

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**ENERGIATEKNIikka**

Teemu Ovaska

**VOITELUAINIEN JA POLTTONESTEIDEN VAIKUTUS TYÖKONE-  
DIESELMOOTTORIN PAKOKAASUN HIUKKASKOKOJAKAUMAAN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten  
Vaasassa 26.9.2013

Työn valvoja

Professori Seppo Niemi (TkT)

Työn ohjaaja

Jukka Kiijärvi (TkT)

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö, joka on tehty Vaasan yliopiston teknillisessä tiedekunnassa, on osa energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa. Diplomityön aihe kuuluu Tampereen teknillisen yliopiston koordinoimaan TREAM-tutkimushankkeeseen, jonka tavoitteena on selvittää diesel- ja bensiinimoottoreiden sekä kulkuneuvojen pienhiukkaspäästöjä. Osa tämän diplomityön tuloksista on aiemmin esitetty Teknologiateollisuus ry:n järjestämässä Kestävä moottoritekniikka -seminaarissa Helsingissä 7.5.2013.

Kiitän työni valvojaa professori Seppo Niemeä, joka tarjosi minulle polttomoottoreihin liittyvän tutkimusaiheen, ja työni ohjaajaa, Jukka Kiijärveä. Yliopisto-opintojeni aikana sekä professori Seppo Niemi että Jukka Kiijärvi opettivat minulle polttomoottoritekniikan perusteita sekä niitä tukevia oppiaineita. Diplomityöni aikana he ovat tukeneet paljon työni edistymistä. Erityisesti olen oppinut heiltä alaani liittyviä hyvän tieteellisen toiminnan ja raportoinnin taitoja.

Kiitän myös Katriina Sirviötä, Olav Nilssonia sekä Topias Pihlavaa Vaasan yliopistosta sekä tutkimushankkeen projektipäällikköä, tutkija Panu Karjalaista ja Topi Rönkköä Tampereen teknillisestä yliopistosta. He olivat mukana TREAM-tutkimushankkeen Vaasan mittausten suunnittelemisessa ja toteuttamisessa. Kiitän myös Henri Huuskoa AGCO Power Oy:stä, Neste Oil Oyj:n teknisen tuen päällikköä Kari Kulmalaa sekä Ab Nanol Technologies Oy:n teknistä johtajaa Patrik Strandia asiantuntija-avusta.

Lisäksi kiitän Janne Suomelaa, joka auttoi polttomoottorilaboratoriossa tehdyissä tutkimusmittauksissa. Olemme tehneet yhteistyötä energiatekniikan opintojemme aikana ja auttaneet toisiamme edistymään opinnoissamme. Lukemattomat keskustelutuokiot kahvikupin ääressä ovat myös edesauttaneet tämän diplomityön edistymistä.

Vaasa, 19.9.2013

Teemu Ovaska

<b>SISÄLLYSLUETTELO</b>	<b>sivu</b>
ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ	12
ABSTRACT	13
1. JOHDANTO	14
2. PIENHIUKKASET	17
2.1. Kokoluokat	17
2.2. Kokojakauma	19
2.3. Kemiallinen koostumus	21
2.4. Päästönormit	24
2.5. Pakokaasun laimentaminen pienhiukkasmittauksissa	25
2.6. Aiempia tutkimustuloksia	25
2.6.1. Voiteluöljyn vaikutus	26
2.6.2. Biopolttonesteiden vaikutus	27
3. KOEJÄRJESTELYT	29
3.1. Koemoottori ja moottoridynamometri	30
3.2. Mittalaitteet ja mittausten menetelmät	33
3.2.1. Pienhiukkaslukumäärä ja hiukkaskokojakauma	33
3.2.2. Pienhiukkasmassa	35
3.2.3. Savutus	36
3.2.4. Kaasumaiset päästöt	36
3.2.5. Koematriisi	37
3.3. Tutkimuksen kulku	38
3.3.1. Voiteluöljyt	39
3.3.2. Voiteluöljyn lisäaine	40
3.3.3. Polttonesteet	41
4. TULOKSET	45
4.1. Voiteluöljyn vaikutus	46
4.2. Voiteluöljyn lisäaineen vaikutus	52
4.3. Polttonesteiden vaikutus	57
5. TULOSTEN ARVIOINTI	68
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	70
7. YHTEENVETO	72
LÄHDELUETTELO	74

LIITTEET	79
LIITE 1. Muut kaaviot voiteluöljyjen vertailusta.	79
LIITE 2. Muut kaaviot lisäainetutkimuksesta.	86
LIITE 3. Muut kaaviot polttonesteiden vertailuista.	93

<b>KUVAT</b>	<b>sivu</b>
Kuva 1. Pienhiukkasten kokoluokat sekä tyypilliset massa- ja lukumääräosuudet dieselmoottorin pakokaasussa (Kittelson 1998: 577).	18
Kuva 2. Pienhiukkaspäästöjen ryhmittely eri jakeisiin.	22
Kuva 3. Moottorilaboratorio.	29
Kuva 4. Koe- ja mittalaitteistokaavio.	30
Kuva 5. Ohjelma moottorin lämpötilojen, paineiden ja virtausten seuraamiseksi.	31
Kuva 6. Koemoottori ja moottoridynamometri moottorilaboratoriossa.	32
Kuva 7. Ruiskutusannosten yhteismäärät eri pyörimisnopeuksilla.	43
Kuva 8. Esi-, pää- ja jälkiruiskutusmäärien suhteet pyörimisnopeudella 2200 r/min.	44
Kuva 9. Esi-, pää- ja jälkiruiskutusmäärien suhteet pyörimisnopeudella 1500 r/min.	44
Kuva 10. Koemoottorin hyötysuhde eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	47
Kuva 11. Koemoottorin hyötysuhde eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	47
Kuva 12. Koemoottorin yhdistetyt typpioksidipäästöt eri voiteluöljyillä.	48
Kuva 13. Koemoottorin yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöt eri voiteluöljyillä.	49
Kuva 14. Koemoottorin hiukkasmassapäästö eri voiteluöljyillä NRSC-syklissä.	49
Kuva 15. Koemoottorin savutus eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	50
Kuva 16. Koemoottorin savutus eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	50
Kuva 17. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 100 %.	51
Kuva 18. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 1500 r/min ja 50 %.	52
Kuva 19. Koemoottorin hyötysuhde lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyillä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.	53
Kuva 20. Koemoottorin hyötysuhde lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyillä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.	54
Kuva 21. Lisäainetutkimuksen yhdistetyt typpioksidipäästöt.	55
Kuva 22. Lisäainetutkimuksen yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöt.	55

Kuva 23. NRSC-syklin kokonaishiukkasmassat lisäainetutkimuksessa.	56
Kuva 24. Koemoottorin savutus lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.	56
Kuva 25. Koemoottorin savutus lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.	57
Kuva 26. Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 2200 r/min ja 100 %.	58
Kuva 27. Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 1500 r/min ja 100 %.	58
Kuva 28. Koemoottorin hyötysuhde eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	59
Kuva 29. Koemoottorin hyötysuhde eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	59
Kuva 30. Koemoottorin yhdistetyt typpioksidipäästöt eri polttonesteillä.	60
Kuva 31. Koemoottorin hiilivetyypäästö eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	61
Kuva 32. Koemoottorin hiilivetyypäästö eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	62
Kuva 33. Koemoottorin yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivetyypäästöt eri polttonesteillä.	63
Kuva 34. Koemoottorin typpioksidipäästöt eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	64
Kuva 35. Koemoottorin hiilimonoksidipäästö eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	65
Kuva 36. NRSC-syklin hiukkasmassapäästö eri polttonesteillä.	65
Kuva 37. Koemoottorin savutus eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	66
Kuva 38. Koemoottorin savutus eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	66
Kuva 39. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 75 %.	67
Kuva 40. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 1500 r/min ja 100 %.	67

Kuva 41. Ympäristön lämpötila kuormituspisteittäin eri voiteluöljyjä tutkittaessa.	79
Kuva 42. Ympäristön suhteellinen ilmankosteus kuormituspisteittäin eri voiteluöljyjä tutkittaessa.	79
Kuva 43. Koemoottorin typpioksidipäästöt eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	80
Kuva 44. Koemoottorin typpioksidipäästöt eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	80
Kuva 45. Koemoottorin hiilivetyypäästö eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	81
Kuva 46. Koemoottorin hiilivetyypäästö eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	81
Kuva 47. Koemoottorin hiilimonoksidipäästö eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.	82
Kuva 48. Koemoottorin hiilimonoksidipäästö eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	82
Kuva 49. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 75 %.	83
Kuva 50. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 50 %.	83
Kuva 51. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 10 %.	84
Kuva 52. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 1500 r/min ja 100 %.	84
Kuva 53. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 1500 r/min ja 75 %.	85
Kuva 54. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 860 r/min ja 0 %.	85
Kuva 55. Ympäristön lämpötila kuormituspisteittäin lisäainetutkimuksessa.	86
Kuva 56. Ympäristön suhteellinen ilmankosteus kuormituspisteittäin lisäainetutkimuksessa.	86
Kuva 57. Koemoottorin typpioksidipäästöt lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyillä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.	87

Kuva 58. Koemoottorin typpioksidipäästöt lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.	87
Kuva 59. Koemoottorin hiilivetyypäästö lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.	88
Kuva 60. Koemoottorin hiilivetyypäästö lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.	88
Kuva 61. Koemoottorin hiilimonoksidipäästö lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.	89
Kuva 62. Koemoottorin hiilimonoksidipäästö lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.	89
Kuva 63. Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 2200 r/min ja 75 %.	90
Kuva 64. Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 2200 r/min ja 50 %.	90
Kuva 65. Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 2200 r/min ja 10 %.	91
Kuva 66. Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 1500 r/min ja 75 %.	91
Kuva 67. Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 1500 r/min ja 50 %.	92
Kuva 68. Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 860 r/min ja 0 %.	92
Kuva 69. Ympäristön lämpötila kuormituspisteittäin eri polttonesteitä tutkittaessa.	93
Kuva 70. Ympäristön suhteellinen ilmankosteus kuormituspisteittäin eri polttonesteitä tutkittaessa.	93
Kuva 71. Koemoottorin typpioksidipäästöt eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	94
Kuva 72. Koemoottorin hiilimonoksidipäästö eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.	94
Kuva 73. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 100 %.	95

Kuva 74. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 50 %.	96
Kuva 75. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 10 %.	96
Kuva 76. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 1500 r/min ja 75 %.	97
Kuva 77. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 1500 r/min ja 50 %.	97
Kuva 78. Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 860 r/min ja 0 %.	98

## **TAULUKOT**

**sivu**

Taulukko 1. Voimassa olevat päästönormit Euroopassa ja Yhdysvalloissa (DieselNet 2012a; 2012b).	24
Taulukko 2. Koemoottorin tietoja.	31
Taulukko 3. Pyörrevirtadynamometrin tietoja (Horiba 2007: 55).	32
Taulukko 4. Mittalaitteet ja mitatut päästökomponentit.	33
Taulukko 5. NRSC-sykli ja tutkimuksessa käytetyt kuormat, muokattu (DieselNet 2012c).	37
Taulukko 6. Voiteluöljyjen tietoja.	38
Taulukko 7. Tutkimustehtävien suoritusjärjestys.	39
Taulukko 8. Koemoottorin pakokaasun hiilimonoksidi- ja hiilivetytypitoisuudet NRSC-syklin kuormituspisteissä eri polttonesteillä.	61
Taulukko 9. Massaimpaktorin suodattimen punnitustulokset ja hiukkasmassat.	95

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### *Symbolit*

$\lambda$	Ilmakerroin
$(CO_2)_{laimea}$	Pakokaasun hiilidioksidipitoisuus huokoisen putken jälkeen
$(CO_2)_{raaka}$	Raakapakokaasun hiilidioksidipitoisuus
$(CO_2)_{spektrometri}$	Pakokaasun hiilidioksidipitoisuus ennen spektrometriä
$(CO_2)_{tausta}$	Ympäristön hiilidioksidipitoisuus
$D_p$	Pienhiukkasen liikkuvuushalkaisija
$DR$	Lopullinen laimennussuhde
$DR_{ejektori}$	Ejektorin laimennussuhde
$DR_{hputki}$	Huokoisen putken laimennussuhde
$DR_{kokonais}$	Kokonaislaimennussuhde
$N$	Pienhiukkaslukumäärä
$n(D_p)$	Hiukkaslukumääräjakauman funktio

### *Lyhenteet*

BMEP	Tehollinen keskipaine (Brake Mean Effective Pressure)
CO	Hiilimonoksidi (Carbon Monoxide)
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi (Carbon Dioxide)
DFO	Fossiilinen dieselpolttoaine (Diesel Fuel Oil)
EEPS	Engine Exhaust Particle Sizer <sup>TM</sup>
EU	Euroopan Unioni
FID	Liekki-ionisaatioilmaisin (Flame Ionization Detector)
FSN	Savutusluku (Filter Smoke Number)
HC	Hiilivety (Hydrocarbon)
H <sub>2</sub> O	Vesi
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Rikkihappo
HVO	Vetykäsitelty kasviöljy (Hydrotreated Vegetable Oil)

ISO	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö (International Standardization Organization)
NO <sub>x</sub>	Typenoksidit
NRSC	Non-Road Steady Cycle
O <sub>2</sub>	Happi
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
RME	Rypsimetyyliesteri (Rapeseed Methyl Ester)
SAE	Yhdysvaltalainen standardisointijärjestö (Society of Automotive Engineers)
SME	Soijametyyliesteri (Soybean Methyl Ester)
US	United States

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta**

<b>Tekijä:</b>	Teemu Ovaska
<b>Diplomityön nimi:</b>	Voiteluaineiden ja polttonesteiden vaikutus työkonedieselmoottorin pakokaasun hiukkaskokojakaumaan
<b>Valvoja:</b>	Professori Seppo Niemi (TkT)
<b>Ohjaaja:</b>	Jukka Kiijärvi (TkT)
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Yksikkö:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan yksikkö
<b>Koulutusohjelma:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma
<b>Suunta:</b>	Energiatekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2010
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2013

**Sivumäärä: 98**

---

**TIIVISTELMÄ**

Polttomoottorit, joita käytetään liikenteessä ja sen ulkopuolella, ovat yksi merkittävä hiukkaspäästöjen lähde. Pienhiukkaset syntyvät polttomoottorin sylinterissä, kun polttoaine-ilmaseos palaa epätäydellisesti. Ihmisille haitallisimpia ovat pienimmät hiukkaset. Ne saattavat kulkeutua hengityselimien kautta sydän- ja verisuonijärjestelmään, joista edelleen jopa aivoverenkiertoon.

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia, miten voiteluöljy, voiteluöljyn lisäaine sekä erilaiset polttonesteet vaikuttavat työkonedieselmoottorin pakokaasun pienhiukkasiin, savutukseen ja kaasumaisiin päästöihin. Koemoottorina käytettiin nykyaikaista nopeakäyntistä työkonedieselmoottoria ilman pakokaasun jälkikäsitteilyä. Pakokaasun pienhiukkasista mitattiin lukumäärä, kokojakauma ja massa. Mittaukset tehtiin laboratorioolosuhteissa eri päästömittausten menetelmin.

Tuloksista voitiin päätellä, että eri voiteluöljyjen välisissä hiukkaskokojakaumissa ei ollut huomattavia eroja. Voiteluöljyn lisäaineen vaikutukset hiukkaspäästöihin sekä kaasumaisiin päästöihin jäivät vähäisiksi 75 tunnin ajoaikana. Dieselpolttolainneella tai vetykäsitellyllä kasviöljyllä ajettaessa syntyi useimmiten vähiten hiukkasia, joiden halkaisija oli alle 30 nm. Metyyliesterit tuottivat useimmiten vähiten hiukkasia välillä 70–200 nm. Vetykäsitellyllä kasviöljyllä oli pienin hiukkasmassapäästö sekä pienimmät yhdistetyt typpioksidi- ja hiilivetypäästöt.

---

**AVAINSANAT:** Dieselmoottori, pakokaasu, hiukkaskokojakauma, voiteluaine, biopolttoneste

---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology**

<b>Author:</b>	Teemu Ovaska
<b>Topic of the Thesis:</b>	Effects of lubricants and fuels on the exhaust particle size distributions in an off-road diesel engine
<b>Supervisor:</b>	Professor Seppo Niemi (D.Sc.)
<b>Instructor:</b>	Jukka Kiijärvi (D.Sc.)
<b>Degree:</b>	Master of Science in Technology
<b>Department:</b>	Department of Electrical Engineering and Energy Technology
<b>Degree Programme:</b>	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
<b>Major of Subject:</b>	Energy Technology
<b>Year of Entering the University:</b>	2010
<b>Year of Completing the Thesis:</b>	2013

**Pages: 98**

---

**ABSTRACT**

Internal combustion engines are used in road traffic and outside the roads. These engines are one significant source of particulate emissions. Particulates are formed in the cylinder, in which fuel-air mixture burns imperfectly. The smallest particulates have the most detrimental effects on the human health. They may penetrate into the cardiovascular and even cerebrovascular system via respiratory organs.

The aim of this thesis was to investigate how lubricant oil, lubricant oil additive and different fuels affect the exhaust particles, soot and gaseous emissions in an off-road diesel engine. The experiments were conducted with a modern, high-speed off-road diesel engine without exhaust gas aftertreatment. The exhaust gas particle number, size distribution and mass were measured in the laboratory conditions with different exhaust measurement methods.

The results indicated that there were no considerable differences in the particle size distributions between different lubricant oils. The effects of the lubricant oil additive on the exhaust particles and gaseous emissions were small after the engine had been run for 75 hours. When using fossil diesel fuel there were less particles under 30 nm in the exhaust gas compared to using rapeseed or soybean methyl ester. There were fewer particles between 70–100 nm when methyl esters were used. Particle mass emission and the combined emissions of nitrogen oxides and hydrocarbon were the smallest when hydrotreated vegetable oil was used.

---

**KEYWORDS:** Diesel engine, exhaust, particle size distribution, lubricant, biofuel

## 1. JOHDANTO

Ilmasto vaikuttaa ihmisen elinolosuhteisiin maapallolla. Käynnissä olevan ilmastonmuutoksen keskeisimpänä uhkana on, että maapallon keskilämpötila nousee merkittävästi nykyhetkeen verrattuna. Ilmaston lämpenemisen syyksi on oletettu, että kasvihuonekaasujen pitoisuudet ovat lisääntyneet ilmakehässä. Hiilidioksidi on merkittävin kasvihuonekaasu.

Maapallon väkiluvun kasvu lisää energian kokonaiskulutusta. Hiilidioksidia syntyy, kun energiaa tuotetaan fossiililla polttoaineilla. Samalla tuotetaan muita päästöjä, kuten esimerkiksi pienhiukkaspäästöjä. Pienhiukkaspäästöt vaikuttavat ihmisen terveyteen. Anderson, Thundiyil ja Stolbach (2012) mainitsevat tutkimuksista, joissa pienhiukkasten on todettu vaikuttavan sydän- ja verisuonijärjestelmään. Lisäksi pienhiukkaset saattavat vaikuttaa hengitykseen sekä aivoverenkiertoon.

Kasvihuonekaasuja voidaan vähentää siten, että uusiutuvilla energiamuodoilla korvataan fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Yksi tärkeimmistä fossiilista polttoaineista maapallolla on öljy, joka on vähenemässä (Demirbas 2008: 111). Siksi raakaöljyn korvaamiseksi etsitään jatkuvasti muita vaihtoehtoisia polttoaineita, joita voidaan tuottaa kannattavasti. Tärkeimpiä tavoiteltavia ominaisuuksia vaihtoehtoisille polttoaineille ovat raaka-aineiden uusiutuvuus sekä vähäpäästöisyys. Biopolttonesteet ovat liikennekäytössä yksi vaihtoehto fossiilisille polttoaineille.

Dieselmootoreissa voidaan käyttää eri tavoin tuotettuja biopolttonesteitä. Esimerkiksi biodiesel on kasviöljyjen tai eläinrasvojen monoalkyyliesteri, joka on valmistettu transesteröintimenetelmällä. Tällä hetkellä biopolttonesteitä tuotetaan pääosin rypsiöljystä, soijapavuista ja palmuöljystä. Rypsiöljystä ja metanolista valmistetaan rypsimetyyliesteriä (engl. rapeseed methyl ester), joka on tavallisin biodieselpolttoneste Euroopassa. Yhdysvalloissa puolestaan soijametyyliesteri (engl. soybean methyl ester) on yleisin biodieselpolttoneste. Sitä valmistetaan soijapavuista ja metanolista. (Demirbas 2008: 114-115.)

Eläinrasvojen tai kasviöljyjen vetykäsittely (engl. hydrotreated vegetable oil) on vaihtoehtoinen menetelmä valmistaa biopolttonestettä. Valmistuksessa käytetään vetyä hapenpoistamiseen triglyseridistä eli kasviöljyn rasvasta tai eläinrasvasta. Vetykäsiteltyä kasviöljyä kutsutaan myös uusiutuvaksi dieseliksi. (Aatola, Larmi, Sarjovaara & Mikkonen 2009: 1251–1252.)

Biodieseliä voidaan käyttää joko sellaisenaan tai dieselöljyyn sekoitettuna. Biodieselin käyttö vähentää dieselmoottorin pakokaasupäästöjä. Pakokaasupäästöjen määrän pieneminen riippuu siitä, käytetäänkö pelkkää biodieseliä, sekoitetaanko biodieseliä dieselöljyyn sekä sekoitussuhteesta. (Schröder, Bünger, Munack, Knothe & Krahl 2012.)

Demirbas (2008: 151, 157) on verrannut biodieselpolttonesteiden ja fossiilisen diesel-polttoaineen ominaisuuksia. Biodieselin etuja verrattuna fossiilinen dieseliin ovat korkeampi setaaniluku ja palamisen suurempi hyötysuhde sekä hyvä voitelevuus. Biodiesel sisältää vähemmän rikkiä ja aromaattisia yhdisteitä kuin fossiilinen diesel. Lisäksi biodieseliä voidaan tuottaa kotimaassa, jolloin riippuvuus tuontiöljystä pienenee. Toisaalta biodieseleillä on suurempi viskositeetti ja pienempi energiasisältö kuin fossiilisella dieselillä. Biodieseleiden same- ja jähmepisteet sekä typenoksidipitoisuudet pakokaasussa ovat suuremmat. Muita biodieselin huonoja puolia ovat korkea hinta ja sopimattomuus joihinkin dieselmoottoreihin.

Dieselmoottoreita koskevat päästörajoitukset, jotka rajoittavat sekä pakokaasun pienhiukkaspäästöä että hiilimonoksidi-, typenoksidi- ja hiilivetypäästöä. Eri maanosissa on omat rajoituksensa. Rajoitukset on jaoteltu moottorien käyttökohteiden ja teholuokkien mukaan. Ylimmät sallitut päästörajat ilmoitetaan grammoina kilowattituntia kohden.

Dieselmoottorin pakokaasut sisältävät pienhiukkasia. Nämä pienhiukkaset syntyvät, kun polttoainetta palaa moottorin sylinterissä. Pienhiukkaset ovat pääosin peräisin polttoaineesta. Osa pienhiukkasista on peräisin voiteluöljystä sekä moottorin kulumisesta. Pienhiukkasilla tarkoitetaan kaikkea kiinteää tai nestemäistä materiaalia, joka kyetään keräämään mihin tahansa suodattimeen. Yhdysvaltain pakokaasulainsäädännössä tarken-

netaan, että pienhiukkaset on kerättävä laimennetusta pakokaasusta, jonka lämpötila on enintään 52 °C. (Eastwood 2008: 6; Turunen & Niemi 2002: 619.)

Dieselmoottorin pakokaasun pienhiukkasia voidaan tutkia ottamalla näyte pakokaasusta. Pakokaasunäyte on laimennettava, jotta analysaattoriin tulevan näytteen pienhiukkaspitoisuus vähenee ja jotta näyte jäähtyy. Lisäksi laimentamisen avulla hallitaan pienhiukkasten kemiallista käyttäytymistä. Näytteenoton jälkeen pakokaasun pienhiukkasista voidaan mitata erilaisia parametreja. Mittalaitteilla kyetään mittaamaan hiukkasten kokonaisuudessa, lukumäärä, kokojakauma, hiilipitoisuus, pinta-ala, tiheys, muoto tai rakenne. (Burtscher 2005: 906, 912.)

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia voiteluöljyn, voiteluöljyn lisäaineen sekä erilaisten polttonesteiden vaikutusta työkonedieselmoottorin pakokaasun pienhiukkasiin, savutukseen ja kaasumaisiin päästöihin. Pakokaasun pienhiukkasista mitattiin lukumäärä, kokojakauma ja massa. Kokeelliset tutkimukset tehtiin Vaasassa tutkimuskeskus Technobothnian moottorilaboratoriossa. Tutkittu koemoottori oli nopeakäyntinen, nelitahtinen, nelisyylinterinen, työkonekäyttöön tarkoitettu 4,4 litran dieselmoottori. Moottori oli turboahdettu, välijäähdytetty sekä yhteispaineruiskutuksella varustettu.

Luvussa 2 on teoriaa pienhiukkasista sekä työkonedieselmoottorien päästönormit. Lisäksi siinä on käsitelty tämän tutkimuksen mittauksiin liittyvää teoriaa sekä tutkimustavoitteeseen liittyviä aiempia tutkimuksia. Luvussa 3 on esitelty tämän tutkimuksen koejärjestelyt, koe- ja mittalaitteistot, koematriisi sekä tutkimuksen kulku. Luvussa 4 ovat tämän tutkimuksen tulokset, joita arvioidaan luvussa 5. Tuloksista tehdyt johtopäätökset on esitelty luvussa 6. Tutkimuksen yhteenveto on luvussa 7.

## 2. PIENHIUKKASET

Dieselmoottorien pakokaasupäästöjä pyritään jatkuvasti vähentämään. Oleellimmat päästökomponentit ovat pienhiukkaset ja typenoksidit. Dieselmoottorien haitallisimpina päästöinä pidetään pienhiukkasia. Siksi onkin tutkittu, miten moottorin suunnittelutekijät ja pakokaasun jälkikäsitteily vaikuttavat pienimpien hiukkasten syntyyn. Kun pienhiukkaset kasaantuvat ja adsorptoituvat muiden hiukkasten kanssa, muodostuu ilmakehään monimutkaisia aerosoleja. Polttomoottorien pienhiukkasjakaumiin on kiinnitetty entistä enemmän huomiota, sillä kaikkein pienimmät hiukkaset voivat vaikuttaa haitallisesti ihmisen terveyteen. Terveysvaikutuksista johtuen pienhiukkaspäästöjä säädelään maailmanlaajuisesti. Pienhiukkasten kemiallisia muodostumistapoja ja niiden fysikaalisia ominaisuuksia ei vielä täysin tunneta. (Majewski & Khair 2006: 126–134.)

### 2.1. Kokoluokat

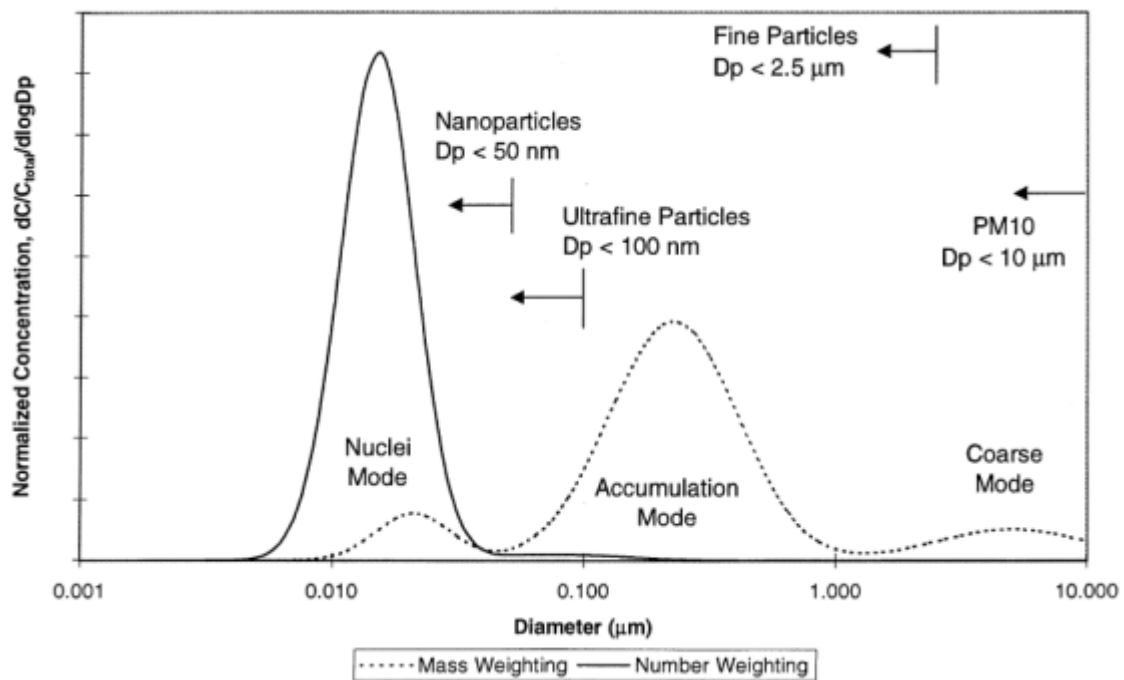
Pakokaasun pienhiukkaset voidaan luokitella koon mukaan. Ensin hiukkasille on määriteltävä geometrinen mitta, halkaisija. Halkaisijalle on olemassa erilaisia määritelmiä. (Eastwood 2008: 10–11.) Hiukkasen sähköinen liikkuvuushalkaisija määritellään seuraavasti:

Tutkittavan hiukkasen sähköinen liikkuvuushalkaisija on yhtä suuri kuin homogeenisessä sähkökentässä samalla nopeudella liikkuvan ympyrämuotoisen hiukkasen halkaisija (DeCarlo, Slowik, Worsnop, Davidovits & Jimenez 2004: 1190). Kun tässä tutkimuksessa mainitaan hiukkasen halkaisija, tarkoitetaan tällä juuri hiukkasen sähköistä liikkuvuushalkaisijaa.

Pienhiukkaset voidaan erotella selvästi kolmeen eri kokoluokkaan eli moodiin: nukleatiomoodiin (engl. nuclei mode), akkumulaatio- eli kertymämoodiin (accumulation mode) ja karkeaan moodiin (coarse mode). Tätä kolmijakoa käytetään pienhiukkasille, jotka ovat peräisin eri lähteistä ja jotka esiintyvät ilmakehässä. (Eastwood 2008: 25.)

Kertymämodia kutsutaan nokimoodiksi, kun on kyse dieselmoottorin pakokaasusta. Dieselmoottorin pakokaasun pienhiukkaskokojakauma koostuu pääosin kahdesta moodista: nukleaatiomoodista ja nokimoodista. Tyypillisesti nukleaatiomoodiin kuuluvan hiukkasen halkaisija on alle 50 nm. (Vaaraslahti, Keskinen, Giechaskiel, Solla, Murtonen & Vesala 2005: 8497.) Hiukkanen, jonka halkaisija on yli 50 nm, kuuluu nokimoodiin.

Kuvassa 1 ovat pienhiukkasten kokoluokat sekä tyypilliset massa- ja lukumääräosuudet dieselmoottorin pakokaasussa. Hienojakoisten partikkeleiden (engl. fine particles) muodostumisessa on kaksi vaihetta. Aluksi hiukkanen nukleoituu eli syntyy, jolloin hiukkanen on nukleaatiomoodissa. Nukleoituneesta hiukkasesta tulee nokimoodin hiukkanen, kun hiukkasen koko kasvaa. (Petrović, Janković, Miroljub, Jovanović & Knežević 2011: 916.)



**Kuva 1.** Pienhiukkasten kokoluokat sekä tyypilliset massa- ja lukumääräosuudet dieselmoottorin pakokaasussa (Kittelson 1998: 577).

Nukleaatiomoodin partikkelit ovat pallomaisia toisin kuin nokimoodin partikkelit. Nukleaatiomoodin hiukkasista vain pieni osa on olomuodoltaan kiinteää, kuten hiiltä tai metallista tuhkaa, joka on peräisin voiteluöljyn lisäaineista tai polttoaineen metallijäämistä. Pienhiukkaspäästöissä nukleaatiomoodin partikkeleita on lukumääräisesti paljon. Silti ne muodostavat vain pienen osan pienhiukkaspäästöjen kokonaismassasta. (Majewski & Khair 2006: 127; Liati, Spiteri, Eggenschwiler & Vogel-Schäuble 2012: 2.)

Nokimoodin partikkelit puolestaan muodostuvat, kun hiili ja muut kiinteät aineet kiinnittyvät toisiinsa. Hiileen yhdistyy pääosin raskaita hiilivetyjä. Lisäksi nokimoodin partikkeleiden pinnoille tiivistyy ja adsorboituu kaasuja. Partikkelit voivat sisältää myös rikkiyhdisteitä, metallista tuhkaa sekä sylinteristä irronnutta materiaalia. (Majewski & Khair 2006: 127.)

Karkean moodin palamisperäiset partikkelit muodostuvat nukleaatio- ja nokimoodin partikkeleista. Partikkelit, jotka kuuluvat karkeaan moodiin, voivat muodostua esimerkiksi pakokanavassa. Tällöin hiukkaset, jotka tarttuvat pakokanavan seinämiin, keräävät muita hiukkasia ympärilleen ja kasvavat suuremmiksi. Karkean moodin partikkeleita, joita vapautuu pakokanavan seinämistä, syntyy hyvin epäsäännöllisesti. (Eastwood 2008: 42–43.)

## 2.2. Kokojakauma

Useamman kuin yhden kokoisia hiukkasia sisältävää kaasua sanotaan polydispersiksi kaasuksi. Polydispersin kaasun hiukkaskokojakaumaa voidaan kuvata tilastollisesti niin kuin mitä tahansa muuta populaatiota. Hiukkaskokojakaumilla kyetään kuvaamaan hiukkasten lukumääräjakaumaa, tilavuusjakaumaa, pinta-alajakaumaa tai massajakaumaa (Eastwood 2008: 12–13.) Dieselmoottorin pakokaasusta mitataan usein sekä pienhiukkaslukumäärä että hiukkasmassa.

Logaritmisella asteikolla olevaa jakaumaa, joka on normaalijakauman muotoinen, sanotaan log-normaaliksi jakaumaksi. Pienhiukkasten kokojakauma lähenee log-normaalialia,

kun mitattuja hiukkasia on riittävän paljon. (Hiukkastieto 2012.) Pienhiukkaslukumäärän  $N$  yhteys hiukkaslukumääräjakauman funktioihin  $n(D_p)$  ja  $n(\log D_p)$  voidaan selvittää matemaattisesti. Tästä eteenpäin esitetty teoria hiukkaslukumäärien matemaattisesta esitystavasta noudattaa Eastwoodin (2008: 13–14) esitystä.

Teoriassa otetaan ensin yksikkötilavuus pakokaasua ja lasketaan yksikkötilavuudessa olevien hiukkasten lukumäärä. Jos yksikkötilavuus pakokaasua sisältää hiukkasia, joiden liikkuvuushalkaisijat vaihtelevat välillä  $D_p - D_p + dD_p$ , on hiukkasten lukumäärä  $n(D_p)dD_p$ .

Hiukkasten kokonaislukumäärä  $N$  pakokaasun yksikkötilavuutta kohden saadaan, kun hiukkasten lukumäärä  $n(D_p)dD_p$  integroidaan välillä  $0 - \infty$  eli

$$N = \int_0^{\infty} n(D_p) dD_p \quad (1)$$

Hiukkaslukumäärä on mahdollista esittää myös logaritmisesti. Eastwood (2008) mainitsee logaritmisestä esitystavasta edesauttavan hiukkaslukumääräesityksen havainnollisuutta, koska hiukkasmäärien suuruusluokat vaihtelevat paljon hiukkaskoon funktiona.

Logaritmistä esitystä varten liikkuvuushalkaisija  $D_p$  korvataan uudella muuttujalla  $\log D_p$ . Tällöin jos yksikkötilavuus pakokaasua sisältää hiukkasia, joiden liikkuvuushalkaisijat vaihtelevat välillä  $\log D_p - \log D_p + d\log D_p$ , on hiukkasten lukumäärä  $n(\log D_p)d\log D_p$ .

Koska muuttuja  $D_p$  korvattiin muuttujalla  $\log D_p$ , integroidaan hiukkasten lukumäärä  $n(\log D_p)d\log D_p$  nyt välillä  $-\infty - \infty$  eli

$$N = \int_{-\infty}^{\infty} n(\log D_p) d\log D_p \quad (2)$$

Jos hiukkasten lukumäärä ei riipu lukumääräjakauman esityksestä ja jos tarkastellaan edelleen samaa yksikkötilavuutta kuin edellä, pätee

$$dN = n(D_p)dD_p = n(\log D_p)d\log D_p \quad (3)$$

Yhtälöstä 3 saadaan hiukkaslukumäärälle esitystapa, jota käytetään useasti hiukkaslukumääriä esittämissä kuvaajissa

$$n(\log D_p) = \frac{dN}{d\log D_p} \quad (4)$$

Kittelson, Watts ja Johnson (2006: 927) luettelevat useita koejärjestelystä riippuvia tekijöitä, jotka vaikuttavat pakokaasun pienhiukkaskokojakaumaan. Näitä ovat moottorin käyttösykli, polttoaineen ja voiteluöljyn koostumus, pakokaasujärjestelmä, hiukkasnäytteenotto sekä olosuhteet, joissa hiukkasnäyte otetaan. Lisäksi hiukaskokojakauman mittaamisessa on merkittävää moottorin käynnin ja näytteenoton vakaus.

### 2.3. Kemiallinen koostumus

Pienhiukkaset voidaan ryhmitellä viiteen eri jakeeseen kemiallisen koostumuksen mukaan. Tällöin jakeet sisältävät tuhkaa, hiiltä, orgaanisia yhdisteitä, sulfaatteja sekä nitraatteja. Hiukkaset, jotka sisältävät orgaanisia yhdisteitä, sulfaatteja tai nitraatteja, ovat haihtuvia. Tällaiset hiukkaset syntyvät aluksi moottorin palotilassa, jossa hiukkaset kuumenevat ja haihtuvat kaasumaisiksi komponenteiksi. (Eastwood 2008: 44–51.)

Lämpötilasta ja muista olosuhteista riippuen haihtuneet hiukkaset saattavat jäädä kaasumaiseen olomuotoon, tiivistyä kiinteiden hiukkasten pinnalle tai nukleoitua uusiksi hiukkasiksi (Burtscher 2005: 899). Pakoputkistossa hiukkasista kaasuksi haihtuneet komponentit muuttuvat takaisin kaasusta hiukkasiksi, kun pakokaasun lämpötila laskee (Eastwood 2008: 51).

Pienhiukkasten luokittelu kemiallisen koostumuksen mukaan ei ole välttämättä yksiselitteistä. Majewski ja Khair (2006: 128) luokittelevat pienhiukkaset kiinteään ja orgaaniseen jakeeseen sekä sulfaattihiukkasiin, kuten kuvassa 2 on esitetty. Dieselmoottorin hiukaspäästöjen kiinteä osa sisältää enimmäkseen hienojakoista hiiltä. Hiilipartikkelit muodostuvat moottorin palotilassa. Tämän jälkeen hiilipartikkelit poistuvat pakokanavaan, hapettuvat ja kasautuvat suuremmiksi partikkeleiksi, noeksi. (Majewski & Khair 2006: 128–129.)

Nokihiukkaset aiheuttavat savutusta, joka rajoittaa osaltaan dieselmoottorista otettavaa tehoa. Noen syntymistä ehkäistään riittävällä ilmakertoimella sekä hyvällä ilman ja polttoaineen sekoittumisella. Nokihiukkasia muodostuu myös polttoainesuihkun osuessa palotilan seinämille. (Turunen & Niemi 2002: 598.)



**Kuva 2.** Pienhiukaspäästöjen ryhmittely eri jakeisiin.

Tuhka ja sylinteristä irronneet metallihiukkaset lisäävät kiinteän jakeen määrää. Pakokaasussa oleva tuhka sisältää sulfaatteja, fosfaatteja, kalsiumoksidgeja, sinkkiä, magnesi-

umia ja muita metalleja. Tuhkan sisältämät metallit ovat peräisin voiteluöljyn lisäaineista, joita palaa moottorin palotilassa. Kun moottori kuluu, tulee voiteluöljyn mukana palotilaan rautaoksideja sekä kupari-, kromi- ja alumiinihiukkasia. Pieni osa tuhkan sisältämistä metalleista voi olla peräisin polttoaineesta tai korroosiosta. (Majewski & Khair 2006: 128–129; Liati ym. 2012: 2.)

Partikkeleiden mahdollisesti sisältämät rikkiyhdisteet ovat syntyneet dieselpolttoaineen tai voiteluöljyn sisältämästä rikistä. Rikki poistuu moottorin palotilasta pääosin rikkidioksidina sekä osin rikkitrioksidina. Pienhiukkasten koostumus vaihtelee suuresti moottoritekniikan, mittausolosuhteiden sekä polttoaineen rikkipitoisuuden mukaan. (Majewski & Khair 2006: 128–129.)

Dieselmoottorin hiukkaspäästöjen orgaaninen jae koostuu hiilivedyistä, jotka ovat adsorboituneet hiilipartikkeleiden pinnalle. Hiilivedyt saattavat esiintyä myös hienoina pisaroina. Suurin osa orgaanisesta jakeesta höyrystyy erityisesti suurilla kuormilla, kun moottorin ja pakokaasun lämpötilat ovat korkeat. Orgaanisen jakeen määrä on suurimmillaan pienellä kuormalla, kun lämpötilat ovat matalat. Moottorin käyttöolosuhteet, kuten käyttösyklit, vaikuttavat suuresti orgaanisen jakeen määrään. Orgaaninen jae sisältää myös osittain palaneita hiilivetyjä. Ne ovat peräisin voiteluöljystä sekä vähäisesti dieselpolttoaineesta. (Majewski & Khair 2006: 130.)

Lisäksi orgaaninen jae sisältää dioksiineja sekä suurimman osan PAH-yhdisteistä (engl. polycyclic aromatic hydrocarbon). Raskaista hiilivedyistä syntyneiden PAH-yhdisteiden olomuoto on joko kaasumainen tai kiinteä. PAH-yhdisteiden epäillään aiheuttavan syöpää ja geneettisiä muutoksia. Dioksiinit ovat klooria sisältäviä PAH-yhdisteitä, jotka ovat erittäin myrkyllisiä. (Majewski & Khair 2006: 131–132.)

Dieselmoottorissa dieselpolttoaineen ja voiteluöljyn sisältämä rikki vaikuttaa hiukkaspäästöjen sulfaattipartikkeleiden muodostumiseen. Pääosin sulfaattipartikkelit muodostuvat, kun rikkihappomolekyylit ( $H_2SO_4$ ) ja vesimolekyylit ( $H_2O$ ) yhdistyvät. Sulfaattipartikkelit saattavat sisältää sulfaattisuoloja. Suoloista yleisin on kalsiumsulfaatti. Sulfaattipartikkeleiden muodostuminen riippuu veden ja rikkihapon höyrönpaineista. Höy-

rynpaineisiin vaikuttavat dieselpolttoaineen rikki- ja rikkihiokkipitoisuus sekä se, kuinka paljon rikki- ja rikkihiokkipitoisuus muodostuu. Lisäksi veden ja rikkihiokkipitoisuuden höyrynpaineisiin vaikuttavat moottorin ilmakerroin, lämpötila ja suhteellinen kosteus. Kalsiumsulfaatteja voi muodostua rikkihiokkipitoisuuden ja voiteluöljyn lisäaineena olevan kalsiumin vuorovaikutuksessa. Sulfaatteja saattaa muodostua myös silloin, kun rikkihappo reagoi moottorin pakosarjassa olevan tuhkan kanssa. (Majewski & Khair 2006: 112, 133.)

#### 2.4. Päästönormit

Uusien dieselmoottorien päästörajat määritellään standardeissa. Euroopassa työkonedieselmoottorien pakokaasupäästöille on voimassa EU Stage IIIB -standardi, joka tuli voimaan tammikuussa 2012. Seuraava EU Stage IV -standardi tulee voimaan vuoden 2014 aikana. Vastaavasti US Tier 4 -standardi määrittelee rajoitukset työkonedieselmoottorien pakokaasupäästöille Yhdysvalloissa. US Tier 4 -standardin asteittainen käyttöönotto koskee vuosia 2008–2015. Standardit koskevat uusia moottoreita, jotka valmistetaan standardien voimassaoloaikoina. Taulukossa 1 on annettu standardien ominaispäästörajat 101 kW:n tehoiselle työkonedieselmoottorille, jota tässä tutkimuksessa käytettiin. Eurooppalaisissa standardeissa pienhiukkasmassan ominaispäästörajaksi määritellään tällöin 25 mg/kWh ja US Tier 4 -standardissa 20 mg/kWh.

**Taulukko 1.** Voimassa olevat päästönormit Euroopassa ja Yhdysvalloissa (DieselNet 2012a; 2012b).

Standardi	Tehoalue (kW)	Voimaan	CO (g/kWh)	NMHC (g/kWh)	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	PM (g/kWh)
EU Stage IIIB	75 ≤ P < 130	2012	5,0	0,19	3,30	0,025
EU Stage IV	56 ≤ P < 130	2014	5,0	0,19	0,40	0,025
US Tier 4	56 ≤ P < 130	2012–2014	5,0	0,19	0,40	0,020

## 2.5. Pakokaasun laimentaminen pienhiukkasmittauksissa

Pienhiukkaspäästömittauksissa määritetään, miten paljon ja millaisia pienhiukkasia ilmakehään vapautuu. Erilaisiin mittausmenetelmiin vaaditaan pitkää pienhiukkasnäytteen keräysaikaa, sillä päästömäärät ovat usein pieniä. Pienhiukkasten mittaamista hankaloittaa se, että hiukkasten koot, koostumukset ja lukumäärät ovat epävakaita. Pienhiukkaset ovat jatkuvassa kemiallisessa vuorovaikutuksessa pakokaasun muiden päästökomponenttien kanssa. (Heywood 1988: 627.)

Pienhiukkaset eivät ole saavuttaneet lopullista olomuotoaan, kun palaminen sylinterissä on päättynyt ja pakokaasu poistuu sylinteristä. Pakosarjassa pienhiukkaset muuttavat muotoaan: ne kasvavat suuremmiksi, ja osa jää myös kiinni pakosarjan pintoihin. Pakosarjassa pienhiukkasten muodostumiselle on keskeistä pakokaasun laimeneminen. Pakokaasun laimeneminen ohjaa pakokaasun jäähtymistä ja sekoittumista pakosarjassa. (Eastwood 2008: 51.)

Kun pienhiukkasmittauksia tehdään laboratoriossa, käytetään pakokaasun laimentimia. Laimennin sekoittaa pakokaasua ja ilmaa, minkä tarkoituksena on mallintaa pakokaasun laimenemista ilman kanssa todellisessa ympäristössä. (Majewski & Khair 2006: 127.) Yleisesti laimentimissa sekoitetaan pakokaasua ja ilmaa kahdella vaihtoehdoisella toimintaperiaatteella. Toisinaan laimennetaan ensin koko pakokaasu, josta pakokaasunäyte otetaan. Vaihtoehdoisesti laimennetaan vain pakokaasunäyte, joka ensin otetaan pakokaasusta. Laboratoriopäästömittauksissa pakokaasun laimeneminen ei ole ääretöntä niin kuin todellisessa ympäristössä. Siksi laboratoriossa mitatut pienhiukkaspäästöt eivät vastaa identtisesti ilmakehään vapautuvia pienhiukkaspäästöjä. (Eastwood 2008: 51, 160)

## 2.6. Aiempia tutkimustuloksia

Tässä kappaleessa esitellään aiempia tutkimustuloksia voiteluöljyjen ja biopolttoneiden vaikutuksista dieselmoottoreiden pakokaasujen pienhiukkasiin.

### 2.6.1. Voiteluöljyn vaikutus

Voiteluöljy vaikuttaa moottorin pakokaasun pienhiukkaspäästöön, kun voiteluöljyä joutuu sylinterin palotilaan. Froelund ja Yilmaz (2004: 6) mainitsevat, että viskositeetti ja haihtuvuus saattavat olla merkittäviä voiteluöljyn ominaisuuksia, jotka vaikuttavat öljyn kulutukseen ja hiukkaspäästöön. Viskositeetti vaikuttaa öljyn kulkeutumiseen esimerkiksi sylinterin seinämän ja männän välissä. Voiteluöljyn haihtuvuus vaikuttaa puolestaan öljyn höyrystymiseen kuumilta pinnoilta työkierron aikana. Froelund ja Yilmaz (2004: 9) esittävät, että voiteluöljyn suuri viskositeetti ja vähäinen haihtuvuus vähentävät kumpikin voiteluöljyn kulutusta sekä voiteluöljystä muodostuvaa hiukkaspäästöä.

Jung, Kittelson ja Zachariah (2003) tutkivat voiteluöljyn vaikutusta nanopartikkeleihin dieselmoottorin pakokaasussa. Tutkittava dieselmoottori oli nelisylinterinen, nelitahtinen ja turboahdettu. Moottorin maksimiteho oli 93 kW pyörimisnopeudella 2400 r/min. Tutkimuksessa verrattiin kahta dieselpolttoainetta, joista toiseen oli lisätty 2 % voiteluöljyä. Dieselmoottoria ajettiin molemmilla polttoaineilla yhdessä kuormituspisteessä, jossa pyörimisnopeus oli 1400 r/min ja vääntömomentti 300 Nm. Tutkijat mittasivat pakokaasun hiukkaskokojakaumaa ja havaitsivat, että hiukkaslukumäärä kasvoi, kun polttoaineessa oli voiteluöljyä. Pakokaasussa oli lukumäärältään eniten kiinteitä, alle 30 nm:n kokoisia hiukkasia.

Dong, Shu ja Liang (2013) tutkivat kahden eri voiteluöljyn vaikutusta dieselmoottorin pienhiukkasten kokojakaumaan. Tutkittava dieselmoottori oli nelisylinterinen, nelitahtinen, turboahdettu ja suoraruiskutteinen. Moottorin maksimiteho oli 93 kW pyörimisnopeudella 2800 r/min. Tutkimuksessa verrattiin kahta kaupallista voiteluöljyä. Dieselmoottoria ajettiin molemmilla voiteluöljyillä 100 Nm:n kuormalla sekä täydellä kuormalla. Pyörimisnopeudet oli valittu väliltä 1200–2800 r/min 400 r/min välein.

Hiukkaskokojakaumaa mitattiin kokovälillä 5–1000 nm. Pääosa pienhiukkasista havaittiin kokoalueella 5–400 nm. Kokoalueella 400–1000 nm hiukkasten merkitys todettiin mitättömäksi vähäisten lukumäärien vuoksi. Tutkijat havaitsivat, että hiukkasten kokonaislukumäärä oli lähes sama eri voiteluöljyillä. Eri kuormilla mitatut hiukkaskokoja-

kaumat erosivat toisistaan. Hiukkaskokojakaumat olivat kaksi- tai kolmihuippuisia, kun kuormana oli 100 Nm. Täydellä kuormalla hiukkaskokojakaumat olivat enimmäkseen yksihuippuisia. Eri voiteluöljyillä hiukkaslukumäärien maksimikohdat sijaitsivat eri kokoväleillä. (Dong ym. 2013: 79–81).

#### 2.6.2. Biopolttonesteiden vaikutus

Lapuerta ym. (2008) ovat koonneet yhteen lukuisia tutkimuksia biopolttonesteiden vaikutuksista dieselmoottorin pakokaasupäästöön. He raportoivat esimerkiksi tuloksista, joissa rypsi- ja soijapohjaisilla biopolttonesteillä ajettaessa pakokaasu sisälsi vähemmän yli 40 nm:n kokoisia hiukkasia verrattuna vähärikkiseen fossiiliseen dieselpolttoaineeseen. Sitä vastoin biopolttonesteillä mitattiin enemmän alle 40 nm:n kokoisia hiukkasia verrattuna vähärikkiseen fossiiliseen dieselpolttoaineeseen.

Aiemmissä tutkimuksissa on todettu, että biopolttonesteiden korkea setaaniluku vähentää sekä hiilivety- että hiilimonoksidipäästöä, sillä palaminen alkaa aiemmin. Lisäksi biopolttonesteillä on suurempi happipitoisuus kuin fossiilisella dieselpolttoaineella, mikä parantaa polttonesteen palamista sylinterissä. Kun polttonesteen palamisen osana on enemmän happea, vähenevät hiilivety- ja hiilimonoksidipäästöt. (Lapuerta ym. 2008: 215–217.) Heywood (1988: 592) kuitenkin toteaa, että hiilimonoksidipäästöillä on vähäinen merkitys dieselmoottoreissa, jotka toimivat aina laihalla polttoaineilmaseoksella. Typenoksidipäästöt nousivat hieman, kun polttoaineena käytettiin biopolttonesteitä (Lapuerta ym. 2008: 219).

Hassaneen, Munack, Ruschel, Schröder ja Krahl (2012) tutkivat, miten rypsimetyyliesterin käyttö vaikutti dieselmoottorin pakokaasupäästöihin sekä polttoaineen kulutukseen. Tutkittava dieselmoottori oli kuusisylinterinen, nelitahtinen, ahtamaton ja vesijäähdytteinen. Tutkimuksessa rypsimetyyliesteriä verrattiin fossiiliseen dieselpolttoaineeseen. Tutkijat havaitsivat, että rypsimetyyliesterin käyttö vähensi pienhiukkasmassapäästöä yli 60 %, hiilimonoksidipäästöä yli 70 % sekä hiilivetyypäästöä yli 50 % verrattuna fossiilisen dieselin käyttöön. Sitä vastoin rypsimetyyliesterin typpioksidipäästöt olivat huomattavasti suuremmat kuin dieselpolttoaineella.

Hassaneenin ym. (2012) tutkimuksessa pakokaasusta mitattujen pienhiukkasten koko vaihteli välillä 10–300 nm. Suurin osa pienhiukkasista havaittiin kokoalueella 10–30 nm, kun polttoaineena käytettiin rypsimetyyliesteriä. Fossiilisella dieselpolttoaineella suurin osa pienhiukkasista havaittiin kokoalueella 30–200 nm. Kokoalueella 10–30 nm hiukkasia oli lähes sata kertaa niin paljon kuin dieselpolttoainetta käytettäessä. (Hassaneen ym. 2012: 129–130.)

Soyhan, Buyukkaya ja Gokalp (2011) tutkivat, miten soijametyyliesterin käyttö vaikuttaa dieselmoottorin pakokaasupäästöihin sekä pakokaasun lämpötiloihin, suorituskykyyn ja polttoaineen kulutukseen. Tutkittava traktorin dieselmoottori oli nelisylinterinen, nelitahtinen, ahtamaton ja suoraruiskutteinen. Soijametyyliesteriä verrattiin fossiiliseen dieselpolttoaineeseen. Tutkijat havaitsivat, että pakokaasusta mitattu hiilimonoksidipäästö väheni 52 %, mutta typenoksidipäästöt kasvoivat 15,5 %. Savutus väheni. (Soyhan ym. 2011.)

### 3. KOEJÄRJESTELYT

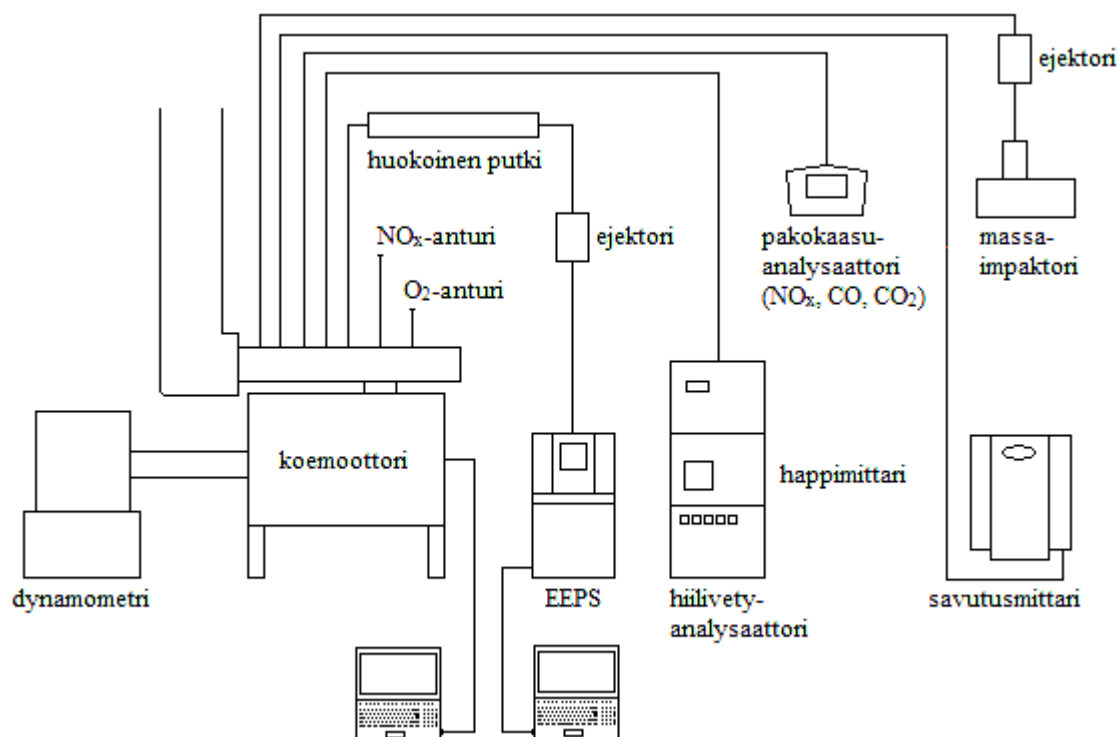
Tässä luvussa esitellään koemoottori, moottoridynamometri sekä tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet toimintaperiaatteineen. Tämän jälkeen selostetaan tutkimuksen kulku. Kaikki tässä diplomityössä esiteltävät mittaukset tehtiin Vaasassa tutkimuskeskus Technobothnian moottorilaboratoriossa. Kuvassa 3 on näkymä moottorilaboratoriosta.

Kuvassa 4 on kaavio koe- ja mittalaitteistosta. Mittausten aikana koe- ja mittalaitteistoon oli yhdistetty muitakin mittalaitteita, joiden toimintaa ja joilla saatuja tuloksia ei tässä työssä käsitellä. Muita mittaustuloksia käsitellään TREAM-tutkimushankkeen toisissa raporteissa ja julkaisuissa.



**Kuva 3.** Moottorilaboratorio.

Mittausten avulla haluttiin selvittää eri voiteluöljyjen, voiteluöljyn lisäaineen sekä rypsi- ja soijametyyliesterin sekä vetykäsittelyn kasviöljyn vaikutus työkonedieselmoottorin pienhiukkaspäästöihin.



**Kuva 4.** Koe- ja mittalaitteistokaavio.

### 3.1. Koemoottori ja moottoridynamometri

Koemoottorina käytettiin AGCO Powerin valmistamaa nopeakäyntistä nelitahtista työkonedieselmoottoria. Moottorissa on hukkaportilla varustettu turboahdin, ahtoilman jäähdytys ja Boschin yhteispaineruiskutus. Koemoottorissa ei käytetty pakokaasun jälkikäsittelyä. Taulukossa 2 on annettu tietoja koemoottorista.

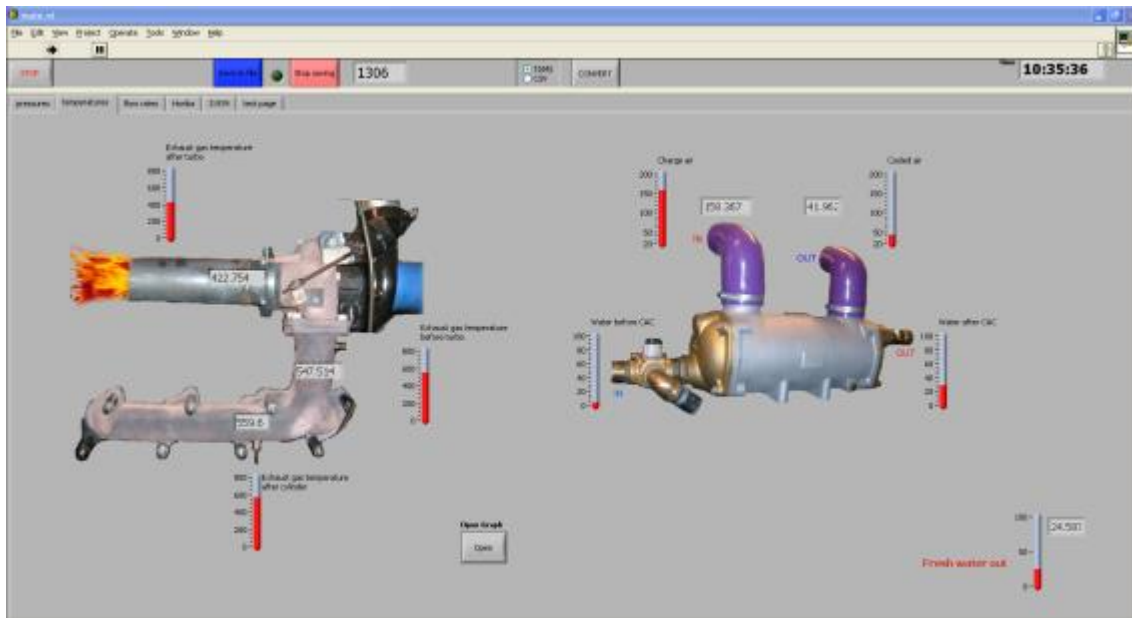
Koemoottorin jäähdytysveden, imuilman ja pakokaasun lämpötiloja, imuilman ja pakokaasun paineita sekä imuilma- ja polttoainevirtaa seurattiin graafiseen LabVIEW-ohjelmointiympäristöön toteutetulla ohjelmalla. Kuvassa 5 on ohjelman käyttöliittymä.

Tutkimusten aikana moottorin elektronisen ohjausyksikön parametrit pidettiin vakioina. Ohjausyksikön toimintaa seurattiin WinEEM4-ohjelmalla.

## Taulukko 2. Koemoottorin tietoja.

Malli	44AWI
Sylinteriluku	4
Sylinterin halkaisija (mm)	108
Iskunpituus (mm)	120
Iskutilavuus (dm <sup>3</sup> )	4,4
Puristussuhde	16,5
Nimellispyörimisnopeus (r/min)	2200
Maksimiteho nimellispyörimisnopeudella (kW)	101
Maksimimomentti nimellispyörimisnopeudella (Nm)	455 <sup>a</sup>
Maksimimomentti pyörimisnopeudella 1500 r/min (Nm)	583 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> arvot Teboil Diesel -dieselpolttoaineelle

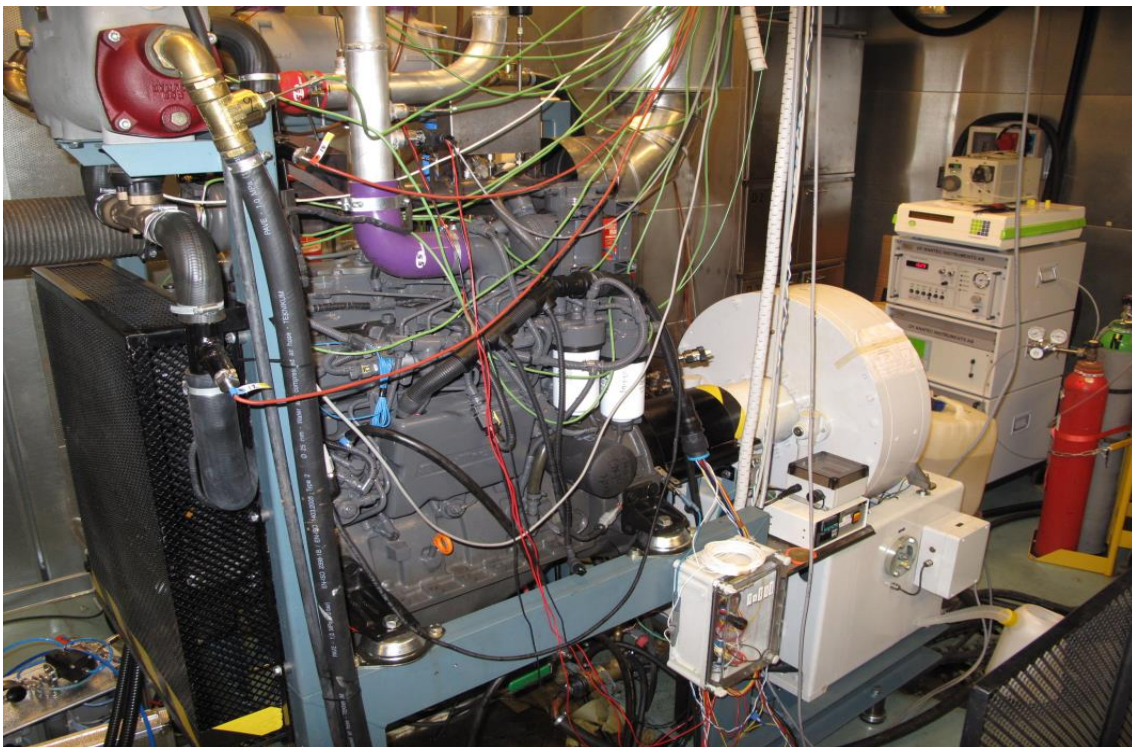


**Kuva 5.** Ohjelma moottorin lämpötilojen, paineiden ja virtausten seuraamiseksi.

Taulukossa 3 on annettu tietoja Horiban pyörrevirtadynamometrissä, jolla koemoottoria kuormitettiin. Kuvassa 6 on valokuva moottorilaboratoriossa sijainneista koemoottorista ja moottoridynamometrissä.

**Taulukko 3.** Pyörrevirtadynamometrin tietoja (Horiba 2007: 55).

Malli	WT300
Maksimipyörimisnopeus (r/min)	7500
Maksimimomentti (Nm)	1200
Teho (kW)	300
Paino (kg)	670



**Kuva 6.** Koemoottori ja moottoridynamometri moottorilaboratoriossa.

Pyörrevirtadynamometrin toiminta perustuu magneettikentässä olevaan levyroottoriin, jota tutkittava moottori pyörittää. Dynamometrin sisällä magneettikentän vuo on yhden-suuntainen levyroottorin akselin kanssa. Magneettikentän voimakkuus määrää vääntö-

momentin, joka dynamometriin kytketyn moottorin on tuotettava. Moottorin tuottama työ muuttuu lämmöksi roottorissa, jota jäähdytetään vedellä. (Stone 1999: 505.) Koe-moottoria voitiin siis kuormittaa halutusti dynamometrin magneettikentän voimakkuutta säätämällä.

### 3.2. Mittalaitteet ja mittausmenetelmät

Seuraavissa kappaleissa esitellään tehdyt mittaukset sekä mittalaitteet toimintaperiaatteen. Koematriisina käytettiin koemoottorille tarkoitettua ISO-standardin mukaista sykliä, jonka mukaan koemoottoria ajettiin mittausten aikana. Koematriisi on esitetty kappaleessa 3.2.5. Taulukossa 4 on esitetty tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet sekä laitteilla mitatut päästökäskomponentit.

**Taulukko 4.** Mittalaitteet ja mitatut päästökäskomponentit.

Mittalaite	Päästökäskomponentti
TSI EEPS 3090	Pienhiukkaslukumäärät ja -kokojakaumat
Dekati PM10 Impactor	Pienhiukkasmassa
AVL 415 S	Savutus
TSI CA-6203	NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub>
WDO UniNO <sub>x</sub> -tunnistin	NO <sub>x</sub> , λ
Siemens Oxymat 61	O <sub>2</sub>
J.U.M. VE7	Hiilivedyt

#### 3.2.1. Pienhiukkaslukumäärä ja hiukkaskokojakauma

Pakokaasun pienhiukkaslukumäärä ja hiukkaskokojakauma mitattiin TSI EEPS 3090 -spektrometrillä (Engine Exhaust Particle Sizer<sup>TM</sup>). Spektrometrillä voitiin mitata pienhiukkasia, joiden liikkuvuushalkaisija on välillä 5,6–560 nm. EEPS-spektrometriin johdetaan moottorin pakokanavasta laimennettua pakokaasua, jonka sisältämät pienhiukkaset varataan koronavaraajalla positiivisesti. Varautuneet hiukkaset johdetaan lähelle po-

sitiivisesti varautunutta elektrodiä, joka sijaitsee pystyssä spektrometrin keskellä. Tällöin positiivisesti varatut hiukkaset erkanevat spektrometrin ulommille elektrodeille, joille ne sijoittuvat hiukkasten sähköisen liikkuvuuden perusteella. (Petrović ym. 2011: 927–928.)

Hiukkaslukumäärä ja hiukkaskokojakauma mitattiin laimennetusta pakokaasusta. Mittausten aikana pakokaasunäyte laimennettiin kahdesti, ensin huokoisessa putkessa ja tämän jälkeen ejektorissa. EEPS-spektrometri oli yhteydessä tietokoneeseen, jolla käytettiin spektrometrin mittaushjelmaa. Mittauksen aikana ohjelmalla seurattiin pienhiukkaslukumäärää ja hiukkaskokojakaamaa. Mitattu pienhiukkaslukumäärä kerrottiin laimennussuhteella, jotta se vastasi raakapakokaasun hiukkaslukumäärää.

Sekä huokoiselle putkelle että ejektorille laskettiin laimennussuhteet  $DR_{hputki}$  ja  $DR_{ejektor}$ . Laimennussuhteet laskettiin laimentamattoman ja laimennetun pakokaasun hiilidioksidipitoisuuksien suhteena. Ensiksi laskettiin huokoisen putken laimennussuhde, joka on

$$DR_{hputki} = \frac{(CO_2)_{raaka} - (CO_2)_{tausta}}{(CO_2)_{laimea} - (CO_2)_{tausta}}, \quad (5)$$

jossa  $(CO_2)_{raaka}$  on raakapakokaasun hiilidioksidipitoisuus ja  $(CO_2)_{laimea}$  on pakokaasun hiilidioksidipitoisuus huokoisen putken jälkeen. Ympäristön hiilidioksidipitoisuutta merkitään symbolilla  $(CO_2)_{tausta}$ . Toiseksi laskettiin ejektorin laimennussuhde, joka on

$$DR_{ejektor} = \frac{(CO_2)_{laimea} - (CO_2)_{tausta}}{(CO_2)_{spektrometri} - (CO_2)_{tausta}}, \quad (6)$$

jossa  $(CO_2)_{spektrometri}$  on pakokaasun hiilidioksidipitoisuus ejektorin jälkeen ennen spektrometriä. Lopuksi laskettiin kokonaislaimennussuhde  $DR_{kokonais}$ , joka on

$$DR_{kokonais} = DR_{hputki} \cdot DR_{ejektor} \quad (7)$$

### 3.2.2. Pienhiukkasmassa

Koemoottorin pakokaasun pienhiukkasmassa mitattiin Dekatin PM10 -massaimpaktorilla. Impaktorin toiminta perustuu pienhiukkasten aerodynaamisten ominaisuuksien hyödyntämiseen. Massaimpaktorissa on päällekkäisiä keräystasoja, joihin hiukkaset tarttuvat. Ylimmälle keräystasolle tarttuvat suurimmat hiukkaset ja alimman keräystason suodattimeen pienimmät hiukkaset. Laimennettu pakokaasu tuodaan impaktoriin ylhäältä, josta pakokaasu virtaa alas. Keräystasojen yläpuolella on suutinreiät, joissa pakokaasun virtausnopeus kasvaa. Mitä alempana keräystaso sijaitsee, sitä pienempi suutinreikä keräystason yläpuolella on. Eri keräystasoille kerääntyvät vain tietynkokoiset hiukkaset riippuen siitä, kuinka suuri on keräystasoa edeltävän suuttimen halkaisija ja yksittäisen hiukkasen massa. (Petrović ym. 2011: 924.)

Dekatin massaimpaktori sisälsi kaksi foliopinnoitettua keräystasoa sekä alimman keräystason suodattimen. Keräystasot olivat tarkoitetut halkaisijaltaan 10, 2,5 sekä 1  $\mu\text{m}$ :n kokoisille hiukkasille. (Dekati 2009: 22.) Foliopinnoille siveltiin rasvaliuotinseosta, jolla varmistettiin hiukkasen tarttuminen keräystasolle. Impaktorin alimman keräystason suodatin punnittiin tyhjänä ennen NRSC-sykliä. Impaktoriin kerättiin hiukkasia, kunnes koko sykli oli ajettu. Syklin kuormituspisteissä mittaussajat olivat samat. Impaktorin mittaussajat yksittäisissä kuormituspisteissä määriteltiin syklin painokertoimista, jotka on esitelty taulukossa 5. Painokertoimen 0,15 omaavissa pisteissä ajoaika oli 21 minuuttia ja painokertoimen 0,10 pisteissä 14 minuuttia.

Hiukkasmassa mitattiin laimennetusta pakokaasusta. Ejektorissa laimennetun pakokaasun laimennussuhde oli 8,5. Kun koko sykli oli ajettu, punnittiin vain alimman keräystason suodattimeen kertyneet hiukkaset. Tällöin impaktorilla mitattu hiukkasmassa koostui hiukkasista, jotka olivat kooltaan alle 1000 nm. Suodattimen punnitukset tehtiin Sartorius Genius ME215S -vaa'alla.

### 3.2.3. Savutus

Koemoottorin savutuksen mittaamiseen käytettiin AVL 415S -savutusmittaria. Savutusmittarin sisällä olevalle suodatinpaperille johdetaan pakokaasua, jolloin suodatinpaperi tummentuu. Tämän jälkeen tummuneeseen suodatinpaperiin heijastetaan valoa. Lähetetyn ja heijastuneen valon intensiteetin suhteesta mittari ilmoittaa savutusluvun FSN (engl. filter smoke number). Tutkimuksessa käytetylle savutusmittarille ilmoitettiin savutusluvun vaihteluväliksi 0–10. (Eastwood 2008: 201–202; AVL 2005: 11–17.) Savutusmittari mittasi savutuksen kolme kertaa peräkkäin ja ilmoitti kustakin FSN-luvun mittarin näyttöruudulla. Savutusmittari antoi lopullisen tuloksen FSN-luvulle kolmen peräkkäin mitatun arvon keskiarvona.

### 3.2.4. Kaasumaiset päästöt

Koemoottorin pakokaasun kaasumaisista päästöistä mitattiin typpi- ja hiilioksidit, hiilivedyt sekä happipitoisuus. Typen oksidit ja hiilimonoksidit mitattiin TSI CA-6203 -pakokaasuanalysointilaiteella kuivasta pakokaasusta. Typpioksidit mitattiin myös VDO UniNO<sub>x</sub> -tunnistimella. Tunnistin mittaa pakokaasusta sekä typpioksidien pitoisuuden että ilmakertoimen.

Pakokaasun happipitoisuus mitattiin Siemens Oxymat 61 -happianalysointilaiteella. Analysointilaiteeseen johdetaan aluksi referenssikaasua kahdesta kanavasta. Toiseen kanavaan johdetaan pakokaasua, joka sekoittuu referenssikaasuun magneettikentässä. Referenssi- ja näytekaasun happipitoisuuksien erosta seuraa magneettikentässä paine-ero, koska happi on paramagneettinen aine. Kaasujen happipitoisuuksien eroon verrannollinen paine-ero aiheuttaa kanavien välissä virtauksen, joka muutetaan sähköiseksi signaaliksi virtausanturilla. (Siemens 2001: 3–5.) Happipitoisuus mitattiin myös TSI CA-6203 -pakokaasuanalysointilaiteella ja Lambda-tunnistimella.

Pakokaasun hiilivetyjen pitoisuus mitattiin J.U.M. VE7 -hiilivetyanalysointilaiteella kosteasta pakokaasusta. Tämän analysointilaiteen toimintaperiaate tunnetaan lyhenteellä FID (engl. flame ionization detector). FID-analysointilaiteeseen johdetaan moottorin

pakokaasua sekä vedyn ja heliumin kaasuseosta. Lisäksi uuniin johdetaan ilmaa, jotta kaasuseos voidaan polttaa elektrodien välisessä sähkökentässä. Palavassa kaasuseoksessa pakokaasun hiilivetymolekyylit hajoavat ja ionisoituvat, jolloin ionit synnyttävät heikon jännitteen elektrodien välille. (Mollenhauer & Tschöke 2012: 470.)

### 3.2.5. Koematriisi

Kansainvälisessä ISO 8178-4 -standardissa määritellään mittaussyklit maanteiden ulkopuolisessa käytössä oleville polttomoottoreille päästöjen mittausta varten (DieselNet 2012c). Tässä tutkimuksessa koematriisina käytettiin ISO 8178-4 -standardin kahdeksan pisteen C1-sykliä, joka on esitetty taulukossa 5. Tähän sykliin viitataan yleisesti lyhenneellä NRSC (engl. non-road steady cycle).

**Taulukko 5.** NRSC-sykli ja tutkimuksessa käytetyt kuormat, muokattu (DieselNet 2012c).

Piste	1	2	3	4	5	6	7	8
Kuorma (%)	100	75	50	10	100	75	50	0
Todellinen kuorma (Nm)	410	308	205	41	525	394	263	0
Pyörimisnopeus	Nimelliskohteudella				Välinopeudella			Joutokäynnillä
Painokerroin	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15

Moottorilla ajettiin NRSC-sykli standardin mukaisesti eri kuormituspisteissä nimellisiä välipyörimisnopeuksilla sekä joutokäyntipyörimisnopeudella. Kun koemoottorin pakokaasupäästöjä mitattiin, NRSC-sykli ajettiin ajasta riippumattomana lukuun ottamatta pienhiukkasmassan mittausta.

NRSC-syklin sadan prosentin kuorman suuruudet pisteissä 1 ja 5 määriteltiin koemoottorin rajamomentin perusteella. Pisteisiin 1 ja 5 valittiin kuormat, jotka olivat 90 % saavutettujen maksimimomenttien suuruuksista. Maksimimomentit on aiemmin mainittu taulukossa 2. Kuormat valittiin näin, jotta koemoottoria voitiin ajaa samoissa kuormi-

tuspisteissä sekä fossiilisella dieselpolttoaineella että muilla polttonesteillä. Kuormitus-  
pisteet ovat taulukossa 5. Nimellisa nopeus oli 2200 r/min ja välinopeus 1500 r/min.

### 3.3. Tutkimuksen kulku

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia voiteluöljyn, voiteluöljyn lisäaineen sekä erilaisten dieselpolttoaineiden vaikutusta työkonedieselmoottorin pakokaasun pienhiukkasiin, savutukseen ja kaasumaisiin päästöihin. Tutkimuksen tavoitteista muodostettiin kolme erillistä tehtävää, jotka selostetaan kappaleissa 3.3.1–3.3.3. Tiedot tutkimuksessa käytetyistä voiteluöljyistä (A–E) esitetään taulukossa 6. Tutkimustehtävien suoritusjärjestys annetaan taulukossa 7.

**Taulukko 6.** Voiteluöljyjen tietoja.

Voiteluöljy	A <sup>a</sup>	B <sup>b</sup>	C <sup>b</sup>	D <sup>b</sup>	E	F <sup>c</sup>
Toimittaja	Shell	Neste	Neste	Neste	Neste	Teboil
SAE-luokka	10W-40	10W-40	15W-40	10W-40	15W-40	10W-40
Viskositeetti 100 °C (cSt)	14,3	13,7	14,3	13,5	13,7	14,5
Viskositeetti-indeksi	152	153	138	152	142	152
Leimahduspiste (°C)	221	222	224	220	> 220	234
Sulfaattituhka (%)	1,0	1,0	1,4	1,4	1,0	-

<sup>a</sup> Tiedot lähteestä Shell (2013).

<sup>b</sup> Tiedot lähteestä Neste (2013).

<sup>c</sup> Tiedot lähteestä Teboil (2013).

Ennen mittausten aloittamista odotettiin, että moottorin käynti tasaantui kussakin yksittäisessä kuormituspisteessä. Käynnin oletettiin tasaantuneen, kun jäähdytysveden, imuilman ja pakokaasun lämpötilat olivat vakiintuneet. Vakiintumisessa seurattiin pakokaasun lämpötilaa ennen ahtimen turbiinia. Lisäksi koemoottorin imuilman lämpötilaksi säädettiin 50 °C syklin pisteessä 1 ennen mittausten aloittamista. Koemoottoriin tuleva ahtoilma virtasi lämmönsiirtimeen, jossa imuilman lämpötilaa voitiin säätää. Lämmönsiirtimeen tulevan jäähdytysveden virtausta säädettiin käsin.

**Taulukko 7.** Tutkimustehtävien suoritusjärjestys.

Tehtävä	Mittauskerta	Voiteluöljy	Polttoaine	Kesto (h)	Kokonaisajoaika (h)
Voiteluöljyt	1	A	DFO	6,0	6,0
	2	B	DFO	6,0	12,0
	3	C	DFO	6,0	18,0
	4	D	DFO	6,0	24,0
	5	E	DFO	6,0	30,0
Voiteluöljyn lisäaine	6 <sup>a</sup>	F	DFO	7,0	37,0
	- <sup>b</sup>	F+lisäaine	DFO	25,7	62,7
	7 <sup>c</sup>	F+lisäaine	DFO	6,0	68,7
	- <sup>b</sup>	F+lisäaine	DFO	23,9	92,7
	8 <sup>d</sup>	F+lisäaine	DFO	6,0	98,7
	- <sup>b</sup>	F+lisäaine	DFO	21,0	120
	9 <sup>e</sup>	F+lisäaine	DFO	6,0	126
	10 <sup>f</sup>	F	DFO	7,0	133
Poltonesteet	11	E	DFO	15,1	148
	12	E	RME	12,8	161
	13	E	SME	12,8	174
	14	E	HVO	10,5	184

<sup>a</sup> Voiteluöljy ilman lisäainetta (referenssi 1).

<sup>b</sup> Lisäaineistetulla voiteluöljyllä ajaminen ilman mittausta

<sup>c</sup> Lisäaineistettu voiteluöljy 25 tunnin jälkeen.

<sup>d</sup> Lisäaineistettu voiteluöljy 50 tunnin jälkeen.

<sup>e</sup> Lisäaineistettu voiteluöljy 75 tunnin jälkeen.

<sup>f</sup> Voiteluöljy ilman lisäainetta (referenssi 2).

### 3.3.1. Voiteluöljyt

Voiteluöljyjen vaikutusta työkonedieselmoottorin pienhiukkaspäästöihin tutkittiin viidellä eri voiteluöljyllä, jotka olivat toimittajan valitsemia. Tutkituista voiteluöljyistä neljä on kaupallisia ja viides oli toimittajan kehitystuote. Kaikki voiteluöljyt (A–E) on tarkoitettu raskaalle kalustolle. Referenssinä käytettiin voiteluöljyä A ja polttoaineena Teboilin toimittamaa vähärikkistä dieselpolttoainetta.

Aluksi koemoottoriin vaihdettiin uusi tutkittava voiteluöljy. Edellinen voiteluöljy valuttiin pois ja voiteluöljytilaan kaadettiin kuusi litraa uutta tutkittavaa voiteluöljyä. Voiteluöljysuodatin vaihdettiin ja öljynvaihdon jälkeen koemoottoria käytettiin 10 minuuttia uudella voiteluöljyllä, jotta voiteluöljyjärjestelmästä huuhtoutuisivat edellisen voiteluöljyn jäämät pois. Tämän jälkeen uusi voiteluöljy valutettiin pois, minkä aikana koemoottoriin vaihdettiin uusi öljynsuodatin toisen kerran. Lopuksi koemoottoriin lisättiin uutta tutkittavaa voiteluöljyä kahdeksan litraa.

Voiteluöljyn vaihdon jälkeen moottori käynnistettiin ja lämmitettiin ajamalla. Lämmitysajo kesti vaihtelevasti 30–60 minuutin ajan. Lämmitysajon jälkeen koemoottorilla ajettiin NRSC-sykli, jonka jokaisessa kahdeksassa kuormituspisteessä mitattiin kaikki päästökomponentit kerran. Edellä kuvattu voiteluöljyn vaihtorutiini, lämmitysajo sekä NRSC-syklin ajo mittauksineen tehtiin kullakin tutkittavalla voiteluöljyllä.

### 3.3.2. Voiteluöljyn lisäaine

Voiteluöljyn lisäaineen vaikutusta työkonedieselmoottorin pienhiukkaspäästöihin tutkittiin perusvoiteluöljyllä sekä voiteluöljyyn sekoitettavalla erillisellä lisäaineella. Referenssinä käytettiin kaupallista voiteluöljyä F, joka oli lisäainetoimittajan valitsema.

Tutkimusöljynä käytettiin voiteluöljyä F, johon lisättiin Ab Nanol Technologies Oy:n toimittamaa lisäainetiivistettä. Lisäainetiiviste koostui Nanol<sup>TM</sup>-lisäaineesta, joka oli sekoitettu perusvoiteluöljyyn. Lisäainetiiviste sisälsi lisäainetta 10 %. Polttoaineena käytettiin Teboilin toimittamaa vähärikkistä dieselpolttoainetta.

Aluksi koemoottoriin vaihdettiin perusvoiteluöljy ja voiteluöljysuodatin. Edellinen voiteluöljy valutettiin pois, ja voiteluöljytilaan kaadettiin kuusi litraa uutta tutkittavaa perusvoiteluöljyä. Tämän jälkeen koemoottoria käytettiin 10 minuuttia perusvoiteluöljyllä voiteluöljyjärjestelmän puhdistamista varten. Huuhtelun jälkeen perusvoiteluöljy laskettiin pois. Tämän jälkeen koemoottoriin vaihdettiin öljynsuodatin toiseen kertaan sekä samaa perusvoiteluöljyä uudelleen. Voiteluöljyn vaihdon jälkeen moottori käynnistettiin ja lämmitettiin ajamalla, jonka jälkeen ajettiin NRSC-sykli. Sykli ajettiin pelkällä perusvoiteluöljyllä (referenssi 1). NRSC-syklin jokaisessa kahdeksassa kuormituspisteessä mitattiin kaikki päästökomponentit kertaalleen.

NRSC-syklin jälkeen voiteluöljy laskettiin pois näytteenoton vuoksi, ja samalla arvioitiin moottorissa olleen voiteluöljyn määrä. Öljypohjassa olleen voiteluöljyn määräksi mitattiin 7,5 litraa. Öljynsuodattimeen kertyneen voiteluöljyn määräksi arvioitiin noin 1,2 litraa. Öljypohjasta poislaskettu voiteluöljy kaadettiin takaisin moottoriin. Voiteluöl-

jyn kokonaismääräksi arvioitiin tasan yhdeksän litraa, johon lisättiin lisäänetiivistettä. Tiivistettä lisättiin 3 % voiteluöljyn arvioidusta kokonaismäärästä.

Koemoottoria ajettiin lisääineistetulla voiteluöljyllä 75 tunnin ajan NRSC-syklin mukaisissa kuormituspisteissä. Ajoaika yksittäisessä kuormituspisteessä määriteltiin NRSC-syklin painokertoimista. Painokertoimen 0,15 omaavissa pisteissä ajoaika oli 21 minuuttia ja painokertoimen 0,10 pisteissä 14 minuuttia. Näin yksi kokonainen sykli kesti 140 minuuttia.

Kun lisääineistetulla voiteluöljyllä oli ajettu 25 tuntia, ajettiin NRSC-sykli, jonka jokaisessa kahdeksassa kuormituspisteessä mitattiin kaikki päästökäkomponentit kerran. Päästömittaukset toistettiin 50 ja 75 tunnin ajon jälkeen. Kun lisääineistetulla voiteluöljyllä oli ajettu 75 tuntia ja päästömittaukset tehty, vaihdettiin lisääineistetun voiteluöljyn tilalle perusvoiteluöljy.

Ensin lisääineistettu voiteluöljy valutettiin pois, minkä jälkeen koemoottoriin vaihdettiin perusvoiteluöljy ja voiteluöljysuodatin. Seuraavaksi koemoottoria käytettiin 10 minuuttia perusvoiteluöljyllä voiteluöljyjärjestelmän puhdistamista varten. Huuhtelun jälkeen perusvoiteluöljy laskettiin pois. Tämän jälkeen koemoottoriin vaihdettiin öljysuodatin toiseen kertaan sekä samaa perusvoiteluöljyä uudelleen. Voiteluöljyn vaihdon jälkeen moottori käynnistettiin ja lämmitettiin ajamalla, jonka jälkeen ajettiin NRSC-sykli pelkällä perusvoiteluöljyllä uudelleen (referenssi 2). Kaikki päästökäkomponentit mitattiin syklin jokaisessa kahdeksassa kuormituspisteessä kertaalleen.

### 3.3.3. Polttonesteet

Tutkimuksessa tutkittiin myös rypsi- ja soijametyyliesterin sekä vetykäsitellyn kasviöljyn vaikutusta työkonedieselmoottorin pienhiukkaspäästöihin sekä voiteluöljyn ominaisuuksiin. Vetykäsitelty kasviöljy oli Neste Oil Oyj:n valmistamaa NExBTL-dieselpolttonestettä. Referenssinä käytettiin Teboilin toimittamaa vähärikkistä dieselpolttoainetta. Voiteluaineena käytettiin voiteluöljyä F.

Aluksi koemoottoriin vaihdettiin voiteluöljy ja polttoaine. Käytetty voiteluöljy valutettiin pois ja voiteluöljytilaan kaadettiin kuusi litraa uutta voiteluöljyä. Samalla vaihdettiin voiteluöljysuodatin ja polttoainesuodattimet. Huuhtelun jälkeen voiteluöljy, voiteluöljysuodatin ja polttoainesuodattimet vaihdettiin toiseen kertaan. Lopuksi koemoottoriin kaadettiin uutta voiteluöljyä kahdeksan litraa.

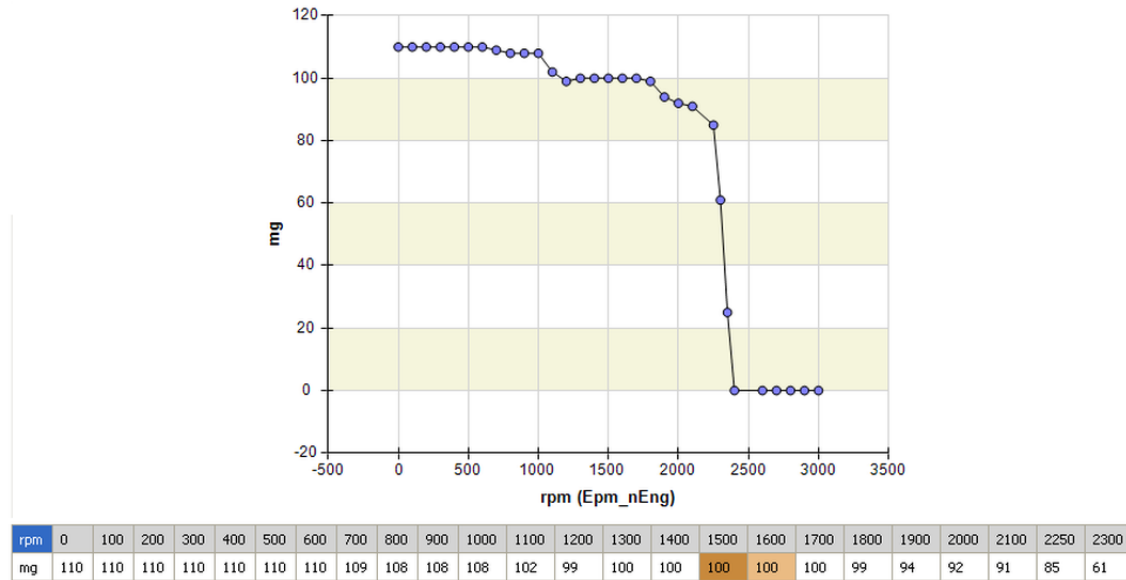
Tämän jälkeen moottori käynnistettiin ja lämmitettiin. Lämmitysajon jälkeen ajettiin NRSC-sykli, jonka jokaisessa kuormituspisteessä mitattiin kaikki päästökomponeetit. Täyden syklin jälkeen eri polttoaineilla ajettiin NRSC-syklin kuormituspisteet 5, 6 ja 7 siten, että kutakin kuormituspistettä ajettiin 1,5–2 tuntia. Pienhiukkaskokumäärän ja hiukkaskokojakauman mittausta oli jatkuvaa. Kaasumaiset päästöt mitattiin kerran. Edellä kuvattu voiteluöljyn ja polttoaineen vaihtorutiini, lämmitysajo, NRSC-mittaus sekä NRSC-syklin kuormituspisteiden 5, 6 ja 7 ajo mittaussuorituksen tehtiin kullakin tutkittavalla polttonesteellä.

Moottoria ajettiin NRSC-syklin kuormituspisteessä 1 pyörimisnopeudella 2200 r/min. Tällöin vääntömomenttina oli 410 Nm, kun polttoaineina käytettiin fossiilista dieseliä ja vetykäsiteltyä kasviöljyä. Kuormituspisteessä 5 moottoria ajettiin pyörimisnopeudella 1500 r/min. Tällöin vääntömomenttina oli 525 Nm.

Ruiskutusjärjestelmässä käytettiin polttoaineen esi-, pää- ja jälkiruiskutusta. Ruiskutusannosten yhteismäärän ylärajoja muutettiin WinEEM4-ohjelmassa, jolla muutokset siirrettiin moottorin elektroniseen ohjausyksikköön. Kuvassa 7 on esitetty ruiskutuksen yhteismäärän ylärajat milligrammoina moottorin eri pyörimisnopeuksilla. Pyörimisnopeuksia vastaavat ruiskutusmäärät näkyvät kuvassa pisteinä, jotka ohjelma yhdistää lineaarisesti. Pisteitä yhdistävä käyrä on ruiskutuksen annosmäärän rajakäyrä. Rajakäyrä määrää ruiskutuksen yhteismäärän ylärajan koko kuormitusalueella.

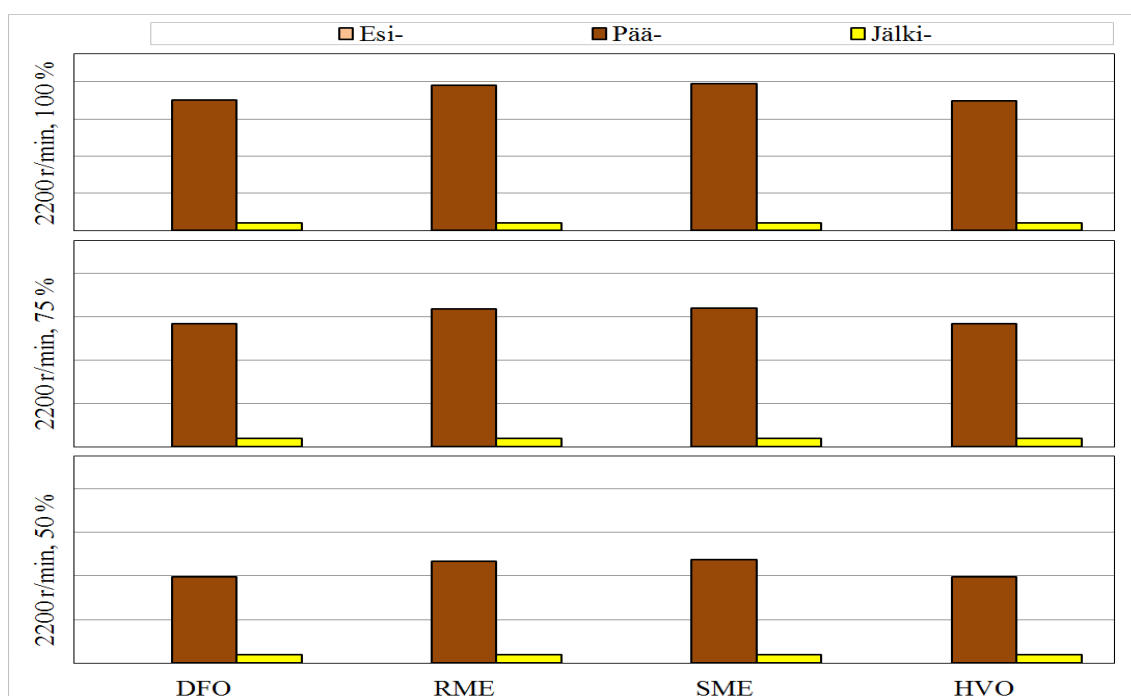
Jotta moottoria voitiin ajaa samoissa kuormituspisteissä kaikilla polttonesteillä, oli ruiskutusannoksia lisättävä, kun käytettiin rypsi- ja soijametyyliesteriä. Ruiskutusannosten lisäys oli välttämätön, vaikka pisteisiin 1 ja 5 ennalta valitut 410 Nm:n ja 525 Nm:n

kuormat olivat vain 90 % koemoottorin maksimimomenttien suuruuksista. Muissa syklin kuormituspisteissä ruiskutusannokset pidettiin vakioina.

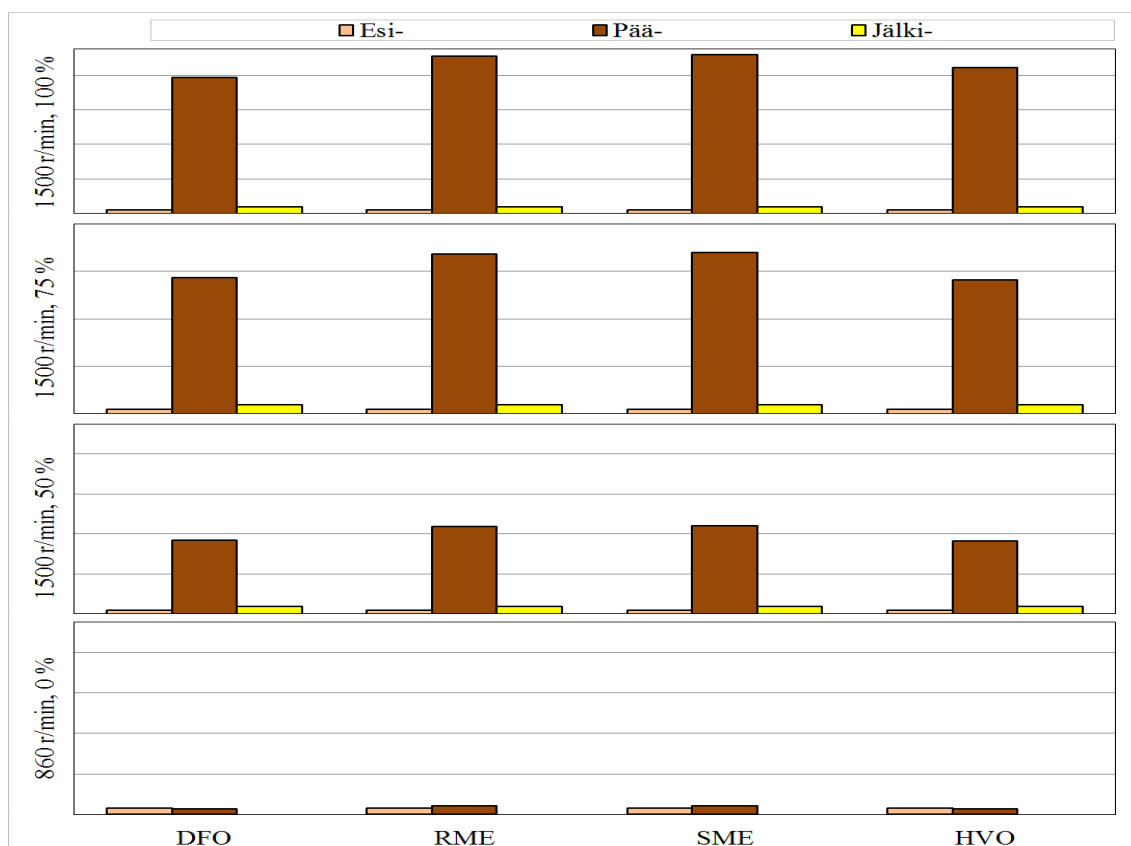


**Kuva 7.** Ruiskutusannosten yhteismäärät eri pyörimisnopeuksilla.

Ruiskutusannosten yhteismäärää muutettiin kohdissa 1400 r/min, 1500 r/min ja 1600 r/min 95 mg:sta 100 mg:aan. Muutokset nostivat rajakäyrää ylöspäin. Kohdassa 2200 r/min oleva piste siirrettiin kohtaan 2250 r/min. Muutos siirsi rajakäyrää etäämmälle kohdasta 2200 r/min. Nämä muutokset lisäsivät pääruiskutuksen todellista annosmäärää NRSC-syklin pisteissä 1 ja 5. Esi- ja jälkiruiskutuksen annosmäärät pysyivät ennallaan. Muutokset tehtiin vain, kun polttoaineina käytettiin metyyliestereitä. Esi-, pää- ja jälkiruiskutusmäärien suhteet eri polttoaineilla nähdään kuvissa 8 ja 9 syklin kuormituspisteissä. Pääruiskutusmäärä oli metyyliestereillä suhteessa suurempi kuin fossiilisella dieselpolttoaineella ja vetykäsitellyllä kasviöljyllä.



**Kuva 8.** Esi-, pää- ja jälkiruiskutusmäärien suhteet pyörimisnopeudella 2200 r/min.



**Kuva 9.** Esi-, pää- ja jälkiruiskutusmäärien suhteet pyörimisnopeudella 1500 r/min.

#### 4. TULOKSET

Tämän luvun kohdissa 4.1.–4.3. esitetään tulokset siitä, miten voiteluöljy, voiteluöljyn lisäaine sekä eri polttonesteet vaikuttivat koemoottorin pakokaasun pienhiukkasiin, savutukseen ja kaasumaisiin päästöihin.

Pienhiukkaslukumäärien ja hiukkaskokojakaumien mittaustuloksista valittiin kolmen minuutin pituinen ajanjakso, jonka aikana pakokaasun kokonaishiukkaspitoisuus oli mahdollisimman vakaa. Mittaustiedot pienhiukkaslukumääristä tallennettiin mittaustiedostoksi. Mittaustiedostossa hiukkasten lukumäärät sijaitsivat sarakkeissa, jotka vastasivat hiukkasten sijoittumista EEPS-spektrometrin uloimmille elektrodeille liikkuvuushalkaisijan mukaan. Mittaustiedoston lukumääräsarakkeiden lukuarvoista laskettiin keskiarvot, jotka kerrottiin pakokaasunäytteen laimennussuhteella.

Eri voiteluöljyille (A–E) mitatut hiukkaslukumäärät sekä ennen lisäainetutkimuksen aloittamista mitatut (referenssi 1) hiukkaslukumäärät kerrottiin laimennussuhteella, joka oli pakokaasun keskimääräinen laimennussuhde koko NRSC-syklin aikana.

Seuraavilla mittauskerroilla laimennussuhteet laskettiin kuormituspistekohtaisesti. Pakokaasun laimennussuhteen määrittämiseksi pakokaasun hiilidioksidipitoisuus mitattiin kahdesti kussakin NRSC-syklin kuormituspisteessä. Pitoisuuksista laskettiin kokonaislaimennus  $DR_{kokonais}$ . Kuormituspisteen lopullinen laimennussuhde  $DR$  oli kahdesti lasketun kokonaislaimennuksen keskiarvo. Lisäainetutkimuksessa sekä eri polttonesteillä mitatut hiukkaslukumäärät kerrottiin laimennussuhteella  $DR$ , joka laskettiin jokaisessa syklin kuormituspisteessä.

Tässä tutkimuksessa mitatut hiukkaslukumäärät  $dN/d\log D_p$  esitetään hiukkasten liikkuvuushalkaisijoiden  $D_p$  funktiona logaritmisilla asteikoilla. Hiukkaskokojakaumat annetaan NRSC-syklin kuormituspisteittäin.

Hiukkasmassan ominaispäästö (g/kWh) laskettiin, kun massaimpaktorin alimman keräystason suodattimeen kertyneet hiukkaset oli punnittu. Impaktoriin menevä pakokaasu-

virtaus suhteutettiin raakapakokaasun massavirtaan, minkä jälkeen laskettiin mittauksen aikana tuotettu energia. Kuormituspisteittäin laskettuja massavirtoja painotettiin massaimpaktorin pistekohtaisilla keräysajoilla. Lopputulos saatiin, kun hiukkasmassa jaettiin mittauksen aikana tuotetulla energialla.

Typen oksidipitoisuudet sekä hiilimonoksidi- ja hiilivetytitoisuudet muunnettiin laske-  
malla moottorin ominaispäästöiksi (g/kWh). Aluksi kullekin päästökomponentille las-  
kettiin massavirta (kg/h). Seuraavaksi typen oksidien ja hiilimonoksidin massavirrat  
korjattiin vastaamaan kostean pakokaasun massavirtaa ISO 8178 -standardin mukaan.  
(Wright 2005: 117–126.)

Jokaisessa kuormituspisteessä painotettiin NRSC-syklin painokertoimilla päästökompone-  
nttien ( $\text{NO}_x$ , CO, HC) massavirtauksia. Lopputulos saatiin, kun painotetut massavir-  
taukset laskettiin yhteen. Painotettujen massavirtojen summa jaettiin eri kuormituspis-  
teissä mitattujen moottoritehojen summalla.

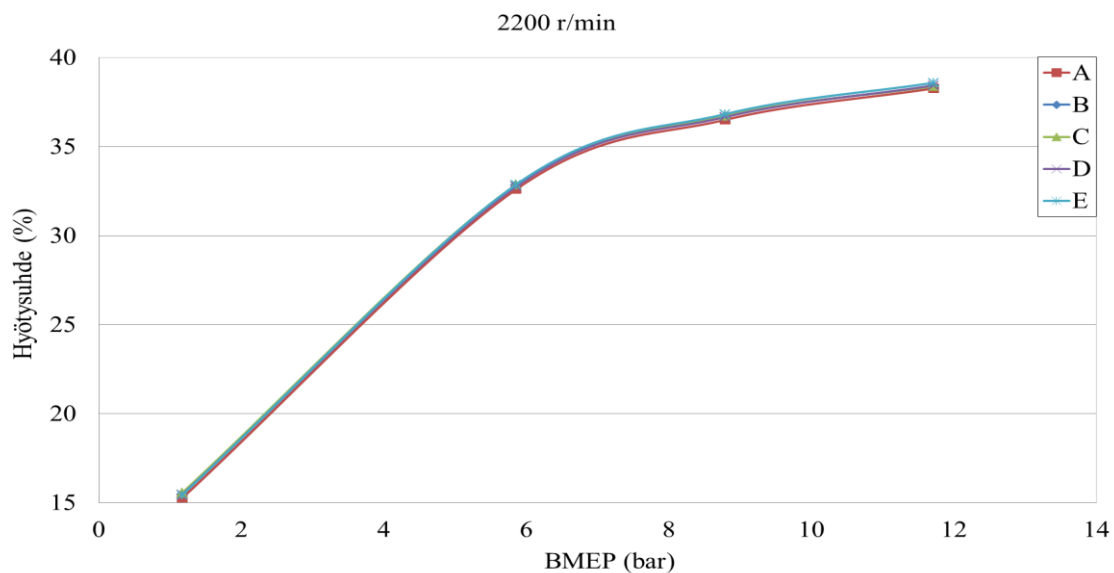
#### 4.1. Voiteluöljyn vaikutus

Ympäristön lämpötila vaihteli mittausten aikana välillä 29,9–39,4 °C, kun eri voiteluöl-  
jyjen vaikutusta tutkittiin. Suurin vaihteluväli (5,0 °C) oli kuormituspisteessä 1. Suhteel-  
linen ilmankosteus vaihteli välillä 4–9 %. Ympäristön lämpötila ja ilmankosteus on esi-  
tetty kuormituspisteittäin liitteessä 1.

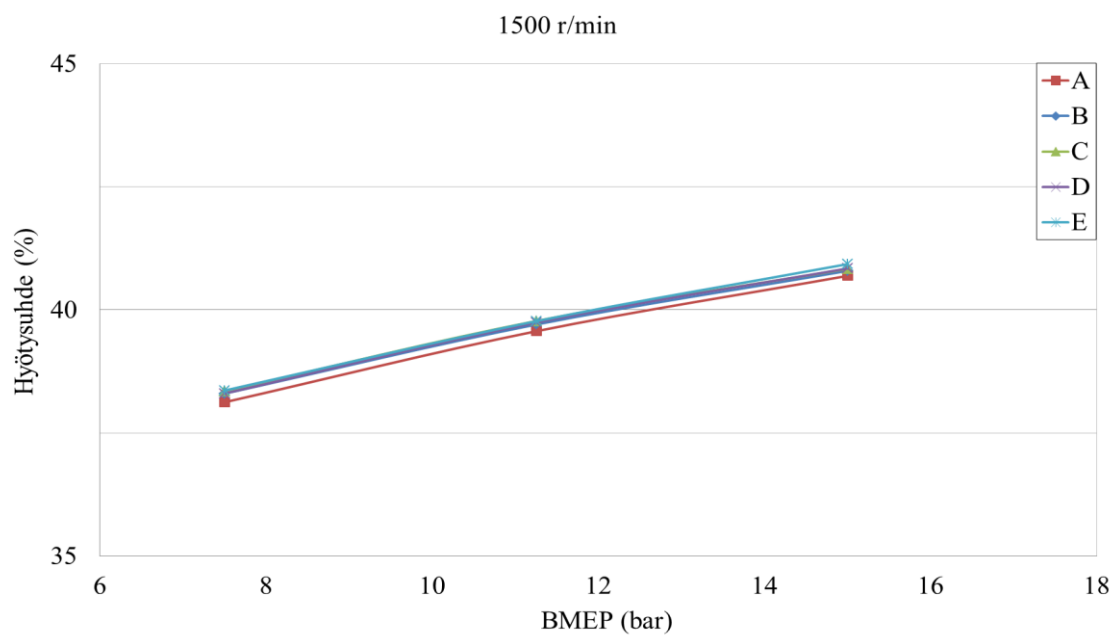
Koemoottorin hyötysuhde eri voiteluöljyillä on annettu kuvissa 10 ja 11 pyörimisnope-  
uksilla 2200 r/min ja 1500 r/min. Hyötysuhteet olivat kaikissa kuormituspisteissä miltei  
samat. Kun verrataan voiteluöljyjen B–E hyötysuhteita voiteluöljyllä A havaittuihin,  
vaihtelivat hyötysuhteiden erot kuormituspisteittäin vain 0,1–0,3 prosenttiyksikköä. Pa-  
ras hyötysuhde mitattiin voiteluöljyllä E.

Kuvassa 12 ovat koemoottorin yhdistetyt typpioksidipäästöt eri voiteluöljyillä. Yhdiste-  
tyt typpioksidipäästöt vaihtelivat välillä 8,4–9,4 g/kWh. Pienimmät koko syklin yli las-

ketut typpioksidipäästöt syntyivät, kun käytettiin voiteluöljyä D. Suurimmat typpioksidipäästöt koko syklistä muodostuivat voiteluöljyn A kanssa.



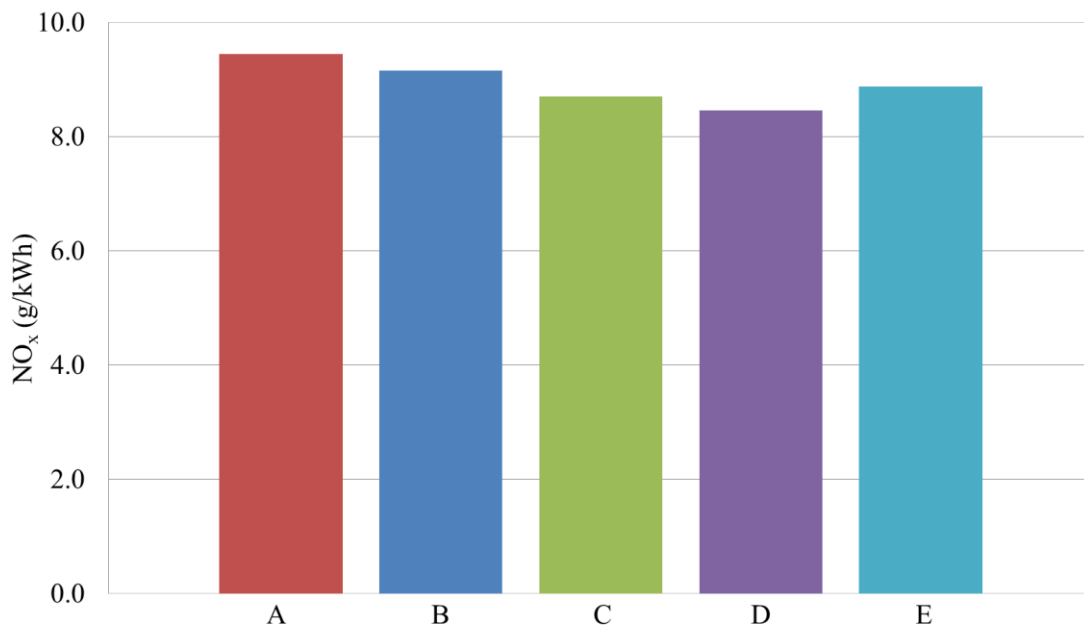
**Kuva 10.** Koemoottorin hyötysuhde eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.



**Kuva 11.** Koemoottorin hyötysuhde eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.

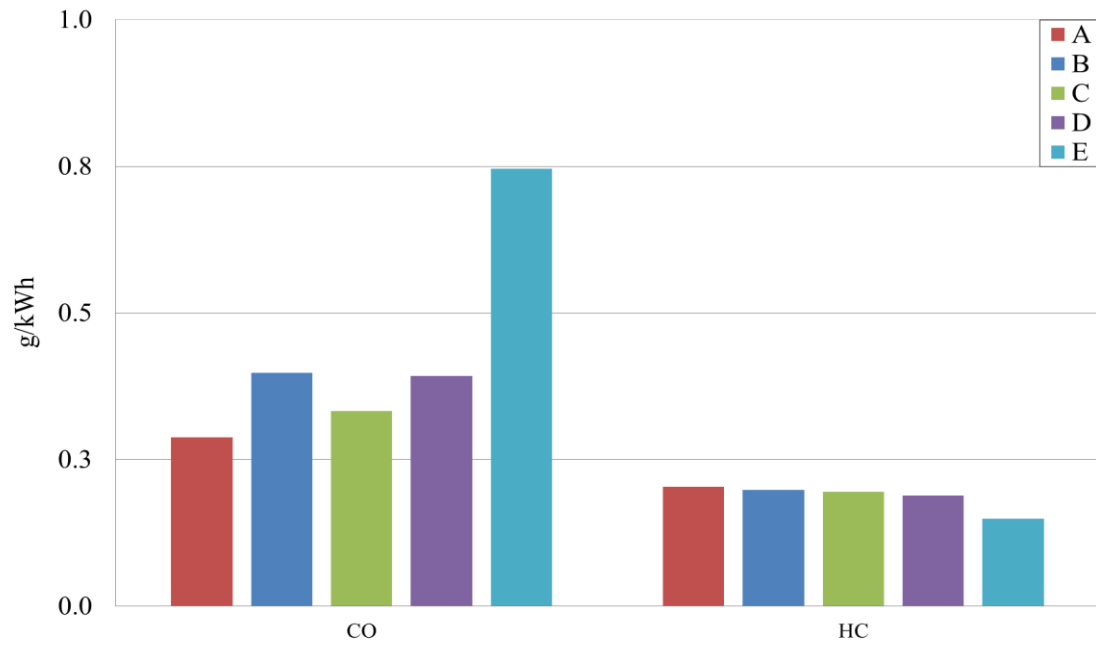
Koemoottorin yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöt eri voiteluöljyillä löytyvät kuvasta 13. Yhdistetty hiilimonoksidipäästö vaihteli välillä 0,29–0,75 g/kWh. Alhaisin koko syklin yli laskettu hiilimonoksidipäästö syntyi, kun käytettiin voiteluöljyä A. Korkein hiilimonoksidipäästö koko syklistä syntyi voiteluöljyllä E. Yhdistetty hiilivety-päästö vaihteli välillä 0,15–0,20 g/kWh. Pakokaasussa oli vähiten hiilivetyjä, kun käytettiin voiteluöljyä E. Eniten hiilivetyjä syntyi voiteluöljyllä A ajettaessa.

Liitteessä 1 on esitetty typenoksidien, hiilimonoksidin ja hiilivedyn ominaispäästöt eri voiteluöljyillä moottorin tehollisen keskipaineen funktiona pyörimisnopeuksilla 2200 r/min ja 1500 r/min.

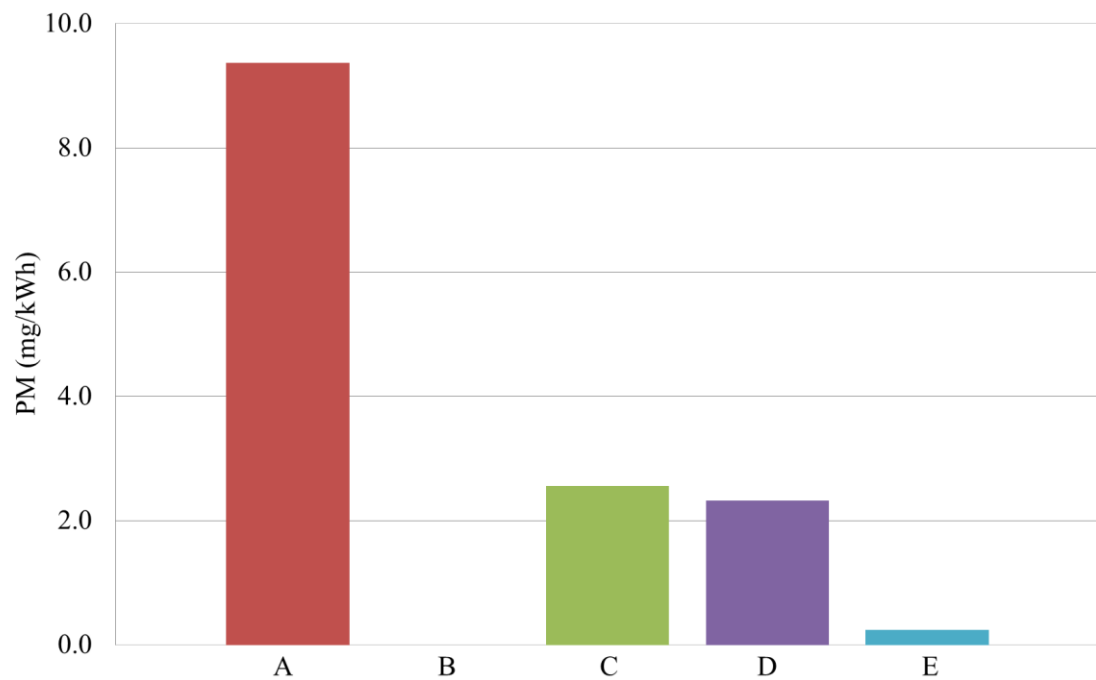


**Kuva 12.** Koemoottorin yhdistetyt typpioksidipäästöt eri voiteluöljyillä.

Kuvassa 14 on koemoottorin pakokaasun hiukkasmassan ominaispäästö eri voiteluöljyillä. Hiukkasmassapäästö vaihteli välillä 0,24–9,37 mg/kWh. Hiukkasmassapäästö oli pienin, kun käytettiin voiteluöljyä E, ja suurin, kun käytettiin voiteluöljyä A. Öljystä B ei saatu tulosta.

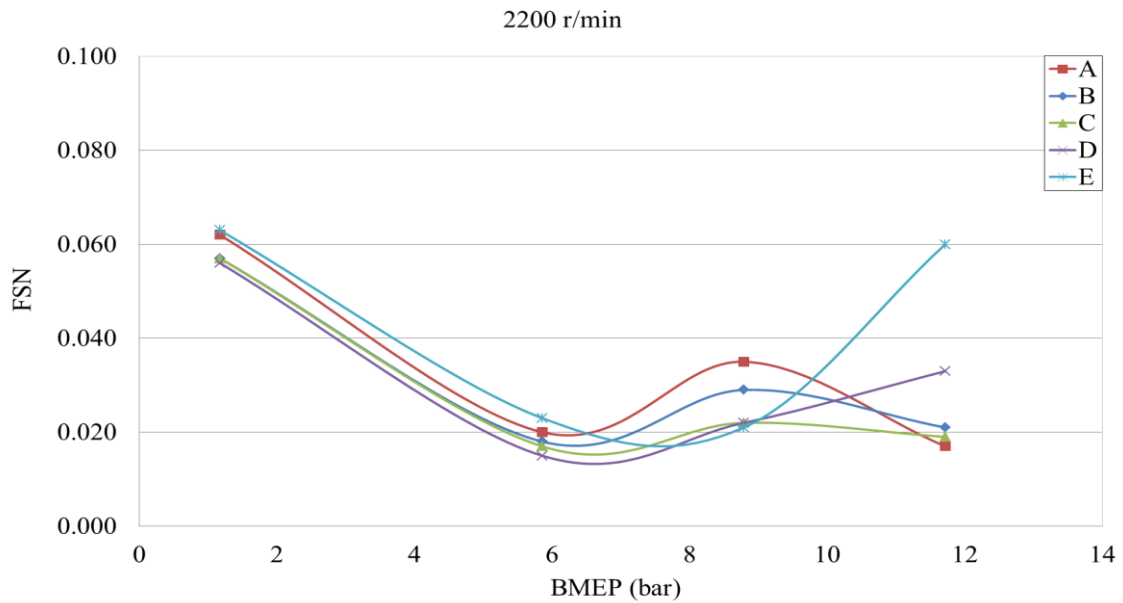


**Kuva 13.** Koemoottorin yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivetyypäästöt eri voiteluöljyillä.

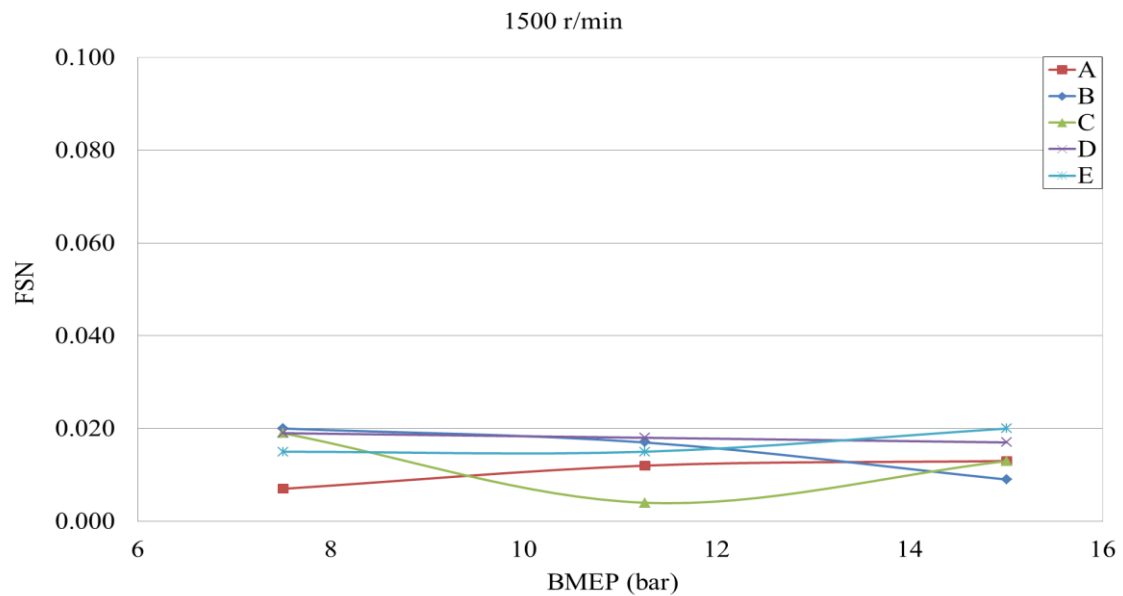


**Kuva 14.** Koemoottorin hiukkasmassapäästö eri voiteluöljyillä NRSC-syklissä.

Koemoottorin savutus eri voiteluöljyillä on annettu kuvissa 15 ja 16 pyörimisnopeuksilla 2200 r/min ja 1500 r/min. FSN-luvut vaihtelivat välillä 0,004–0,062. FSN-luvut olivat siis pienet kaikissa NRSC-syklin kuormituspisteissä. Mikään voiteluöljyistä ei ollut savutuksen suhteen muita parempi koko sykliä ajatellen.



**Kuva 15.** Koemoottorin savutus eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.

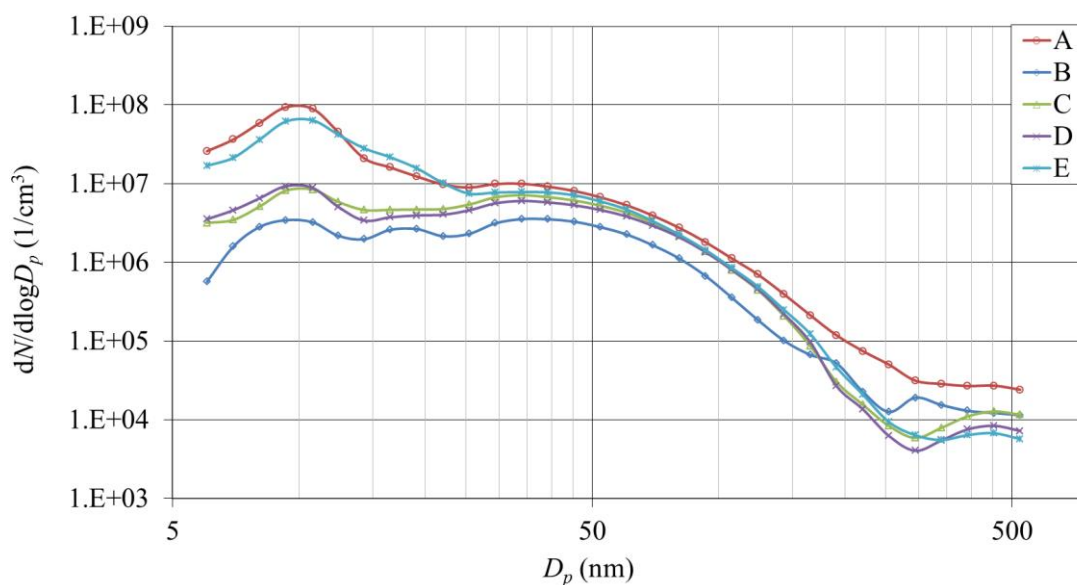


**Kuva 16.** Koemoottorin savutus eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.

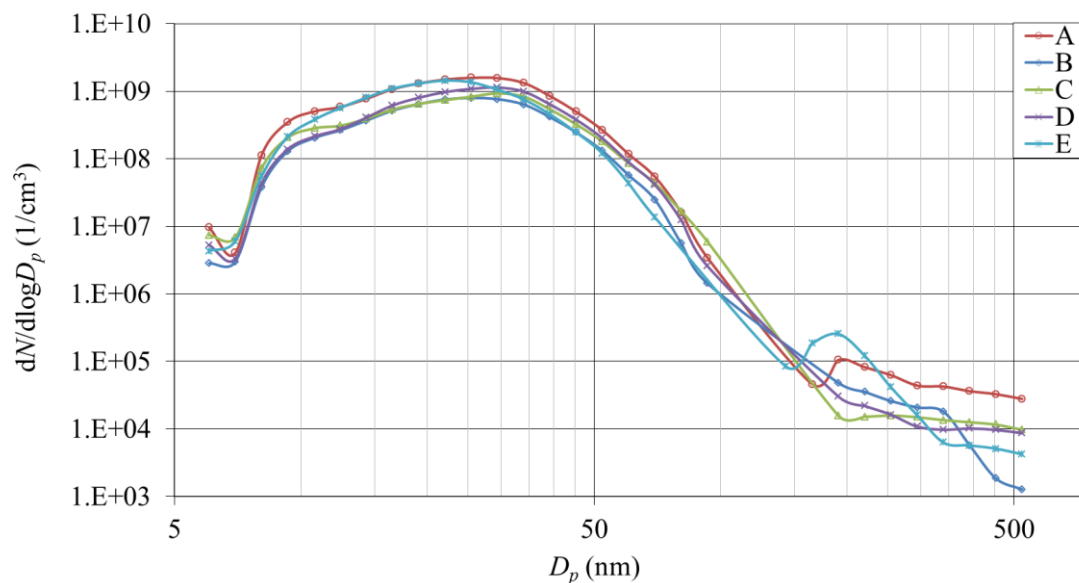
Kuvassa 17 on pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä NRSC-syklin pisteessä 1. Eniten hiukkasia oli kokoluokassa 10 nm kaikilla voiteluöljyillä ajettaessa. Lukumääräisesti pienimmät hiukkaspäästöt mitattiin voiteluöljyllä B alle 200 nm kokoalueella ja suurimmat voiteluöljyllä A. Erot näyttävät pieniltä logaritmisella asteikolla, mutta esimerkiksi voiteluöljyllä B ajettaessa pakokaasu sisälsi 10 nm:n kokoisia hiukkasia vain noin 4 % voiteluöljyllä A mitatusta lukumäärästä.

Kuvassa 18 on pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä NRSC-syklin pisteessä 7. Eniten hiukkasia oli kokovälillä 20–35 nm kaikilla voiteluöljyillä ajettaessa. Muiden kuormituspisteiden hiukkaskokojakaumat löytyvät liitteestä 1. Voiteluöljy B tuotti useimmiten vähiten hiukkasia.

Hiukkaskokojakaumien lukumäärät on kerrottu laimennussuhteella, joka oli pakokaasun keskimääräinen laimennussuhde koko NRSC-syklin aikana. Hiukkaskokojakaumista ei sen vuoksi voida tehdä yksiselitteisiä johtopäätöksiä öljyjen keskinäisistä eroista.



**Kuva 17.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 100 %.



**Kuva 18.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 1500 r/min ja 50 %.

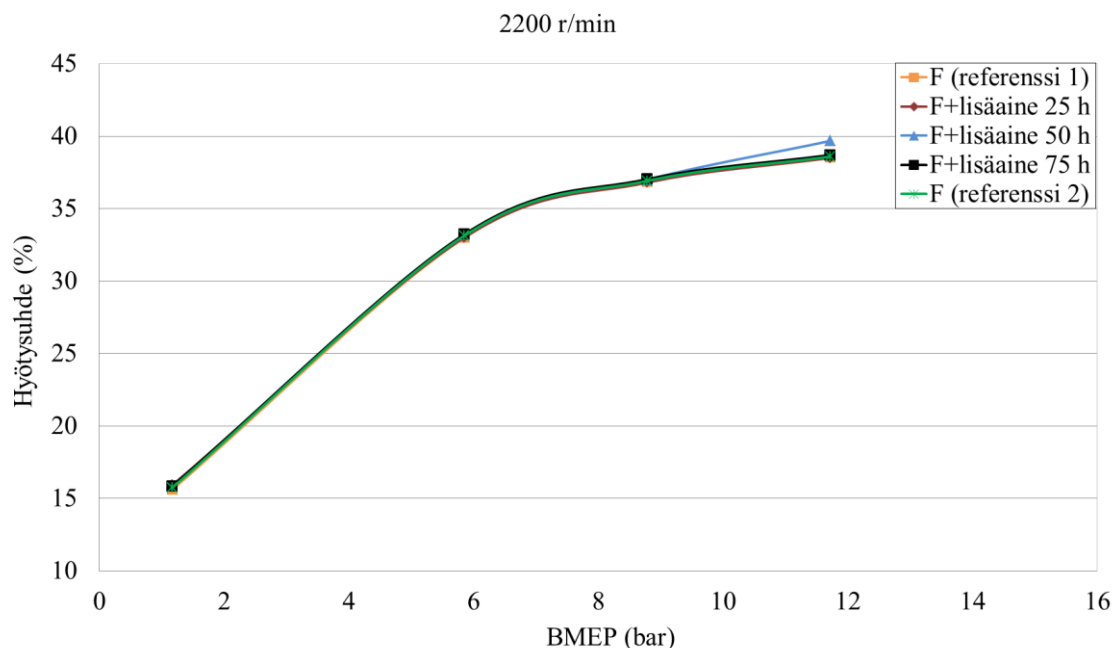
#### 4.2. Voiteluöljyn lisäaineen vaikutus

Ympäristön lämpötila vaihteli mittausten aikana välillä 26,7–42,8 °C, kun voiteluöljyn lisäaineen vaikutusta tutkittiin. Suurin vaihteluväli (16,1 °C) oli kuormituspisteessä 1. Suhteellinen ilmankosteus oli 3–10 %. Ympäristön lämpötila ja ilmankosteus on esitetty kuormituspisteittäin liitteessä 2.

Koemoottorin hyötysuhde lisäainetutkimuksessa löytyy kuvista 19 ja 20 pyörimisnopeuksilla 2200 r/min ja 1500 r/min. Hyötysuhteet olivat kaikissa kuormituspisteissä miltei samat. Kun verrataan lisäaineistetulla voiteluöljyllä havaittuja hyötysuhteita perusvoiteluöljyn käytön (referenssi 1) aikana havaittuihin, vaihtelivat hyötysuhteiden erot kuormituspisteittäin 0,1–1,4 prosenttiyksikköä.

Kuvissa 21 ja 22 ovat lisäainetutkimuksen yhdistetyt typpioksidipäästöt sekä yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivety-päästöt. Yhdistetyt typpioksidipäästöt vaihtelivat välillä 8,8–9,3 g/kWh. Koko syklin yli laskettu typpioksidipäästö oli suurin, kun lisäaineiste-

tulla voiteluöljyllä oli ajettu 50 tuntia. Yhdistetty typpioksidipäästö oli pienin 75 tunnin ajon jälkeen.



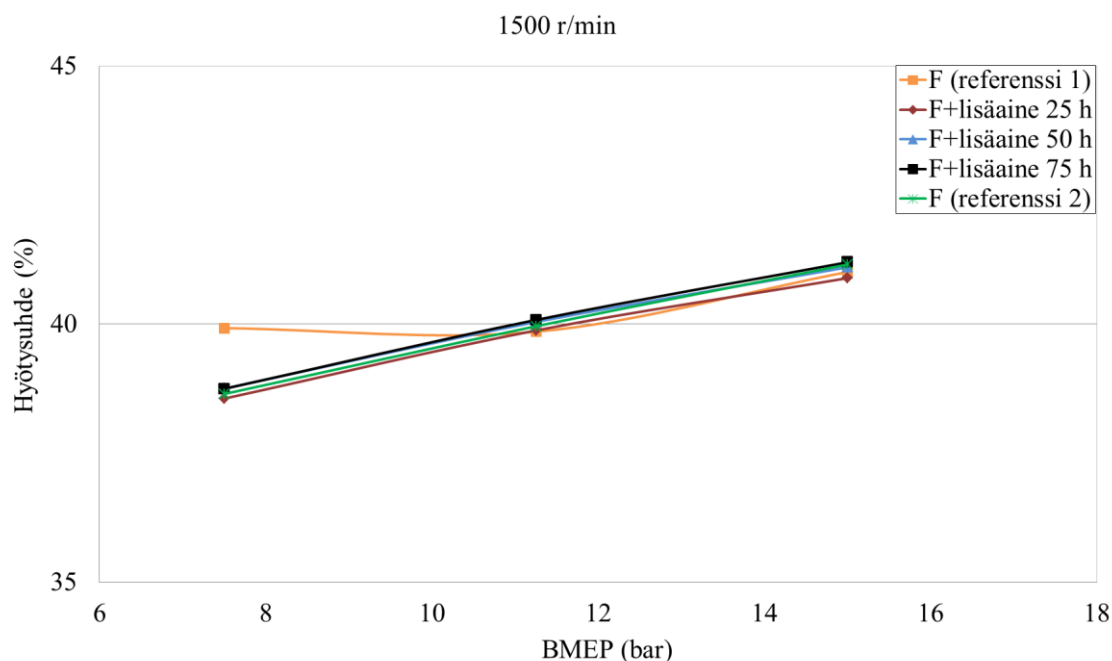
**Kuva 19.** Koemoottorin hyötysuhde lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.

Pakokaasun yhdistetty hiilimonoksidipäästö vaihteli välillä 0,70–1,31 g/kWh. Koko syklin yli laskettu hiilimonoksidipäästö oli suurin lisäaineistetulla voiteluöljyllä 25 tunnin jälkeen. Yhdistetty hiilimonoksidipäästö väheni 50 ja 75 tunnin jälkeen.

Yhdistetty hiilivetyypäästö oli lähes vakio eli 0,19–0,20 g/kWh. Liitteessä 2 on annettu typenoksidien, hiilimonoksidin ja hiilivedyn ominaispäästöt lisäainetutkimuksessa moottorin tehollisen keskipaineen funktiona pyörimisnopeuksilla 2200 r/min ja 1500 r/min. Mitään merkittävää trendiä ei havaittu, mutta hiilimonoksidipäästöt olivat yleensä pienimmät, kun lisäainetta ei käytetty.

Kuvassa 23 on esitetty koemoottorin hiukkasmassapäästö lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä. Lisäainetutkimuksessa pakokaasun hiukkasmassapäästö

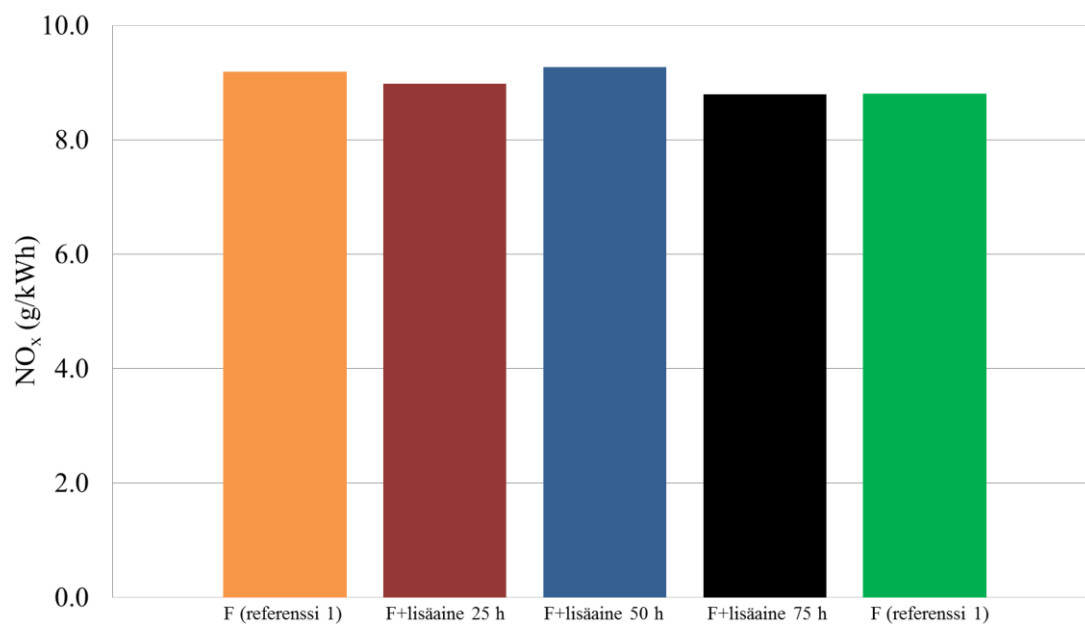
vaihteli välillä 2,4–3,8 mg/kWh. Päästö oli pienin, kun lisäaineistetulla voiteluöljyllä oli ajettu 25 tuntia. Hiukkasmassa oli suurin 50 tunnin ajon jälkeen. Päästö oli kaiken kaikkiaan pieni eikä mitään trendiä havaittu.



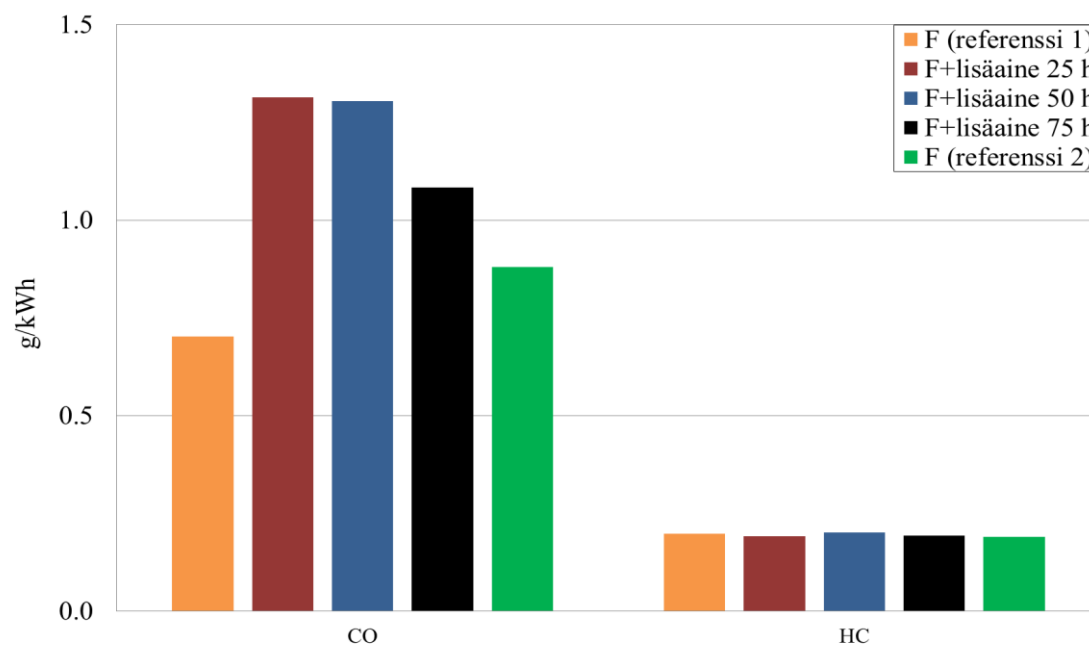
**Kuva 20.** Koemoottorin hyötysuhde lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.

Lisäainetutkimuksen savutus nähdään kuvissa 24 ja 25 pyörimisnopeuksilla 2200 r/min ja 1500 r/min. FSN-luvut vaihtelivat välillä 0,009–0,070. Savutusarvot olivat kaiken kaikkiaan pienet, eikä mitään johdonmukaista trendiä havaittu tässäkin.

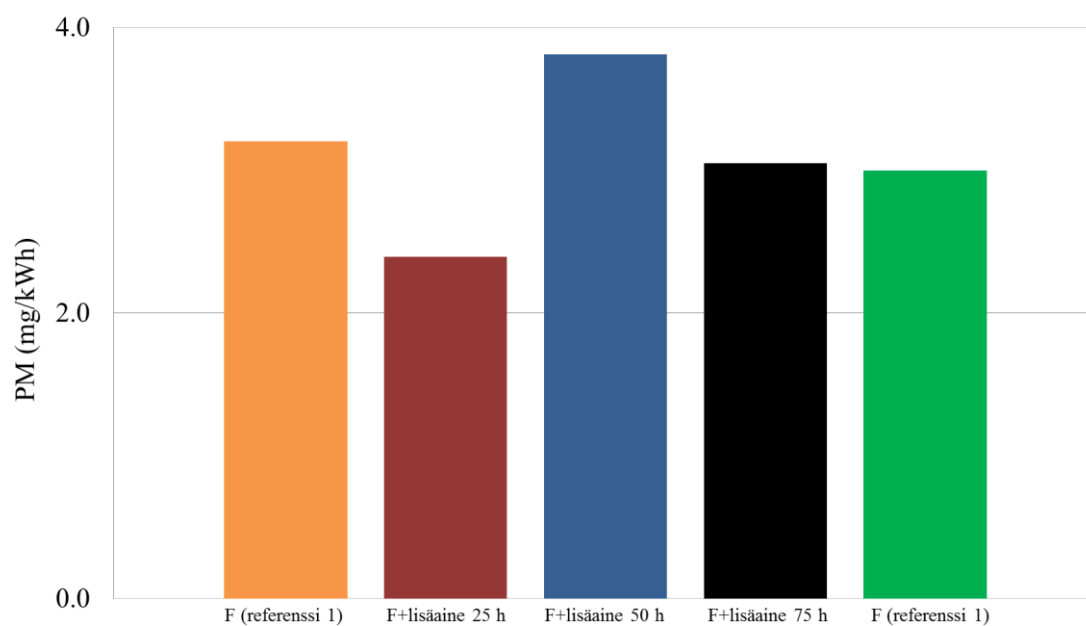
Kuvassa 26 on pakokaasun hiukkaskokojakauma referenssivoiteluöljyllä ja lisäaineistetulla voiteluöljyllä NRSC-syklin pisteessä 1. Pakokaasu sisälsi vähiten alle 10 nm:n kokoisia hiukkasia, kun koemoottorissa käytettiin lisäaineistettua voiteluöljyä. Toisaalta lisäaineistetulla voiteluöljyllä ajettaessa mitattiin eniten hiukkasia kokovälillä 20–110 nm.



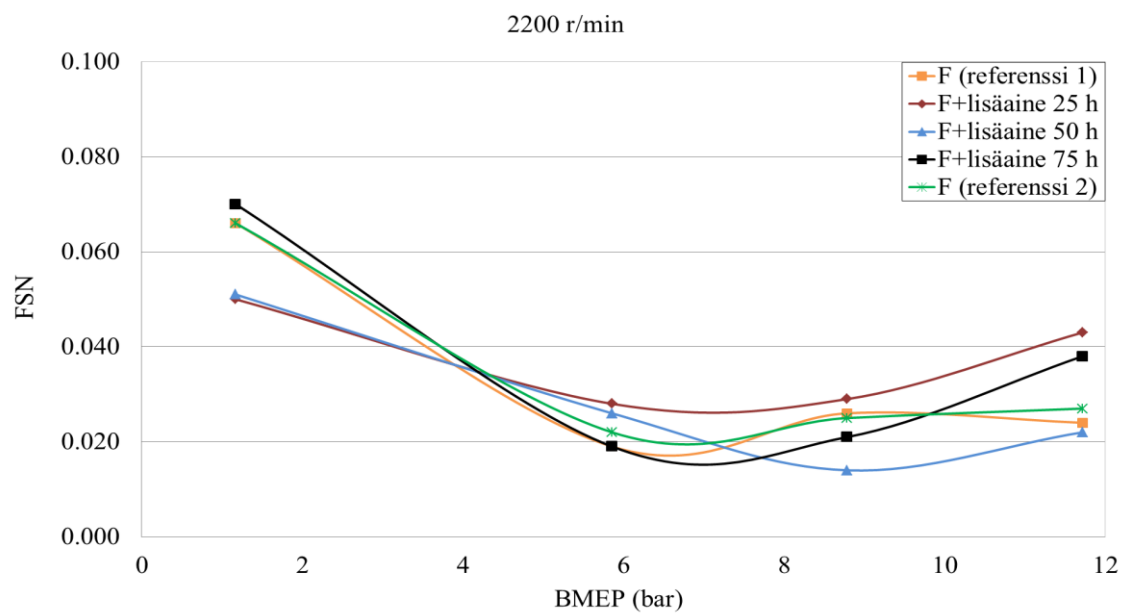
**Kuva 21.** Lisäainetutkimuksen yhdistetyt typpioksidipäästöt.



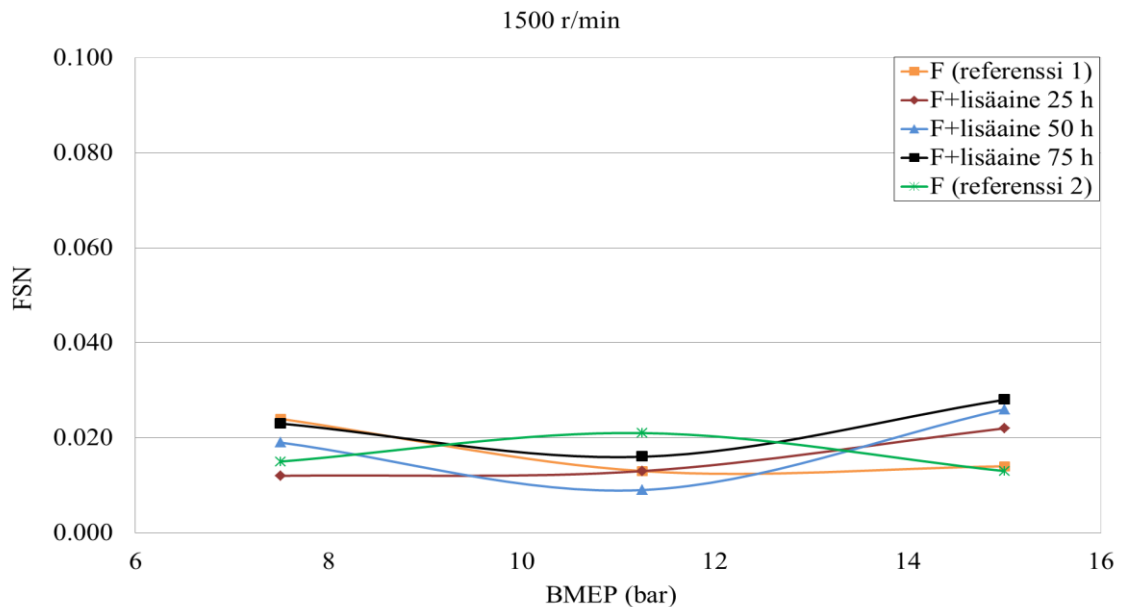
**Kuva 22.** Lisäainetutkimuksen yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöt.



**Kuva 23.** NRSC-syklin kokonaishiukkasmassat lisäainetutkimuksessa.



**Kuva 24.** Koemoottorin savutus lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.



**Kuva 25.** Koemoottorin savutus lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.

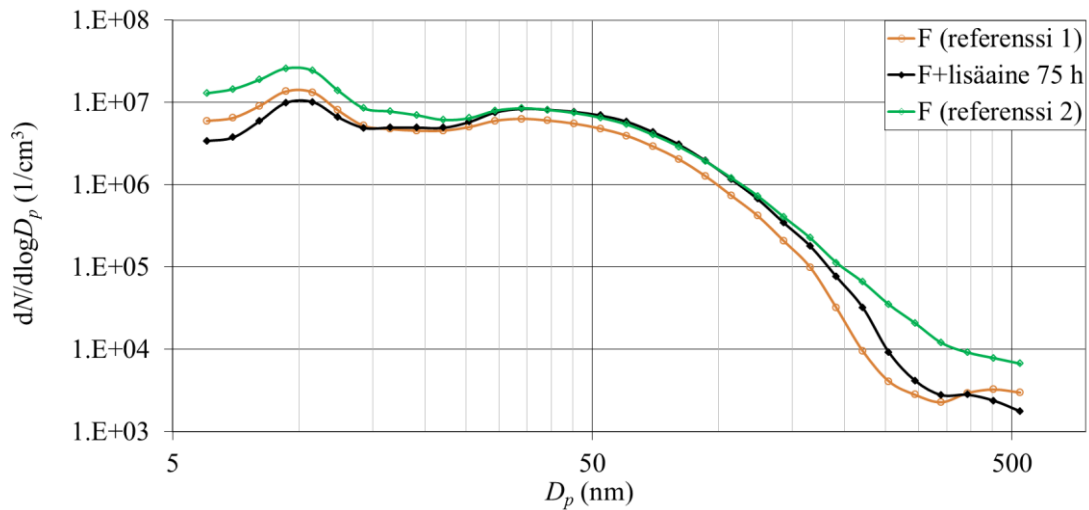
Kuvassa 27 nähdään pakokaasun hiukkaskokojakaumat NRSC-syklin pisteessä 5. Pisteessä 5 oli eniten alle 100 nm:n hiukkasia, kun koemoottorissa käytettiin lisäaineistettua voiteluöljyä. Pakokaasu sisälsi vähiten hiukkasia lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä ennen lisäainetutkimuksen aloittamista (referenssi 1). Muiden kuormituspisteiden hiukkaskokojakaumat sijaitsevat liitteessä 2.

Ennen lisäainetutkimuksen aloittamista (referenssi 1) mitatut hiukkaslukumäärät on kerrottu laimennussuhteella, joka oli pakokaasun keskimääräinen laimennussuhde koko NRSC-syklin aikana. Siksi ensimmäisen mittauskerran (referenssi 1) hiukkaskokojakaumasta ei sen vuoksi voida tehdä yksiselitteisiä johtopäätöksiä lisäaineistamattoman ja lisäaineistetun voiteluöljyn eroista.

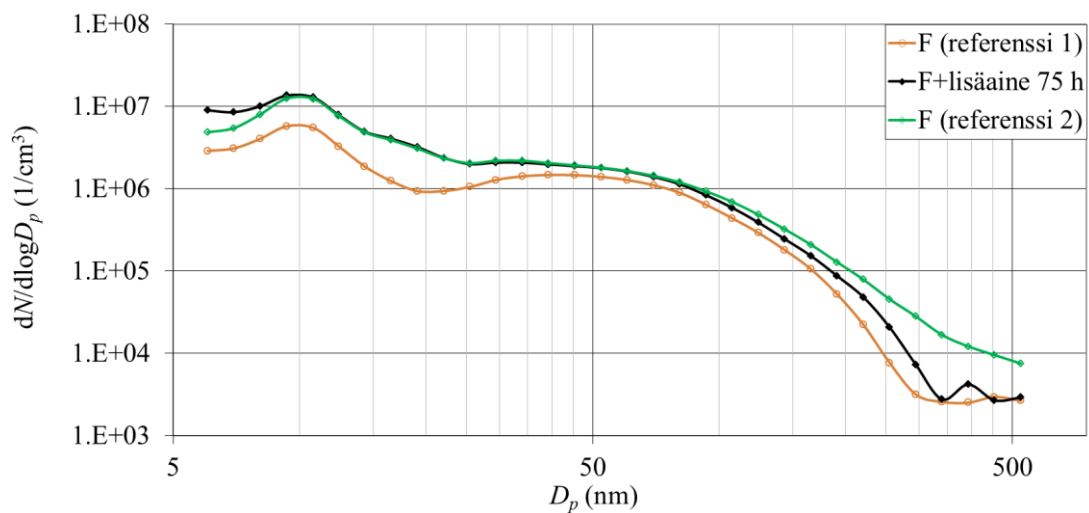
#### 4.3. Polttonesteiden vaikutus

Ympäristön lämpötila vaihteli mittausten aikana välillä 33,0–40,9 °C, kun eri polttonesteiden vaikutusta tutkittiin. Suurin vaihteluväli (4,2 °C) oli kuormituspisteessä 1. Suh-

teellinen ilmankosteus vaihteli välillä 3–7 %. Ympäristön lämpötila ja ilmankosteus on esitetty kuormituspisteittäin liitteessä 3.

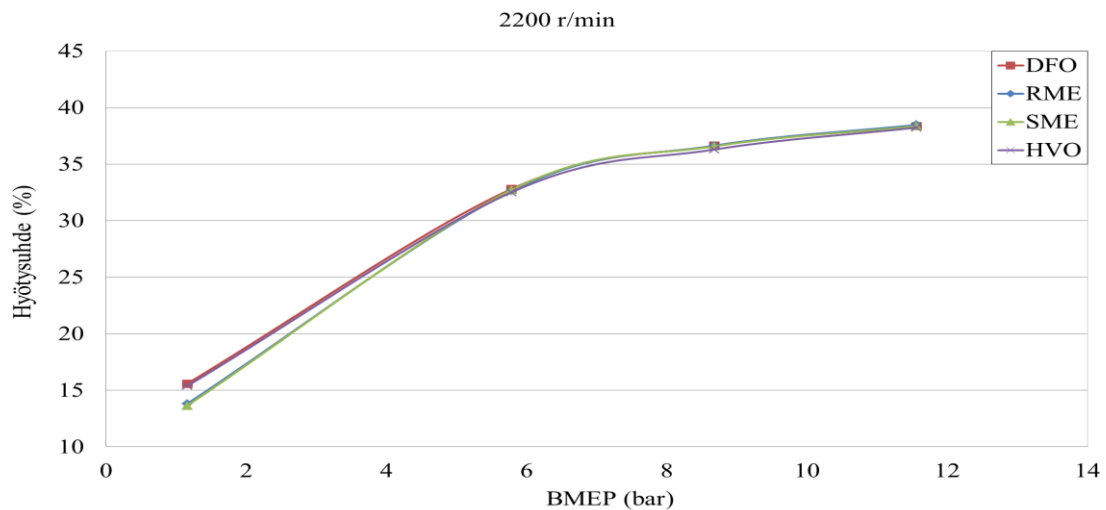


**Kuva 26.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 2200 r/min ja 100 %.

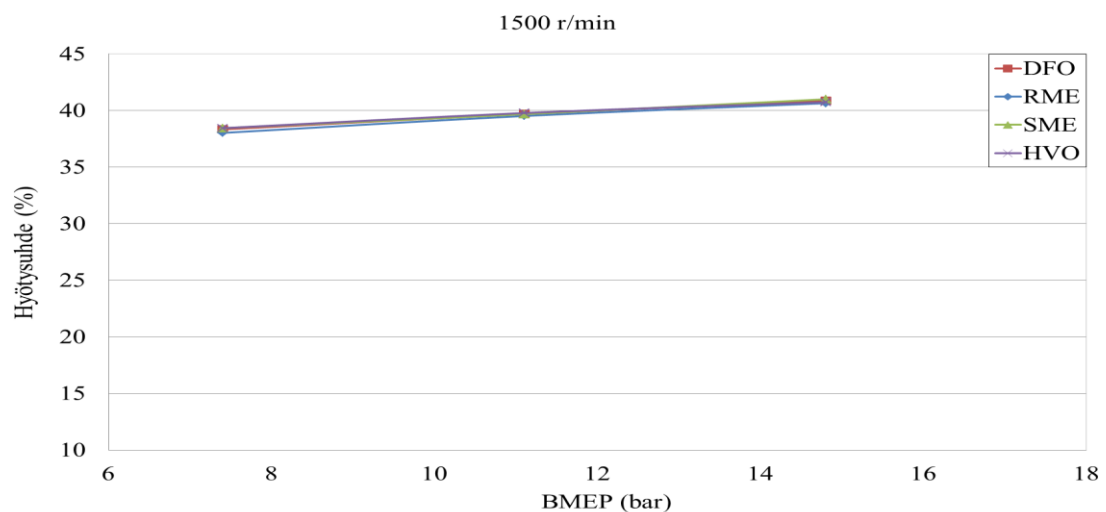


**Kuva 27.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 1500 r/min ja 100 %.

Koemoottorin hyötysuhde eri polttonesteillä on annettu kuvissa 28 ja 29 pyörimisnopeuksilla 2200 r/min ja 1500 r/min. Hyötysuhteet olivat kaikissa kuormituspisteissä miltei samat. Kun verrataan metyyliestereiden sekä vetykäsitellyn kasviöljyn hyötysuhteita fossiilisella dieselpolttoaineella havaittuihin, vaihtelivat hyötysuhteiden erot kuormituspisteittäin välillä ainoastaan 0,1–1,9 prosenttiyksikköä.



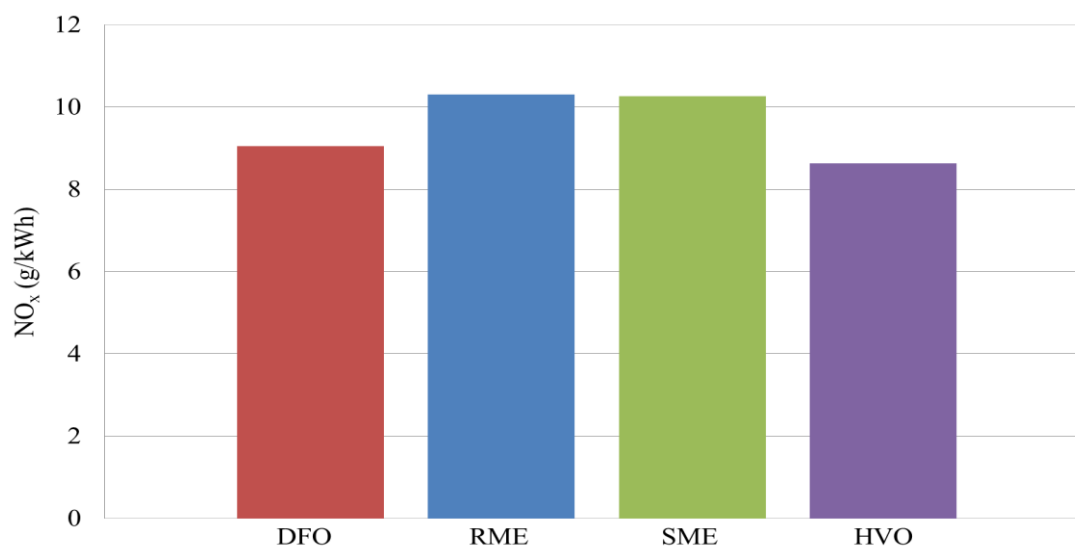
**Kuva 28.** Koemoottorin hyötysuhde eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.



**Kuva 29.** Koemoottorin hyötysuhde eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.

Kuvassa 30 ovat koemoottorin yhdistetyt typpioksidipäästöt eri polttonesteillä. Yhdistetyt typpioksidipäästöt vaihtelivat välillä 8,6–10,3 g/kWh. Koko syklin yli lasketut typpioksidipäästöt olivat pienimmät, kun polttonesteena käytettiin vetykäsiteltyä kasviöljyä, ja suurimmat, kun polttonesteena käytettiin rypsimetyyliesteriä. Ero rypsi- ja soijametyyliesterin välillä oli pieni.

Yhdistettyjen ominaispäästötulosten perusteella ei voida yksiselitteisesti sanoa, mikä polttonesteistä on vähäpäästöisin. NRSC-syklin yhdistettyihin tuloksiin vaikuttaa kahdeksan mittauservoa. Jos tarkasteltavalle polttonesteelle mitattu päästökomponentin arvo on yhdessä kuormituspisteessä todella suuri ja kaikissa muissa seitsemässä pisteessä pieni, jäävät pienet päästöarvot huomiotta. Tällöin yhdessä kuormituspisteessä mitattu suuri arvo määrää, miten tarkasteltava polttoneste sijoittuu yhdistetyissä tuloksissa vertailtaviin polttonesteisiin nähden. Tässä tutkimuksessa näin kävi erityisesti hiilivetyjen kohdalla, sillä metyyliestereiden hiilivetyypäästöt olivat huomattavasti muita suuremmat syklin pisteessä 4.

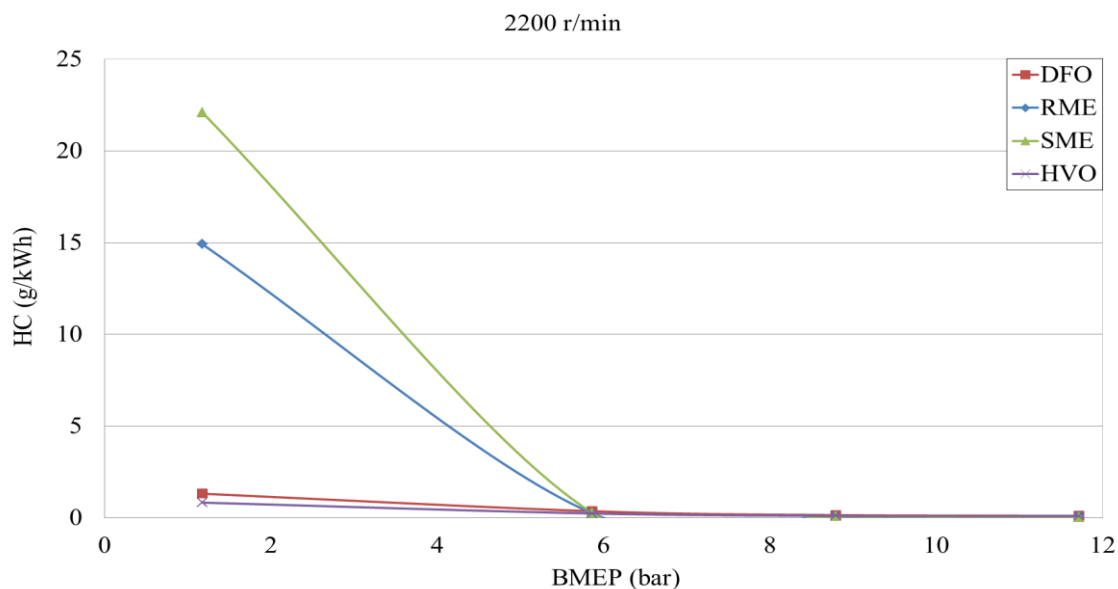


**Kuva 30.** Koemoottorin yhdistetyt typpioksidipäästöt eri polttonesteillä.

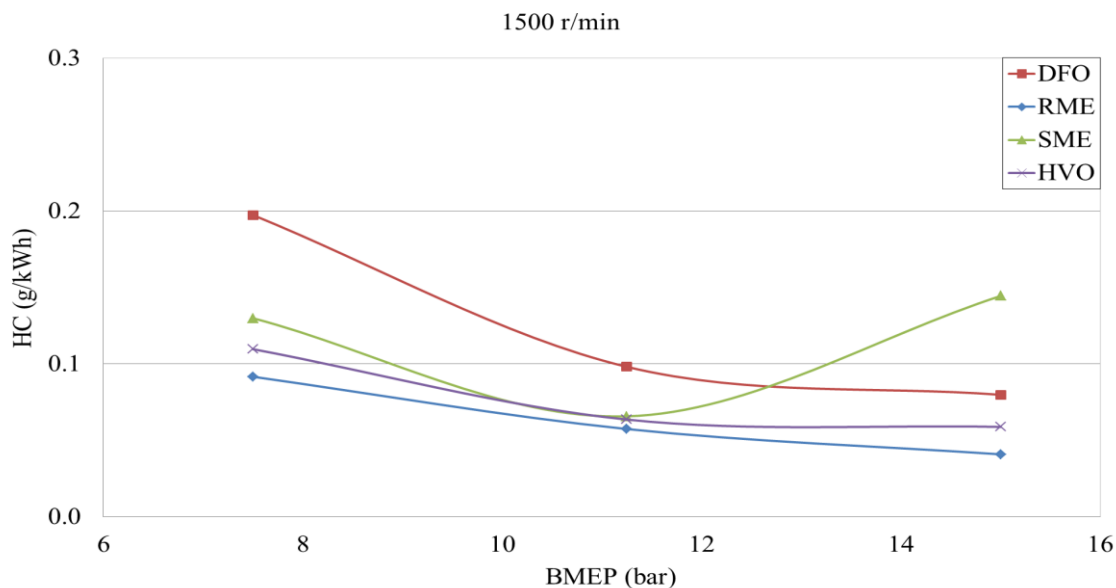
Taulukossa 8 ovat koemoottorin pakokaasusta eri polttonesteillä mitatut hiilimonoksidi- ja hiilivetytitoisuudet. Kuvissa 31 ja 32 ovat koemoottorin hiilivetytitoisuudet pyörimisnopeuksilla 2200 r/min ja 1500 r/min.

**Taulukko 8.** Koemoottorin pakokaasun hiilimonoksidi- ja hiilivetytitoisuudet NRSC-syklin kuormituspisteissä eri polttonesteillä.

Piste	CO-pitoisuus (ppm, kuiva)				HC-pitoisuus (ppm, kostea)			
	DFO	RME	SME	HVO	DFO	RME	SME	HVO
1	102	249	321	286	34	30	6	27
2	48	119	168	151	35	20	20	26
3	77	108	145	112	58	40	44	39
4	20	390	531	31	50	545	822	32
5	157	173	340	296	28	15	52	22
6	50	201	120	129	27	16	18	18
7	37	43	78	91	42	20	28	24
8	53	63	124	24	81	30	45	42



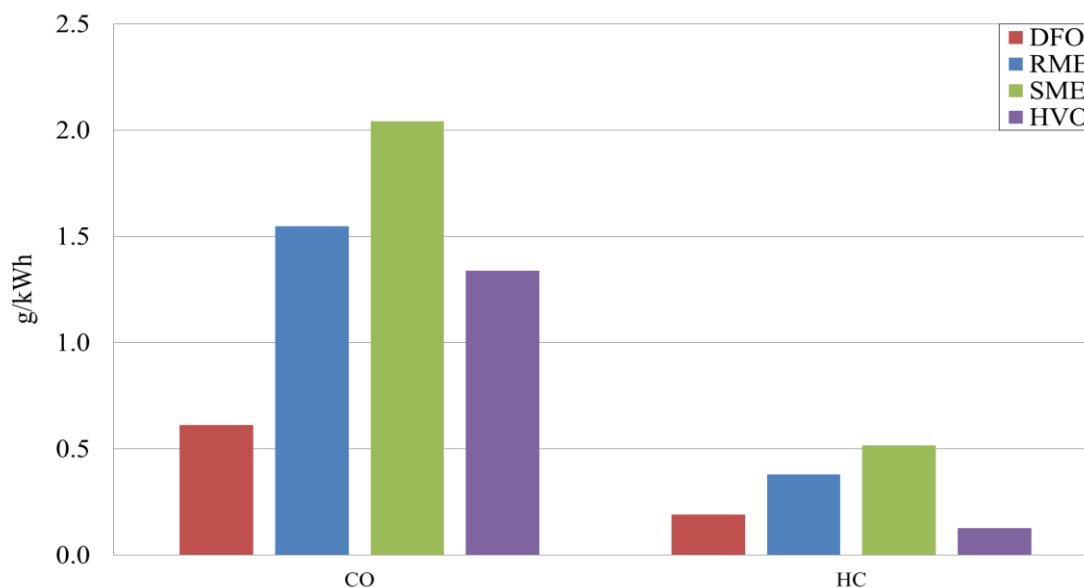
**Kuva 31.** Koemoottorin hiilivetytitoisuus eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.



**Kuva 32.** Koemoottorin hiilivetyypäästö eri polttoaineilla pyörimisnopeudella 1500 r/min.

Kuvassa 33 on esitetty pakokaasun yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivetyypäästöt. Yhdistetty hiilimonoksidipäästö vaihteli välillä 0,61–2,04 g/kWh. Koko syklin yli laskettu hiilimonoksidipäästö oli pienin, kun polttoaineena käytettiin fossiilista dieselöljyä, ja suurin, kun polttoaineena käytettiin soijametyyliesteriä. Yhdistetty hiilivetyypäästö vaihteli välillä 0,13–0,52 g/kWh. Koko syklin yli laskettu hiilivetyypäästö oli pienin, kun polttoaineena käytettiin vetykäsiteltyä kasviöljyä, ja suurin, kun polttoaineena käytettiin soijametyyliesteriä.

Kun polttoaineena käytettiin metyyliestereitä, NRSC-syklin pisteessä 4 mitattiin huomattavasti suurempi hiilivetyypitoisuus kuin muissa kuormituspisteissä. Metyyliestereillä syklin hiilivetyypäästöjä suurensi se, että pisteessä 4 hiilivetyypitoisuudet olivat huomattavan suuret (545 ja 822 ppm). Muissa kuormituspisteissä metyyliestereillä mitatut hiilivedyt olivat yleensä pienemmät kuin fossiilisella dieselpolttoaineella ja joissain tapauksissa myös vetykäsiteltyä kasviöljyä pienemmät.



**Kuva 33.** Koemoottorin yhdistetyt hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöt eri polttonesteillä.

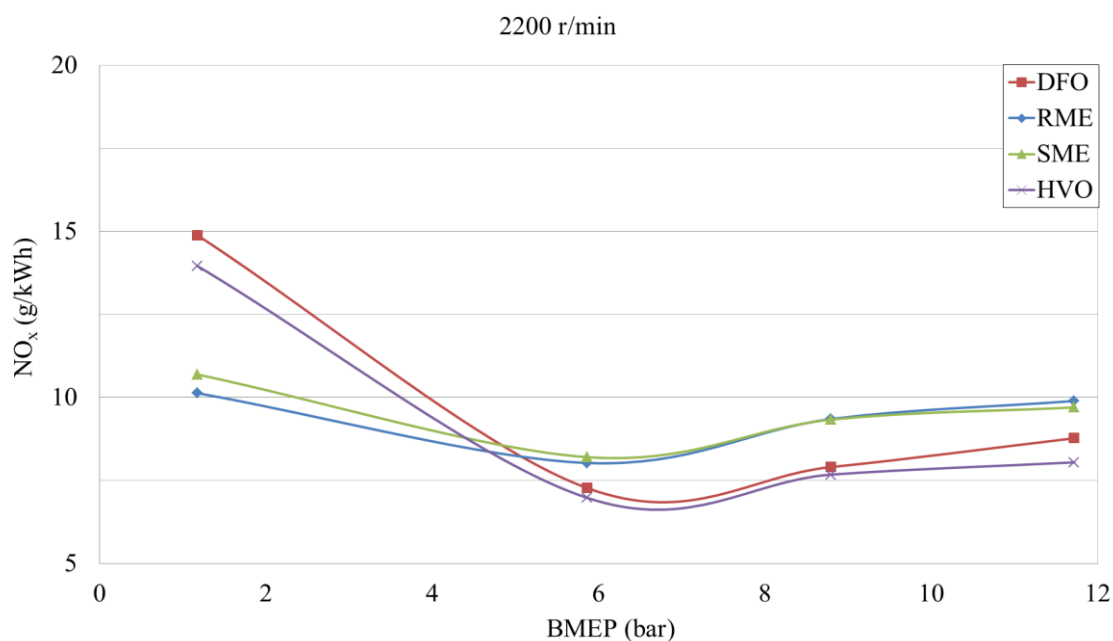
Kuvissa 34 ja 35 ovat typenoksidien ja hiilimonoksidin ominaispäästöt eri polttonesteillä sylinterin tehollisen keskipaineen funktiona pyörimisnopeudella 2200 r/min. Liitteenä 3 löytyvät typenoksidien ja hiilimonoksidin ominaispäästöt eri polttonesteillä sylinterin tehollisen keskipaineen funktiona pyörimisnopeudella 1500 r/min.

Kuvassa 36 on koemoottorin hiukkasmassan ominaispäästö eri polttonesteillä. Päästö vaihteli välillä 2,4–6,5 mg/kWh. Päästö oli pienin, kun polttoaineena käytettiin vetykäsitelyä kasviöljyä, ja suurin, kun polttoaineena käytettiin rypsimetyyliesteriä.

Liitteessä 3 ovat massaimpaktorin suodattimen punnitustulokset sekä suodattimeen kertyneet hiukkasmassat. Suodattimeen kertynyt hiukkasmassa oli pienin, kun koemoottoria ajettiin vetykäsitellyllä kasviöljyllä. Fossiilisella dieselpolttoaineella ajettaessa suodattimeen kertynyt hiukkasmassa oli pienempi kuin metyyliestereillä ajettaessa.

Koemoottorin savutus eri polttonesteillä on esitetty kuvissa 37 ja 38 pyörimisnopeuksilla 2200 r/min ja 1500 r/min. FSN-luvut vaihtelivat välillä 0,005–0,062. Pyörimisnopeu-

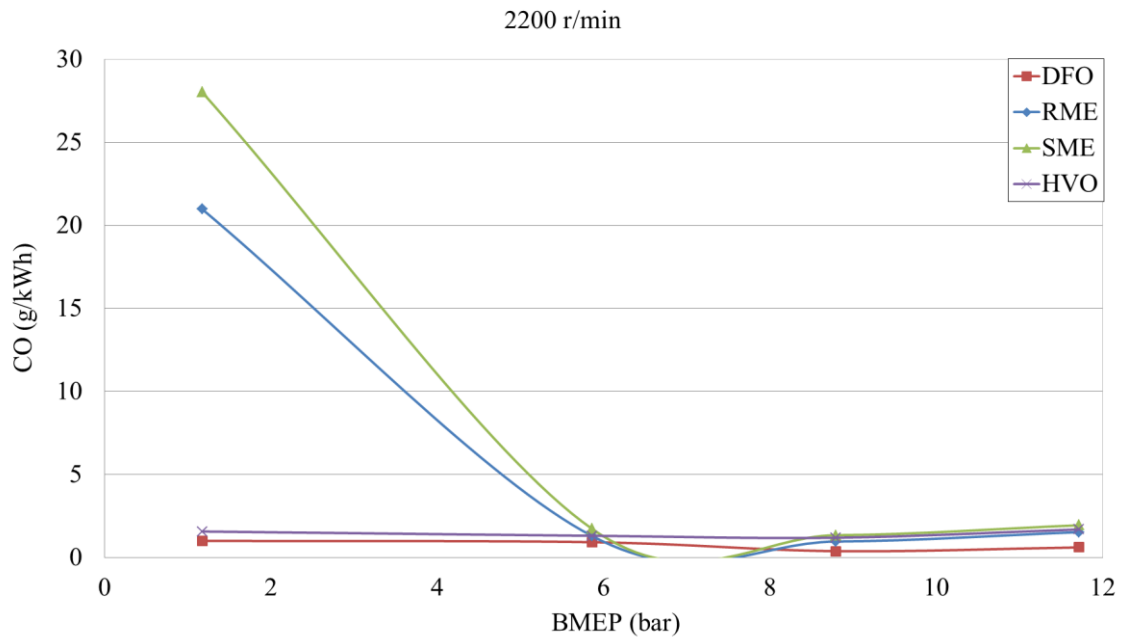
della 2200 r/min savutus oli pienin, kun polttoaineena käytettiin rypsimetyyliesteriä, ja suurin fossiilisella dieselpolttoaineella. Nopeudella 1500 r/min järjestys vaihteli. Savutus oli kaiken kaikkiaan vähäistä.



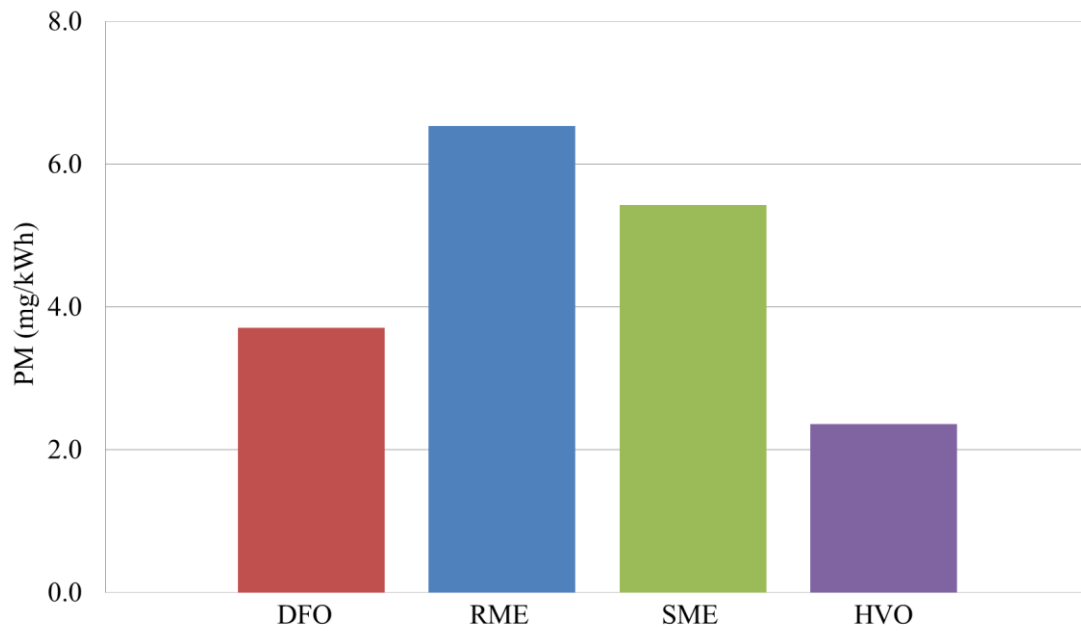
**Kuva 34.** Koemoottorin typpioksidipäästöt eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.

Kuvassa 39 on pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä NRSC-syklin pisteessä 2. Kokovälillä 5,6–30 nm fossiilinen dieselpolttoaine ja vetykäsitelty kasviöljy tuottivat vähemmän hiukkasia kuin soija- ja rypsimetyyliesteri. Toisaalta esterit tuottivat vähemmän hiukkasia, kun hiukkaskoko ylitti 35 nm.

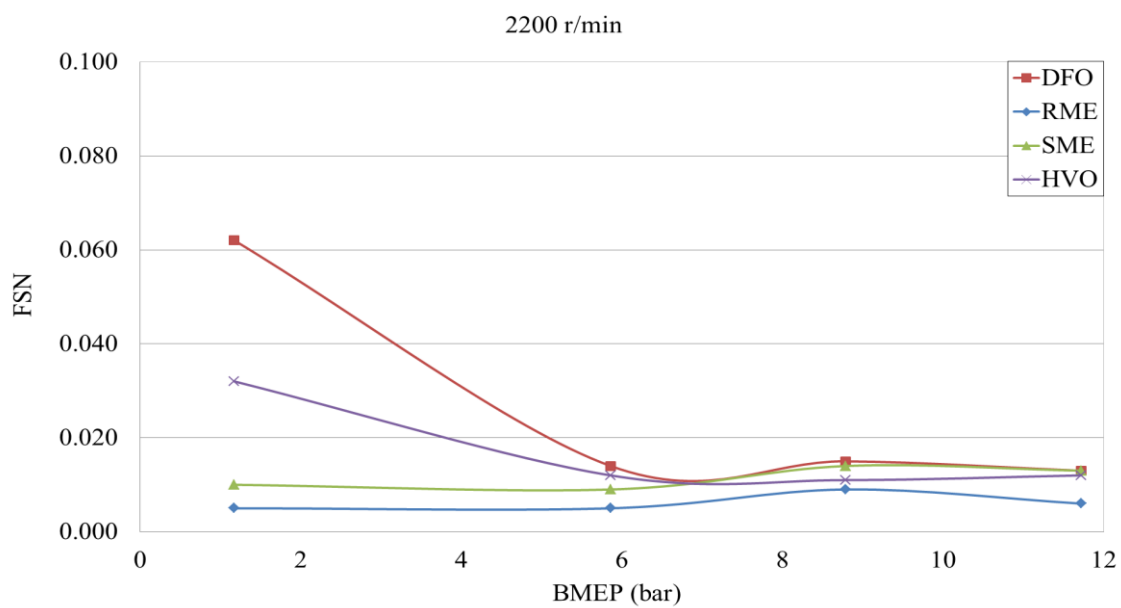
Kuvassa 40 on pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä NRSC-syklin pisteessä 5. Fossiilisella dieselpolttoaineella ja vetykäsitellyllä kasviöljyllä mitattiin vähiten hiukkasia kokovälillä 5,6–35 nm. Alueella 50–200 nm lukumäärät olivat eri polttoaineilla hyvin lähellä toisiaan. Muiden kuormituspisteiden hiukkaskokojakaumat ovat liitteessä 3.



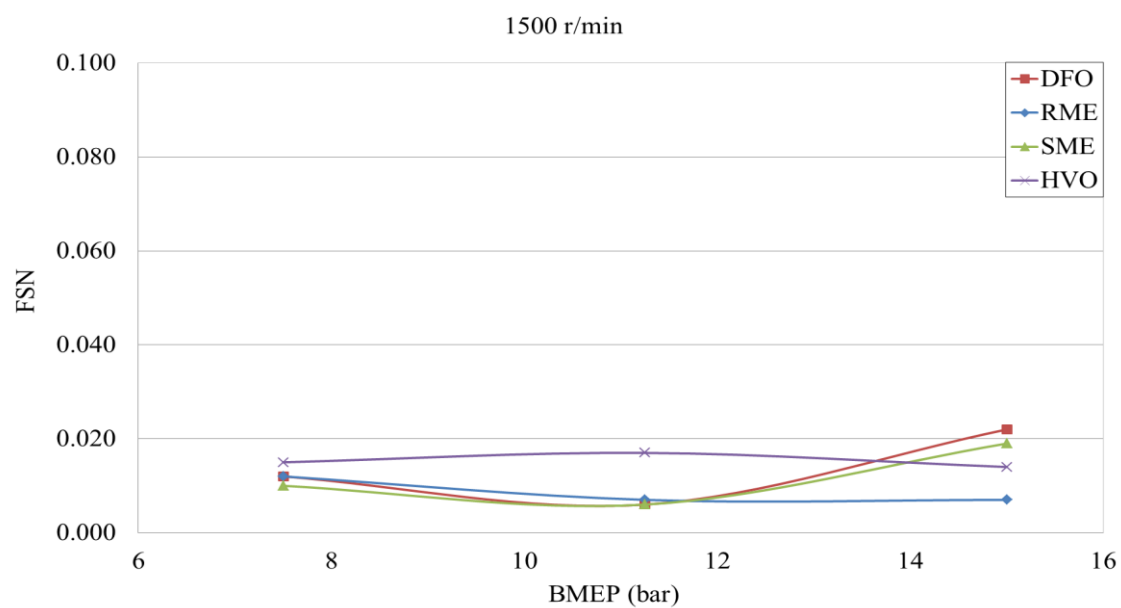
**Kuva 35.** Koemoottorin hiilimonoksidipäästö eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.



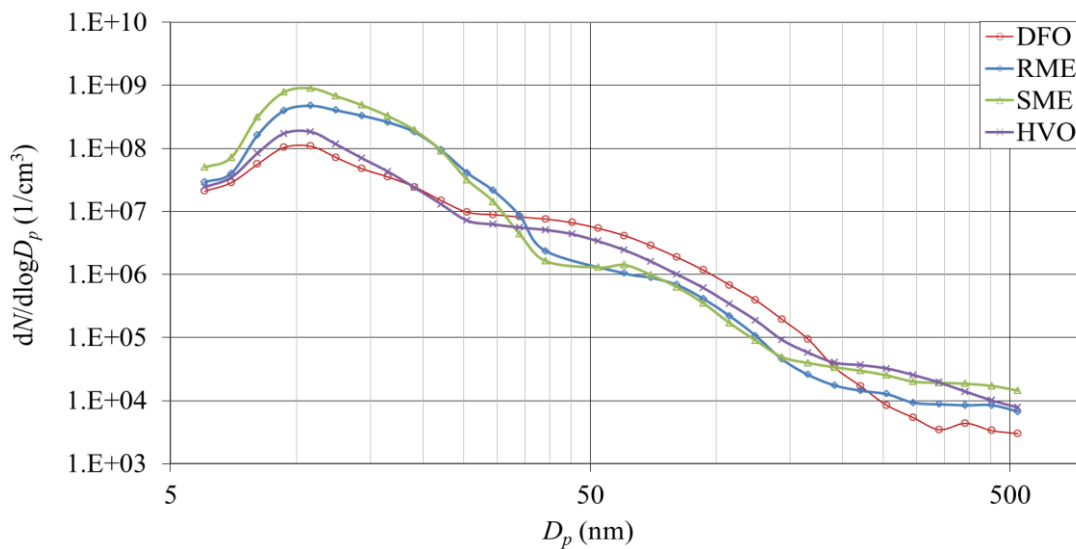
**Kuva 36.** NRSC-syklin hiukkasmassapäästö eri polttonesteillä.



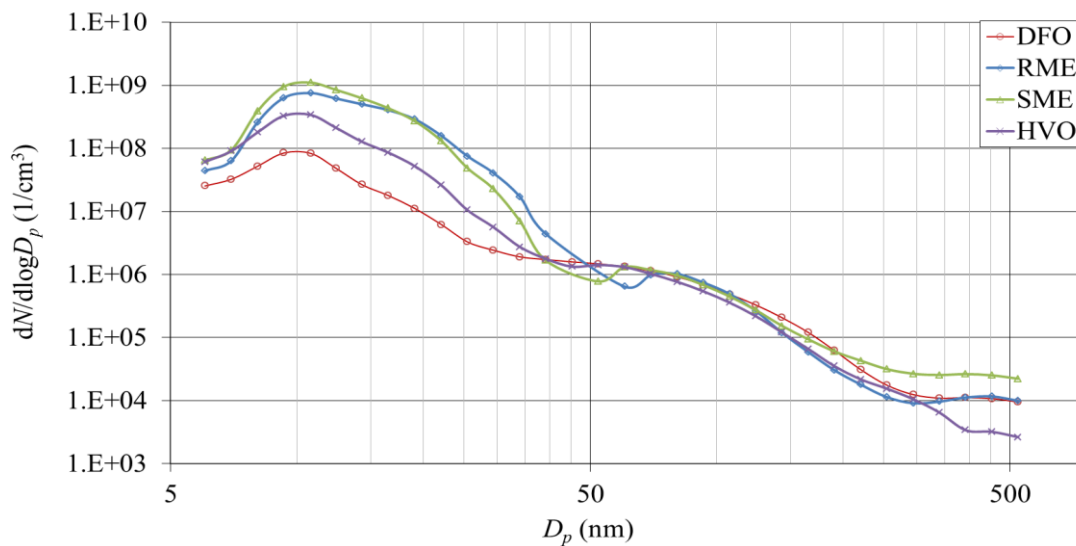
**Kuva 37.** Koemoottorin savutus eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.



**Kuva 38.** Koemoottorin savutus eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.



**Kuva 39.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormitusasteessa 2200 r/min ja 75 %.



**Kuva 40.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormitusasteessa 1500 r/min ja 100 %.

## 5. TULOSTEN ARVIOINTI

Tämän tutkimuksen mittausten epävarmuustekijät sijaitsivat joko ympäristössä, koemootorissa tai käytetyissä mittalaitteissa. Mittalaitteet oli huollettu ja puhdistettu kunakin laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti. Puhtaus vaikuttaa erityisesti spektrometrillä ja massaimpaktorilla mitattuihin tuloksiin.

Tutkimusten aikana mitatut savutusarvot vaihtelivat välillä 0,004–0,070. Koemootorin savutusarvot, jotka mitattiin tutkimuksen eri vaiheissa, lähenivät ajoittain savutusmittarin lukematarkkuutta, joka on 0,001.

Massaimpaktori, pakokaasuanalysointilaitteet sekä happi- ja hiilivetyanalysointilaitteet sijaitsivat koemootorin kanssa yhteisessä tilassa. Muut mittalaitteet olivat väliseinällä moottoritilasta erotetussa huoneessa. Mittausten aikana havaittiin, että ympäristön lämpötilan muutokset vaikuttavat hiilivetyanalysointilaitteen sisällä pakokaasunäytteen paineeseen ja siten analysointilaitteen ilmoittamaan hiilivetytipitoisuuteen. Paineen nousu oli kuitenkin vähäinen, vaikka ympäristön lämpötila kohosi moottorin käydessä useiden tuntien ajan. Näytteen paine pidettiin vakiona niin, että analysointilaitteet kalibroitiin tarvittaessa uudestaan mittausten välissä.

Tutkimusten aikana voiteluöljyjen vaihdot, koemootorilla ajettut syklit sekä mittaukset tehtiin tarkasti samanlaisina. Näin varmistettiin, että eri voiteluöljyjä voidaan vertailla keskenään. Vertailutuloksia on vähän, sillä voiteluöljyn vaikutusta dieselmootorin pakokaasun hiukkaskokojakaumaan on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin polttokeskusten vaikutusta. Lisäainetutkimuksessa moottorin kitkapinnoilla vaikutti voiteluöljyn lisäaine, kun koemootoria ajettiin pelkällä perusvoiteluöljyllä toiseen kertaan.

Eri voiteluöljyjen hiukkaskokojakaumista ei voida tehdä yksiselitteisiä johtopäätöksiä öljyjen vaikutuksesta, koska kuormituspistekohtaisia laimennussuhteita ei ollut käytettävissä. Hiukkaskokojakaumien lukumäärät kerrottiin koko NRSC-syklin keskimääräisellä laimennussuhteella. Lisäksi lisäainetutkimuksen hiukkaskokojakaumat eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään, sillä perusvoiteluöljyllä ensimmäisen kerran

(referenssi 1) mitatut hiukkaslukumäärät on kerrottu koko syklin keskimääräisellä laimennussuhteella.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Eri voiteluöljyillä mitatut hiukkaslukumäärät erosivat toisistaan, mutta hiukkaslukumääräjakaumissa ei ollut huomattavia eroja voiteluöljyjen välillä. Jokaisessa kuormituspisteessä lukumääräjakaumat olivat muodoltaan toistensa kaltaisia mitatulla kokoalueella (5,6–560 nm). Hiukkaskokojakaumissa ei ilmennyt kuitenkaan yhtäläisyyttä, jonka mukaan tietyllä voiteluöljyllä ajettaessa tulisi eniten tai vähiten hiukkasia kuormituspisteestä riippumatta. Hiukkaskokojakaumien lukumäärät on kerrottu koko NRSC-syklin keskimääräisellä laimennussuhteella, mikä lisää johtopäätösten epävarmuutta.

Tulokset voiteluöljyn lisäaineen vaikutuksesta työkonedieselmoottorin pakokaasun hiukkaskokojakaumaan eivät olleet yhteneväisiä eri kuormituspisteissä. Jatkossa voiteluöljyn lisäaineen vaikutusta pakokaasun hiukkaspäästöön tulisi tutkia niin, että lisäaineellisen voiteluöljyn käyttöaika pidennetään. Tutkittu 75 tuntia on lyhyt aika verrattuna esimerkiksi koemoottorin tyypilliseen öljynvaihtoväliin työkonikäytössä (500 tuntia).

Tulokset polttonesteiden vaikutuksesta pienihiukkasjakaumaan vahvistavat osin aiempaa käsitystä siitä, että dieselpolttoaineella ajettaessa syntyy vähemmän nanohiukkasia ( $D_p < 50$  nm) kuin rypsi- tai soijametyyliesterillä ajettaessa. Dieselpolttoaineella tai vetäksitellyllä kasviöljyllä mitattiin useimmiten vähiten hiukkasia, joiden halkaisija oli alle 30 nm. Metyyliestereillä mitattiin useimmiten vähiten hiukkasia välillä 70–200 nm. Pyörimisnopeudella 2200 r/min savutus oli pienin, kun polttoaineena käytettiin rypsimetyyliesteriä, mutta nopeudella 1500 r/min eri polttonesteiden järjestys vaihteli.

Tutkimuksen johtopäätökset voidaan kiteyttää seuraavasti:

- Eri voiteluöljyjen välisissä hiukkaskokojakaumissa ei ollut huomattavia eroja.
- Voiteluöljyn lisäaineen vaikutukset hiukkaspäästöihin sekä kaasumaisiin päästöihin jäivät vähäisiksi 75 tunnin aikana.
- Voiteluöljyn lisäaineen vaikutuksia hiukkaspäästöihin sekä kaasumaisiin päästöihin on tutkittava huomattavasti kauemmin kuin 75 tuntia.

- Dieselpolttoaineella tai vetykäsittelöllä kasviöljyllä ajettaessa syntyi useimmiten vähiten hiukkasia, joiden halkaisija oli alle 30 nm.
- Metyyliesterit tuottivat useimmiten vähiten hiukkasia välillä 70–200 nm.
- Aiemmista tutkimuksista poiketen fossiilisen dieselpolttoaineen käyttö tuotti vähemmän hiilimonoksidia kuin biopolttonesteet kaikissa muissa kuormituspisteissä paitsi joutokäynnillä.
- Vetykäsittelöllä kasviöljyllä oli pienimmät yhdistetyt typpioksidi- ja hiilivety-päästöt sekä pienin hiukkasmassapäästö.
- Metyyliesterit tuottivat vähemmän hiilivetyjä kuin fossiilinen dieselpolttoaine aivan pientä kuormaa lukuun ottamatta.
- Savutus oli hyvin vähäistä kaikilla polttonesteillä.

## 7. YHTEENVETO

Palamisperäiset pienhiukkaset ovat haitallisia hiukkasille altistuville ihmisille. Pienimmät hiukkaset saattavat kulkeutua hengityselimien kautta sydän- ja verisuonijärjestelmään ja siitä edelleen aivoverenkiertoon.

Polttomootorit ovat merkittävä hiukkaspäästöjen lähde. Polttomootorissa polttoaineen kemiallinen energia muuttuu palamisen kautta mekaaniseksi energiaksi. Samalla syntyy pienhiukkasia, koska palaminen on aina jossain määrin epätäydellistä.

Uusia polttomootoreita koskevat päästöstandardit määrittelevät, kuinka paljon moottorien pakokaasut saavat sisältää pienhiukkasia sekä kaasumaisia päästökomponeentteja (CO, NO<sub>x</sub>, HC). Dieselmootorin pakokaasupäästöjä voidaan vähentää esimerkiksi pakokaasun jälkikäsittelymenetelmillä sekä parantuneilla polttoaineilla. Voiteluaineiden merkitys pienhiukkasten synnyssä lisääntyy, koska polttoaineet paranevat ja päästörajotukset tiukkenevat.

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia, miten voiteluöljy, voiteluöljyn lisäaine ja polttonesteet vaikuttavat työkonedieselmootorin pakokaasun pienhiukkasiin, savutukseen ja kaasumaisiin päästöihin.

Koemootorina käytettiin nopeakäyntistä nelitahtista työkonedieselmootoria, jossa oli hukkaportilla varustettu turboahdin ja ahtoilman jäähdytys. Koemootorin pakokaasusta mitattiin pienhiukkasten lukumäärä, kokojakauma ja massa. Lisäksi mitattiin savutus, typpi- ja hiilioksidit, hiilivedyt sekä happipitoisuus. Koematriisina käytettiin ISO 8178-4 -standardin kahdeksan pisteen C1-sykliä (NRSC).

Ensimmäisenä tutkittiin viiden eri voiteluöljyn vaikutus päästöihin. Tutkituista voiteluöljyistä neljä on kaupallisia ja viides oli toimittajan kehitystuote. Seuraavana tutkittiin kaupallista voiteluöljyä, johon lisättiin erillistä lisäainetiivistettä. Mootoria ajettiin lisäaineistetulla voiteluöljyllä 75 tunnin ajan. Viimeisenä tutkittiin eri polttonesteiden vaikutuksia pakokaasun pienhiukkasiin, savutukseen sekä kaasumaisiin päästöihin.

EEPS-spektrometrin mittaustuloksista laskettiin hiukkaslukumäärät  $dN/d\log D_p$  hiukkasen liikkuvuushalkaisijan  $D_p$  funktiona NRSC-syklin kuormituspisteissä. Massaimpaktorin suodattimen punnitustuloksista ja kaasumaisten päästöjen mittaustuloksista laskettiin hiukkasmassan, hiilimonoksidin, typenoksidien sekä hiilivetyjen ominaisemissiot. Myös savutus mitattiin.

Eri voiteluöljyillä mitatuissa hiukkaskokojakaumissa ei ollut huomattavia eroja. Hiukkaskokojakaumien lukumäärät on kuitenkin kerrottu koko NRSC-syklin keskimääräisellä laimennussuhteella eikä kunkin kuormituspisteen omalla laimennussuhteella. Hiukkaskokojakaumista ei sen vuoksi voida tehdä yksiselitteisiä johtopäätöksiä öljyjen keskinäisistä eroista.

Voiteluöljyn lisäaineen vaikutukset hiukkaspäästöihin sekä kaasumaisiin päästöihin jäivät vähäisiksi 75 tunnin aikana. Jatkossa voiteluöljyn lisäaineen vaikutuksia hiukkaspäästöihin sekä kaasumaisiin päästöihin on tutkittava huomattavasti pidempään kuin 75 tuntia.

Dieselpolttoaineella tai vetykäsitellyllä kasviöljyllä ajettaessa syntyi useimmiten vähiten hiukkasia, joiden halkaisija oli alle 30 nm. Metyyliesterit tuottivat useimmiten vähiten hiukkasia välillä 70–200 nm. Vetykäsitellyllä kasviöljyllä oli pienin hiukkasmassapäästö. Aiemmista tutkimuksista poiketen fossiilisen dieselpolttoaineen käyttö tuotti vähemmän hiilimonoksidia kuin biopolttonesteet.

Typpioksidipäästöt olivat useimmiten pienimmät, kun polttonesteenä käytettiin vetykäsitelyä kasviöljyä. Hiilimonoksidipäästö oli pienin, kun polttoaineena käytettiin fossiilista dieselöljyä. Moottorin savutus oli kaiken kaikkiaan hyvin vähäistä kaikilla polttonesteillä.

## LÄHDELUETTELO

- Aatola, H., M. Larmi, T. Sarjovaara & S. Mikkonen (2009). Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NO<sub>x</sub>, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. *SAE International Journal of Engines* [online] 1:1 [siteerattu 10.2.2013], 1251-1262. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.4271/2008-01-2500>>.
- Anderson, J. O., J. G. Thundiyil & A. Stolbach (2012). Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *Journal of Medical Toxicology* [online] 8:2 [siteerattu 11.3.2013], 166–175. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>>.
- AVL (2005). *Smoke Value Measurement with the Filter-paper-method – Application Notes*. [Käyttöopas]. 112 s. Saatavana World Wide Webistä: <URL:[https://www.avl.com/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2b39210c-6937-43e4-b223-b5c2c11f91ac&groupId=10138](https://www.avl.com/c/document_library/get_file?uuid=2b39210c-6937-43e4-b223-b5c2c11f91ac&groupId=10138)>.
- Burtscher, Heinz (2005). Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review. *Journal of Aerosol Science* [online] 36:7 [siteerattu 7.3.2013], 896–932. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.12.001>>.
- DeCarlo P. F., J. G. Slowik, D. R. Worsnop, P. Davidovits & J. L. Jimenez (2004). Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory. *Aerosol Science and Technology* [online] 38:12 [siteerattu 14.3.2013], 1185–1205. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1080/027868290903907>>.
- Dekati (2009). *Dekati PM10 Impactor – User Manual, Version 2.50*. [Käyttöopas]. 32 s. Saatavana World Wide Webistä: <URL:[http://www.biral.com/imagprod/downloads/PM10\\_Manual\\_2.5.pdf](http://www.biral.com/imagprod/downloads/PM10_Manual_2.5.pdf)>.

- Demirbas, Ayhan (2008). *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. London: Springer-Verlag. 218 p. ISBN 978-1-84628-994-1.
- DieselNet (2012a). Emission standards. European Union. Nonroad diesel engines. [online]. [siteerattu 25.10.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>>.
- DieselNet (2012b). Emission standards. United States. Nonroad diesel engines. [online]. [siteerattu 25.10.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php>>.
- DieselNet (2012c). Emission standards. Emission test cycles. ISO 8178. [online]. [siteerattu 26.10.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.dieselnet.com/standards/cycles/iso8178.php>>.
- Dong, L., G. Shu & X. Liang (2013). Effect of lubricating oil on the particle size distribution and total number concentration in a diesel engine. *Fuel Processing Technology* [online] 109 [siteerattu 25.10.2012], 78–83. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.040>>.
- Eastwood, Peter (2008). *Particulate Emissions from Vehicles*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 494 p. ISBN 978-0-470-72455-2.
- Froelund, K. & E. Yilmaz (2004). Impact of engine oil consumption on particulate emissions. *International Conference on Automotive Technology*. Istanbul, Turkey, 26.11.2004. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.osd.org.tr/17.pdf>>.
- Hassaneen, A., A. Munack, Y. Ruschel, O. Schröder & J. Krahl (2012). Fuel economy and emission characteristics of gas-to-liquid (GTL) and rapeseed methyl ester (RME) as alternative fuels for diesel engines. *Fuel* [online] 97 [siteerattu 12.10.2012], 125–130. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.077>>.

Heywood, John B. (1988). *Internal Combustion Engines Fundamentals*. New York: McGraw-Hill Inc. 930 p. ISBN 0-07-028637-X.

Hiukkastieto (2012). Hiukkaskäsikirja. Hiukkasten koko ja muoto. [online]. [siteerattu 18.3.2013]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://hiukkastieto.fi/node/22>>.

Horiba (2007). *Operating manual – Eddy Current Dynamometer of the WT Series*. [Käyttöopas]. 75 s.

Jung, H., D. B. Kittelson & M. R. Zachariah (2003). The influence of engine lubricating oil on diesel nanoparticle emissions and kinetics of oxidation. *SAE Technical Paper 2003-01-3179*. [siteerattu 9.3.2013]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.4271/2003-01-3179>>.

Kittelson, David B. (1998). Engine and nanoparticles: a review. *Journal of Aerosol Science* [online] 29:5–6 [siteerattu 11.2.2013], 575–588. Saatavana World Wide Webistä: <URL:[http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502\(97\)10037-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502(97)10037-4)>.

Kittelson, D. B., W. F. Watts & J. P. Johnson (2006). On-road and laboratory evaluation of combustion aerosol – Part1: Summary of diesel engine results. *Journal of Aerosol Science* [online] 37:8 [siteerattu 31.5.2013], 913–930. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.08.005>>.

Lapuerta, M., O. Armas & J. Rodríguez-Fernández (2008). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*. [online] 34:2 [siteerattu 23.4.2013], 198–223. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2007.07.001>>.

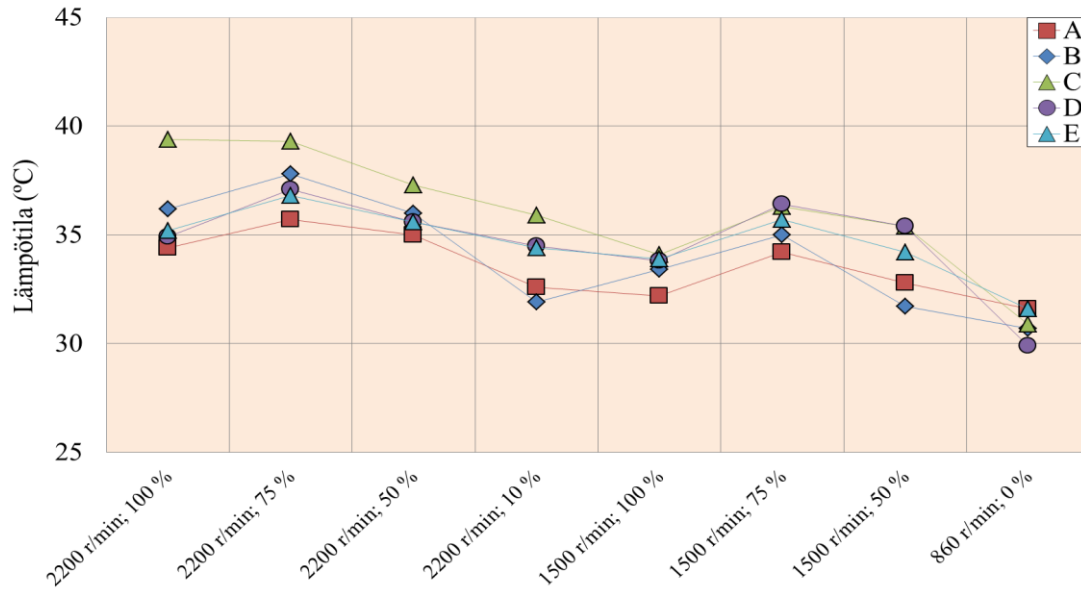
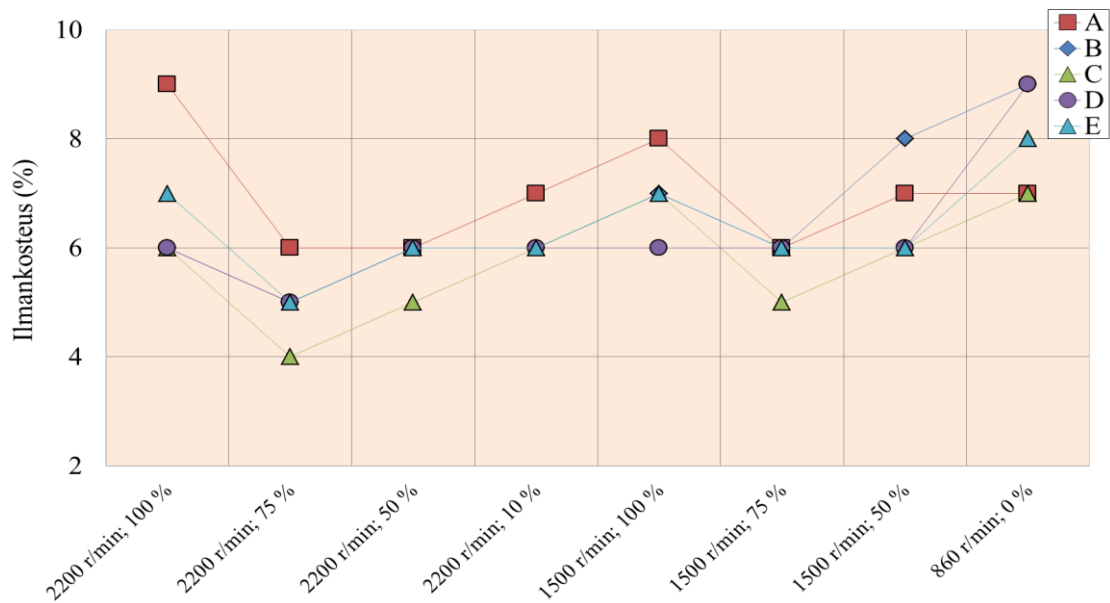
- Liati, A., A. Spiteri, P. D. Eggenschwiler & N. Vogel-Schäuble (2012). Microscopic investigation of soot and ash particulate matter derived from biofuel and diesel: implications for the reactivity of soot. *Journal of Nanoparticle Research* [online] 14:11 [siteerattu 30.7.2013], 1-18. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1007/s11051-012-1224-7>>.
- Majewski, W. A. & M. K. Khair (2006). *Diesel Emissions and Their Control*. Warrendale: SAE International. 561 p. ISBN 978-0-7680-0674-2.
- Neste (2013). Tuotteet. Tuote- ja käyttöturvatiedotteet. Voiteluaineet. [online]. Espoo: Neste Oil Oyj. Saatavana World Wide Webistä: <URL:[http://www.neste.fi/tuotteet\\_tuotelistaus.aspx?path=2589%2c2655%2c2698%2c2699%2c2701](http://www.neste.fi/tuotteet_tuotelistaus.aspx?path=2589%2c2655%2c2698%2c2699%2c2701)>.
- Petrović, V. S., S. P. Janković, T. V. Miroļjub, Z. S. Jovanović & D. M. Knežević (2011). The possibilities for measurement and characterization of diesel engine fine particles: A review. *Thermal Science* [online] 15:4 [siteerattu 6.12.2012], 915–938. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.2298/TSCI110509092P>>.
- Shell (2013). Tuotetiedot ja käyttöturvallisuustiedotteet (MSDS) [online]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.shell.fi/msds.html>>.
- Schröder, O., J. Bünger, A. Munack, G. Knothe & J. Krahl (2013). Exhaust emissions and mutagenic effects of diesel fuel, biodiesel and biodiesel blends. *Fuel* [online] 103 [siteerattu 4.3.2013], 414-420. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.050>>.
- Siemens (2001). *Siemens Oxymat 61 – The Oxygen Analyzer For Standard Applications*. [Käyttöopas]. 118 s. Saatavana World Wide Webistä: <URL:[http://cache.automation.siemens.com/dnl/TM2Mzc4MzUA\\_9215674\\_HB/A5E00123067\\_e.pdf](http://cache.automation.siemens.com/dnl/TM2Mzc4MzUA_9215674_HB/A5E00123067_e.pdf)>.

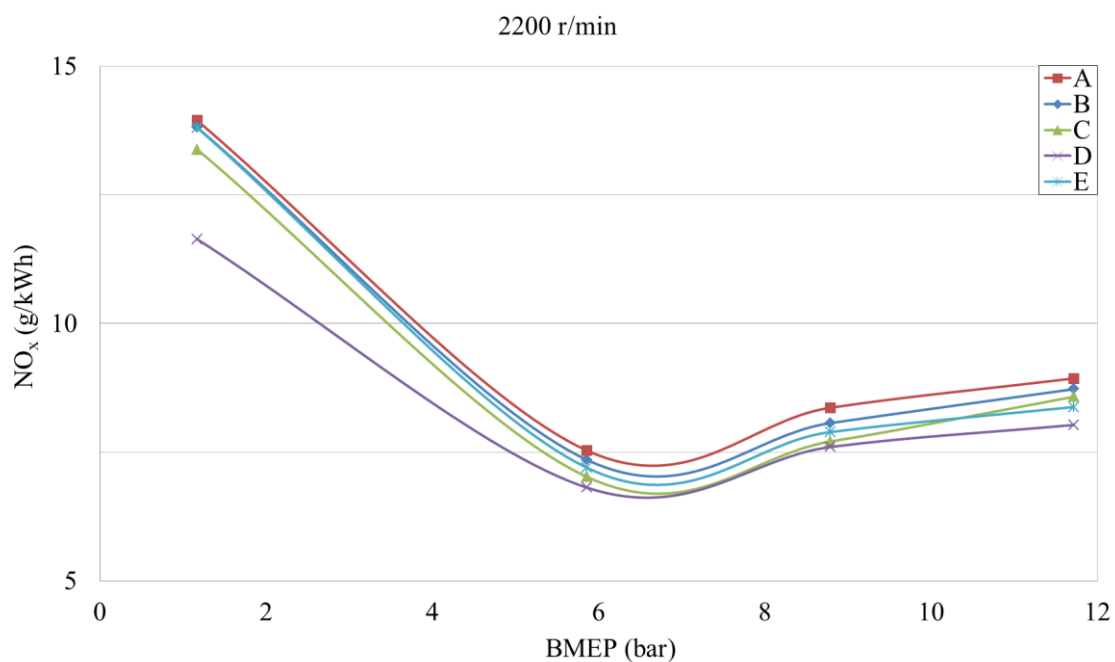
- Soyhan, H. S., E. Buyukkaya & B. Gokalp (2011). Performance and emissions of a diesel tractor engine fueled with marine diesel and soybean methyl ester. *Biomass and Bioenergy* [online] 35:8 [siteerattu 12.10.2012], 3575–3583. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.015>>.
- Stone, Richard (1999). *Introduction to Internal Combustion Engines*. 3. painos. Basingstoke: Palgrave Macmillan. 646 p. ISBN 0-333-74013-0.
- Teboil (2013). Raskaan kaluston moottoriöljyt. [online]. Helsinki: Oy Teboil Ab. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.teboil.fi/FolderProducts.asp?path=1;1510;1508;4351;4352;4354>>.
- Tschöke, H., A. Graf, J. Stein, M. Krüger, J. Schaller, N. Breuer, K. Engeljehring & W. Schindler (2010). Environmental pollution by diesel engines. Teoksessa: *Handbook of Diesel Engines*, 415–504. Toim. K. Mollenhauer & H. Tschöke. Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-89082-9.
- Turunen, R. & S. Niemi (2002). Polttomoottorit. Teoksessa: *Poltto ja Palaminen*, 585–624. Toim. R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit. ISBN 951-666-604-3.
- Vaaraslahti, K., J. Keskinen, B. Giechaskiel, A. Solla, T. Murtonen & H. Vesala (2005). Effect of lubricant on the formation of heavy-duty diesel exhaust nanoparticles. *Environmental Science & Technology* [online] 39:21 [siteerattu 15.4.2013], 8497–8504. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://dx.doi.org/10.1021/es0505503>>.
- Wright, A. A. (2005). *Exhaust Emissions from Combustion Machinery*. London: The Institute of Marine Engineering, Science and Technology. 246 p. ISBN 1-902536-17-7.

## LIITTEET

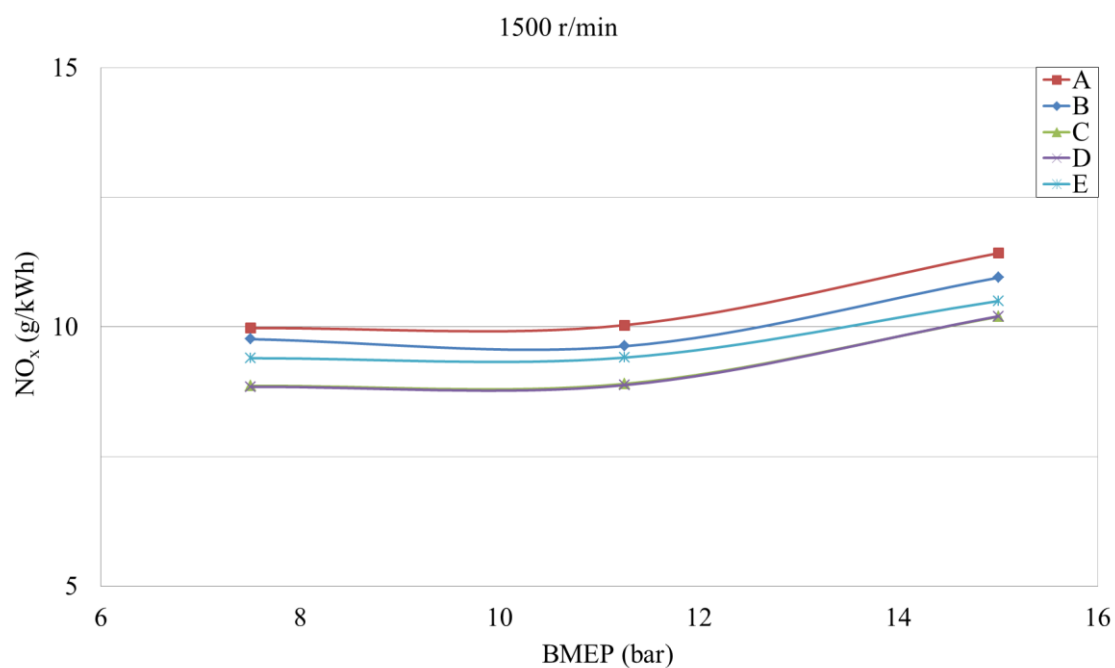
LIITE 1. Muut kaaviot voiteluöljyjen vertailusta.

(1/3)

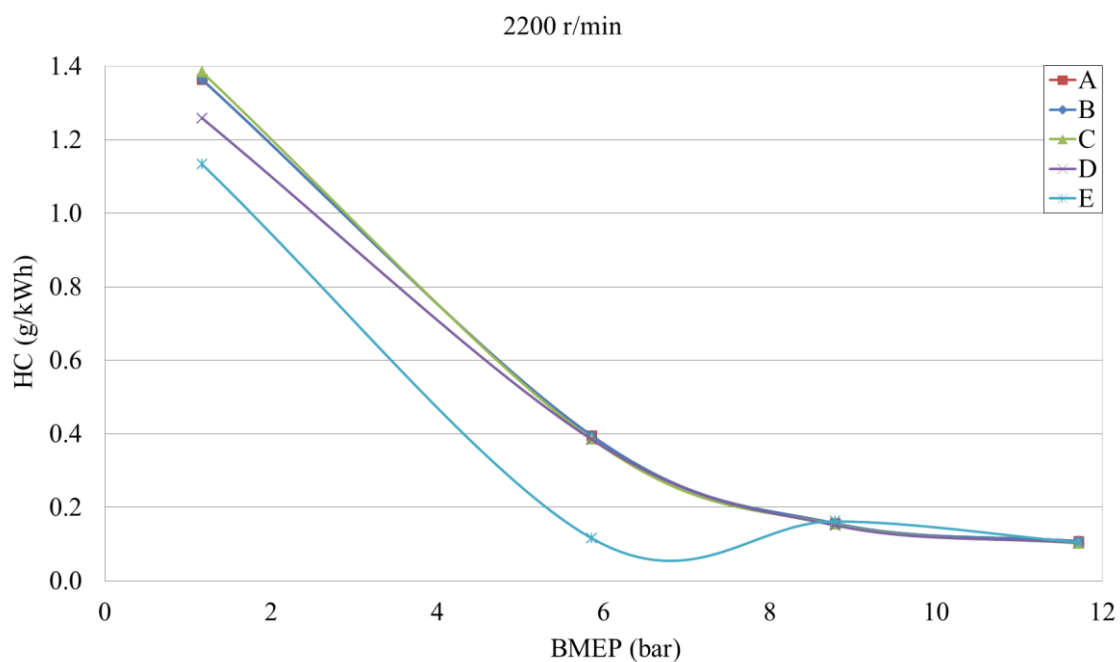
**Kuva 41.** Ympäristön lämpötila kuormituspisteittäin eri voiteluöljyjä tutkittaessa.**Kuva 42.** Ympäristön suhteellinen ilmankosteus kuormituspisteittäin eri voiteluöljyjä tutkittaessa.



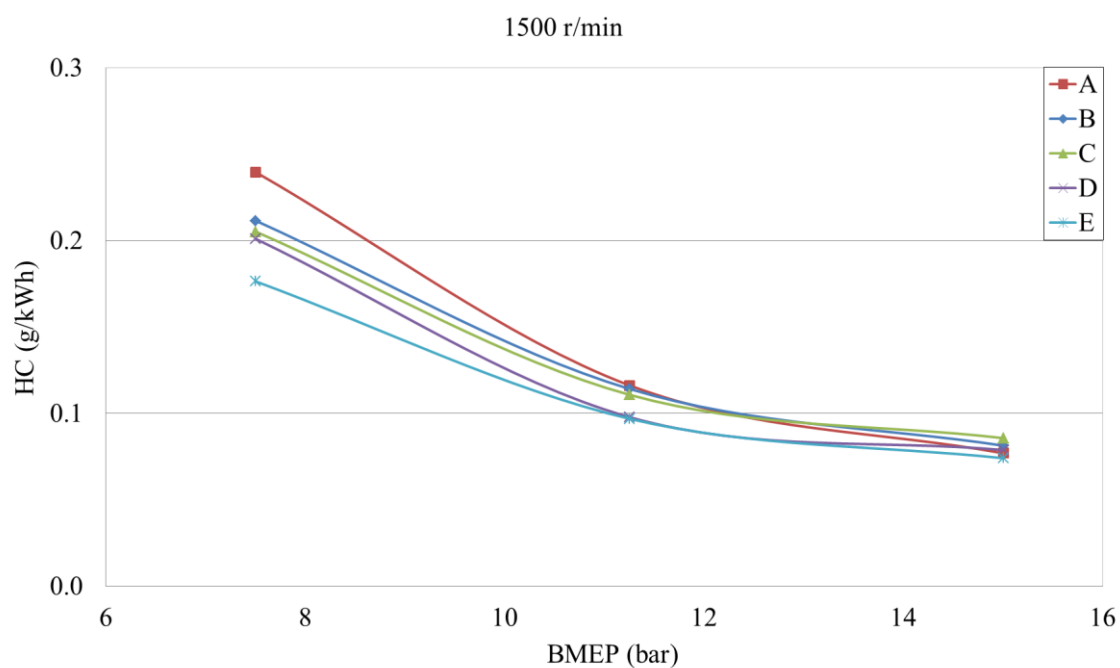
**Kuva 43.** Koemoottorin typpioksidipäästöt eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.



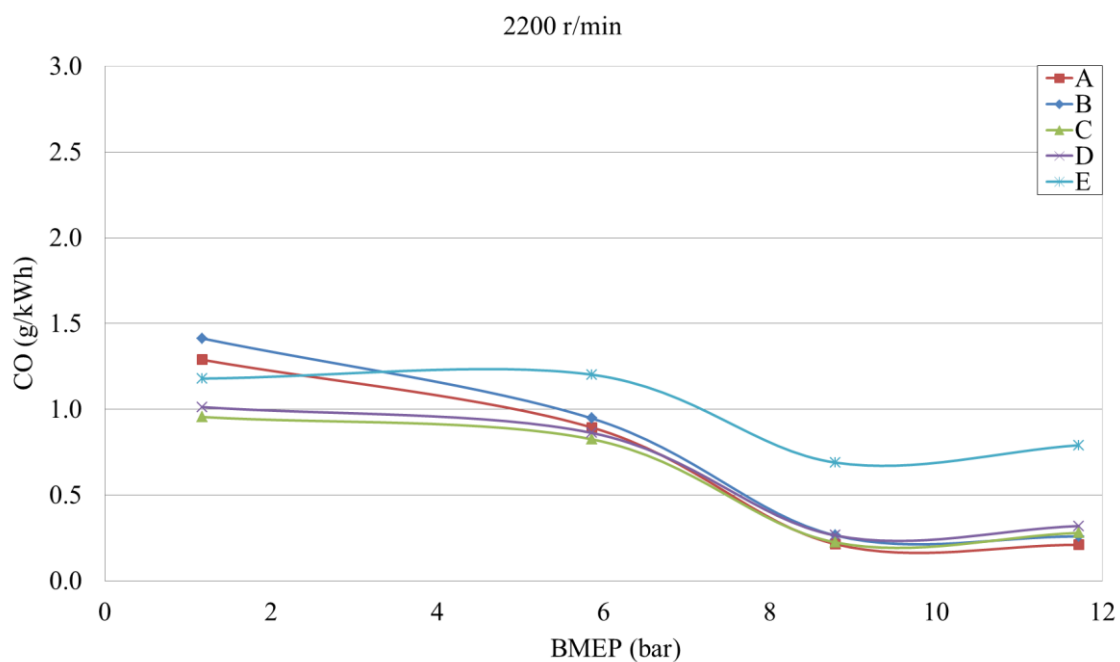
**Kuva 44.** Koemoottorin typpioksidipäästöt eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.



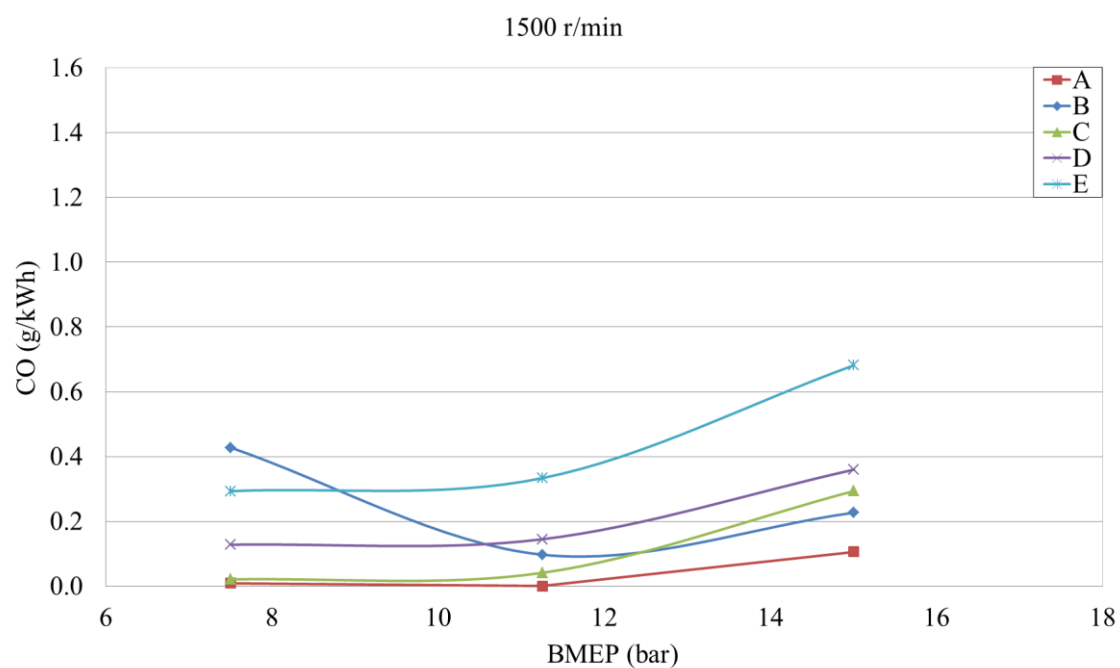
**Kuva 45.** Koemoottorin hiilivetypäästö eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.



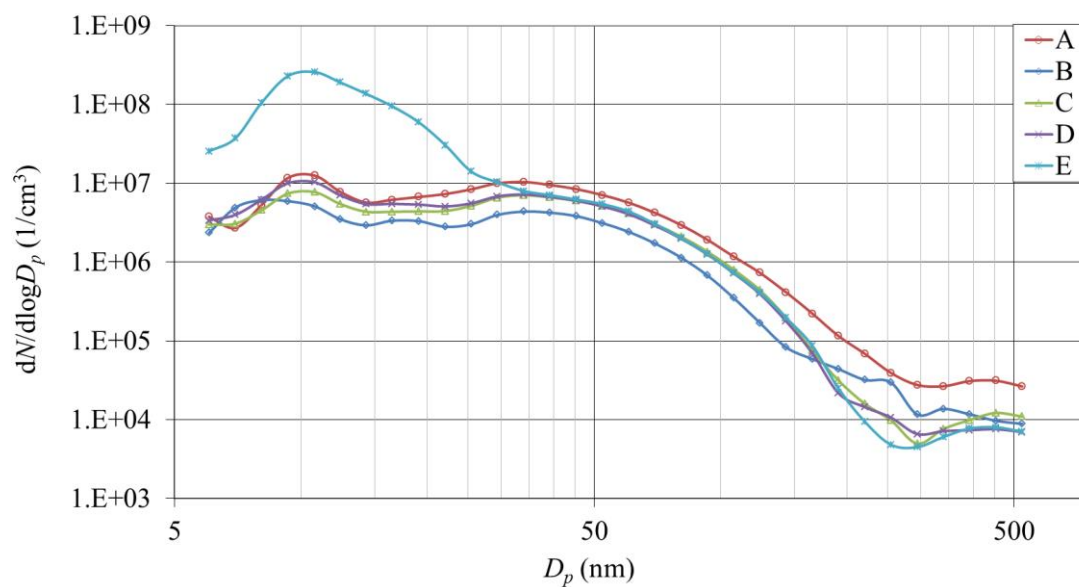
**Kuva 46.** Koemoottorin hiilivetypäästö eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.



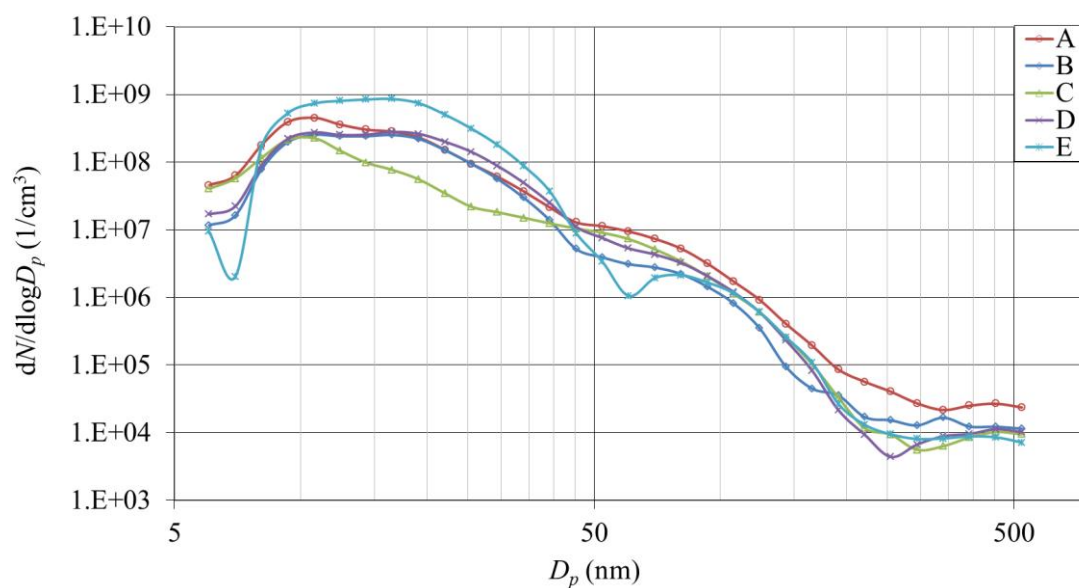
**Kuva 47.** Koemoottorin hiilimonoksidipäästö eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 2200 r/min.



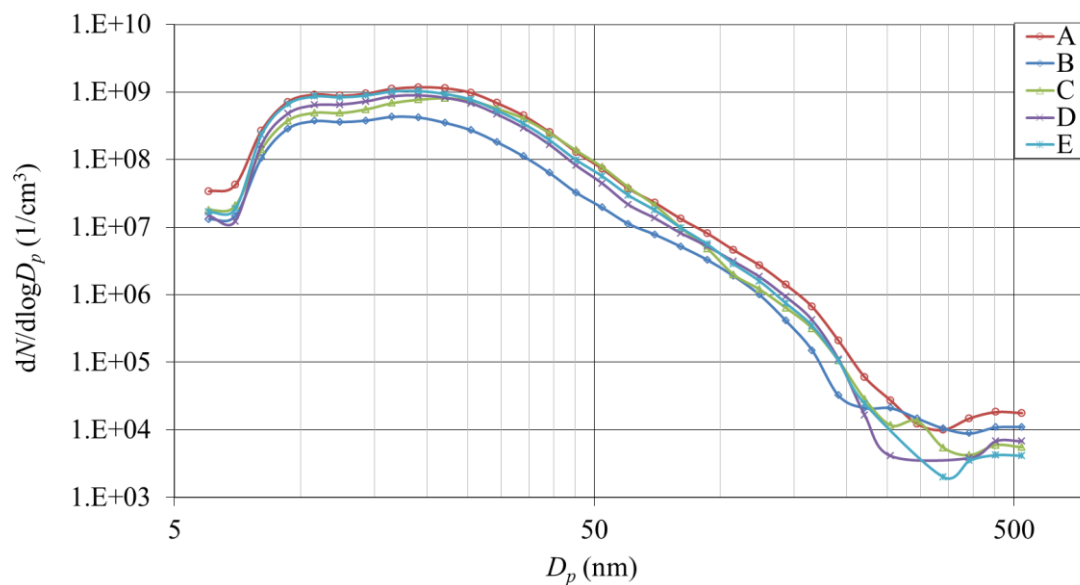
**Kuva 48.** Koemoottorin hiilimonoksidipäästö eri voiteluöljyillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.



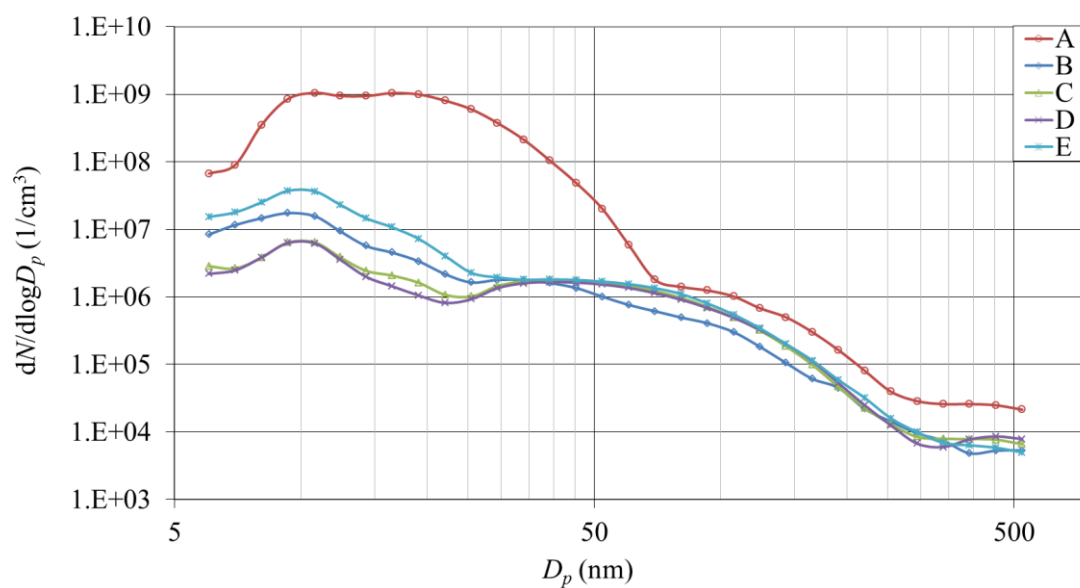
**Kuva 49.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 75 %.



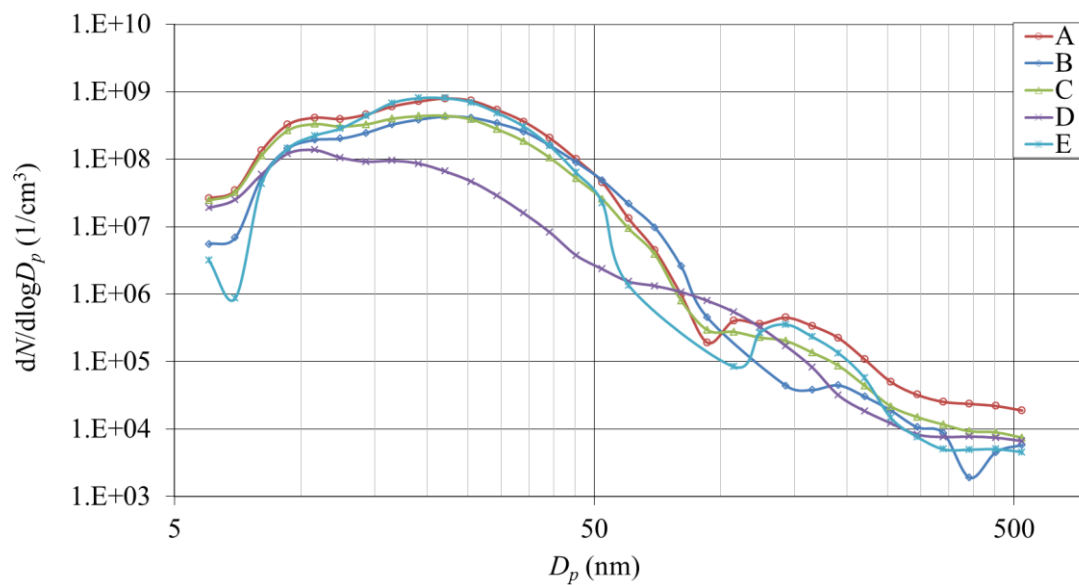
**Kuva 50.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 2200 r/min ja 50 %.



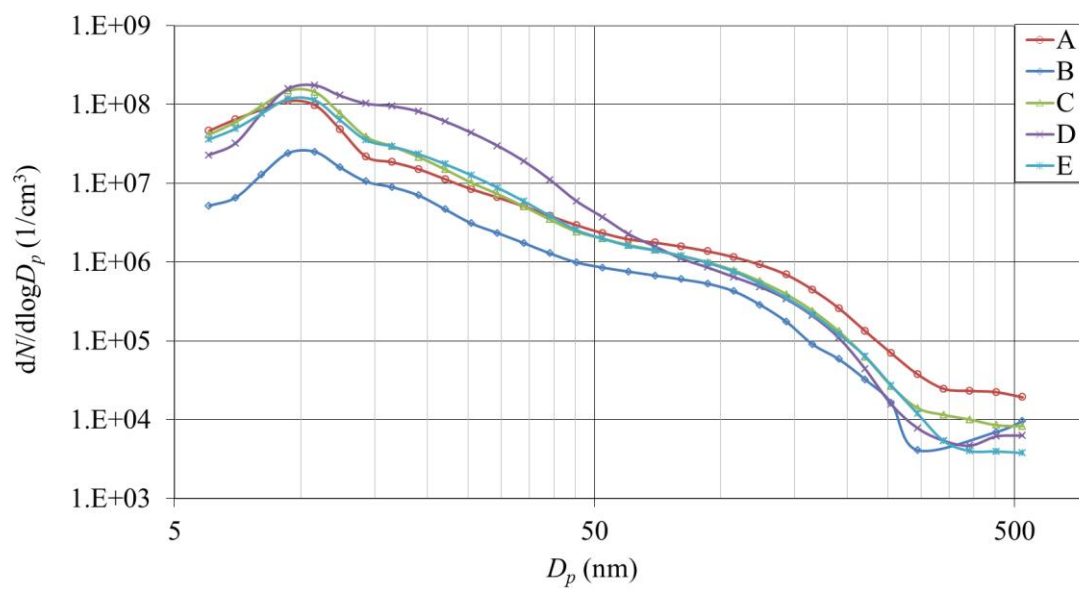
**Kuva 51.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormitusasteessa 2200 r/min ja 10 %.



**Kuva 52.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormitusasteessa 1500 r/min ja 100 %.



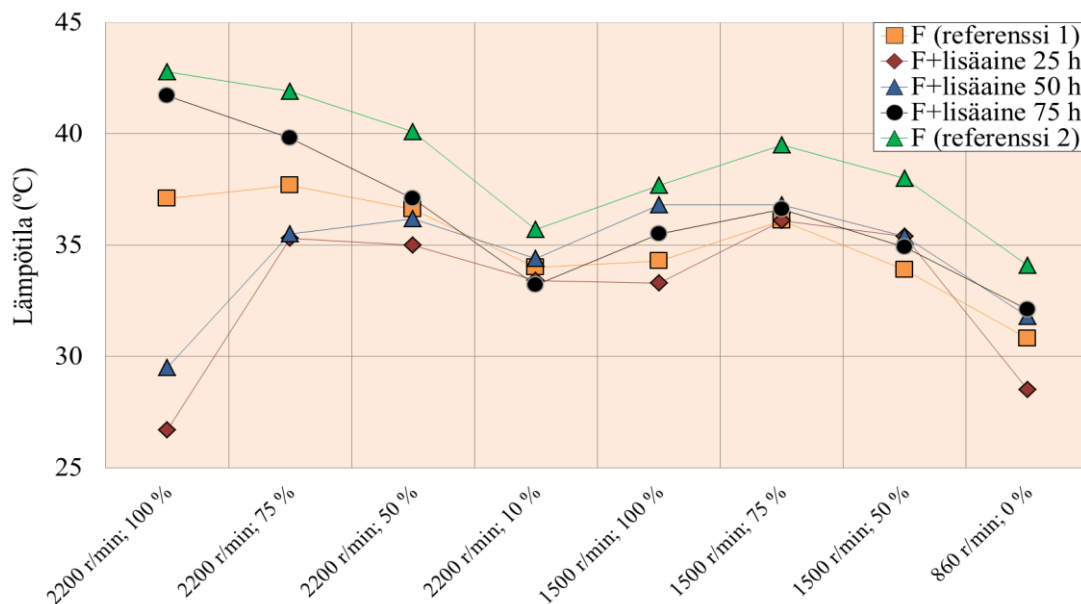
**Kuva 53.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 1500 r/min ja 75 %.



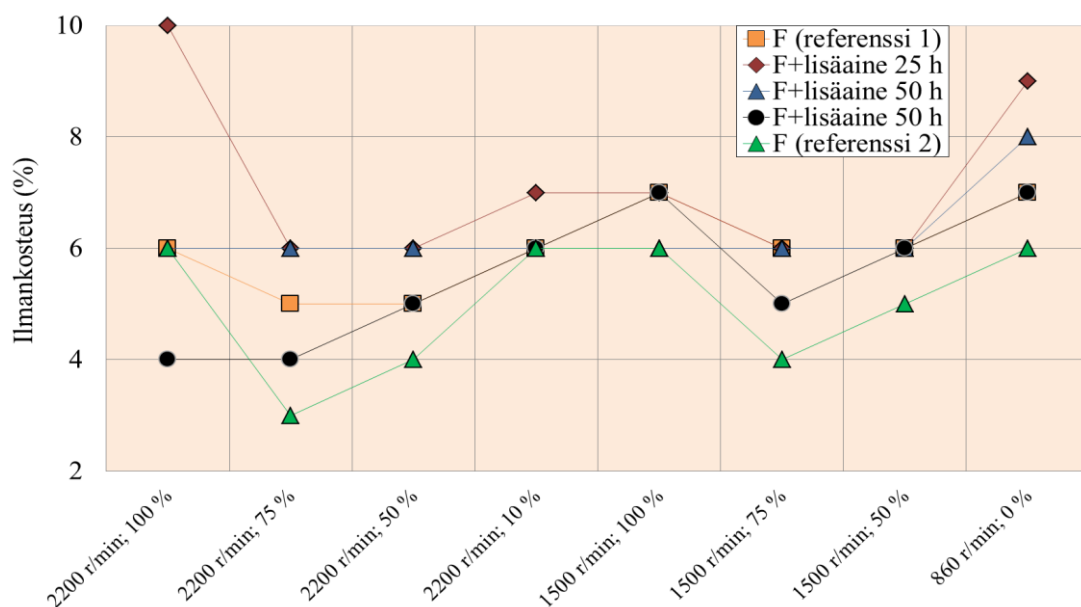
**Kuva 54.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri voiteluöljyillä kuormituspisteessä 860 r/min ja 0 %.

## LIITE 2. Muut kaaviot lisäainetutkimuksesta.

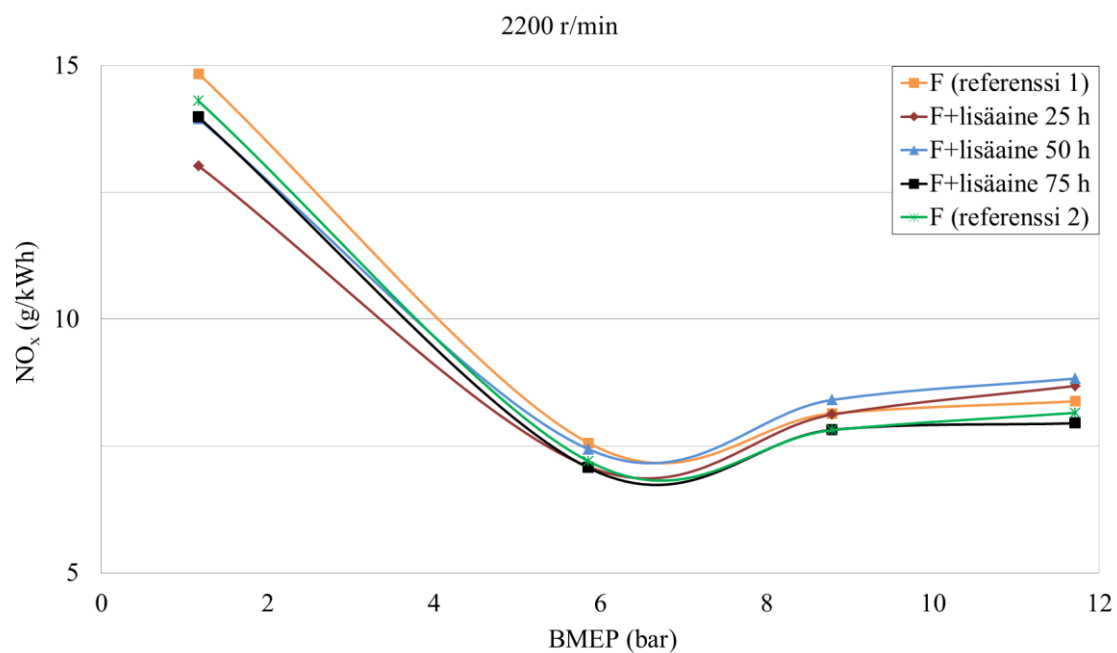
(2/3)



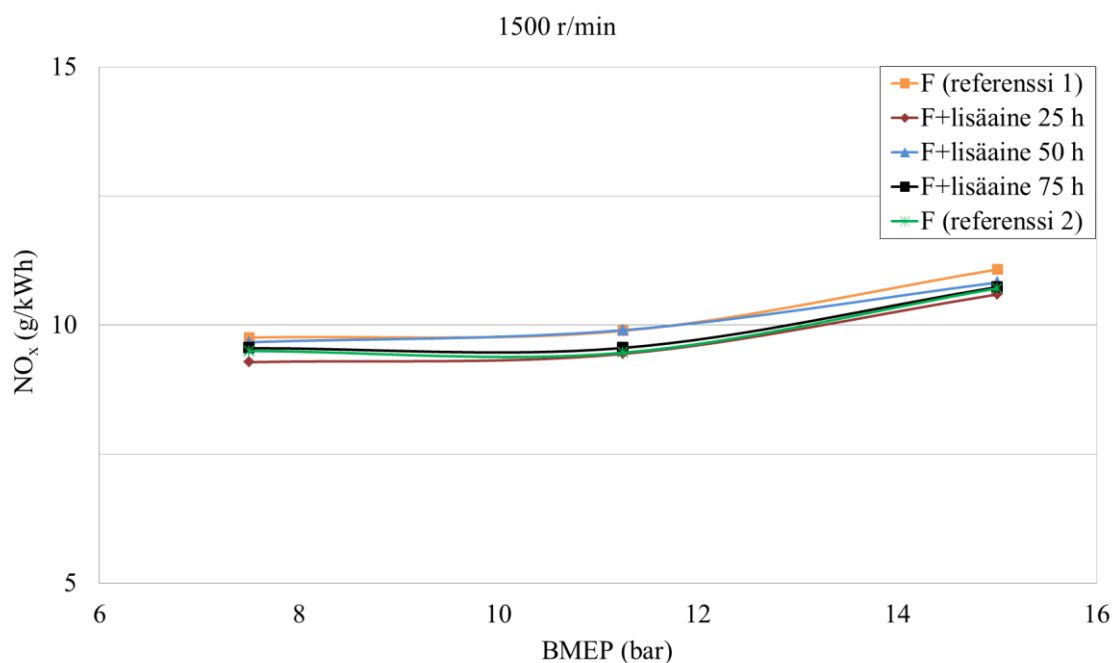
**Kuva 55.** Ympäristön lämpötila kuormituspisteittäin lisäainetutkimuksessa.



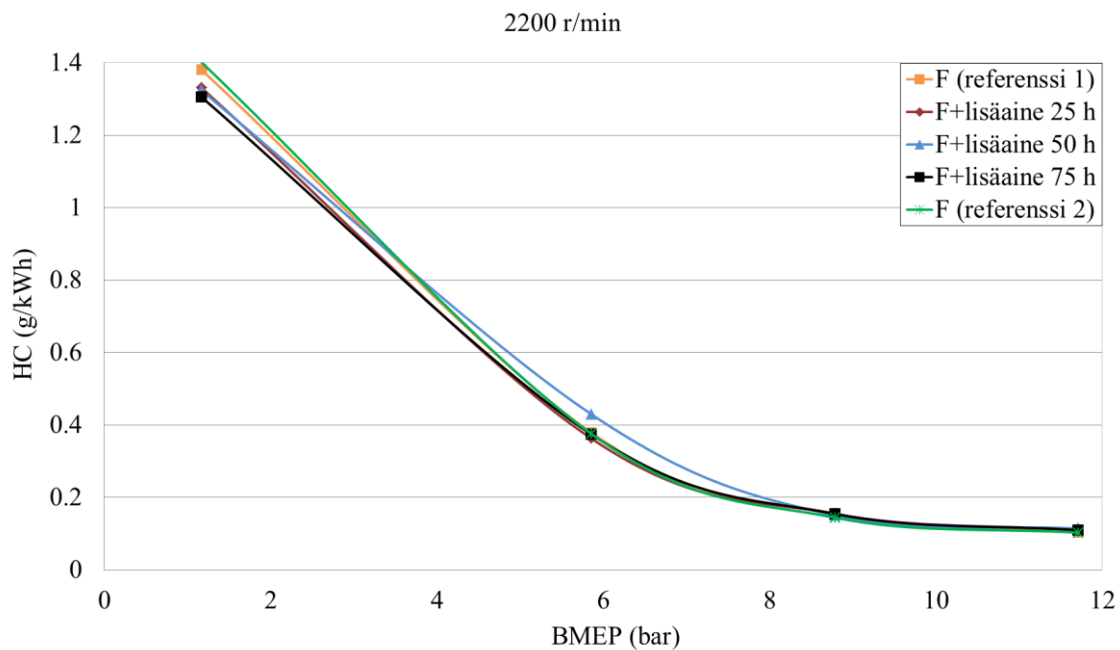
**Kuva 56.** Ympäristön suhteellinen ilmankosteus kuormituspisteittäin lisäainetutkimuksessa.



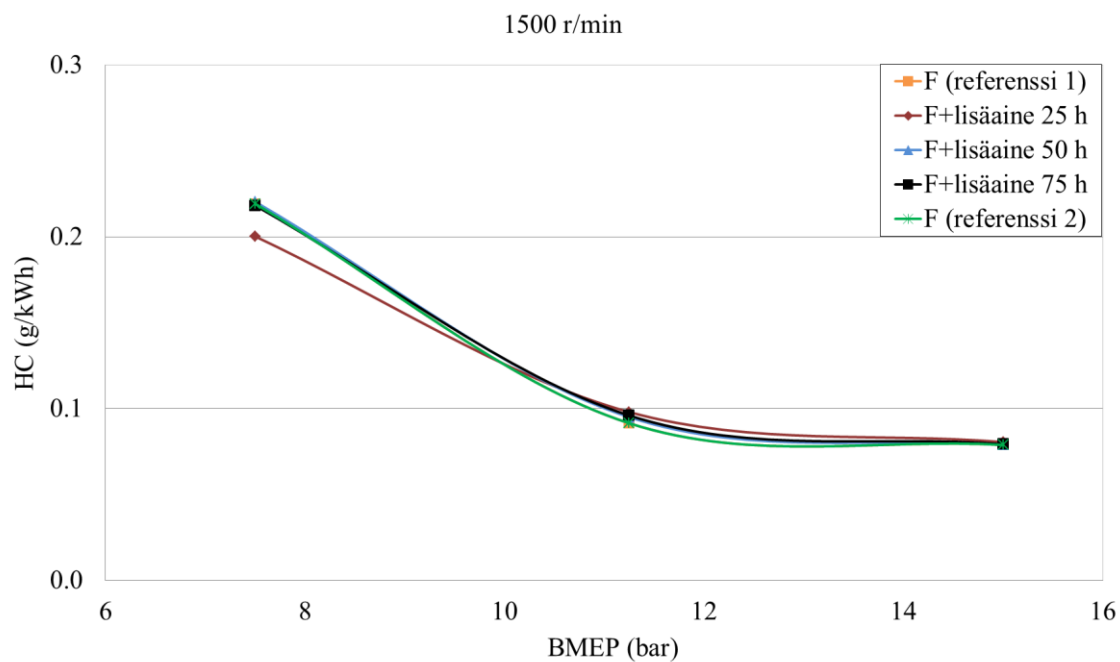
**Kuva 57.** Koemoottorin typpioksidipäästöt lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.



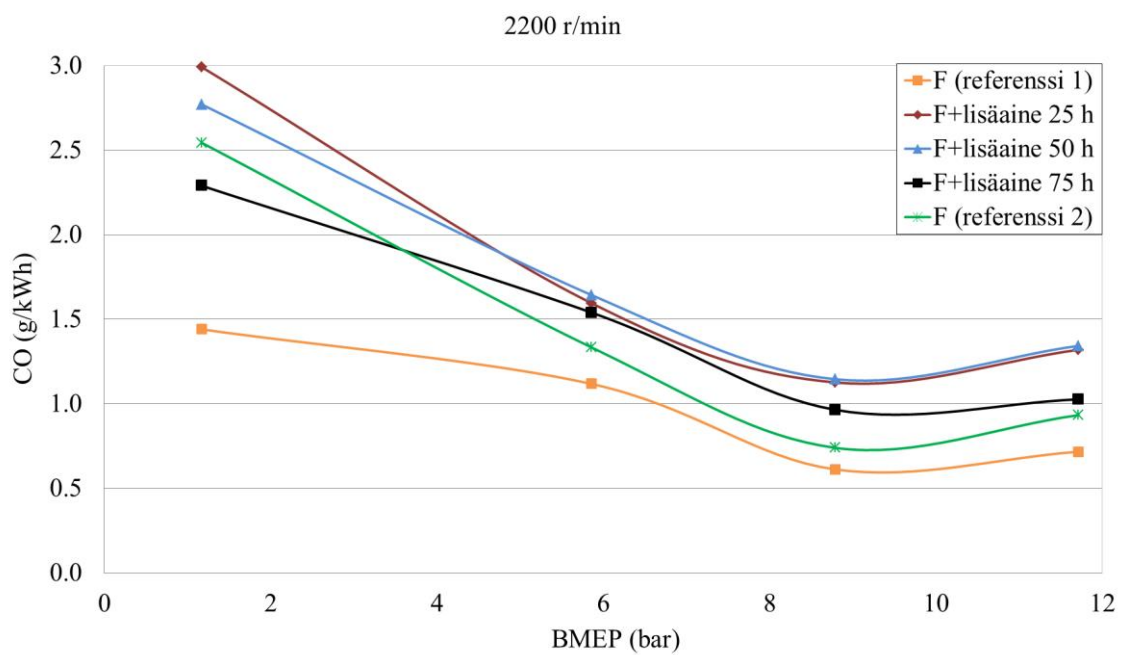
**Kuva 58.** Koemoottorin typpioksidipäästöt lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.



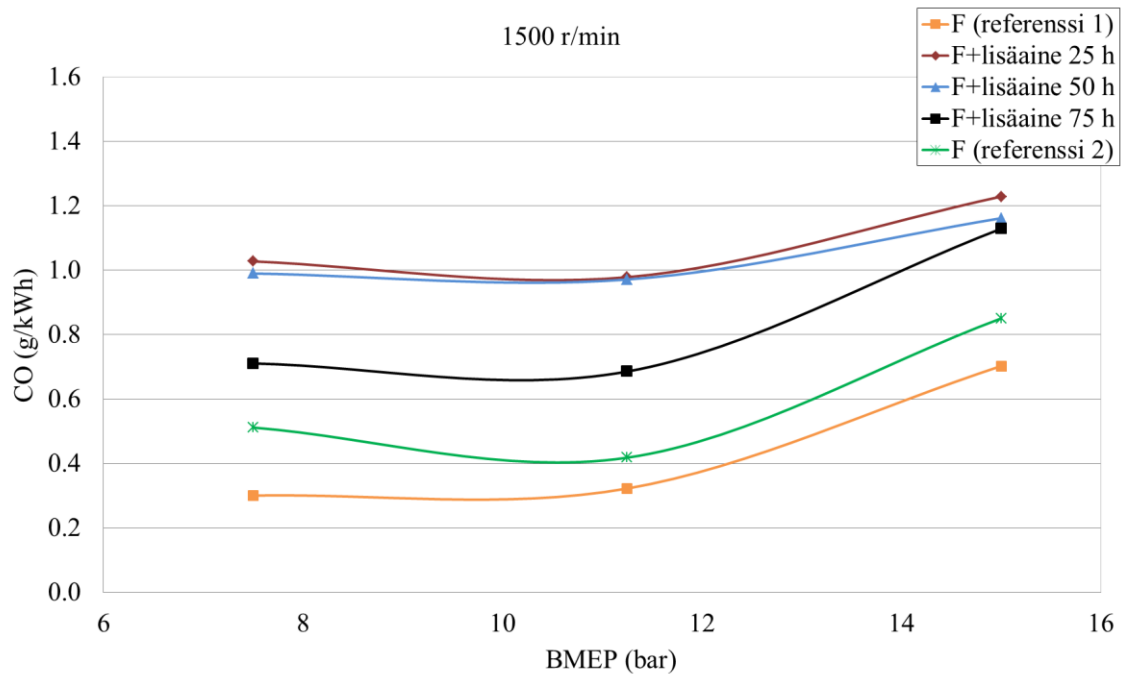
**Kuva 59.** Koemoottorin hiilivetyypäästö lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.



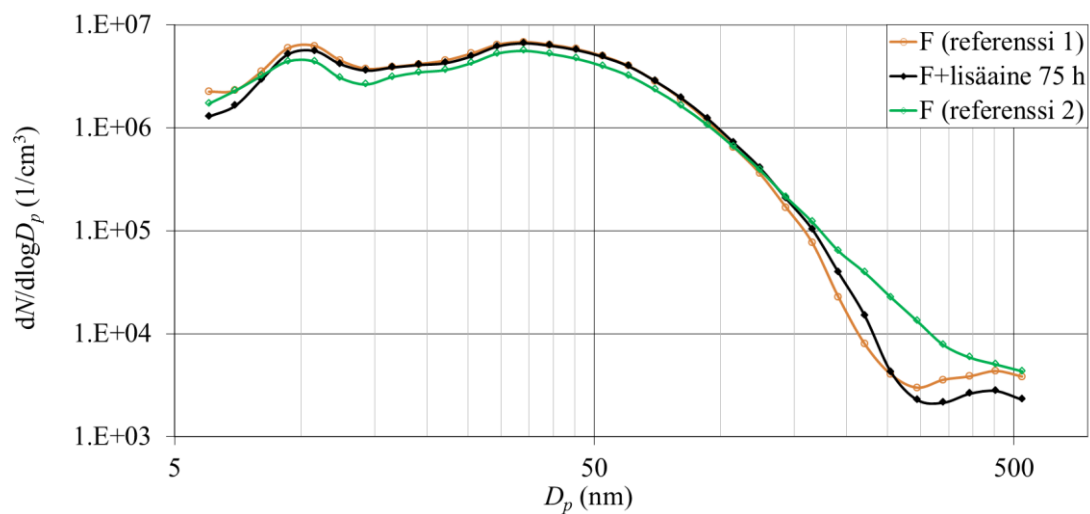
**Kuva 60.** Koemoottorin hiilivetyypäästö lisääineistetulla ja lisääineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.



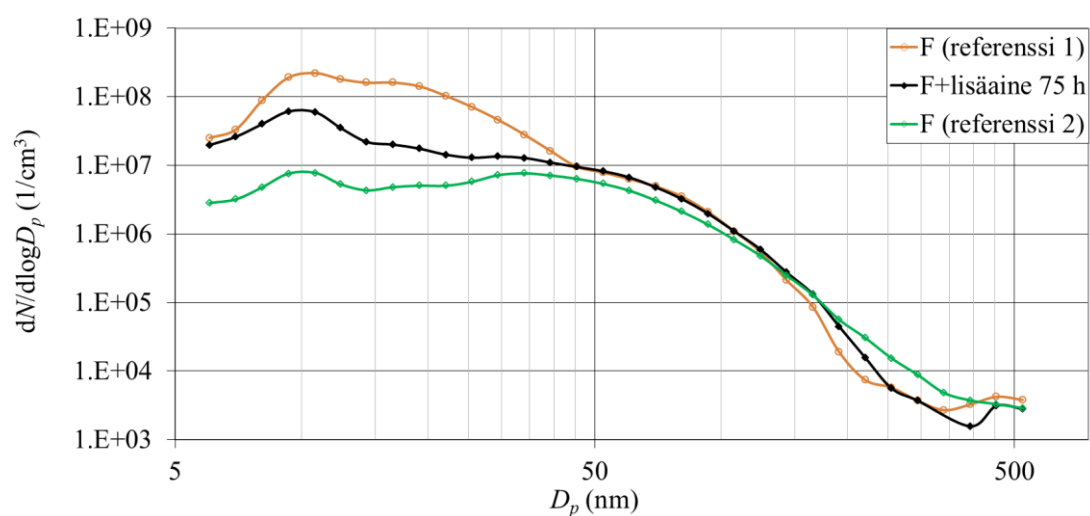
**Kuva 61.** Koemoottorin hiilimonoksidipäästö lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 2200 r/min.



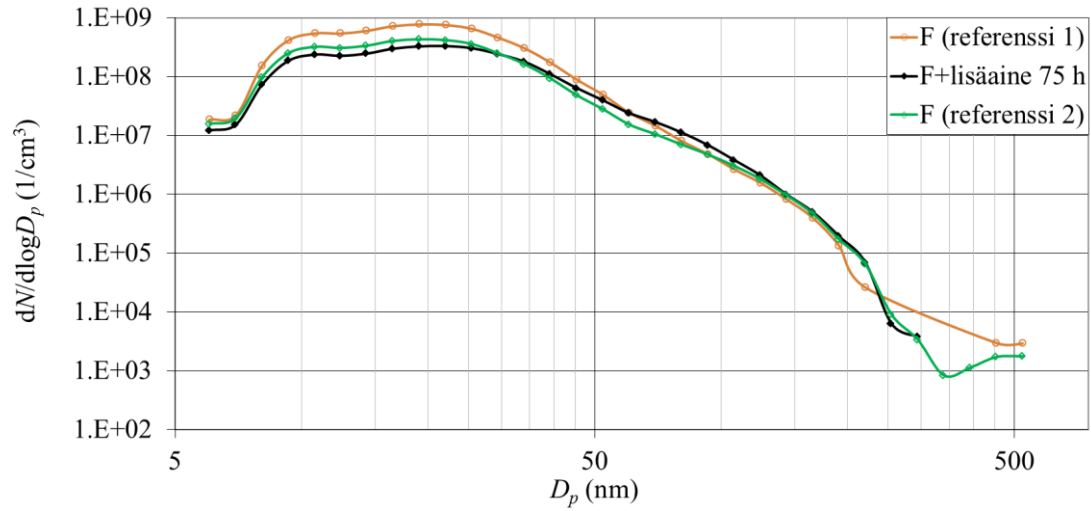
**Kuva 62.** Koemoottorin hiilimonoksidipäästö lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F pyörimisnopeudella 1500 r/min.



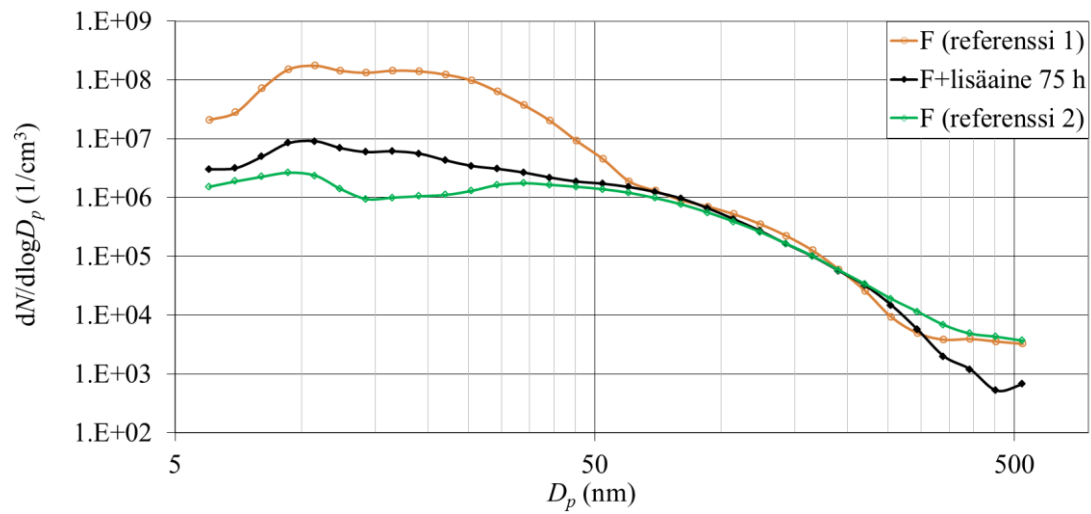
**Kuva 63.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 2200 r/min ja 75 %.



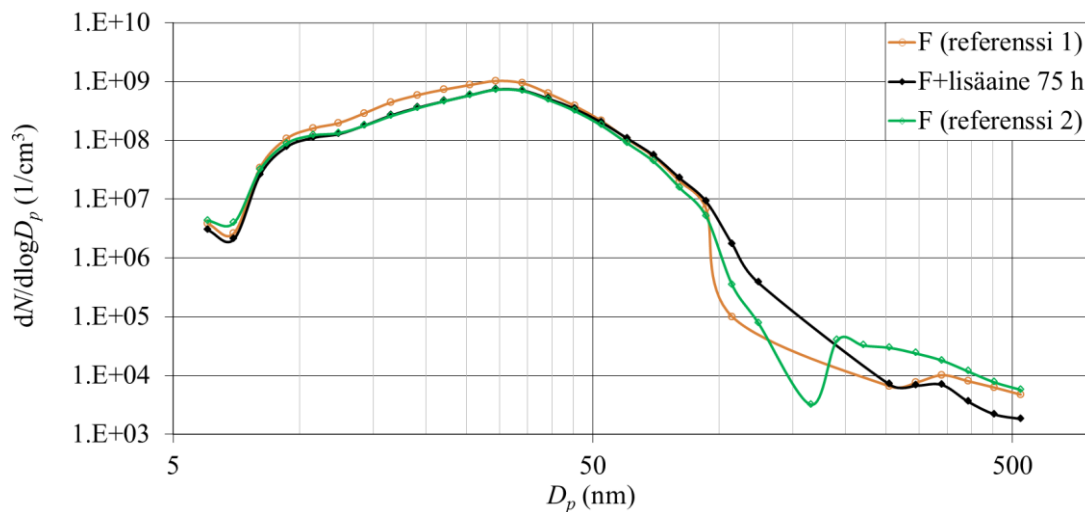
**Kuva 64.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 2200 r/min ja 50 %.



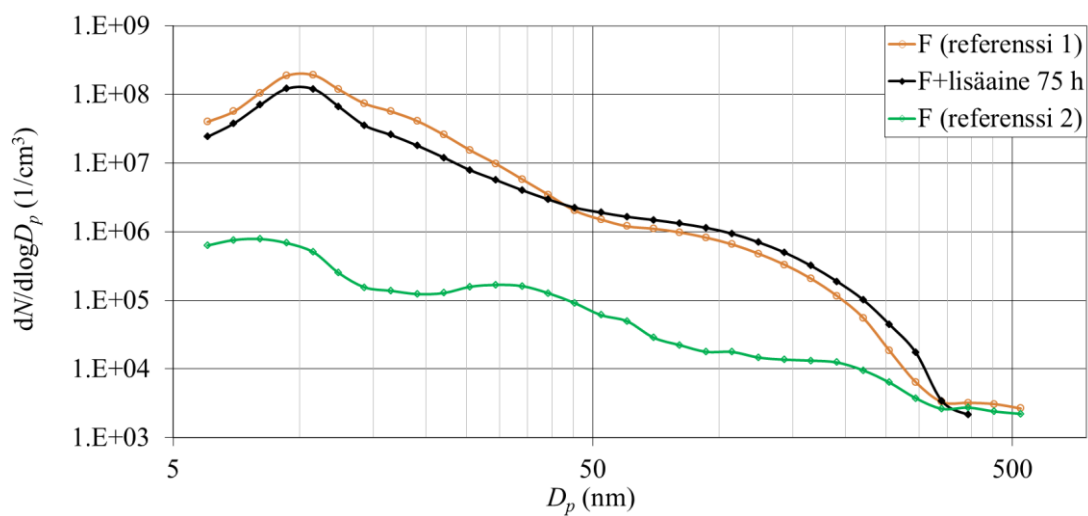
**Kuva 65.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 2200 r/min ja 10 %.



**Kuva 66.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 1500 r/min ja 75 %.



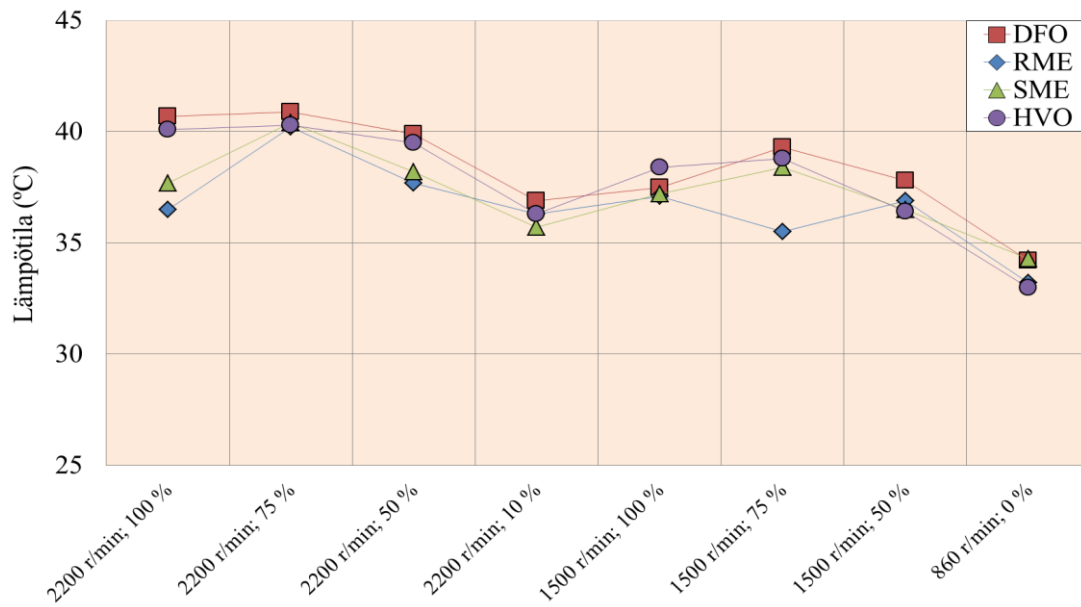
**Kuva 67.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 1500 r/min ja 50 %.



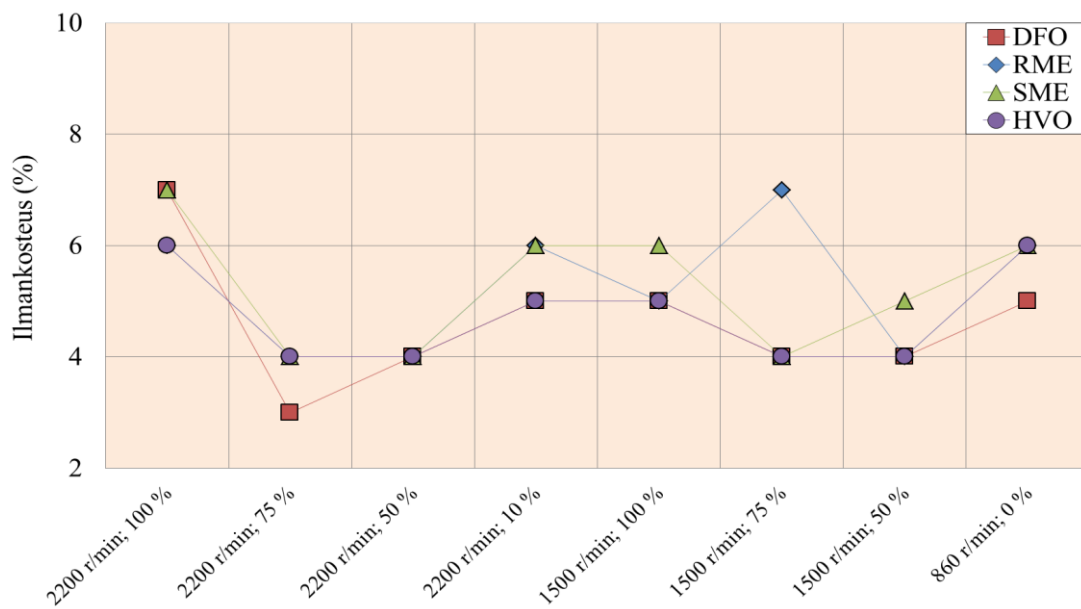
**Kuva 68.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma lisäaineistetulla ja lisäaineistamattomalla voiteluöljyllä F kuormituspisteessä 860 r/min ja 0 %.

## LIITE 3. Muut kaaviot polttonesteiden vertailuista.

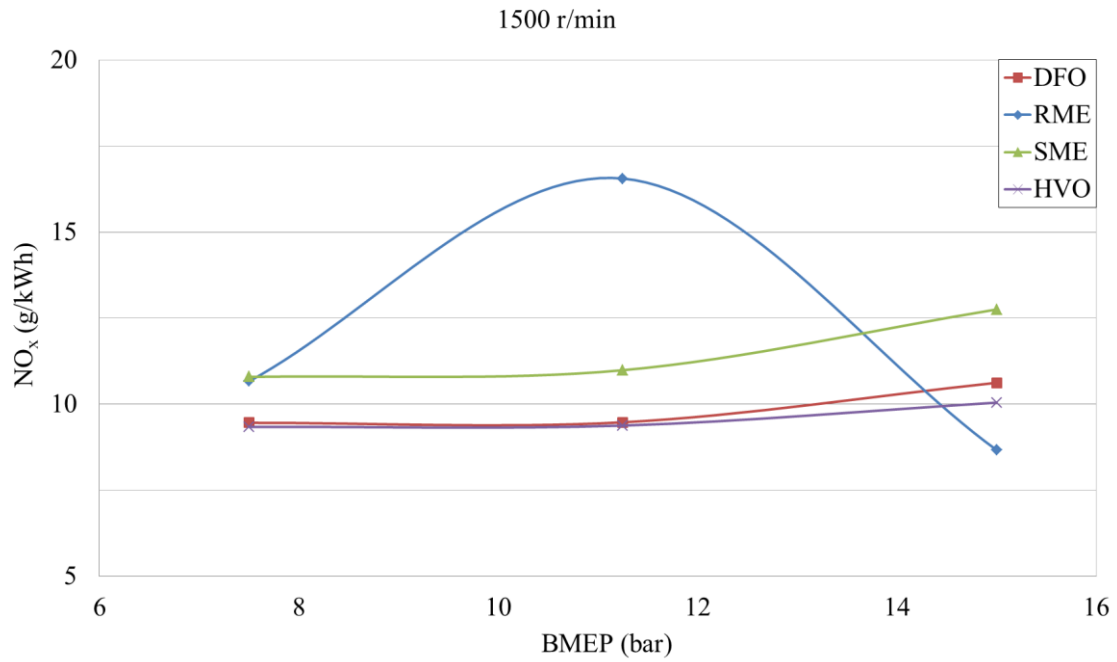
(3/3)



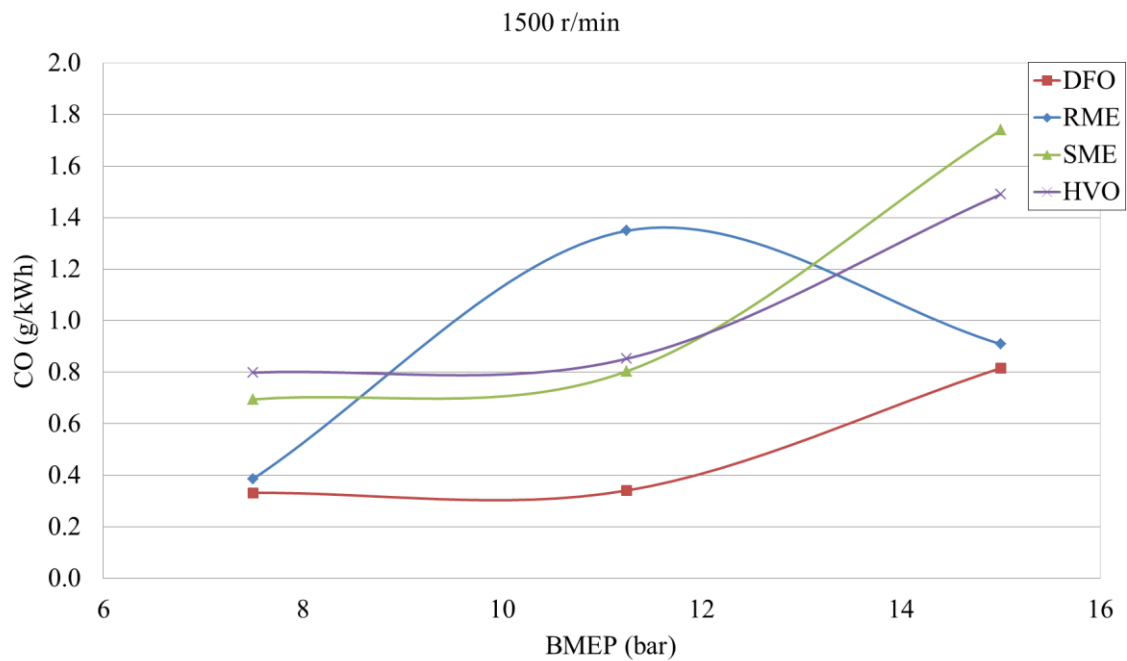
**Kuva 69.** Ympäristön lämpötila kuormituspisteittäin eri polttonesteitä tutkittaessa.



**Kuva 70.** Ympäristön suhteellinen ilmankosteus kuormituspisteittäin eri polttonesteitä tutkittaessa.



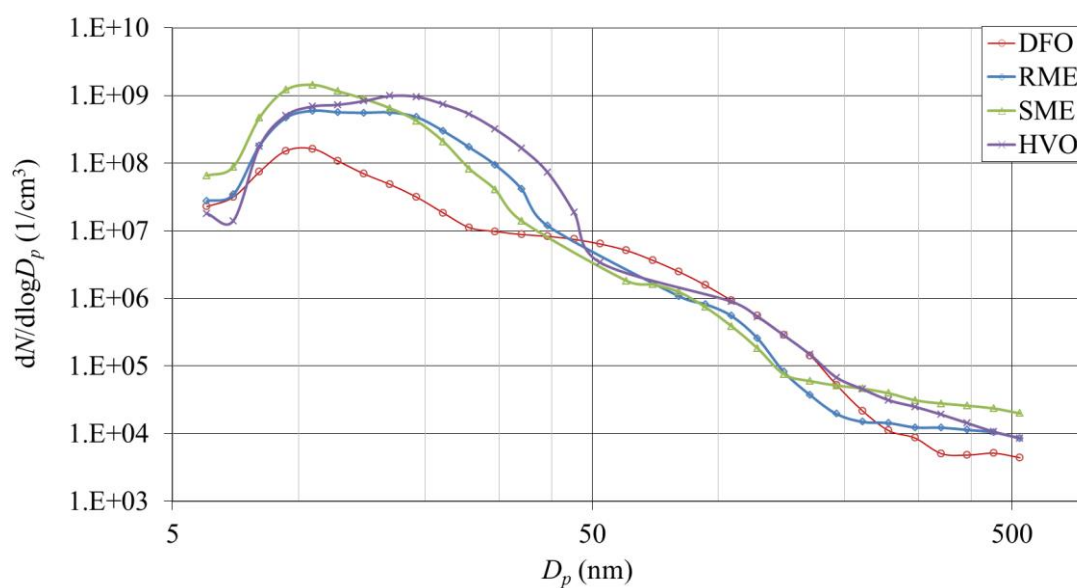
**Kuva 71.** Koemoottorin typpioksidipäästöt eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.

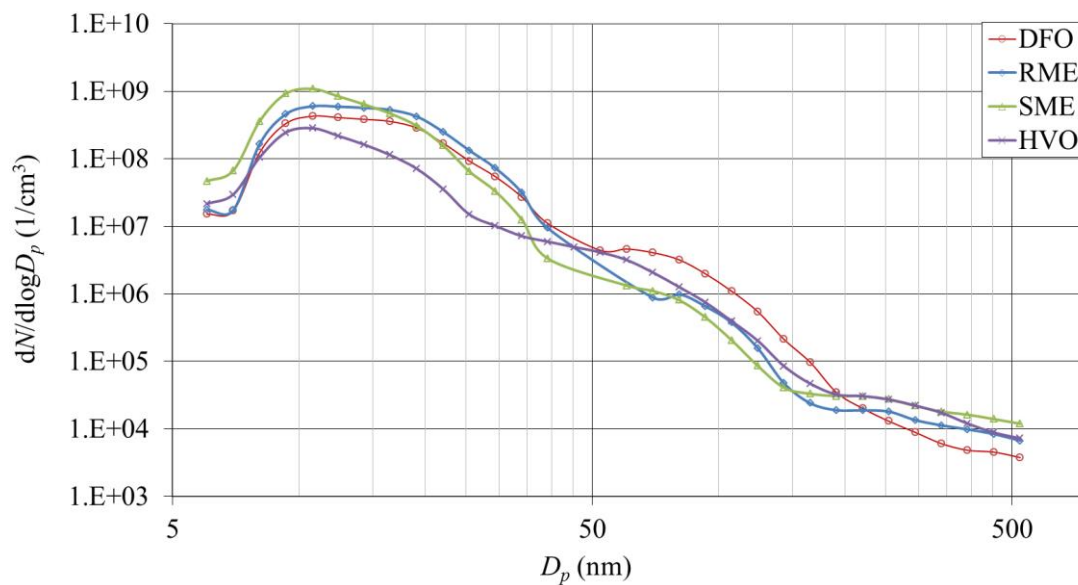


**Kuva 72.** Koemoottorin hiilimonoksidipäästö eri polttonesteillä pyörimisnopeudella 1500 r/min.

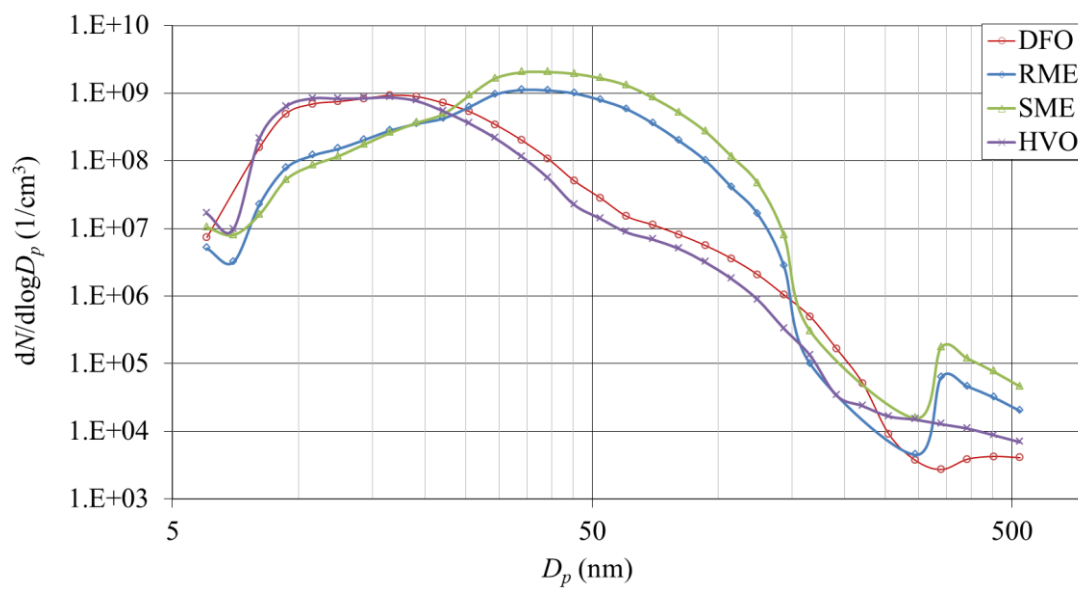
**Taulukko 9.** Massaimpaktorin suodattimen punnitustulokset ja hiukkasmassat.

	DFO	RME	SME	HVO
Suodattimen massa ennen sykliä (mg)	89,50667	90,60333	90,63667	90,60333
Suodattimen massa syklin jälkeen (mg)	89,69667	90,93667	90,91667	90,72667
Hiukkasmassa suodattimessa (mg)	0,19000	0,33333	0,28000	0,12333

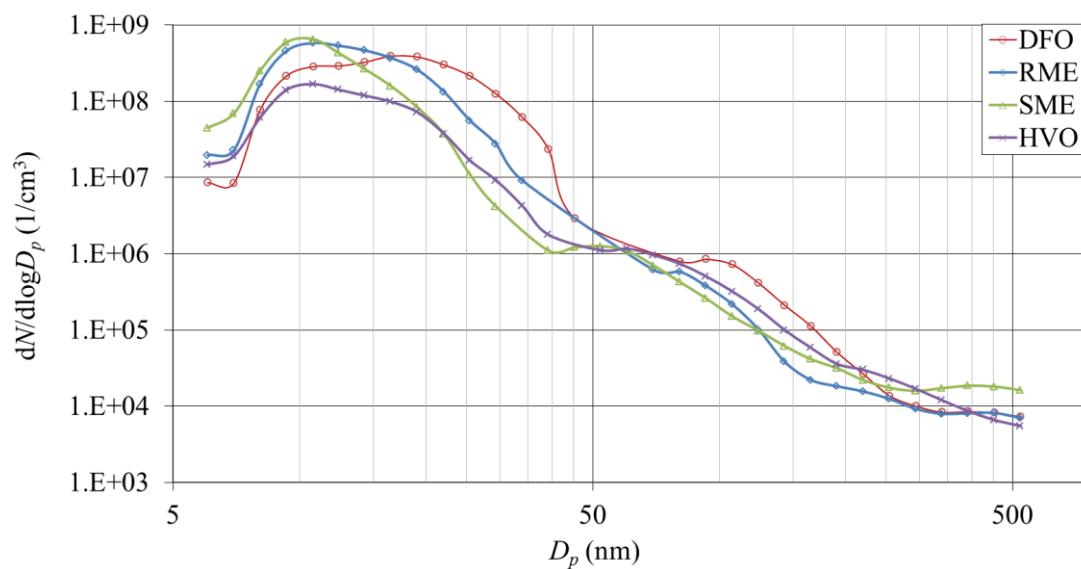
**Kuva 73.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormitusasteessa 2200 r/min ja 100 %.



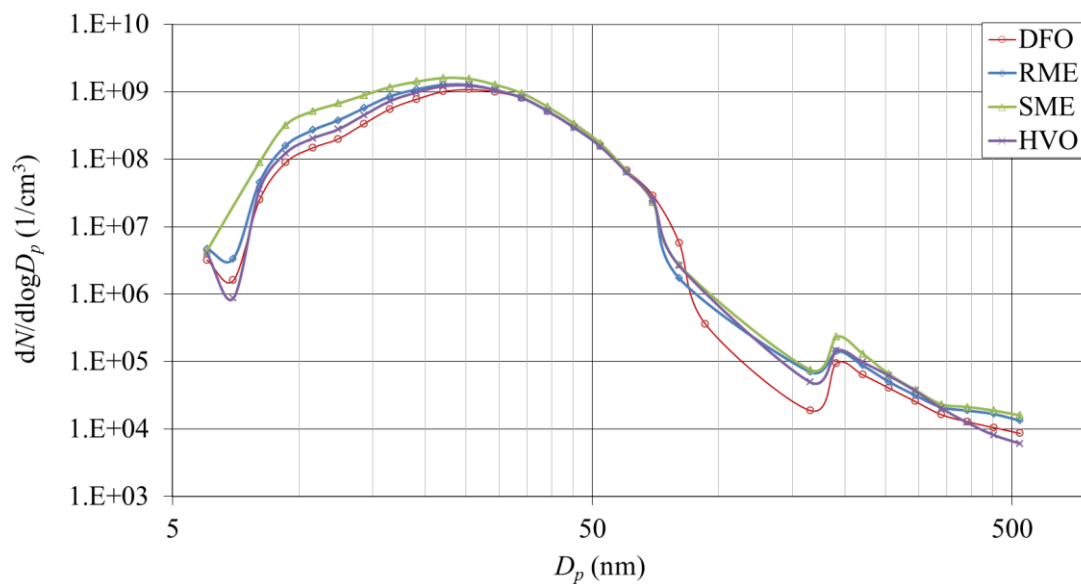
**Kuva 74.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormitusasteessa 2200 r/min ja 50 %.



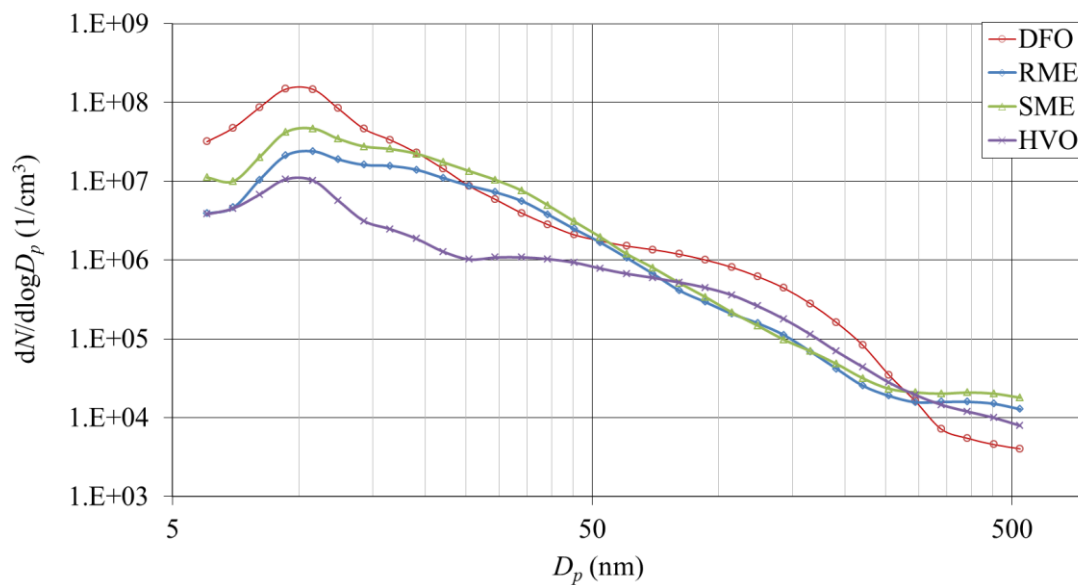
**Kuva 75.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormitusasteessa 2200 r/min ja 10 %.



**Kuva 76.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormitusasteessa 1500 r/min ja 75 %.



**Kuva 77.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormitusasteessa 1500 r/min ja 50 %.



**Kuva 78.** Pakokaasun hiukkaskokojakauma eri polttonesteillä kuormituspisteessä 860 r/min ja 0 %.