntöisesti 10-reikäisillä HF-suuttimilla ajettaessa pakokaasun lämpötila oli korkeampi kuin muilla suuttimilla. Ahto- ja sylinteripaineet olivat kaikilla suut-

timilla yhtenäiset. Yleisesti 8-reikäisten LF-suuttimien syttymisjättämä oli lyhin, mikä saattoi johtua suutinkartan muokkauksesta.

Kuusireikäiset HF-suuttimet aiheuttivat savutusta eniten. Alhaisimmat arvo mitattiin 8-reikäisillä LF-suuttimilla kertoen suuttimien hyvästä seoksenmuodostuksesta erityisesti osakuormilla, mutta täytyy ottaa huomioon suutinkarttaan tehdyt muutokset. Eniten typen oksideja aiheuttivat 8-reikäiset LF-suuttimet ja vähiten 6-reikäiset HF-suuttimet. CO-päästöt olivat nimellinopeudella korkeimmillaan pienellä kuormalla 8-reikäisillä LF-suuttimilla ja välinopeudella korkeimmillaan puolella kuormalla 10-reikäisillä HF-suuttimilla. Molemmilla nopeuksilla 6-reikäiset HF-suuttimet tuottivat CO-päästöjä vähiten. HC-päästöt olivat korkeimmat kaikissa kuormituspisteissä standardisuuttimilla. Muiden suuttimien HC-päästöissä ei ollut suuria eroja. Yli 10 nm pienhiukkasia syntyi nimellis- ja välinopeudella eniten HF-suuttimilla ja vähiten 8-reikäisillä LF-suuttimilla. Alle 10 nm hiukkasia syntyi vähiten standardisuuttimilla. Joutokäynnillä pienhiukkasjakaumasta erottui erityisesti 10-reikäisten HF-suuttimien käyrän nousu n. 140 nm kohdalla, jota ei tapahtunut muilla suuttimilla.

Raa'an kalaöljyn ja dieselin vertailussa oli nähtävissä, että DFO:n syttymisjättämä oli lyhyempi ja siitä vapautui lämpöä nopeammin kuin FISHOIL:sta. Kaikissa kuormituspisteissä FISHOIL:a ruiskutettiin yhden työkierron aikana enemmän kuin DFO:ta. Diesel kuitenkin savutti huomattavasti enemmän kuin kalaöljy. Pääsääntöisesti kalaöljy tuotti hieman enemmän typen oksideja kuin diesel. Seoksen muodostus kalaöljyllä oli huonoa pienillä kuormilla lämpötilojen ollessa matalat. Tästä johtuen kalaöljyllä syntyi 3-kertainen määrä hiilivetyypäästöjä DFO:n verrattuna. Samoin kävi myös CO-päästöjen kanssa. Kuorman kasvaessa HC- ja CO-päästöt alenevat kalaöljyllä lähes DFO:n tasolle. Yleisesti eniten yli 10 nm pienhiukkasia syntyi eniten kalaöljyllä ja alle 10 nm hiukkasia syntyi eniten DFO:lla.

Mittaustuloksia saatiin riittävästi simulointimallia varten. Tarkempia pienhiukkasmassatuloksia olisi kuitenkin tarvittu. Tulevia moottoriajoja ajatellen tulisi kiinnittää enemmän huomiota ruiskutusajoituksiin ja -määriin sekä pienhiukkasmassan keräykseen. Kiinnostavaa lisätietoa toisi mm. ruiskutussuuttimien ja pienhiukkasten kokojen välinen korrelaatioanalyysi, johon tutkielmasta löytyisi valmis aineisto.

LÄHDELUETTELO

- Aatola, Hannu, Martti Larmi, Seppo Mikkonen & Teemu Sarjovaara (2009). *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine*. SAE Int. J. Engines 1(1): s. 1251-1262, doi: 10.4271/2008-01-2500.
- Ab Feora Oy (2013). *Feora Ecofuel* [online]. [siteerattu 11.5.2013] Saatavilla: http://www.feora.fi/feora_oljy.html.
- AGCO POWER Oy (2012). *44 CWA* [online]. [siteerattu 9.7.2012] Saatavilla: http://agcopower-com-bin.directo.fi/@Bin/61109038d303b5-685ee8c491747d5484/1341826052/application/pdf/1635397/SisuDiesel_4cylEng.pdf
- Broström, Rosita & Sixten Sjöblom (2012). *Produktion av biodiesel på Åland*. Storfjärdens fisk Ab, Ålands fiskodlarförening rf. PowerPoint.
- DieselNet (2012a). *Emission Standards, Emission Test Cycles: ISO 8178* [online]. [siteerattu 3.8.2012] Saatavilla: <http://www.diesel-net.com/standards/cycles/iso8178.php>
- DieselNet (2012b). *Fuel Regulations, European Union, Automotive Diesel Fuel* [online]. [siteerattu 11.9.2012] Saatavilla: http://www.diesel-net.com/standards/eu/fuel_automotive.php
- DieselNet (2013a). *Emission Standards, United States: Nonroad Diesel Engines* [online]. [siteerattu 14.1.2013] Saatavilla: <http://www.diesel-net.com/standards/us/nonroad.php>
- DieselNet (2013b). *Emission Standards, European Union: Nonroad Diesel Engines* [online]. [siteerattu 14.1.2013] Saatavilla: <http://www.dieselnets.com/standards/eu/nonroad.php>
- DieselNet (2013c). *Biodiesel Standards & Properties* [online]. [siteerattu 9.12.2013] Saatavilla: http://dieselnets.com/tech/fuel_biodiesel_std.php

- HORIBA (2012). *WT-Dyno, Specifications* [online]. [siteerattu 11.7.2012] Saatavilla:
<http://www.horiba.com/automotive-test-systems/products/mechatronicssystem/brake-test-systems/details/wt-dyno-880/>
- Huttunen, Jussi (2012). *Hengitysilman pienhiukkaset – savusta ja saasteista sairautta* [online]. [siteerattu 22.7.2013] Saatavilla:
http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=kol00207
- IMO (2013a). *Nitrogen oxides (NOX) – Regulation 13* [online]. [siteerattu 14.2.2013] Saatavilla:
<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-%28NOx%29-%E2%80%93Regulation-13.aspx>
- IMO (2013b). *IMO Marine Environment Protection Committee 65th session pushes forward with energy-efficiency implementation* [online]. [siteerattu 9.10.2013] Saatavilla: <http://www.imo.org/MediaCentre/Press-Briefings/Pages/18-MEPC65ENDS.aspx>
- Kytö, Matti (2012). *FCEP – Future Combustion Engine Power Plant* [online]. VI Liekkipäivä 26.01.2012. [siteerattu 8.8.2012] Saatavilla:
http://www.ffrc.fi/Liekkipaiva_2012/Sessio1A/Kyto.pdf
- Laine, Elli (2011). *PIKE-selvityksen loppuraportti* [online]. [siteerattu 6.8.2012] Saatavilla: http://www.seprat.net/files/Tiedos-tot/PIKEesiselvitys_loppuraportti.pdf
- Neste Oil (2012). *Sanasto* [online]. [siteerattu 11.9.2012] Saatavilla:
<http://www.nesteoil.fi/default.asp?path=35,52,62,175>
- Pietiko Oy (2009). *Termopari lämpötila-anturina* [online]. [siteerattu 12.12.2013] Saatavilla: <http://www.pietiko.fi/mittarikirjallisuus/Ter-mopari.pdf>
- Raami, Jani (2003). *Hiilimonoksidivaroittimien toiminta ja vaatimukset* [online]. Opin-
näytetyö, Espoon-Vantaan teknillinen ammattikorkeakoulu. 59 s. [siteerattu
17.7.2012] Saatavilla:

<http://www.tukes.fi/tiedostot/julkaisut/hiilimonoksidivaroittimien%20toiminta%20ja%20vaatimukset.pdf>

Siitonen, Jani & Sam Stade (2006). *Nesteen biodieselprosessi* [online]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 10 s. [siteerattu 6.8.2012] Saatavilla:
<http://www3.lut.fi/webhotel/teke/kklemola/2006-NExBTL.pdf>

TSI (2012). *CA-6203 CA-CALC-Combustion Analyzer, Operation and Service Manual* [online]. [siteerattu 17.7.2012] Saatavilla:
http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Manuals/1980472C-6203-Combustion-Analyzer.pdf

US EPA (2013). *Emission Standards Reference Guide, Nonroad Compression-Ignition Engines* [online]. [siteerattu 14.1.2013] Saatavilla:
<http://www.epa.gov/otaq/standards/nonroad/nonroadci.htm>

LIITTEET

LIITE 1. Mittaustulokset DFO 1, 15.2.2012.

	Date	Speed	Torque, request	Torque, real	Power	Air pressure	Relative humidity
Mode	dd.mm.yy	rpm	Nm	Nm	kW	kPa	%
1	15.2.2012	2200	400	400.0	92.2	99.9	6
2	15.2.2012	2200	300	300.0	69.1	99.9	4
3	15.2.2012	2200	200	200.0	46.1	99.9	4
4	15.2.2012	2200	40	40.00	9.2	100	6
5	15.2.2012	1500	610	610.0	95.8	100	4
6	15.2.2012	1500	458	458.0	71.9	100	4
7	15.2.2012	1500	305	305.0	47.9	100	4
8	15.2.2012	850	0	1.83	0.2	100	7

	Air temperature	Rail pressure	Injection timing M1	Injection timing M2	Injection timing P1	Injection timing P2
Mode	°C	MPa	°CA	µs	µs	°CA
1	37.4	83.3	-4	1049	349	0
2	39.2	74.0	-3	1049	349	0
3	39.2	66.0	-3.5	1049	400	0
4	36.6	59.7	-8	1049	400	0
5	39.4	60.5	-2	1049	349	0
6	41.8	46.2	-2.05	1049	349	0
7	40.9	40.0	-1.9	1049	349	0
8	33.6	40.0	-6.2	1049	400	0

	Injection quantity M1	Injection quantity M2	Injection quantity P1	Injection quantity P2	Injection quantity, total	Injection duration P1
Mode	mg	mg	mg	mg	mg	µs
1	81.5	0.1	0.05	0	81.65	0
2	62.2	0.1	0.05	0	62.35	0
3	41.1	0.1	2.5	0	43.7	304
4	12.6	0.1	3.5	0	16.2	348
5	112	0.9	2.5	0	115.4	314
6	82	2.1	2.45	0	86.55	363
7	47.7	6.1	3.0	0	56.8	409
8	1.7	2.3	3.5	0	7.5	435

	Injection duration M1	Injection duration M2	Injection duration P2	FSN	NO _x	NO _x , sensor	HC
Mode	μs	μs	μs		ppm	ppm	ppm
1	1518	0	0	0.925	322	264	55.5
2	1200	0	0	0.945	233.5	206	65.5
3	888	0	0	1.587	170	166	88.1
4	518	0	0	0.875	84	106	188
5	2618	241	0	0.611	680.5	561	53.3
6	2198	346	0	0.859	439	384	56.1
7	1347	525	0	1.111	314	295	72.1
8	285	381	0	0.133	103.7	0	198

	CO ₂ , sensor	CO, sensor	O ₂ , Siemens	O ₂ , WDO	Cooling water in to CAC	Air tempertaure after charger
Mode	%	ppm	%	%	°C	°C
1	8.5	84.5	10.1	9.5	3.5	176.0
2	7.3	82.0	11.7	11.1	3.5	155.5
3	6.0	84.5	13.4	12.7	3.4	118.0
4	2.9	119	17.3	16.6	3.4	61.8
5	9.9	68.0	8.2	7.9	3.5	170.0
6	8.5	75.0	9.9	9.4	3.5	144.9
7	7.0	62.5	11.8	11.0	3.4	107.1
8	1.6	106	18.9	0	3.3	39.3

	Intake air temperature	Coolant after ECS	Coolant from engine	Exhaust gas temperature after cylinder 2	Exhaust gas temperature before cahrger
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	51.4	60.2	85.2	628.2	613.9
2	43.5	59.3	84.8	550.0	537.9
3	30.9	59.0	84.5	448.8	441.3
4	15.1	66.8	83.8	234.6	229.3
5	44.1	54.9	84.5	678.5	651.3
6	35.4	53.5	83.3	602.6	579.9
7	24.3	52.7	82.8	506.4	493.1
8	7.6	67.3	79.9	110.8	113.3

	Cooling water after CAC	Fresh water after ECS	Fresh water before ECS	Exhaust gas temperature after charger	Room temperature
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	32.3	20.5	6.1	464.3	33.2
2	26.7	17.5	5.5	414.2	37.9
3	18.5	13.1	4.7	351.7	37.6
4	9.3	7.7	3.9	199.4	35.2
5	27.9	19.3	5.6	508.7	36.4
6	22.1	15.7	5.1	464.7	38.7
7	14.8	11.5	4.4	412.2	38.2
8	4.7	4.2	3.4	110.1	34.1

	Charge air pressure (after CAC)	Air pressure before CAC	Exhaust gas pressure	Exhaust gas after turbo	Fuelflow	Airflow
Mode	bar	bar	bar	bar	kg/h	kg/h
1	2.4	2.5	2.6	1.0	21.9	644.6
2	2.1	2.2	2.2	1.0	16.7	567.3
3	1.7	1.7	1.8	1.0	11.4	457.0
4	1.1	1.2	1.4	1.0	3.9	311.3
5	2.4	2.4	2.3	1.0	21.1	520.1
6	2.0	2.1	2.0	1.0	16.0	452.5
7	1.6	1.6	1.6	1.0	10.7	357.7
8	1.0	1.0	1.1	1.0	0.005	102.9

	Water vapour pressure	Intake air moisture	Dry mass flow	NO _x correction	Particle correction	Dry-wet correction
Mode	kPa	g/kg	kg/s			
1	5.5	2.1	0.000002	0.833	1.13	0.924
2	7.0	1.8	0.004644	0.815	1.14	0.934
3	7.0	1.8	0.003173	0.815	1.14	0.944
4	6.1	2.3	0.001077	0.830	1.13	0.970
5	7.1	1.8	0.005841	0.815	1.13	0.912
6	8.1	2.0	0.004443	0.811	1.13	0.923
7	7.7	1.9	0.002980	0.812	1.13	0.936
8	5.2	2.3	0.000002	0.839	1.13	0.982

	Wet exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow, sensor	PM calculated from FSN	PM calculated	Mass flow CO	Mass flow HC
Mode	kg/h	kg/h	kg/h	mg/m ³	g/kg	kg/h	kg/h
1	666.4	283.6	232.5	25.6	0.0198	50.2	17.7
2	584.1	176.4	155.7	26.3	0.0203	43.2	18.3
3	468.4	103.0	100.6	50.8	0.0393	36.1	19.8
4	315.2	34.9	44.0	23.9	0.0185	35.1	28.4
5	541.2	746.2	392.6	15.3	0.0118	32.4	13.8
6	468.6	264.6	231.4	23.3	0.0181	31.3	12.6
7	368.4	149.1	140.1	32.3	0.0249	20.8	12.7
8	102.9	14.2	0	2.4	0.0018	10.3	9.8

	Weighting factor	Weighted power	Weighted fuel flow	Weighted NO _x	Weighted HC	Weighted CO
Mode		kW	g/h	kg/h	kg/h	kg/h
1	0.15	13.8	3278.0	34.9	2.7	7.5
2	0.15	10.4	2512.2	23.3	2.7	6.5
3	0.15	6.9	1716.7	15.1	3.0	5.4
4	0.1	0.9	388.7	4.4	2.8	3.5
5	0.1	9.6	2106.6	39.3	1.4	3.2
6	0.1	7.2	1602.5	23.1	1.3	3.1
7	0.1	4.8	1074.9	14.0	1.3	2.1
8	0.15	0.0	0.8	0.0	1.5	1.6
Total	1	53.6	12680.4	154.1	16.6	33.0

	Weighted PM, calculated	Weighted exhaust flow	Weighted particle correction
Mode	kg/h	g/s	
1	2.2	27.8	0.169
2	2.0	24.3	0.170
3	3.1	783	0.170
4	0.7	8.8	0.113
5	0.7	15	0.113
6	1.0	13	0.113
7	1.0	10.2	0.113
8	0.0	4.3	0.169
Total	10.7	886	1.131

LIITE 2. Mittaustulokset FISH, 22.2.2012.

	Date	Speed	Torque, request	Torque, real	Power	Air pressure	Relative humidity
Mode	dd.mm.yy	rpm	Nm	Nm	kW	kPa	%
1	22.2.2012	2200	400	400.0	92.2	100.5	7
2	22.2.2012	2200	300	300.0	69.1	100.5	5
3	22.2.2012	2200	200	200.0	46.1	100.5	5
4	22.2.2012	2200	40	40.0	9.2	100.5	6
5	22.2.2012	1500	610	610.0	95.8	100.2	5
6	22.2.2012	1500	458	458.0	71.9	100.2	4
7	22.2.2012	1500	305	305.0	47.9	100.2	5
8	22.2.2012	850	0	2.3	0.2	100	7

	Air temperature	Rail pressure	Injection timing M1	Injection timing M2	Injection timing P1	Injection timing P2
Mode	°C	MPa	°CA	µs	µs	°CA
1	34.1	86.5	-4	1049	349	0
2	38.1	77.7	-3	1049	349	0
3	37.3	68.5	-3.5	1049	400	0
4	34.6	59.7	-8	1049	400	0
5	37.5	63	-3.9	1049	349	0
6	39.1	50.3	-3.3	1049	349	0
7	38.6	40.5	-2.2	1049	349	0
8	32.1	40	-6.1	1049	400	0

	Injection quantity M1	Injection quantity M2	Injection quantity P1	Injection quantity P2	Injection quantity, total	Injection duration P1
Mode	mg	mg	mg	mg	mg	µs
1	89.7	0.1	0.05	0	89.9	0
2	69.2	0.1	0.05	0	69.4	0
3	47.2	0.1	2.5	0	49.8	294
4	15	0.1	3.5	0	18.6	350
5	126.5	0.1	2.5	0	129.1	306
6	91.5	2.1	2.5	0	96.1	351
7	57	4.5	3	0	64.5	405
8	2	2.5	3.5	0	8	427

	Injection duration M1	Injection duration M2	Injection duration P2	FSN	NO _x	NO _x , sensor	HC
Mode	μs	μs	μs		ppm	ppm	ppm
1	1651	0	0	0.282	388	314	29.1
2	1327	0	0	0.263	262	243	36.8
3	945	0	0	0.472	206	193	56.7
4	566	0	0	0.335	82	111	127.1
5	2904	0	0	0.18	874	702	26.5
6	2349	334	0	0.253	590	494	32.4
7	1593	459	0	0.392	382	338	48.8
8	311	383	0	0.029	86	0	126.2

	CO ₂ , sensor	CO, sensor	O ₂ , Siemens	O ₂ , WDO	Cooling water in to CAC	Air temperature after charger
Mode	%	ppm	%	%	°C	°C
1	8.3	62	10.3	9.6	3.6	173.3
2	6.9	90	11.8	11.1	3.5	149.1
3	5.7	77	13.5	12.8	3.5	112.5
4	2.6	180	17.3	16.7	3.4	59.1
5	9.6	32	8.4	8.0	3.6	163.0
6	8.2	51	10.1	9.4	3.5	136.3
7	6.8	64	11.9	10.9	3.5	102.1
8	1.3	196	19.0	0	3.3	37.1

	Intake air temperature	Coolant after ECS	Coolant from engine	Exhaust gas temperature after cylinder 2	Exhaust gas temperature before charger
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	51.7	64.0	85.7	610.6	597.6
2	42.8	62.1	84.9	530.5	520.2
3	30.5	60.6	84.5	430.6	428.1
4	14.9	66.8	83.9	225.7	222.3
5	44.2	60.0	85.4	649.3	626.4
6	34.9	57.2	83.5	576.9	558.4
7	24.5	54.8	82.9	495.1	482.3
8	7.5	68.0	79.9	108.1	110.5

	Cooling water after CAC	Fresh water after ECS	Fresh water before ECS	Exhaust gas temperature after charger	Room temperature
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	32.7	28.5	6.8	454.6	35.5
2	26.4	23.0	6.0	402.5	36.8
3	18.4	17.0	5.1	342.6	35.9
4	9.3	9.4	4.0	193.0	33.1
5	28.9	26.6	6.2	493.1	34.9
6	22.6	21.1	5.5	451.2	36.6
7	15.3	15.4	4.6	404.8	36.1
8	4.8	4.5	3.4	105.0	31.8

	Charge air pressure (after CAC)	Air pressure before CAC	Exhaust gas pressure	Exhaust gas after turbo	Fuelflow	Airflow
Mode	bar	bar	bar	bar	kg/h	kg/h
1	2.4	2.4	2.4	1.0	24.7	649.8
2	2.1	2.1	2.1	1.0	18.9	554.9
3	1.7	1.7	1.8	1.0	12.9	454.2
4	1.1	1.2	1.3	1.0	4.4	308.9
5	2.3	2.4	2.1	1.0	23.5	501.8
6	1.9	2.0	1.9	1.0	17.8	432.2
7	1.6	1.6	1.6	1.0	12.2	343.6
8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	102.6

	Water vapour pressure	Intake air moisture	Dry mass flow	NO _x correction	Particle correction	Dry-wet correction
Mode	kPa	g/kg	kg/s			
1	5.3	2.3	0.000002	0.838	1.13	0.9244
2	6.6	2.1	0.005239	0.822	1.13	0.9361
3	6.4	2.0	0.003579	0.823	1.13	0.9462
4	5.5	2.0	0.001217	0.833	1.13	0.9729
5	6.4	2.0	0.006522	0.823	1.13	0.9145
6	7.0	1.7	0.004946	0.815	1.14	0.9260
7	6.8	2.1	0.003380	0.821	1.13	0.9369
8	4.8	2.1	0.000002	0.841	1.13	0.9845

	Wet exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow, sensor	PM calculated from FSN	PM calculated	Mass flow CO	Mass flow HC
Mode	kg/h	kg/h	kg/h	mg/m ³	g/kg	kg/h	kg/h
1	674.5	347.9	281.6	5.9	0.0046	37.3	9.4
2	573.8	196.2	181.9	5.4	0.0042	46.7	10.1
3	467.1	125.8	117.8	11.1	0.0086	32.9	12.7
4	313.3	34.0	46.0	7.3	0.0056	53.0	19.1
5	525.3	599.8	481.8	3.4	0.0026	14.9	6.7
6	450.0	343.5	287.6	5.2	0.0040	20.5	6.7
7	355.8	177.2	156.8	8.9	0.0068	20.6	8.3
8	102.6	11.8	0.0	0.4	0.0003	19.1	6.2

	Weighting factor	Weighted power	Weighted fuel flow	Weighted NO _x	Weighted HC	Weighted CO
Mode		kW	g/h	kg/h	kg/h	kg/h
1	0.15	13.8	3699.8	42.2	1.4	5.6
2	0.15	10.4	2834.7	27.3	1.5	7.0
3	0.15	6.9	1936.7	17.7	1.9	4.9
4	0.1	0.9	439.2	4.6	1.9	5.3
5	0.1	9.6	2352.8	48.2	0.7	1.5
6	0.1	7.2	1783.7	28.8	0.7	2.1
7	0.1	4.8	1219.4	15.7	0.8	2.1
8	0.15	0.0	0.8	0.0	0.9	2.9
Total	1	53.6	14266.9	184.4	9.9	31.3

	Weighted PM, calculated	Weighted exhaust flow	Weighted particle correction
Mode	kg/h	g/s	
1	0.52	28.1	0.169
2	0.41	23.9	0.169
3	0.68	19.5	0.170
4	0.20	8.7	0.113
5	0.16	14.6	0.113
6	0.20	12.5	0.114
7	0.27	9.9	0.113
8	0.01	4.3	0.169
Total	2.45	121.4	1.130

LIITE 3. Mittaustulokset AFME, 29.2.2012.

	Date	Speed	Torque, request	Torque, real	Power	Air pressure	Relative humidity
Mode	dd.mm.yy	rpm	Nm	Nm	kW	kPa	%
1	29.2.2012	2200	400	400.0	92.2	100.7	6
2	29.2.2012	2200	300	300.0	69.1	100.7	6
3	29.2.2012	2200	200	200.0	46.1	100.7	5
4	29.2.2012	2200	40	40.0	9.2	100.7	6
5	29.2.2012	1500	610	610.0	95.8	100.7	5
6	29.2.2012	1500	458	458.0	71.9	100.7	4
7	29.2.2012	1500	305	305	47.9	100.7	5
8	29.2.2012	850	0	1.81	0.2	100.7	7

	Air temperature	Rail pressure	Injection timing M1	Injection timing M2	Injection timing P1	Injection timing P2
Mode	°C	MPa	°CA	µs	µs	°CA
1	34.1	86.7	-4	1049	349	0
2	36.8	77.7	-3.1	1049	349	0
3	37	68.6	-3.5	1049	400	0
4	34.5	59.9	-8	1049	400	0
5	37.9	63	-3.9	1049	349	0
6	39.5	50	-3.3	1049	349	0
7	38.9	41	-2.3	1049	349	0
8	33.2	39.9	-6.1	1049	400	0

	Injection quantity M1	Injection quantity M2	Injection quantity P1	Injection quantity P2	Injection quantity, total	Injection duration P1
Mode	mg	mg	mg	mg	mg	µs
1	90.4	0.1	0.05	0	90.55	0
2	69.9	0.1	0.05	0	70.05	0
3	47	0.1	2.5	0	49.6	299
4	15.1	0.1	3.5	0	18.7	349
5	127.3	0.1	2.5	0	129.9	310
6	91.5	2.1	2.5	0	96.1	351
7	57	4.45	3.1	0	64.55	410
8	2.2	2.5	3.5	0	8.2	430

	Injection duration M1	Injection duration M2	Injection duration P2	FSN	NO _x	NO _x , sensor	HC
Mode	μs	μs	μs		ppm	ppm	ppm
1	1670	0	0	0.264	363	290	33.7
2	1359	0	0	0.232	267	224	41.5
3	940	0	0	0.433	198	183	62.0
4	570	0	0	0.285	89	108	122.1
5	2925	0	0	0.183	810.5	643	25.9
6	2349	334	0	0.255	544.5	451	34.8
7	1591	459	0	0.385	359.5	314	49.1
8	321	386	0	0.029	105.5	0	99.0

	CO ₂ , sensor	CO, sensor	O ₂ , Siemens	O ₂ , WDO	Cooling water in to CAC	Air temperature after charger
Mode	%	ppm	%	%	°C	°C
1	8.35	63	10.29	9.66	4	170
2	7.1	78.5	11.85	11.13	4	147
3	5.9	72	13.46	12.76	3	111
4	2.9	137	17.33	16.69	3	60
5	9.7	32.5	8.41	7.99	4	162
6	8.4	49	10.1	9.39	4	136
7	7	62	11.87	10.9	3	102
8	1.6	126	19	0	3	38

	Intake air temperature	Coolant after ECS	Coolant from engine	Exhaust gas temperature after cylinder 2	Exhaust gas temperature before charger
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	51	59	85	605	591
2	42	58	85	527	516
3	30	58	84	430	425
4	15	66	84	226	222
5	44	53	84	646	624
6	34	52	83	575	556
7	24	52	83	492	479
8	8	68	80	108	110

	Cooling water after CAC	Fresh water after ECS	Fresh water before ECS	Exhaust gas temperature after charger	Room temperature
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	33	17	6	449	33
2	27	15	5	400	36
3	19	11	4	341	35
4	10	7	4	193	34
5	28	16	5	491	35
6	22	13	5	450	37
7	15	10	4	403	37
8	5	4	3	107	33

	Charge air pressure (after CAC)	Air pressure before CAC	Exhaust gas pressure	Exhaust gas after turbo	Fuelflow	Airflow
Mode	bar	bar	bar	bar	kg/h	kg/h
1	2.4	2.5	2.4	1.0	24.7	653.2
2	2.1	2.1	2.1	1.0	19.0	551.3
3	1.7	1.7	1.8	1.0	13.0	456.2
4	1.1	1.2	1.3	1.0	4.5	313.1
5	2.3	2.4	2.0	1.0	23.6	505.6
6	2.0	2.0	1.8	1.0	17.9	437.3
7	1.6	1.6	1.5	1.0	12.2	348.6
8	1.0	1.0	1.1	1.0	0.0	103.8

	Water vapour pressure	Intake air moisture	Dry mass flow	NO _x correction	Particle correction	Dry-wet correction
Mode	kPa	g/kg	kg/s			
1	5.3	2.0	0.000002	0.833	1.13	0.9244
2	6.2	2.3	0.005263	0.829	1.13	0.9341
3	6.3	1.9	0.003593	0.824	1.13	0.9446
4	5.5	2.0	0.001234	0.833	1.13	0.9703
5	6.6	2.0	0.006537	0.822	1.13	0.9137
6	7.2	1.8	0.004950	0.814	1.13	0.9243
7	6.9	2.1	0.003384	0.821	1.13	0.9352
8	5.1	2.2	0.000002	0.839	1.13	0.9817

	Wet exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow, sensor	PM calculated from FSN	PM calculated	Mass flow CO	Mass flow HC
Mode	kg/h	kg/h	kg/h	mg/m ³	g/kg	kg/h	kg/h
1	677.9	260.0	260.0	5.5	0.0042	38.1	10.9
2	570.3	168.1	168.1	4.7	0.0036	40.4	11.4
3	469.2	112.3	112.3	10.0	0.0077	30.8	13.9
4	317.5	45.3	45.3	6.0	0.0046	40.8	18.6
5	529.2	444.1	444.1	3.5	0.0027	15.2	6.6
6	455.2	265.3	265.3	5.2	0.0040	19.9	7.6
7	360.8	168.9	147.6	8.7	0.0067	20.2	8.5
8	103.8	14.6	0.0	0.4	0.0003	12.4	4.9

	Weighting factor	Weighted power	Weighted fuel flow	Weighted NO _x	Weighted HC	Weighted CO
Mode		kW	g/h	kg/h	kg/h	kg/h
1	0.15	13.8	3705.9	39.0	1.6	5.7
2	0.15	10.4	2848.8	25.2	1.7	6.1
3	0.15	6.9	1944.2	16.8	2.1	4.6
4	0.1	0.9	445.1	4.5	1.9	4.1
5	0.1	9.6	2358.1	44.4	0.7	1.5
6	0.1	7.2	1785.2	26.5	0.8	2.0
7	0.1	4.8	1220.7	14.8	0.8	2.0
8	0.15	0.0	0.9	0.0	0.7	1.9
Total	1	53.6	14309.0	171.3	10.3	27.9

	Weighted PM, calculated	Weighted exhaust flow	Weighted particle correction
Mode	kg/h	g/s	
1	0.49	28.2	0.170
2	0.35	23.8	0.169
3	0.62	19.6	0.170
4	0.17	8.8	0.113
5	0.16	14.7	0.113
6	0.21	12.6	0.113
7	0.27	10.0	0.113
8	0.01	4.3	0.169
Total	2.26	122.1	1.130

LIITE 4. Mittaustulokset HVO, 12.4.2012.

	Date	Speed	Torque, request	Torque, real	Power	Air pressure	Relative humidity
Mode	dd.mm.yy	rpm	Nm	Nm	kW	kPa	%
1	12.4.2012	2200	400	400.0	92.1	100.3	5
2	12.4.2012	2200	300	300.0	69.1	100.3	5
3	12.4.2012	2200	200	200.0	46.1	100.3	5
4	12.4.2012	2200	40	40.0	9.2	100.3	7
5	12.4.2012	1500	610	610.0	95.8	100.3	4
6	12.4.2012	1500	458	458.0	71.9	100.3	4
7	12.4.2012	1500	305	305.0	47.9	100.3	5
8	12.4.2012	850	0	1.8	0.1	100.3	7

	Air temperature	Rail pressure	Injection timing M1	Injection timing M2	Injection timing P1	Injection timing P2
Mode	°C	MPa	°CA	µs	µs	°CA
1	37.4	83.3	-4	1049	349	0
2	37.9	74.9	-3	1049	349	0
3	37.3	65.8	-3.5	1049	400	0
4	33.5	59.6	-8	1049	400	0
5	39.3	61.6	-2	1049	349	0
6	40.7	46.5	-2.1	1049	349	0
7	39.0	40.0	-1.9	1049	349	0
8	32.6	40.2	-6.1	1049	400	0

	Injection quantity M1	Injection quantity M2	Injection quantity P1	Injection quantity P2	Injection quantity, total	Injection duration P1
Mode	mg	mg	mg	mg	mg	µs
1	83.1	0.1	0.05	0	83.25	0
2	63.5	0.1	0.05	0	63.65	0
3	41.0	0.1	2.5	0	43.6	303
4	11.4	0.1	3.5	0	15.0	349
5	114.4	0.5	2.5	0	117.4	312
6	83.2	2.1	2.5	0	87.8	363
7	47.2	6.1	3.2	0	56.5	417
8	1.9	2.4	3.5	0	7.8	435

	Injection duration M1	Injection duration M2	Injection duration P2	FSN	NO _x	NO _x , sensor	HC
Mode	μs	μs	μs		ppm	ppm	ppm
1	1565	0	0	0.601	305,5	256	33.0
2	1231	0	0	0.561	216.5	196	38.7
3	885	0	0	1.01	163.0	162	54.3
4	523	0	0	0.392	94.0	115	125.2
5	2647	199	0	0.366	648.0	530	27.6
6	2205	346	0	0.577	404.5	362	34.0
7	1334	525	0	0.737	300.5	286	46.9
8	285	381	0	0.042	105.0	0	125.3

	CO ₂ , sensor	CO, sensor	O ₂ , Siemens	O ₂ , WDO	Cooling water in to CAC	Air tempertaure after charger
Mode	%	ppm	%	%	°C	°C
1	8.8	64.5	10.0	9.4	4	174.0
2	7.3	76.5	11.7	11.0	4	151.0
3	6.0	79.5	13.4	12.6	4	114.0
4	3.0	84.5	17.3	16.6	4	59.0
5	10.2	40.0	8.2	7.9	4	167.0
6	8.7	57.5	9.9	9.3	4	142.0
7	7.0	56.5	11.9	10.9	4	104.0
8	1.7	49.5	18.9	0	4	38.0

	Intake air temperature	Coolant after ECS	Coolant from engine	Exhaust gas temperature after cylinder 2	Exhaust gas temperature before charger
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	50.0	64.0	86.0	621.6	608.1
2	43.0	62.0	85.0	541.3	529.9
3	31.0	60.0	85.0	442.3	439.6
4	15.0	67.0	84.0	226.2	224.0
5	43.0	58.0	85.0	668.0	642.7
6	35.0	56.0	83.0	597.3	575.9
7	24.0	54.0	83.0	500.8	488.5
8	8.0	68.0	80.0	108.7	111.6

	Cooling water after CAC	Fresh water after ECS	Fresh water before ECS	Exhaust gas temperature after charger	Room temperature
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	33.0	27.3	7.5	462.5	34.5
2	26.9	22.3	6.8	408.5	36.2
3	18.7	16.7	5.8	348.8	36.0
4	9.7	9.7	4.6	194.6	33.8
5	27.3	23.9	6.8	504.3	35.4
6	21.9	19.3	6.1	462.4	37.8
7	14.7	14.1	5.2	409.2	37.0
8	5.2	4.9	4.1	105.3	33.4

	Charge air pressure (after CAC)	Air pressure before CAC	Exhaust gas pressure	Exhaust gas after turbo	Fuelflow	Airflow
Mode	bar	bar	bar	bar	kg/h	kg/h
1	2.4	2.4	2.4	1.0	21.3	643,8
2	2.1	2.1	2.1	1.0	16.3	560,6
3	1.7	1.7	1.8	1.0	11.1	462,5
4	1.1	1.1	1.3	1.0	3.8	309,7
5	2.4	2.4	2.2	1.0	20.5	514,0
6	2.0	2.1	1.9	1.0	15.6	443,4
7	1.6	1.6	1.5	1.0	10.4	349,3
8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	102,8

	Water vapour pressure	Intake air moisture	Dry mass flow	NO _x correction	Particle correction	Dry-wet correction
Mode	kPa	g/kg	kg/s			
1	6.4	1.989	0.000002	0.823	1.13	0.9212
2	6.6	2.044	0.004528	0.823	1.13	0.9329
3	6.4	1.979	0.003076	0.824	1.13	0.9437
4	5.2	2.247	0.001041	0.839	1.13	0.9691
5	7.1	1.763	0.005672	0.815	1.14	0.9101
6	7.6	1.900	0.004320	0.812	1.13	0.9218
7	7.0	2.170	0.002886	0.821	1.13	0.9352
8	4.9	2.136	0.000000	0.840	1.13	0.9814

	Wet exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow, sensor	PM calculated from FSN	PM calculated	Mass flow CO	Mass flow HC
Mode	kg/h	kg/h	kg/h	mg/m ³	g/kg	kg/h	kg/h
1	665.1	265.5	222.5	15.0	0.0116	38.2	10.5
2	576.9	163.0	147.6	13.8	0.0106	39.8	10.7
3	473.6	100.9	100.3	28.6	0.0221	34.3	12.3
4	313.4	39.2	48.0	8.9	0.0068	24.8	18.8
5	534.4	447.8	366.3	8.1	0.0063	18.8	7.1
6	459.0	239.4	214.2	14.2	0.0110	23.5	7.5
7	359.8	140.8	134.0	19.3	0.0149	18.4	8.1
8	102.8	14.4	0.0	0.6	0.0005	4.8	6.2

	Weighting factor	Weighted power	Weighted fuel flow	Weighted NO _x	Weighted HC	Weighted CO
Mode		kW	g/h	kg/h	kg/h	kg/h
1	0.15	13.8	3194.7	33.4	1.6	5.7
2	0.15	10.4	2450.3	22.1	1.6	6.0
3	0.15	6.9	1664.1	15.0	1.8	5.1
4	0.1	0.9	375.6	4.8	1.9	2.5
5	0.1	9.6	2045.6	36.6	0.7	1.9
6	0.1	7.2	1558.2	21.4	0.7	2.4
7	0.1	4.8	1041.3	13.4	0.8	1.8
8	0.15	0.0	0.2	0.0	0.9	0.7
Total	1	53.6	12330.0	146.8	10.1	26.1

	Weighted PM, calculated	Weighted exhaust flow	Weighted particle correction
Mode	kg/h	g/s	
1	1.3	27.7	0.170
2	1.0	24.0	0.170
3	1.8	19.7	0.170
4	0.2	8.7	0.113
5	0.4	14.9	0.114
6	0.6	12.8	0.113
7	0.6	1.0	0.113
8	0.0	4.3	0.169
Total	5.9	122.1	1.131

LIITE 5. Mittaustulokset DFO, 8-hole LF, 25.4.2012.

	Date	Speed	Torque, request	Torque, real	Power	Air pressure	Relative humidity
Mode	dd.mm.yy	rpm	Nm	Nm	kW	kPa	%
1	25.4.2012	2200	400	400.0	92.2	101.2	5
2	25.4.2012	2200	300	300.0	69.1	101.2	4
3	25.4.2012	2200	200	200.0	46.1	101.2	5
4	25.4.2012	2200	40	40.00	9.2	101.2	6
5	25.4.2012	1500	610	610.0	95.8	101.2	4
6	25.4.2012	1500	458	458.0	71.9	101.2	4
7	25.4.2012	1500	305	305.0	47.9	101.2	4
8	25.4.2012	850	0	1.83	0.2	101.2	7

	Air temperature	Rail pressure	Injection timing M1	Injection timing M2	Injection timing P1	Injection timing P2
Mode	°C	MPa	°CA	µs	µs	°CA
1	38.9	84.7	-4	1049	349	0
2	40.5	74.4	-3	1049	349	0
3	38.5	63.9	-4.2	1049	400	0
4	34.1	59.8	-8	1049	400	0
5	41.2	62.7	-3.8	1049	349	0
6	41.7	48.8	-2.8	1049	349	0
7	39.9	39.9	-2	1049	349	0
8	32.8	40.2	-6.1	1049	400	0

	Injection quantity M1	Injection quantity M2	Injection quantity P1	Injection quantity P2	Injection quantity total	Injection duration P1
Mode	mg	mg	mg	mg	mg	µs
1	84.7	0.1	0.05	0	84.9	0
2	62.5	0.1	0.05	0	62.7	0
3	35.9	0.1	2.5	0	38.5	355
4	10.4	0.1	3.5	0	14.0	371
5	126.3	0.1	2.4	0	128.8	355
6	88.8	2.1	2.5	0	93.4	389
7	49.9	6.1	3.2	0	59.2	432
8	0.2	1.7	3.5	0	5.4	437

	Injection duration M1	Injection duration M2	Injection duration P2	FSN	NO _x	NO _x , sensor	HC
Mode	μs	μs	μs		ppm	ppm	ppm
1	2126	0	0	0.864	295.5	254	0
2	1625	0	0	0.667	205	200	41.5
3	917	0	0	0.832	206	208	57.0
4	449	0	0	0.219	152	178	90.1
5	3743	0	0	1.219	673.5	564	19.0
6	2929	406	0	0.63	439	400	25.4
7	1727	621	0	0.537	310	300	49.5
8	0	412	0	0.028	137.5	0	87.9

	CO ₂ , sensor	CO, sensor	O ₂ , Siemens	O ₂ , WDO	Cooling water in to CAC	Air temperature after charger
Mode	%	ppm	%	%	°C	°C
1	9	108.5	9.6	9.2	5	178
2	7.5	116	11.4	10.8	5	154
3	6.1	69	13.3	12.6	5	108
4	2.85	150	17.3	16.7	5	59
5	10.5	84.5	7.7	7.5	5	170
6	9	53.5	9.6	9.1	5	143
7	7.25	56.5	11.6	10.7	5	104
8	1.6	99.5	19.0	0	5	39

	Intake air temperature	Coolant after ECS	Coolant from engine	Exhaust gas temperature after cylinder 2	Exhaust gas temperature before charger
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	50.8	62.2	85.5	645.6	630.1
2	42.5	60.9	85.0	550.8	538.3
3	28.0	60.4	84.4	429.2	421.8
4	15.3	67.0	83.9	217.6	211.9
5	43.5	57.7	85.3	687.2	661.8
6	34.8	55.1	83.5	604.6	582.5
7	23.8	53.3	82.7	505.6	492.5
8	8.8	67.6	79.9	107.2	108.6

	Cooling water after CAC	Fresh water after ECS	Fresh water before ECS	Exhaust gas temperature after charger	Room temperature
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	32.5	24.9	7.8	479.4	36.1
2	26.2	20.6	7.2	416.8	39.6
3	17.3	14.7	6.1	340.8	37.7
4	9.8	9.2	5.2	184.3	35.1
5	28.2	23.0	7.3	519.1	37.6
6	22.1	18.4	6.7	468.6	39.6
7	14.9	13.5	5.8	414.4	38.6
8	6.0	5.6	4.7	105.1	34.2

	Charge air pressure (after CAC)	Air pressure before CAC	Exhaust gas pressure	Exhaust gas after turbo	Fuel flow	Air flow
Mode	bar	bar	bar	bar	kg/h	kg/h
1	2.4	2.5	2.6	1.0	22.6	658.5
2	2.1	2.1	2.2	1.0	17.0	554.9
3	1.6	1.6	1.8	1.0	11.0	433.1
4	1.1	1.1	1.3	1.0	3.7	301.5
5	2.4	2.4	2.2	1.0	21.5	521.9
6	2.0	2.1	1.9	1.0	16.1	448.6
7	1.6	1.6	1.6	1.0	10.7	350.9
8	1.0	1.0	1.1	1.0	0.0	104.7

	Water vapour pressure	Intake air moisture	Dry mass flow	NO _x correction	Particle correction	Dry-wet correction
Mode	kPa	g/kg	kg/s			
1	6.9	2.1	0.000002	0.821	1.13	0.9190
2	7.6	1.9	0.004706	0.812	1.13	0.9314
3	6.8	2.1	0.003042	0.821	1.13	0.9427
4	5.3	2.0	0.001025	0.833	1.13	0.9708
5	7.8	1.9	0.005972	0.811	1.13	0.9075
6	8.0	2.0	0.004467	0.810	1.13	0.9193
7	7.3	1.8	0.002979	0.814	1.13	0.9336
8	5.0	2.1	0.000000	0.840	1.13	0.9818

	Wet exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow. sensor	PM calculated from FSN	PM calculated	Mass flow CO	Mass flow HC
Mode	kg/h	kg/h	kg/h	mg/m ³	g/kg	kg/h	kg/h
1	681.0	262.1	225.3	23.5	0.0182	65.6	0.0
2	571.9	151.2	147.5	17.0	0.0132	59.7	11.4
3	444.0	119.2	120.4	22.4	0.0173	27.9	12.1
4	305.2	61.4	71.8	4.4	0.0034	42.9	13.2
5	543.4	471.2	394.6	36.3	0.0281	40.3	5.0
6	464.7	262.4	239.1	15.9	0.0123	22.1	5.7
7	361.6	144.7	140.1	13.0	0.0101	18.4	8.6
8	104.7	19.2	0.0	0.4	0.0003	9.9	4.4

	Weighting factor	Weighted power	Weighted fuel flow	Weighted NO _x	Weighted HC	Weighted CO
Mode		kW	g/h	kg/h	kg/h	kg/h
1	0.15	13.8	3387.7	33.8	0.0	9.8
2	0.15	10.4	2545.7	22.1	1.7	9.0
3	0.15	6.9	1645.8	18.1	1.8	4.2
4	0.1	0.9	369.7	7.2	1.3	4.3
5	0.1	9.6	2154.0	39.5	0.5	4.0
6	0.1	7.2	1611.4	23.9	0.6	2.2
7	0.1	4.8	1074.3	14.0	0.9	1.8
8	0.15	0.0	0.1	0.0	0.7	1.5
Total	1	53.6	12788.8	158.5	7.4	36.8

	Weighted PM. calculated	Weighted exhaust flow	Weighted particle correction
Mode	kg/h	g/s	
1	2.1	28.4	0.169
2	1.3	23.8	0.170
3	1.3	783.0	0.169
4	0.1	8.5	0.113
5	1.7	15.1	0.113
6	0.7	12.9	0.113
7	0.4	10.1	0.113
8	0.0	4.4	0.169
Total	7.6	886.1	1.131

LIITE 6. Mittaustulokset DFO, 10-hole HF, 2.5.2012.

	Date	Speed	Torque, request	Torque, real	Power	Air pressure	Relative humidity
Mode	dd.mm.yy	rpm	Nm	Nm	kW	kPa	%
1	2.5.2012	2200	400	400.0	92.2	101.3	6
2	2.5.2012	2200	300	300.0	69.1	101.3	5
3	2.5.2012	2200	200	200.0	46.1	101.3	5
4	5.5.2012	2200	40	40.00	9.2	101.3	6
5	5.5.2012	1500	610	610.0	95.8	101.3	4
6	2.5.2012	1500	458	458.0	71.9	101.3	3
7	2.5.2012	1500	305	305.0	47.9	101.3	4
8	2.5.2012	850	0	1.83	0.2	101.3	7

	Air temperature	Rail pressure	Injection timing M1	Injection timing M2	Injection timing P1	Injection timing P2
Mode	°C	MPa	°CA	µs	µs	°CA
1	34.4	84.9	-4	1049	349	0
2	38.8	76	-3	1049	349	0
3	37.7	66.3	-3.5	1049	400	0
4	34.3	59.8	-8	1049	400	0
5	40.4	62.6	-2.4	1049	349	0
6	42	47.3	-2.3	1049	349	0
7	40.2	40.1	-2.1	1049	349	0
8	32	39.9	-6	1049	400	0

	Injection quantity M1	Injection quantity M2	Injection quantity P1	Injection quantity P2	Injection quantity total	Injection duration P1
Mode	mg	mg	mg	mg	mg	µs
1	85.6	0.1	0	0	85.7	0
2	65.9	0.1	0.05	0	66.1	0
3	41.6	0.1	2.5	0	44.2	302
4	11.5	0.1	3.5	0	15.1	348
5	118.9	0.1	2.5	0	121.5	309
6	85.9	2.1	2.5	0	90.5	355
7	52.3	5.7	2.5	0	60.5	386
8	2.1	2.5	3.5	0	8.1	430

	Injection duration M1	Injection duration M2	Injection duration P2	FSN	NO _x	NO _x sensor	HC
Mode	μs	μs	μs		ppm	ppm	ppm
1	1589	0	0	1.16	307.5	254.0	15.7
2	1259	0	0	1.16	217.5	198.0	22.1
3	886	0	0	1.60	168.0	168.0	37.5
4	500	0	0	0.62	101.0	118.0	104.3
5	2681	0	0	1.08	597.0	507.0	13.8
6	2289	343	0	1.23	394.5	351.0	19.6
7	1469	513	0	1.29	281.5	269.0	33.2
8	307	381	0	0.23	108.5	0.0	100.0

	CO ₂ sensor	CO sensor	O ₂ , Siemens	O ₂ , WDO	Cooling water in to CAC	Air temperature after charger
Mode	%	ppm	%	%	°C	°C
1	9.0	69.5	9.8	9.3	5.8	175.0
2	7.6	66	11.5	11.0	5.8	154.7
3	6	73.5	13.3	12.6	5.9	115.9
4	3.0	84.5	17.3	16.6	5.8	59.3
5	10.5	87	7.9	7.5	5.9	171.4
6	9.1	87.5	9.6	9.1	5.9	148.5
7	7.4	79.5	11.5	10.8	5.9	109.2
8	1.6	58	18.9	0	5.8	38.5

	Intake air temperature	Coolant after ECS	Coolant from engine	Exhaust gas temperature after cylinder 2	Exhaust gas temperature before charger
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	50.3	64.0	85.5	649.4	632.1
2	42.7	62.5	84.8	566.6	551.5
3	30.6	61.4	84.5	457.4	450.4
4	15.9	67.0	83.8	229.8	228.1
5	43.6	59.7	85.2	704.7	675.0
6	36.3	57.1	83.4	631.1	603.9
7	25.5	54.8	82.7	530.0	510.8
8	9.4	67.6	79.8	111.9	114.5

	Cooling water after CAC	Fresh water after ECS	Fresh water before ECS	Exhaust gas temperature after charger	Room temperature
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	30.9	29.3	10.1	479.7	32.7
2	26.2	24.9	9.3	425.8	37.9
3	18.7	18.8	8.0	360.9	37.6
4	10.4	11.4	6.5	199.1	34.4
5	27.4	27.2	9.7	527.5	37.3
6	22.7	22.6	8.7	482.4	39.8
7	15.8	17.0	7.6	428.3	38.9
8	6.8	6.8	5.9	110.1	33.5

	Charge air pressure (after CAC)	Air pressure before CAC	Exhaust gas pressure	Exhaust gas after turbo	Fuel flow	Air flow
Mode	bar	bar	bar	bar	kg/h	kg/h
1	2.4	2.5	2.6	1.0	22.2	648.3
2	2.1	2.2	2.2	1.0	17.0	555.6
3	1.7	1.7	1.8	1.0	11.4	450.7
4	1.1	1.2	1.3	1.0	3.8	302.3
5	2.4	2.5	2.1	1.0	21.4	526.2
6	2.1	2.1	1.9	1.0	16.3	462.8
7	1.6	1.7	1.6	1.0	11.0	364.4
8	1.0	1.0	1.1	1.0	0.0	104.2

	Water vapour pressure	Intake air moisture	Dry mass flow	NO _x correction	Particle correction	Dry-wet correction
Mode	kPa	g/kg	kg/s			
1	5.4	2.0	0.000002	0.833	1.13	0.9196
2	6.9	2.1	0.004701	0.821	1.13	0.9307
3	6.5	2.0	0.003167	0.823	1.13	0.9437
4	5.4	2.0	0.001057	0.833	1.13	0.9699
5	7.5	1.9	0.005921	0.813	1.13	0.9080
6	8.2	1.5	0.004528	0.804	1.14	0.9191
7	7.4	1.8	0.003040	0.813	1.13	0.9327
8	4.7	2.0	0.000001	0.841	1.13	0.9820

	Wet exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow. sensor	PM calculated from FSN	PM calculated	Mass flow CO	Mass flow HC
Mode	kg/h	kg/h	kg/h	mg/m ³	g/kg	kg/h	kg/h
1	670.5	272.5	225.1	34.2	0.0265	41.4	5.1
2	572.5	162.2	147.7	34.0	0.0263	34.0	6.1
3	462.2	101.4	101.4	51.4	0.0397	31.0	8.3
4	306.1	40.9	47.7	15.6	0.0121	24.2	15.3
5	547.5	421.6	358.0	31.0	0.0240	41.8	3.6
6	479.1	241.1	214.5	36.8	0.0284	37.2	4.5
7	375.4	136.3	130.3	39.1	0.0303	26.9	6.0
8	104.2	15.1	0.0	4.6	0.0036	5.7	5.0

	Weighting factor	Weighted power	Weighted fuel flow	Weighted NO _x	Weighted HC	Weighted CO
Mode		kW	g/h	kg/h	kg/h	kg/h
1	0.15	13.8	3329.7	33.8	0.8	6.2
2	0.15	10.4	2544.1	22.1	0.9	5.1
3	0.15	6.9	1713.4	15.2	1.2	4.6
4	0.1	0.9	381.3	4.8	1.5	2.4
5	0.1	9.6	2135.5	35.8	0.4	4.2
6	0.1	7.2	1632.7	21.5	0.4	3.7
7	0.1	4.8	1096.3	13.0	0.6	2.7
8	0.15	0.0	0.5	0.0	0.7	0.9
Total	1	53.6	12833.5	146.2	6.6	29.8

	Weighted PM. calculated	Weighted exhaust flow	Weighted particle correction
Mode	kg/h	g/s	
1	3.0	27.9	0.170
2	2.6	23.9	0.169
3	3.1	783.0	0.170
4	0.4	8.5	0.113
5	1.5	15.2	0.113
6	1.6	13.3	0.114
7	1.3	10.4	0.113
8	0.1	4.3	0.170
Total	13.5	886.6	1.132

LIITE 7. Mittaustulokset DFO, 6-hole HF, 8.5.2012.

	Date	Speed	Torque, request	Torque, real	Power	Air pressure	Relative humidity
Mode	dd.mm.yy	rpm	Nm	Nm	kW	kPa	%
1	8.5.2012	2200	400	400.0	92.2	101.7	5
2	8.5.2012	2200	300	300.0	69.1	101.7	4
3	8.5.2012	2200	200	200.0	46.1	101.7	5
4	8.5.2012	2200	40	40.00	9.2	101.7	6
5	8.5.2012	1500	610	610.0	95.8	101.7	4
6	8.5.2012	1500	458	458.0	71.9	101.7	3
7	8.5.2012	1500	305	305.0	47.9	101.7	4
8	8.5.2012	850	0	1.7	0.2	101.7	7
25 %	8.5.2012	1500	152	152.0	38.1	101.7	8

	Air temperature	Rail pressure	Injection timing M1	Injection timing M2	Injection timing P1	Injection timing P2
Mode	°C	MPa	°CA	µs	µs	°CA
1	38.2	85.2	-4	1049	349	0
2	40.2	76.6	-3	1049	349	0
3	38.6	67	-3.5	1049	400	0
4	35.5	59.8	-8	1049	400	0
5	41.5	62.9	-2.4	1049	349	0
6	42.4	47.2	-2.3	1049	349	0
7	40.5	40.4	-2.1	1049	349	0
8	32.4	40.4	-6	1049	400	0
25 %	31.8	40	-4.5	1049	381.5	0

	Injection quantity M1	Injection quantity M2	Injection quantity P1	Injection quantity P2	Injection quantity total	Injection duration P1
Mode	mg	mg	mg	mg	mg	µs
1	86.1	0.1	0.05	0	86.25	0
2	67	0.1	0.05	0	67.15	0
3	43.8	0.1	2.5	0	46.4	302
4	12.5	0.1	3.5	0	16.1	349
5	118.9	0.1	2.5	0	121.5	310
6	85.9	2.1	2.5	0	90.5	354
7	53.7	5.4	2.6	0	61.7	389
8	2.1	2.45	3.5	0	8.05	431
25 %	24.2	6.1	3.5	0	33.8	431

	Injection duration M1	Injection duration M2	Injection duration P2	FSN	NO _x	NO _x , sensor	HC
Mode	μs	μs	μs		ppm	ppm	ppm
1	1593	0	0	1.2	306.0	258	21.7
2	1281	0	0	1.4	207.5	193	33.0
3	909	0	0	2.0	158.5	158	47.6
4	525	0	0	0.9	87.5	111	104.7
5	2717	0	0	0.9	705.0	562	19.7
6	2274	342	0	1.2	440.0	377	26.9
7	1489	499	0	1.6	281.5	261	43.1
8	322	387	0	0.2	108.0	0	93.3
25 %	906	527	0	2.2	209.0	191	76.4

	CO ₂ , sensor	CO, sensor	O ₂ , Siemens	O ₂ , WDO	Cooling water in to CAC	Air temperature after charger
Mode	%	ppm	%	%	°C	°C
1	8.7	43.0	9.9	9.2	7.0	175.1
2	7.4	81.5	11.5	10.7	7.0	154.8
3	6.1	69.0	13.2	12.4	7.0	116.8
4	2.9	107.5	17.3	16.6	7.0	60.3
5	10.3	22.5	8.0	7.5	7.1	168.1
6	8.9	44.0	9.6	9.0	7.1	143.5
7	7.2	59.0	11.6	10.7	7.1	106.6
8	1.6	34.0	18.9	0	7.0	38.4
25 %	5.6	72.5	14.0	13.5	7.4	63.8

	Intake air temperature	Coolant after ECS	Coolant from engine	Exhaust gas temperature after cylinder 2	Exhaust gas temperature before charger
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	50.6	62.8	85.6	632.8	620.0
2	43.2	61.5	84.9	555.4	545.1
3	31.5	60.0	84.5	457.3	449.7
4	17.0	66.7	83.8	232.7	226.5
5	43.2	58.5	85.4	683.1	657.9
6	35.6	55.9	83.5	612.1	590.3
7	25.6	53.9	82.8	517.8	504.3
8	10.4	67.8	79.7	111.6	113.6
25 %	15.8	57.7	82.4	371.4	363.3

	Cooling water after CAC	Fresh water after ECS	Fresh water before ECS	Exhaust gas temperature after charger	Room temperature
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
1	31.7	26.9	9.9	472.7	35.4
2	27.0	23.0	9.3	422.8	39.5
3	19.8	17.9	8.4	361.1	38.8
4	11.7	11.6	7.5	197.7	35.4
5	28.0	25.1	9.6	517.3	37.7
6	22.9	21.0	8.9	476.2	39.9
7	16.6	16.3	8.1	423.6	38.9
8	8.0	7.8	7.0	107.4	33.5
25 %	11.1	12.7	7.8	316.2	32.8

	Charge air pressure (after CAC)	Air pressure before CAC	Exhaust gas pressure	Exhaust gas after turbo	Fuelflow	Airflow
Mode	bar	bar	bar	bar	kg/h	kg/h
1	2.4	2.5	2.5	1.0	22.3	649.7
2	2.1	2.2	2.2	1.0	17.3	564.3
3	1.7	1.7	1.8	1.0	11.7	451.1
4	1.1	1.2	1.3	1.0	3.9	304.1
5	2.3	2.4	2.2	1.0	21.3	508.6
6	2.0	2.1	1.9	1.0	16.3	436.8
7	1.6	1.6	1.6	1.0	11.1	345.6
8	1.0	1.0	1.1	1.0	0.0	103.2
25 %	1.2	1.3	1.3	1.0	-	249.5

	Water vapour pressure	Intake air moisture	Dry mass flow	NO _x correction	Particle correction	Dry-wet correction
Mode	kPa	g/kg	kg/s			
1	6.7	2.0	0.000002	0.822	1.13	0.9220
2	7.4	1.8	0.004793	0.813	1.13	0.9323
3	6.8	2.1	0.003246	0.821	1.13	0.9427
4	5.8	2.1	0.001072	0.831	1.13	0.9702
5	8.0	2.0	0.005907	0.811	1.13	0.9091
6	8.4	1.5	0.004526	0.803	1.14	0.9207
7	7.6	1.9	0.003069	0.812	1.13	0.9340
8	4.9	2.1	0.000000	0.840	1.13	0.9824
25 %	4.7	2.3	-0.017320	0.845	1.13	0.9466

	Wet exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow. sensor	PM calculated from FSN	PM calculated	Mass flow CO	Mass flow HC
Mode	kg/h	kg/h	kg/h	mg/m ³	g/kg	kg/h	kg/h
1	672.0	268.1	226.1	35.6	0.0275	25.7	7.0
2	581.6	155.7	144.8	42.2	0.0326	42.7	9.2
3	462.8	95.6	95.3	67.1	0.0519	29.1	10.6
4	308.0	35.5	45.1	24.2	0.0187	31.0	15.5
5	529.9	480.6	383.1	25.2	0.0195	10.5	5.0
6	453.1	254.1	217.7	35.2	0.0272	17.7	5.8
7	356.7	129.5	120.0	52.2	0.0403	19.0	7.4
8	103.2	14.9	0.0	4.6	0.0036	3.3	4.6
25 %	187.0	52.4	47.9	80.2	0.0620	12.4	6.8

	Weighting factor	Weighted power	Weighted fuel flow	Weighted NO _x	Weighted HC	Weighted CO
Mode		kW	g/h	kg/h	kg/h	kg/h
1	0.15	13.8	3346.7	33.9	1.0	3.9
2	0.15	10.4	2592.9	21.7	1.4	6.4
3	0.15	6.9	1756.4	14.3	1.6	4.4
4	0.1	0.9	386.6	4.5	1.5	3.1
5	0.1	9.6	2130.6	38.3	0.5	1.0
6	0.1	7.2	1631.7	21.8	0.6	1.8
7	0.1	4.8	1107.0	12.0	0.7	1.9
8	0.15	0.0	0.1	0.0	0.7	0.5
Total	1	53.6	12952.1	146.5	8.1	22.9

	Weighted PM. calculated	Weighted exhaust flow	Weighted particle correction
Mode	kg/h	g/s	
1	3.1	28.0	0.170
2	3.2	24.2	0.170
3	4.1	783.0	0.169
4	0.7	8.6	0.113
5	1.2	14.7	0.113
6	1.4	12.6	0.114
7	1.6	9.9	0.113
8	0.1	4.3	0.169
Total	15.4	885.3	1.131

LIITE 8. Mittaustulokset FISHOIL, 6-hole HF, 9.5.2012.

	Date	Speed	Torque. request	Torque. real	Power	Air pressure	Relative humidity
Mode	dd.mm.yy	rpm	Nm	Nm	kW	kPa	%
4	9.5.2012	2200	40	40.0	9.2	101.7	9
7	9.5.2012	1500	305	292	45.8	101.7	8
8	9.5.2012	850	0	2.8	0.2	101.7	9
25 %	9.5.2012	1500	152	152	23.9	101.7	8

	Air temperature	Rail pressure	Injection timing M1	Injection timing M2	Injection timing P1	Injection timing P2
Mode	°C	MPa	°CA	µs	µs	°CA
4	28.1	59.8	-8	1049	400	0
7	31	42.3	-2.5	1049	349	0
8	28.4	40	-6.1	1049	400	0
25 %	31.2	40	-4.4	1049	349	0

	Injection quantity M1	Injection quantity M2	Injection quantity P1	Injection quantity P2	Injection quantity. total	Injection duration P1
Mode	mg	mg	mg	mg	mg	µs
4	15.2	0.1	3.5	0	18.8	349
7	62.8	2.35	3.5	0	68.7	420
8	3.3	2.95	3.5	0	9.8	430
25 %	33	6.1	3.5	0	42.6	431

	Injection duration M1	Injection duration M2	Injection duration P2	FSN	NO _x	NO _x . sensor	HC
Mode	µs	µs	µs		ppm	ppm	ppm
4	573	0	0	0.691	45	89	325.6
7	1727	381	0	1.223	294	259	55.7
8	372	404	0	0.087	54	0	137.3
25 %	1065	527	0	1.378	184	178	90.4

	CO ₂ . sensor	CO. sensor	O ₂ . Siemens	O ₂ . WDO	Cooling water in to CAC	Air temperature after charger
Mode	%	ppm	%	%	°C	°C
4	2.9	727.5	17.2	16.5	7	57
7	6.9	143.5	12.2	11.1	7	96
8	1.6	424.5	18.9	0	7	36
25 %	5.6	234	13.9	13.4	7	64

	Intake air temperature	Coolant after ECS	Coolant from engine	Exhaust gas temperature after cylinder 2	Exhaust gas temperature before charger
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
4	15	66	84	234	228
7	23	55	83	489	477
8	10	67	80	109	112
25 %	16	57	83	367	358

	Cooling water after CAC	Fresh water after ECS	Fresh water before ECS	Exhaust gas temperature after charger	Room temperature
Mode	°C	°C	°C	°C	°C
4	10	12	8	198	31
7	14	15	8	400	32
8	8	8	7	107	30
25 %	11	12	8	313	33

	Charge air pressure (after CAC)	Air pressure before CAC	Exhaust gas pressure	Exhaust gas after turbo	Fuel flow	Air flow
Mode	bar	bar	bar	bar	kg/h	kg/h
4	1.14	1.16	1.35	1.03	0.01	308
7	1.58	1.61	1.59	1.03	0.01	338
8	1.01	1.01	1.08	1.03	-	103
25 %	1.23	1.24	1.32	1.03	0.01	248

	Water vapour pressure	Intake air moisture	Dry mass flow	NO _x correction	Particle correction	Dry-wet correction
Mode	kPa	g/kg	kg/s			
4	3.8	2.1	-	0.854	1.13	0.9697
7	4.5	2.2	-	0.846	1.13	0.9359
8	3.9	2.1	-	0.854	1.13	0.9815
25 %	4.5	2.2	-	0.846	1.13	0.9466

	Wet exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow	NO _x exhaust mass flow. sensor	PM calculated from FSN	PM calculated	Mass flow CO	Mass flow HC
Mode	kg/h	kg/h	kg/h	mg/m ³	g/kg	kg/h	kg/h
4	308.0	18.8	37.2	17.8	0.0138	209.9	48.0
7	337.7	133.3	117.5	36.4	0.0282	43.8	9.0
8	61.5	4.5	0	1.4	0.0011	24.8	4.0
25 %	247.7	61.2	59.2	42.4	0.0328	53.0	10.7

	Weighting factor	Weighted power	Weighted fuel flow	Weighted NO_x	Weighted HC	Weighted CO
Mode		kW	g/h	kg/h	kg/h	kg/h
4	0.1	0.9	0.8	3.7	4.8	21.0
7	0.1	4.6	0.7	11.7	0.9	4.4
8	0.15	0	-	0	0.6	3.7

	Weighted PM. calculated	Weighted exhaust flow	Weighted particle correction
Mode	kg/h	g/s	
4	0.48	8.6	0.113
7	1.07	9.4	0.113
8	0.01	2.6	0.169

LIITE 9. Tulostiedote polttoaineista AFME. DFO. FISH ja FISHOIL.

NESTE OIL**Tulostiedote**

TS-12-000707

1 (1)

15.2.2012

Aihe

Biodieseltulokset

Näytteet

Nimike	Kohde	Näytteenottoaika	Näytteenottoaika	Näytetunnus
1. BIODIESEL kaladiesel Vaasan yliopisto	ASIAKK		07.02.2012	02801943
2. BIODIESEL FME diesel Vaasan yliopisto	ASIAKK		07.02.2012	02801944
3. BIODIESEL Kalaöljy Vaasan yliopisto	ASIAKK		07.02.2012	02801945
4. BIODIESEL Moottoripolttoöljy Vaasan yliopisto	ASIAKK		07.02.2012	02801967

Tulokset

Ominaisuus	Menetelmä	Yksikkö	Näyte 1.	Näyte 2.	Näyte 3.	Näyte 4.
Rikki, UV (Antek)	ENISO20846	mg/kg	1,9	19,0	2,1	3,3
Tuhka 775°C öljytuotteista	ENISO6245	wt-%	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Orgaanisesti sitoutunut tyyppi	ASTMD4629	mg/kg	5,6	63	5,1	13
Setaaniluku IQT-analysaattorilla	ASTMD6890		51,0	59,4		54,1

Kommentit

Kalaöljy liian viskoosia setaanilukumääritykseen.

Elektroninen hyväksyntä**Laatija**

Kalle Ojala

LABORANTTI

kalle.ojala@nesteoil.com**Laboratorio**

Tutkimus ja Teknologia

Neste Oil Corporation, Naantali Refinery, Laboratory, 21100 Naantali, FINLAND

Laboratorio ei vastaa näytteenotosta.
Tulokset pätevät vain tutkituille näytteille
Todistuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

LIITE 10. AFME-polttoaineen rasvahappokoostumuksen tutkimustodistus.



Vaasan yliopisto
Katriina Sirviö
PL 700
65101 VAASA

Tutkimustodistus



Todistus : AR-12-FL-001784-01

Asiakaskoodi : FL0000399

Näyte: FME
Näyttenumero: 493-2012-00007446
Näytesarjan kuvaus: Katriina Sirviö
Näytteen saapumispäivä: 14/02/2012

Tutkimus - Laboratorio	Tulos	Yksikkö	MU
(a) FL019 - Rasvahappokoostumus % - EUFIRA			
Akkreditointi: FINAS T248 (EN ISO/IEC 17025)			
Menetelmä: Sisäinen menetelmä LAB-M1836, GC-FID			
12:0	0,1	%	± 35 %
14:0	2,4	%	± 7 %
i-15:1	0,1	%	± 35 %
ai-15:1	0,1	%	± 35 %
14:1 cis	0,2	%	± 35 %
15:0	0,2	%	± 35 %
i-16:0	0,1	%	± 35 %
16:0	16,8	%	± 7 %
16:1 cis	7,4	%	± 7 %
17:0	0,4	%	± 35 %
17:1	0,3	%	± 35 %
18:0	8,1	%	± 7 %
18:1 cis	48,0	%	± 7 %
18:2 n-6 cis	9,7	%	± 7 %
18:2 muut isomeerit	0,6	%	± 35 %
20:0	0,1	%	± 35 %
20:1	0,9	%	± 35 %
18:3 n-3 cis (ALA)	1,2	%	± 7 %
20:2 n-6 cis	0,3	%	± 35 %
22:1	0,2	%	± 35 %
20:3 n-3 cis	0,1	%	± 35 %
20:4 n-6 cis	0,3	%	± 35 %
20:4 n-3 cis	0,2	%	± 35 %
20:5 n-3 cis (EPA)	0,3	%	± 35 %
22:5 n-3 cis (DPA)	0,4	%	± 35 %
22:6 n-3 (DHA)	0,9	%	± 35 %
Tyydyttyneet rasvahapot yhteensä	28,4	%	± 16 %
Kertatyydyttymättömät rasvahapot yhteensä	57,1	%	± 16 %
Monityydyttymättömät rasvahapot yhteensä	14,1	%	± 16 %
FL057 - Jodiluku laskennallinen - EUFIRA			
Menetelmä: AOCS Cd 1c-85, Laskennallinen			
Jodiluku	79,3		

Asiakirjojen osittainen kopiointi on kielletty. Testaustulos koskee vain tutkittua näytettä. Lausunto ei kuulu akkreditoinnin piiriin. Akkreditoitujen menetelmien arvioitu tutkimuksen suorittaneen laboratorion oman maan akkreditointielimen toimesta. Tämä tutkimustodistus on luotu sähköisesti ja se on tarkastettu ja hyväksytty.

Eurofins Scientific Finland Oy

PL 75 (Raisionkaari 55)
21201 Raisio
Finland



Finnish Accreditation Service
T248 (EN ISO/IEC 17025)

Y-tunnus 1514462-1
www.eurofins.fi
FoodAgro@eurofins.fi

(a) = Akkreditoitu menetelmä
MU = Expanded Measurement Uncertainty, k=2 (Laajennettu mittausepävarmuus, k=2)
* = Tulos alle määrittäysrajan

Laboratoriolyhenteet

EUFIRA - Eurofins Scientific Finland Raisio (Food & Agro), FINLAND



Raisio, 06/03/2012

Päivi Laakso

Analyysipalvelupäällikkö

+358 503 864 322

Asiakirjojen osittainen kopioiminen on kielletty. Testaustulos koskee vain tutkittua näytettä. Lausunto ei kuulu akkreditoinnin piiriin. Akkreditoitua menetelmät on arvioitu tutkimuksen suorittaneen laboratorion oman maan akkreditointielimen toimesta. Tämä tutkimustodistus on luotu sähköisesti ja se on tarkastettu ja hyväksytty.

Sivu 2/2

Eurofins Scientific Finland Oy

PL 75 (Raisionkaari 55)
21201 Raisio
Finland



Y-tunnus 1514462-1
www.eurofins.fi
FoodAgro@eurofins.fi

LIITE 11. FISH-polttoaineen rasvahappokoostumuksen tutkimustodistus.



Tutkimustodistus



Todistus : AR-12-FL-001785-01

Asiakaskoodi : FL0000399

Vaasan yliopisto
Katriina Sirviö
PL 700
65101 VAASA

Näyte: Kaladiesel
Näyttenumero: 493-2012-00007447
Näytesarjan kuvaus: Katriina Sirviö
Näytteen saapumispäivä: 14/02/2012

Tutkimus - Laboratorio	Tulos	Yksikkö	MU
(a) FL019 - Rasvahappokoostumus % - EUFIRA			
Akkreditointi: FINAS T248 (EN ISO/IEC 17025)			
Menetelmä: Sisäinen menetelmä LAB-M1836, GC-FID			
14:0	3,1	%	± 7 %
i-15:1	0,1	%	± 35 %
15:0	0,3	%	± 35 %
16:0	11,3	%	± 7 %
16:1 cis	4,5	%	± 7 %
17:0	0,2	%	± 35 %
17:1	0,1	%	± 35 %
16:4 n-3 cis	0,3	%	± 35 %
18:0	2,6	%	± 7 %
18:1 cis	33,3	%	± 7 %
18:2 n-6 cis	16,6	%	± 7 %
18:2 muut isomeerit	0,8	%	± 35 %
20:0	0,2	%	± 35 %
20:1	3,1	%	± 7 %
18:3 n-3 cis (ALA)	3,6	%	± 7 %
18:4 n-3 cis (SDA)	0,9	%	± 35 %
20:2 n-6 cis	0,8	%	± 35 %
22:0	0,1	%	± 35 %
20:3 n-6 cis	0,2	%	± 35 %
22:1	2,8	%	± 7 %
20:3 n-3 cis	0,3	%	± 35 %
20:4 n-6 cis	0,3	%	± 35 %
20:4 n-3 cis	0,8	%	± 35 %
20:5 n-3 cis (EPA)	3,5	%	± 7 %
24:1	0,3	%	± 35 %
22:5 n-3 cis (DPA)	1,6	%	± 7 %
22:6 n-3 (DHA)	6,4	%	± 7 %
Tyydyttyneet rasvahapot yhteensä	18,1	%	± 16 %
Kertatyydyttymättömät rasvahapot yhteensä	44,2	%	± 16 %
Monitydyttymättömät rasvahapot yhteensä	36,8	%	± 16 %
FL057 - Jodiluku laskennallinen - EUFIRA			
Menetelmä: AOCS Cd 1c-85, Laskennallinen			
Jodiluku	131,8		

Asiakirjojen osittainen kopiointi on kielletty. Testaustulos koskee vain tutkittua näytettä. Lausunto ei kuulu akkreditoinnin piiriin. Akkreditoitujen menetelmät on arvioitu tutkimuksen suorittaneen laboratorion oman maan akkreditointielimen toimesta. Tämä tutkimustodistus on luotu sähköisesti ja se on tarkastettu ja hyväksytty.

Eurofins Scientific Finland Oy

PL 75 (Raisionkaari 55)
21201 Raisio
Finland



Finnish Accreditation Service
T248 (EN ISO/IEC 17025)

Y-tunnus 1514462-1
www.eurofins.fi
FoodAgro@eurofins.fi

--	--	--

(a) = Akkreditoitu menetelmä
 MU = Expanded Measurement Uncertainty, k=2 (Laajennettu mittausepävarmuus, k=2)
 * = Tulos alle määrittäjärajan

Laboratoriolyhenteet
 EUFIRA - Eurofins Scientific Finland Raisio (Food & Agro), FINLAND



Raisio, 06/03/2012

Päivi Laakso

Analyysipalvelupäällikkö

+358 503 864 322

Asiakirjojen osittainen kopioiminen on kielletty. Testaustulos koskee vain tutkittua näytettä. Lausunto ei kuulu akkreditoinnin piiriin. Akkreditoitujen menetelmät on arvioitu tutkimuksen suorittaneen laboratorion oman maan akkreditointielimen toimesta. Tämä tutkimustodistus on luotu sähköisesti ja se on tarkastettu ja hyväksytty.

Sivu 2/2

Eurofins Scientific Finland Oy

PL 75 (Raisionkaari 55)
 21201 Raisio
 Finland



Y-tunnus 1514462-1
 www.eurofins.fi
 FoodAgro@eurofins.fi

LIITE 12. FISHOIL-polttoaineen rasvahappokoostumuksen tutkimustodistus.



Vaasan yliopisto
Katriina Sirviö
PL 700
65101 VAASA

Tutkimustodistus



Todistus : AR-12-FL-001786-01

Asiakaskoodi : FL0000399

Näyte: Kalaöljy
Näyttenumero: 493-2012-00007448
Näytesarjan kuvaus: Katriina Sirviö
Näytteen saapumispäivä: 14/02/2012

Tutkimus - Laboratorio	Tulos	Yksikkö	MU
(a) FL019 - Rasvahappokoostumus % - EUFIRA			
Akkreditointi: FINAS T248 (EN ISO/IEC 17025)			
Menetelmä: Sisäinen menetelmä LAB-M1836, GC-FID			
14:0	3,0	%	± 7 %
i-15:1	0,1	%	± 35 %
15:0	0,2	%	± 35 %
16:0	11,2	%	± 7 %
16:1 cis	4,5	%	± 7 %
17:0	0,2	%	± 35 %
17:1	0,1	%	± 35 %
16:4 n-3 cis	0,3	%	± 35 %
18:0	2,6	%	± 7 %
18:1 cis	33,5	%	± 7 %
18:2 n-6 cis	17,6	%	± 7 %
18:2 muut isomeerit	0,8	%	± 35 %
20:0	0,2	%	± 35 %
20:1	2,9	%	± 7 %
18:3 n-3 cis (ALA)	3,4	%	± 7 %
18:4 n-3 cis (SDA)	0,8	%	± 35 %
20:2 n-6 cis	0,9	%	± 35 %
22:0	0,1	%	± 35 %
20:3 n-6 cis	0,2	%	± 35 %
22:1	2,5	%	± 7 %
20:3 n-3 cis	0,3	%	± 35 %
20:4 n-6 cis	0,3	%	± 35 %
20:4 n-3 cis	0,8	%	± 35 %
20:5 n-3 cis (EPA)	3,3	%	± 7 %
24:1	0,3	%	± 35 %
22:5 n-3 cis (DPA)	1,6	%	± 7 %
22:6 n-3 (DHA)	6,4	%	± 7 %
Tyydyttyneet rasvahapot yhteensä	18,0	%	± 16 %
Kertatyydyttymättömät rasvahapot yhteensä	43,9	%	± 16 %
Monitydyttymättömät rasvahapot yhteensä	37,4	%	± 16 %
FL057 - Jodiluku laskennallinen - EUFIRA			
Menetelmä: AOCS Cd 1c-85, Laskennallinen			
Jodiluku	132,0		

Asiakirjojen osittainen kopiointi on kielletty. Testaustulos koskee vain tutkittua näytettä. Lausunto ei kuulu akkreditoinnin piiriin. Akkreditoitujen menetelmät on arvioitu tutkimuksen suorittaneen laboratorion oman maan akkreditointielimen toimesta. Tämä tutkimustodistus on luotu sähköisesti ja se on tarkastettu ja hyväksytty.

Eurofins Scientific Finland Oy

PL 75 (Raisionkaari 55)
21201 Raisio
Finland



Finnish Accreditation Service
T248 (EN ISO/IEC 17025)

Y-tunnus 1514462-1
www.eurofins.fi
FoodAgro@eurofins.fi

--	--	--	--

(a) = Akkreditoitu menetelmä
 MU = Expanded Measurement Uncertainty, k=2 (Laajennettu mittausepävarmuus, k=2)
 * = Tulos alle määrittäjärajan

Laboratoriolyhenteet

EUFIRA - Eurofins Scientific Finland Raisio (Food & Agro), FINLAND



Raisio, 06/03/2012

Päivi Laakso

Analyysipalvelupäällikkö

+358 503 864 322

Asiakirjojen osittainen kopioiminen on kielletty. Testaustulos koskee vain tutkittua näytettä. Lausunto ei kuulu akkreditoinnin piiriin. Akkreditoitujen menetelmät on arvioitu tutkimuksen suorittaneen laboratorion oman maan akkreditointielimen toimesta. Tämä tutkimustodistus on luotu sähköisesti ja se on tarkastettu ja hyväksytty.

Sivu 2/2

Eurofins Scientific Finland Oy

PL 75 (Raisionkaari 55)
 21201 Raisio
 Finland



Y-tunnus 1514462-1
 www.eurofins.fi
 FoodAgro@eurofins.fi

LIITE 13. Polttoaineiden mittaustuloksia Tutkimuskeskus Technobothnian Ympäristö- ja laboratoriotekniikan laboratoriosta.

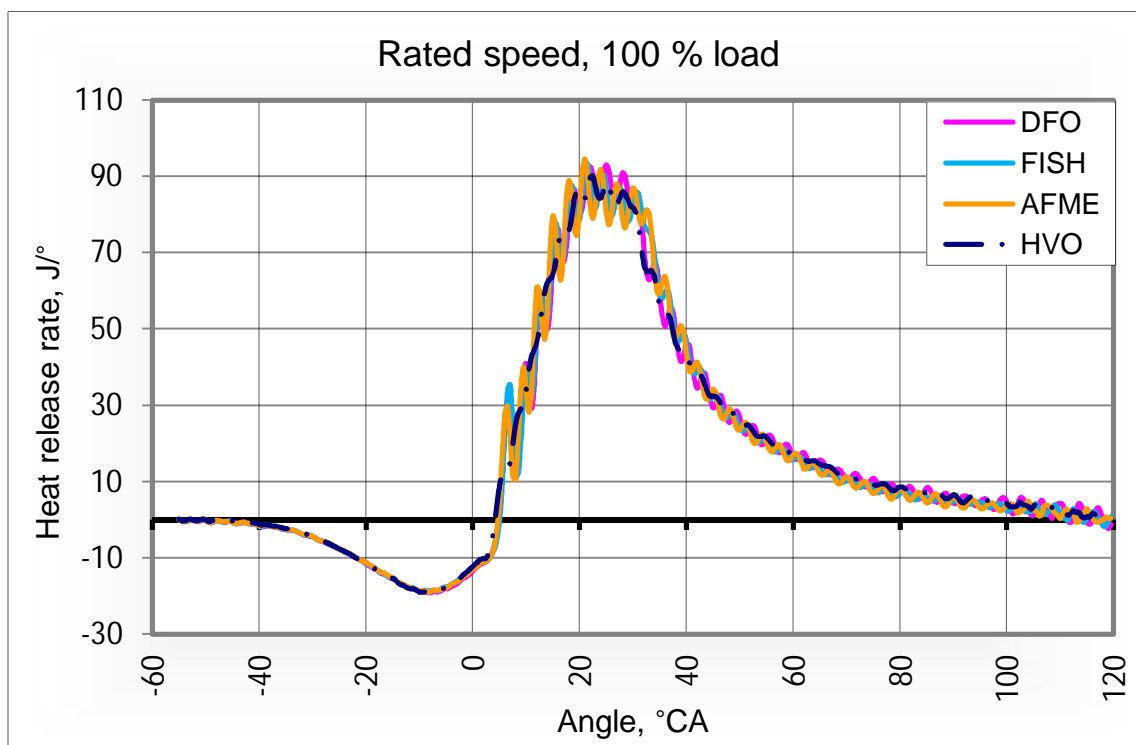
Näyte	Vesipitoisuus	Happoluku	Jodiluku	OSI	Pintajännitys
	ppm	mg KOH/ g	g/100 g	h	mN/m
AFME	255	0.116	76	32.05	31.41
FISH	1096	0.099	113	0.55	31.91
FISHOIL	909	2.089	107	0.68	33.59
DFO	-	-	-	-	28.54

LIITE 14. Hiukkasmassojen punnitustulokset.

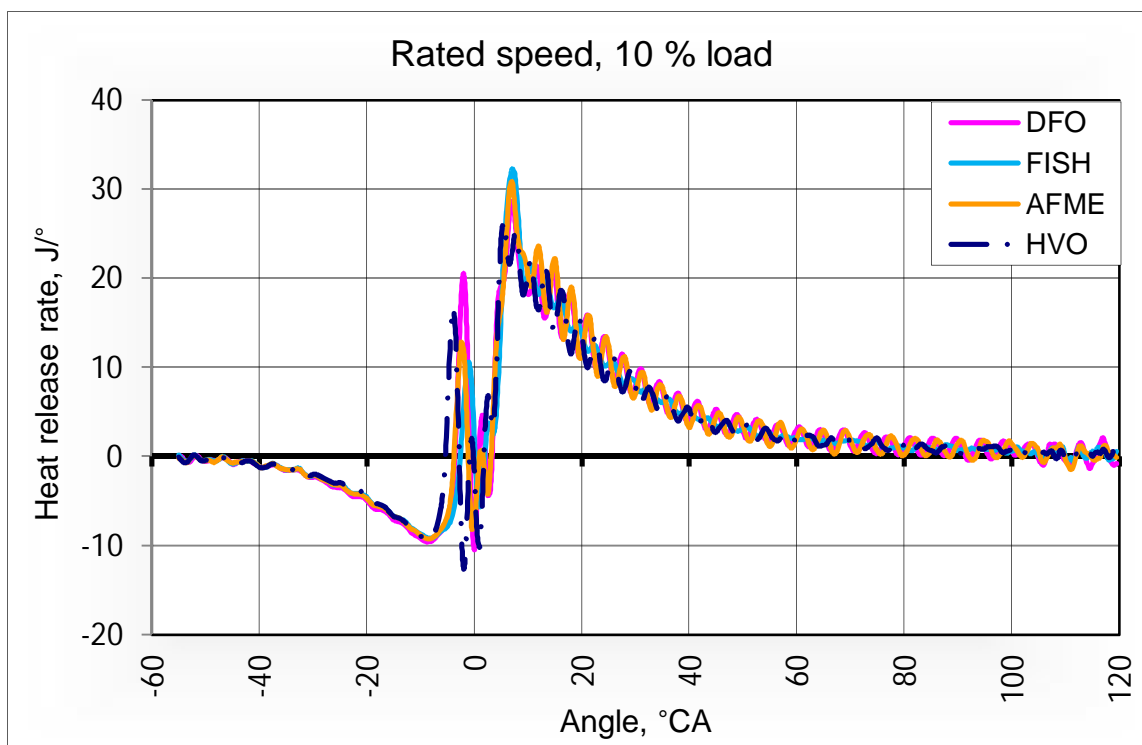
Particle matter. weight							
DFO 2		FISH		AFME		HVO	
Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
g	g	g	g	g	g	g	g
0.08885	0.08938	37.21589	37.21669	37.21646	37.21656	0.08936	0.08954
0.08883	0.08933	37.21583	37.21666	37.21648	37.21696	0.08935	0.08952
0.08884	0.08933	37.21584	37.2167	37.21657	37.21731	0.08935	0.08955
0.08884	0.089347	37.21585	37.21668	37.2165	37.21694	0.089353	0.089537
0.000506667		0.00083		0.00044		0.000183333	

*Yellow weights are combined weight results of indicator paper and plastic holder.

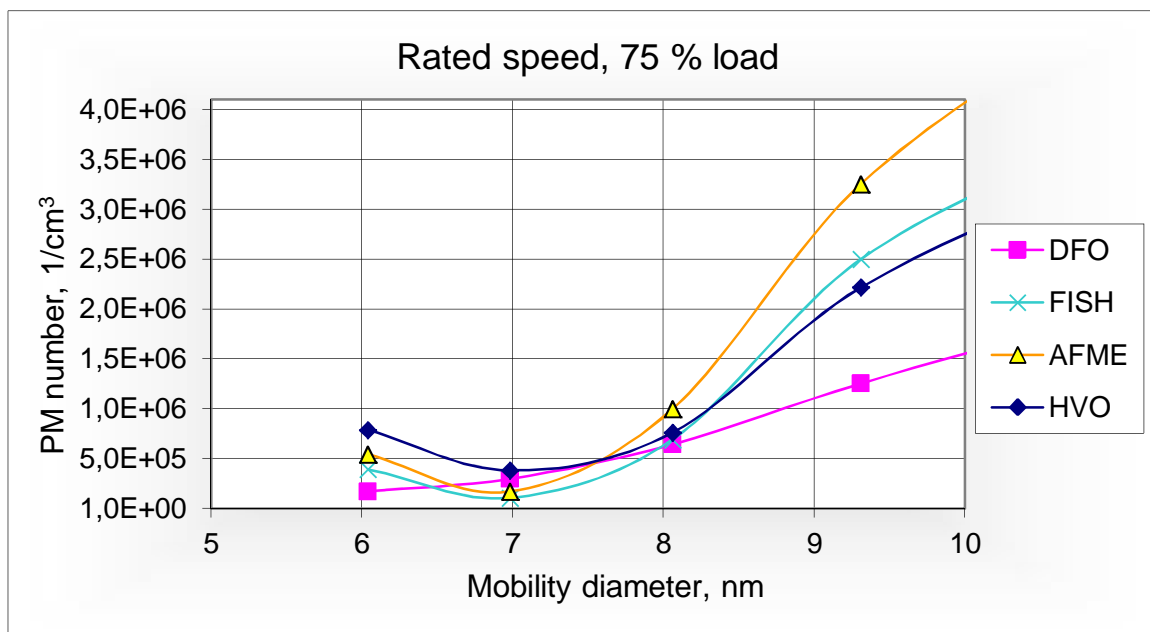
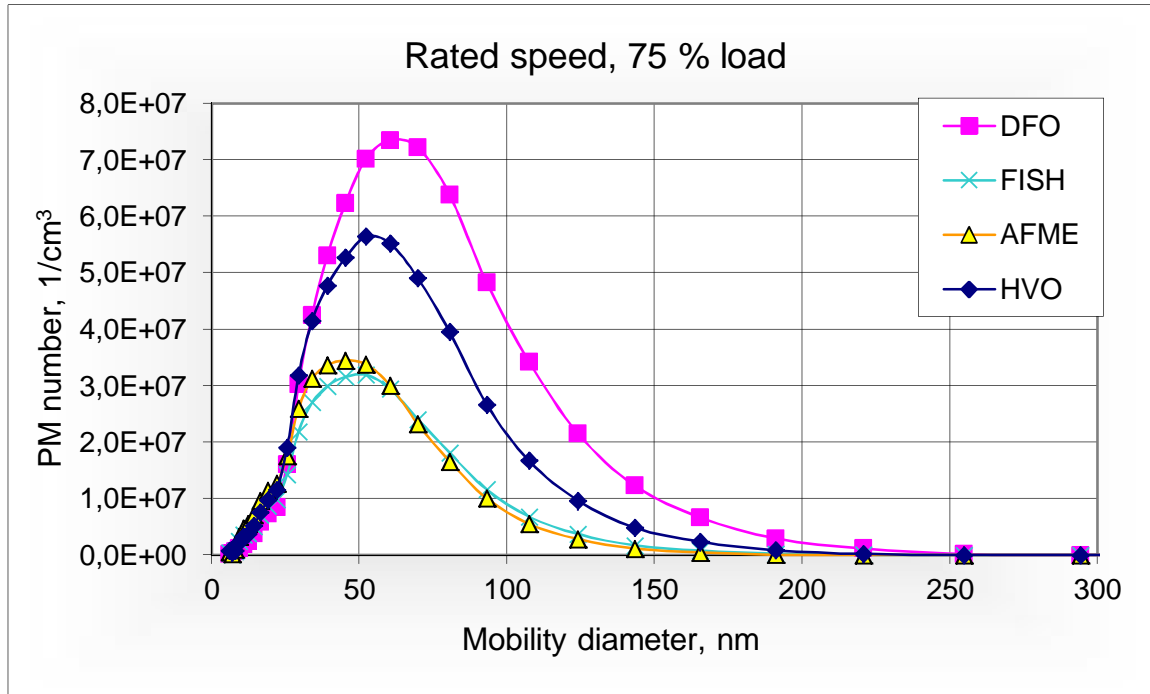
LIITE 15. Lämmönvapautuminen eri polttoaineilla 100 % kuormalla nopeudella 2200 r/min.



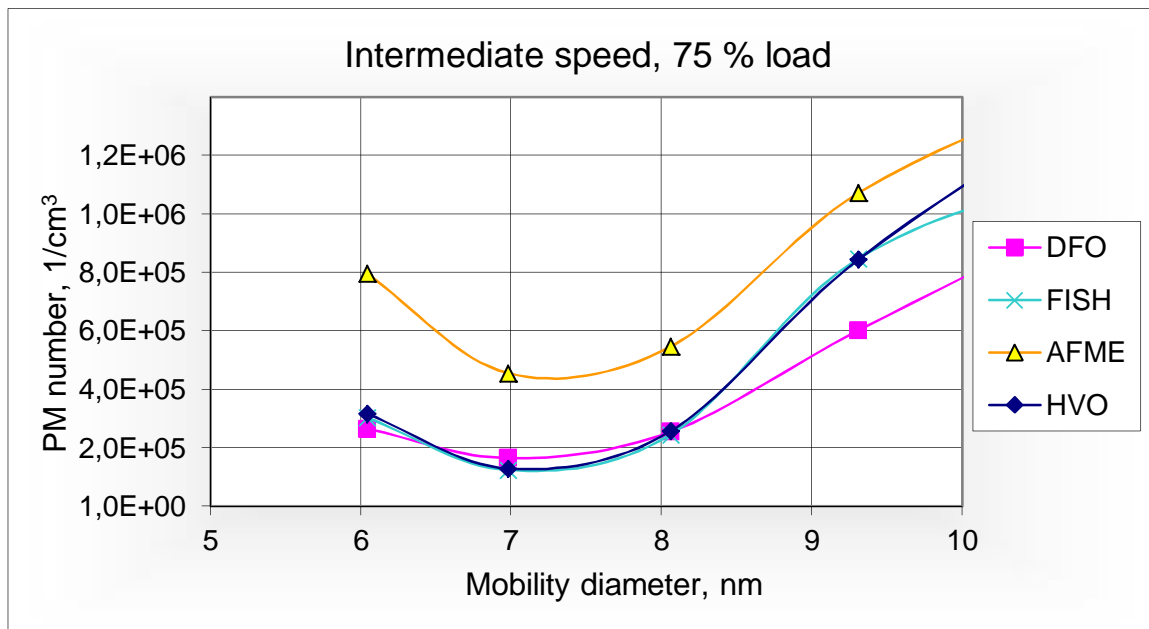
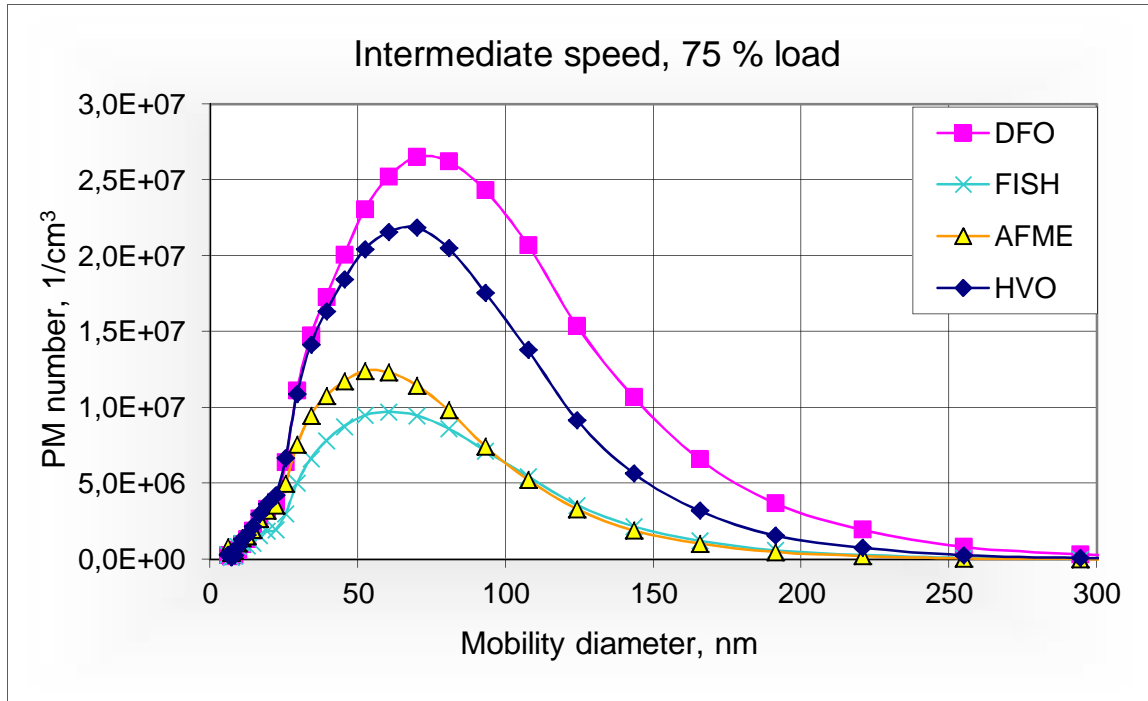
LIITE 16. Lämmönvapautuminen eri polttoaineilla 10 % kuormalla nopeudella 2200 r/min.



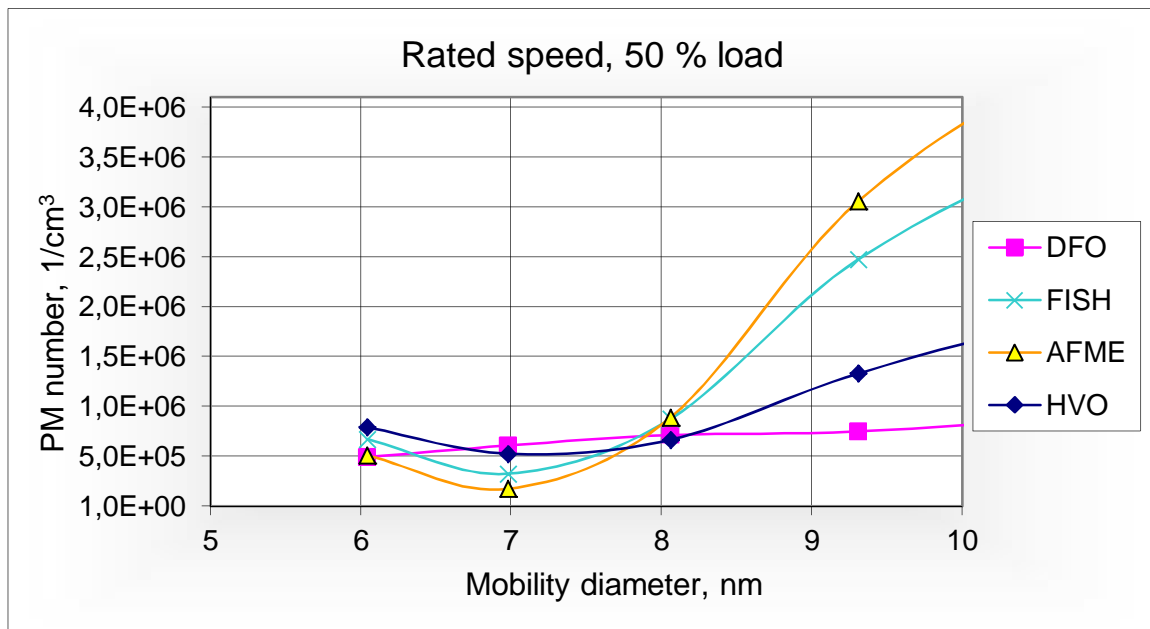
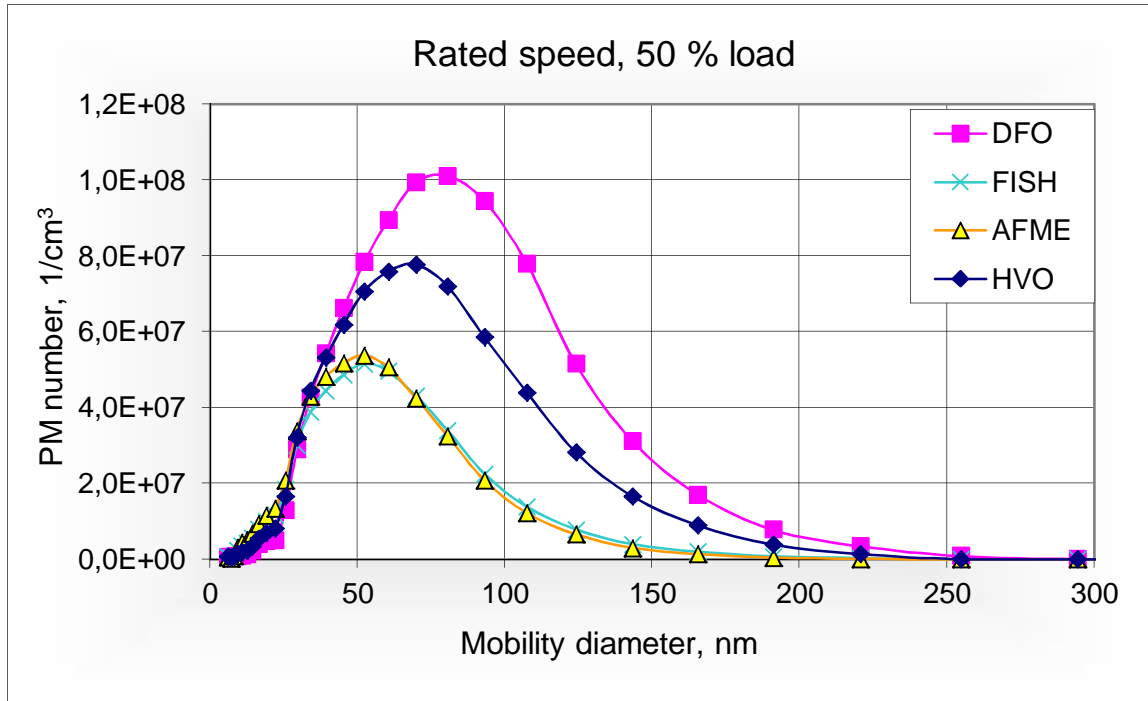
LIITE 17. Pienhiukkasten kokojakaumat eri polttoaineilla nopeudella 2200 r/min 75 % kuormalla.



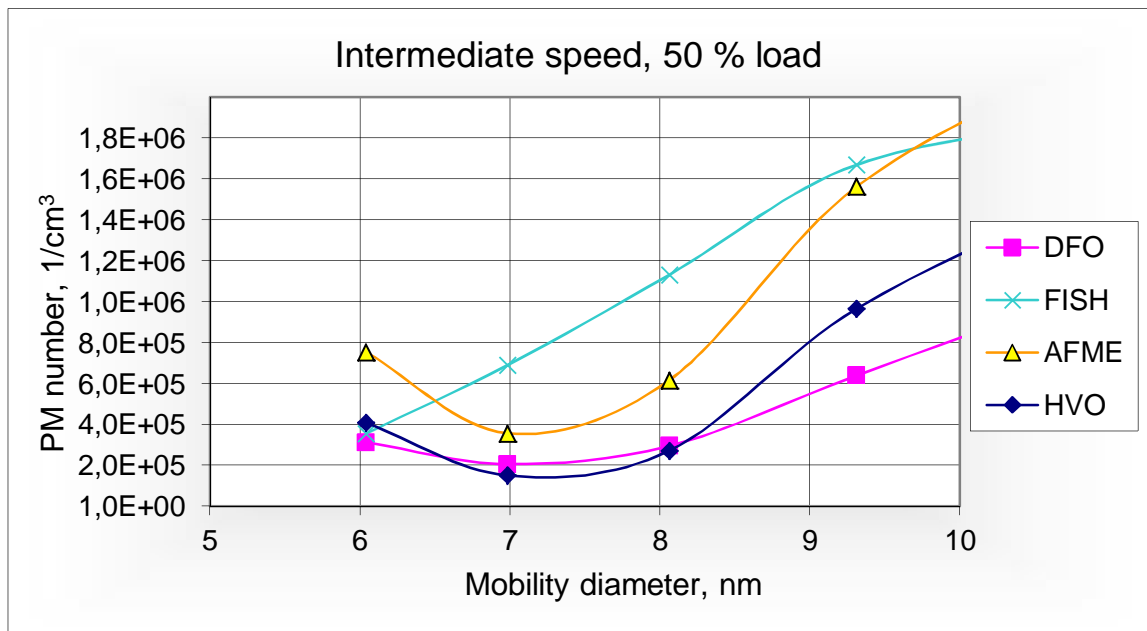
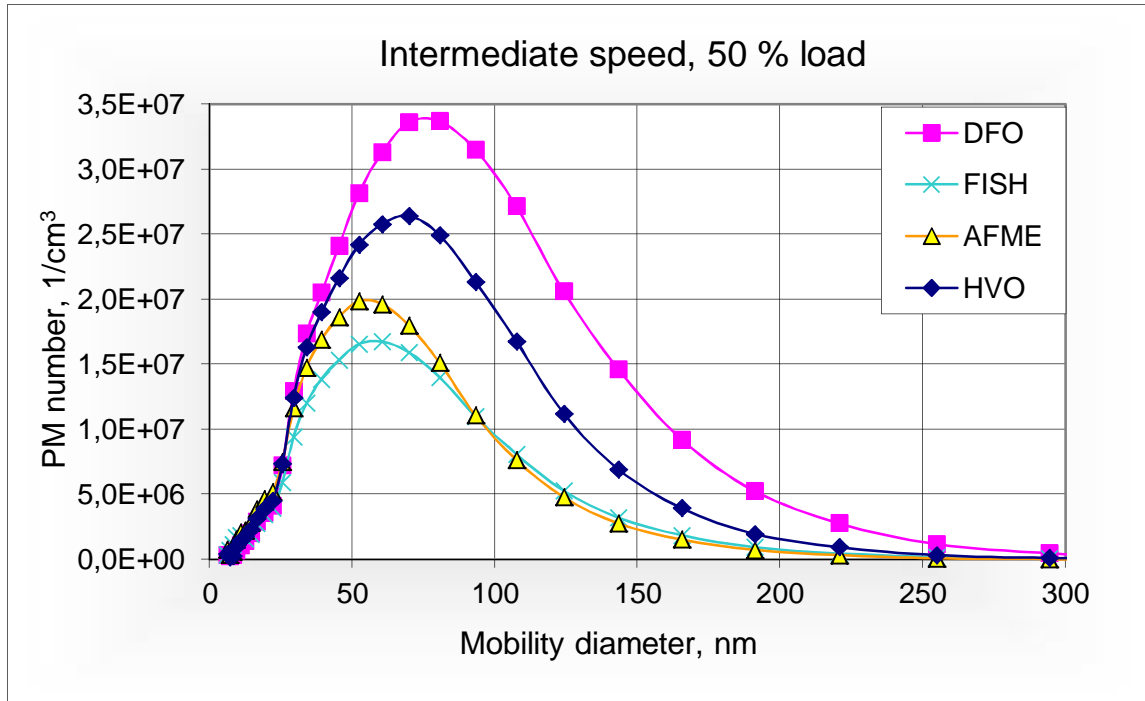
LIITE 18. Pienhiukkasten kokojakaumat eri polttoaineilla välinopeudella 75 % kuormal-
la.



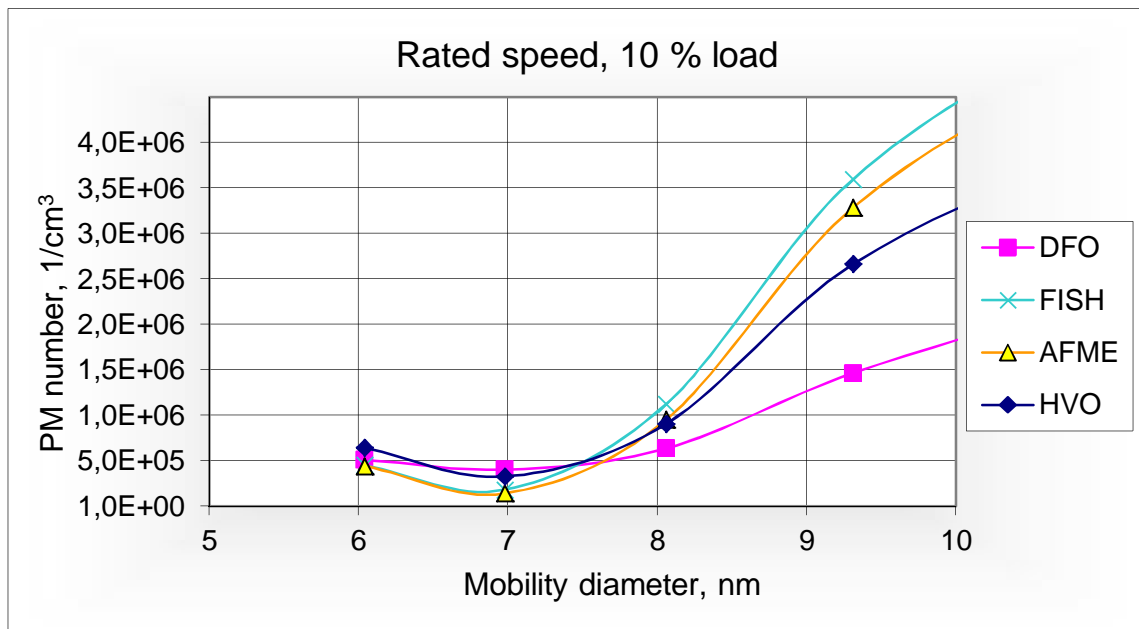
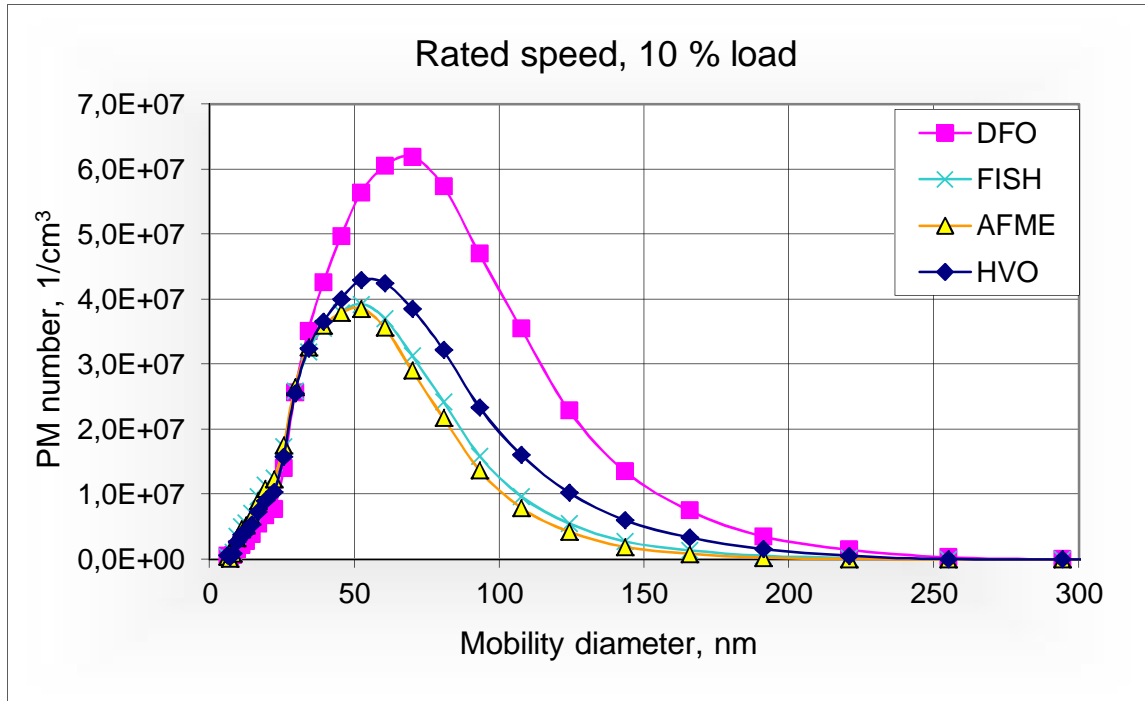
LIITE 19. Pienhiukkasten kokojakaumat eri polttoaineilla nopeudella 2200 r/min 50 % kuormalla.



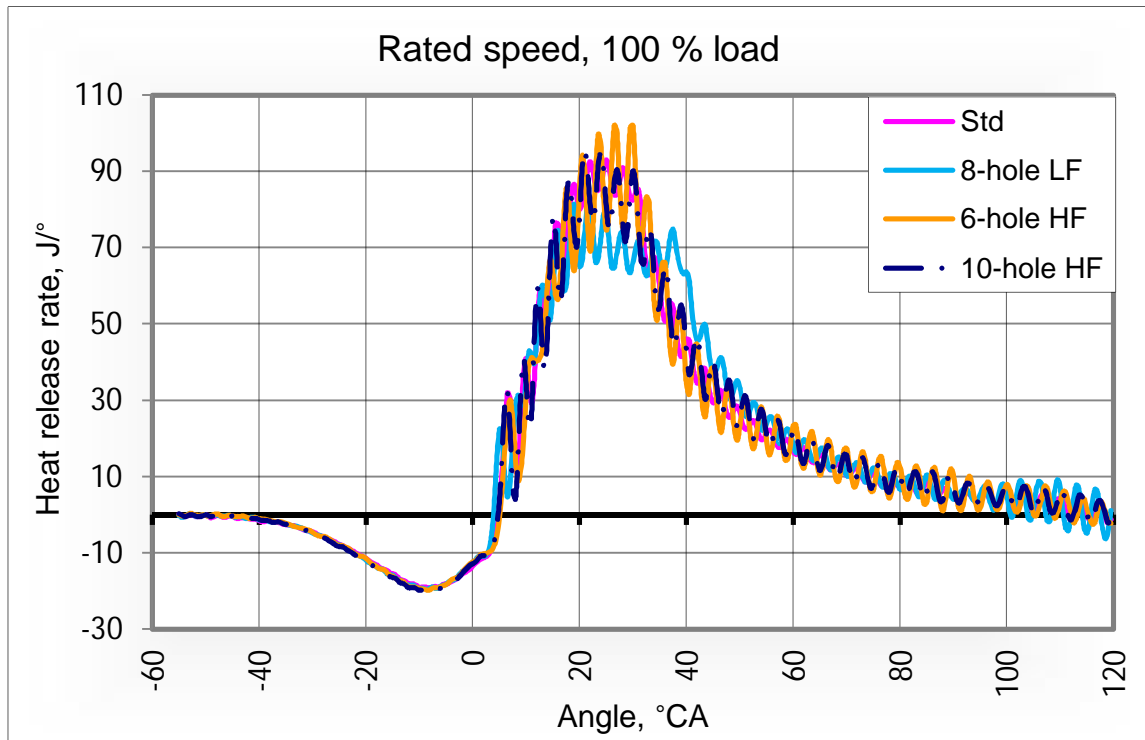
LIITE 20. Pienhiukkasten kokojakaumat eri polttoaineilla nopeudella 1500 r/min 50 % kuormalla.



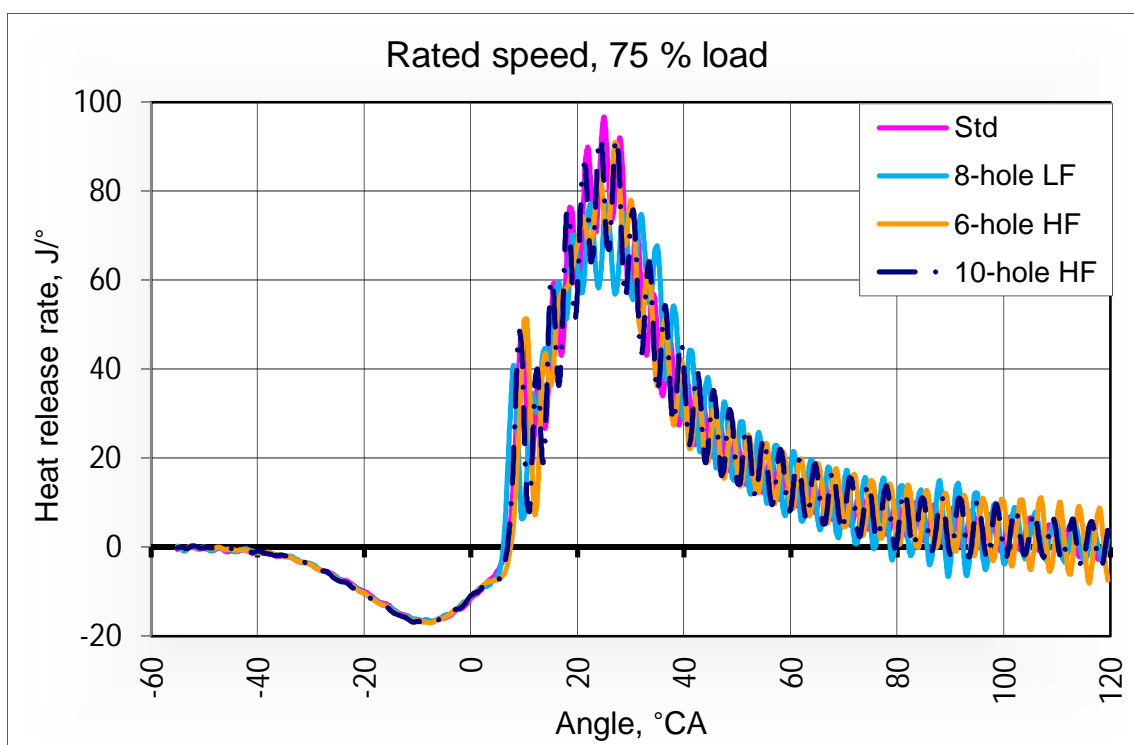
LIITE 21. Pienhiukkasten kokojakaumat eri polttoaineilla nopeudella 2200 r/min 10 % kuormalla.



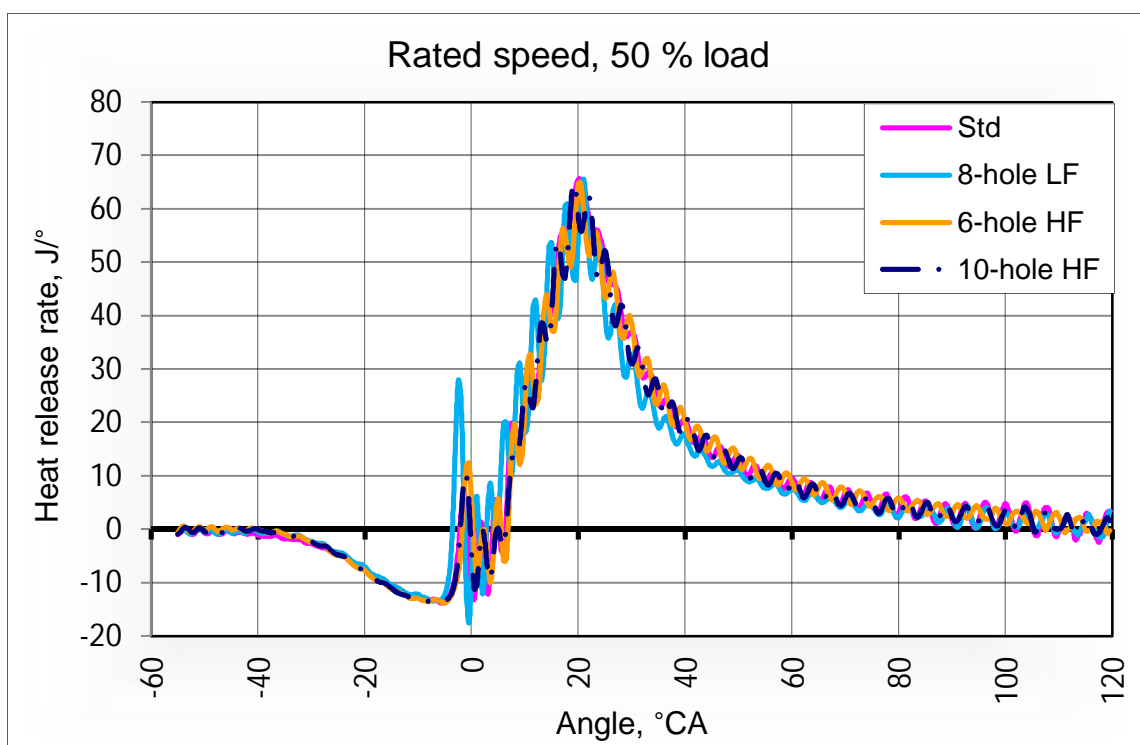
LIITE 22. Lämmönvapautuminen eri suuttimilla 100 % kuormalla nopeudella 2200 r/min.



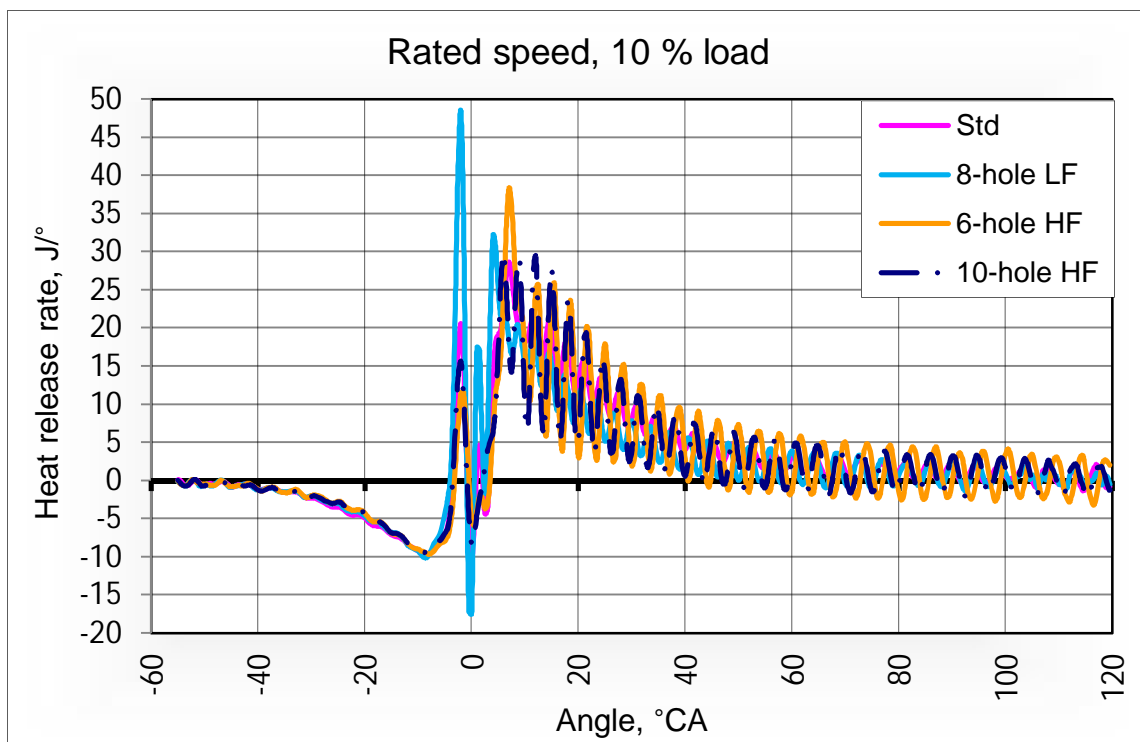
LIITE 23. Lämmönvapautuminen eri suuttimilla 75 % kuormalla nopeudella 2200 r/min.



LIITE 24. Lämmönvapautuminen eri suuttimilla 50 % kuormalla nopeudella 2200 r/min.



LIITE 25. Lämmönvapautuminen eri suuttimilla 10 % kuormalla nopeudella 2200 r/min.



LIITE 26. Lämmönvapautuminen joutokäynnillä eri suuttimilla.

