

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

ENERGIATEKNIikka

Jiri Vehmasto

DPF:N PASSIIVINEN REGENEROINTI TYÖKONEDIESELMOOTTORISSA

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Vaasassa 26.10.2012.

Työn valvoja

Seppo Niemi

Työn ohjaaja

Markus Iivonen

ALKUSANAT

Haluan kiittää tekniikan tohtori Seppo Niemeä diplomityöni valvonnasta sekä laadukkaasta opetuksesta opiskeluni aikana.

Kiitän Markus Iivosta, joka ohjasi diplomityöni suorittamista AGCO Powerilla. Kiitoksen ansaitsee AGCO Powerilta myös Jarno Ratia, joka mahdollisti diplomityöni suorittamisen AGCOLla. AGCOLta kiitän vielä kaikkia, jotka auttoivat minua diplomityöni tekemisessä.

Erityisesti haluan kiittää myös puolisoani Tarua, joka tuki minua hakemaan Vaasan yliopistoon opiskelemaan energiatekniikkaa. Kiitän häntä tuesta sekä opiskeluni aikana että diplomityöni suorittamisessa. Kiitän myös isääni ja äitiäni, jotka ovat tukeneet minua koko opiskeluelämäni ajan.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia henkilöitä, jotka ovat antaneet minulle välillä muuta ajateltavaa diplomityöni suorittamisen aikana.

SISÄLLYSLUETTELO

sivu

ALKUSANAT	1
1 JOHDANTO	16
2 PAKOKAASUPÄÄSTÖT	18
2.1 Hiukkaset	20
2.1.1 Hiukkasten koko	21
2.1.2 Hiukkasten kokojakauma	23
2.2 Dieselmoottorin pakokaasuhiukkaset	24
2.2.1 Kiinteä osuus (SOL)	26
2.2.2 Liukeneva orgaaninen osuus (SOF)	28
2.2.3 Sulfaattiosuus	29
2.2.4 Haihtuva orgaaninen osuus (VOF)	30
2.2.5 Hiukkasten synty ja rakenne	30
2.3 Päästömääräykset ja niiden kehittyminen	34
2.3.1 Eurooppa	36
2.3.2 Pohjois-Amerikka	38
2.3.3 Muu maailma	39
2.4 Hiukkaspäästöjen terveysvaikutukset	40
2.4.1 Altistuminen hiukkasille	42
2.4.2 Lyhytaikainen altistuminen pakokaasulle	43
2.4.3 Pitkäaikainen altistuminen pakokaasulle	43
3 DIESELMOOTTOREIDEN PÄÄSTÖTEKNIikka	45
3.1 Päästöjen vähentäminen moottorisuunnittelulla	46
3.1.1 NO _x -päästöjen vähentäminen	47
3.1.2 Hiukkaspäästöjen vähentäminen	48
3.2 Hiukkassuodatin	50
3.3 Hapetuskatalysaattori	50

4	PAKOKAASUPÄÄSTÖJEN MITTAAMINEN	54
4.1	Emissiotestisyklit	56
4.2	Näytteenotto ja mittaaminen	57
5	HIUKKASSUODATIN	61
5.1	Toiminta	62
5.1.1	Vastapaine	66
5.1.2	Hiukkasmassan ja -määrän hallinta	67
5.1.3	Wall-flow	68
5.1.4	Flow-through ja partial-flow	70
5.2	Materiaalit	72
5.2.1	Keraaminen wall-flow -monoliitti	75
5.2.2	Keraaminen kuitu	75
5.2.3	Keraaminen vahto	76
5.2.4	Metallikuitu	76
5.2.5	Sintrattu metalli	77
5.2.6	Poimuinen paperi	77
5.3	DPF:n regenerointi	78
5.3.1	Aktiivinen regenerointi	81
5.3.2	Passiivinen regenerointi	83
5.3.3	Passiivi-aktiivinen -regenerointi	84
5.3.4	Hallitsematon regenerointi	85
6	KOEAJOT	87
6.1	Koemoottori ja mittalaitteet	87
6.1.1	Pakokaasun jälkikäsitteilylaitteet	88
6.1.2	Moottoridynamometri	88
6.1.3	Mittausolosuhteet	89
6.1.4	Savutusmittari	89
6.1.5	Hiukkasmassamittalaite	90
6.1.6	Pakokaasuanalysointilaitteet	90

6.1.7	Muut mittalaitteet	91
6.2	Tutkimuksen kulku	91
6.2.1	Rajamomenttiajo	92
6.2.2	NRSC (ISO 8178)	92
6.2.3	Balance point -testi	93
6.2.4	Regenerointitutkimus	93
6.2.5	Muut testit	94
7	TULOKSET	95
7.1	Moottorin savuttaminen ja päästöt	95
7.2	Balance point	97
7.2.1	DOC 20 g/ft ³ platinamäärällä	97
7.2.2	DOC 10 g/ft ³ platinamäärällä	100
7.3	Hiukkassuodattimen täyttymisnopeus	102
7.3.1	DOC 10 g/ft ³ platinamäärällä	103
7.3.2	DOC 20 g/ft ³ platinamäärällä	107
7.4	Hiukkassuodattimen regeneroitumisnopeus	110
7.4.1	DOC 10 g/ft ³ platinamäärällä	111
7.4.2	DOC 20 g/ft ³ platinamäärällä	121
7.5	Epätäydellinen regenerointi	129
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	133
9	YHTEENVETO	137
	LÄHTEET	139
	LIITTEET	153
	LIITE 1. Työtä tukevat kaaviot.	153
	LIITE 2. Työssä käytetyn DOC:n ja DPF:n koot sekä koko järjestelmän poikkileikkaus.	161

KUVIOT	sivu
Kuvio 1 Dieselmoottorin ja kipinäsytytteisen moottorin emissioiden erot, kun kipinäsytytteisessä moottorissa on kolmitoimikatalysaattori (ECOgroup 2008).	19
Kuvio 2 Hiukkasten kokoluokat, hiukkasmäärät ja hiukkasmassan osuus (Kittelson 2006).	21
Kuvio 3 Hiukkasten koko verrattuna hiuksen ja hiekan jyvän kokoon (Oregon Physicians for Social Responsibility 2008).	22
Kuvio 4 Hiukkasten kokojakauma (Riipinen & Lehtipalo 2012).	23
Kuvio 5 Hiukkaspäästöjen jakautuminen eri ryhmiin (Collura ym. 2005).	26
Kuvio 6 Hiilihiukkasen rakenne (Environment Canada 2011).	27
Kuvio 7 Dioksiini (Encyclopedia Britannica inc. 2012).	29
Kuvio 8 Liekin kemiallinen koostumus, muokattu (Khair & Jääskeläinen 2010).	32
Kuvio 9 Dieselpartikkelien kokoluokka ja muodostuminen (ECOpoint inc. 2008).	33
Kuvio 10 Dieselmoottorin pakokaasuhiukkasten rakenne (Maricq 2007).	34
Kuvio 11 Päästörajojen kehittyminen yli 130 kW moottoreissa PM:n ja NO _x :in suhteen Euroopassa, muokattu (AGCO Sisu Power 2008).	38
Kuvio 12 Hiukkasten kulkeutuminen hengityselimissä (Tekes teknologiaohjelmaraportti 2006).	42
Kuvio 13 Hiukkaspäästöjen ja typenoksidien trade-off -ilmiö.	47
Kuvio 14 Hapetus-katalysaattorin toimintaperiaate (Robert Bosch GmbH 2012).	53
Kuvio 15 Liikuteltava emissiomittausjärjestelmä PEMS (Sensors inc.).	55
Kuvio 16 Vaihteleva emissiotestisykli NRTC (Ecopoint inc. 2004).	57

Kuvio 17 Hiukkassuodattimen rakenne (Ngk insulators, ltd 2001).	61
Kuvio 18 Syvyysuodatuksen ja pintasuodatuksen toimintaperiaate (Majewski 2011).	63
Kuvio 19 Syvyysuodatuksen kolme mekanismia aerosolin kerrostumiselle, muokattu (Majewski 2011).	64
Kuvio 20 DPF kanavan suurennos ja noen/tuhkan kerääntyminen (Dimopoulos 2008).	66
Kuvio 21 Wall-flow -mallinen suodatin (Blackthorn, 2012).	69
Kuvio 22 Wall-flow -mallin suodattimen kanavien koko (Majewski 2011).	70
Kuvio 23 Flow-through -suodatin (Huss Group 2010).	71
Kuvio 24 Partial-flow -suodatin (Emitec).	72
Kuvio 25 Tietokonemallinnus DPF:ssä käytettävistä materiaalien huokoisuusrakenteista (Konstandopoulos & Papaioannou 2008).	74
Kuvio 26 Hiukkassuodattimen regenerointitavat (ECOpoint inc. 2005).	79
Kuvio 27 Osa sulanutta DPF suodatinta (Espino 2009).	81
Kuvio 28 Moottorin savutus NRSC-testissä sekä normaaleilla että savuttavilla säädöillä.	96
Kuvio 29 Moottorin ominaispäästöt sekä normaaleilla että savuttavilla säädöillä.	96
Kuvio 30 Balance point nopeudella 2100 rpm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	98
Kuvio 31 Savutus hiukkassuodattimen jälkeen 2100 rpm balance point -testissä.	98
Kuvio 32 Balance point nopeudella 1500 rpm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	99
Kuvio 33 Balance point nopeudella 2100 rpm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	100

Kuvio 34 Savutus hiukkassuodattimen jälkeen 2100 rpm balance point -testissä.	101
Kuvio 35 Balance point nopeudella 1500 rpm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	101
Kuvio 36 Pakovastapaineen nousu hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 90 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	104
Kuvio 37 Pakovastapaineen nousu hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 100 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	105
Kuvio 38 Pakovastapaineen nousu hiukkaskeräyksessä 2000 rpm ja 90 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	106
Kuvio 39 Pakovastapaineen nousu hiukkaskeräyksessä 1500 rpm ja 73 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	107
Kuvio 40 Pakovastapaineen muutos hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 90 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	108
Kuvio 41 Pakovastapaineen muutos hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 100 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	109
Kuvio 42 Pakovastapaineen muutos hiukkaskeräyksessä 1500 rpm ja 77 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	110
Kuvio 43 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 135 Nm sekä 500 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	112
Kuvio 44 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm 135 Nm ja 500 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	113
Kuvio 45 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä)	113
Kuvio 46 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	114

Kuvio 47 Typenoksidien määrät regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	115
Kuvio 48 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	116
Kuvio 49 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	117
Kuvio 50 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	118
Kuvio 51 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	119
Kuvio 52 Typenoksidien määrät regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 10 g/ft ³ platinamäärä).	120
Kuvio 53 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 135 Nm sekä 500 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	122
Kuvio 54 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm ja 135 Nm sekä 500 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	123
Kuvio 55 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	124
Kuvio 56 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	125
Kuvio 57 Typenoksidien määrät regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	125
Kuvio 58 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	126
Kuvio 59 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	127

Kuvio 60 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	128
Kuvio 61 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	128
Kuvio 62 Typenoksidien määrät regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	129
Kuvio 63 Pakovastapaineen muutos hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 96 Nm (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	130
Kuvio 64 DPF:n lämpötilajakauma, kun moottori laitettiin regeneroinnista 1500 rpm ja 620 Nm joutokäynnille (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	131
Kuvio 65 Typenoksidien määrät ja hapen määrä regeneroinnista joutokäynnille -testissä (DOC, jossa 20 g/ft ³ platinamäärä).	132

TAULUKOT sivu

Taulukko 1 Hiukkaspäästöjen lähteitä, muokattu (Majewski & Khair 2006: 114).	32
Taulukko 2 Non-road-dieselmoottoareiden päästömääräykset euroopassa eri teholuokan moottoreille, muokattu (Euromot 2010).	37
Taulukko 3 Non-road-dieselmoottoareiden päästömääräykset Pohjois-Amerikassa, muokattu (Euromot 2010).	39
Taulukko 4 Non-road-dieselmoottoareiden päästörajoitukset Kiinassa (ECOpoinc. 2009).	40
Taulukko 5 Non-road -dieselmoottoareiden päästörajoitukset Japanissa (ECOpoinc. 2009).	40

Taulukko 6 AGCO Power 44AWF -moottorin perustiedot.	87
Taulukko 7 DOC:n ja DPF:n koot sekä platinamäärät.	88
Taulukko 8 ISO 8178- eli NRSC-syklin pisteet.	92
Taulukko 9 Tyhjän DPF:n ja DOC:n aiheuttama vastapaine.	102

SYMBOLI- JA MERKKILUETTELO

ρ	Tiheys
CO	Hiilimonoksidi
CO ₂	Hiilidioksidi
CO(NH ₂) ₂	Urea
°C	Celsiusaste
CPC	Kondensaation hiukkaslaskuri, condensated particle counter
CRDPF	Jatkuvasti regeneroituva hiukkassuodatin, continuously regenerating diesel particulate filter
CRT	Jatkuvasti regeneroituva hiukkassuodatin, continuously regenerating trap
DPF	Hiukkassuodin, diesel particulate filter
DPM	Dieselmoottorin hiukaspäästö, diesel particulate matter
DOC	Hapetuskatalysaattori, diesel oxidation catalyst
EC	Alkeishiili, elemental carbon
EGR	Pakokaasun takaisinkierrätys, exhaust gas recirculation
EPA	Ympäristönsuojeluviranomainen, environment protection agency, US
EU	Euroopan Unioni
FID	Liekki-ionisaatioilmaisim, flame ionization detector
ft ³	Kuutiojalka
FSN	Filter smoke number
g	Gramma
HPL	Korkeapaine-EGR, high pressure loop
HC	Hiilivety, hydrocarbon

H ₂ O	Vesi
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
K	Kelvin
kPa	Kilopascal
kW	Kilowatti
kWh	Kilowattitunti
LPL	Matalapaine-EGR, low pressure loop
mg	Milligramma
MSS	Micro soot sensor, hiukkastunnistin
N ₂	Typpi
NDIR	Hajaantumaton infrapunamittaus, nondispersive infrared
NH ₂	Amiini
NH ₃	Ammoniakki
NH ₄ HSO ₄	Ammoniumvetysulfaatti
(NH ₄) ₂ SO ₄	Ammoniumsulfaatti
NH ₄ NO ₃	Ammoniumnitriitti
NH ₄ NO ₂	Ammoniumnitraatti
nm	Nanometri
Nm	Newtonmetri
NO	Typpimonoksidi
NO _x	Typhen oksidit
NO ₂	Typpidioksidi
N ₂ O	Dityppioksidi
NRSC	Emissiotesti, non-road steady-state cycle
NRTC	Vaihtuvakuormainen emissiotesti, non-road transient cycle
O ₂	Happi
OC	Orgaaninen hiili, organic carbon

PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt
PEMS	Liikuteltava emissiomittausjärjestelmä, portable emission measurement system
PM	Hiukkaspäästö, particulate matter
PM _{2,5}	Hiukkaset alle 2,5 µm
PM ₁₀	Hiukkaset alle 10 µm
PN	Hiukkasmäärä, particle number
ppm	Miljoonas osa, parts per million
R-CHO	Aldehydi
rpm	Kierrosta minuutissa
S	Rikki
SI	Kipinäsytytteinen moottori, spark ignited
SO _x	Rikin oksidit
SO	Rikkimonoksidi
SO ₂	Rikkidioksidi
SO ₃	Rikkitrioksidi
SO ₄	Sulfaatti
SCR	Pelkistävä katalysaattori, selective catalytic reduction
SOL	Kiinteä osuus, solid fraction
SOF	Liukeneva orgaaninen osuus, soluble organic fraction
TPM	Hiukkaspäästöjen kokonaisuus, total particulate matter
VOF	Haihtuva orgaaninen osuus, volatile organic fraction
µm	Mikrometri

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Jiri Vehmasto	
Diplomityön nimi:	DPF:n passiivinen regenerointi työkonedielselmoottorissa	
Valvojan nimi:	Seppo Niemi	
Ohjaajan nimi:	Markus Iivonen	
Tutkinto:	Diplomi-insinööri	
Koulutusohjelma:	Sähkö- ja energiatekniikka	
Suunta:	Energiatekniikka	
Opintojen aloitusvuosi:	2011	
Diplomityön valmistumisvuosi:	2012	Sivumäärä: 152+9

TIIVISTELMÄ:

Jatkuvasti tiukentuvat pakokaasun päästörajoitukset ovat ajaneet moottoritekniikan kehitystä jo pitkän aikaa. Vuonna 2014 tulevat voimaan uudet päästörajoitukset non-road -moottoreille, jotka rajoittavat vain NO_x-päästöjä. On odotettavissa, että sitä seuraava päästörajoitus rajoittaa ainakin hiukkasmäärää. Hiukkassuodin (DPF) on tehokas keino vähentää hiukkaspäästöjä, mutta hiukkasten kerääntymisen takia se pitää myös regeneroida eli puhdistaa aika ajoin.

Tämä diplomityö selvittää DPF:n passiivisen regeneroinnin toimintaa non-road -moottorissa. Työssä tutkittiin, missä lämpötilassa passiivinen regenerointi alkaa, kuinka nopeasti suodatin täyttyy hiukkasista ja kuinka kauan regenerointi kestää. Työssä selvitettiin myös DPF:n lämpötilajakauma regeneroinneissa ja moottorin päästötasojen muuttumisen vaikutus edellä mainittuihin asioihin.

Pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmänä työssä käytettiin passiiviselle regeneroinnille tyypillistä yhdistelmää, hapettavaa katalysaattoria (DOC) ja hiukkassuodinta. Työssä käytettiin kahta eri platinatiheydellä varustettua DOC:ia ja selvitettiin niiden erot regeneroinnissa. Työn tuloksena havaittiin pakokaasun lämpötilan ennen DPF:ää olevan regeneroinnin alkaessa lähellä teorian arvoja eli 300 °C:ta. DPF:n täytyminen oli hidasta, vaikka moottori säädettiin savuttavaksi ennen testien aloittamista. Regenerointi vei aikaa 15 minuutista tunteihin, riippuen moottorin pyörimisnopeudesta ja kuormasta.

AVAINSANAT: Dieselmoottori, hiukkassuodin, DPF, passiivinen regenerointi, hiukkaspäästöt

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author: Jiri Vehmasto
Topic of the Thesis: DPF's passive regeneration in non-road diesel engines
Supervisor: Seppo Niemi
Instructor: Markus Iivonen
Degree: Master of Science in Technology
Degree Programme: Electrical and Energy Engineering
Major of Subject: Energy technology
Year of Entering the University: 2011
Year of Completing the Thesis: 2012 **Pages:** 152+9

ABSTRACT:

Continuously developing emission regulations have been the driving force in engine technology for a long time. New regulations for non-road engines will come into force in the beginning of 2014 and they will reduce only NO_x emissions compared to current legislation. It's expected that the particulate number is regulated after that regulation. Particulate filter (DPF) is an efficient way to reduce particulate matter but as it collects particulates it needs to be regenerated, in other words cleaned, for time to time.

The purpose of the master's thesis was to study passive regeneration of a DPF in non-road engines. Purpose was to find out at which temperature the filter starts to regenerate, how fast the filter collects particulates and is regenerated. In this thesis the DPFs temperature distribution in regenerations was examined. Also, the engines changing emission levels on regeneration was studied.

As typical for passive regeneration, a combination of diesel oxidation catalyst (DOC) and DPF was used in this thesis as the exhaust aftertreatment system. Two kinds of DOCs with different amount of platinum-coating were tested. The exhaust temperature before the DPF in the beginning of regeneration was close to what was expected according to the regeneration theory. The exhaust back-pressure raised slowly even though the engine was adjusted to form high amounts of smoke. The regeneration itself endured from 15 minutes to multiple hours depending on the engine speed and torque.

KEYWORDS: Diesel engine, particulate filter, DPF, passive regeneration, particulate matter

1 JOHDANTO

Moottoritekniikan kehitystä ajavana voimana ovat jo pidemmän aikaa olleet lakisääteiset päästörajoitukset, jotka tiukentuvat jatkuvasti. Nykyään huomio kiinnittyy pääasiassa typenoksideihin (NO_x) ja hiukkaspäästöihin (PM ja PN), sillä niillä uskotaan olevan haitallista vaikutusta ihmisten terveyteen. NO_x - ja hiukkaspäästöjä pystytään vähentämään optimoimalla polttoaineen palamista-
pahtumaa moottorissa, mutta nyky laki on päästöjen suhteen niin tiukka, että on pakko käyttää pakokaasun jälkikäsittelylaitteita vaadittujen rajojen saavuttamiseksi.

Moottoriajoneuvojen ja työkoneiden määrä lisääntyy jatkuvasti kiihtyvällä tahdilla, ja pakokaasupäästöjen haitalliset terveysvaikutukset ajavat kehittämään pakokaasun jälkikäsittelylaitteita. Päästömääräykset on aikataulutettu erittäin tiiviisti, joten moottorivalmistajien pitää panostaa jälkikäsittelylaitteiden tuotekehitykseen, mikäli haluavat jatkaa moottorivalmistuksen parissa.

Hiukkassuodattimen tehtävänä on puhdistaa pakokaasu hiukkaspäästöistä. Suodattimeen kerääntyneet hiukkaset pitää aika ajoin polttaa pois, sillä suodattimen tukkeutuminen vaikeuttaa moottorin toimintaa. Suodattimen puhdistamiseen ilman, että suodatin otetaan pois pakokaasulinjasta, on kaksi tapaa: aktiivinen ja passiivinen regenerointi. Aktiivisessa regeneroinnissa hiukkaset poistetaan erillisen energialähteen avulla, ja passiivisessa regeneroinnissa hiukkasten poistamiseen käytetään NO_2 -yhdistettä, joka on parempi hapetin noelle kuin happi itse. Passiivisessa regeneroinnissa ei tarvita erillisiä energialähteitä noen polttamiseen, vaan hapetuskatalysaattorin tarkoituksena on nostaa pako-

kaasun NO₂-pitoisuutta ennen hiukkassuodatinta, jotta noki hapettuu jo käytössä saavutettavissa lämpötiloissa pois suodattimesta.

Tämän työn tarkoituksena oli keskittyä hiukkassuodattimen (DPF = diesel particulate filter) passiiviseen regenerointiin eli suodattimen puhdistamiseen työkonedieselmoottorissa. Työn tarkoituksena oli selvittää lämpötilapiste, jossa DPF alkaa regeneroitua. Työssä selvitettiin DPF:n täyttymisnopeus ja regeneroitumisnopeus eri kuormitustilanteissa. Työssä paneuduttiin myös DPF:n lämpötilakäytökseen ja painehäviön muuttumiseen suodattimen regeneroitumisen aikana. Työssä pohdittiin myös moottorin päästötasojen muuttumisen vaikutusta regeneroitumiseen. Työ suoritettiin AGCO Powerilla Nokian Linnavuorella, tehtaan omissa moottoritestilaboratorioissa.

Pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmänä käytettiin hapetuskatalysaattoria ja hiukkassuodatinta. Hapetuskatalysaattoreita oli kaksi kappaletta, varustettuna eri määrillä katalyyttiä. Hapetuskatalysaattorin tarkoituksena on luoda hiukkassuodattimelle sopivat olosuhteet, jotta passiivinen regenerointi on mahdollista tarpeeksi alhaisissa lämpötiloissa.

Luvussa 2 selostetaan pakokaasupäästöjä, keskittyen pakokaasuhiukkasiin, niiden rajoitukseen ja terveysvaikutuksiin. Luku 3 käsittää dieselmoottorin päästötekniikkaa eli miten pakokaasupäästöjä voidaan vähentää. Luvussa 4 käsitellään pakokaasupäästöjen mittaamista. Luvussa 5 selostetaan hiukkassuodattimen toimintaa, rakennetta ja puhdistamista. Luku 6 käsittää työssä käytetyt mittalaitteet ja mittausten menetelmät. Luvussa 7 käsitellään työn tulokset ja sen jälkeen päästään johtopäätöksiin ja yhteenvetoon.

2 PAKOKAASUPÄÄSTÖT

Polttomoottorit muuttavat polttoaineen sisältämän kemiallisen energian mekaaniseksi tehoksi. Polttoaine dieselmootoreissa koostuu hiilivedyistä, jotka teoriassa tuottavat palaessaan vain CO₂:ta ja H₂O:ta. Täydellisessä palamisessa ylijäämädieselpakokaasut koostuvat siis pääasiassa CO₂:sta, H₂O:sta ja hapesta. Näiden kaasujen määrä vaihtelee moottorista, kuormasta ja pyörintänopeudesta riippuen välillä:

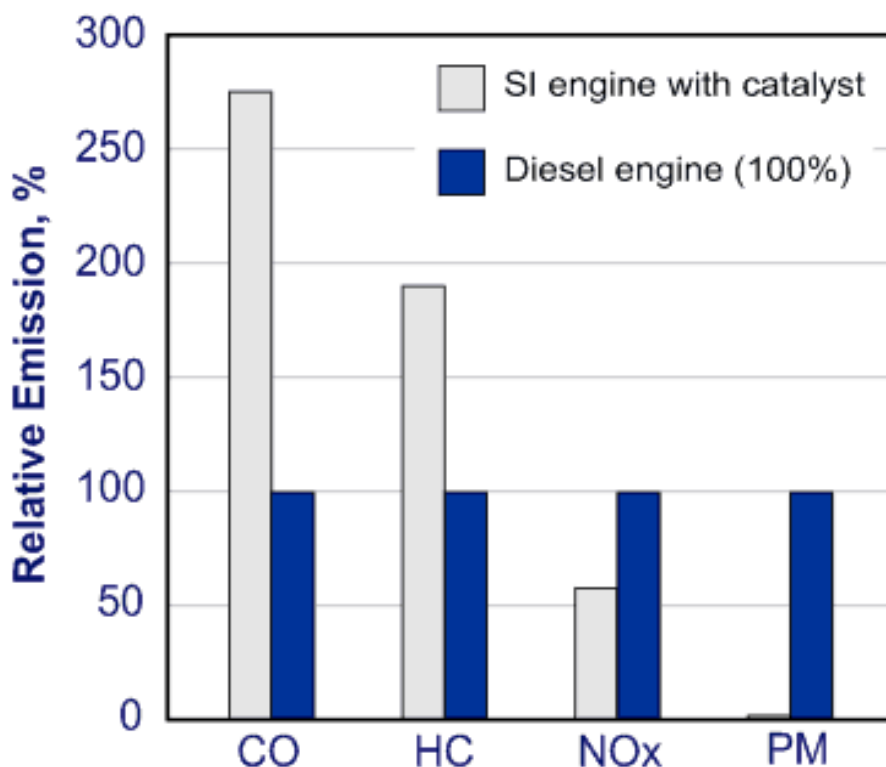
- CO₂: 2–12 %
- H₂O: 2–12 %
- O₂: 3–17 %
- N₂: tasapainossa

(Majewski & Khair 2006: 121.)

Dieselpakokaasut sisältävät myös epäpuhtauksia, jotka voivat olla haitallisia ihmisille tai ympäristölle. Dieselmootorit tuottavat myös HC-, NO-, NO₂-, CO- ja PM -päästöjä. NO- ja NO₂-päästöjä kutsutaan yhteisesti NO_x-päästöiksi. Näitä epäpuhtauksia syntyy palamisprosessin sivutuotteina eri syistä johtuen, kuten voiteluaineiden palaminen palotilassa, polttoaine-ilma -seoksen keskinäiset reaktiot korkeassa lämpötilassa ja paineessa, polttoaineen epätäydellinen palaminen, ja muiden yhdisteiden kuin hiilivetyjen palaminen palotilassa. Näitä muita ovat rikkiyhdisteet ja polttoaineen lisäaineet. (Majewski & Khair 2006: 121.)

Dieselmootorin pakokaasupäästöissä on enemmän NO_x-päästöjä verrattuna kolmitoimikatalysaattorilla varustettuun kipinäsytytteiseen moottoriin. Diesel-

moottori tuottaa enemmän hiukkaspäästöjä kipinäsytytteiseen moottoriin verrattuna. Dieselmoottoireiden tuottamaa hiukkasmassaa rajoitetaan päästömääräyksissä, sillä on havaittu, että hiukkaset ovat haitallisia ihmisille. (Majewski & Khair 2006: 121–123.)



Kuvio 1 Dieselmoottorin ja kipinäsytytteisen moottorin emissioiden erot, kun kipinäsytytteisessä moottorissa on kolmitoimikatalysaattori (ECOgroup 2008).

Kuviosta 1 on havaittavissa dieselmoottorin ja kolmitoimikatalysaattorilla varustetun perinteisen kipinäsytytteisen moottorin erot emissioissa. Kuviosta havaitaan, että perinteinen kipinäsytytteinen moottori ei tuota juuri lainkaan PM-päästöjä, kun taas dieselmoottori tuottaa suhteellisen paljon. Kuvion päästöjä vertailtaessa pitää muistaa, että kipinäsytytteinen moottori on varustettu pakokaasun jälkikäsitteilyllä ja dieselmoottori ei, joten vertailu ei suoraan näytä dieselmoottorin ja kipinäsytytteisen moottorin päästöjen eroja.

Loren (2012) kertoo kuitenkin, että nykyaikaisen suoraruiskutuksella varustetun kipinäsytytteisen moottorin on havaittu tuottavan enemmän hiukkaspäästöjä perinteiseen verrattuna. Kipinäsytytteisen suoraruiskutusmoottorin hiukkaspäästöt ovat riippuvaisia moottorin kuormituksesta sekä polttoaine-ilma-seoksesta, ja hiukkaspäästöt voivatkin olla jossain tapauksissa lähellä dieselin hiukkaspäästöjä.

2.1 Hiukkaset

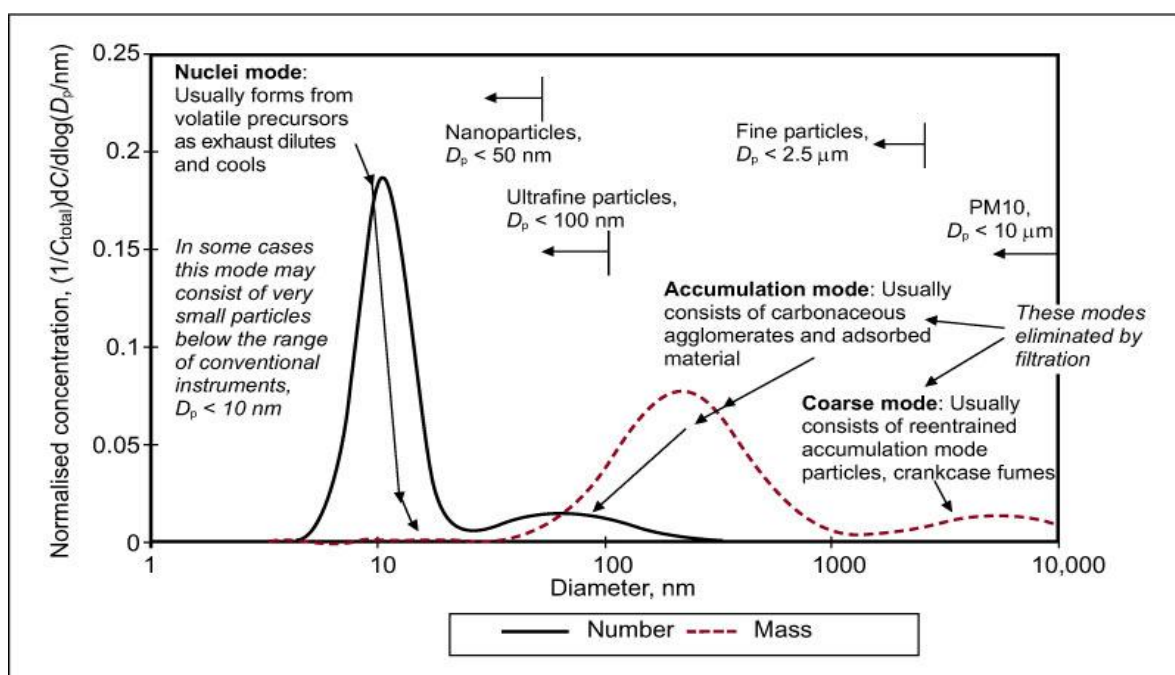
Hiukkasia on jatkuvasti ilmassa, ja suurin osa niistä on näkymättömiä ihmisilmälle. Hiukkasilla on usein merkittävä terveysvaikutus, ja suurimmat hiukkaset aiheuttavat jopa likaantumista ja pölyyntymistä. Ilmassa olevat hiukkaset ovat usein peräisin maasta ja kasveista, kuten katupölystä, siitepölystä ja sienien itiöistä. (Anttila, Haaparanta, Kousa, Lahtinen ja Salonen 2004.)

Suurin osa kaupunki-ilman sisältämistä hiukkasista tulee liikenteen aiheuttamana joko suoraan autojen pakoputkista, liikenteen muuten nostattamasta katupölystä tai autojen renkaiden kuluttamasta asfaltista. Liikenteen pakokaasupäästöt ovat merkittävä paikallinen lähde, sillä ne purkautuvat lähellä ihmisiä ja lähes hengityskorkeudella. Myös teollisuus ja puun polttaminen aiheuttavat merkittäviä hiukkaspäästöjä, mutta teollisuus on usein kauempana tiiviistä asutuksesta ja tehtaiden korkeat savupiiput levittävät päästöt laajemmalle alueelle. Puun polttamisesta syntyvien hiukkasten vaikutus ilmanlaatuun on suuri lähinnä suurilla omakotialueilla, joissa käytetään usein puulämmitystä ainakin osittain tukemaan muita lämmitystapoja. (Anttila ym. 2004.)

Yleisesti ottaen hiukkaset ovat haitaksi ihmisille ja voivat aiheuttaa pahimmillaan jopa terveyshaittoja. Hiukkaset ovat siitä vaarallisia, että suurinta osaa niistä ei voi nähdä ja niitä syntyy ja leijuu joka puolella jatkuvasti. Lisää hiukkasten aiheuttamista terveysvaikutuksista on kappaleessa 2.4.

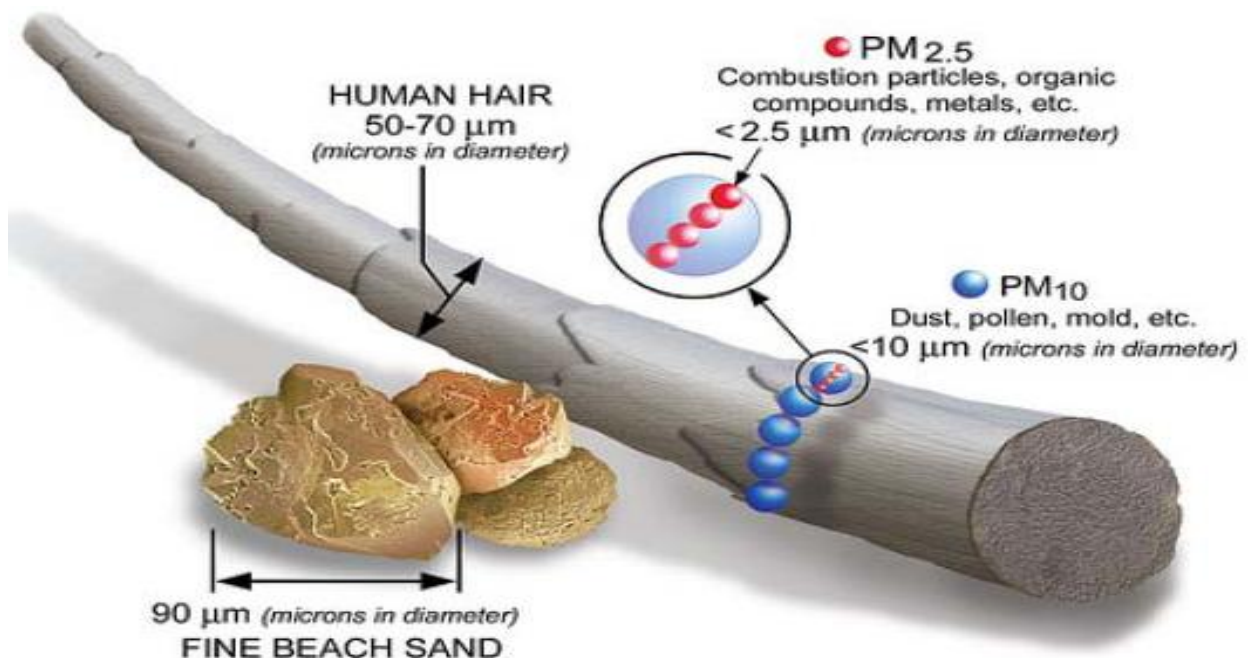
2.1.1 Hiukkasten koko

Hiukkasille käytetään mittayksikköinä nanometriä ja mikrometriä. Mikrometri on metrin miljoonasosa ja nanometri metrin miljardisosa. Hiukkasten halkaisijan määritellään olevan 1 nm–100 µm, joten niiden koko vaihtelee monia kertaluokkia. Pienimmät hiukkaset ovat vain muutamista molekyyleistä koostuvia rypäitä, kun taas suurimmat hiukkaset ovat jopa silmin havaittavia pölyhiutusia. (Riipinen & Lehtipalo 2012.) Kuvio 2 voidaan havaita hiukkasten kokoluokkien määrittely.



Kuvio 2 Hiukkasten kokoluokat, hiukkasmäärät ja hiukkasmassan osuus (Kittelson 2006).

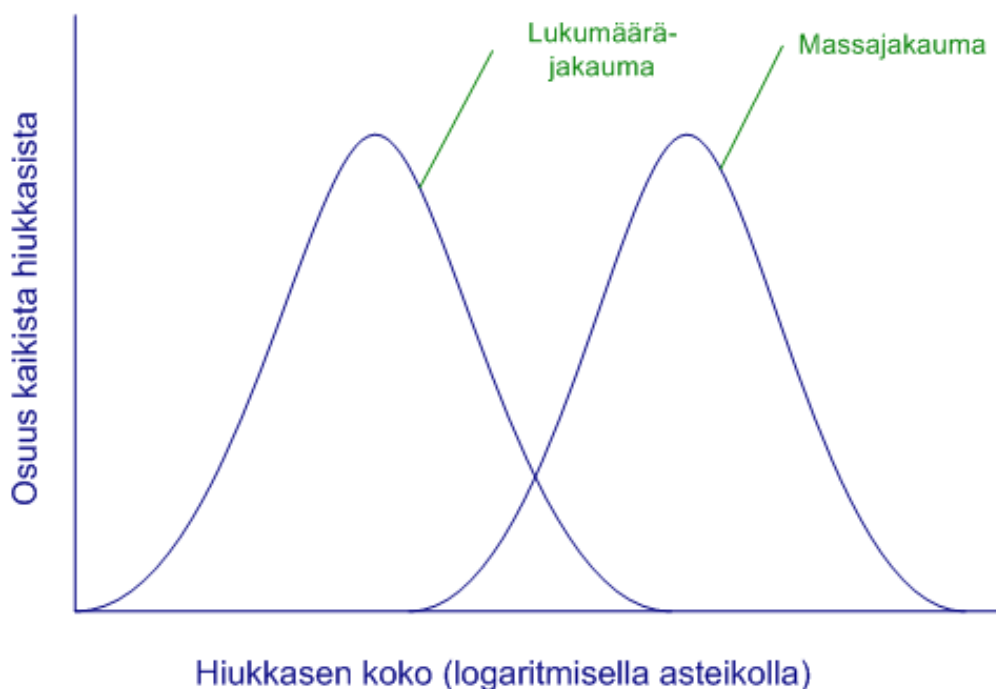
Hiukkaset voidaan jakaa eri kokoluokkiin, riippuen lähteistä. Anttilan ym. (2004) mukaan hiukkaset jaotellaan neljään kategoriaan: suuriin hiukkasiin, hengitettäviin hiukkasiin, karkeisiin hiukkasiin ja pienhiukkasiin. Hengitettävät hiukkaset voidaan jakaa pienhiukkasiin ja karkeisiin hiukkasiin. Raja niiden välille vedetään yleensä 1–2,5 μm (PM₁–PM_{2,5}) kohdalla. Karkeita hiukkasia ovat hiukkaset joiden koko on alle 10 μm (PM₁₀). Alle 100 nm (PM_{0,1}) kokoisia hiukkasia kutsutaan yleensä ultrapieniksi hiukkasiksi ja alle 50 nm hiukkasia kutsutaan nanohiukkasiksi. Kuvio 2 selventää tätä jaottelua suhteessa hiukkasten määrään ja massaan. Vaikkakin hiukkasten koko ilmoitetaan yleensä halkaisijana, ovat ne usein ryppäissä ja muodostavat täten erimuotoisia kokonaisuuksia. Kuviossa 3 on havainnollistettu hiukkasten kokoa ihmisen hiukseen ja hiekan jyvään. (Riipinen & Lehtipalo 2012.)



Kuvio 3 Hiukkasten koko verrattuna hiuksen ja hiekan jyvän kokoon (Oregon Physicians for Social Responsibility 2008).

2.1.2 Hiukkasten kokojakauma

Kuvio 4 havainnollistaa hiukkasten kokojakaumaa massajakauman suhteen. Karkeat hiukkaset muodostavat suurimman osan hiukkasten massasta, kun taas määrällisesti enemmän on pieniä ja ultrapieniä hiukkasia. (Riipinen & Lehtipalo 2012; Cordtz 2011; Liu, Shah, Ge, Ding, Tan, Jiang, Yu, Zhao, Wang & Teng 2011.) Tämän takia hiukkasmassan tarkkailun ja rajoittamisen lisäksi tulevissa päästörajoituksissa tullaan oletettavasti keskittymään hiukkasmäärän rajoittamiseen.



Kuvio 4 Hiukkasten kokojakauma (Riipinen & Lehtipalo 2012).

Hiukkaset vaikuttavat ilmastoon kahdella tavalla: suorasti ja epäsuorasti. Suoraan tapaan kuuluu hiukkasten kyky sirottaa ja absorboida auringosta tulevaa säteilyä. Tällöin hiukkaset voivat joko lämmittää tai viilentää ilmastoa. Epäsuorasti hiukkaset vaikuttavat ilmastoon esimerkiksi muodostaen pölyä, joka absorboi aurinkosäteilyä ja heijastaa sitä takaisin ilmaan.

ra tapa on hiukkasten osallisuus pilvien muodostamisessa. Hiukkaspitoisuus vaikuttaa niiden koostumukseen ja elinikään. Näin ollen pilvet heijastavat säteilyä mahdollisesti tehokkaammin ja pidempään tai päinvastoin. (Riipinen & Lehtipalo 2012.) Hiukkasten vaikutuksesta ihmisten terveyteen on kerrottu kappaleessa 2.4.

2.2 Dieselmoottorin pakokaasuhiukkaset

Dieselmoottorin hiukkaspäästöt lyhennetään yleensä joko PM (particulate matter) tai DPM (diesel particulate matter). PM-emissioita pidetään yhtenä haitallisimmista päästöistä, joita tulee dieselmoottorista (Majewski & Khair 2006: 126–127). Hiukkaspäästöt yhdessä NO_x-päästöjen kanssa ovatkin nykyään eniten suurennuslasin alla dieselmoottorin emissioista. Hiukkaset ovat erittäin kompleksiksi sekoitus alkeishiiltä (EC = elemental carbon), orgaanista hiiltä (OC = organic carbon), sulfaatteja ja muita ei eloperäisiä yhdisteitä, joita tulee yleensä polttoaineesta ja öljystä. (Mayer & 50 co-authors 2008: 77.)

Majewskin ja Khairin (2006: 112) sekä Guptan, Kotharin, Srivastavan ja Agarwalin (2010) mukaan hiukkaspäästöt määritellään miksi tahansa aineeksi, joka tulee polttomoottorin pakoputkesta ja voidaan ottaa kiinni näytteenottosuodattimeen ≤ 52 °C lämpötilassa. Tästä huomataan, että hiukkaspäästöillä ei ole kovin hyvää fysikaalista määrittelyä. Majewskin ja Khairin mukaan (2006: 127–128) hiukkaspäästöt on jaettu yleensä kolmeen pääkategoriaan, jotka ovat seuraavat:

- Kiinteä osuus (SOL = solid fraction)

- alkeishiili
- tuhka
- Liukeneva orgaaninen osuus (SOF = soluble organic fraction)
 - orgaaninen aine moottorin voiteluaineesta
 - orgaaninen aine polttoaineesta
- Sulfaattiosuus (SO₄ = sulfate particulates)
 - rikkihappo
 - vesi

Lisäksi pääkategorioihin voidaan luokitella myös haihtuva orgaaninen osuus (VOF = volatile organic fraction).

Näistä voidaan laskea hiukkapäästöjen kokonaisosuus (TPM = total particulate matter) seuraavanlaisesti:

$$\text{TPM} = \text{SOL} + \text{SOF} + \text{SO}_4 \quad (1)$$

Polttoaineen ja voiteluöljyn rikkipitoisuus aiheuttaa sulfaattihiukkasten syntymisen. Sulfaattihiukkasiin liittyvä ongelma on niiden kyky sitoa kosteutta, mikä voi aiheuttaa jopa hiukkasten massan kaksinkertaistumista. (Majewski & Khair 2006: 112.)

Hiukkaspäästöjen jakautuminen SOL:iin, SOF:iin ja VOF:iin rikittömässä polttoaineessa voidaan havaita kuviosta 5. SOL pitää sisällään kaikkein suurimman osuuden, n. 64 % hiilipohjaisia yhdisteitä sekä n. 3 % tuhkaa. SOF (n. 20 %) pitää sisällään haihtumattoman ja haihtuvan liukenevan orgaanisen osuuden,

kun taas VOF:iin (n. 23 %) luetaan haihtuva liukeneva orgaaninen osuus ja termisesti labiilit ja hapettuneet pintaryhmät.

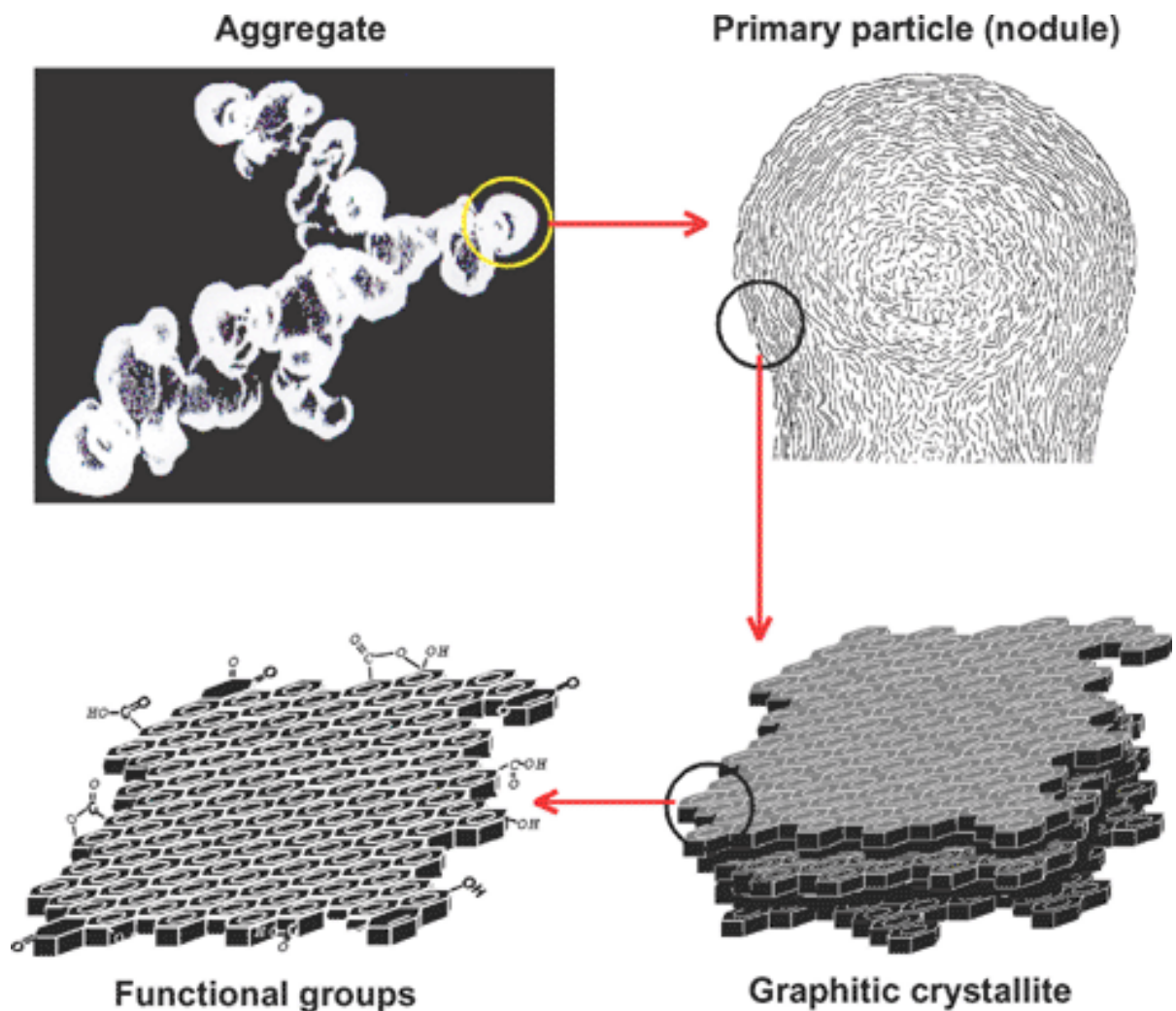
Non-volatile Soluble Organic Fraction	10 %	} SOF	} VOF
Volatile Soluble Organic Fraction at 600 °C	10 %		
Thermally Labile and Oxygenated Surface Groups	13 %		
Carbonaceous Matrix at 600 °C	64 %		
Ashes	3%		

Kuvio 5 Hiukkaspäästöjen jakautuminen eri ryhmiin (Collura ym. 2005).

2.2.1 Kiinteä osuus (SOL)

Dieselpakokaasuhiukkasten kiinteään osuuteen kuuluvat hiili ja tuhka. Hiili, joka tunnetaan myös nimellä noki (soot), on vastuussa pakokaasupäästöissä havaittavasta mustasta savusta. Andreas Meyer ym. (2008) kertovat kirjassaan, että nokihiukkaset ovat noin 20 nm halkaisijaltaan ja ne muodostuvat pe-

rushiukkasista muodostaen rypäle- tai ketjumuodostelmia. He kertovat kirjassaan myös, että dieselmoottori muodostaa nokihiukkasia, jotka ovat halkaisijaltaan 50–150 nm. Hiilipitoiset hiukkaset syntyvät dieselmoottorin heterogeenisessä palotapahtumassa. Nokihiukkasen hiiliatomi järjestäytyy kuusikulmaisen hiutaleen muotoon ja useampi niistä asettautuu kerrosmaisiksi lehden muotoiseksi grafiittikiteiksi kuvion 6 mukaisesti. Hiukkaset kasautuvat kuvion 6 vasemman yläkulman mukaisesti sylinterissä, pakokaasuputkistossa ja tullessaan kosketuksiin ilman kanssa. (Majewski & Khair 2006: 128–129; Van Setten, Makkee & Moulijn 2001.)



Kuvio 6 Hiilihiukkasen rakenne (Environment Canada 2011).

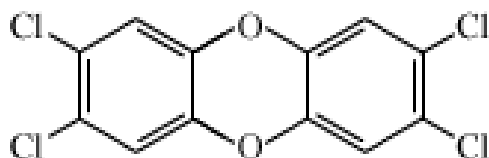
Tuhkapäästöt pitävät sisällään metallisen tuhkan. Pääasiassa pakokaasun tuhka sisältää sulfaatteja ja fosfaatteja tai kalsiumin, sinkin ja magnesiumin oksideja sekä muita metalleja, joita syntyy kun polttoaineen lisäaineet tai öljy palavat palotilassa. Tuhka sisältää myös kulumisesta muodostuvia raudan, kuparin, kromin ja alumiinin oksideja. Rautaoksideja sekä mahdollisesti muita oksideja syntyy myös pakopuolen putkien sekä pakokaasun jälkikäsittelylaitteiden korroosiosta. (Majewski & Khair 2006: 128–129.)

2.2.2 Liukeneva orgaaninen osuus (SOF)

Liukenevaan orgaaniseen osuuteen kuuluvat hiilivedyt, jotka ovat adsorboituneet hiilipartikkelin pinnalle tai ilmentyvät hienon pisaran muodossa. SOF pysyy normaalissa pakokaasun lämpötilassa kaasumaisena, mutta mikäli lämpötila putoaa alle 52 °C:n, muuttuu SOF nestemäiseksi. Mikäli hiukkaspäästöt sisältävät vähän SOF osuutta, kutsutaan hiukkasia kuiviksi hiukkasiksi ja mikäli SOF:ia on paljon, kutsutaan hiukkasia märäksi hiukkasiksi. (Majewski & Khair 2006: 130–131.)

SOF sisältää suurimman osan PAH-yhdisteistä. PAH-yhdisteet ovat hiilivetyjä, joihin on yhdistynyt kahdesta kuuteen bentseenirengasta. Yli neljä rengasta sisältäviä PAH-yhdisteitä pidetään vaarallisina yhdisteinä ja niitä on SOF:ssa lähes aina. PAH-yhdisteitä syntyy epätäydellisen palamisen sivutuotteena. PAH-yhdisteiden osuus dieselpolttoaineessa vaihtelee 1,5 % ja 2,5 % välillä. Noin 0,2–1 % tästä voidaan havaita pakokaasussa. PAH-yhdisteet ovat vaarallisia, mutta niitä on pakokaasussa erittäin vähän. (Majewski & Khair 2006: 130–131.)

Dioksiinit kuuluvat SOF:iin ja ovat erittäin vaarallisia, sillä niillä epäillään olevan karsinogeenisiä vaikutuksia. Dioksiineja syntyy palamisen sivutuotteena, ja ne koostuvat kahdesta kahden hapen yhdistämästä bentseenirenkaasta kuvion 7 mukaisesti. Eläinkokeet ovat todistaneet, että dioksiinit voivat aiheuttaa tulehduksia, lihasten vajaatoimintaa sekä ongelmia hermostossa. (Encyclopedia Britannica inc. 2012). Niitä on kuitenkin PAH -yhdisteiden tavoin erittäin vähän pakokaasussa, joten niitä ei pidetä merkittävänä uhkana ihmiselle tai ympäristölle.



Kuvio 7 Dioksiini (Encyclopedia Britannica inc. 2012).

2.2.3 Sulfaattiosuus

Polttoaineen rikkipitoisuudella on tärkeä osa sulfaattipäästöjen syntyyn. Mitä enemmän polttoaineessa on rikkiä, sitä enemmän syntyy sulfaattipäästöjä. Rikkipitoinen polttoaine tuottaa palaessaan SO_2 -päästöjä, jotka happirikkaassa ympäristössä tai tässä tapauksessa hapetuskatalysaattorin läpi kulkiessaan hapeuttuvat osittain SO_3 :ksi. Sopivissa olosuhteissa SO_3 voi reagoida veden (H_2O) kanssa ja muodostaa rikkihappoa (H_2SO_4), joka puolestaan muodostaa ultra-
pieniä hiukkasia. (Walsh.)

Rikkidioksidi (SO_2) muodostaa myös hiukkaspäästöjä, kun se joutuu kosketuksiin ympäröivän ilman kanssa. Toisin sanoen SO_2 muodostaa hiukkaspäästöjä

vasta DPF:n jälkeen pakoputken päässä päästyään kosketuksiin ilman kanssa. Tämä aiheuttaa mittaustuloksiin hiukkaspäästöjä ja heikentää siten DPF:n laskennallista hyötysuhdetta. (Walsh.)

Ympäri maailmaa pyritään siihen, että polttoaineessa olisi mahdollisimman vähän rikkiä. Tämän kehityksen tarkoituksena on se, että pyritään vähentämään hiukkaspäästöjä. Lisäksi rikkipäästöt voivat aiheuttaa pakokaasun jälkikäsitteilylaitteissa katalyytin tehon heikkenemistä. (Maricq 2007.) Tavoitteena on myös happosateiden määrän vähentäminen (Niemi 2012).

2.2.4 Haihtuva orgaaninen osuus (VOF)

Haihtuvaksi orgaaniseksi osuudeksi luokitellaan hiilipohjaiset yhdisteet, joiden höyrystymispaine on 0,01 kPa 20 °C lämpötilassa. Tästä saadaan höyrystymispisteeksi noin 220–250 °C. VOF luokitellaan myös sen vesiliukoisuuden mukaan. VOF:iin kuuluu osa SOF:n yhdisteistä sekä myös sulfaattiosuutta. VOF on määrittelyltään erittäin lähellä SOF:ia. (Pagans, Font & Sánchez 2005.)

2.2.5 Hiukkasten synty ja rakenne

Pakokaasussa olevat hiukkaset syntyvät palotapahtumassa pääasiassa kolmella eri tavalla:

- Epätäydellinen palaminen
 - Nokihiuksaset, sisältävät lähinnä hiiltä ja hiilivetyä
- Palamattoman materiaalin päästöt
 - Mineraalit, suolat, rikkiyhdisteet

- Mekaanisesti syntyvät hiukkaset
 - Moottorin metalliosien kuluminen

(Mayer & 50 co-authors 2008.)

Majewskin ja Khairin (2006: 112–113) mukaan pakokaasu voi sisältää myös hiukkasia, jotka tulevat pölystä, epäorgaanisesta aineesta tai mahdollisesti metallin kulumisesta. Pölyä voi päästä ilmasta palotilaan imuputkiston kautta päästyään ensin ilmansuodattimen läpi. Epäorgaanista ainetta palotilaan pääsee öljyn tai polttoaineen lisäaineiden kautta. Metallin kuluminen aiheuttaa metallihiukkasia, jotka voivat kulkeutua pakokaasuun voiteluöljyn kautta.

Kuviossa 8 on yksinkertaistettu malli ruiskutustapahtuman jälkeisestä liekistä ja siitä, mitä päästöjä liekkirintamassa muodostuu missäkin vaiheessa. Polttoaineen palamiseen palotilassa vaikuttavat:

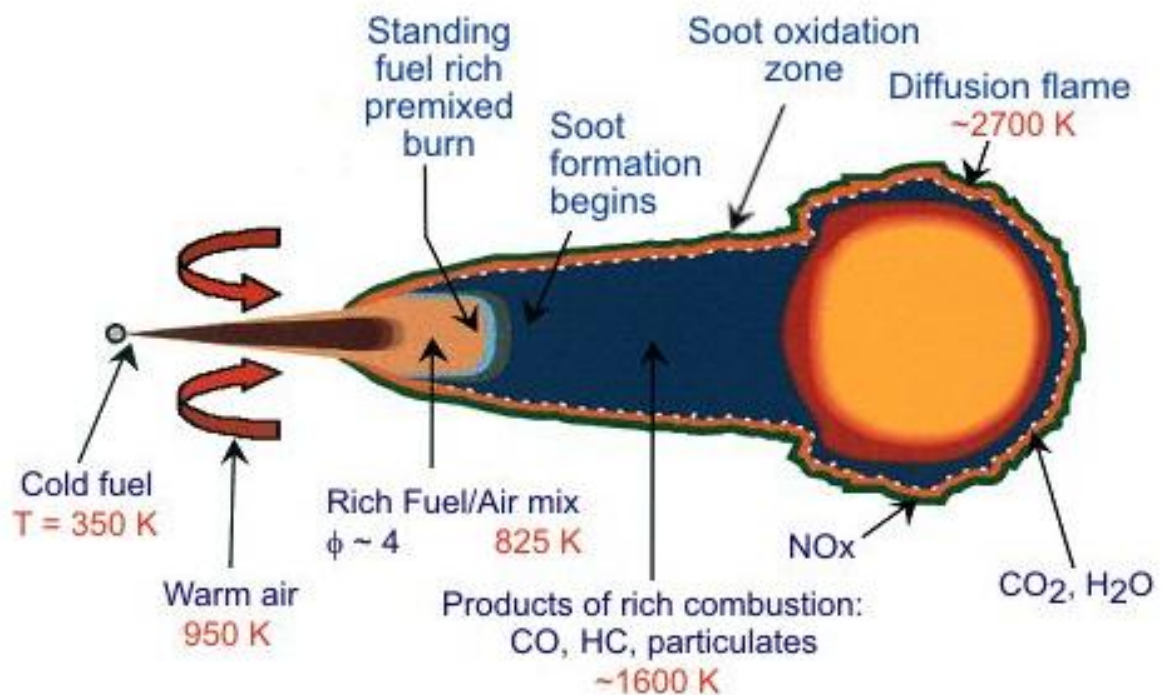
- ilmamäärä
- puristussuhde
- lämmönsiirtymisnopeus sylinteritilavuudessa eri kierrosnopeuksilla ja kuormilla
- venttiileiden määrä ja niiden ajoitus
- polttoaineen spesifikaatio ja monet muut parametrit.

(Majewski 2002.)

Kuviosta 8 havaitaan, että NO_x -päästöt muodostuvat liekkirintaman ulkokehällä korkeissa lämpötiloissa (n. 2700 K). CO, HC sekä PM muodostuvat liekkirintaman keskellä pienemmissä lämpötiloissa (n. 1600 K). Noki puolestaan alkaa muodostua liekin alkupäässä rikkaan polttoaine-ilma -seoksen etupuolella.

Taulukko 1 Hiukkaspäästöjen lähteitä, muokattu (Majewski & Khair 2006: 114).

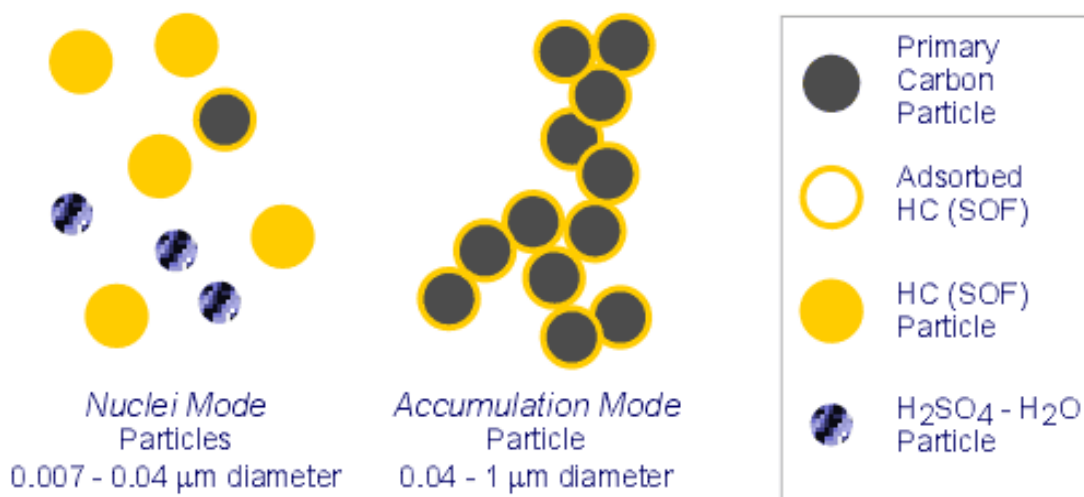
<p>1. Öljyhäviöt</p> <p>2. Musta savutus</p> <ul style="list-style-type: none"> - liiallinen polttoaineen syöttö - huono palaminen <p>3. Valkoinen savutus</p> <ul style="list-style-type: none"> - kylmäkäynnistys - sytytysvirhe <p>4. Muu hiilivedyn lähde</p> <ul style="list-style-type: none"> - polttoaineen valuminen suuttimesta - toissijainen ruiskuttaminen - jälkiruiskutus <p>5. Polttoaineen laatu</p> <ul style="list-style-type: none"> - rikkipitoisuus - aromaattisuus - setaaniluku - tuhkapitoisuus
--



Kuvio 8 Liekin kemiallinen koostumus, muokattu (Khair & Jääskeläinen 2010).

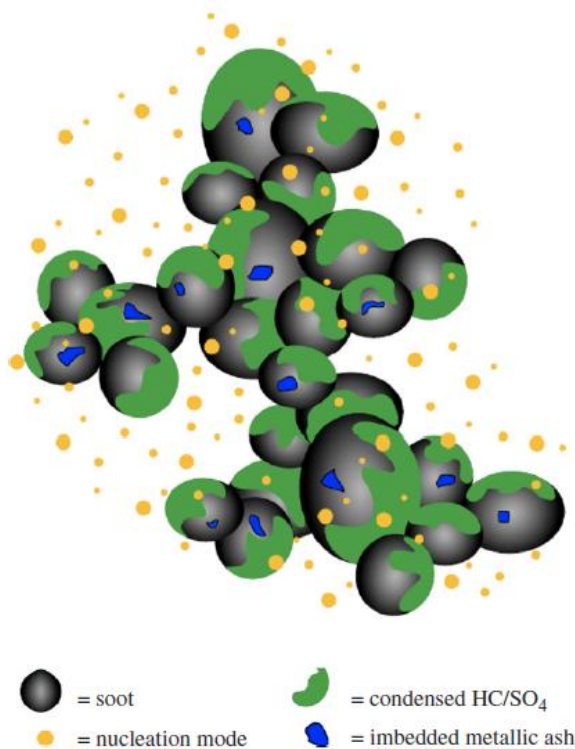
Taulukossa 1 on listattu satunnaiseen järjestykseen lähteitä, joiden takia hiukkaspäästöjä syntyy. Hiukkaspäästöjen lähteitä ovat mm. öljyhäviöt, valkoinen savutus johtuen kylmästä käynnistyksestä, liian huono palaminen, polttoaineen palamattomuus ja polttoaineen laadun heikkous.

Dieselpartikkelit koostuvat alkeishiilipartikkeleista, jotka kasaantuvat ja adsorboituvat muihin alkuaineisiin ja luovat näin rakenteita, joilla on monimutkaisia fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Dieselhiukkaset jakautuvat kahteen kokojakaumaan, joita ovat yksittäiset ydinhiukkaset ja kasaantuneet hiukkaset. Kuvio 9 nähdään ydinhiukkasten ja kasaantuneiden hiukkasten kokoluokka dieselmoottorin pakokaasussa sekä miten kasautuneet hiukkaset muodostuvat. Ydinhiukkaset ovat halkaisijaltaan 7–40 nm ja hiukkasryppäät 4–1000 nm. (Majewski & Khair 2006: 126–128.)



Kuvio 9 Dieselpartikkelien kokoluokka ja muodostuminen (ECOpoint inc. 2008).

Kasaantuneiden hiukkasten koostumus on havaittavissa kuvio 10. Nokihiukkaset keräävät itseensä tiivistyneitä hiilivetyjä ja mahdollisesti sulfaattia. Myös metallihiukkasia kiinnittyy nokihiukkasiin.



Kuvio 10 Dieselmoottorin pakokaasuhiukkasten rakenne (Maricq 2007).

2.3 Päästö määräykset ja niiden kehittyminen

Dieselmoottori tuottaa erilaisia yhdisteitä paloprosessin aikana, ja osaa näistä yhdisteistä säädellään lakipykälillä. Näitä säädeltyjä emissioyhdisteitä ovat:

- Hiukkasaines (PM = particulate matter), siitä voidaan käyttää lyhenteitä DPM (diesel particulate matter) ja TPM (total particulate matter). PM sisältää hiilipitoista nokea yhdessä muiden kiinteiden ja nestemäisien aineiden kanssa.
- Hiukkasmäärä (PN = particle number).

- Typen oksidit (NO_x = nitrogen oxides) ovat sekoitus typpimonoksidia (NO) ja typpidioksidia (NO_2).
- Hiilivedyt (HC = hydrocarbons) pitävät sisällään joko kokonaishiilivedyt (THC = total hydrocarbons) tai muut hiilivedyt, mutta ei metaania (NMHC = non-methane hydrocarbons).
- Hiilimonoksidi (CO), joka tunnetaan myös nimellä häkä.

(ECOpaint inc. 2008.)

Dieselpakokaasut sisältävät myös paljon muita yhdisteitä, joita ei rajoiteta. Näiden yhdisteiden määrä koko pakokaasussa on erittäin pieni, mutta ne voivat olla silti erittäin haitallisia ihmisille ja ympäristölle. Näitä yhdisteitä ovat:

- Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH = polynuclear aromatic hydrocarbons) ovat raskaita orgaanisia yhdisteitä, joita löytyy lähinnä PM:stä, mutta myös kaasumuodossa.
- Liukeneva orgaaninen osuus (SOF = soluble organic fraction) on osittain haihtuvaa, mitä on pääasiassa PM:ssä.
- Aldehydit (R-CHO).
- Dityppioksidi eli ilokaasu (N_2O = nitrous oxide); ei yleensä sisällytetä NO_x :iin.
- Metallioksidit tulevat voiteluaineista, jotka usein sisältävät metalliyhdisteitä.
- Dioksiini.

(ECOpaint inc. 2008.)

Dieselmoottorin päästöjä eli emissioita rajoitetaan joka puolella maapalloa. Tiukimmat emissiorajat ovat tällä hetkellä Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa.

Vuonna 2014 Euroopassa tulevat voimaan Stage 4 ja Pohjois-Amerikassa Tier 4 päästörajoitukset, jotka tiukentavat vain NO_x-päästöjä. Yleinen käsitys on, että mahdollisesti tuleva Stage/Tier 5 tulee ottamaan hiukkaslukumäärän rajoitusten piiriin, jolloin hiukkassuodattimen käyttö yleistyy.

Muissa maissa noudatetaan soveltuvin osin Euroopan Stage- tai Pohjois-Amerikan Tier-päästörajoituksia. Yleensä ne noudattavat joko Stage- tai Tier -päästörajoituksia, mutta niiden käyttöönottopäivämäärät rajoituksille ovat erilaiset tai ne tulevat yhden tai useamman rajoitustason taaempaan. Muutamilla alueilla ei ole rajoituksia ollenkaan.

2.3.1 Eurooppa

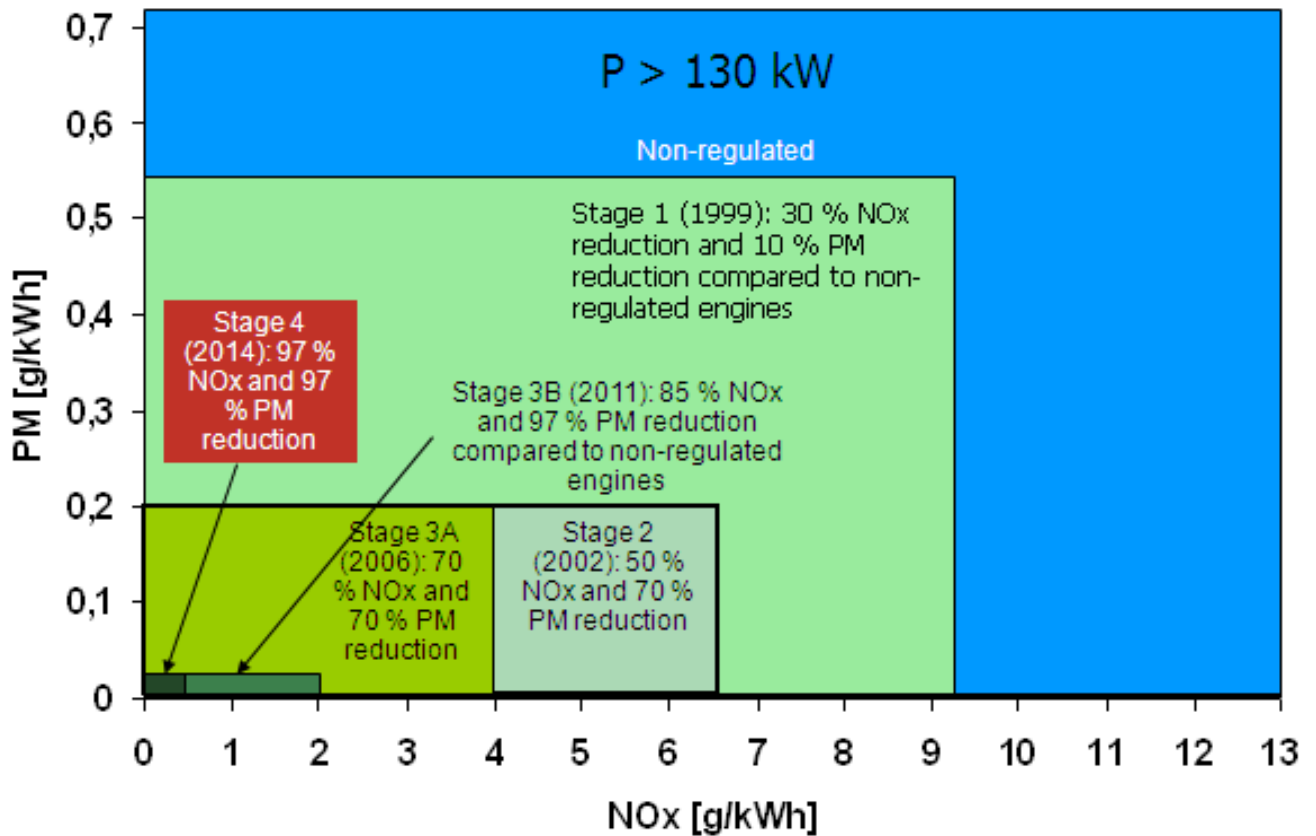
Ensimmäiset päästörajoitukset (Stage I) Euroopan parlamentti asetti non-road (off-road) dieselmootoreille vuonna 1997, ja ne otettiin käyttöön 1999. Euroopan päästörajoitukset tunnetaan nimellä Stage I, II, IIIA, IIIB ja IV. Nämä vastaavat suurilta osin Pohjois-Amerikan päästörajoituksia ja eroavat lähinnä nimestään. (ECOpaint inc 2009.)

Taulukossa 2 on esitetty Euroopan non-road-dieselmootoreiden päästömääräykset Stage I-IV eri moottorien teholuokille. Kuten taulukosta havaitaan, ovat vuodesta 2006 päästömääräykset tiukentuneet lähinnä NO_x:n tai HC+NO_x:n ja hiukkaspäästöjen osalta. Vuonna 2014 voimaan tuleva Stage IV kiristää vain NO_x-päästöjä merkittävästi.

Taulukko 2 Non-road-dieselmootoreiden päästömääräykset euroopassa eri teholuokan mootoreille, muokattu (Euromot 2010).

Power P_n kW	NO _x g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	Particulates g/kWh	Date*
	NO _x + NMHC				
Stage I					
$75 \leq P_n < 130$	9.2	1.3	5.0	0.70	1999
$130 \leq P_n \leq 560$	9.2	1.3	5.0	0.54	1999
Stage II					
$75 \leq P_n < 130$	6.0	1.0	5.0	0.3	2003
$130 \leq P_n \leq 560$	6.0	1.0	3.5	0.2	2002
Stage III A					
$75 \leq P_n < 130$	4.0		5.0	0.3	2007
$130 \leq P_n \leq 560$	4.0		3.5	0.2	2006
Stage III B					
$75 \leq P_n < 130$	3.3	0.19	5.0	0.025	2012
$130 \leq P_n \leq 560$	2.0	0.19	3.5	0.025	2011
Stage IV					
$56 \leq P_n < 130$	0.4	0.19	5.0	0.025	Oct 2014
$130 \leq P_n \leq 560$	0.4	0.19	3.5	0.025	2014

Kuviossa 11 on kuvattu hyvin päästörajojen kehittyminen NO_x- ja PM -päästöjen suhteen yli 130 kW non-road-dieselmootoreissa. Vuonna 1999 voimaan tulleet päästörajoitukset pienensivät NO_x-päästöjä 30 % ja PM-päästöjä 10 %. Päästörajoitukset ovat tiukentuneet huomattavasti vuodesta 1999, ja jopa 97 % NO_x- ja PM-päästöjen lasku verrattuna sääntelemättömiin moottoreihin pitää saavuttaa vuoteen 2014 mennessä. Tämän saavuttamiseksi pitää pakokaasupuolelle asentaa pakokaasun jälkikäsitteilylaitteita.



Kuvio 11 Päästörajojen kehittyminen yli 130 kW moottoreissa PM:n ja NO_x:in suhteen Euroopassa, muokattu (AGCO Sisu Power 2008).

2.3.2 Pohjois-Amerikka

Ensimmäiset non-road-päästörajoitukset määriteltiin Pohjois-Amerikassa vuonna 1996, ja ne otettiin kokonaan käyttöön vuonna 1998. Siitä lähtien päästörajoitukset ovat kiristyneet muun maailman tavoin koko ajan. Pohjois-Amerikan päästörajoitukset tunnetaan nimillä Tier 1, 2, 3, 4 interim ja 4 tai 4 final. Taulukossa 3 on esitetty Pohjois-Amerikan non-road-dieselmootoreiden päästömääräykset. Havaitaan, että päästörajat liikkuvat hyvin samoilla alueilla kuin Euroopassa.

Taulukko 3 Non-road-dieselmootoreiden päästömääräykset Pohjois-Amerikassa, muokattu (Euromot 2010).

Power P_n kW	NO _x g/kWh	HC* g/kWh	CO g/kWh	Particulates g/kWh	Date as of MY
	NO _x + NMHC				
Tier 1					
$75 \leq P_n < 130$	9.2	–	–	–	1997
$130 \leq P_n < 560$	9.2	1.3	11.4	0.54	1996
$P_n > 560$	9.2	1.3	11.4	0.54	2000
Tier 2					
$75 \leq P_n < 130$	6.6		5.0	0.3	2003
$130 \leq P_n < 225$	6.6		3.5	0.2	2003
$225 \leq P_n < 450$	6.4		3.5	0.2	2001
$450 \leq P_n \leq 560$	6.4		3.5	0.2	2002
$P_n > 560$	6.4		3.5	0.2	2006
Tier 3					
$75 \leq P_n < 130$	4.0		5.0	0.3	2007
$130 \leq P_n \leq 560$	4.0		3.5	0.2	2006
$P_n > 560$	no further reduction				
Tier 4 interim					
$56 \leq P_n < 130$	3.4	0.19	5.0	0.02	2012
$130 \leq P_n \leq 560$	2.0	0.19	3.5	0.02	2011
$P_n > 560$	3.5	0.4	3.5	0.10	2011
Tier 4					
$56 \leq P_n < 130$	0.4	0.19	5.0	0.02	2015**
$130 \leq P_n < 560$	0.4	0.19	3.5	0.02	2014***
$P_n > 560$	3.5	0.19	3.5	0.04	2015

2.3.3 Muu maailma

Brasiliassa päästörajoitukset non-road -dieselmootoreille tulevat voimaan vuonna 2015, ja ne ovat samat kuin Pohjois-Amerikan Tier 3:ssa. Intiassa ovat tulleet voimaan vuonna 2011 päästörajoitukset, joka seuraavat niin ikään Pohjois-Amerikan Tier 3:sta. (ECOpoint inc 2009.)

Kiinassa vuonna 2009 voimaan tulevat päästörajoitukset pitävät sisällään taulukon 4 kaltaiset rajoitukset. Rajoituksista nähdään, että ne seuraavat hyvin pit-

kähti Pohjois-Amerikan Tier 3 -päästörajoituksia. NO_x- ja HC -päästöt saavat olla hieman korkeammat kuin Tier 3:ssa.

Taulukko 4 Non-road-dieselmootoreiden päästörajoitukset Kiinassa (ECOpoint inc. 2009).

Max Power (P), kW	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	PM
130 ≤ P ≤ 560	3.5	1.0	6.0	-	0.2

Japanin päästörajoitukset 130–560 kW non-road-dieselmootoreille ovat taulukossa 5. CO-taso on sama kuin muidenkin maiden päästörajoituksissa, mutta muut arvot vaihtelevat, ja lisäksi Japanilla on rajoitus savutukselle, mitä muilla mailla ei ole. NO_x-päästöt saavat olla hieman korkeammat kuin yleensä, mutta hiukkaspäästöt taas ovat hieman pienemmät kuin muilla.

Taulukko 5 Non-road -dieselmootoreiden päästörajoitukset Japanissa (ECOpoint inc. 2009).

Power (P)	CO	HC	NO _x	PM	Smoke
<i>kW</i>	<i>g/kWh</i>				<i>%</i>
130 ≤ P < 560	3.5	0.4	3.6	0.17	25

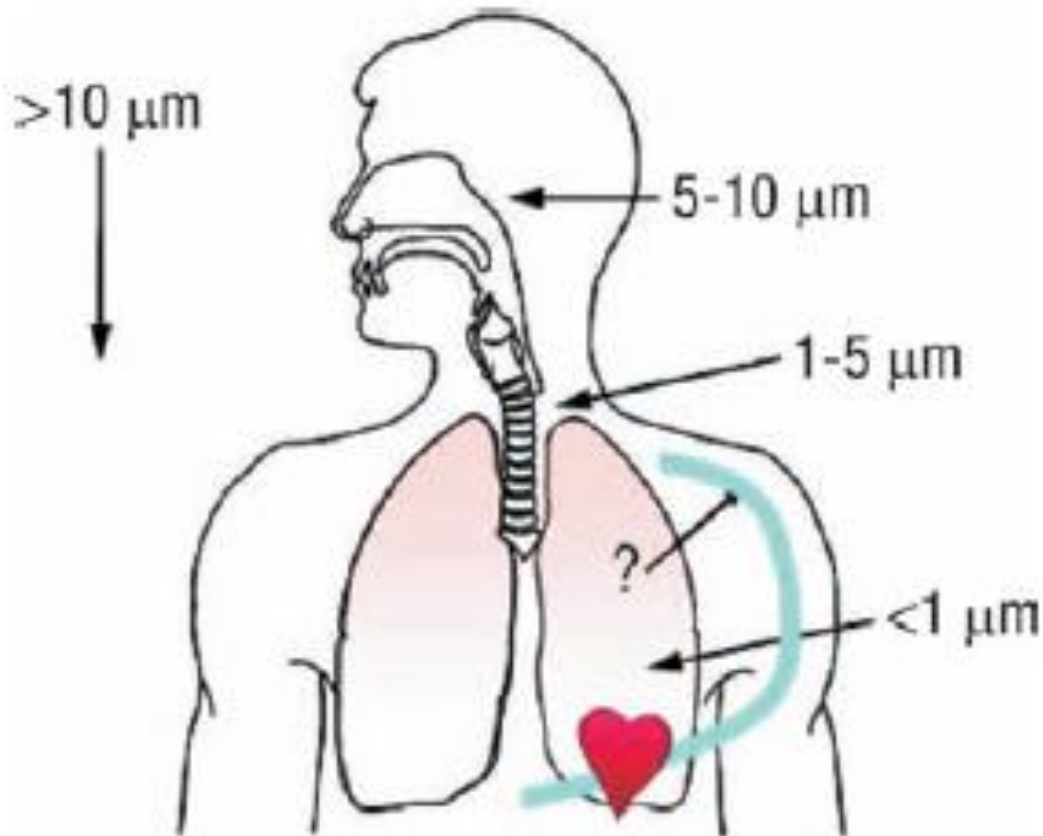
2.4 Hiukkaspäästöjen terveysvaikutukset

Dieselmootorin pakokaasu sisältää useita vaarallisia yhdisteitä: hiilimonoksidi- eli häkä- (CO), typpimonoksidi- (NO), typpidioksidi- (NO₂), rikkidioksidi- (SO₂) sekä hiukkaspäästöjä (PM). Hiilimonoksidi ja typenoksidit ovat säädeltyjä yhdisteitä, ja rikkidioksidia säädelään polttoainelaadun kautta (ECOpoint inc. 1999; Riedl & Diaz-Sanchez 2005). Pakokaasu sisältää myös monia muita vaaral-

lisia yhdisteitä, kuten PAH-yhdisteitä, mutta niiden määrä on erittäin pieni, eikä niitä oteta erittäin pienien määriensä takia huomioon päästörajoituksissa.

Riipinen ja Lehtipalo (2012) kertovat, että pienimmät hiukkaset eli ultrahiukkaset voivat kulkeutua suoraan keuhkorakkuloista verenkiertoon. Ihmisten hengityselimet käsittelevät 10–25 kuutiometriä ilmaa päivässä ja jokaisella hengityksellä keuhkoihin jää mahdollisesti jopa 2,4 litraa ilmaa, vain 0,5 litran vaihtuessa hengittäessä. Tällöin osa hengitysilmaasta deponoituu eli tarttuu johonkin pintaan joko diffuusion, impaktion tai sedimentaation vaikutuksesta. Diffuusio tarkoittaa molekyylien leviämistä lämpöliikkeen vaikutuksesta alhaisemman pitoisuuden suuntaan. Impaktio tarkoittaa molekyylin jäämistä kiinni pintaan suoraan iskun vaikutuksesta. Sedimentaatio puolestaan tarkoittaa, että molekyyli laskeutuu painovoiman vaikutuksesta suoraan pinnalle. Myös nanohiukkaset voivat kulkeutua verenkiertoon ja sitä kautta jopa soluihin asti. Tämänhetkisen käsityksen mukaan hiukkaset aiheuttavat elimistössä jatkuvaa tulehdustilaa ja lisäävät veren hyytymistäipumusta (Huttunen 2012; Mazzarella, Ferraraccio, Prati, Annunziata, Bianco, Mezzogiorno, Liguori, Angelillo & Cazzola 2007).

Kuvio 12 havainnollistaa, kuinka hiukkaset voivat kulkeutua ihmisen hengityselimissä. Yli 10 μm hiukkaset eivät tunkeudu hengityselimiin, 5–10 μm kulkeutuvat nenään ja suuhun, 1–5 μm kulkeutuvat nieluun ja alle 1 μm hiukkaset kulkeutuvat keuhkoihin (Mazzarella ym. 2007; Tekes teknologiaohjelmaraportti 2006). Dieselautojen tuottamasta hiukkasmassasta suurimman osan muodostavat alle 0,1 μm kokoluokan hiukkaset, jotka voivat kulkeutua hengityselimiä pitkin jopa keuhkorakkuloihin ja sieltä verenkiertoon (Tekes teknologiaohjelmaraportti 2006).



Kuvio 12 Hiukkasten kulkeutuminen hengityselimissä (Tekes teknologiaohjelmaraportti 2006).

2.4.1 Altistuminen hiukkasille

Laajoissa väestötutkimuksissa hengitysilman pienhiukkaset (PM_{2,5}) ovat näyttäneen lisäävän aivoverenkierron häiriöiden ja sydänkohtausten vaaraa. Yksilöittäin lisäriski ei ole hälyttävä, mutta suuremmalla otannalla merkitys on suuri, sillä moni ihminen altistuu pienhiukkasille. Pienhiukkaset voivat aiheuttaa myös kohonnutta verenpainetta, kakkos-tyypin diabetesta, keuhkosairauksia, muistin heikkenemistä ja mahdollisesti jopa dementiaa. (Huttunen 2012.)

Rikkihappo muodostaa hiukkasia ja rikkihappohiukkasiin vaarallisuus on laajasti tiedossa. Erittäin pieninä määrinä nämä hiukkaset kuitenkin hyvin todennäköisesti neutralisoituvat ammoniumsulfaatiksi ihmisten hengityselimissä, sillä eläinkokeissa näillä hiukkasilla ei ole todettu olevan merkittävää haittaa rotien keuhkoille (Schneider, Kirchner, Borrmann, Vogt & Scheer 2008). Eläinkokeet kuten ihmistutkimuksetkin ovat todistaneet, että osa hiukkasista pystyy kulkeutumaan keuhkorakkuloihin ja mahdollisesti jopa verenkiertoon. Nämä verenkiertoon päässeet hiukkaset voivat ainakin teoriassa saavuttaa ihmisen jokaisen elimen. (Mayer & 50 co-authors 2008: 18–21.)

2.4.2 Lyhytaikainen altistuminen pakokaasulle

Pakokaasulle altistumisen terveysvaikutuksista on rajallisesti informaatiota saatavilla, sillä terveysvaikutuksia ei ole ehditty vielä tutkimaan kovinkaan paljoa. On kuitenkin tiedossa, että pakokaasulle altistuminen voi aiheuttaa lyhytaikaisia terveyshaittoja, kuten ärsytystä esimerkiksi silmiin tai kurkkuun, pahoinvointia tai yskää. Lyhytaikainen altistuminen pakokaasulle voi aiheuttaa myös jo olemassa olevan sairauden kuten astman pahenemista. (United States environmental protection agency 2002: 1-4–1-5; Madden 2008.)

2.4.3 Pitkäaikainen altistuminen pakokaasulle

Pitkäaikainen altistuminen pakokaasulle voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, syöpää aiheuttamattomiin ja syöpää aiheuttaviin. Pitkäaikaista altistumista ei ole pystytty tutkimaan paljoa ja ainoat testit on tehty eläimille kuten rotille, hiirille, hamstereille ja apinoille. Syöpää aiheuttamaton, pitkäaikainen altistumi-

nen pakokaasulle aiheutti altistumisannoskohtaisia tulehduksia sekä histopatologisia muutoksia koe-eläinten keuhkoissa. (United States environmental protection agency 2002: 1-4-1-5.)

Pitkäaikaisen altistumisen ja keuhkosityövän riskin välillä on löydetty yhteys, ja siksi toista ryhmää kutsutaan syöpää aiheuttavaksi. Tilastollisesti yhteys on löytynyt ihmisistä, jotka ovat työskennelleet dieselmoottorien läheisyydessä. Tosin tilastojen paikkansapitävyys sisältää epävarmuuksia, sillä ei ole tiedossa, kuinka kauan ihmiset ovat altistuneet pakokaasulle. Rotille tehdyissä testeissä keuhkosityöpää ilmaantui ja sen saamisen riski kasvoi, kun rotat altistuivat pakokaasulle. Hiukkasmäärä rottien keuhkoissa oli niin suuri, ettei ihmisillä ole vaaraa altistua suhteessa samaan hiukkasmäärään. Ihmisten keuhkosityöpäriskin kasvamista pidetään kuitenkin merkittävänä, kun ihminen altistuu pitempiaikaisesti pakokaasulle. Väite pitää sisällään kuitenkin olettamuksia ja epävarmuuksia. (United States environmental protection agency 2002: 1-4-1-5.)

3 DIESELMOOTTOREIDEN PÄÄSTÖTEKNIikka

Dieselmoottoareiden pakokaasupäästöjä voidaan vähentää monella eri tavalla riippuen halutusta lopputuloksesta. Päästöjä pystytään pienentämään optimoimalla polttoaineen palamiseen liittyviä parametreja, ja kun se ei riitä, voidaan käyttää pakokaasun jälkikäsitteilylaitteita, jotta tarvittavat päästöjen alenukset saavutetaan. Lisää pakokaasupäästöjen vähentämisestä parametreja optimoimalla on kappaleessa 3.1.

Hapetuskatalysaattorilla voidaan vähentää HC- ja CO-yhdisteitä pakokaasusta. Hapettamalla näitä kahta yhdistettä syntyy vähemmän vaarallisia CO₂- ja H₂O-yhdisteitä. Hapetuskatalysaattoria käytetään myös hapettamaan NO NO₂:ksi, jota puolestaan käytetään hiukkassuodattimen passiiviseen regenerointiin. DOC:sta kerrotaan enemmän kappaleessa 3.3.

Hiukkassuodin eli DPF on kehitetty vähentämään moottorin polttoaineen palamisesta syntyviä hiukkaspäästöjä. DPF kaappaa hiukkaset pakokaasusta fyysisesti suodattimen seinämien sisälle ja pinnalle. Hiukkassuodatin on tehokas puhdistamaan pakokaasua kiinteistä hiukkasista, hyötysuhde voi olla jopa yli 90 %. Hiukkassuodattimesta on lisää kappaleessa 3.2 ja luvussa 5.

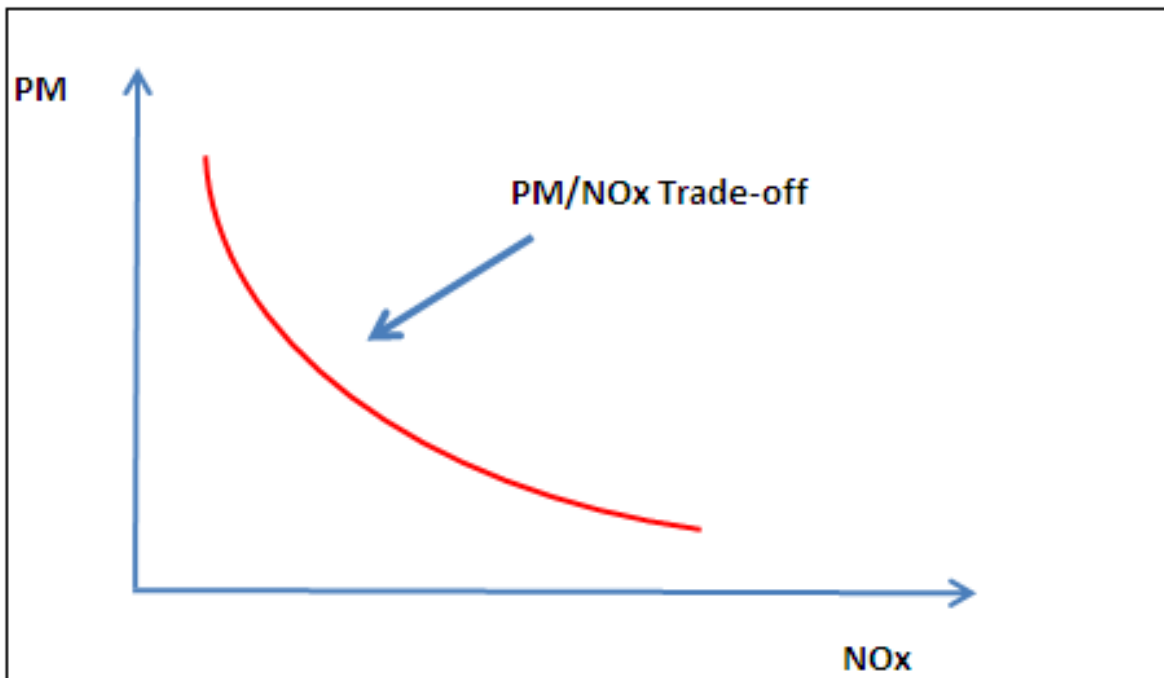
NO_x-päästöjen vähentämiseksi on kehitetty erilaisia jälkikäsitteilylaitteita, kuten SCR, DeNO_x-katalysaattori ja NO_x-adsorptiokatalysaattori. SCR-katalysaattorissa käytetään ureaa tai ammoniakia, jotka katalyyttien kanssa reagoidessaan vähentävät NO_x-päästöjä. DeNO_x käyttää hiilivetyjä NO_x-päästöjen vähentämiseen. NO_x-adsorptio kerää NO_x-päästöjä laitteen pinnoit-

teen pinnalle ja nämä regeneroidaan pois muutamien minuuttien välein rikkaal-la ilma-polttoaine seoksella. (Majewski & Khair 2006: 405–407.)

3.1 Päästöjen vähentäminen moottorisuunnittelulla

Päästöjä pystytään hallitsemaan hyvin pitkälle pelkällä moottorisuunnittelulla ja palamisprosessin parametreja optimoimalla. Näihin parametreihin kuuluvat mm. polttoaine-ilma seos, ruiskutus (reikien lukumäärä, ajoitus, paine, alku- ja jälkiruiskutus), EGR, venttiilien lukumäärä ja palotilan muotoilu (Niemi 2012). Kaikilla näillä keinoilla on mahdollista vähentää haluttua päästöä, mutta usein parametrin muuttaminen alentaa toista päästöä mutta nostaa toista. Näillä pa-rametreilla on usein myös optimi, eli päästöjen laskiessa jotain parametria muuttamalla alkaa tietyn rajan jälkeen vaikutus olla päinvastainen eli päästöt nousevat.

PM- ja NO_x -päästöjen vähentämistä pyritään hallitsemaan vähentämällä niiden muodostumista. Mikäli palamisprosessi suunnitellaan PM-päästöille sopivaksi eli hiukkaspäästöjä syntyy mahdollisimman vähän, syntyy puolestaan NO_x -päästöjä enemmän. Tämä ilmiö tapahtuu myös toisin päin. Ilmiötä kutsutaan nimellä trade-off, eli kun toista päästöä pyritään vähentämään niin toinen pääs-tö kasvaa. Esimerkiksi NO_x -päästöjä voidaan vähentää lisäämällä EGR:n mää-rää ja jälkiruiskutusta, mutta nämä puolestaan lisäävät hiukkasten syntymistä (Van Setten ym. 2001). Kuviossa 13 on havainnollistettu PM/ NO_x -suhteen tra-de-off -ilmiötä.



Kuvio 13 Hiukkaspäästöjen ja typenoksidien trade-off -ilmiö.

3.1.1 NO_x-päästöjen vähentäminen

NO_x-päästöjä pystytään vähentämään moottorisuunnittelulla monella eri keinolla, kuten ajamalla laihemmalla polttoaine-ilma -seoksella, ruiskutusparametreja säätämällä, EGR:llä, palotilan muotoilulla, ruiskutuksen ajoittamisella, Miller-ajoituksella, veden syöttämisellä palotilaan, ruiskuttamalla vettä imuilmaan tai veden sekoittamisella polttoaineen sekaan. Päämäärä kaikilla näillä keinoilla on palamisen lämpötilan laskeminen, koska typenoksidit syntyvät korkeissa lämpötiloissa. (Niemi 2012.)

Veden lisääminen dieselmoottorin palotapahtumaan on tunnettu NO_x-päästöjen vähentäjä. Vettä pidetään rikkovana voimana sylinterin seinämille muodostuvalle öljypinnalle, mutta tämä pätee ainoastaan nestemäiselle vedelle. Mikäli vesihöyryä on palotilassa liikaa, voi osa siitä kondensoitua nestemäiseksi

ja jopa rikkihapoksi, jotka puolestaan aiheuttavat korroosiota. Palotilassa vesi pudottaa palamistapahtuman lämpötilaa, mikä on avain NO_x-päästöjen vähentämiseen. (Majewski & Khair 2006: 317–321.)

3.1.2 Hiukkaspäästöjen vähentäminen

PM-päästöjen vähentäminen dieselmootoreissa tapahtuu NO_x-päästöjen vähentämisen tavoin monella eri keinolla, kuten polttoaine-ilma -seoksen tehokkaampi muodostuminen, suuri ilmaylimäärä, ruiskutusparametrien optimointi (ajoitus, paine, alku- ja jälkiruiskutus), pakokaasun takaisin kierrättämisen rajoittaminen ja polttoaineen laatu (matala rikki-, tuhka- ja aromaattisten aineiden pitoisuus, korkea happimäärä palotilassa). (Niemi 2012.)

Maricq (2007) kertoo artikkelissaan, että hiukkaspäästöjen syntymiseen vaikuttaa moottorin nopeus, kuorma, EGR ja turboahtaminen. Hiukkaspäästöt pyrkivät lisääntymään, mitä enemmän on kuormaa. Turboahtaminen edistää polttoaineen ja ilman sekoittumista ja siten myös hiukkaspäästöjen vähentymistä. Kun seos on hyvin sekoittunut, se palaa paremmin eikä synny hiukkasia epätäydellisestä palamisesta. (Majewski & Khair 2006: 273–281.)

Öljyä pidetään merkittävänä hiukkaspäästöjen lähteenä, sillä se sisältää rikkiä ja usein myös paljon tuhkaa. Rikki puolestaan aiheuttaa hiukkaspäästöjä usein DPF:n jälkeen pakokaasun jäähtyessä. Näin ollen öljyn kulutuksen seuraaminen ja hallitseminen auttaa hiukkaspäästöjen vähentämisessä. Jotta saavutetaan vähäinen öljyn kulutus, pitää öljyä hallita kolmella tavalla:

- Sylinterin seinämissä.
 - Männät
 - Männänrenkaat
- Imu- ja pakojärjestelmissä.
 - Venttiileiden tiivisteet
 - Turbon tiivisteet
- Öljyn koostumuksen kautta.

(Majewski & Khair 2006: 284–286.)

Tärkein öljyn kulutuksen kannalta näistä kolmesta ovat sylinterin seinämät, joiden kautta voiteluöljyä pääsee siirtymään palotilaan. Männänrenkaat ja männät voivat olla liian väljiä, jolloin pieniä määriä öljyä voi päästä palotilaan. Toiseksi tärkein ovat imu- ja pakojärjestelmät, joihin öljyä pääsee lähinnä venttiileiden tiivisteiden kautta. (Majewski & Khair 2006: 284–286).

Hiukkaspäästöjä pystytään vähentämään myös käyttämällä biodieseliä polttoaineena. Lapuerta, Armas & Rodríguez-Fernández (2008) kertovat artikkelissaan, että on tehty monia tutkimuksia, joissa eri biodieseleiden käyttö on vähentänyt hiukkaspäästöjen syntymistä. Heidän mukaansa hiukkasmäärä pakokaasussa vähenee sitä enemmän, mitä enemmän polttoaineessa on biodieseliä. Jopa noin 50 % vähennys hiukkaspäästöissä on mahdollista kun käytetään 100 % biodieseliä.

3.2 Hiukkassuodatin

Hiukkassuodatin on kehitetty vähentämään pakokaasun hiukkaspäästöjä. Hiukkassuodattimen tarkoitus on ottaa hiukkaset kiinni fyysisesti huokoisen materiaalin seinämän sisään tai seinämän pinnalle päästään kuitenkin pakokaasun kulkemaan suodattimen läpi. Hiukkassuodattimia on kahta eri mallia, wall-flow ja flow-through. Wall-flow -mallin suodatin on suosituin ja käytetyin suodatinmalli, jossa pakokaasu pakotetaan suodattimen seinämän läpi ja suodatin kerää hiukkaset huokoisen seinämän sisään. Flow-through -mallissa pakokaasu kulkee suodattimen läpi ilman seinämän läpi kulkeutumista ja hiukkaset jäävät tällöin seinämän pinnalle kiinni. Hiukkassuodattimesta kerrotaan enemmän luvussa 5.

3.3 Hapetuskatalysaattori

Hapetuskatalysaattorin (DOC = Diesel Oxidation Catalysat) tehtävänä on hapettaa pakokaasussa olevia yhdisteitä. DOC kehitettiin vähentämään CO- ja HC-päästöjä, mutta nykyään sitä käytetään lähinnä luomaan paremmat olosuhteet DPF:lle ja SCR:lle (Hauff, Tuttlies, Eigenberger & Nieken 2012). Hapetuskatalysaattori onkin erittäin tehokas CO- ja HC-päästöjen vähentäjä, mikäli pakokaasun lämpötila on riittävän korkea ja katalysaattori on päällystetty jalometalilla (esim. platina). SOF-yhdisteiden eli liukenevien orgaanisten yhdisteiden hapettaminen auttaa vähentämään hiukkaspäästöjä. Riippuen SOF-yhdisteiden sisällöstä, hiukkaspäästöjen vähennys liikkuu yleensä välillä 15–30 %. (Majewski & Khair 2006: 404–408; Xinqun, Dou & Winsor 2010; Liu ym. 2011.)

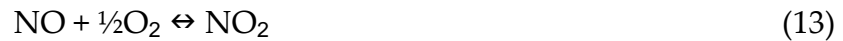
DOC:ssa tapahtuu reaktioita lähes kaikkien yhdisteiden kanssa, joita sinne pakokaasun mukana kulkeutuu. CO- ja HC-päästöjen vähennys tapahtuu hapetuskatalysaattorissa hapettamalla hiilivedyt ja niiden johdannaiset hiilidioksidiksi ja vedeksi (9) sekä hiilimonoksidi hiilidioksidiksi (10). Koska hiilidioksidia ja vesihöyryä pidetään harmittomina, pakokaasut puhdistuvat. (Majewski & Khair 2006: 404–408; Xinqun, Dou & Winsor 2010.)



Hapetuskatalysaattori voi tuottaa myös haitallisia yhdisteitä, jotka voivat olla haitaksi katalyyteille sekä mahdollisesti ympäristölle. Rikkidioksidi hapettuu DOC:ssa rikkitrioksidiksi kaavan 11 mukaisesti ja tämä voi puolestaan tietyissä olosuhteissa reagoida veden kanssa siten, että yhdisteestä tulee rikkihappoa kaavan 12. (Majewski 2012.)

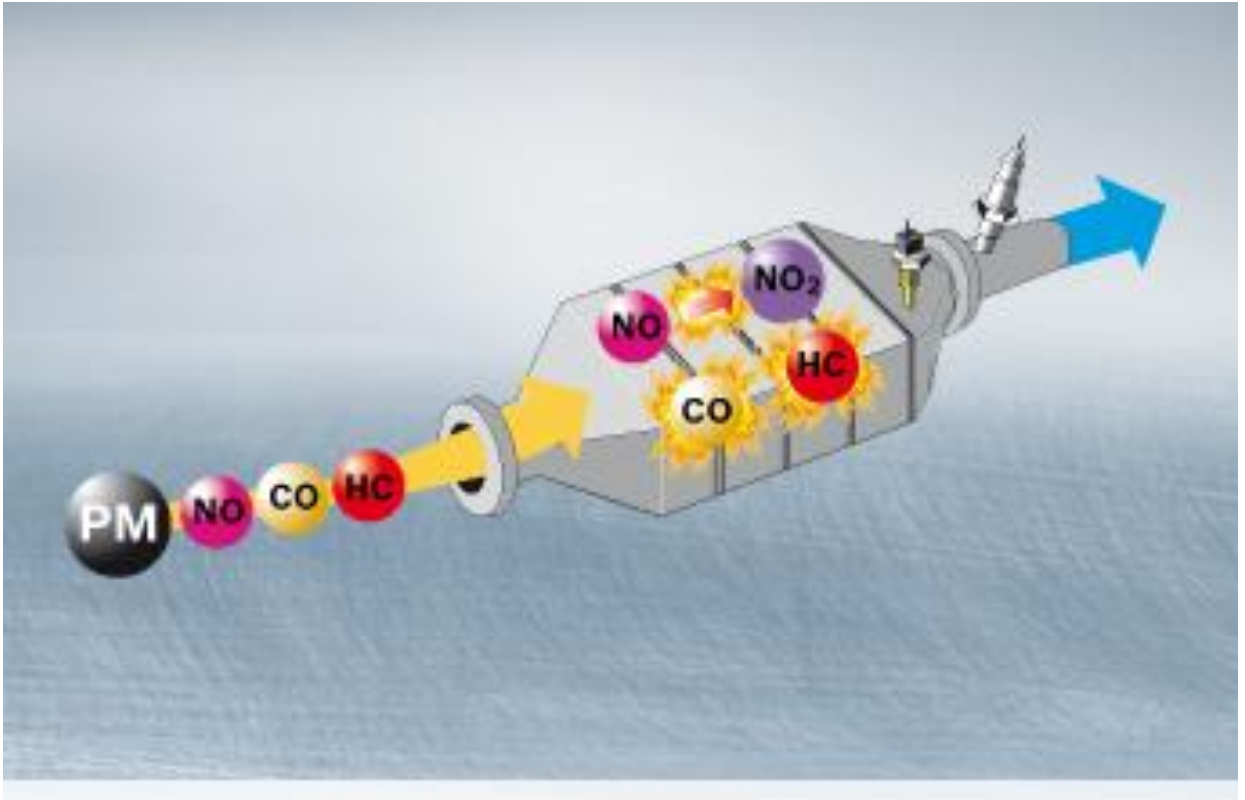


NO:n hapettumista NO₂:ksi pidetään yleisesti haitallisena reaktiona (13), sillä NO₂ on paljon myrkyllisempää kuin NO. Tämä aiheuttaa ongelmia yleensä kaivoksissa ja tunnelityömailla, jossa ilma ei pääse kiertämään kunnolla. Toisaalta NO₂ on erinomainen hapetin hiukkasille hiukkassuodatinta regeneroitaessa. NO₂:a on pakokaasussa noin 5 % - 15 % ja DOC voi parhaimmillansa lisätä tätä osuutta jopa arvoon 50 % (Liu, Ge, Tan, He, Shah, Ding, Yu & Zhao 2011). (Majewski & Khair 2006: 404–408.)



Kuviossa 14 on kuvattu hapetuskatalysaattorissa tapahtuvia reaktioita. DOC:in sisälle kulkeutuu pakokaasun mukana PM-, NO-, CO- ja HC-päästöjä ja ulos tulee pääasiassa NO₂-, CO₂-, H₂O-päästöjä. Mikäli polttoaineessa on rikkiä tai öljyä pääsee palotilaan, kulkeutuu DOC:iin myös SO₂:ta, mikä voi hapettua SO₃:ksi ja olosuhteiden ollessa oikeat muodostaa H₂SO₄:ää eli rikkihappoa. Rikkihappo puolestaan on erittäin vaarallista ja syövyttävää ainetta, joka voi tehdä tuhojaan hapetuskatalysaattorissa.

Mehring, Elsner, Bächli & Kröcher (2012) toisaalta kertovat artikkelissaan, että polttoaineen tai öljyn palamisen kautta syntyvä rikkihappo voi myös edistää DPF:ään kerääntyneiden nokihiukkasten hapettumista NO₂ avulla alemmissa lämpötiloissa (>150 °C), mikäli rikkihapon pitoisuus pakokaasussa on tarpeeksi suuri (>1ppm). Tämä taas auttaa DPF:n passiivista regenerointia, sillä pakokaasun lämpötilan ei tarvitsisi nousta kovinkaan korkealle. Rikkihapon vaikutusta DPF:n toimintaan kannattaisi tutkia enemmän miettien, olisiko rikkihapon käyttö edes mahdollista regeneroinnin lämpötilan alentamiseen jatkuvassa käytössä.



Kuvio 14 Hapetuskatalysaattorin toimintaperiaate (Robert Bosch GmbH 2012).

4 PAKOKAASUPÄÄSTÖJEN MITTAAMINEN

Jos päästöjä ei pystyittäisi mittaamaan tarkasti, ei niitä voisi säädellä laeilla, kontrolloida eikä määrittää. Monet mittaustekniikat ovat standardisoituja, jotta eri paikoissa mitatut tulokset olisivat vertailukelpoisia. Dieselpäästöjen mittaus voidaan jakaa laboratorio- ja kenttätesteihin. Laboratoriotesteissä tehdään lähinnä emissiotutkimuksia, tutkitaan lain säädöksiä ja kehitetään emissiojärjestelmiä. Kenttätesteihin kuuluvat liikkuvat emissiotestauslaboratoriot, emissioiden mittaaminen liikkuvassa autossa, emissioiden etävalvonta, tutkimus- ja kunnossapito-ohjelmat, paikalliset emissioiden terveystvaikutusten mittaamiset sekä emissioapulaitteiden huolto. (Majewski & Burtscher 2011.)

Laboratoriotestilaitteet ovat yleensä erittäin monimutkaisia ja kehittyneitä järjestelmiä, jotta niillä saadaan mahdollisimman tarkat ja toistettavat tulokset. Koska emissioiden mittaus on standardisoitua, pitää tulokset pystyä toistamaan eri mittauskerralla. Tämän takia tutkimuksissa on tärkeää mainita millaisilla mittalaitteilla ja olosuhteilla tutkimuksen tulokset on saatu. Yhdisteitä emissiomittauksessa mitataan massana. Mitattavia yhdisteitä ovat HC, CO, NO_x ja PM. Uusissa emissiomääräyksissä tier 5 ja stage 5 tulevat mahdollisesti rajoittamaan näiden suureiden lisäksi myös hiukkaslukumäärää (PN). Monissa laboratorioissa pystytään mittaamaan myös emissioita, joita ei säädellä millään lakipykälillä. Nykyään tutkitaan paljon hiukkaspäästöjä keskittyen niiden lukumäärään, massaan ja kokojakaumaan. Hiukkaspäästöt määritelläänkin niiden mittaustavan perusteella, sillä ne koostuvat monista eri yhdisteistä. (Majewski & Burtscher 2011.)



Kuvio 15 Liikuteltava emissiomittausjärjestelmä PEMS (Sensors inc.).

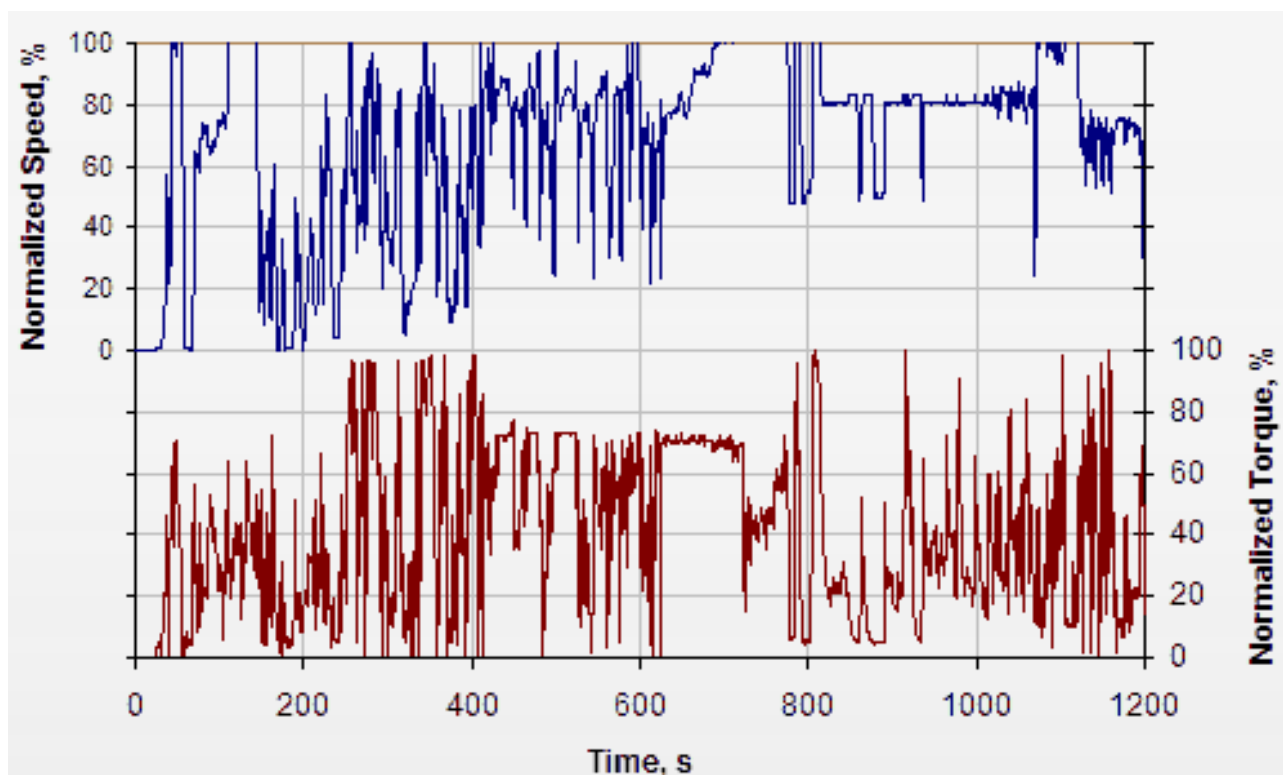
Nykyään saadaan ajoneuvoon liitettävästä mittalaitteistosta laboratoriotason mittaustuloksia. Tällainen liikuteltava emissiomittausjärjestelmä (PEMS = portable emission measurement system) on nähtävissä kuviossa 15. PEMS pystyy tuottamaan tuloksia perustuen päästöjen määrään kuljettua matkaa kohti tai päästöjen määrään mekaaniseen energiaan nähden ja näiden yksiköt ovat g/km sekä g/kWh. PEMS:ä voidaan käyttää uusien ja vanhojen ajoneuvojen pakokaasupäästöjen mittaamiseen, sen auttaen mm. jälkikäsitteilylaitteiden kehittämistä. (Majewski & Burtscher 2011.)

4.1 Emissiotestisyklit

Emissiomittauksia varten pitää laboratorioissa olla sopivat olosuhteet, jotka on mahdollista toteuttaa uudestaan. Mittaustulokset ovat tällöin toistettavia ja luotettavia. Aina kun tarvitaan tarkkoja ja vertailtavia tuloksia, tehdään moottorille emissiotestisyklejä moottori- tai ajoneuvodynamometrissä. Dynamometrin tarkoitus on kuormittaa moottoria halutulla tavalla. (Majewski & Burtscher 2011.)

Emissiotestisyklit pitävät sisällään nopeuden ja kuorman sekvenssejä, jotka toteutetaan dynamometrillä. Testisyklit jaetaan kahteen eri ryhmään, vakiotilan sykliin ja vaihteleva sykliin. Vakiotilan syklissä moottorin nopeus ja kuorma ovat vakiot ajettaessa haluttuja pisteitä. Vaihtelevassa syklissä nopeus ja kuorma vaihtelevat sisältäen kiihdytyksiä ja jarrutuksia esimerkiksi kuvion 16 mukaisesti. Non-road -moottoreille on kehitetty NRTC eli non-road transient cycle, jonka tarkoituksena on kuvata moottoria työajossa. NRTC on kuvattuna kuviossa 16 (Majewski & Khair 2006: 210–214.)

Emissiotestisykliin tarkoituksena on olla mahdollisimman lähellä oikeita ajotapoja. Tällöin saadaan mahdollisimman tarkka kuva pakokaasupäästöistä. Koska on paljon erilaisia ajotapoja, yritetään testisyklejä kehittää jatkuvasti lisää. Näille uusille testisykleille ei ole kehitetty mitään määräävää lakia, joten eri testien tuloksia ei usein pysty vertailemaan. Tuloksien vertailemattomuuteen vaikuttaa myös se, etteivät eri maat ole yksimielisiä testaustavoista. (Majewski & Khair 2006: 176–177.)



Kuvio 16 Vaihteleva emissiotestisykli NRTC (Ecopoint inc. 2004).

4.2 Näytteenotto ja mittaaminen

Pakokaasujen ja pakokaasuhiukkasten mittaaminen sisältää näytteenoton sekä niiden analysoinnin. Mittaamisessa käytetään laimennettua ja laimentamatonta pakokaasua. Laimennetussa pakokaasussa lämpötila saadaan putoamaan mitta-laitteelle sopivammaksi syöttämällä pakokaasuun yleensä ilmaa ennen näytteenottoa. Pakokaasun laimentaminen vähentää myös epävakaiden yhdisteiden kondensoitumista. Mikäli mittaamisessa käytetään pakokaasua jota ei ole laimennettu ilmalla, voi mittaukseen tulla epätarkkuutta ja näytteenottohäviöitä. (Majewski & Burtscher 2011.)

Kun otetaan näytteitä kaasumaisesta aineesta, pitää varmistaa, ettei mitään reaktioita tapahdu mittausputkissa. Tämän takia mittalaitteissa pitää käyttää kaasun kanssa reagoimatonta materiaalia. Hiukkaspäästöjen mittaamisessa pitää olosuhteet pystyä pitämään kurissa tai mieluiten vakioina, jotta pystytään välttämään hiukkasten muodostumista ja kondensoitumista. (Burtscher & Majewski 2012.03.)

Yleisimmin käytetyt kaasujen mittaustavat ovat leviämätön infrapunamittaus hiilimonoksidille ja -dioksidille (NDIR), liekki-ionisaatioilmaisoin hiilivedyille (FID), kemiluminesenssimenetelmä typen oksideille ja paramagneettinen menetelmä hapelle. Hiukkasmassaa mitataan mittaamalla massan lisääntyminen näytteenottosuodattimessa eli suorittamalla gravimetrinen analyysi. Hiukkasmäärää mitataan kondensaatiohiukkaslaskurilla. (Majewski & Khair 2006; Sappok, Parks II & Prikhodko 2010.)

NDIR-mittaus perustuu analysoitavan kaasun absorptioon havaitsemiseen tietyillä aallonpituuksilla. Havaitseminen tapahtuu infrapunasäteen avulla, joka kohdistetaan tunnistusvastaanottimeen. Analysoitava kaasu absorboi infrapunasädettä tietyillä aallonpituuksilla. Vaikkakin NDIR-analysointia voidaan käyttää moniin yli kahta alkuainetta sisältäviin yhdisteisiin, käytetään sitä lähinnä CO:n ja CO₂:n mittaamiseen (Majewski & Khair 2006: 180). (Rubio, Santander, Fonseca, Sabaté, Gràcia, Cané, Udina & Marco 2007.)

Liekki-ionisaatioilmaisinta käytetään hiilivetyjen tunnistamiseen. Tunnistaminen tapahtuu syöttämällä pakokaasu FID:n sisään, jossa palaa vetyliekki. Hiilivedyt tuottavat palaessaan ioneja ja nämä ionit tunnistetaan metallikerääjällä, jossa on korkea tasajännite. Jännitteen määrä kerääjässä vaihtelee hiilivetyjen

tuottamien ionien mukaan ja tästä määritellään hiilivetyjen määrä pakokaasussa. (Cambustion 2012.)

NO_x-päästöjä mitataan kemiluminesenssimenetelmällä, joka on yleisin typenoksidien mittaustapa. Kemiluminesenssimenetelmässä NO reagoi otsonin kanssa tuottaen NO₂:a ja on täten virittyneessä tilassa synnyttäen kemiallisen reaktion kautta valoa. Pieni osa näistä virittäytyneessä tilassa olevista molekyyleistä luovuttaa valoa, eli luovuttaa fotonin, ja kun tämä valon määrä mitataan, voidaan määrittää NO_x-päästöjen määrä. (Brand-Gaus 2004.)

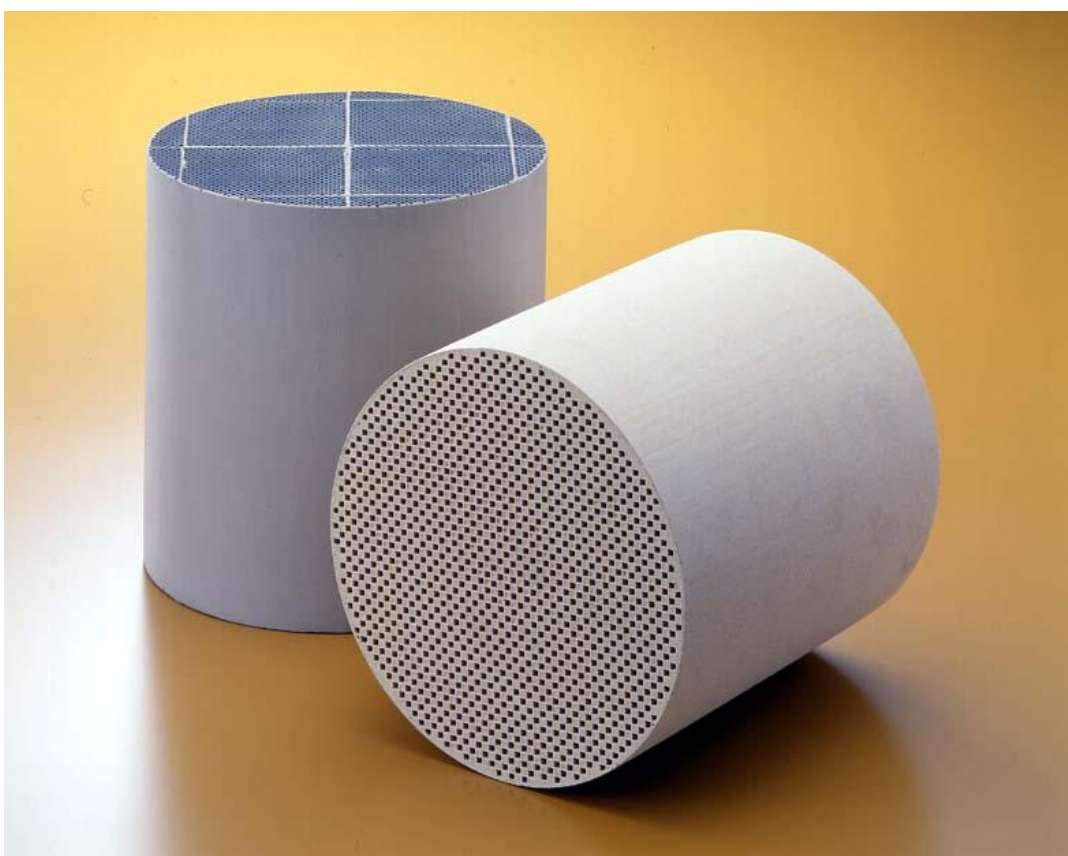
Happi ja typen oksidit sisältävät paramagneettisia ominaisuuksia. Paramagneettinen kaasu luo magneettikentän läpi kulkiessaan voiman suoraan kohti kasvavaa magneettikenttää. Tämä magneettikentän voiman kasvu voidaankin mitata monella eri tapaa ja tämän kautta pystytään määrittelemään hapen määrä pakokaasussa. (Majewski & Khair 2006: 181.)

Hiukkasmassaa mitataan gravimetrisellä analyysillä, jossa hiukkasten kerääntyminen näytteenotto-suodattimeen punnitaan. Tässä mittaustavassa ei selviä hiukkasten koko eikä määrä ja lisäksi tulosten saaminen keräämisestä kestää jonkin aikaa, sillä näytettä ei pystytä punnitsemaan paikallaan (Majewski & Khair 2006: 182–183). Hiukkasmassaa on mahdollista mitata myös termisen massa-analyysaattorin avulla. Tässä tavassa hiukkasmassa saadaan selville analysoimalla hiilidioksidin muodostuminen hiukkasnäytteestä, kun näyte lämmitetään happivirtauksessa, jolloin kaikki hiili palaa hiilidioksidiksi (Burtscher, Majewski & Khalek 2012).

Hiukkasmäärän mittaamiseen käytetään eniten kondensaatio-hiukkaslaskuria (CPC = condensated particle counter). CPC:ssä pakokaasu kyllästetään aluksi alkoholikaasulla, jonka jälkeen kyllästetty pakokaasu jäähdytetään ja se muuttuu ylikyllästetyksi. Tällöin pakokaasusta kondensoituu hiukkasia, jotka havaitaan optisesti. (Burtscher & Majewski 2012.01.)

5 HIUKKASSUODATIN

Hiukkassuodatin on kehitetty vähentämään dieselajoneuvojen hiukkaspäästöjä. DPF kerää hiukkaset fyysisesti ja estää niiden pääsyn ilmakehään. Hiukkassuodatin on tällä hetkellä tehokkain keino vähentää hiukkaspäästöjä dieselmoottoreiden emissioista. Suodatin voi kuitenkin suodatustyyppistä ja suodatinmallista riippuen olla vähemmän tehokas tai jopa tehoton hallittaessa ei-kiinteitä hiukkasia, kuten liukenevia orgaanisia osuuksia eli SOF:a tai sulfaattihiukkasia (Majewski & Khair 2006: 459–462). Kuviossa 17 on kuvattuna hiukkassuodattimen rakenne, pystyssä olevan materiaalina on silikonikarbidi ja kyljellään olevan materiaali on kordieriitti.



Kuvio 17 Hiukkassuodattimen rakenne (Ngk insulators, ltd 2001).

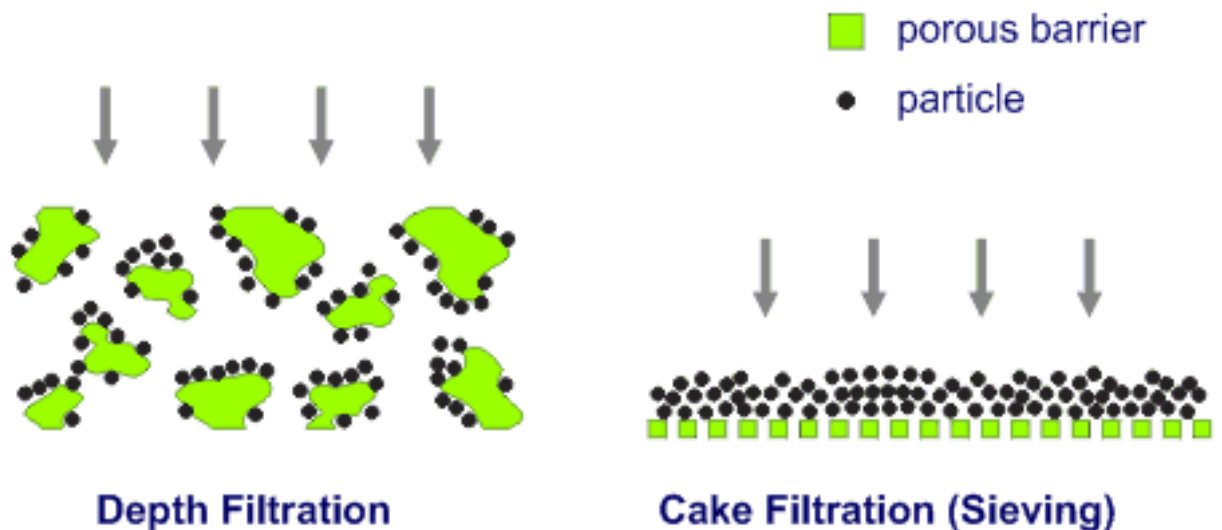
Suodattimia on toimintaperiaatteeltaan erilaisia, kuten wall-flow ja flow-trough, näistä on kerrottu enemmän kappaleissa 5.1.2 ja 5.1.3. Hiukkassuodattimella päästään yleensä 70–95 % hyötysuhteeseen riippuen suodattimen mallista, materiaalista ja pinnoitteista. Hiilihiukkaset jäävät suodattimeen 95–99,9 % varmuudella ja hyötysuhdetta laskee SOF sekä sulfaattiosuus, joiden suodattaminen on ongelmallista. Aiheesta kerrotaan tarkemmin kappaleissa 4.1.3 ja 4.1.4. (Majewski & Khair 2006: 462–464.)

Suodattimeen kerääntyvän noen maksimitäyttöaste riippuu pakokaasuvirtauksesta ja suodattimen nokijakaumasta. Heikolla virtauksella ja huonolla noen jakautumisella suodattimeen voi tämä raja olla noin 3 g/l. Mikäli taas suodatin regeneroidaan hitaasti ja käytetään ulkoista lämmitystä, voi suodattimen täyttöaste olla 10–12 g/l. (Amberla 2012.)

5.1 Toiminta

Hiukkassuodattimen toimintaperiaatteena on saada pakokaasussa olevat hiukkaset kasaantumaan suodattimen pinnalle. Pakokaasu kulkee yleensä suodattimen huokoisen seinämän läpi tai läheltä seinämää, johon hiukkaset jäävät kiinni. Suodatustapoja on kahdenlaisia, pintatyypistä suodatusta ja syvyys-suodatusta. Pintatyypisessä suodatuksessa suodatin kerää hiukkaset seinämän pinnalle, sillä materiaalin huokoisuus on pienempää kuin hiukkasten kokoluokka. Hiukkaset muodostavat kerrostuman (soot cake) suodattimen seinämän pinnalle. Pintasuodatuksessa (cake filtration) kerrostunut noki eli soot cake muodostaa oman suodatuskerroksensa ja tehostaa näin ollen hiukkasten ke-

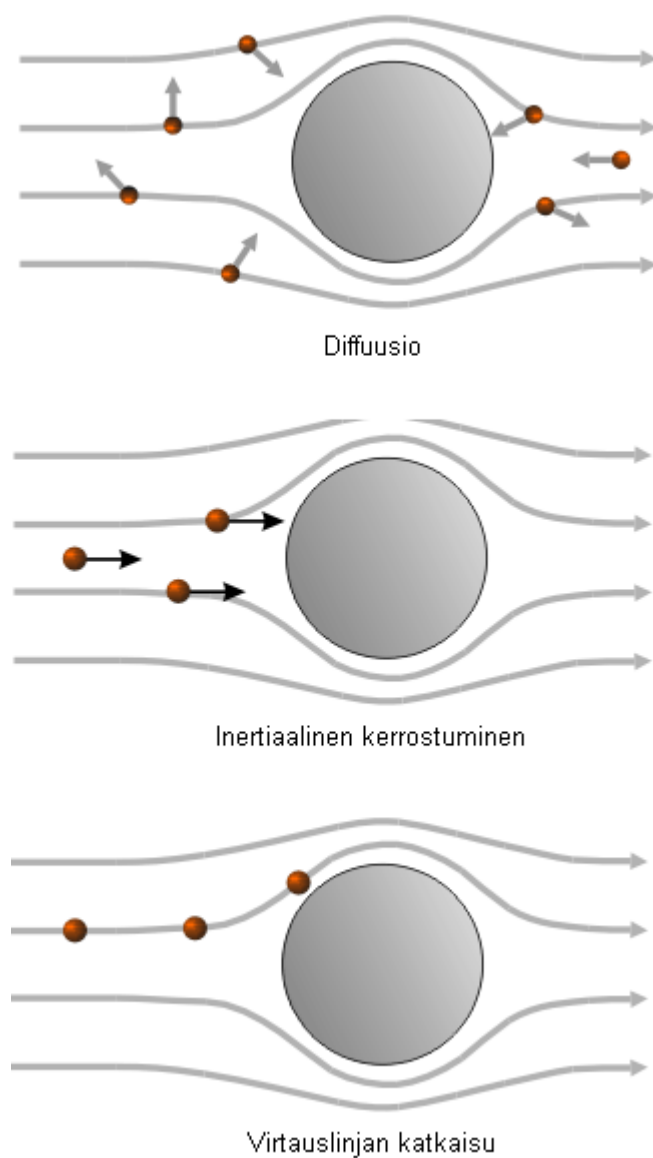
rääntymistä. Jo pienikin hiukkaskerrostuma suodattimen seinämälle voi aiheuttaa suurta vastapainetta, riippuen suodattimen seinämän huokoisuudesta (Konstandopoulos & Papaioannou 2008). Syvyysuodatuksessa (depth filtration) materiaalin huokoisuus on suurempaa kuin hiukkasten kokoluokka, mutta materiaalia on kerroksittain, jolloin hiukkaset jäävät kiinni suodattimen seinämään. Kuvio 18 selkeyttää näiden kahden suodatinmallin toimintaa. (Majewski & Khair 2006: 459–462; Betarice, Di Iorio, Guido & Napolitano 2012.)



Kuvio 18 Syvyysuodatuksen ja pintasuodatuksen toimintaperiaate (Majewski 2011).

Syvyysuodatusmalli on yleisin ja se perustuu hiukkasten kerrostumisen kolmeen mekanismiin, joita ovat diffuusio, inertiaalinen kerrostuminen ja virtauslinjan katkaisu. Nämä mekanismit ovat kuvattuna kuviossa 19. Harmaa ympyrä kuvastaa suodattimen kuitua, jonka ympäri pakokaasut kulkevat virtaviivojen mukaisesti ja punaiset ympyrät kuvastavat pakokaasussa sijaitsevia hiukkasia. $PM_{0,3}$ hiukkaset kiinnittyvät kuituun diffuusiolla, sillä alle $0,3 \mu m$ hiukkaset eivät juuri liiku virtaviivojen mukaisesti. Kun hiukkaskoko kasvaa, muuttuu hiukkasten kiinnittyminen inertiaaliseen kerrostumiseen, sillä isommat hiukkaset jatkavat matkaansa kaasussa suoraan inertian vuoksi ja törmäävät hiuk-

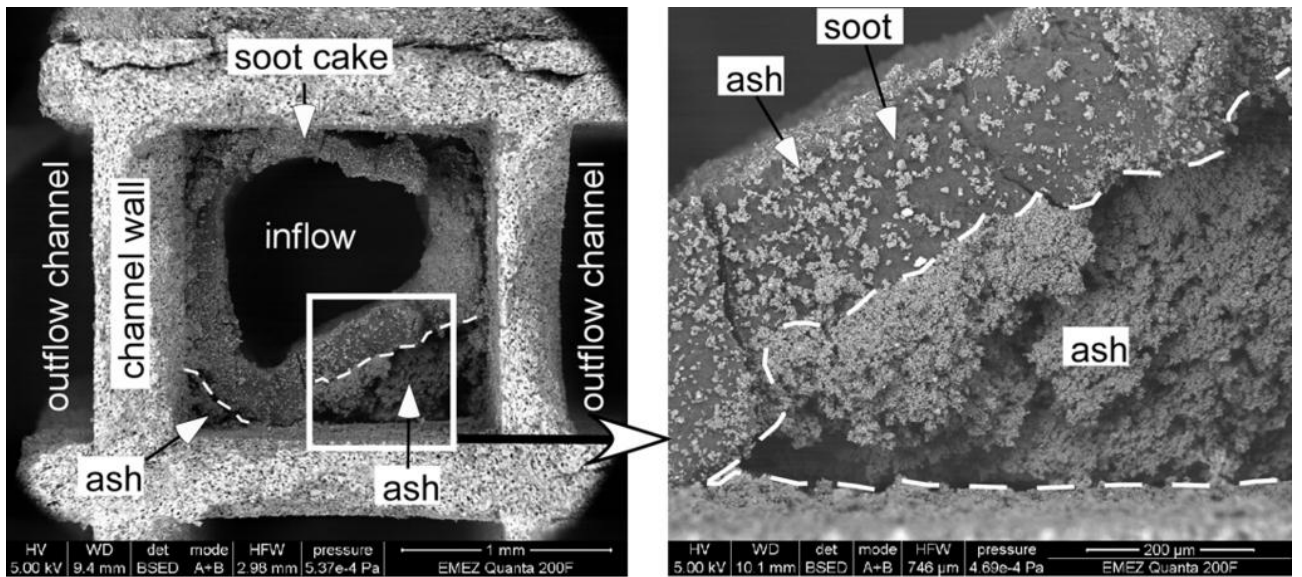
kasia keräävään materiaan. Kuviossa 19 alimpana on virtauslinjan katkaisu, jossa hiukkanen kulkee virtaviivan mukaisesti, mutta liian läheltä keräävää materiaa, jolloin se voi koskettaa kuitua ja kiinnittyä siihen. (Majewski 2011; Van Setten & ym. 2001.)



Kuvio 19 Syvyysuodatuksen kolme mekanismia aerosolin kerrostumiselle, muokattu (Majewski 2011).

Suodattimeen voi jäädä hiiliperäisten hiukkasten lisäksi myös metallioksidipartikkeleita, joita kulkeutuu pakokaasun mukana. Metallioksidipartikkelit syntyvät moottorin metalliosien kulumisen seurauksena eivätkä ne pala polttoaineen palamisprosessissa. Palamattomuuden takia ne eivät myöskään poistu suodattimesta regeneroinnin aikana. Mikäli lämpötila regeneroinnissa nousee tarpeeksi korkeaksi ja partikkeleita on tarpeeksi, voivat metallioksidipartikkelit sintrautua eli saavuttaa kiinteän rakenteen. Partikkelit voivat jopa sulaa osittain suodattimeen. Suodattimen osittaista sulamista voi aiheuttaa lämpötilojen noustessa hiilipohjaisten hiukkasten sintraantuminen ja kiinnittyminen suodattimen seinämiin. Tällöin osittaista sulamista tapahtuu alemmissa lämpötiloissa kuin metallioksidien tapauksessa. (Johnson 2007: 167–170.)

Hiukkassuodattimen hyötysuhde voi heikentyä, mikäli SOF ja sulfaattiosuutta on pakokaasussa paljon. Hiukkassuodatin ei tällöin pysty käsittelemään niitä, koska ne ovat kaasumaisessa muodossa, kuten kappaleessa 2.2.2. on selitetty. Lämpötilan laskiessa tarpeeksi alas hiukkassuodattimen jälkeen, SOF ja sulfaattiosuus muuttuvat kaasumaisesta nestemäiseksi ja aiheuttavat hiukkaspäästöjä. Mitä korkeampi on suodattimen lämpötila, sitä enemmän SOF:ia ja sulfaattiosuutta pääsee suodattimen läpi kaasumaisena. (Majewski & Khair 2006: 462–464.)



Kuvio 20 DPF kanavan suurenus ja noen/tuhkan kerääntyminen (Dimopoulos 2008).

Kuviossa 20 on kuvattuna noen (soot) ja tuhkan (ash) kerääntymistä hiukkas-suodattimen kanavaan. Kuvioista on nähtävissä noen muodostama nokikerrostuma sekä tuhkaa, joka on kerääntynyt noen alle. Noki palaa regeneroinnissa pois, mutta tuhka jää suodattimen seinämille.

5.1.1 Vastapaine

Vastapaine syntyy moottorille, kun moottorin pakokaasulinjaan asennetaan pakokaasun jälkikäsittelylaitteita. Myös jo pelkkä putkisto aiheuttaa vastapainetta moottoriin. Vastapaine nousee tasaisesti, kun DPF kerää hiukkasia. Mitä enemmän suodatin kerää hiukkasia, sitä enemmän syntyy vastapainetta, sillä pakokaasun kulkeminen suodattimen läpi vaikeutuu suodattimen seinämille kerääntyneen nokikerrostuman vuoksi (Sappok, Parks II & Prikhodko 2010; Xinqun, Dou & Winsor 2010).

Uusimpien tutkimusten mukaan vastapaineen kasvaminen hiukkassuodattimeen kerääntyneen noen takia aiheuttaa polttoaineen kulutuksen kasvamista 1,5–2 %. Vastapainetta alentamalla ja pyrkimällä pitämään se optimaalisissa suhteissa, voidaan polttoaineen kulutuksessa säästää 0,4–2 %. Kun DPF:ää regeneroidaan aktiivisesti käyttämällä polttoaineen jälkiruiskutusta, voi polttoaineen kulutus lisääntyä 2–5 %. (Sappok, Parks II & Prikhodko 2010.)

5.1.2 Hiukkasmassan ja -määrän hallinta

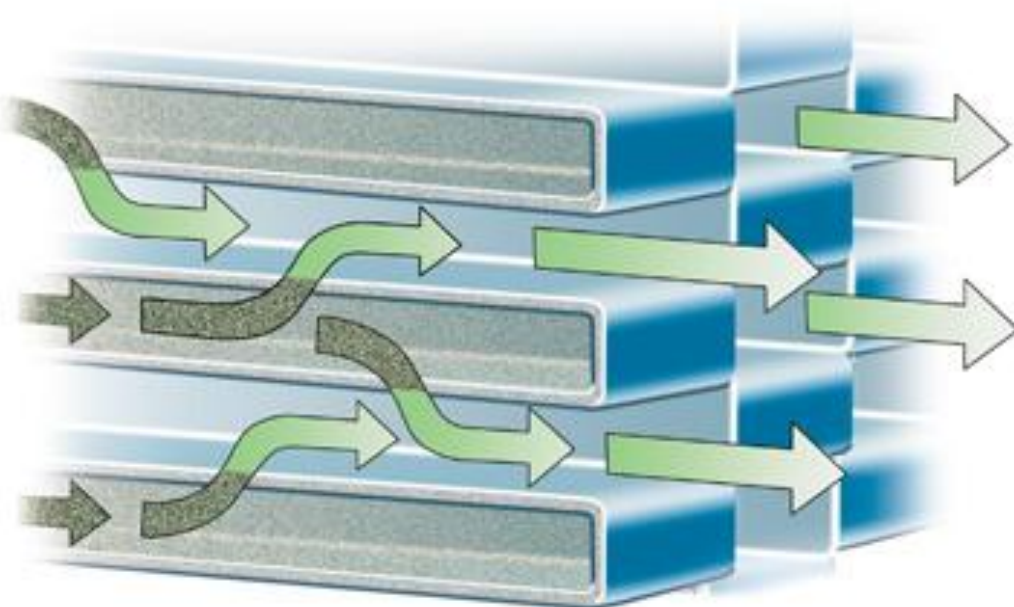
PM-päästöt sisältävät hiukkasmassaa ja hiukkasmäärää. Hiukkasmassa on pääasiassa kiinteitä hiukkasia, kuten epäorgaaninen hiili ja tuhka. Hiukkaspäästöjen kiinteän osuuden vähentämisessä DPF onkin erittäin tehokas ja sillä päästään 95–99,9 % tehokkuuteen. Suodattimen hyötysuhdetta laskevat kuitenkin SOF ja sulfaattihiukkaset, joiden hallitsemiseen hiukkassuodatin voi olla jopa tehoton. (Majewski & Khair 2006: 462–464.)

Suurin osa PM-päästöjen massasta koostuu kiinteästä materiasta, kun taas PM-päästöjen hiukkasmäärä koostuu lähinnä nestemäisestä materiasta, joka sisältää huomattavan osan päästöjen nanohiukkasista. Nestemäinen materia sisältää sulfaatteja ja SOF:ia, joten se muodostaa hiukkaspäästöjä kappaleen 2.2.2. mukaisesti usein DPF:n jälkeen, kun pakokaasun lämpötila putoaa tarpeeksi alas. DPF on tämän takia tehoton vähentämään nanohiukkasten ja hiukkasten määrää pakokaasussa. Itse asiassa DPF, hiilihiukkasia kiinni ottaessaan, vähentää materiaalia, johon nanohiukkaset voisivat kiinnittyä muodostaen näin suurempia kokonaisuuksia. DPF siis vähentää kiinteiden kasaantuneiden hiukkasten määrää ja korvaa niitä nestemäisillä nanohiukkasilla. (Majewski 2011.)

Hiukkasmäärä riippuu osittain sulfaattihiukkasista, joita syntyy kun käytetään rikkiä sisältävää polttoainetta ja pakokaasun lämpötila on tarpeeksi korkea. DPF on tehoton sulfaattihiukkasten vähentämiseen, kun suodattimen lämpötila on korkea ja sulfaattihiukkasten muodostuminen tapahtuukin DPF:n jälkeen. Mitä korkeampi on polttoaineen rikkipitoisuus, sitä enemmän muodostuu sulfaattihiukkasia DPF:n jälkeen. Suodattimen katalyytti voi muodostaa sulfaattihiukkasia reagoidessaan rikkipitoisen pakokaasun kanssa. (Majewski 2011.)

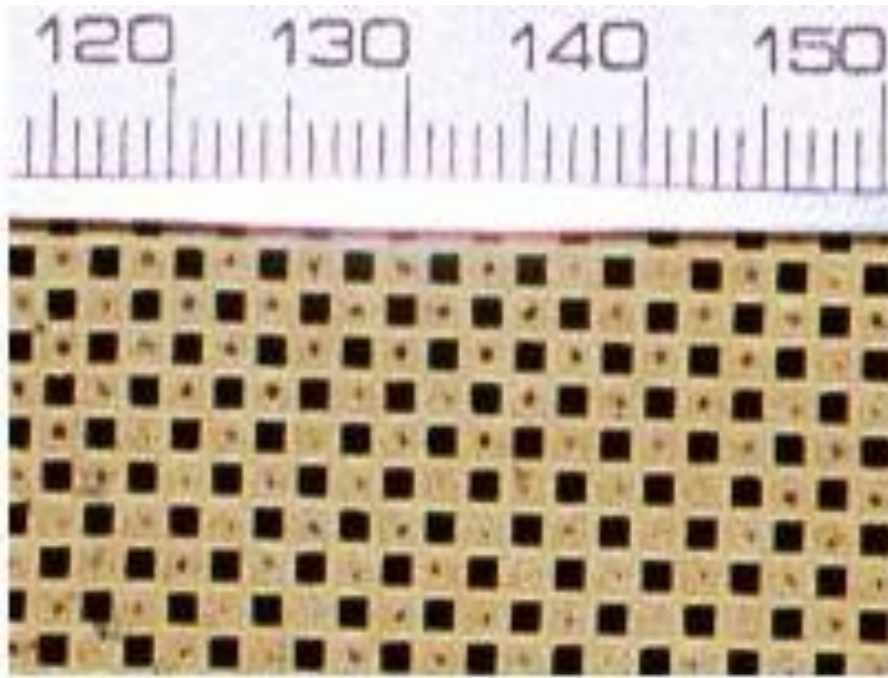
5.1.3 Wall-flow

Wall-flow -suodattimet ovat yleisimmin käytetty ja arvostetuin suodatinmalli sen hyvän suodatustehon takia, sen suodatustehokkuus on 70–95 %. Monoliittimalliset suodattimet koostuvat monista kanavista, jotka ovat yhdensuuntaisia ja yleensä neliön mallisia. Suodatin muistuttaa flow-through -mallin suodatinta, mutta sen kanavien joka toinen pää on tukittu. Tästä syntyy hiukkasten suodatamista edistävä kuvio, joka on nähtävissä kuviossa 22. Kuvioista 21 nähdään, että wall-flow -suodattimen periaatteena on moottorista tulevan pakokaasuvirran pakottaminen suodattimen seinämien läpi, jolloin hiukkaset jäävät suodattimen huokoiseen pintaan kiinni. (Majewski & Khair 2006: 477–479; Van Poppel & Lenaers 2005.)



Kuvio 21 Wall-flow -mallinen suodatin (Blackthorn, 2012).

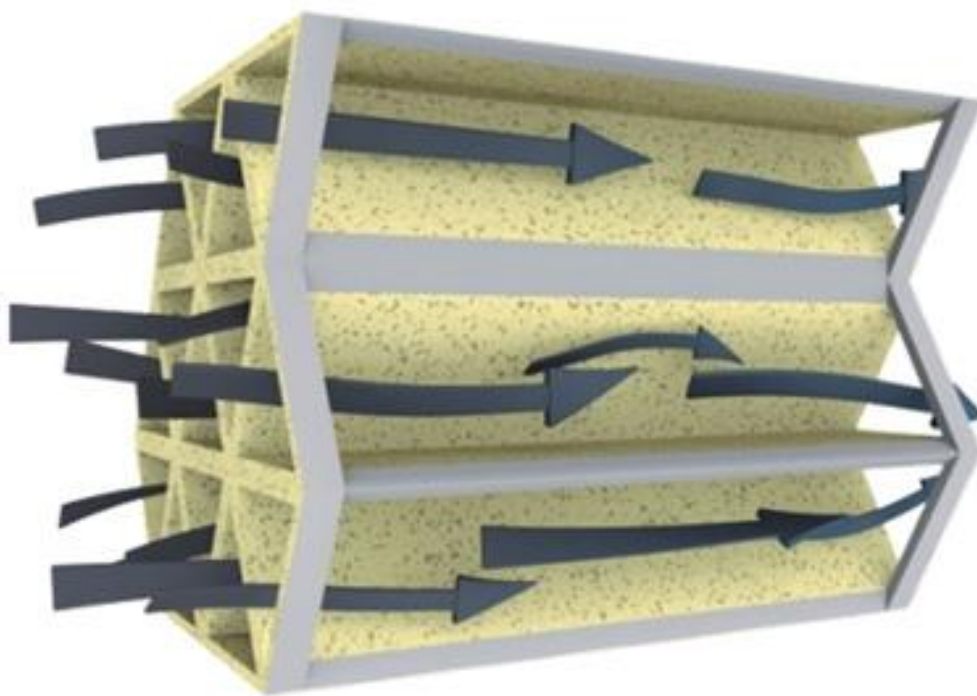
Wall-flow -suodattimia valmistetaan yleensä pyöreän malliseksi, mutta myös ovaaleja on mahdollista tehdä. Suodatusmekanismina wall-flow käyttää yhdistettyä pinta- ja syvyysuodatusta. Hiukkaset kiinnittyvät siis alkuun seinämien sisään ja kun hiukkasia kertyy enemmän alkaa suodatus muistuttamaan enemmän pintasuodatusta. Puhtaassa suodattimessa syvyysuodatus on pääasiallinen suodatusmekanismi ja kun suodatin täyttyy hiukkasista, tulee pintasuodatuksesta pääasiallinen mekanismi. Lisää suodattimen materiaaleista on kappaleessa 5.2. (Majewski & Khair 2006: 477–479.)



Kuvio 22 Wall-flow -mallin suodattimen kanavien koko (Majewski 2011).

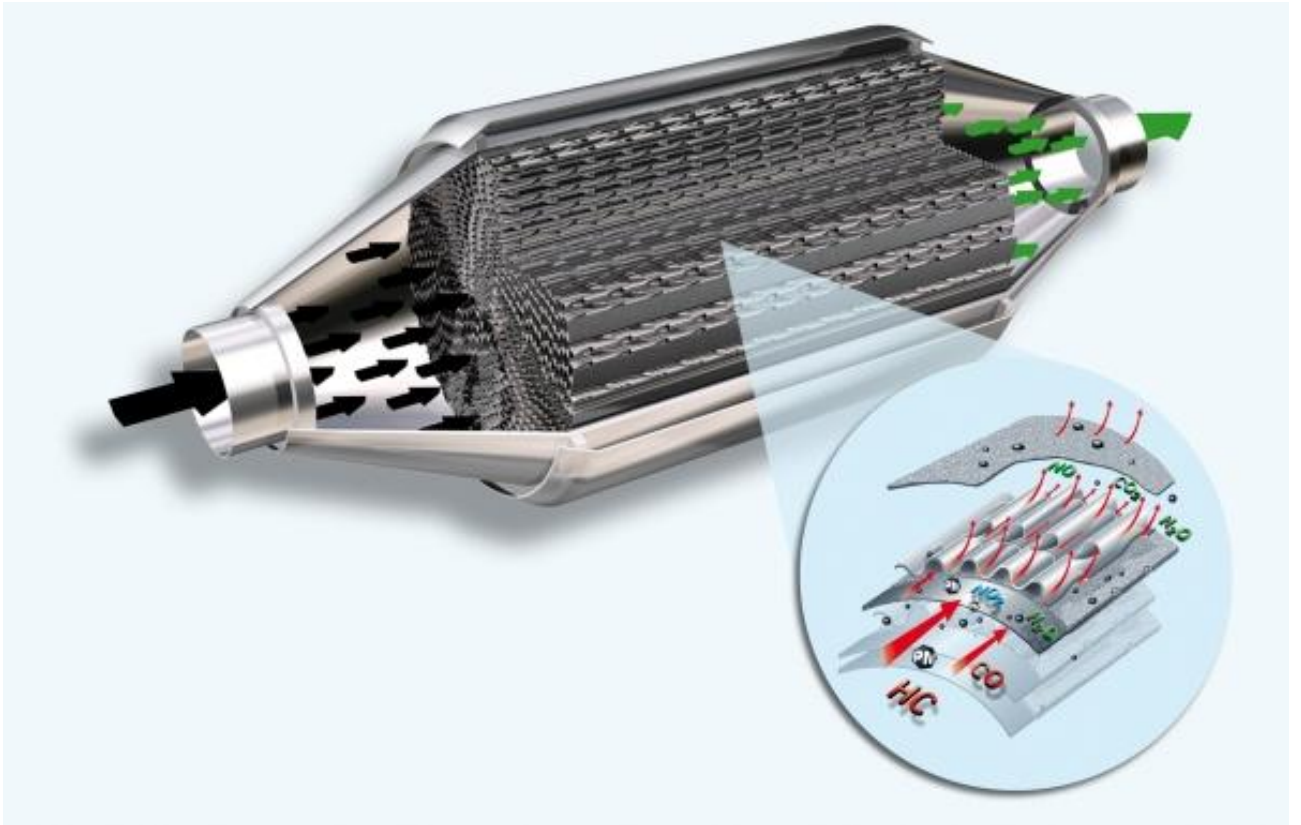
5.1.4 Flow-through ja partial-flow

Kuviossa 23 nähtävä flow-through -suodatinmalli on yksinkertaisempi kuin wall-flow -suodatin, sillä pakokaasu kulkee vain suodattimessa olevien kanavien läpi ja hiukkaset jäävät kiinni huokoiseen seinämään. Flow-through -suodatin on suodatusteholtaan huomattavasti heikompi kuin wall-flow -suodatin. Toisaalta Flow-through -mallin suodattimen tukkeutumisvaara on paljon pienempi kuin wall-flow -suodattimen, sillä pakokaasu ei joudu virtaamaan seinämien läpi. Flow-through -suodattimella päästään 40–60% suodatustehoon (Huss Group 2010).



Kuvio 23 Flow-through -suodatin (Huss Group 2010).

Partial-flow -suodattimessa toimintaperiaate on erittäin lähellä flow-through -suodatinta. Partial-flow -suodatin koostuu kanavista joissa on reikiä ylä- ja alapuolella vuorovälein. Pakokaasu kulkeutuu kanavien läpi ohjautuen reikien läpi, mikäli reikien ylä- tai alapuolella oleva suodatin materiaali ei ole tukkeutunut hiukkasista. Mikäli suodatinmateriaali on tukkeutunut, etsii pakokaasu seuraavan reiän, josta voi kulkea. Kuviossa 24 on kuvattuna partial-flow -suodattimen toimintaa. Suodatusteholtaan partial-flow -suodatin on heikko verrattuna wall-flow -suodattimeen, mutta partial-flow -suodatin ei tukkeudu, siinä olevien kanavien takia. Mikäli kaikki suodatinmateriaali on tukossa, kulkeutuu pakokaasu suodattimen läpi, eikä juuri mitään suodatu. Suodatin puhdistetaan regeneroimalla kuten muutkin suodattimet.



Kuvio 24 Partial-flow -suodatin (Emitec).

5.2 Materiaalit

DPF:n tehokkuus riippuu paljon käytetystä materiaalista, joillakin materiaaleilla saavutetaan jopa yli 90 % suodatusteho ja siedettävät mekaanisten rasitusten sekä lämpörasitusten kestot. (Majewski & Khair 2006: 459–462.)

Hiukkassuodattimen materiaalia suunniteltaessa pitää materiaalilta vaatia seuraavia asioita:

- Mahdollisimman korkea noen keräämiskapasiteetti
- Lämpötilapiikit jopa 1400 °C:ta materiaalin keston kannalta
- Korkeat termomekaaniset rasitukset

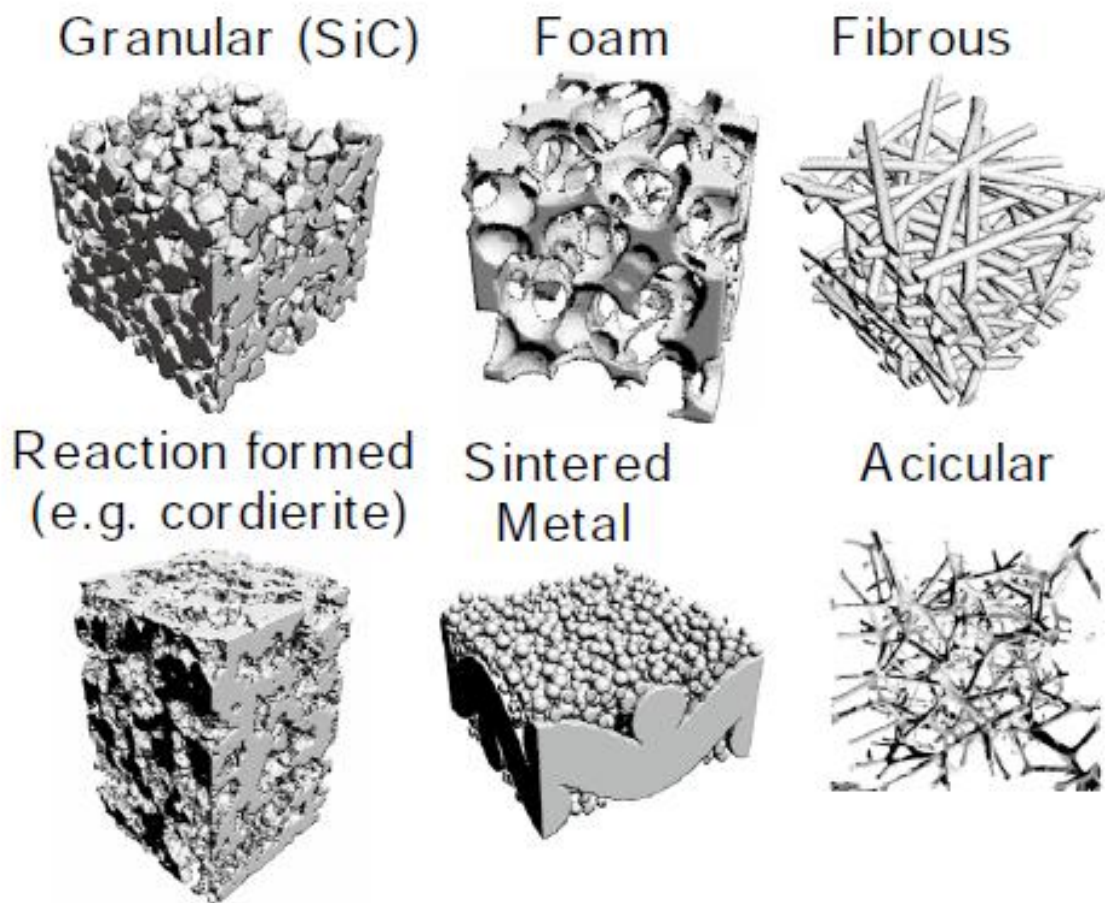
- Hiukkasmassan ja -määrän hyvä suodatus
- Kemiallinen stabiliteetti: resistiivisyys rikkiyhdisteille, hapettumisresistiivisyys, mahdollisimman pieni reagointi tuhkeyhdisteiden kanssa
- Mahdollisimman pieni painehäviö
- Hyvä yhteensopivuus eri regenerointitapojen kanssa
- Mahdollisimman pitkä käyttöikä ja kestävyys moottoriin nähden
- Mahdollisimman pieni koko ja helppo sijoitettavuus
- Mahdollisimman halpa hinta

(Mayer & 50 co-authors 2008: 26-27.)

Hiukkassuodattimien materiaalit altistuvat erittäin kovalle lämpötiloille ja nopeille lämpötilamuutoksille riippuen regenerointitavasta. Noen epätasainen kasaantuminen suodattimeen aiheuttaa regeneroinnissa termistä kuormitusta johonkin kohtaan suodatinta enemmän kuin toiseen. Korkea lämpötila ja termien kuormitus ovat monissa tapauksissa vastuussa suodattimen tehon heikentymisestä tai jopa sulamisesta. Suodatinmateriaalin reaktiivisuus tuhkan kanssa on myös tärkeä näkökohta suodattimen kestävyteen. Metallioksidit voiteluöljystä ja muista lähteistä muodostavat tuhkaa, joka voi reagoida kemiallisesti ja syövyttää suodatinta. (Majewski & Khair 2006: 473–477.)

Suodatinmateriaalin valinnassa pitää löytää käyttötarkoitukseen sopiva materiaali, sillä jonkin ominaisuuden parantaminen heikentää yleensä toista ominaisuutta. Jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä suodatus, pitäisi materiaalin olla mahdollisimman tiivistä. Kun taas materiaali on huokoista, saavutetaan pieni painehäviö. Pakokaasun ollessa mahdollisimman kuumaa, saavutetaan hyvä suodatus, mutta viileämpi pakokaasu puolestaan aiheuttaa pienen painehäviön. (Mayer & 50 co-authors 2008: 28–29.)

Kuviossa 25 on havainnollistettu DPF:ssä käytettävien materiaalien rakenteita. Kuten huomataan, ovat eri materiaalit rakenteeltaan täysin erilaisia toisiinsa verrattuna. Toiset ovat erittäin huokoisia ja toiset hieman vähemmän. Kaikki nämä materiaalit ovat kuitenkin huokoisia, joten hiukkaset jäävät seinämän sisälle ja pinnalle kiinni.



Kuvio 25 Tietokonemallinnus DPF:ssä käytettävistä materiaalien huokoisuusrakenteista (Konsandopulos & Papaioannou 2008).

5.2.1 Keraaminen wall-flow -monoliitti

Keraaminen wall-flow -monoliitti on yleisin materiaali hiukkassuodattimissa, sillä sitä on tutkittu, mainostettu ja käytetty erilaisissa projekteissa eniten. Wall-flow -monoliitti tehdään kordieriitista tai piikarbidista, joiden materiaalin rakenne on nähtävissä kuvion 30 vasemmassa reunassa. Kordieriitti lämpölaajenee erittäin vähän ja on tämän takia erittäin kestävä vaihtelevissa lämpötiloissa. Kordieriitilla on erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja se kestää lämpötiloja jopa 1200 °C asti. Piikarbidi kestää lämpöä enemmän, jopa 1800 °C, mutta sen haittapuolena on kallis hinta ja suurempi lämpölaajeneminen. (ECOpoint inc. 2003.)

Wall-flow -monoliitti voidaan päällystää katalyytillä regeneroinnin tehostamiseksi. Wall-flow -monoliitilla päästään jopa yli 90 % suodatustehoon. Monoliitin haittapuoli on nopea vastapaineen nousu, sillä hiukkasia kerääntyy tehokkaasti suodattimeen ja tämä voi johtaa suodattimen tukkeutumiseen. Suodattimet pitää suunnitella siten, että regeneroinnista mahdollisesti syntyvät lämpötilapiikit voidaan eliminoida, koska tämä voi pahimmillaan sulattaa koko wall-flow -monoliitin. (Majewski & Khair 2006: 474.)

5.2.2 Keraaminen kuitu

Suodattimien materiaalina käytetään erilaisia korkeita lämpötiloja kestäviä keraamisia kuituja. Keraamista kuitua käytetään suodattimissa ohuina, paperia muistuttavina arkkeina. Keraamista kuitua on myös mahdollista käyttää jatkuvana kuituna metallisen rungon päällä. Kuvioista 30 yläriviltä oikeasta reunasta

on nähtävissä kuitusuodattimen huokoisuuden rakenne. Keraamista kuitua sisältävässä suodattimessa käytetään yleensä aktiivista regenerointia, sillä passiivinen regenerointi ei sovi kovin hyvin keraamiselle kuidulle. Keraaminen kuitu materiaalina käyttää syvyysuodatusta hiukkasten kiinniottamiseen. (ECOpaint inc. 2003.)

5.2.3 Keraaminen vaaho

Keraaminen vaaho on kiinteää ja sisältää isoja ympyrämäisiä reikiä, joiden halkaisija on 250–500 µm. Kuvion 30 ylärivin keskeltä on havaittavissa vaahdon huokoisuusrakenne. Polyuretaanivaahtoon lisätään keraamista lisäainetta ja sen jälkeen se kalsinoidaan, jotta polyuretaani hajoaa ja keraaminen jäykkä koostumus säästyy. Materiaali voidaan tehdä joko piikarbidista tai kordieriitista. Keraamisella vaahdolla päästään noin 60 – 70 % hyötysuhteeseen, koska materiaalin noen varastoimiskyky on pieni, johtuen suuresta huokoisuudesta. Tämän vuoksi keraamista vaahtoa käytettäessä tarvitsee suodattimen koko olla suuri, jotta päästään hyvin hyötysuhteisiin. (ECOpaint inc. 2003.)

5.2.4 Metallikuitu

Metallikuitusuodattimet tehdään metallivillasta, metallitaljasta tai metallilangasta tehdystä verkosta. Kuvioista 30 ylärivin oikeasta reunasta on nähtävissä metallikuitumateriaalin huokoisuusrakenne. Metallikuitusuodatin on erittäin kestävä erilaisille regeneraatiotavoille, mutta haittapuolena on pyrkimys pollyttää suodattimeen kerrostunutta nokea. (Majewski & Khair 2006: 476.)

5.2.5 Sintrattu metalli

Sintratulla metallipulverilla on erittäin hyvä hiukkasten suodatuskyky. Sintratettu metallisuodatin perustuu metallilangasta tehtyyn verkkoon, joka on päällystetty lisäaineilla täytetyllä metallipulverilla. Tämän jälkeen materiaali sintrataan ja materiaali saavuttaa kiinteän koostumuksen. Kuviosta 30 alhaalta keskeltä on havaittavissa sintratun metallin huokoisuusrakenne. Yuranov, Kiwi-Minsker ja Renken (2002) kertovat artikkelissaan, että sintrattu metalli on kemiallisesti ja mekaanisesti vakaa ja sillä on korkea terminen johtavuus. He kertovat myös artikkelissaan materiaalin hyvänä puolena olevan kyky suodattaa hiukkasia ja kaasumaisia saasteita. Hyvänä puolena sintratulla metallilla on myös sen muotoiltavuus, mutta huonona puolena on sen suuri paino. (Majewski & Khair 2006: 476.)

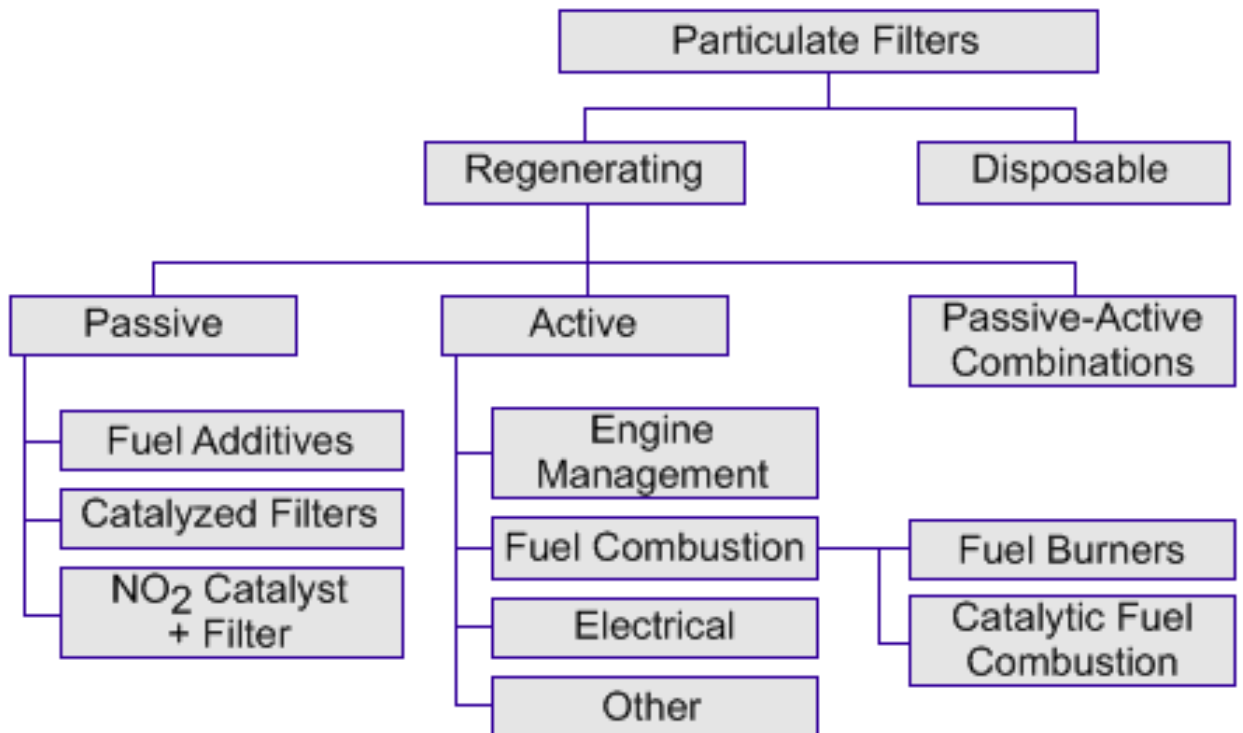
5.2.6 Poimuinen paperi

Paperisuodattimia käytetään lähinnä kertakäyttöisinä suodattimina. Paperisuodattimilla päästään erittäin hyvään hyötysuhteeseen, lähes 100 %, mutta pakokaasun pitää olla jäähdytettyä ennen kulkeutumistaan suodattimeen. Mikäli pakokaasua ei jäähdytetä, voi suodatin syttyä tuleen noen kasautuessa suodattimeen. Myös paperin mekaaninen kestävyys on heikko. Poimuista paperia käytetään suodattimen materiaalina ajoneuvoissa, jotka ovat räjähtävissä tiloissa. (ECOpoint inc. 2003.)

5.3 DPF:n regenerointi

Dieselmoottorissa syntyvien hiukkasten tiheys on yleensä hieman alle $0,1 \text{ g/cm}^3$ ja tämän takia DPF voi kerätä huomattavia määriä nokea pienessä ajassa. On tutkittu, että rekka tai linja-auto voi kerätä useita grammoja litraa kohti nokea suodattimeen päivän aikana. Hiukkasten kerääntyminen johtuu kuitenkin moottorin savutuksesta. Mitä suurempaa savutus on, sitä nopeammin suodatin täyttyy. Noen kerääntyminen aiheuttaa suodattimen tukkeutumista ja se johtaa vastapaineen kasvamiseen, joka puolestaan voi johtaa moottorin toiminnan heikentymiseen. Noen kerääntymisen vuoksi pitää suodatinta puhdistaa aika ajoin. (Majewski & Khair 2006: 459–462.)

DPF:n regeneroinnilla tarkoitetaan hiukkassuodattimen puhdistamista polttamalla suodattimeen kerääntynyt noki ja muut hiukkaset. Beatrice ym. (2012) kertovat artikkelissaan, että DPF:n läpi pääsevien hiukkasten lukumäärä ja massa lisääntyvät hetkellisesti regeneroinnin aikana, sillä suodattimen hyötysuhde heikkenee hetkellisesti. Noen polttamiseen voidaan käyttää hapettimena happea (O_2) tai typpidioksidia (NO_2). Happi tarvitsee korkeamman lämpötilan ja typpidioksidi puolestaan huomattavasti alhaisemman lämpötilan noen polttamiseen. Regenerointitapoja on kolme: aktiivinen, passiivinen ja passiiviaktiivinen. Aktiivisessa regeneroinnissa noen ja muiden hiukkasten polttaminen käynnistetään erillisellä tapahtumalla ja passiivisessa regeneroinnissa hiukkasten ja noen polttaminen tapahtuu koko ajan kemiallisilla reaktioilla. Passiiviaktiivisessa -regeneroinnissa yhdistellään molempia regenerointitapoja. Kuviossa 26 on kuvattuna hiukkassuodattimen regenerointitapoja ja nähdään, että on mahdollista myös käyttää kertakäyttöisiä suodattimia.



Kuvio 26 Hiukkassuodattimen regenerointitavat (ECOpaint inc. 2005).

DPF:n regeneroinnissa käytetään katalyyttejä, jotka auttavat pakokaasun reagoimista DPF:ssä. Katalyyttejä voidaan käyttää kahdella eri tavalla: toinen on pinnoittaa DPF katalyytillä ja toinen on lisätä katalyyttiä polttoaineeseen. Mikäli käytetään pinnoitusta, ei polttoaineessa saisi olla rikkiä (S) enempää kuin 150 ppm, jotta katalyytin tehokkuus säilyy. Polttoaineeseen lisättävä katalyytti puolestaan lisää palotapahtumassa syntyvää tuhkaa. (Jiang, Ning, Yao, Zi ja Liu 2011.)

Jatkuvasti regeneroituva hiukkassuodatin (CRT) tarkoittaa DPF:n ja DOC:n yhdistelmää, jossa DOC on sijoitettu ennen DPF:ä. DOC hapettaa pakokaasussa olevan NO:n NO₂:ksi, kun pakokaasu kulkee DOC:n läpi. Tämä laskee regeneroinnin tapahtumislämpötilaa 600 °C:sta n. 250–300 °C:een. Teoriassa pa-

kokaasun NO_x/PM -suhde pitää olla 8:1, jotta regenerointi tapahtuu tehokkaasti. Todellisuudessa NO_x/PM -suhteen pitää olla mahdollisimman suuri, jopa yli 15:1, jotta regenerointi tapahtuu mahdollisimman tehokkaasti (Jiang ym. 2011.)

Mikäli suodattimeen on kerääntynyt liian paljon nokea ennen kuin regenerointi alkaa, voi tämä johtaa suodattimen hajoamiseen tai sulamiseen, koska lämpötilat nousevat liian suuriksi regeneroinnin aikana. Suodattimen ylitäyttymisen vaaran vuoksi vastapaineen kasvamisen seuraaminen on erittäin tärkeää. Vastapaineen kasvamisesta pystytään päättämään suodattimeen kerääntyneen noen määrä. Aktiivisessa regeneroinnissa suodattimen ylitäyttymisen vaara on pienempi sillä regenerointi voidaan käynnistää, mikäli vastapaine ei ole tietyssä ajassa noussut tarpeeksi korkealle. Noen määrä suodattimessa määritteleeekin optimaalisimmat olosuhteet regeneroinnin alkamiselle. (Beatrice ym. 2012; Sappok, Parks II & Prikhodko 2010.)

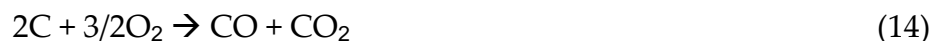
Rautaoksidishiukkaset pyrkivät asettumaan mahdollisimman kauas hiukkas-suodattimen sisääntulosta niiden liikemäärän takia. Koska suurin osa rautaoksidishiukkasista kasaantuu suodattimen toiseen päähän, voi regenerointi aiheuttaa erittäin suuri paikallisia lämpötiloja. Rautaoksidishiukkaset eivät pala regeneroinnissa ja näin ollen voivat sulattaa osan suodattimesta, kuten kuviossa 27. (Johnson 2007: 167–170.)



Kuvio 27 Osa sulanutta DPF suodatinta (Espino 2009).

5.3.1 Aktiivinen regenerointi

Aktiivisessa regeneroinnissa noen polttamiseen käytetään reaktion 14 tavoin happea ja tällöin pakokaasun lämpötila pitää saada nousemaan noin 600 °C:een, jotta regenerointi on tehokasta. Noen hapettaminen hapen avulla vaatii yli 500 °C:een, jotta hiukkasten hapettaminen alkaa. Beatricen & kumppaneiden (2012) mukaan jälkiruiskutusta käytettäessä aktiivinen regenerointi koostuu kahdesta vaiheesta: matalalämpötila-regeneroinnista ja korkealämpötila-regeneroinnista. Matalalämpötila-regeneroinnissa lämpötila nostetaan jälkiruiskutuksella 600 °C:een ja annetaan tasaantua, jonka jälkeen lämpötila nostetaan korkealämpötila-regeneroinnin 650 °C:een.



Aktiivisessa regeneroinnissa suodattimeen kerääntyneen noen lämpötilaa nostetaan ulkoisen energialähteen avulla. Ajoneuvossa on valmiiksi ulkoisia energialähteitä suodattimeen nähden, kuten polttoaine ja sähkö. Polttoainetta voidaan käyttää aktiivisen regeneroinnin käynnistäjänä käyttämällä jälkiruiskutusta. Tällöin pakokaasujen lämpötilaa nostetaan ruiskuttamalla polttoainetta palotapahtuman loppuvaiheessa. Mahdollista on myös asentaa polttoaineen poltin pakoputkeen ennen suodatinta. Sähköä voidaan puolestaan käyttää monellakin tavalla, kuten lämmittimenä ennen suodatinta, sisään rakennettuna lämmittimenä suodattimessa tai vaikkapa käyttämällä suodattimessa materiaalia, jota voidaan lämmittää itsessään. (ECOpoint inc. 2005.)

Aktiivinen regenerointi käynnistetään erikseen, kun anturit tunnistavat DPF:ssä kasvavan vastapaineen. Vastapaine nousee siksi, että suodatin kerää hiukkasia ja nokea itseensä, eli tukkeutuu. Tällöin pakokaasun kulku suodattimen läpi vaikeutuu ja vastapaine kasvaa. Regeneroinnin ollessa käynnissä anturit tunnistavat laskevan vastapaineen ja pystyvät tunnistamaan koska suodatin on puhdistunut ja regenerointi loppuu (Beatrice ym. 2012).

Aktiivisessa regeneroinnissa voidaan apuna käyttää sähköisiä lisälaitteita, joilla halutut olosuhteet saadaan aikaiseksi. Sähköisiä lisälaitteita on monenlaisia ja niitä voidaan käyttää suodattimen materiaalin lämmittämiseen, pakokaasun lämmittämiseen tai suodattimeen kerääntyneen noen lämmittämiseen. Suodattimen materiaalin lämmittäminen voi olla hyvinkin energiatehokas keino, mikäli materiaalilla on pieni lämpökapasiteetti. Pakokaasun lämmittäminen on käytetyin keino aktiivisessa regeneroinnissa ja se tapahtuu yleensä vastuksilla, jot-

ka lämmittävät pakokaasua ennen hiukkassuodatinta. Noen lämmittäminen suodattimessa onnistuu myös mikroaalloilla. Tässä menetelmässä noki imee mikroaaltoja ja ollessaan magneettikentässä, alkavat ne värisemään ja sen seurauksena kuumenemaan. Kaikilla näillä on tarkoitus saada lämpötila nousemaan tarpeeksi korkealle, jotta aktiivinen regeneroituminen O_2 :n avulla alkaa. (ECOpaint inc. 2002.)

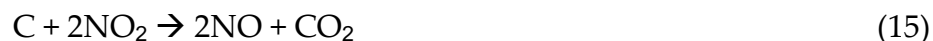
5.3.2 Passiivinen regenerointi

Passiivisessa regeneroinnissa suodattimen puhdistamista tapahtuu automaattisesti lämpötilan noustessa tarpeeksi korkeaksi. Passiivisessa regeneroinnissa käytetäänkin lähes aina hapetuskatalysaattoria eli DOC:ia. DOC:ssa hapetetaan NO :ta NO_2 :ksi, eli se lisää NO_2 :n määrää pakokaasussa, sillä NO_2 on parempi hapetin hiukkasille kuin happi itse. Tällöin suodattimeen kerääntyneen noen kanssa reagoi NO_2 ja regeneroinnin alkamislämpötila putoaa parhaimmillaan jopa $300\text{ }^\circ\text{C}$:een, tämän myötä koko regenerointitapahtuman lämpötila on huomattavasti pienempi, kuin aktiivisessa regeneroinnissa.

Edellä mainittua järjestelmää kutsutaan yleisesti jatkuvasti regeneroituvaksi DPF:ksi (CRDPF = continuously regenerating diesel particulate filter) tai jatkuvasti regeneroituvaksi loukuksi (CRT =continously regenerating trap). Tämä järjestelmä sisältää aina DOC-katalysaattorin, jonka avulla regenerointi hiukkassuodattimessa tapahtuu alhaisemmissa lämpötiloissa. (Liu ym. 2012 ja 2011; Van Poppel & Lenaers 2005.)

Passiivisessa regeneroinnissa tärkeitä parametreja ovat pakokaasun lämpötila, pakokaasun virtausmäärä, NO_x/PM -suhde, NO₂/PM -suhde sekä NO_x- ja NO₂-virtausmäärä suodattimeen. Passiivisen regeneroinnin on tarkoitus tapahtua moottorin normaaleissa käyttöolosuhteissa, jolloin ei tarvita ulkoisia energialähteitä regeneroinnin käynnistämiseksi. Passiivisen regeneroinnin optimoitu käyttö vähentää polttoaineen kulutusta aktiiviseen regenerointiin verrattuna, sillä hiukkassuodattimen regeneroitumiseen ei tarvita lisälaitteita tai jälkiruis- kutusta. (Hutton, Johnson, Naber & Keith 2012.)

Hiukkasten hapettaminen NO₂:n avulla tapahtuu kahden reaktion kautta:



Näistä reaktio 15 on yleisempi ja tähän tulokseen on päästy mittaamalla CO:n määrä pakokaasussa suodattimen jälkeen.

5.3.3 Passiivi-aktiivinen -regenerointi

Passiivi-aktiivinen -regenerointi sisältää molempien regenerointitapojen hyödyt. Passiivi-aktiivinen -regenerointi sisältää siis DOC:in, DPF:n sekä ulkoisella energialähteellä toimivan polttimen. Pääasiassa tässä järjestelmässä käytetään passiivista regenerointia, silloin kun pakokaasun lämpötila on sopivan korkea ja suodattimeen on kerääntynyt hiukkasia. Mikäli pakokaasun lämpötila ei nouse tarpeeksi korkealle, käytetään aktiivista regenerointia. Tämä voidaan to-

teuttaa erillisellä polttimella/vastuksilla, kun on kulunut tietty aika ilman regenerointia. (Blackthorn, 2012.)

Passiivi-aktiivisessa -regenerointia käytetään silloin, kun moottori toimii pienellä kuormalla pitkän aikaa. Tällöin suodattimeen kertyy paljon hiukkasia, eikä pakokaasun lämpötila nouse tarpeeksi korkealle, jotta voitaisiin turvautua passiiviseen regenerointiin. Moottorin ollessa tällaisessa käytössä käytetään aktiivista regenerointia turvaamaan suodattimen puhdistuminen. (Liu ym. 2012.) Haasteena tässä järjestelmässä on sen monimutkaisuus, sillä pakoputkeen joudutaan liittämään DOC:in lisäksi myös poltin/vastukset DPF:iin.

5.3.4 Hallitsematon regenerointi

Hallitsematonta regenerointia voi syntyä pääasiassa passiivisessa regeneroinnissa, kun pakokaasun happimäärä on korkea, pakokaasun virtausmäärä on pieni ja noen määrä suodattimessa korkea. Tämä voi aiheuttaa suodattimeen korkeita lämpötiloja regeneroinnin aikana ja suodattimeen voi muodostua aksiaalisiä tai radiaalisiä halkeamia. (Husted, Roth, Nelson, Hocken, Fulks & Racine 2012.) Jos moottorin pakokaasujen lämpötila on alhainen passiivisessä järjestelmässä, kerää suodatin tehokkaammin hiukkasia. Aktiivinen järjestelmä kerää hiukkasia aina 500 °C:een asti. Kun pakokaasujen lämpötila on alhainen, kasvaa hallitsemattoman regeneroinnin mahdollisuus, sillä suodatin kerää enemmän nokea (ECOpaint inc. 2005.06b).

Hallitsematonta regenerointia tapahtuu, jos suodatin on liian täynnä ja se altistetaan korkeille lämpötiloille ajamalla moottoria suurella kuormalla sekä no-

peudella, ja yhtäkkiä moottori laitetaan joutokäynnille. Tällöin mikäli regenerointi on alkanut suurella kuormalla ja nopeudella, ei pakokaasun virtausmäärä riitä jäähdyttämään suodatinta, vaan lämpötilat pääsevät nousemaan hallitsemattomiksi. Seurauksena voi olla suodattimen sulaminen tai halkeaminen. (ECOpaint inc. 2005.)

6 KOEAJOT

Koeajot suoritettiin AGCO Powerin moottorilaboratorioissa Linnavuorella No-kiällä. Koeajoissa testattiin kahta eri platinamäärällä varustettua DOC:ia DPF:n regeneroinnissa. Haluttiin saada selville, kuinka DOC:in platinamäärä vaikuttaa NO₂:n syntymiseen ja siten DPF:n passiiviseen regenerointiin. DOC:ien platinamäärät olivat 10 g/ft³ ja 20 g/ft³ ja DPF:n platinamäärä oli 5 g/ft³. Polttoaineena testeissä käytettiin Neste Oil Oyj:n dieseliä.

6.1 Koemoottori ja mittalaitteet

Moottorina koeajoissa käytettiin AGCO Powerin 44AWF -moottoria. Moottorin iskutilavuus oli 4,4 dm³. Moottorin lyhenteessä A tarkoittaa jälkikäsitelyä (aftertreatment), W tarkoittaa hukkaporttia (wastegate) ja F päästörajoituksiltaan Stage 4/ Tier 4 Final -moottoria. Lisää tietoa moottorista on taulukossa 6.

Taulukko 6 AGCO Power 44AWF -moottorin perustiedot.

Iskutilavuus [dm ³]	4,4
Sylinterien määrä	4
Sylinterien halkaisija	108
Iskunpituus	120
Polttoaineen ruiskutus	Commonrail-järjestelmä
Pakokaasun takaisinkierrätys	ulkoinen jäähdytetty EGR
Ilman imutapa	Turboahdettu, välijäähdytetty, wastegate

Pituus [cm]	902
Korkeus [cm]	887
Leveys [cm]	620
Pakokaasun jälkikäsitely	Normaalisti DOC + SCR Testeissä DOC + DPF

6.1.1 Pakokaasun jälkikäsitelylaitteet

Koeajoissa käytettiin hapetuskatalysaattoria (DOC) ja hiukkassuodatinta (DPF), liite 2. Taulukosta 7 on nähtävissä käytettyjen DOC:ien ja DPF:n koot sekä platinamäärät. Hapetuskatalysaattoreita oli kaksi erilaista, joissa toisessa oli enemmän platinaa. Hiukkassuodattimessa platinamäärä oli 5 g/ft³.

Taulukko 7 DOC:n ja DPF:n koot sekä platinamäärät.

	koko [tuuma]	platinatiheys [g/ft ³]
DOC	7,5*6	10
DOC	7,5*6	20
DPF	7,5*12	5

6.1.2 Moottoridynamometri

Moottoridynamometrinä oli Horiban WT 300 -pyörrevirtadynamometri, joka soveltuu niin kiinteiden pisteiden ajamiseen kuin vaihtelevien kuormien ajoi-

hin. Dynamometrin maksimitehonkesto on 300 kW ja sillä saadaan aikaiseksi maksimissaan 1200 Nm momentti. (Horiba.)

Pyörrevirtadynamometrin toiminta perustuu magneettikenttään ja tutkittavan moottorin pyörittämään levyyn dynamometrin sisällä. Levyn ympärillä on käämejä, joiden läpi kulkeva sähkövirta aiheuttaa levyn pyörimistä kuormittavaa resistanssia. Sähkövirran säätelyllä voidaan säätää resistanssin suuruutta. (Gitano.)

6.1.3 Mittausolosuhteet

Mittausolosuhdemittalaitteena moottorilaboratoriossa oli Vaisalan PTU303-mittayksikkö. Se mittasi painetta, lämpötilaa ja kosteutta moottoridynamometrin ympäristössä. PTU303 auttoi tässä tapauksessa tarkkailemaan mittausolosuhteita. Painetta PTU303 pystyi mittaamaan 50–110 kPa, lämpötilaa -40–60 °C ja kosteutta 0–100 % välillä. (Vaisala 2008.)

6.1.4 Savutusmittari

Moottorin savutusta mitattiin DPF:n jälkeen AVL 451S -mittarilla, joka mittaa noen määrää pakokaasussa havainnoimalla suodinpaperin tummumista. Mittalaite ilmoittaa savutuksen FSN-arvona (filter smoke number), jota käytetään moottoritekniikassa yleisesti savutuksen yksikkönä. AVL 451S:n noen havaitsemisraja oli 0,002 FSN ja mittaustarkkuus 0,001 FSN. (AVL 451S 2005.) Mittari oli sijoitettu DPF:n jälkeen, jotta tiedettiin moottorin ilmaan päästävän savutuksen FSN-arvo.

6.1.5 Hiukkasmassamittalaite

Hiukkasmassamittalaitteena tutkimuksessa käytettiin AVL Micro Soot Sensoria (MSS), joka mittaa hiukkasten massan tilavuutta kohti. AVL MSS käyttää fotoakustista tapaa, jossa nokihiukkanen altistetaan muunnetulle valolle. Nokihiukkaseen kohdistuu muunneltu valo ja nokihiukkanen paisuu. Paisumisesta syntyvä ääniaalto voidaan mitata mikrofonilla. (AVL list GmbH 2009.)

AVL MSS mittaa noki-osuuden tiheyttä yksikössä mg/m^3 ja se voidaan muuttaa likimääräiseksi FSN-arvoksi kaavalla:

$$\rho = \left(\frac{1}{0,405} \right) * 5,32 * FSN * \left(e^{(0,31 * FSN)} \right) \quad [1]$$

FSN on 415S:n savutustulos. Tutkimuksessa pakolinjaan asennettiin kolme näytteenottopistettä paineenpienennysyksikköineen. Tällöin tutkimuksessa pystyttiin mittaamaan hiukkastiheyttä ennen hapetuskatalysaattoria, hapetuskatalysaattorin jälkeen ja hiukkassuodattimen jälkeen. Tarkkuuden säilyttämiseksi mittaaminen piti aina keskeyttää AVL MSS -mittalaitteen vaatimaksi viideksi minuutiksi ennen näytteenottpisteen vaihtamista.

6.1.6 Pakokaasuanalysaattori

Pakokaasuanalysaattorina mittauksissa käytettiin Boo Instrumentsin mittauslaitteistoa, johon kuului typpimonoksidin, typpidioksidin, hiilimonoksidin, hiilidioksidin, hapen ja hiilivetyjen mittaamiseen tarkoitetut laitteet. NO_x -päästöjä

mittalaitteisto mittaa kemiluminenssimenetelmällä, HC-päästöjä liekki-ionisaatioilmaisimen (FID) avulla ja CO-, CO₂- sekä O₂-päästöjä infrapunamittauksen (NDIR) avulla. Mittaustavoista on kerrottu enemmän kappaleessa 4.2.

Mittausjärjestelmässä oli käytössä kaksi mittalinjaa pakokaasuanalysoitsorille, ennen hiukkassuodatinta ja hiukkassuodattimen jälkeen. Mittalinjojen pituus oli noin 4 metriä ja mittalinjat olivat lämmitettyjä. Mitattavan linjan pystyi vaihtamaan suoraan tietokoneelta.

6.1.7 Muut mittalaitteet

Mittalaitteina toimivat hiukkasmassa- ja pakokaasuanalysoitsorin lisäksi perusmittalaitteet, jotka mittasivat lämpötilaa ja painetta. Perusmittauksiin kuuluivat pakokaasun lämpötilat eri kohdissa pakokaasun jälkikäsittelyjärjestelmää sekä termoparit DPF:n sisällä, joilla määritettiin DPF:n lämpötilajakauma. Perusmittauksiin kuului myös paineiden mittaaminen eri kohdissa pakokaasulinjaa. Myös moottorinohjausjärjestelmään liittyvät mittalaitteet antoivat mahdollisuuden mitata lämpötiloja ja paineita eri kohdista moottoria. Moottorinohjausjärjestelmä mahdollisti myös NO_x-pitoisuuden määrittämisen NO_x-antureilla.

6.2 Tutkimuksen kulku

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää suodattimen täyttymisnopeus ja regenerointinopeus eri kuormitustilanteissa. Samalla mitattiin suodattimen painehäviön muuttuminen ja lämpötilakäytös regeneroitumisen aikana. Mittauk-

sista pyrittiin määrittämään regeneroinnin alkamislämpötila sekä moottorilta vaadittu kuormitus- ja lämpötilaprofiili, jolla passiivisen regeneroinnin käyttäminen on mahdollista. Lisäksi tarkoituksena oli pohtia, miten vaadittu kuormitusprofiili muuttuu, kun moottorin hiukkaspäästöt ovat erilaiset kuin koemoottorin. Näiden tietojen saamiseksi päätettiin koeajot suorittaa NRSC-mittauksilla, balance point -testeillä ja regenerointimittauksin. Aluksi suodatin ajettiin kerran täyteen ja regeneroitiin. Kaikki testit suoritettiin kahdella eri DOC:lla, joissa oli eri platinamäärät, 10 g/ft³ tai 20 g/ft³.

6.2.1 Rajamomenttiajo

Aluksi ajettiin rajamomenttiajo, jossa moottorin pyörimisnopeudet olivat 2100–1000 rpm 100 rpm välein ja kuorma 100 %. Tarkoituksena oli selvittää moottorin pakokaasun lämpötilat eri pyörimisnopeuksilla täydellä kuormalla.

6.2.2 NRSC (ISO 8178)

Kolmanneksi ajettiin ISO 8178 -testi eli NRSC, jossa selvitettiin moottorin tuottamat PM-, CO-, CO₂-, O₂-, NO-, NO₂-, NO_x-, HC- ja savutuspäästöt. NRSC-syklissä moottoria ajetaan kahdeksassa (8) eri kuormituspisteessä ja nämä koostuvat neljästä nimellisteholla ajettavasta kuormituspisteestä, kolmesta välinopeudella ajettavasta pisteestä ja joutokäynnistä. Pisteet on kuvattu taulukossa 8.

Taulukko 8 ISO 8178- eli NRSC-syklin pisteet.

Nopeus [rpm]	2100	2100	2100	2100	1500	1500	1500	1000
Kuorma	100 %	75 %	50 %	10 %	100 %	75 %	50 %	0 %

6.2.3 Balance point -testi

Balance point -testin tarkoituksena oli selvittää hiukkasuodattimen regeneroitumisen alkamislämpötila ja vastapaine kyseisellä hetkellä. Testi suoritettiin ajamalla moottoria vakionopeudella ja säätämällä kuorman avulla pakokaasulle haluttu lämpötila. Alkulämpötila pyrittiin saamaan noin 250 °C:een. Tässä pisteessä ajettiin 30 minuuttia. Kuormaa pyrittiin sitten lisäämään siten, että lämpötila nousi noin 25–35 °C:ta ja samalla seurattiin vastapainetta. Kuorman ja lämpötilan nosta jatkettiin kunnes vastapaine alkoi laskea. Balance point määritellään usein pisteeksi, jossa vastapaine ei kasva eikä laske eli hiukkasten kerääntyminen ja NO₂:n polttamat hiukkaset ovat tasapainossa. Näissä testeissä pisteeksi määriteltiin se lämpötila, missä vastapaine alkoi laskea, sillä se on helpompi havaita ja informatiivisempi regeneroinnin kannalta. Nopeuksina käytettiin 2100 rpm ja 1500 rpm. Hiukkasia kerättiin suodattimeen ennen testin aloittamista ajamalla moottoria pienellä kuormalla ja suurella nopeudella, jolloin kone saatiin savuttamaan suhteellisen paljon, mutta pakokaasun lämpötila ei ollut vielä tarpeeksi korkea regenerointiin.

6.2.4 Regenerointitutkimus

Regenerointitutkimus suoritettiin samoilla nopeuksilla kuin balance point -testi (1500 rpm ja 2100 rpm), jolloin voitiin käyttää hyväksi saatuja vastapaine- ja lämpötila-arvoja. Testi ajettiin täydellä kuormalla sekä pisteessä, joka oli juuri balance pointin yläpuolella. Suodatin täytettiin hiukkasilla käyttämällä eri lämpötilapisteitä balance pointin alapuolella, jolloin pystyttiin samassa määrittämään, kuinka kauan suodattimen täyttymiseen menee. Kun suodattimen aihe-

uttama vastapaine oli noussut lähes kaksinkertaiseksi, kuormaa nostettiin joko täydelle kuormalle tai pisteeseen, joka oli juuri balance pointin yläpuolella.

Testissä tarkkailtiin suodattimen täyttymisnopeutta, regeneroitumisen nopeutta ja lämpötilan sekä vastapaineen muutoksia regeneroitumisen aikana. Tässä testissä seurattiin paineita ja lämpötiloja ennen DOC:ia, DOC:in jälkeen ja DPF:n jälkeen sekä DPF:n lämpötilajakaumaa. Myös hiukkasmassan tiheyttä seurattiin samoissa kohdissa kuin painetta ja lämpötilaa.

6.2.5 Muut testit

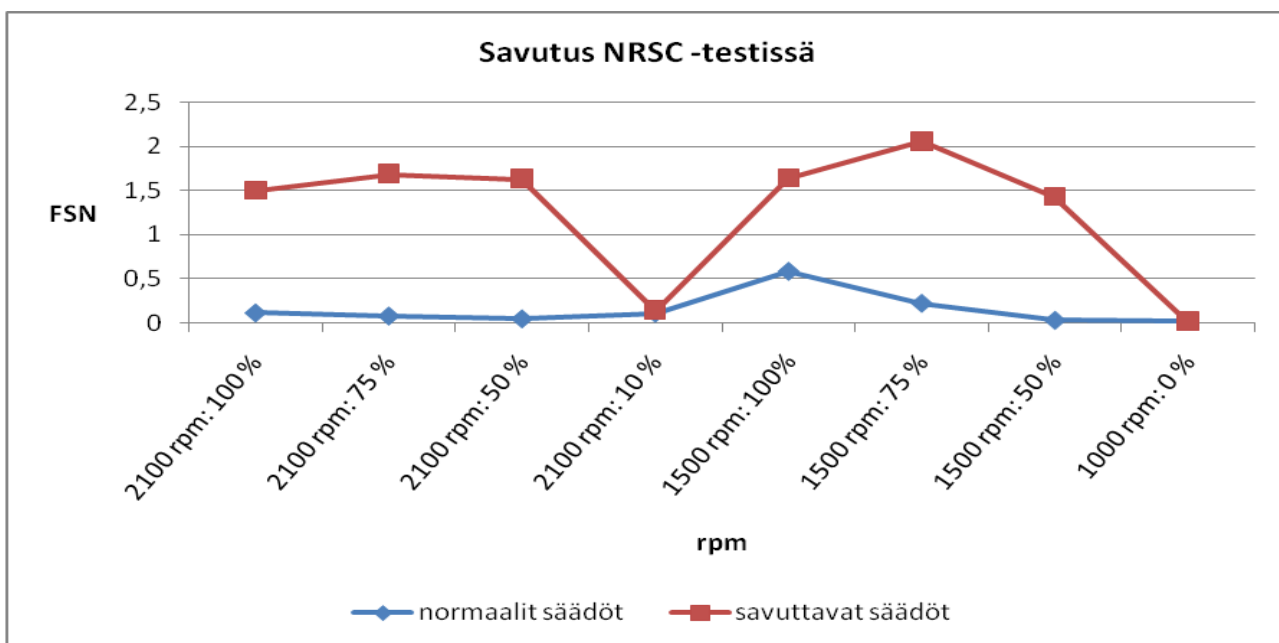
Varsinaisten testien päätteeksi suodatin ajettiin vielä enemmän täyteen, kuin regenerointitestissä. Hiukkaskeräys ajettiin suurella nopeudella ja pienellä kuormalla, jolloin pakokaasun lämpötila ei ollut tarpeeksi korkea regeneroitumisen alkamiseen. Suodattimen vikaantumista testattiin kun 1500 rpm pyörimisnopeudella ja täydellä kuormalla alkanut regenerointi keskeytettiin laittamalla moottori joutokäynnille.

7 TULOKSET

Suodatin päätettiin regeneroida kerran ennen mittausten aloittamista, jotta mittään testiä ei tullut tehdyksi täysin uudelle suodattimelle. Näin ollen testien tulokset olivat paremmin vertailtavissa keskenään. Moottorin parametrien säätämisen jälkeen kaikki testit ajettiin kahdella erilaisella DOC:lla.

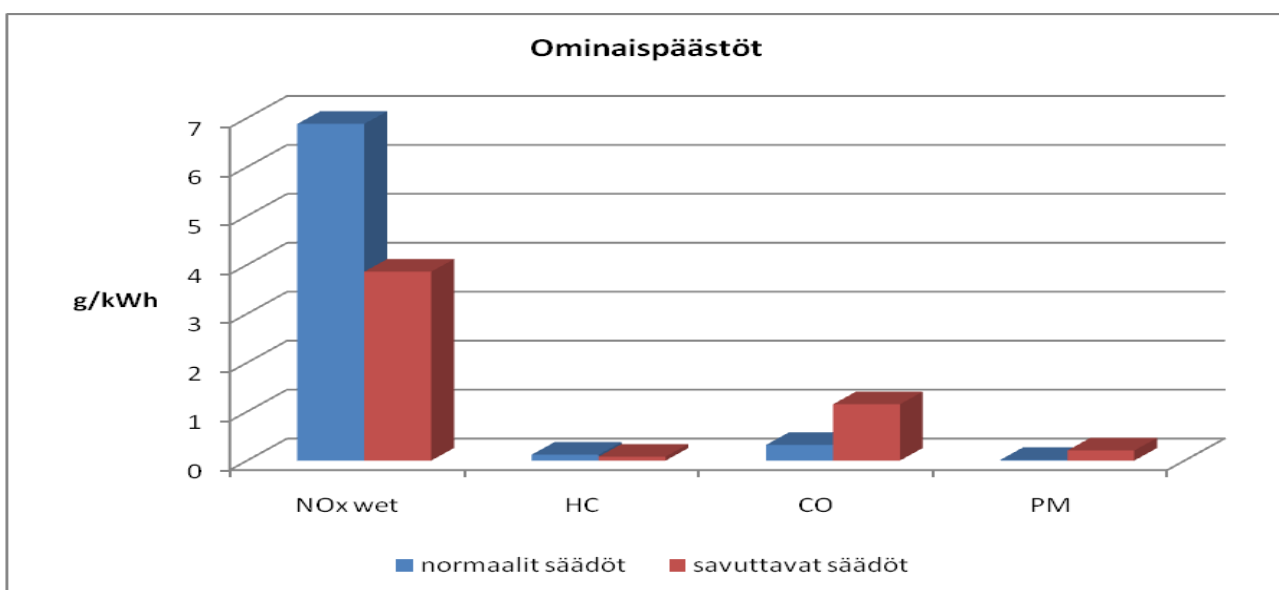
7.1 Moottorin savuttaminen ja päästöt

Moottorilla ajettiin aluksi NRSC-testi (ISO 8178). Tämän jälkeen moottori säädettiin savuttamaan mahdollisimman paljon, jotta hiukkasten keräämiseen suodattimeen ei olisi kulunut tavattoman kauan aikaa. Moottori säädettiin savuttavaksi alentamalla ruiskutuksen painetta, lisäämällä EGR:ää ja avaamalla hukkaporttia, jolloin ahtopaine laski. Kuviosta 28 on nähtävissä säätöjen vaikutus moottorin savuttamiseen NRSC-testissä. Normaalisti moottori savutti NRSC-testissä keskimäärin noin 0,05–0,1 FSN, mutta säätöjen jälkeen moottori savutti keskimäärin 1,5 FSN. Tärkeintä oli saada moottori savuttamaan pienillä momenteilla, jolloin pakokaasun lämpötila oli matala ja hiukkasten kerääminen suodattimeen nopeutui.



Kuvio 28 Moottorin savutus NRSC-testissä sekä normaaleilla että savuttavilla säädöillä.

Kuviossa 29 on kuvattuna moottorin ominaispäästöt normaaleilla ja savuttavilla säädöillä. Savuttamisen kasvaessa NO_x -päästöt vähentyivät huomattavasti trade-off -ilmiön seurauksena ja myös hiilimonoksidin sekä hiukkaspäästöjen (PM) määrät kasvoivat lisääntyneen savutuksen seurauksena.



Kuvio 29 Moottorin ominaispäästöt sekä normaaleilla että savuttavilla säädöillä.

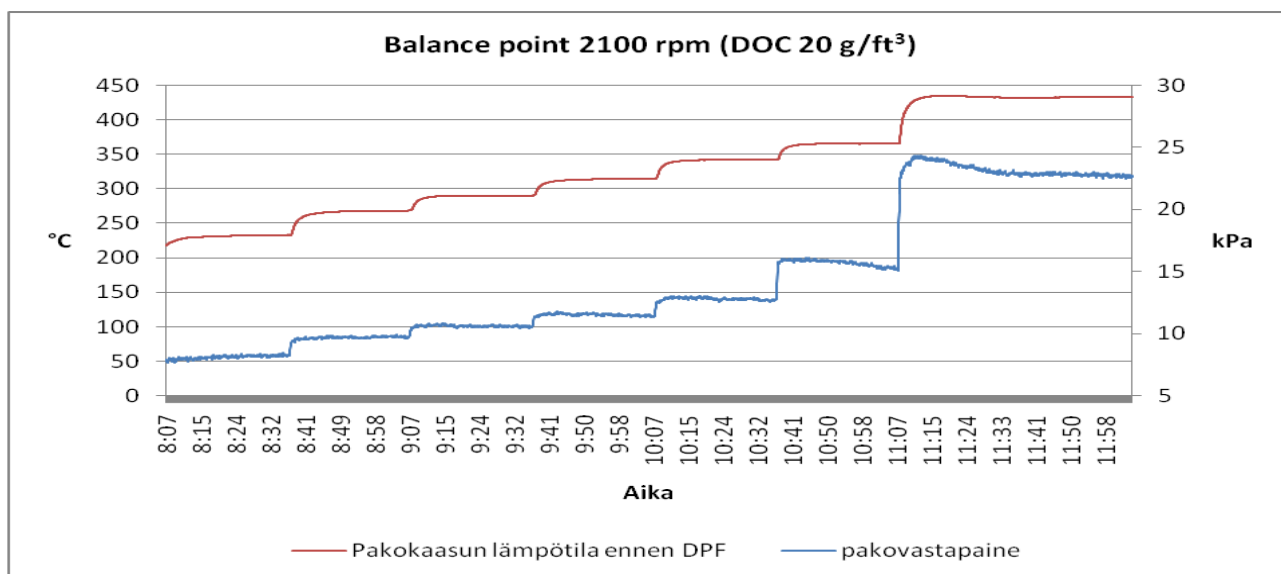
7.2 Balance point

Balance point -testit ajettiin käyttäen kahta erilaista DOC:ia. Testien tarkoituksena oli selvittää, missä lämpötilassa suodattimen vastapaine alkaa laskea. Suodatin täytettiin hiukkasista ennen testien suorittamista. Suodattimen täyttymisen pystyi havaitsemaan vastapaineen noususta ja vastapaineen annettiin nousta noin kaksinkertaiseksi ennen testien aloittamista. Tutkimuksen aikana lämpötilaa pyrittiin nostamaan noin 25–35 °C kerrallaan. Testin tuloksena saatiin lämpötila, jossa suodatin lähti regeneroitumaan eli suodattimesta paloi enemmän hiukkasia kuin mitä se ehti kerätä.

7.2.1 DOC 20 g/ft³ platinamäärällä

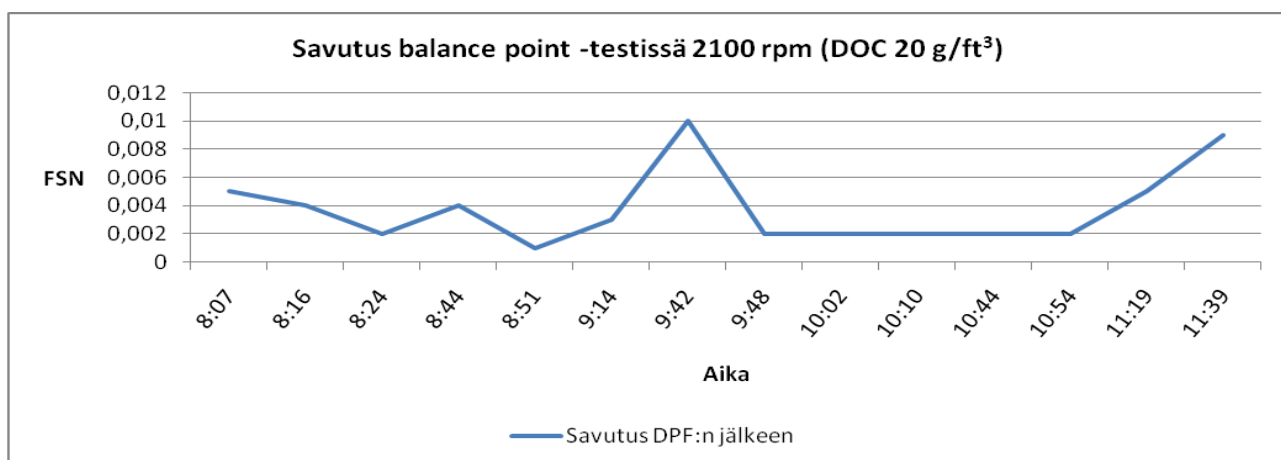
Käytettäessä DOC:ia, jossa platinamäärä oli 20 g/ft³, suodattimen balance point 2100 rpm nopeudella oli 313 °C. Tällöin suodattimen aiheuttama vastapaine alkoi laskea, kun se alemmissa lämpötiloissa joko kasvoi tai pysyi tasaisena.

Lämpötilan 313 °C yläpuolella suodattimen aiheuttama vastapaine laski selvästi. Balance point -pisteessä moottorin momentti oli 150 Nm ja teho 33 kW. Suodattimen balance point oli tällä pyörimisnopeudella varsin alhainen, sillä moottorilta vaadittiin tehoa vain 33 kW, jotta suodatin alkoi puhdistua. Kuviosta 30 on nähtävissä balance point 2100 rpm nopeudella.



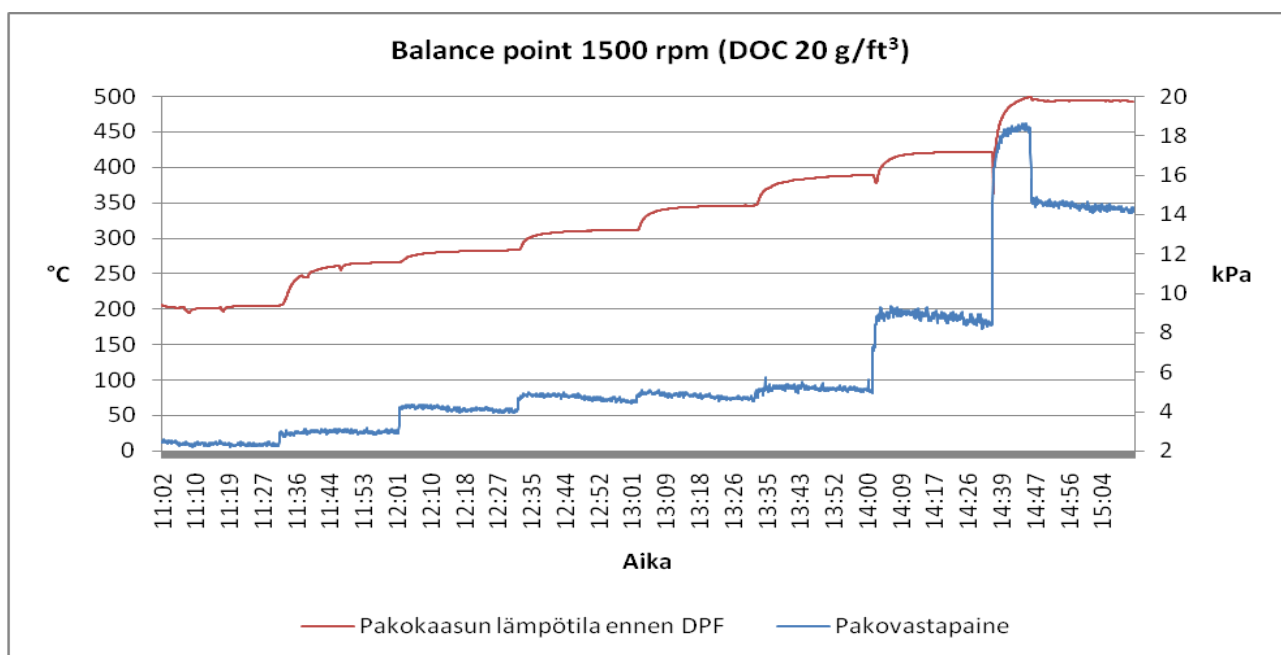
Kuvio 30 Balance point nopeudella 2100 rpm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Savutus DPF:n jälkeen pysyi balance point -testissä erittäin pienenä, keskimäärin noin 0,005 FSN:ssa (kuvio 31). AVL MSS mittasi hiukkaspitoisuudeksi 0,12–0,19 mg/m³, joka tekee FSN-arvona kaavan 1 mukaan noin 0,009–0,015 FSN. AVL MSS antoi siis hieman korkeammat arvot savutukselle, mutta ne olivat silti erittäin pieniä. DPF toimi siis erittäin hyvin, sillä moottori oli säädetty savuttavaksi, tuottaen täydellä kuormalla noin 1,5 FSN. Savutus on nähtävissä kuviossa 31.



Kuvio 31 Savutus hiukkassuodattimen jälkeen 2100 rpm balance point -testissä.

Balance point selvitettiin vielä 1500 rpm nopeudella. Suodattimen aiheuttama vastapaine alkoi laskea 281 °C lämpötilassa. Balance pointia edeltävässä pisteessä lämpötila oli 264 °C ja vastapaine ei laskenut. Balance pointin yläpuolella vastapaine laski jokaisessa pisteessä sitä tehokkaammin, mitä korkeampi lämpötila oli. Balance point -pisteessä moottorin momentti oli 100 Nm ja teho 15 kW. Suodattimen regeneroitumisen alkaminen vaati siis moottorilta huomattavan pienen tehon. Kuviosta 32 nähdään 1500 rpm nopeudella ajettu balance point ja vastapaineen muutokset eri lämpötilapisteissä. Viimeisessä pisteessä oleva vastapainepiikki johtui aluksi asetetusta suuremmasta kuormasta, jota piti kuitenkin laskea moottoridynamometrin alettua pitää ikävän kuuloista ääntä täydellä kuormalla ajettaessa.

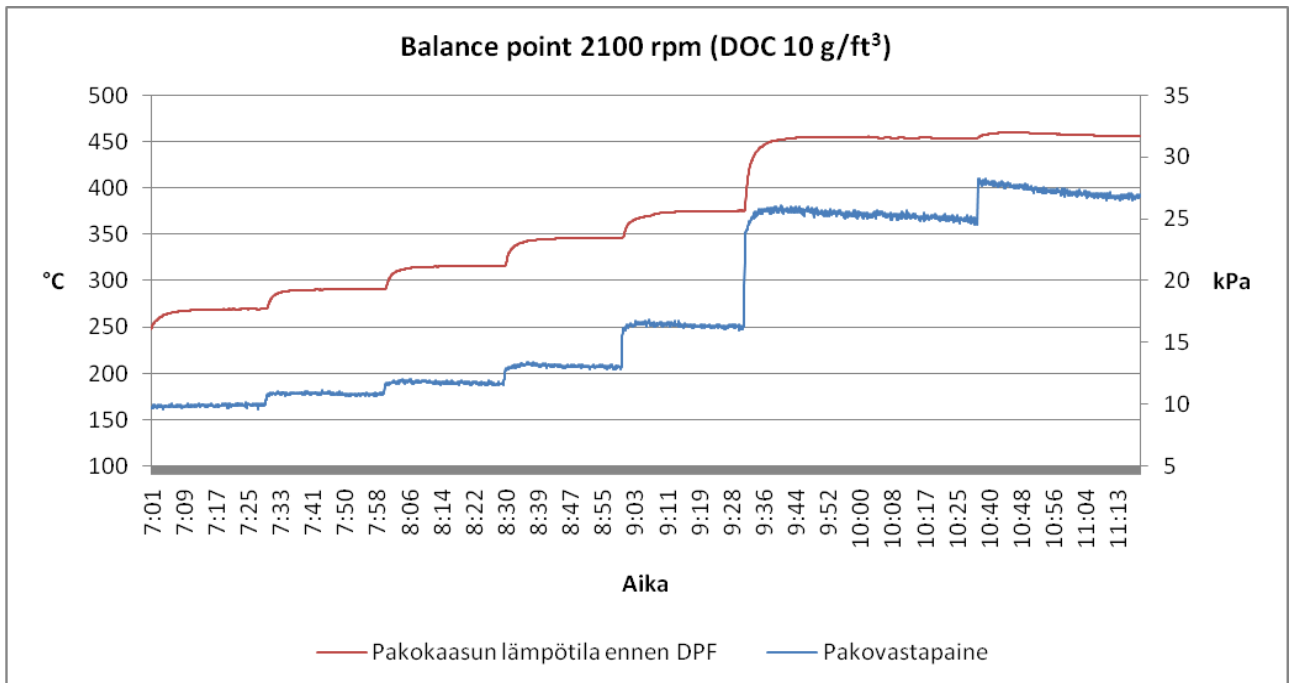


Kuvio 32 Balance point nopeudella 1500 rpm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Savutus mitattiin DPF:n jälkeen myös 1500 rpm balance point -testissä, jolloin se pysyi erittäin pienissä, noin 0,002 FSN lukemissa.

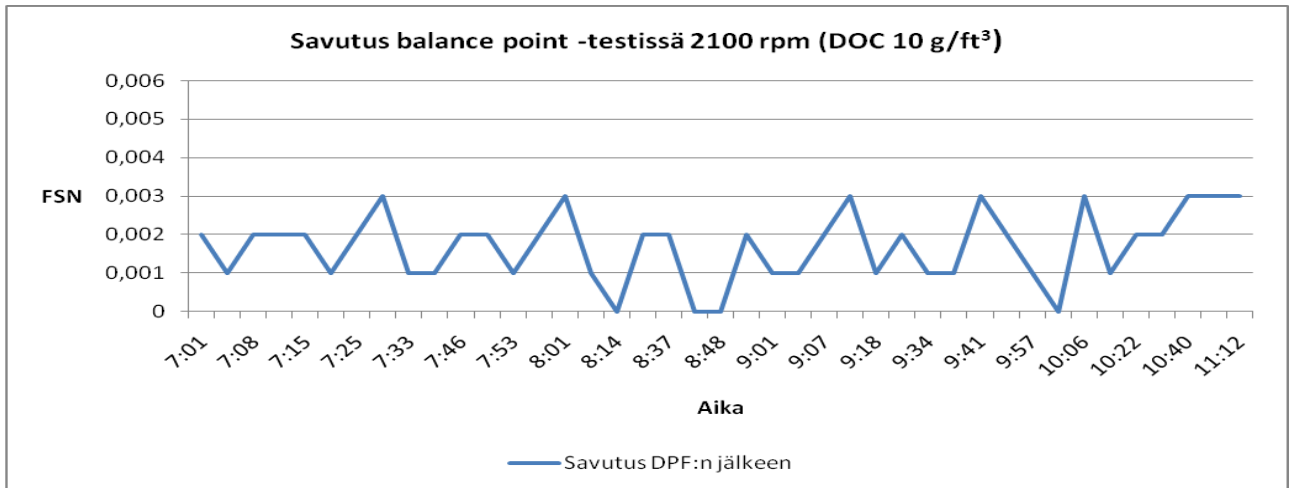
7.2.2 DOC 10 g/ft³ platinamäärällä

Käytettäessä DOC:ia, jossa platinamäärä oli 10 g/ft³, suodattimen balance point 2100 rpm nopeudella oli lämpötilapisteessä 315 °C. Tällöin suodattimen aiheuttama vastapaine alkoi laskea. Balance point pysyi lähes samana DOC:sta riippumatta. Balance point -pisteessä moottorin momentti oli 150 Nm ja teho 33 kW. Kuviossa 33 on kuvattuna balance point 2100 rpm nopeudella.



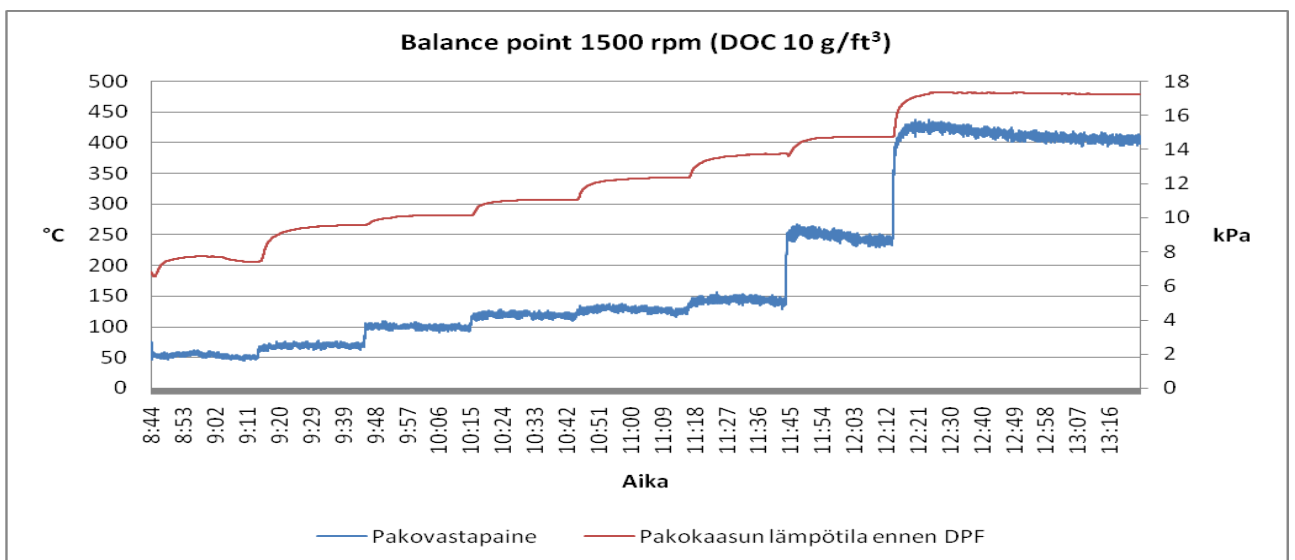
Kuvio 33 Balance point nopeudella 2100 rpm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

Balance point -testin savutus on nähtävissä kuviossa 34. Savutus mitattiin hiukkassuodattimen jälkeen ja se pysyi erittäin pienenä, noin 0,002 FSN:ssa, joten voidaan päätellä, että suodatin toimi siis kuten pitääkin.



Kuvio 34 Savutus hiukkassuodattimen jälkeen 2100 rpm balance point -testissä.

Balance point 1500 rpm nopeudella on nähtävissä kuviosta 35. Vaikkakin vastapaineen laskua oli vaikea havaita 280 °C lämpötilapisteessä, alkoi se laskea hitaasti. Näin ollen DOC:n vaihdolla ei ollut vaikutusta balance pointiin myöskään 1500 rpm pyörimisnopeudella. Balance point -pisteessä moottorin momentti oli 100 Nm ja teho 15 kW. Suodatin vaati siis erittäin pienen tehon moottorilta regeneroinnin aloittamiseen kummallakin DOC:lla ja ero tulee oletettavasti näkymään enemmän hiukkassuodattimen regeneroitumisnopeudessa.



Kuvio 35 Balance point nopeudella 1500 rpm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

Savutus 1500 rpm balance point -testissä on muiden testien kanssa samoissa suuruusluokissa. Savutus on pääasiassa 0,002 FSN, joten voidaan todeta, että suodatin toimii hyvin.

7.3 Hiukkassuodattimen täyttymisnopeus

Hiukkassuodattimen täyttymisnopeutta mitattiin vastapaineen kasvamisnopeudella. Aluksi testattiin, mikä oli DPF:n ja DOC:n aiheuttama vastapaine suodattimen ollessa tyhjä. Tulokset ovat nähtävissä taulukossa 9. Tämän jälkeen suodattimen aiheuttamaa vastapainetta nostettiin keräämällä suodattimeen hiukkasia pienillä kuormilla, jolloin pakokaasun lämpötila pysyi balance point -pisteen alapuolella. Vastapaine pyrittiin nostamaan lähes kaksinkertaiseksi aina ennen regenerointitestien aloittamista. Testeissä käytetyn kordieriitti-suodattimen maksimitäyttöaste oli arviolta noin 6–7 g/l (Amberla 2012).

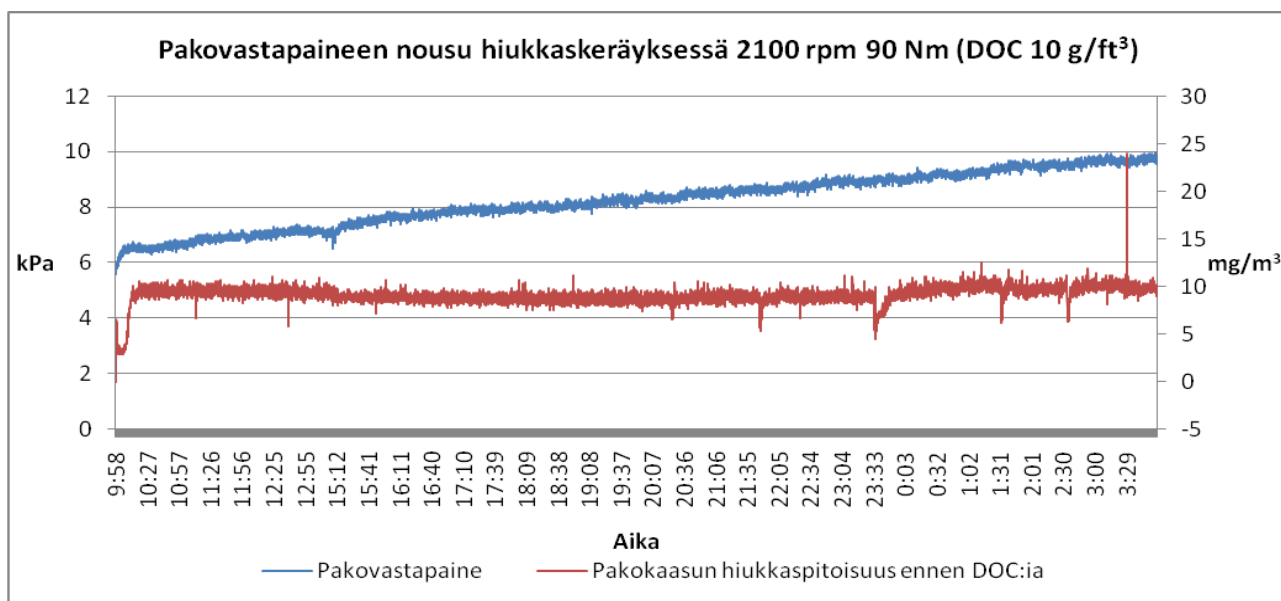
Taulukko 9 Tyhjän DPF:n ja DOC:n aiheuttama vastapaine.

Nopeus [rpm]	Momentti [Nm]	Vastapaine tyhjänä, noin [kPa]
2100	77	5,3
2100	90–100	5,5
2100	160	8,5
2100	460	25–26
2000	90	5,5
1500	73–77	1,4
1500	135	2,6
1500	620	18

Suodattimen täyttymisnopeutta päätettiin testata 2100 rpm ja 1500 rpm pyörimisnopeuksilla pisteissä juuri alle balance pointin. 2100 rpm pyörimisnopeuden pisteiksi valittiin 90 Nm ja 100 Nm, jotta moottorin savutus olisi mahdollisimman suurta. 1500 rpm pyörimisnopeuden hiukkaskeräykset tehtiin 73 Nm ja 77 Nm kuormilla, sillä silloin pakokaasun lämpötila oli juuri balance pointin alapuolella. Moottorin savutus lisääntyi kuormituksen kasvaessa, joten hiukkaskeräyspisteiksi valittiin pisteet juuri balance pointin alapuolelta.

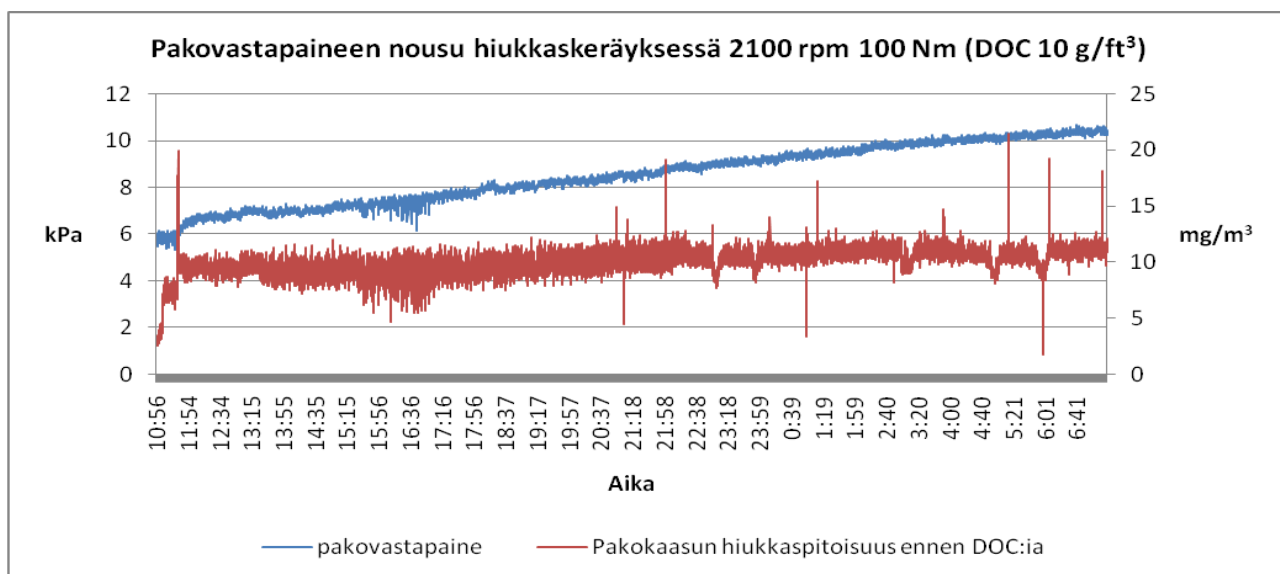
7.3.1 DOC 10 g/ft³ platinamäärällä

Tyhjän suodattimen ja hapetuskatalysaattorin aiheuttama vastapaine oli 2100 rpm ja 90 Nm hiukkaskeräyksessä noin 5,5 kPa. Hiukkasia kerättiin niin kauan kunnes suodattimen vastapaine oli noussut noin 10 kPa asti. Kun vastapaine oli noussut 10 kPa asti, oli aikaa kulunut 17,5 tuntia, kuten kuviosta 36 on nähtävissä. Hiukkasmassan tiheys ennen DOC:ia oli noin 10 mg/m³, eli moottori savutti kaavan 1 mukaan noin 0,7 FSN. Pakokaasun tilavuusvirta oli 224 m³/h, joten suodattimen täyttymisnopeus 100 % suodatusteholla olisi ollut noin 2,24 g/h. Kaiken kaikkiaan suodatin keräsi 39,2 g nokea, joka teki suodattimen laskennalliseksi, hiukkaspäästömittaukseen perustuvaksi täyttöasteeksi 4,51 g/l. Normaalisti kyseinen moottori tuottaisi savua noin 0,05 FSN 2100 rpm nopeudella ja 100Nm momentilla. Mikäli savutus pysyisi 0,05 FSN koko testin ajan, tuottaisi moottori 1/14 hiukkasia verrattuna tehtyyn. Tällöin hiukkasten keräämiseen kuluisi 14 kertaa pidempi aika eli noin 245 tuntia. Mikäli työkoneella tehtäisiin 8 tunnin päiviä, kestäisi suodattimen täytyminen vähintään 30 päivää.



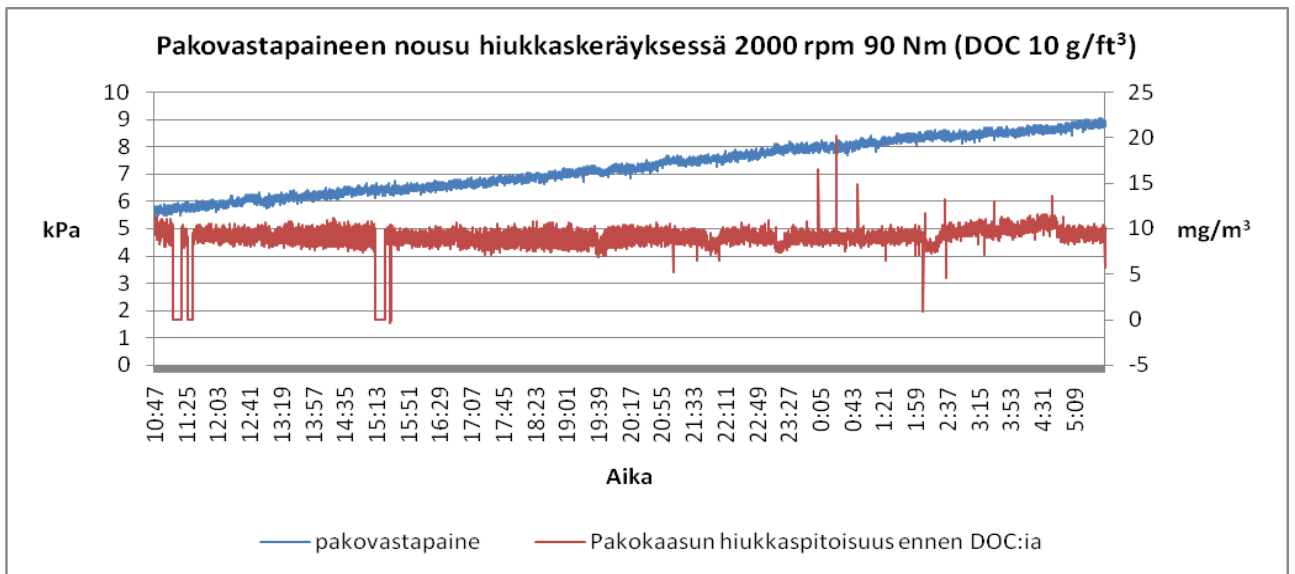
Kuvio 36 Pakovastapaineen nousu hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 90 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

Hiukkaskeräyksessä 2100 rpm 100 Nm hiukkasten kerääntyminen oli yhtä nopeaa, kuin 90 Nm momenttia käytettäessä, lähes muuttumattoman tilavuusvirran ansiosta. Tilavuusvirrassa oli eroa vain 2–3 m³/h. Pakokaasun lämpötila ei kuitenkaan noussut vielä niin korkeaksi, että regenerointi olisi alkanut. Muutosta 90 Nm keräykseen verrattuna ei ollut juurikaan muita kuin momentin nousu ja sen myötä pakokaasun lämpötilan pienoinen nousu. Suodatin keräsi nokea 43,6 g ja suodattimen laskennallinen, hiukkaspäästömittaukseen perustuva täyttöaste oli 5,02 g/l. Kuviossa 37 on nähtävissä pakovastapaineen nousu 2100 rpm ja 100 Nm hiukkaskeräyksessä.



Kuvio 37 Pakovastapaineen nousu hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 100 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

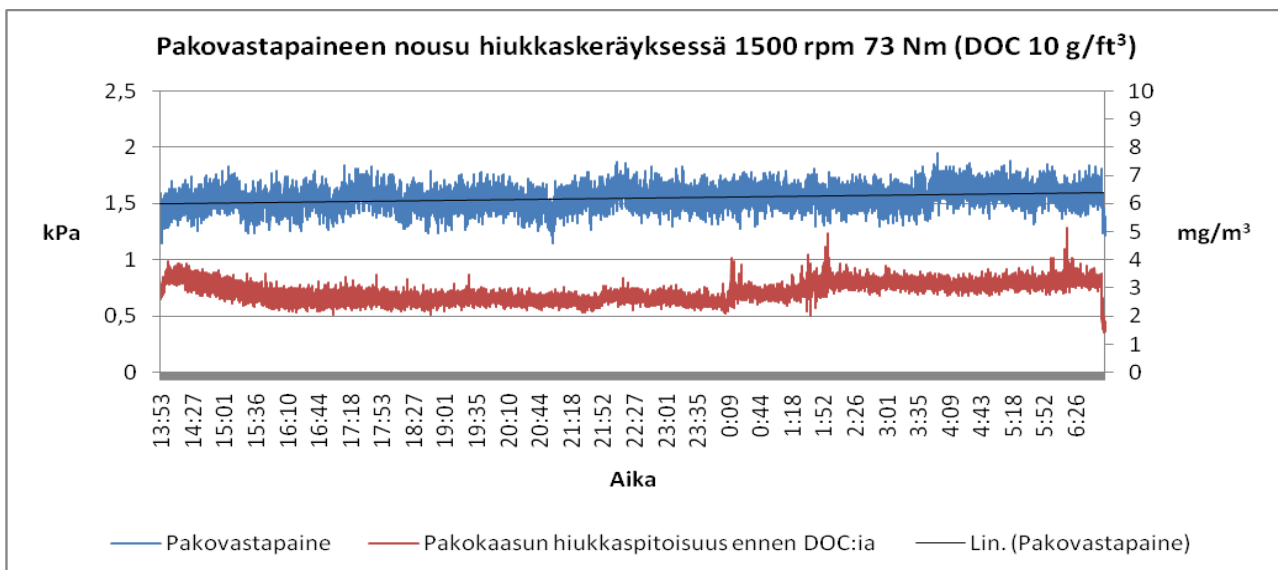
Hiukkaskeräyksessä 2000 rpm ja 90 Nm vastapaine nousi hieman hitaammalla tahdilla kuin 2100 rpm ja 90 Nm keräyksessä. Hiukkasmassan tiheys aleni hieman ja moottorin pyörimisnopeuden muutoksen takia pakokaasun virtausnopeus laski. Alhaisemman pyörimisnopeuden takia suodattimen läpi virtasi pienempi pakokaasun massavirta ja moottorin tuottama savutus oli hieman heikompi, joten suodatin täyttyi hieman hitaammin. Alhaisempi kierrosnopeus vaikutti hiukkasten kerääntymiseen paljon. 2100 rpm nopeudella 9 kPa saavutettiin 12,75 tunnissa, kun taas 2000 rpm nopeudella aikaa kului 18,7 tuntia. Pakokaasun tilavuusvirta oli 206 m³/h, jolloin noen massavirta pakokaasussa oli 1,83 g/h. Testissä suodatin keräsi 34,2 g nokea ja suodattimen laskennallinen, hiukkaspäästömittaukseen perustuva täyttöaste oli 3,94 g/l. Kuviossa 38 on nähtävissä hiukkaskeräys nopeudella 2000 rpm ja 90 Nm momentilla.



Kuvio 38 Pakovastapaineen nousu hiukkaskeräyksessä 2000 rpm ja 90 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

Hiukkaskeräystä kokeiltiin myös 1500 rpm nopeudella ja 73 Nm momentilla, jolloin pakokaasun lämpötila oli alle 1500 rpm balance pointin. Kuvioista 39 nähdään, että vastapaine nousee erittäin hitaasti kyseisessä testissä. Vastapaine kasvoi noin 18,5 tunnin aikana noin 0,2 kPa. 1500 rpm nopeudella ja 73 Nm momentilla täyden suodattimen vastapaine on noin 2,8 kPa eli kaksinkertainen aloitukseen nähden. Pakokaasun tilavuusvirta oli 103 m³/h. Testin aikana suodatin keräsi 4,89 g nokea ja laskennallinen, hiukkaspäästömittaukseen perustuva täyttöaste oli 0,57 g/l. Hidasta täyttymistä selitti osaltaan pienempi hiukkasmassan tiheys (keskimäärin 3 mg/m³) ja pakokaasun pienempi massavirta pienemmän kierrosnopeuden takia. Moottori kuitenkin savutti enemmän kuin normaalisti ja jopa tällä savutuksella suodattimen täytyminen olisi kestänyt noin 129,5 tuntia, mikäli savutus pysyisi samana kokoajan. Normaalisti moottori savuttaisi kyseisessä pisteessä keskimäärin 0,03 FSN. Tämä savutus on 1/7,3 pienempi kuin tehdyssä testissä. Mikäli savutus olisi

pysynyt koko testin 0,03 FSN, olisi suodattimen täyttämiseen kulunut aikaa noin 945 tuntia, joka tekee 8 tunnin työpäivillä 118 päivää.

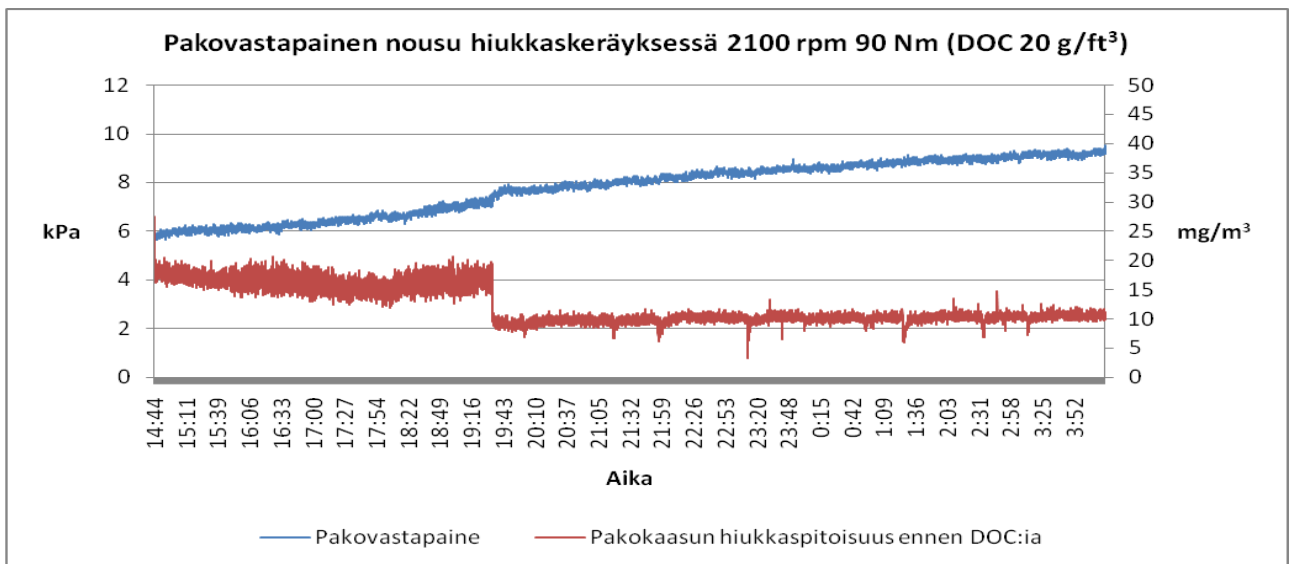


Kuvio 39 Pakovastapaineen nousu hiukkaskeräyksessä 1500 rpm ja 73 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

7.3.2 DOC 20 g/ft³ platinamäärällä

Kun DOC vaihdettiin 20 g/ft³ platinamäärän sisältävään, ei hiukkaskeräysnopeuteen ollut odotettavissa suuria muutoksia. Kuvioista 40 on havaittavissa suodattimen ja DOC:in aiheuttama vastapaineen nousu 2100 rpm nopeudella ja 90 Nm momentilla. Vastapaine lähti nousemaan hieman alle 6 kPa:sta ja vaati aikaa noin 15 tuntia, jotta pääsi 9,4 kPa:han. Vastapaineen nousu 10 kPa:han olisi vienyt aikaa 17,14 tuntia, joten hiukkasten kerääntymisvauhti on verrattavissa toisella DOC:illa tehtyyn testiin. Näin ollen verrattuna 10 g/ft³ platinamäärän sisältävän DOC:in testeihin, oli hiukkasten kerääntymisvauhti likimain sama. Hiukkasmassan tiheys oli testin loppupäässä sama kuin toisella DOC:illa tehdyssä testissä. Pakokaasun tilavuusvirta oli 215 m³/h ja noen massavirta pako-

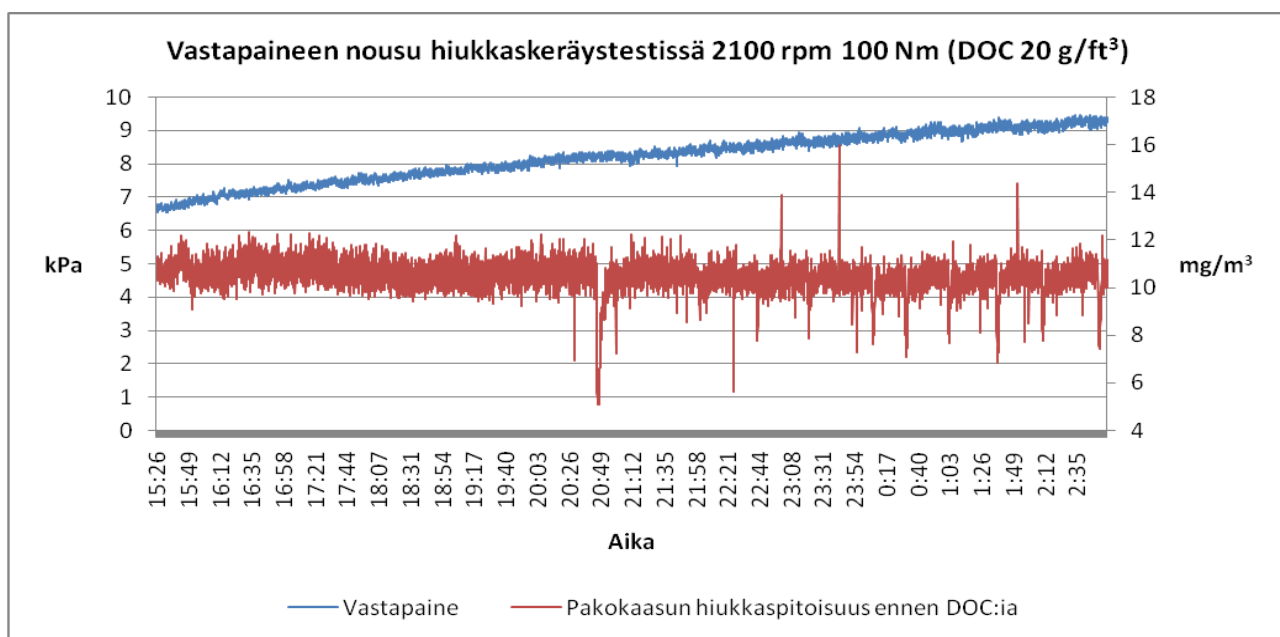
kaasussa oli tällöin 2,62 g/h. Suodatin keräsi testissä 39,4 g nokea ja laskennallinen, hiukkaspäästömittaukseen perustuva täyttöaste oli 4,54 g/l. Arvot olivat hyvin samankaltaiset kuin toisella DOC:lla tehdyissä testissä. Alkupään suuri, noin 18–20 mg/m³, hiukkasmassan tiheys oli hieman epäselvää, sillä ahtoilman lämpötila oli alussa asteen alhaisempi, minkä takia pakokaasun lämpötila oli noin 4 astetta alhaisempi kuin testin lopussa. Normaaleilla parametreilla savutus olisi ollut noin 0,05 FSN ja tällä savutuksella suodattimen täyttäminen olisi kestänyt toisella DOC:lla tehdyn testin mukaisesti 14 kertaa kauemmin. Eli 9,4 kPa:han pääsy olisi vaatinut 210 tuntia.



Kuvio 40 Pakovastapaineen muutos hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 90 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Hiukkaskeräysnopeus pysyi samana 2100 rpm nopeudella ja 100 Nm momentilla, sillä hiukkasmassan tiheys pysyi samana ja vain pakokaasun lämpötila nousi hieman 90Nm hiukkaskeräykseen verrattuna, pysyen kuitenkin alle 2100 rpm balance pointin. Vastapaine nousi 6,6 kPa:sta 9,4 kPa:han 11,5 tunnissa. Savutus pysyi lähes samana kuin toisella DOC:lla tehdyissä testeissä, pakokaasun tila-

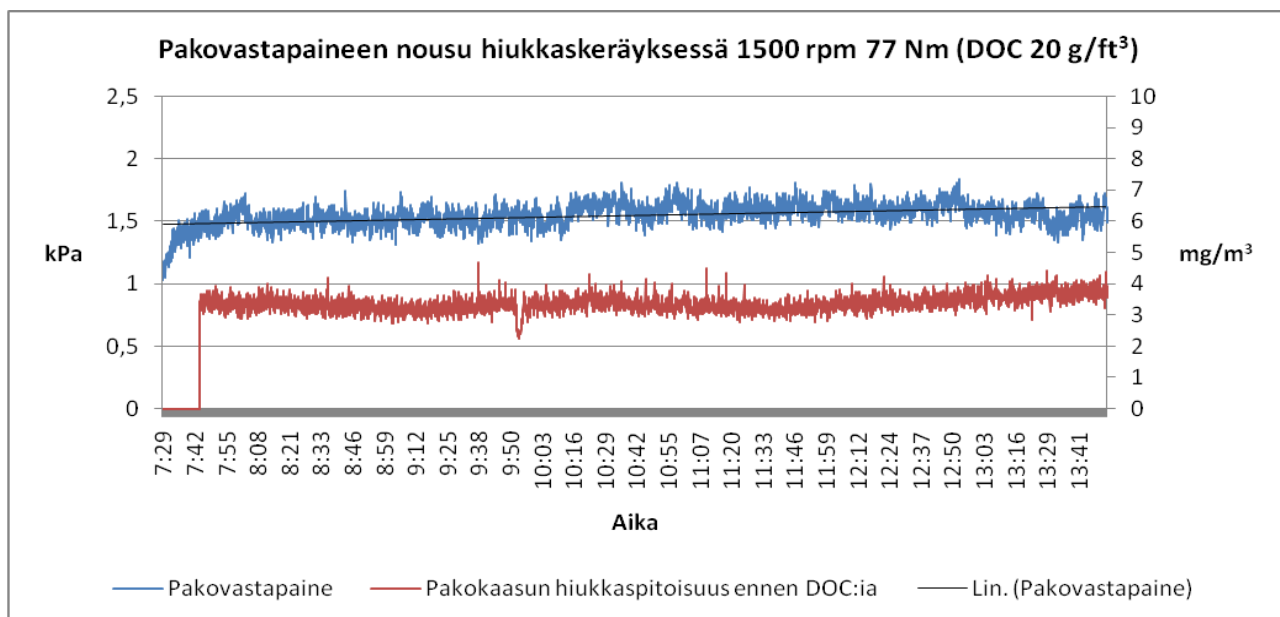
vuusvirta oli 220 m³/h ja noen massavirta oli 2,30 g/h. Hiukkasten kerääntymisnopeus oli siis hyvin samankaltainen kuin toisella DOC:lla. Kuvioista 41 on nähtävissä hiukkakeräyksen tulos 2100 rpm nopeudella ja 100 Nm momentilla.



Kuvio 41 Pakovastapaineen muutos hiukkakeräyksessä 2100 rpm ja 100 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Kuviossa 42 on kuvattuna pakovastapaineen nousu 1500 rpm nopeudella ja 77 Nm momentilla. Kuten toisella DOC:lla, myös tässä testissä hiukkasten kerääntyminen oli hidasta. Kuuden tunnin aikana pakovastapaine nousi noin 0,08 kPa. Vastapaineen hidasta nousua selittää toisen DOC:n testien tavoin pieni pakokaasun tilavuusvirta ja pieni hiukkasmassan tiheys. Tällöin suodattimen aiheuttaman vastapaineen tuplaamiseen olisi kulunut aikaa noin 105 tuntia. Pakokaasun hiukkaspitoisuus oli lievästi suurempi kuin toisen DOC:n testissä, joten tässä testissä savutus oli noin 8,3 kertaa suurempaa kuin normaaleilla parametreilla. Normaaleilla parametreilla vastapaineen tuplaamiseen olisi kulunut aikaa 892,5 tuntia, joka tekee 8 tunnin työpäivinä

111 päivää. Pakokaasun tilavuusvirta oli 115 m³/h, jossa noen massavirta oli 0,3887 g/h. Testissä suodatin keräsi nokea 2,52 g ja laskennallinen, hiukkaspäästömittaukseen perustuva täyttöaste oli 0,291 g/l. Testin tulokset ovat erittäin lähellä toisella DOC:lla tehtyä testiä.



Kuvio 42 Pakovastapaineen muutos hiukkaskeräyksessä 1500 rpm ja 77 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

7.4 Hiukkassuodattimen regeneroitumisnopeus

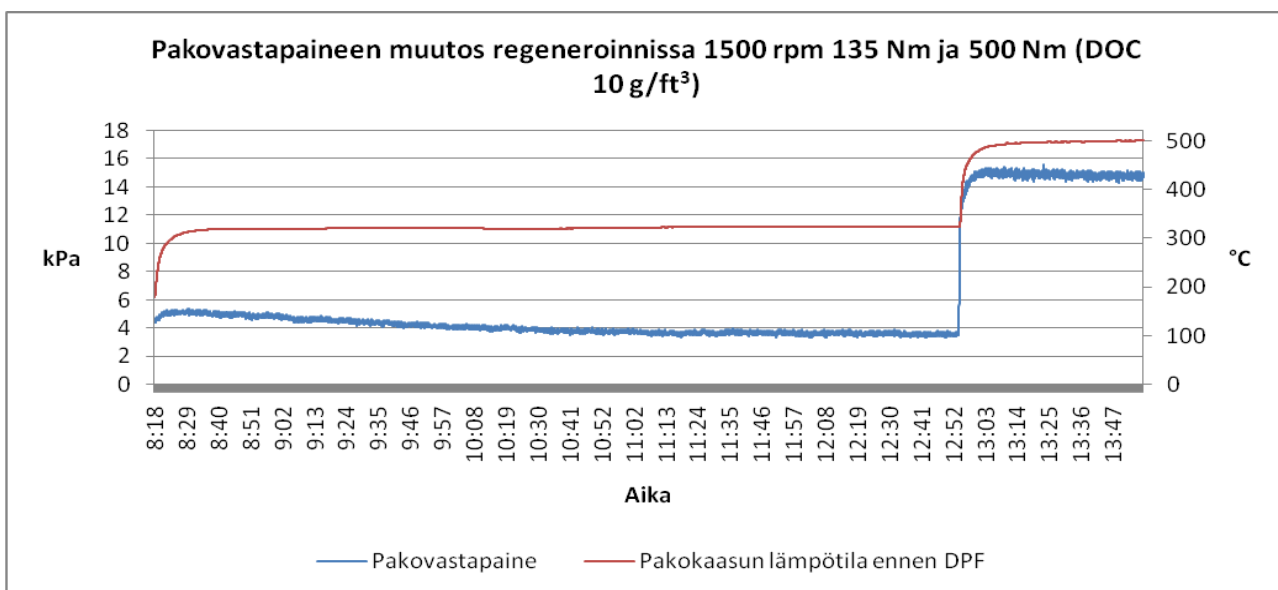
Hiukkassuodattimen regeneroitumisnopeutta mitattiin neljässä pisteessä, molemmilla hapetuskatalysaattoreilla. Pisteet olivat 1500 rpm pyörimisnopeudella 135 Nm ja 620 Nm sekä 2100 rpm pyörimisnopeudella 160 Nm ja 460 Nm. Testeissä selvitettiin, mitä regeneroinnin aikana tapahtuu vastapaineille ja lämpötiloille. Myös NO_x-tasoja seurattiin, jotta havaittiin, mitä regeneroinnin aikana tapahtuu DOC:n tuottamille NO_x-päästöille.

7.4.1 DOC 10 g/ft³ platinamäärällä

Regenerointitesti suoritettiin DOC:lla, jossa oli 10 g/ft³ platinamäärä tehostamassa päästöjen hapettumista. DOC:in tarkoituksena oli hapettaa regenerointia varten NO NO₂:ksi, joka puolestaan pystyi hapettamaan hiukkaset suodattimesta alemmissa lämpötiloissa.

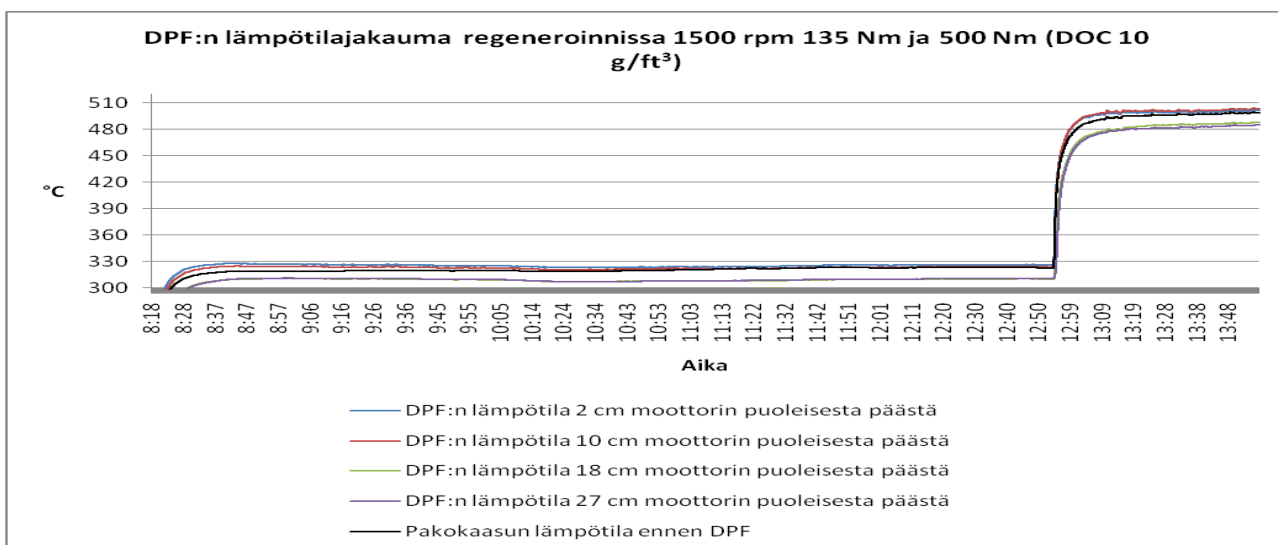
Regeneroinnit 1500rpm

Kuviossa 43 on kuvattuna pisteen 1500 rpm ja 135 Nm regeneroitumistapahtuma. Vastapaine laski noin 5,1 kPa:sta tasaisesti 3,4 kPa:iin 4,5 tunnin aikana ja tämän jälkeen suodattimen tyhjiys varmistettiin nostamalla momentti 500 Nm:iin. Tällöin vastapaine laski vielä 14,9 kPa:sta 14,6 kPa:han 1,5 tunnin aikana. Momentin ollessa 135Nm oli pakokaasun lämpötila 321 °C eli 40 °C yli balance pointin. Pakokaasun lämpötila oli 496 °C ajettaessa 500 Nm momentilla. Suodattimen tyhjentyminen kestää alhaisilla lämmöillä kauan, joten mitä korkeammaksi pakokaasun lämpötilan saa regeneroinnissa, sen parempi.

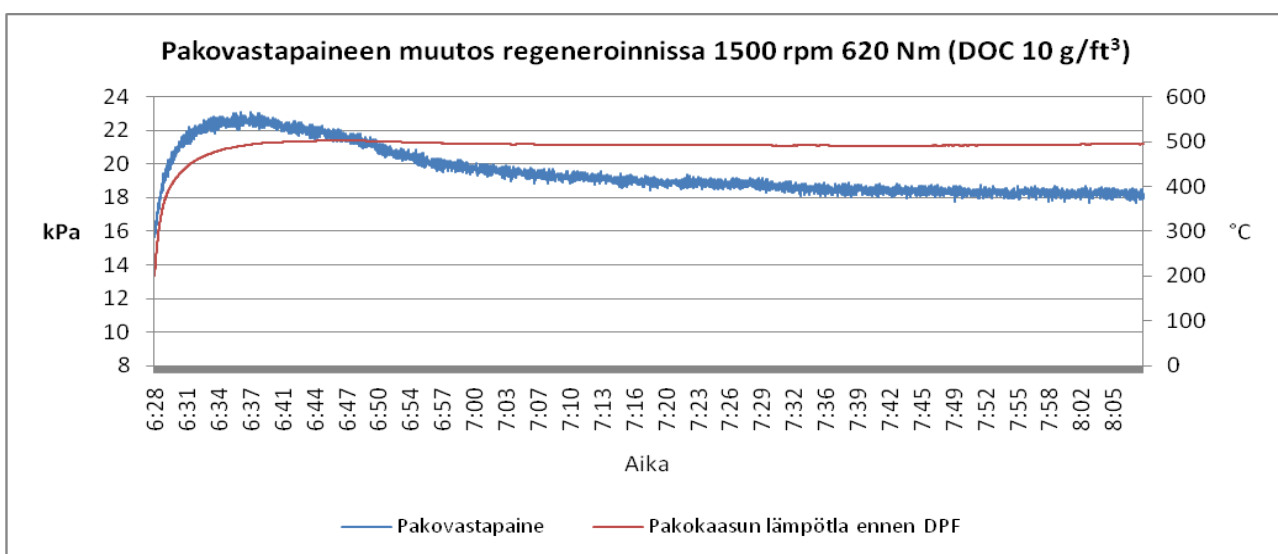


Kuvio 43 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 135 Nm sekä 500 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

DPF:n lämpötilajakauma regenerointitestissä 1500 rpm ja 135 Nm on nähtävissä kuviossa 44. DPF:n lämpötila moottorin puoleisessa päässä oli 135 Nm- testin alussa noin 9 °C korkeampi ja lopussa noin 3 °C korkeampi kuin DPF:n sisään menevän pakokaasun lämpötila. DPF:n lämpötila takapäässä oli puolestaan noin 10 °C matalampi kuin pakokaasun lämpötila lähes koko testin ajan, mikä aiheuttaa epäilyksiä DPF:n loppupään mittauksien luotettavuudesta. DPF:n loppupään lämpötila mitattiin alhaisemmaksi kuin pakokaasun lämpötila DPF:n jälkeen. Tämän vuoksi DPF:n loppupään lämpötilan arvoihin kannattaa suhtautua varauksella.



Kuvio 44 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm 135 Nm ja 500 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

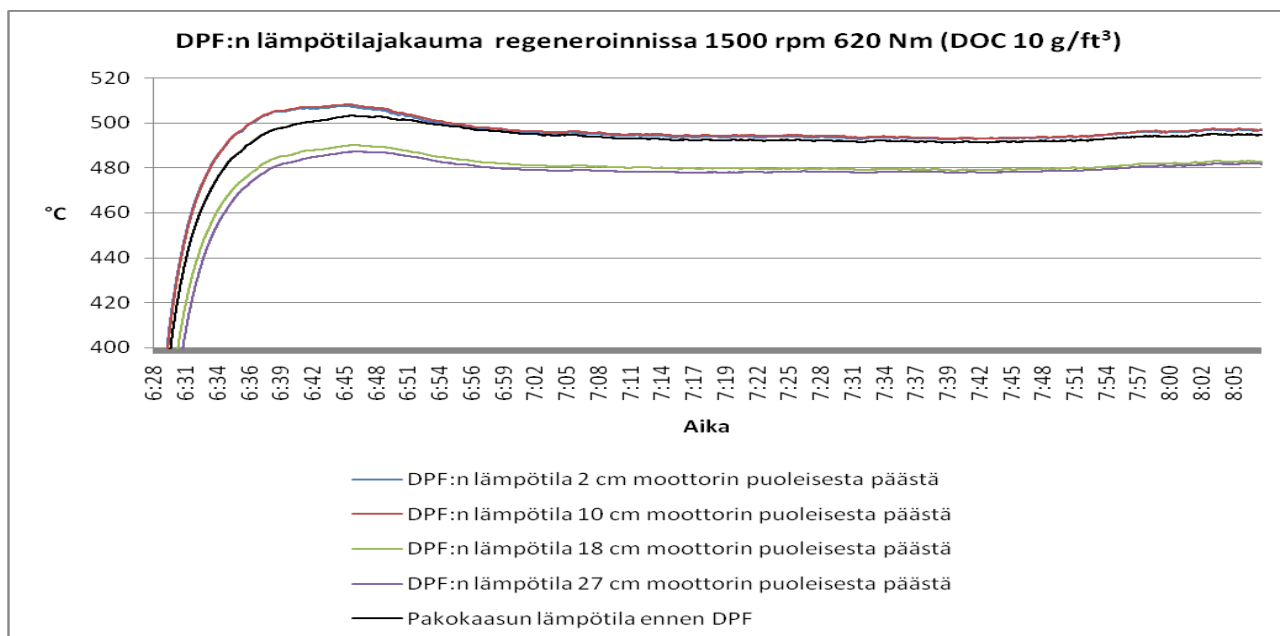


Kuvio 45 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä)

Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm on nähtävissä kuviossa 45. Vastapaine putosi regeneroinnissa jyrkimmin heti alussa 23,05 kPa:sta 19,7 kPa:iin noin 25 minuutissa ja tämän jälkeen vastapaineen putoaminen oli tasaista 18 kPa:han asti. Jyrkimmän pudotuksen jälkeen meni noin tunti,

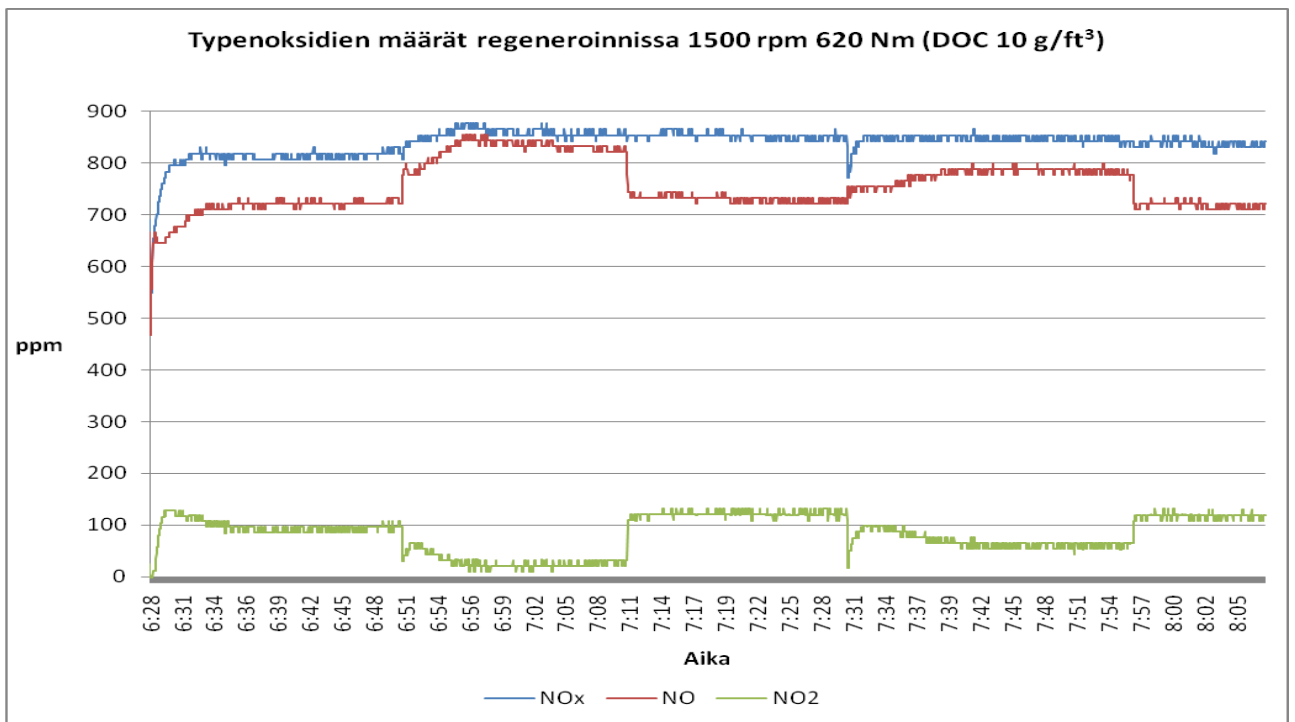
ennen kuin suodatin oli täysin tyhjä ja vastapaineen lasku alkoi tasaantua. Regeneroinnissa pakokaasun lämpötila oli 493 °C:ta.

DPF:n lämpötilajakauma regenerointitestissä 1500 rpm ja 620 Nm osoitti, että pakokaasun lämpötilalla ja DPF:n lämpötilalla ei ollut kovinkaan suurta eroa alun noin 5 °C eron jälkeen, vaan ero pysyi testin aikana 2–3 °C välillä. Tämä oli hieman odotuksista poikkeavaa, sillä odotuksissa oli, että DPF:n lämpötila olisi selvästi korkeampi regeneroinnin aikana kuin pakokaasun lämpötila ennen DPF:ä. Myös DPF:n lämpötilan mataluus regeneroinnin aikana suodattimen takapäässä oli hieman outoa, sillä lämpötilan odotettiin olevan lähempänä pakokaasun lämpötilaa ennen DPF:ä. Toisaalta muissakin testeissä DPF:n lämpötila loppupäässä oli alhaisempi kuin pakokaasun lämpötila DPF:n jälkeen, joten DPF:n loppupään antureissa saattoi olla vikaa ja lämpötila-arvoihin kannattaa suhtautua varauksella. Lämpötilajakauma on nähtävissä kuviossa 46.



Kuvio 46 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

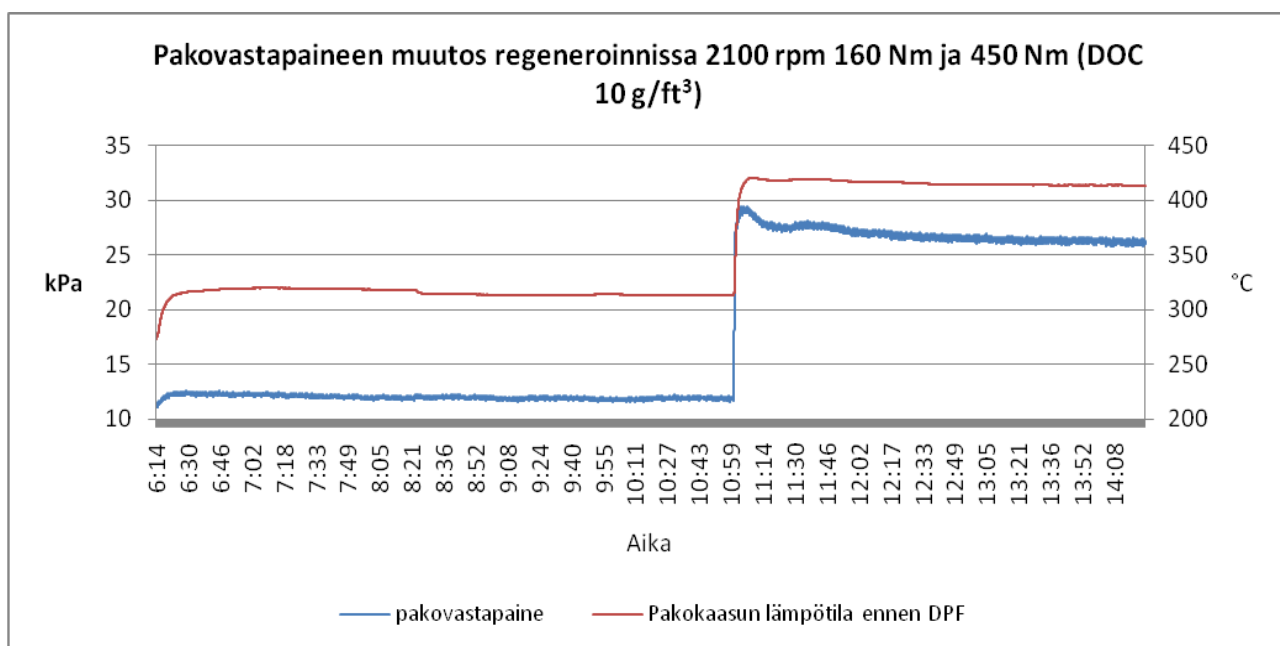
Typenoksideja mitattiin testeissä kahdesta kohtaa, ennen ja jälkeen DPF:n. Mittapistettä vaihdeltiin tietyin väliajoin testien aikana. Kuviossa 47 on kuvattuna typenoksidien määrät regenerointitestissä 1500 rpm ja 620 Nm. Testin alussa mittapiste oli ennen DPF:ä, mikä selittää NO_2 -pitoisuuden korkean määrän, noin 100 ppm. Kuvion mukaan noin klo 6.51 mittapiste vaihdettiin DPF:n jälkeiseksi. Tällöin NO_2 -määrä oli tippunut noin 20 ppm:iin eli melkein kaikki NO_2 oli käytetty DPF:ssä hiukkasten hapettamiseen. NO_2 -pitoisuus oli kasvanut klo 7.31 alkavassa mittauksessa DPF:n jälkeen, mikä tarkoittaa sitä, että suodatin käytti vähemmän NO_2 :ia suodattimessa vielä olevien hiukkasten hapettamiseen. Näin ollen kyseisessä ajankohdassa regenerointi oli hieman hiipunut, mikä voidaan havaita kuviosta 45.



Kuvio 47 Typenoksidien määrät regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

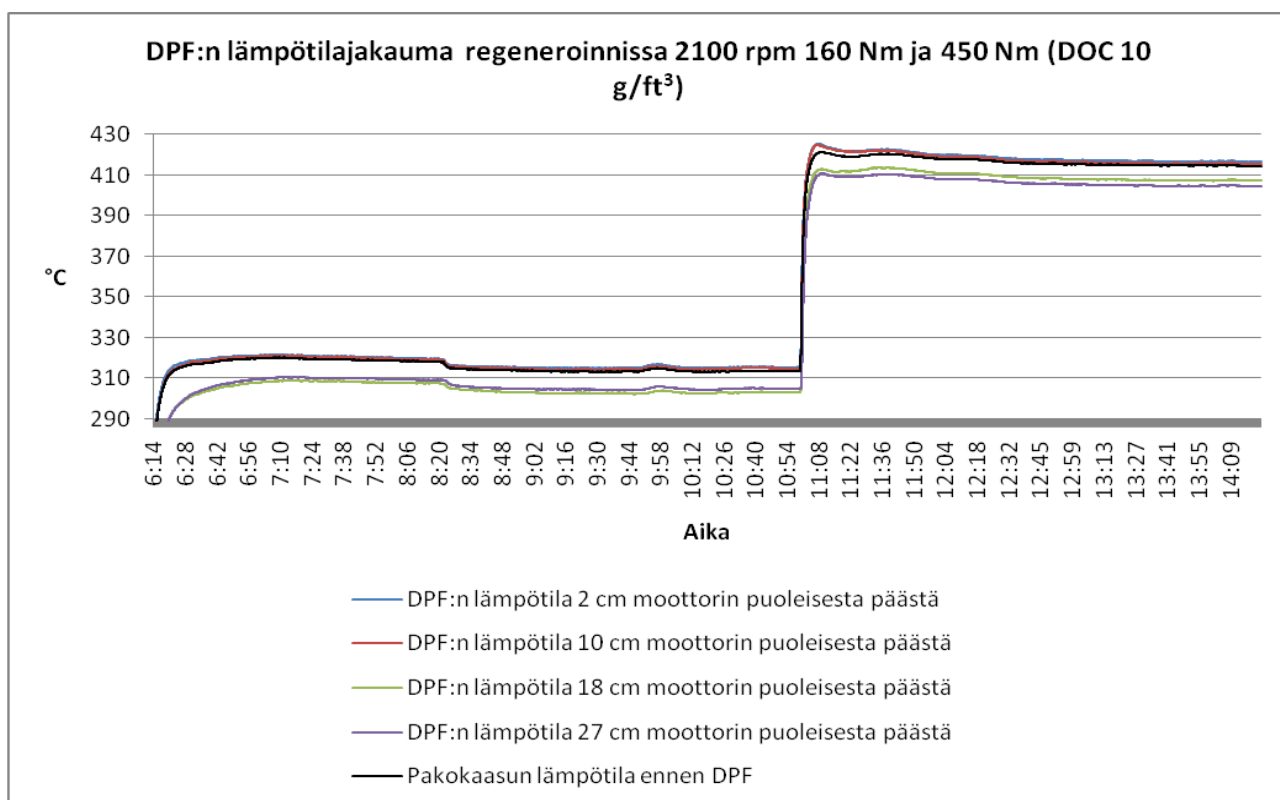
Regeneroinnit 2100rpm

Vastapaineen muutos oli erittäin pientä 2100 rpm nopeudella ja 160 Nm momentilla, eli pisteessä juuri balance pointin yläpuolella. Vastapaine laski 12,4 kPa:sta 11,7 kPa:iin neljässä ja puolessa tunnissa, minkä jälkeen momentti nostettiin 450 Nm, jotta suodatin saatiin regeneroitua kokonaan. Jotta suodatin olisi saatu puhdistettua kokonaan 160 Nm momentilla, olisi sitä pitänyt regeneroida 25 tuntia. Suodatin ei olisi edes välttämättä puhdistunut kokonaan, sillä lämpötilan ollessa juuri balance pointin yläpuolella (320 °C), olisi vastapaineen lasku voinut tasaantua jo aiemmin. Täten oli tärkeää nostaa kuormaa, jotta suodatin tyhjentyisi kunnolla. Kuviossa 48 on kuvattuna vastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm nopeudella ja 160 Nm sekä 450 Nm momenteilla.



Kuvio 48 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

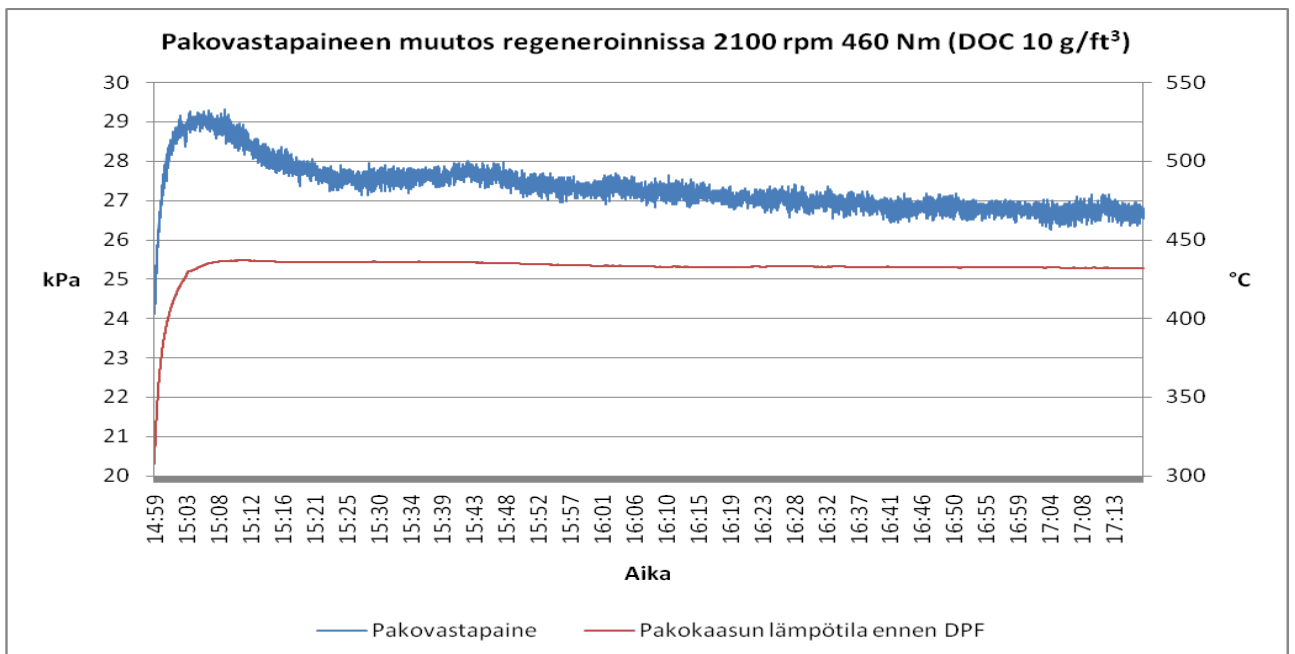
DPF:n lämpötilajakauma regenerointitestissä 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm on nähtävissä kuviossa 49. Lämpötilajakauma eteni hyvin samaan tapaan kuin 1500 rpm ja alhaisella momentilla ajettu regenerointi. DPF:n moottorin puoleisen päädyn lämpötila oli 2 °C korkeampi kuin pakokaasun lämpötila ja momentin noustessa 450 Nm oli lämpötilaero alkuun 5 °C tasoittuen loppua kohti. DPF:n lämpötila toisessa päässä oli puolestaan noin 10 °C matalampi koko regeneroinnin ajan. DPF:n loppupään lämpötilojen arvoihin kannattaa suhtautua varauksella, sillä pakokaasun lämpötila DPF:n jälkeen oli korkeampi kuin DPF:n loppupään lämpötila.



Kuvio 49 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

Pakovastapaine putosi aluksi jyrkästi 2100 rpm nopeudella ja 460 Nm momentilla ajatussa regeneroinnissa. Pakokaasun lämpötila regeneroinnissa oli 435 °C

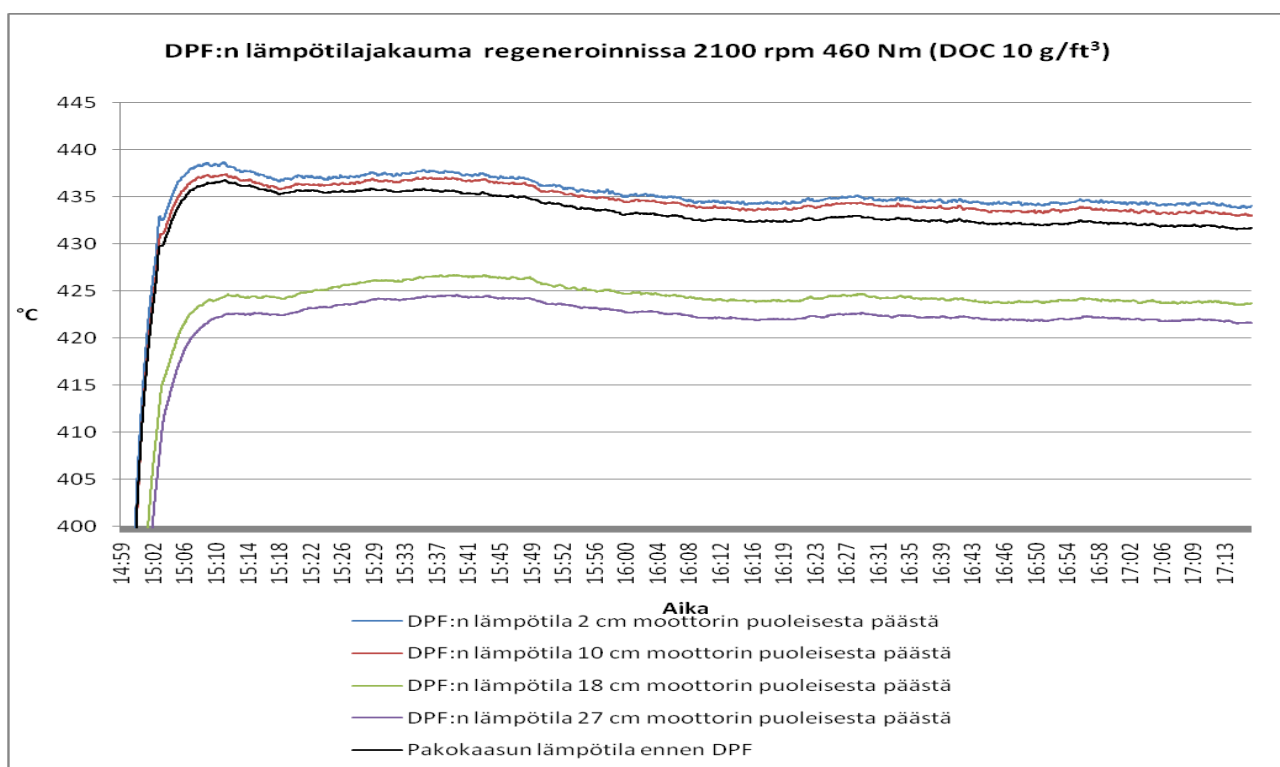
ja vastapaine putosi 29,1 kPa:sta 15 minuutissa 27,5 kPa:iin, minkä jälkeen se laski tasaisesti 26,5 kPa:iin tunnin ja 45 minuutin aikana. Tällä nopeudella pakokaasun tilavuusvirta oli paljon suurempi kuin 1500 rpm pyörimisnopeudella, mikä aiheutti NO₂:lle lyhyemmän viipymäajan suodattimessa. Vaikkakin suodatin ei ehtinyt käyttämään kaikkea NO₂:a regeneroinnin alussa (liite 1. 4/8 & 5/8), suurempi tilavuusvirta kuljetti sitä enemmän suodattimen läpi ajan suhteen, kuin 1500 rpm 620 Nm testissä. Tästä johtui suodattimen aiheuttaman vastapaineen nopeampi putoaminen. Regeneroinnin lopussa vastapaine näytti taasaantuvan, joten voitiin olettaa suodattimen olevan tyhjä. Tämä on havainnollistettuna kuviossa 50.



Kuvio 50 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

DPF:n lämpötila 2 cm moottorin puoleisesta päästä oli testin alkupäässä 438 °C, jonka jälkeen se laski muiden lämpötilojen kanssa samaa tahtia regeneroinnin

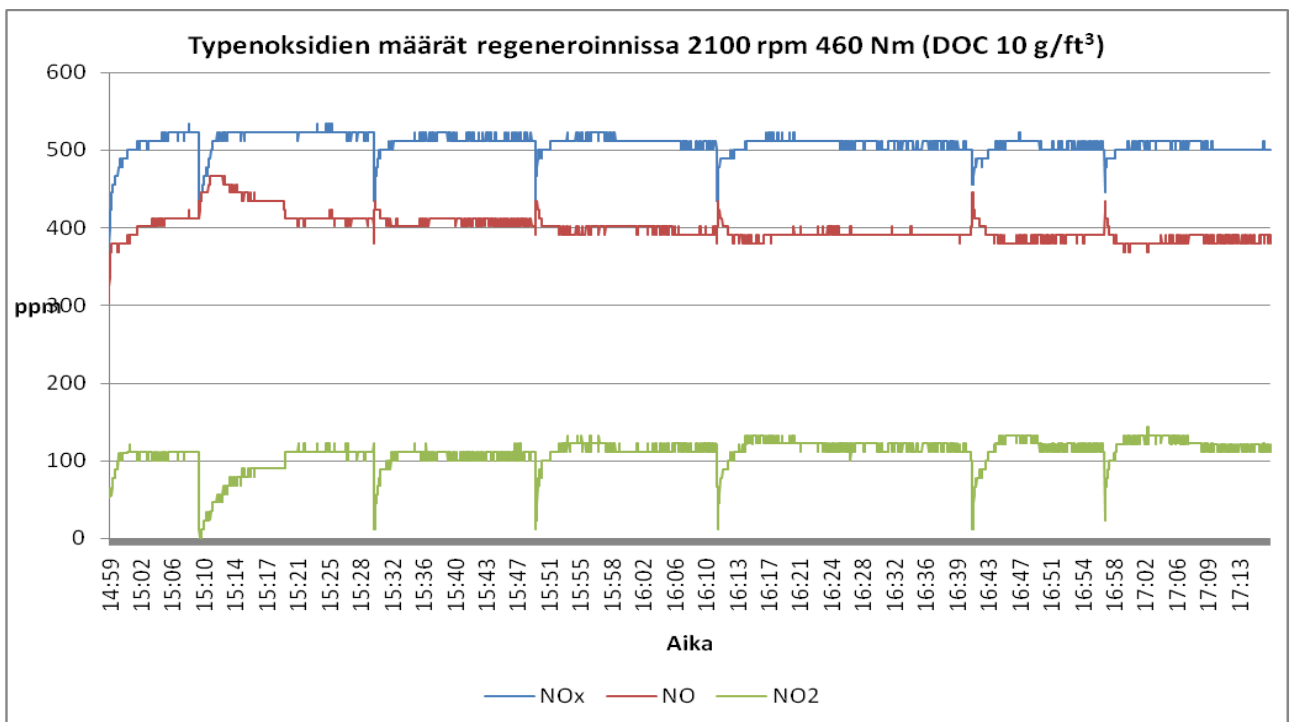
edetessä. Pakokaasun lämpötila pysyi lähes koko regeneroinnin ajan 3 °C alhaisempana kuin DPF:n alkupään lämpötila. Tämä tuntui oudon matalalta verrattuna siihen, että hiukkasia poltettiin juuri pois suodattimesta. DPF:n loppupään lämpötila oli hieman yli 10 °C matalampi kuin pakokaasun lämpötila koko regeneroinnin aikana. Pakokaasun lämpötila DPF:n jälkeen oli kuitenkin korkeampi kuin DPF:n loppupään. Tämä aiheutti pientä epäilyä lämpötilamittauksen luotettavuuteen, sillä matalat lämpötilat suodattimen loppupäässä saattoivat johtua anturiviasta. DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm on nähtävissä kuviossa 51.



Kuvio 51 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

Typenoksidien määrät regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm ovat nähtävissä kuviossa 57. Kuviosta huomataan, että NO-määrät laskivat kokoajan

regeneroinnin edetessä ja NO₂-määrät nousivat regeneroinnin edetessä. Tästä voimme päätellä, että hiukkasten hapettaminen pois suodattimesta hidastuu testin edetessä ja tämän voimme todistaa kuviolla 50. Testissä oli kaksi mittapistettä, ennen ja jälkeen DPF:n, ja testi aloitettiin mittapisteesä, joka sijaitsi ennen DPF:ää. Tämän jälkeen mittapistettä vaihdeltiin 10 minuutin välein. NO₂-määrät pysyivät kokoajan suhteellisen korkeina verrattuna 1500 rpm ja 620 Nm testiin, mutta oletettavasti NO₂ ei ehtinyt reagoimaan yhtä hyvin hiukkasten kanssa nopeamman pakokaasun virtausnopeuden takia. Kuvion 52 arvoihin kannattaa suhtautua varauksella, sillä ennen DPF:ää NO₂-määrän pitäisi olla suurempi kuin DPF:n jälkeen. Ellei suodatin ole jo täysin tyhjä hiukkasista tai suodattimen platinatiheys tuottaa lisää NO₂-päästöjä.



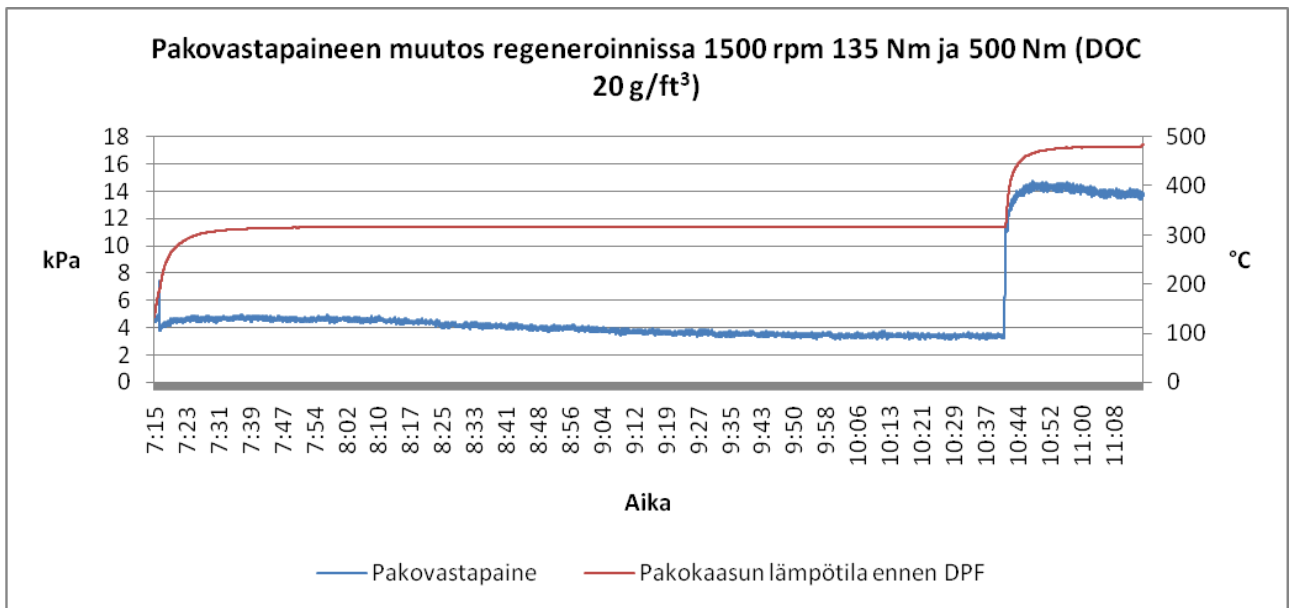
Kuvio 52 Typenoksidien määrät regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 10 g/ft³ platinamäärä).

7.4.2 DOC 20 g/ft³ platinamäärällä

Regenerointitesti suoritettiin DOC:lla, jossa on 20 g/ft³ platinamäärä nopeuttamassa päästöjen hapettumista. Odotuksena oli, että testit tällä DOC:lla tuottaisivat paremmat tulokset kuin toisella DOC:lla. Platinalatauksen määrä kaksinkertaistui toiseen DOC:iin verrattuna, joten NO hapettui NO₂:ksi paljon paremmin. Näin ollen regenerointiaikojen pitäisi pudota verrattuna aiemmin esitettyihin tuloksiin.

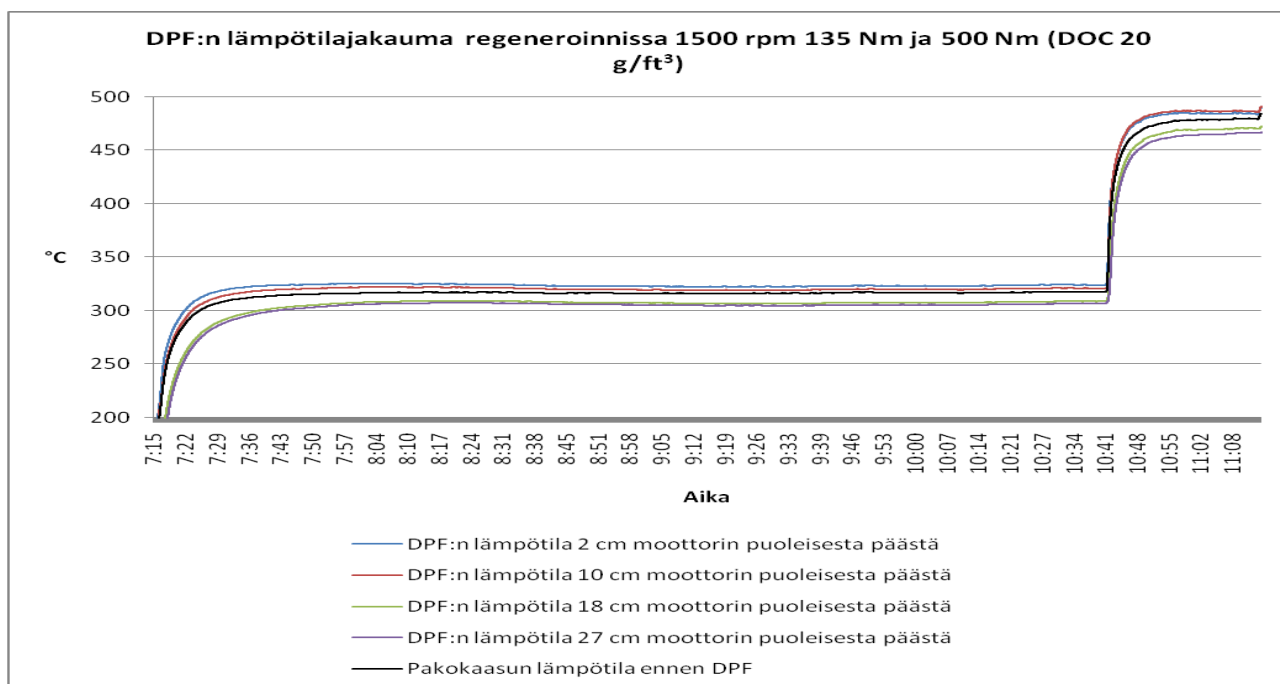
Regeneroinnit 1500rpm

Kuviossa 53 on kuvattuna pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 135 Nm sekä 500 Nm. 135 Nm momentilla ajettu regenerointi oli lämpötilapisteinä juuri yli balance pointin (316 °C) ja vastapaine putosi 4,85 kPa:sta reilun kolmen tunnin aikana 3,4 kPa:iin. Regeneroinnissa 135 Nm momentilla vastapaine alkoi tasaantua testin loppupäässä, eli pakokaasun NO₂-pitoisuus ei riittänyt puhdistamaan suodatinta kokonaan. Momenttia päätettiin nostaa 500 Nm asti, jotta suodatin pystyttiin tyhjentämään kokonaan korkeamman lämpötilan avulla (478 °C). Pakovastapaine putosi vielä 14,7 kPa:sta puolen tunnin aikana 13,5 kPa:iin. Kokonaisuudessaan tämä regenerointitapahtuma oli odotuksen mukaisesti nopeampi, kuin heikommalla DOC:lla suoritettu.



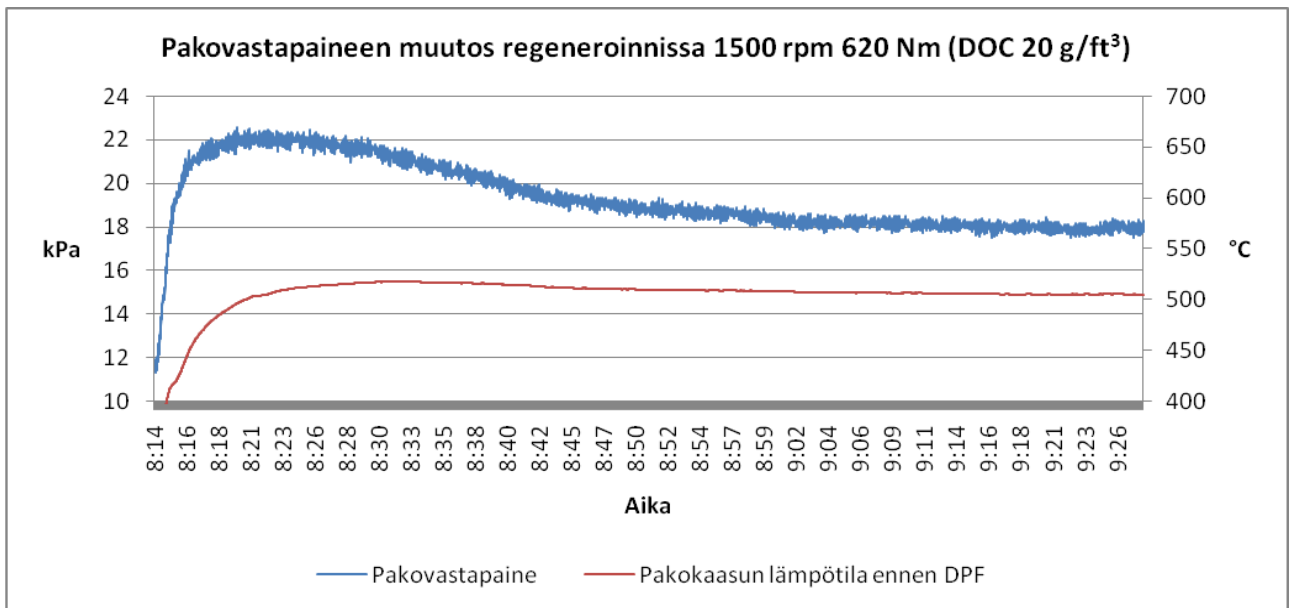
Kuvio 53 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 135 Nm sekä 500 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

DPF:n lämpötila 2 cm moottorin puoleisesta päästä oli 135 Nm testin alussa 10 °C korkeampi kuin pakokaasun lämpötila. Alun jälkeen lämpötilaero tasaantui 8 °C asteeseen. Tämä suurempi lämpötilaero johtui paremmasta hapetuskatylysaattorista, sillä 20 g/ft³ platinaa sisältävä DOC hapetti tehokkaammin NO:ta NO₂:ksi, joten NO₂:ta oli noin 20 ppm enemmän hiukkassuodattimessa kuin toisella DOC:lla. Tämä puolestaan johti hiukkasten parempaan hapettumiseen eli palamiseen pois suodattimesta ja näin ollen suurempaan lämpötilan nousuun kuin heikommalla DOC:lla. DPF:n lämpötilajakauma on nähtävissä kuvioista 54.



Kuvio 54 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm ja 135 Nm sekä 500 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Regenerointi 1500 rpm nopeudella ja 620 Nm momentilla on kuvattuna kuviossa 55. Vastapaine nousi ennen regenerointia 22,49 kPa asti ja se laski regeneroinnin alkaessa noin 20 minuutissa 19,1 kPa:han. Tämä oli noin 10 minuuttia nopeammin kuin heikommalla DOC:lla kuviossa 50. Tämän jälkeen lasku oli tasaista aina 17,6 kPa:han asti 45 minuutin aikana. Regenerointitapahtuma oli kokonaisuudessaan nopeampi kuin DOC:lla, jossa oli 10 g/ft³ platinamäärä. Pakokaasun lämpötila ennen DPF:ä oli 24 °C korkeampi kuin heikomman DOC:in testissä. Turbon jälkeinen pakokaasun lämpötila oli 10 °C suurempi kuin toisella DOC:lla tehdyissä testissä. Nämä vaikuttavat osittain nopeampaan regeneroitumiseen.

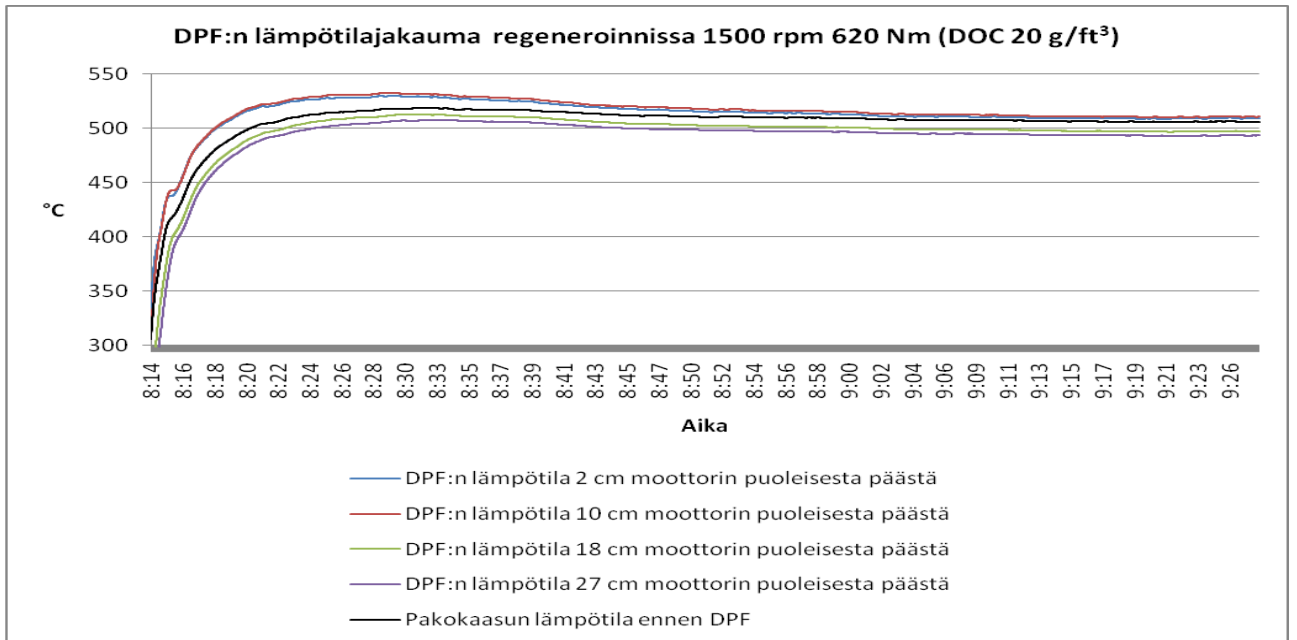


Kuvio 55 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

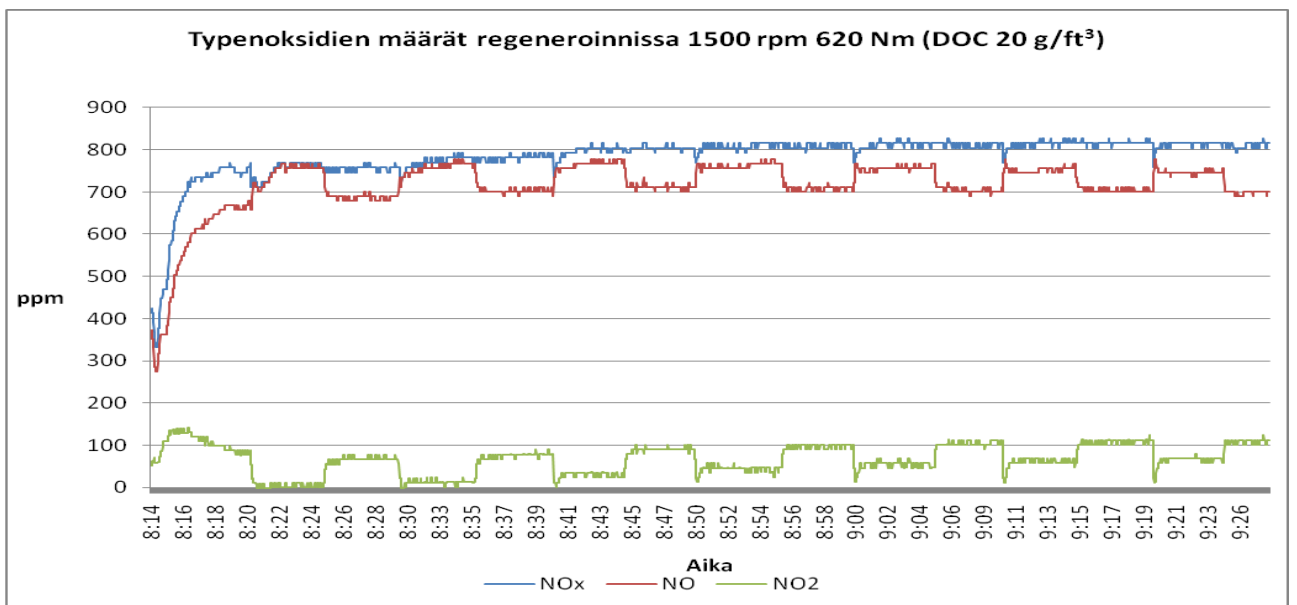
DPF:n lämpötila moottorin puoleisessa päässä oli regeneroinnin alussa 530 °C ja pakokaasun lämpötila oli 515 °C. Tämän jälkeen lämpötilaero laski tasaisesti regeneroinnin edetessä kunnes pakokaasun lämpötila oli 3 °C alhaisempi kuin DPF:n moottorin puoleisen päädyn. Lopun lämpötilaeron tasoittumisen voi selittää suodattimen tyhjentymisellä hiukkasista. Tällöin hiukkasten polttaminen pois suodattimesta vähenee ja lämpötilaerot tasaantuvat. DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm on nähtävissä kuviossa 56.

Typenoksidien määrät regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm on nähtävissä kuviossa 57. Testissä oli kaksi mittapistettä, ennen ja jälkeen DPF. Testissä vaihdettiin mittapistettä 5 minuutin välein aloittaen mittapistestä, joka oli ennen DPF:ää. Kuten kuvioista nähdään, kulutti DPF lähes kaiken NO₂:n testin alussa, kun vastapaine putosi nopeasti. Alun regeneroinnin aikana NO₂:ta ei päässyt DPF:n ohi juuri ollenkaan, sillä lähes kaikki käytettiin hiukkasten hapettami-

seen. Lopussa vastapaineen lasku oli enää tasaista ja NO₂:ta pääsi suodattimen läpi yhä enemmän ja enemmän.



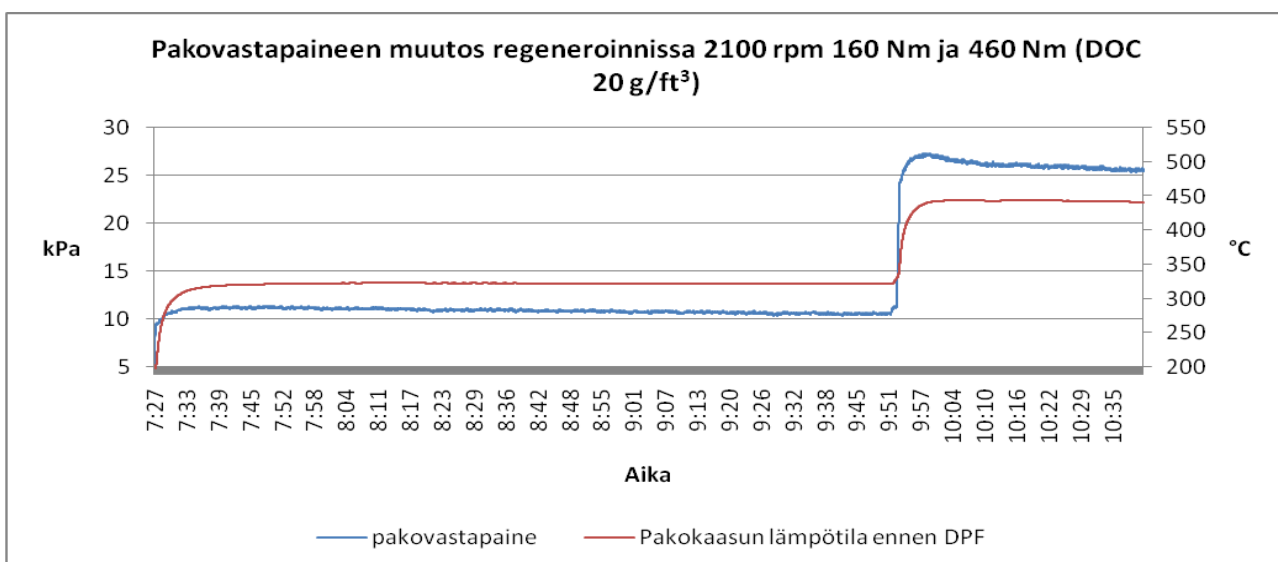
Kuvio 56 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).



Kuvio 57 Typenoksidien määrät regeneroinnissa 1500 rpm ja 620 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Regeneroinnit 2100rpm

Kuviosta 58 on nähtävissä pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm. Vastapaine putosi 11,3 kPa:sta 10,53 kPa:iin kahden ja puolen tunnin aikana. Toisella DOC:lla kului neljä ja puoli tuntia saman tuloksen saavuttamiseen. Pakokaasun lämpötila oli 160 Nm regeneroinnissa 321 °C. Jotta suodatin olisi regeneroitunut tyhjäksi asti 160 Nm momentilla ja 321 °C lämpötilalla, olisi regeneroinnin pitänyt jatkua 13 tuntia. Tämä oli lähes puolet vähemmän kuin heikommalla DOC:lla kuviossa 52.

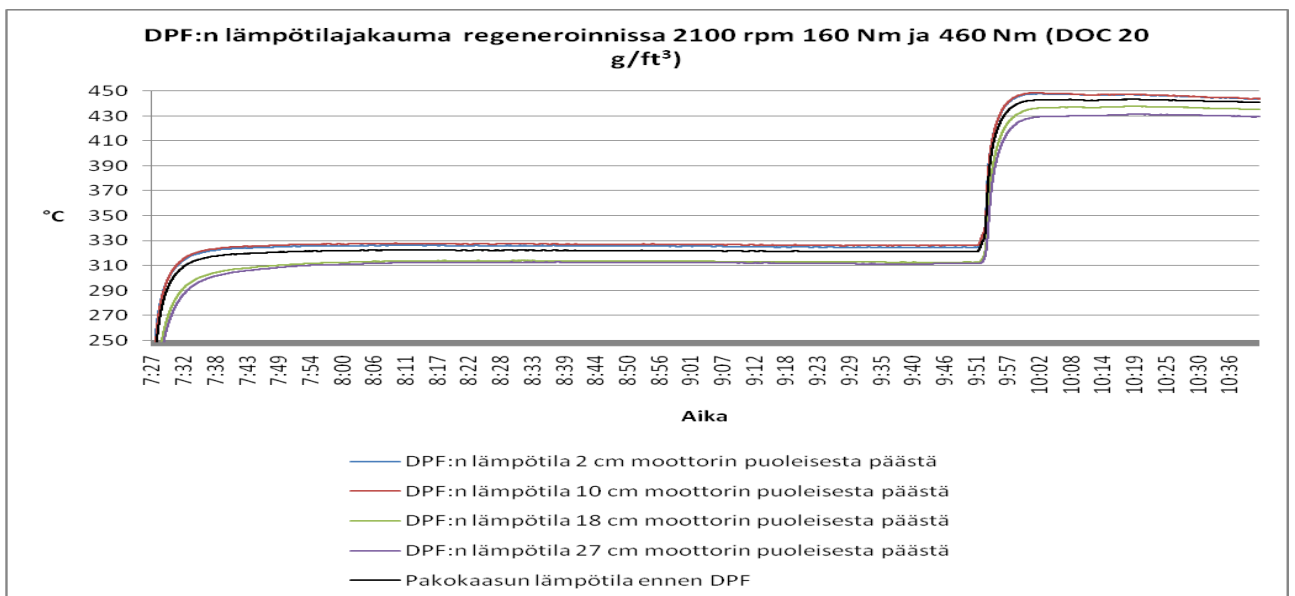


Kuvio 58 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

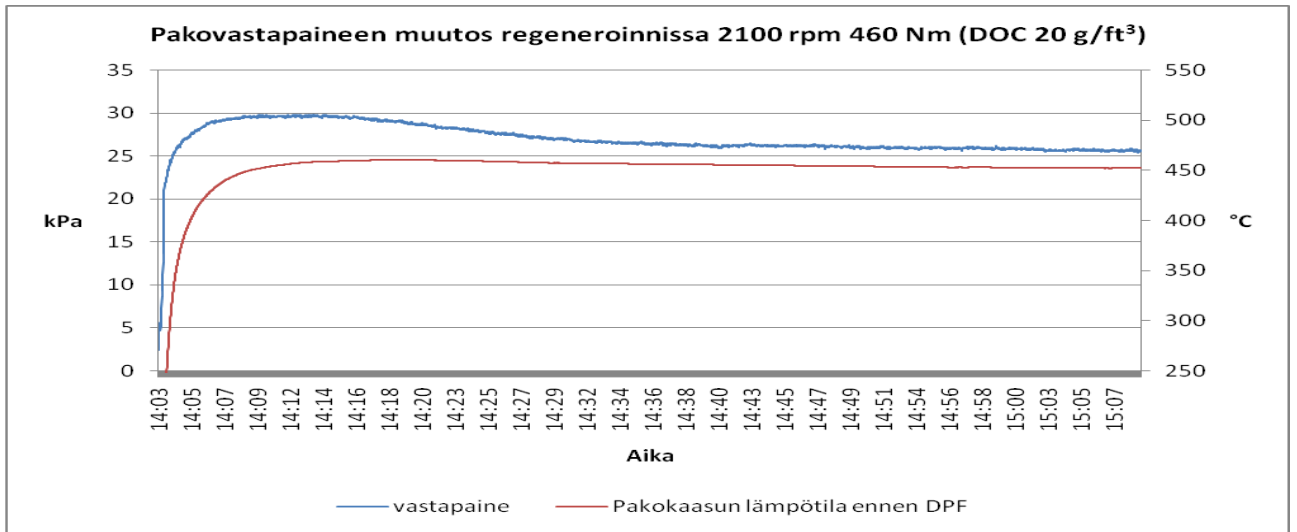
DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm on nähtävissä kuviossa 59. Pakokaasun lämpötila ennen DPF:ä oli 160Nm regeneroinnissa keskimäärin 5 °C vähemmän kuin DPF:n lämpötila moottorin puoleisessa päässä. 450 Nm regeneroinnissa lämpötilaero vaihteli 5-4 °C välillä.

DPF:n toisen pään lämpötila pysyi puolestaan lähes poikkeuksetta testissä kuin testissä 10 °C matalampana kuin pakokaasun lämpötila ennen DPF:ä.

Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm tapahtui aluksi nopeasti, minkä jälkeen vastapaine putosi tasaisesti. Kuviossa 60 on kuvattuna pakovastapaineen muutos kyseisessä regeneroinnissa. Vastapaine lähti laskemaan arvosta 29,7 kPa ja laski 15 minuutissa 26,6 kPa:iin, minkä jälkeen vastapaineen putoaminen jatkui tasaisesti aina 25,4 kPa:iin asti. Vastapaineen tasaiseen putoamiseen kului aikaa 35 minuuttia. Pakokaasun lämpötila oli regeneroinnissa 460 °C ja 452 °C välillä. Kokonaisuudessaan regenerointi oli nopeampi kuin toisella DOC:lla, vaikkakin jyrkimpään pudotukseen kului sama aika molemmissa testeissä. Tosin 20 g/ft³ platinalatauksen DOC pudotti vastapainetta enemmän samassa ajassa.

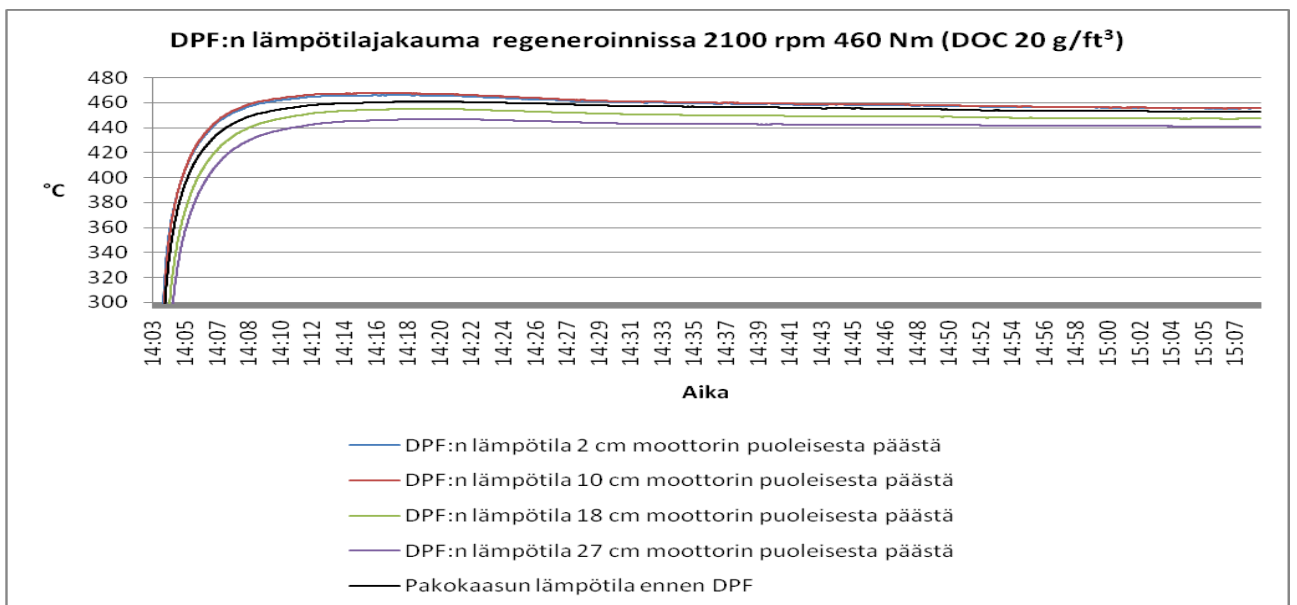


Kuvio 59 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 160 Nm sekä 450 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).



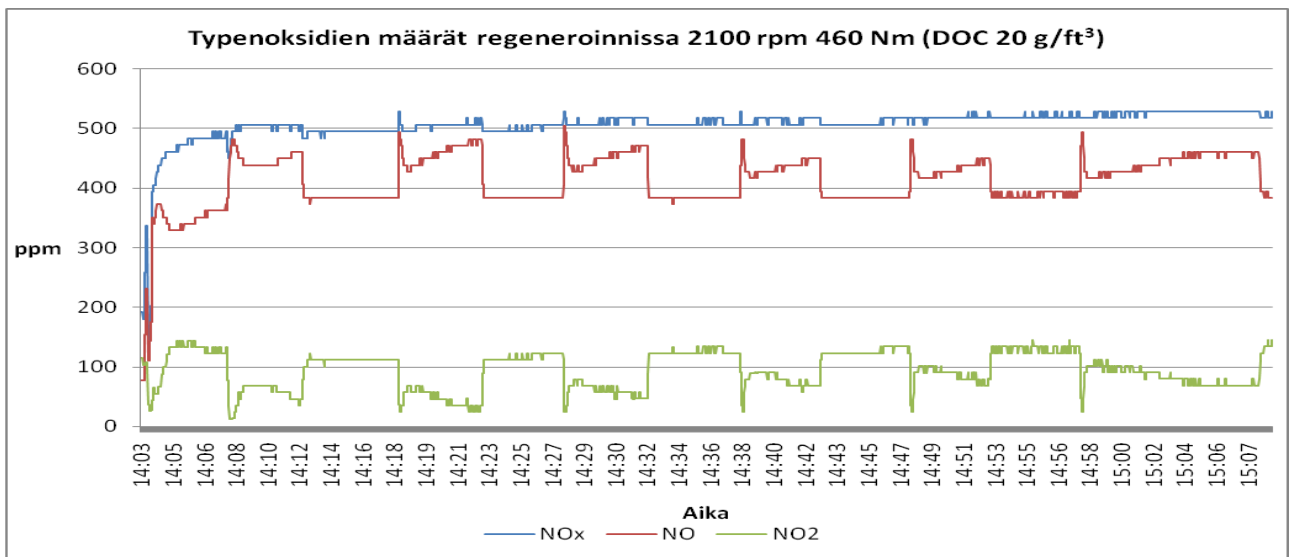
Kuvio 60 Pakovastapaineen muutos regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm on kuviossa 61. Regeneroinnin alussa DPF:n lämpötila moottorin puoleisessa päässä oli 467 °C ja pakokaasun lämpötila oli 458 °C. Regeneroinnin lopussa lämpötilaero kaventui 3 °C asteeseen.



Kuvio 61 DPF:n lämpötilajakauma regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Typenoksidien määrät regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm ovat nähtävissä kuviossa 62. Testissä oli kaksi mittapistettä, ennen ja jälkeen DPF. Testi aloitettiin mittapistestä ennen DPF:ä ja sitä vaihdeltiin 5 minuutin välein. Testissä oli nähtävissä, kuinka NO₂-pitoisuus kasvoi regeneroinnin edetessä ja näin ollen regeneroituminen hidastui kokoajan. Regeneroitumisen hidastuminen voidaan todeta myös kuvioista 65. Kuvion arvoihin DPF:n jälkeen kannattaa suhtautua varauksella.



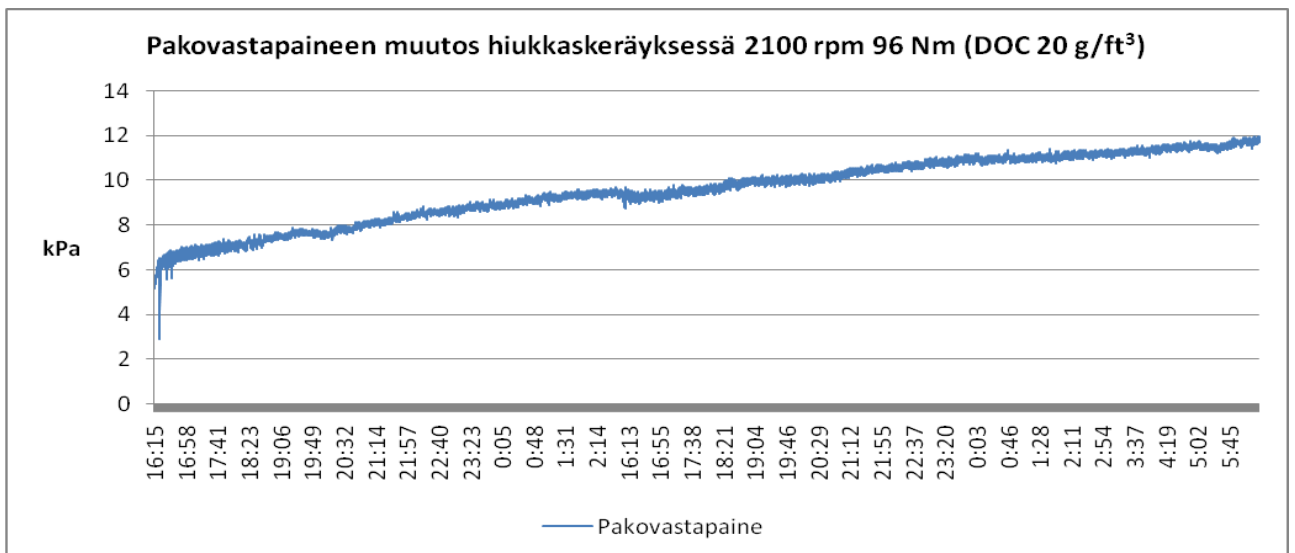
Kuvio 62 Typenoksidien määrät regeneroinnissa 2100 rpm ja 460 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

7.5 Epätäydellinen regenerointi

Lopuksi testattiin hiukkassuodattimen käyttäytymistä, kun regenerointi on epätäydellinen, eli regenerointi lopetetaan laittamalla moottori joutokäynnille. Tällöin hapen määrän pitäisi kasvaa pakokaasussa, ja koska lämpötila on regeneroinnin jäljiltä vielä suuri, on odotettavissa lämpötilan äkillistä kasvua, sil-

lä suodatin alkaa polttaa hiukkasia pois hapen avulla yli 500 °C:ssa. Koska pakokaasun massavirta on joutokäynnin seurauksena pieni, ei lämpöä siirry pois ja lämpötila suodattimessa pysyy korkeana.

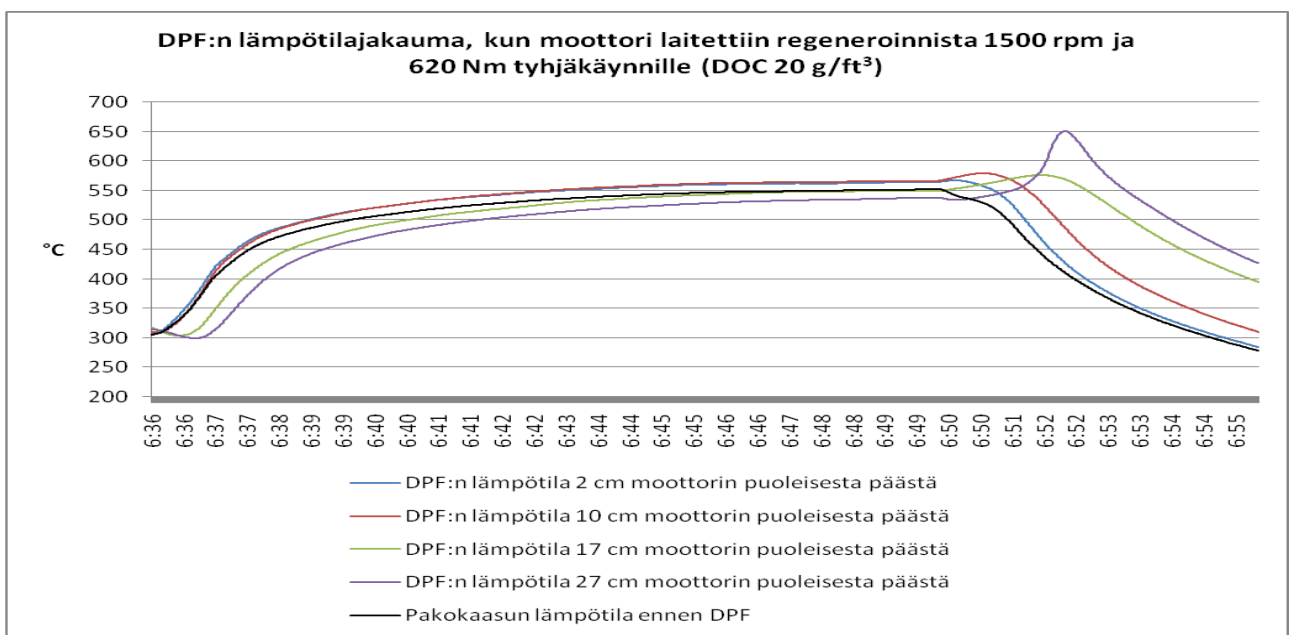
Suodatinta päätettiin täyttää enemmän kuin regenerointitesteissä, jotta saataisiin selvä lämmön nousu pikki aikaiseksi. Kuviossa 63 on kuvattuna hiukkaskeräys tätä testiä varten. Vastapaineen annettiin nousta 5,5 kPa:sta 12 kPa:iin, mikä oli noin 2 kPa:ia enemmän kuin aiemmissa testeissä. Suodattimen laskennallinen, hiukkaspäästömittaukseen perustuva täyttöaste oli tällöin 6,02 g/l.



Kuvio 63 Pakovastapaineen muutos hiukkaskeräyksessä 2100 rpm ja 96 Nm (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Regenerointi aloitettiin 1500 rpm nopeudella ja 620 Nm momentilla, jotta pakokaasusta saataisiin mahdollisimman kuumaa ennen moottorin laittamista joutokäynnille. Pakokaasun lämpötila saatiin 552 °C asti ennen joutokäynnille laittamista. DPF:n lämpötilajakauma testissä on kuvattuna kuviossa 64. DPF:n lämpötila nousi jokaisessa mittapisteessä joutokäynnille laittamisen seurauksena. Suurin nousu tapahtui kuitenkin DPF:n loppupäässä, jossa lämpötila nousi

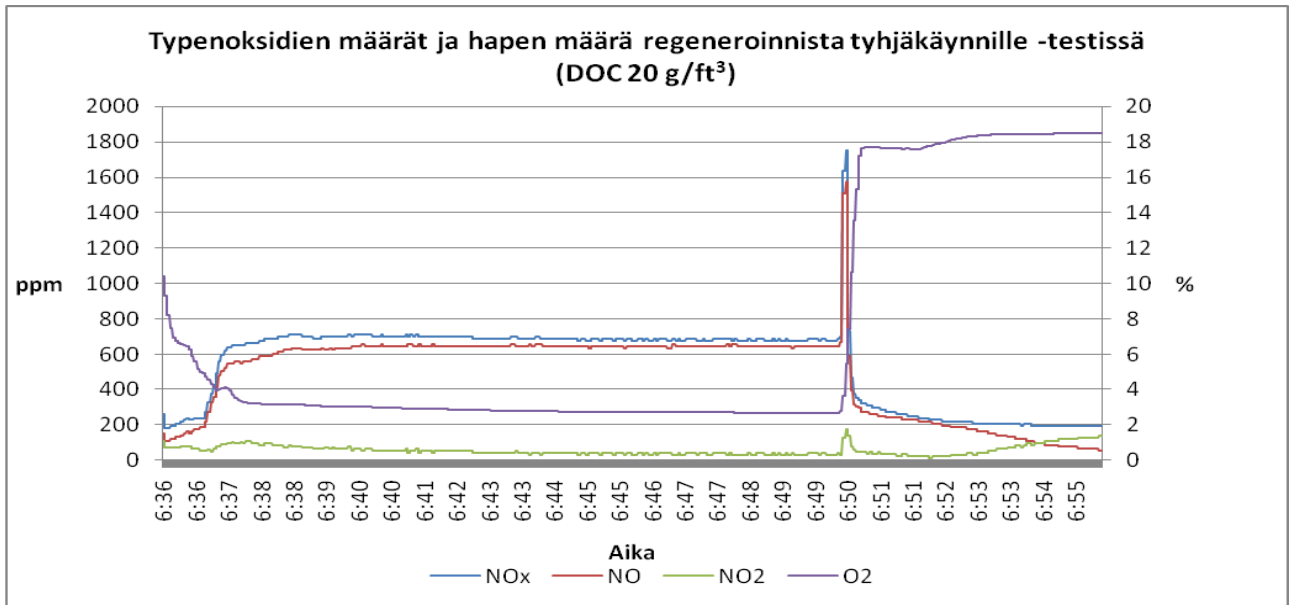
534 °C:sta 648 °C:een. Tämä ei vielä ollut tarpeeksi korkea lämpötila vikaannuttamaan suodatinta, sillä lämpötilan olisi pitänyt nousta yli 750 °C, jotta platinakatalyytti olisi voinut vioittua (Golunski 2007). Lämpötilan nousu oli kuitenkin erittäin nopeaa, sillä se tapahtui minuutin sisällä. Tällä keinolla on siis mahdollista saada suodatin sulatettua, mikäli suodattimessa on vain tarpeeksi paljon hiukkasia.



Kuvio 64 DPF:n lämpötilajakauma, kun moottori laitettiin regeneroinnista 1500 rpm ja 620 Nm joutokäynnille (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Kuviossa 65 on kuvattuna Boo Instrumentsin pakokaasuanalysaattorilla mitatut typenoksidien määrät ja hapen määrä ennen DPF:ää. Kuviosta nähdään, kuinka hapen määrä lisääntyi pakoputkistossa, kun moottori laitettiin joutokäynnille. Typenoksidien määrät puolestaan romahtivat. Tämä ilmiö oli taustalla siinä, miksi lämpötila suodattimessa nousi yhtäkkiä yli 100 °C. Tämän takia regenerointi pitää suorittaa siten, että moottori ei joudu missään regeneroinnin vaiheessa joutokäynnille, sillä vaarana on suodattimen sulaminen. Tämä voi-

daan estää asettamalla suodattimen keräämälle noelle jokin tietty raja. Tällöin varoitusjärjestelmä voi ilmoittaa kuljettajalle suodattimen olevan täynnä. Kuviossa 65 näkyvä NO_x -, NO - ja NO_2 -päästöjen piikki syntyi siitä, että pyörimisnopeus pieneni nopeasti, mutta momentti oli vielä suuri.



Kuvio 65 Typenoksidien määrät ja hapen määrä regeneroinnista joutokäynnille -testissä (DOC, jossa 20 g/ft³ platinamäärä).

Jotta suodatin olisi vikaantunut, sitä olisi tarvinnut täyttää vieläkin enemmän, eli antaa vastapaineen nousta vielä korkeammaksi. Tällöin lämpötilapiikki olisi luultavasti ollut suurempi.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulokset vastasivat hyvin odotuksia. Suodattimen balance point oli hyvin lähellä odotettuja arvoja. Alle 300 °C lämpötiloihin päästiinkin helposti 1500 rpm nopeudella.

Yli yhden FSN:n savutuksella suodattimen täytyminen (4,5g/l) kesti yli 15 tuntia, josta voitaneen päätellä, että moottorin tavanomaisella savutuksella (0,05 FSN) suodattimen täytyminen kestää normaaleja työpäiviä tehdessä pitkän aikaa. Non-road -moottori joutuu työkäytössä erittäin usein vaihtelevaan kuormaan sekä nopeuteen, jolloin suodattimen täytyminen voi kestää hyvin kauan tai se ei mahdollisesti täyty ollenkaan. Testejä olisikin hyvä jatkaa siten, että mitataan, nouseeko suodattimen aiheuttama vastapaine vaihtelevalla kuormalla ja nopeudella. Tällöin pystyisi päättelemään, kuinka kauan suodattimen täytyminen työajossa kestää.

Suodatin täytettiin regenerointitesteissä 4,5 g/l asti ja suodattimen sulatustestissä laskennallinen, hiukkaspäästömittaukseen perustuva täyttöaste oli 6,0 g/l. Suodatin voidaan täyttää turvallisesti vastapaineesta 5,5 kPa 12 kPa:han 2100 rpm pyörimisnopeudella ja noin 90 Nm kuormalla. Tällöin suodatin on lähellä maksimi täyttöastetta (6–7 g/l) ja varsinaista vaaraa suodattimen sulamiselle ei vielä ole. Kovin paljoa enempää suodattimeen ei kannattane kerätä hiukkasia, sillä epätäydellisen regeneroinnin vaara alkaa olla liian suuri.

DPF:n ja DOC:n aiheuttama vastapaineen nousu aiheuttaa moottorille enemmän vastusta kuin pelkkä putki, jolloin moottori joutuu työskentelemään

enemmän. Tämä konkretisoituu puolestaan polttoaineen kulutuksen kasvuna, liite 1 (7/8 & 8/8). Vaikkakin polttoaineen kulutuksen kasvu on pientä, kannattaa suodatin regeneroida passiivisin keinoin niin usein kuin pystyy.

Regenerointitapahtuma oli odotuksien mukainen, sillä regeneroinnissa vastapaineen suurimpaan pudotukseen kului aikaa 15–25 minuuttia. Tämä lienee erittäin kohtuullinen aika suodattimen regeneroitumiseen. Mikäli suodattimen kuitenkin haluaa tyhjentää täysin, pitää sitä regeneroida tunnista kolmeen tuntiin, riippuen DOC:n sisältämän platinan määrästä. Vaadittava lämpötila regeneroinnin alkamiselle oli 1500 rpm pyörintänopeudella 280 °C, mikä on non-road -moottorilta hyvin saavutettavissa, sillä tehoa se vaati vain 15 kW. Suodatin tyhjentyy sitä tehokkaammin, mitä korkeammaksi lämpötila saadaan. Jos pakokaasun lämpötila on yli 550 °C, alkaa suodatin käyttää NO₂:n kanssa myös happea(O₂) hiukkasten hapettamiseen ja suodattimen tyhjentymisen on tehokkaampaa. Mitä pidemmälle regenerointitapahtuma etenee, sitä vähemmän suodatin käyttää DOC:n muodostamaa NO₂:ta hiukkasten hapettamiseen, kuten kuvioista 57 voidaan todeta. Tämä johtuu siitä, että suodattimen hiukkaspitoisuus vähenee ja NO₂:a tarvitaan hiukkasten hapettamiseen vähemmän.

Hiukkaskeräytesteissä DOC ja DPF toimivat erinomaisesti, suodattaen pakokaasusta lähes kaiken noen. DPF:n jälkeen AVL smoke meterin näyttämä savutusarvo oli 2100 rpm testeissä molemmilla hapetuskatalysaattoreilla 0,0013–0,0038 FSN:a eli hyvin pieni. Savutus DPF:n jälkeen 1500 rpm testeissä oli 0,0027–0,00425 FSN:a, mutta näillä arvoilla saavutettiin silti erittäin hyvä suodatusteho, vaikka moottorin tuottama savutus oli tässä tapauksessa pienempää kuin 2100 rpm nopeudella. Regeneroinnin aikana DOC ja DPF vähensivät hiukkaspäästöjä myös hyvin, sillä DPF:n jälkeinen FSN-arvo oli keskimäärin 0,005

riippumatta testistä. Savutus laski DOC:n ja DPF:n asennuksen myötä keskimääräisestä 1 FSN:n savutuksesta 0,005 FSN:n savutukseen. Moottori savutti enemmän suurilla kuormilla, joten DOC:n ja DPF:n hyötysuhde oli silloin erittäin korkea.

DPF:n lämpötilajakauma ei ollut aivan odotettu. Lämpötilaerot olivat maksimissaan noin 15 °C ja keskimäärin noin 5–10 °C. oletus oli, että hiukkasia poltettaessa NO₂:n avulla syntyisi enemmän lämpöä, joka lämmittäisi suodatinta. Suodattimen epätäydellisessä regeneroinnissa lämpötila saatiin nousemaan yli 100 °C hyvin lyhyessä ajassa laittamalla moottori kesken regeneroinnin joutokäynnille. Suodattimessa olisi todennäköisesti pitänyt olla enemmän hiukkasia, jotta sulamisvaara olisi ollut. Suodattimen lämpötila nousi 650 °C lämpötilaan, josta voidaan päätellä, että suodattimen sisältämä hiukkaspitoisuus oli vielä turvallisissa rajoissa. Suodattimen vastapaine nousi testissä 5,5 kPa:sta 12 kPa:han eikä sinne voi kerätä kovin paljoa enempää hiukkasia. Tällöin on vaarana, että platina saattaisi vioittua, jolloin DPF:n toiminta heikkenee. Suodattimien kennot kestävät yli 1000 °C asteen lämpötiloja, joten katalyytit ovat ensimmäisenä vioittumassa korkeissa lämpötiloissa.

Mikäli moottorin päästötasot tämän jälkikäsittelylaitteiston edessä muuttuisivat, olisivat tulokset erilaisia. Käytetty pakokaasun jälkikäsittelyjärjestelmä oli passiivisena riippuvainen moottorin tuottamista NO_x-päästöistä, sillä se käytti NO-päästöistä hapettamisen kautta muodostuneita NO₂-päästöjä hiukkasten polttamiseen pois suodattimesta. Jos moottori tuottaisi vähemmän NO_x-päästöjä, olisi suodattimen regeneroituminen hitaampaa, sillä DOC tuottaisi vähemmän NO₂-päästöjä hiukkasten polttamiseen. Vastaavasti taas suodattimen täyttymisnopeus olisi nopeampi, koska jos NO_x-päästöjä syntyisi vähem-

män, syntyisi hiukkasia enemmän trade-off -ilmiön takia. Mikäli moottori taas tuottaisi enemmän NO_x -päästöjä, olisi suodattimen regeneroituminen nopeampaa DOC:n tuottamien NO_2 -päästöjen vuoksi. Tällöin taas suodatintäyttö olisi hitaammin hiukkasista. Kaiken kaikkiaan suodattimen täyttymisnopeus ja regeneroitumisnopeus ovat hyvin riippuvaisia moottorin tuottamista NO_x - ja hiukkaspäästöistä. Moottorin korkeampi NO_x -päästö taso johtaisi suodattimen balance pointin alenemiseen, sillä NO_2 -pitoisuus ennen suodatinta olisi korkeampi kuin normaalisti. NO_2 -pitoisuuden ollessa korkeampi olisi suodattimella enemmän hapetinta hiukkasille ja regeneroitumiseen vaadittu lämpötila olisi hieman matalampi. Eli passiivisen regeneroinnin vuoksi paras vaihtoehto olisi, että moottori tuottaa vähän hiukkasia ja paljon NO_x -päästöjä.

9 YHTEENVETO

Non-road -moottorien päästömääräykset ovat tiukentuneet jatkuvasti ja vuonna 2014 voimaan tulevat Euroopassa Stage 4 ja Pohjois-Amerikassa Tier 4. Nämä päästörajoitukset tiukentavat vain NO_x-päästöjä. Mahdollisesti myöhemmin tuleva Stage/ Tier 5 tulee oletettavasti rajoittamaan hiukkaslukumäärää, jonka vähentämiseen DPF toimii erinomaisesti. DPF kerää hiukkasia itseensä, minkä vuoksi vastapaine nousee suodattimen täyttyessä. Täyttymisen vuoksi suodatin täytyy aika ajoin regeneroida eli puhdistaa.

Suodattimen puhdistamiseen käytetään aktiivista, passiivista tai passiivi-aktiivista tapaa. Aktiivinen tapa käsittää hiukkasten polttamisen pois suodattimesta hapen (O₂) avulla ja tällöin pakokaasun lämpötila pitää saada lähelle 600 °C:ta. Pakokaasun lämpötilan nostoon käytetään usein ulkoista energialähdettä, kuten poltinta tai vastuksia. Passiivisessa tavassa hiukkaset poltetaan DOC:n tuottaman NO₂:n avulla ja tällöin pakokaasun lämpötilan tarvitsee olla noin 300 °C:ta. Passiivi-aktiivisessa tavassa käytetään pääasiallisesti passiivista tapaa, mutta mikäli pakokaasun lämpötila ei nouse tarpeeksi korkeaksi, voidaan regenerointi käynnistää ulkoisen energialähteen avulla.

Työn tarkoituksena oli selvittää DPF:n passiivisen regeneroinnin mahdollisuuksia AGCO Powerin moottorissa. Tavoitteena oli suodattimen toiminnallisten asioiden tutkiminen, kuten regeneroitumisen alkamislämpötila, DPF:n täyttymisnopeus ja regeneroitumisnopeus käyttäen kahta erilaista DOC:ia ennen DPF:ää. Tutkimuksista saatiin hyvin odotettuja tuloksia; käytetty järjestelmä pystyi puhdistamaan itsensä lähes automaattisesti vain pakokaasun lämpötilan

nostamisella. DPF:n täyttymisnopeus oli hidasta, vaikka moottori säädettiin savuttamaan erittäin paljon. Regeneroitumiseen aikaa meni moottorin toimintapisteestä riippuen minuuteista tunteihin. Suodattimen balance point oli teorian tukemalla tasolla. Kahdella eri DOC:lla tehdyt testit osoittivat, että enemmän platinaa sisältänyt DOC toimi tehokkaammin regeneroinnissa verrattuna vähemmän platinaa sisältäneeseen, sillä platinan määrä vaikuttaa NO₂:n muodostumiseen DOC:ssa.

Molemmat DOC:t toimivat erinomaisesti tutkimuksissa. Enemmän platinaa sisältänyt DOC ja DPF toimivat tehokkaammin suodattimen puhdistamistilanteessa ja olisivat näin ollen parempi valinta hiukkaspäästöjen poistojärjestelmäksi. Järjestelmää pystyy käyttämään non-road -moottorin pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistona passiivisessa regeneroinnissa, mikäli pakokaasun lämpötila on tarpeeksi korkea.

Työtä voisi jatkaa tutkimalla suodattimen täyttymistä ja regeneroitumista työkonekäytössä. Olisi hyvä selvittää, kuinka nopeasti suodatin täyttyy vaihtelevassa kuormassa ja nopeudessa. Näin saisi parempaa kuvaa siitä, kuinka nopeasti suodatin täyttyy työkonekäytössä ja minkälaiset regenerointivälit suodattimella pitäisi olla.

LÄHTEET

Abd-Alla, G.H. (2002). Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review: *Energy conversion and management* 43, 1027-1042. Al-Ain, Arabiemiraatit. Elsevier science Ltd. DOI: S0196-8904(01)00091-7.

AGCO Power (2012). *AGCO Tier 4 Final technology. Esitelmä AGCO Powerin tier 4 suunnitelmasta.*

AGCO Sisu Power (2008). *AGCO Sisu Powerin esitelmä päästörajoituksista.*

Amberla, Arno (2012). DPF-suodattimien maksimitäyttöaste -sähköpostiviesti. [Online]. [Siteerattu 27.9.2012]. Henkilökohtainen kommunikointi.

Anttila, Pia, Suvi Haaparanta, Anu Kousa, Tarja Lahtinen ja Raimo O. Salonen (2004). *Hiukkasia ilmassa, opas ulkoilman hiukkasien lähteistä, terveysvaikutuksista jne.* Hengityслиitto Heli ry, Ilmatieteen laitos, Ympäristöministeriö, Sosiaali- ja terveysministeriö: Helsinki. [Online]. [Siteerattu 4.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=22776>>.

AVL 415S (2005). *AVL 415S Smoke Meter: operating manual.* AVL list GmbH: Graz, Itävalta.

AVL List GmbH (2009). *AVL Micro Soot Sensor: operating manual.* AVL List GmbH: Graz, Itävalta.

Betarice, Carlo, Silvana Di Iorio, Chiara Guido & Pierpaolo Napolitano (2012). Detailed characterization of particulate emissions of an automotive catalyzed DPF using actual regeneration strategies: *Experimental thermal and fluid science* 39, 45-53. Elsevier science Ltd. Instituto Motori: Napoli, Italia.

Blackthorn. (2012). *Wall-flow filters, Hybrid regeneration*. Chichester, Englanti [Online]. [Siteerattu 2.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.blackthorn.eu.com/html/diesel-hybrid-regeneration.aspx>>.

Brand-Gaus (2004). *NO_x analyser technology*. [Online]. [Siteerattu 29.5.2012]. Cedar park: Texas, USA. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.brandgaus.com/NOxAnalyzerTechnology.htm>>.

Burtscher, Heinz, Addy W. Majewski (2012.03). *Exhaust gas sampling and conditioning*. ECOpoint inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 7.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://dieselnet.com/tech/measure_sample.php>.

Burtscher, Heinz, Addy W. Majewski (2012.01). *PM measurement: In-situ methods*. ECOpoint inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 7.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://dieselnet.com/tech/measure_pm_ins.php>.

Burtscher, Heinz, Addy W. Majewski & Imad A. Khalek (2012). *PM measurement: collecting methods*. ECOpoint Inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 30.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://dieselnet.com/tech/measure_pm_col.php>.

Cambustion (2012). *Flame ionization detector (FID) principle*. Cambustionin kotisivut. [Online]. [Siteerattu 29.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.cambustion.com/products/hfr500/fast-fid-principles>>.

Collura, S., N. Chaoui, B. Azambre, G. Fingueneisel, O. Heintz, A. Krzton, A. Koch, J.V. Weber (2005). Influence of the soluble organic fraction on the thermal behaviour, texture and surface chemistry of diesel exhaust soot: *Carbon 43*, numero 3, 605–613. Elsevier science Ltd.

Cordtz, Rasmus (2011). *Steady state investigations of DPF soot burn rates and DPF modeling*. Tanskan teknillinen yliopisto. [Online]. [Siteerattu 4.6.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://alturl.com/uw9n2>>.

Dimopoulos, Panayotis (2008). *Next generation exhaust aftertreatment for diesel propulsion systems (NEADS)*. Paul Scherrer instituutti: Sveitsi. [Siteerattu 2.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.ccem.ch/neads>>.

ECOpoint inc. (2009). *Emission standards*. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 10.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.dieselnet.com/standards/>>.

ECOpoint inc. (2008). *What are diesel emissions: diesel combustion products*. DieselNet, [Online]. [Siteerattu 5.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://www.dieselnet.com/tech/emi_intro.php>.

ECOpaint inc. (2005). *Diesel filter systems*. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 16.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://dieselnet.com/tech/dpf_sys.php>.

ECOpaint inc. (2005.06b). *Diesel filter regeneration*. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 18.6.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://www.dieselnet.com/tech/dpf_regen.php>.

ECOpaint inc. (2004). *Nonroad transient cycle*. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 8.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://dieselnet.com/standards/cycles/nrtc.php>>.

ECOpaint inc. (2003). *Diesel filter materials*. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 16.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://dieselnet.com/tech/dpf_mat.php>.

ECOpaint inc. (2002). *Electrically regenerated filters*. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 16.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://www.dieselnet.com/tech/dpf_electric.php>.

ECOpaint inc. (1999). *Health effects of gas phase components*. DieselNet, [Online]. [Siteerattu 3.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://www.dieselnet.com/tech/health_gas.php>.

Emitec. *Emitec Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH*. Emitecin kotisivut [Online]. [Siteerattu 24.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.emitec.com/en/technology/pm-metalit.html>>.

Encyclopedia Britannica inc. (2012). *Dioxin*. Sanakirja Britannica [Online]. [Siteerattu 13.6.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/164463/dioxin>>.

Environment Canada (2011). *Draft screening assessment for the challenge*. [Online]. [Siteerattu 24.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.ec.gc.ca/ese-ees/default.asp?lang=en&n=2cf34283-1>>

Espino, John (2009). Hoist the colors! or with great power comes great responsibility! Blogiteksti: Banks Power Diesel Performance. [Online]. [Siteerattu 10.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.banksblog.com/tag/truck-u/>>.

Euromot (2010). *Exhaust emission legislation: Diesel and gas engines*. The European association of internal combustion engine manufacturers: Frankfurt, Saksa. [Online]. [Siteerattu 10.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.euromot.org/download/bd7a0f78-848c-4116-bce0-d4fc7c1cf4ea/IC%20Engine%20Emission%20Standards%202010.pdf;jsessionid=40B6DF8789EC2DF715D0E2AAEAC19797>>.

Gitano, Horizon. *Dynamometer basic*. Malesian teknillinen yliopisto. [Online]. [Siteerattu 6.9.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://skyshorz.com/university/resources/dynamo_basics.pdf>.

Golunski, Stan (2007). Why use platinum in catalytic converters: *Platinum metals* 51, numero 3, 162. Johnsson Matthey teknologiakeskus, Iso-Britannia. [Online].

[Siteerattu 26.9.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:
<http://goo.gl/G92Qc>>.

Gupta, Tarun, Abhishek Kothari, Dhananjav Kumar Srivastava & Avinsh Kumar Agarwal (2010). Measurement of number and size distribution of particles emitted from a mid-size transportation multipoint port fuel injection gasoline engine: *Fuel volume 89*, numero 9, 2230-2233. Intian teknologia instituutti: Kanpur, Intia. Elsevier science Ltd.

Hauff, K., U. Tuttlies, G. Eigenberger & U. Nieken (2012). Platinum oxide formation and reduction during NO oxidation on a diesel oxidation catalyst – Experimental results: *Applied Catalysis B: Environmental 123-124*, 107-116. Kemiallisen prosessitekniikan instituutti, Stuttgart: Saksa. Elsevier science Ltd.

Horiba. *Solutions for engine testing -tuoteseloste*. [Siteerattu 6.9.2012]

Huss Group. (2010). *DPF filtration*. Huss groupin -kotisivut. [Online]. [Siteerattu 2.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:
http://www.hussgroup.com/huss-umwelt/us/products/filter_filtration.php >.

Husted, Harry, Gregory Roth, Scott Nelson, Lary Hocken, Gary Fulks & David Racine (2012). *Sensing of particulate matter for on-board diagnosis of particulate filters*. Delphi automotive systems. SAE international. DOI: 10.4271/2012-01-0372. [Online]. [Siteerattu 11.6.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:
<http://delphi.com/pdf/techpapers/2012-01-0372.pdf>>.

Huttunen, Jussi (2012). *Hengitysilman pienhiukkaset – savusta ja saasteista sairautta*. Kolumni, Terveyskirjasto. Kustannus Oy Duodecim: Helsinki. [Siteerattu 11.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_osio=&p_artikkeli=kol00207>.

Hutton, Chris, John Johnson, Jeffrey Naber & Jason Keith (2012). *Procedure development and experimental study of passive particulate matter oxidation in a diesel catalyzed particulate filter*. Michiganin teknillinen yliopisto. SAE international. DOI: 10.4271/2012-01-0851.

Jiang, Da-hai., Zhi Ning, Guang-tao Yao, Xin-yun Zi, Hong-wei Liu (2011). The matching and integration in the technology of diesel particulate filter. *Electric Information and Control Engineering*, Kansainvälinen konferenssi. Pekingin Jiaotongin yliopisto: Kiina.

Johnson, V. Timothy (2007). *Diesel particulate filter technology*. Warrendale, USA: SAE international. 359 s. ISBN-978-0-7680-1707-6.

Khair, K. Magdi & Hannu Jääskeläinen (2012). *Exhaust gas recirculation*. ECOpoint inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 10.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://www.dieselnet.com/tech/engine_egr.php>.

Khair, K. Magdi & Hannu Jääskeläinen (2010). *Combustion in diesel engines*. ECOpoint inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 10.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://dieselnet.com/tech/diesel_comb.php>.

Kittelson, David (2006). *Ultrafine particle emissions & control strategies*. Minnesotan yliopisto: USA. [Online]. [Siteerattu 17.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://www.aqmd.gov/tao/ultrafine_presentations/Pre-Conference_3_Kittleson.pdf>.

Konstandopoulos, G. Athanasios & Eleni Papaioannou (2008). *Update on the science and technology of diesel particulate filters: Kona powder and particle journal*, numero 26. Thessaloniki: Kreikka. Elsevier science Ltd.

Lapuerta, Mágin, Octavio Armas & José Rodríguez-Fernández (2008). Effect of biodiesel fuels on diesel emissions: *Progress in energy and combustion science* 34, 198-223. Castilla-La Manchan yliopisto: Espanja. Elsevier Ltd.

Liu, Zhihua, Yunshan Ge, Jianwei Tan Chao He, Asad Naeem Shah, Yan Ding, Linxiao Yu & Wei Zhao (2012). Impacts of continuously regenerating trap and particle oxidation catalyst on NO₂ and particulate matter emissions emitted from diesel engine: *Journal of environmental sciences* 24, 624-631. ISSN: 1001-0742. Mekaanisen ja ajoneuvotekniikan koulu, Peking: Kiina. Elsevier science Ltd.

Liu, Zhihua, Asad Naeem Shah, Yunshan Ge, Yan Ding, Jianwei Tan, Lei Jiang, Linxiao Yu, Wei Zhao, Zhu Wang & Tao Teng (2011). Effects of continuously regenerating diesel particulate filters on regulated emissions and number-size distribution of particles emitted from a diesel engine: *Journal of environmental sciences* 23, 798-807. ISSN: 1001-0742. Mekaanisen ja ajoneuvotekniikan koulu, Peking: Kiina. Elsevier science Ltd.

Loren, Carl Marz (2012). *Gas vs. diesel in light duty applications*. Meteorologi Carl Marz Lorenin kotisivut. [Online]. [Siteerattu 13.6.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://webpages.charter.net/lmarz/emissions.html>>.

Madden, Michael C. (2008). Complex issues with examining diesel exhaust toxicity: is the task getting easier or harder: *Experimental and toxicologic pathology volume 60*, numerot 2-3, 135-140. Yhdysvaltain ympäristön suojelulautakunta, EPA: USA. Elsevier science Ltd.

Majewski, W. Addy (2012). *Diesel oxidation catalyst*. ECOpoint inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 17.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://dieselnet.com/tech/cat_doc.php>.

Majewski, W. Addy (2011). *Diesel particulate filters*. ECOpoint inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 10.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.dieselnet.com/tech/dpf.php>>.

Majewski, W. Addy (2005). *Selective catalytic reduction*. ECOpoint inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 16.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://dieselnet.com/tech/cat_scr.php>.

Majewski, W. Addy (2002). *Diesel particulate matter*. ECOpoint inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 16.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://dieselnet.com/tech/dpm.php>>.

Majewski, W. Addy & Heinz Burtscher (2011). *Measurement of emissions*. Eco-point inc. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 3.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://dieselnet.com/tech/measure.php>>.

Majewski, W. Addy & Magdi K. Khair (2006). *Diesel emissions and their control*. Warrendale, USA: SAE international. s. 561. ISBN 100-7680-0674-0 ja ISBN 13978-0-7680-0674-2.

Maricq, M. Matti (2007). Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review: *Aerosol science* 38, 1079–1118. Ford motor company: Dearborn. Elsevier science Ltd.

NGK insulators, Ltd (2001). *NGK invests in new diesel particulate filter production*. Yrityksen kotisivut. [Online]. [Siteerattu 17.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.ngk.co.jp/english/news/2001/0514.html>>.

Niemi, Seppo (2012). *Pako- ja savukaasujen seminaari - kurssin materiaalit*. Julkaisematon. Vaasan yliopisto, tekniikan tohtori.

Mayer, Andreas and 50 co-authors (2008). *Particle filter retrofit for all diesel engines*. Aachen ammattikorkeakoulu ja Duisburg-Essenin yliopisto: Essen. 443 s. ISBN: 978-3-8169-2850-8.

Mazzarella, G., F. Ferraraccio, M.V. Prati, S. Annunziata, A. Bianco, A. Mezzogiorno, G. Liguori, I.F. Angelillo & M. Cazzola (2007). Effects of diesel exhaust particles on human lung epithelial cells: An in vitro study: *Respiratory medicine* 101, 1155-1162. Napolin yliopisto: Italia. Elsevier science Ltd.

Mehring, M., M. Elsner, L. Bächli, & O. Kröcher (2012). The influence of H₂SO₄ on soot oxidation with NO₂: *Carbon 50*, 2100-2109. Paul Scherrer instituutti: Sveitsi. Elsevier science Ltd.

Oregon Physicians for Social Responsibility (2008). *A breathable future: health effects of air pollution in portland*. Esitelmä ilmansaasteista. [Online]. [Siteerattu 13.6.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.psr.org/chapters/oregon/assets/pdfs/powerpoints/air-pollution-presentation.pdf>>.

Pagans, Estela, Xavier Font & Antonio Sánchez (2005). Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by bio-filtration: *Journal of hazardous materials B131*, 179-186. [Online]. [Siteerattu 24.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: http://icta.uab.cat/99_recursos/1226484631749.pdf>.

Riedl, Marc & David Diaz-sanchez (2005). Biology of diesel exhaust effects on respiratory function: *Journal of allergy and clinical immunology volume 115*, numero 2, 221-228. Kalifornian yliopisto: Los angeles. Elsevier science Ltd.

Riipinen, Ilona & Katrianne Lehtipalo (2012). Hiukkastieto: hiukkasten koko ja muoto. Helsingin yliopiston fysiikan laitos. [Online]. [Siteerattu 5.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.hiukkastieto.fi/node/22>>.

Robert Bosch GmbH (2012). Oxidation catalytic converter. *Bosch inc -yrityksen kotisivut*. [Online]. [Siteerattu 11.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://goo.gl/L6eKQ>>.

Rubio, R., J. Santander, L. Fonseca, N. Sabaté, I. Gràcia, C. Cané, S. Udina & S. Marco (2007). Non selective NDIR array for gas detection: *Sensors and actuators B* 127, 69-73. Elsevier: Espanja. Elsevier science Ltd.

Sappok, Aleksander, James Parks II & Vitaly Prikhodko (2010). Loading and re-generation analysis of a diesel particulate filter with a radio frequency-based sensor. Sae international.

Schneider, J., U. Kirchner, S. Borrmann, R. Vogt & V. Scheer (2008). In situ measurements of particle number concentration, chemically resolved size distributions and black carbon content of traffic related emissions on German motorways, rural roads and in city traffic: *Atmospheric Environment volume 42*, numero 18, 4257-4268. Max-Planck kemian instituutti: Mainz, Saksa. Elsevier science Ltd.

Sensors inc. *Emission analyzers*. DieselNet. [Online]. [Siteerattu 4.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.dieselnet.com/sensors/>>.

Tekes teknologiaohjelmaraportti. (2006). Fine – pienhiukkaset – teknologia, ympäristö ja terveys 2002-2005. *Tekes teknologiaohjelmaraportti*: Tekes, Helsinki. [Online]. [Siteerattu 3.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: www.tekes.fi/fi/document/43111/fine_pienhiukkaset_pdf>.

Togum Ag (2011). MTU presents pioneering EPA Tier 4 final solutions at Con-Expo show. Friedrichshafen/Detroit/Las Vegas. [Online]. [Siteerattu 11.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://goo.gl/wLRms>>.

United States environmental protection agency. (2002). Health assessment document for diesel engine exhaust. [Online]. [Siteerattu 3.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=29060#Download>>.

Vaisala (2008). PTU300 Combined Pressure, Humidity and Temperature Transmitter for Industrial Use. *Vaisalan tuotekatalogi*, Helsinki. [Online]. [Siteerattu 7.9.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://pdf.directindustry.com/pdf/vaisala/combined-pressure-humidity-and-temperature-transmitter-for-industrial-use/7108-37479.html>>.

Van Poppel, Martine & Guido Lenaers (2005). Real life evaluation of the emission reduction potential of a city bus retrofitted with a continuous regenerating trap: *Atmospheric environment* 39, sivut 2451-2457. Flemish teknologiatutkimuksen instituutti: Mol, Belgia. Elsevier science Ltd.

Van Setten, Barry A. A. L., Michiel Makkee & Jacob A. Mouljin (2001). Science and technology of catalytic diesel particulate filters: *Catalysis reviews* 43, 489-564. Delftin teknillinen yliopisto, Hollanti. Elsevier science Ltd.

Walsh, Michael P. Linkage between fuels, vehicles and emissions – the role of sulfur. 2004 -2011. [Online]. [Siteerattu 21.5.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.walshcarlines.com/pdf/Linkage%20Between%20Fuels%20Sulfur%20and%20Emissions.pdf>>.

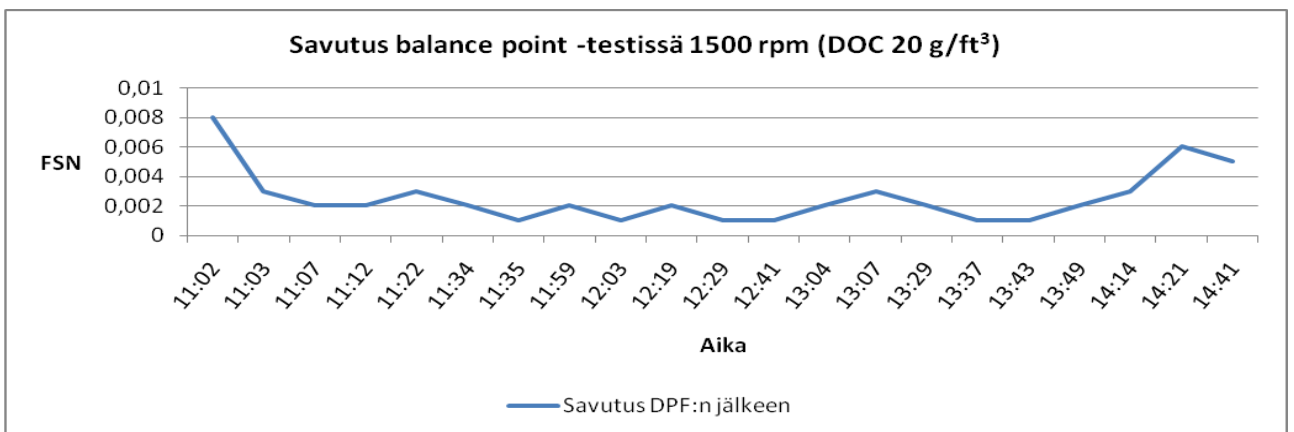
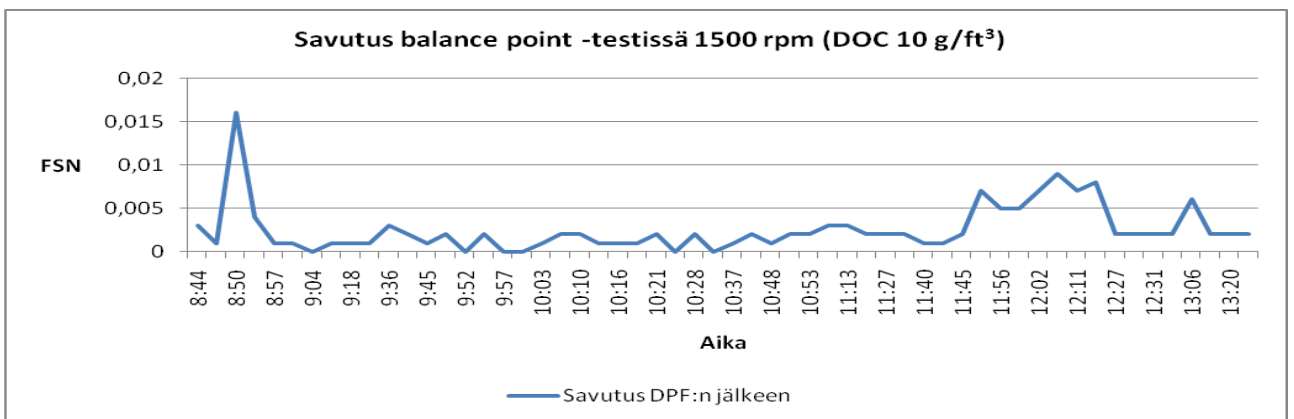
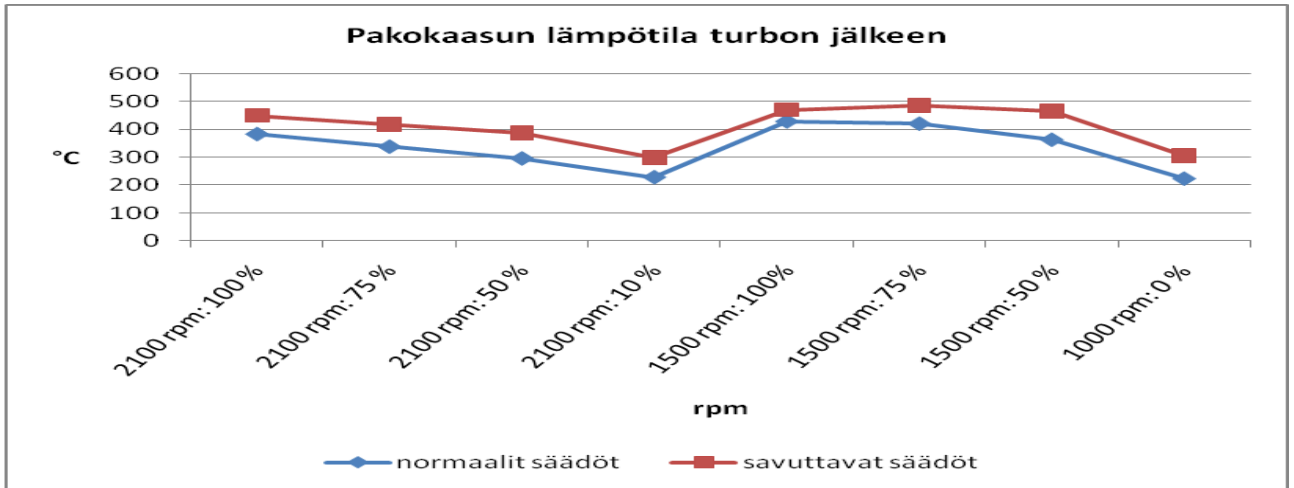
Xinqun, Gui, Danan Dou & Richard Winsor (2010). Non-road diesel engine emissions and technology options for meeting them. Amerikan maatalous- ja biologian insinöörien yhdistys: Orlando, Florida. [Online]. [Siteerattu 11.4.2012]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://elibrary.asabe.org/data/pdf/6/nrde2010/2010%20Lecture%20Series%2034a.pdf>>.

Yuranov, I., L. Kiwi-Minsker & A. Renken (2002). Structured combustion catalysts based on sintered metal fibre filters: *Applied catalysis B: Environmental* 43, 217-227. Kemikaaliteknologian instituutti: Lausanne, Sveitsi. Elsevier science Ltd.

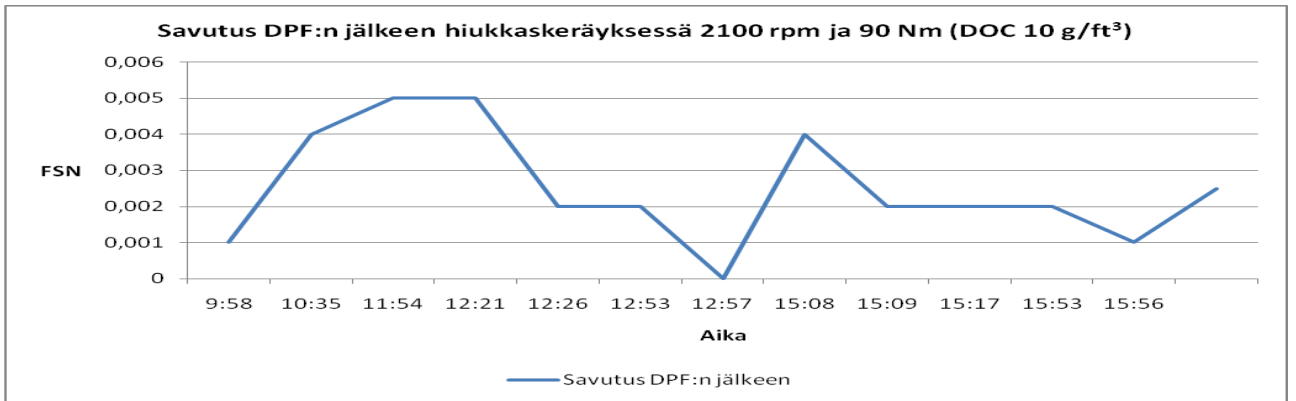
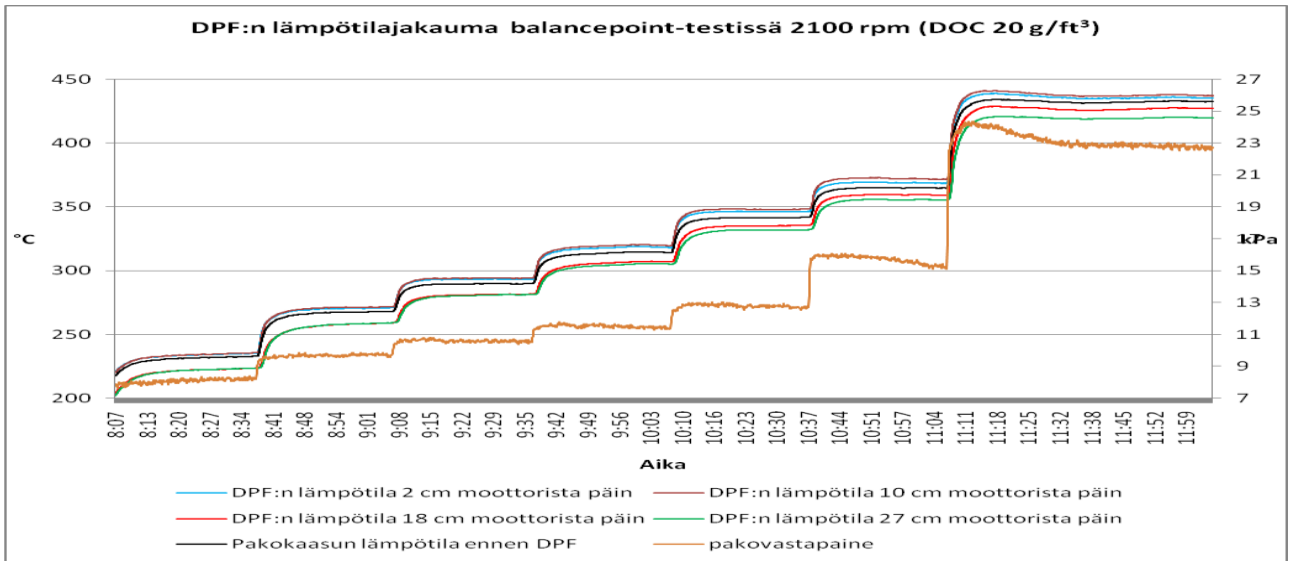
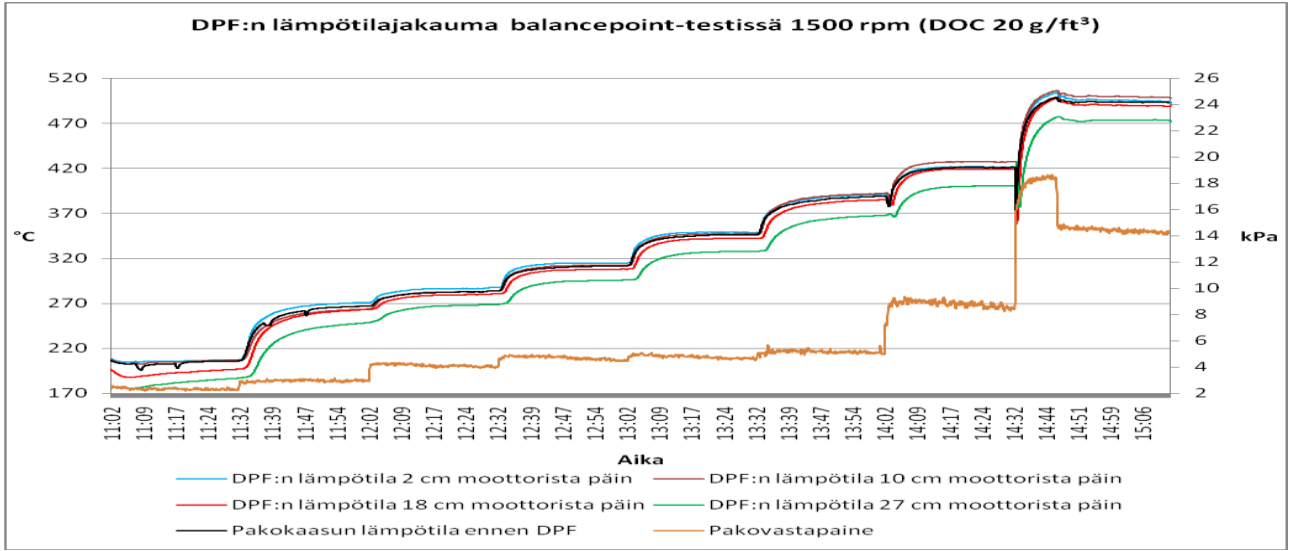
LIITTEET

LIITE 1. Työtä tukevat kaaviot.

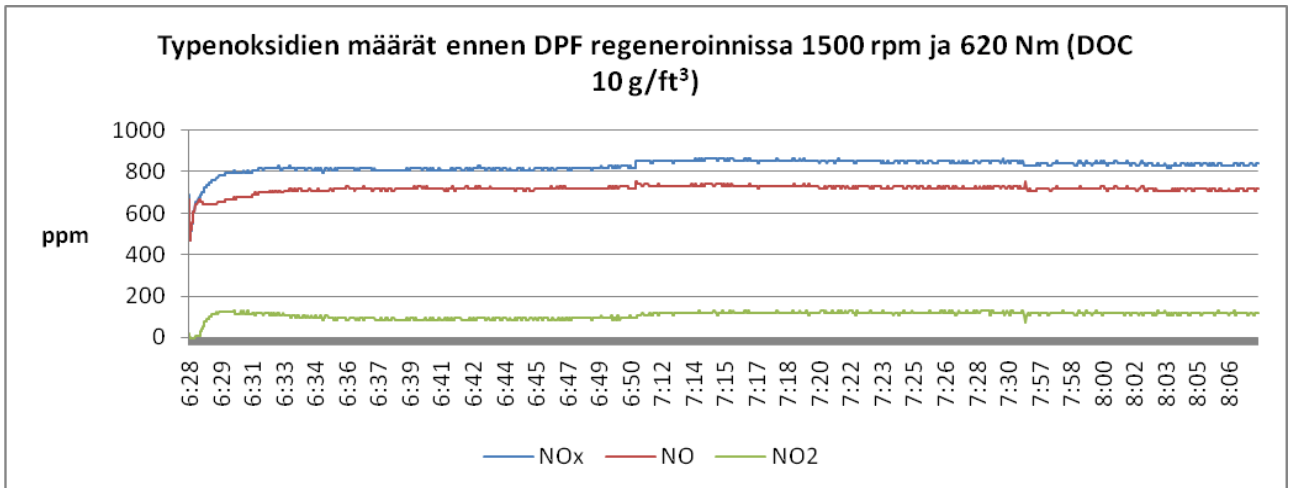
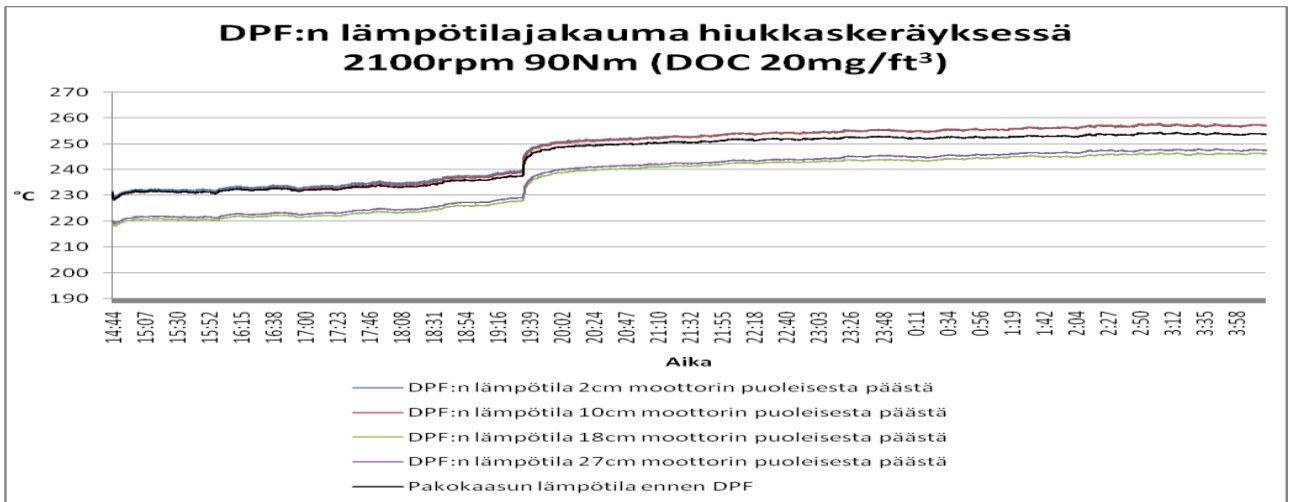
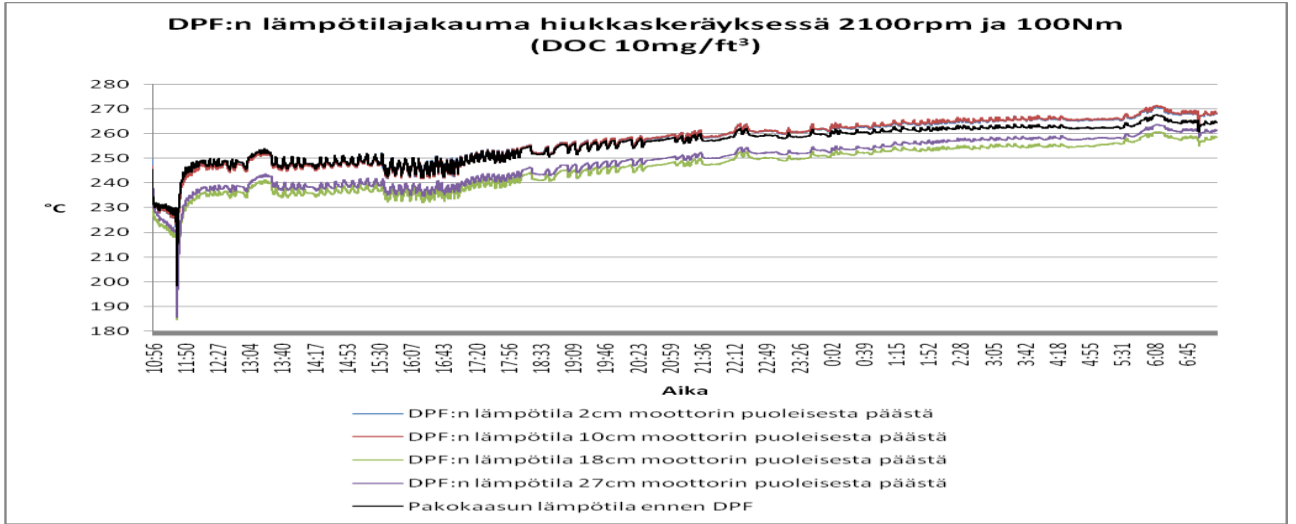
(1/8)



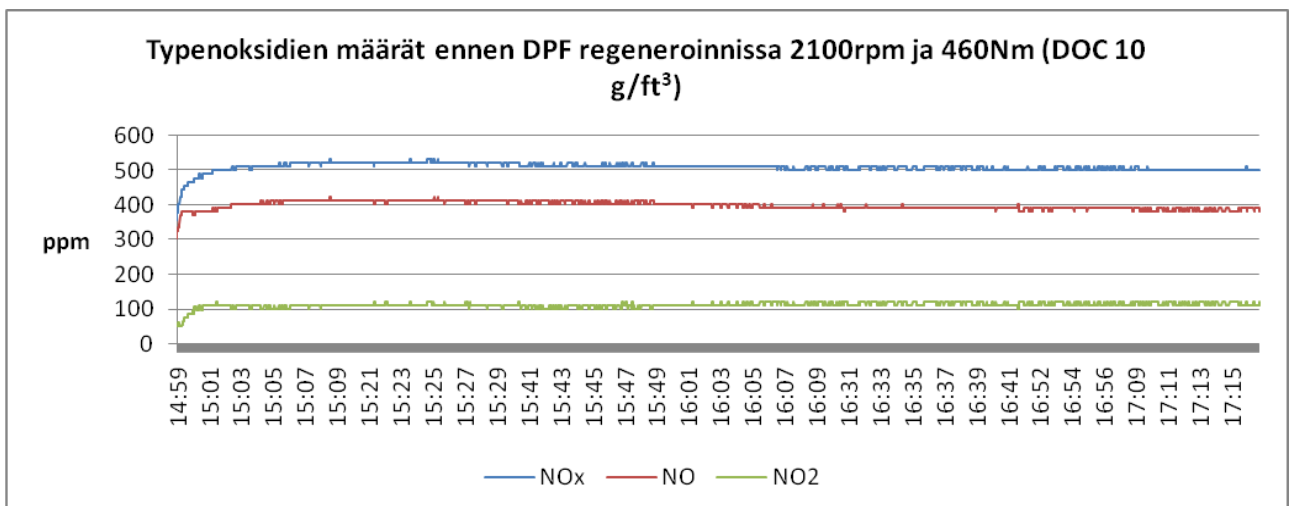
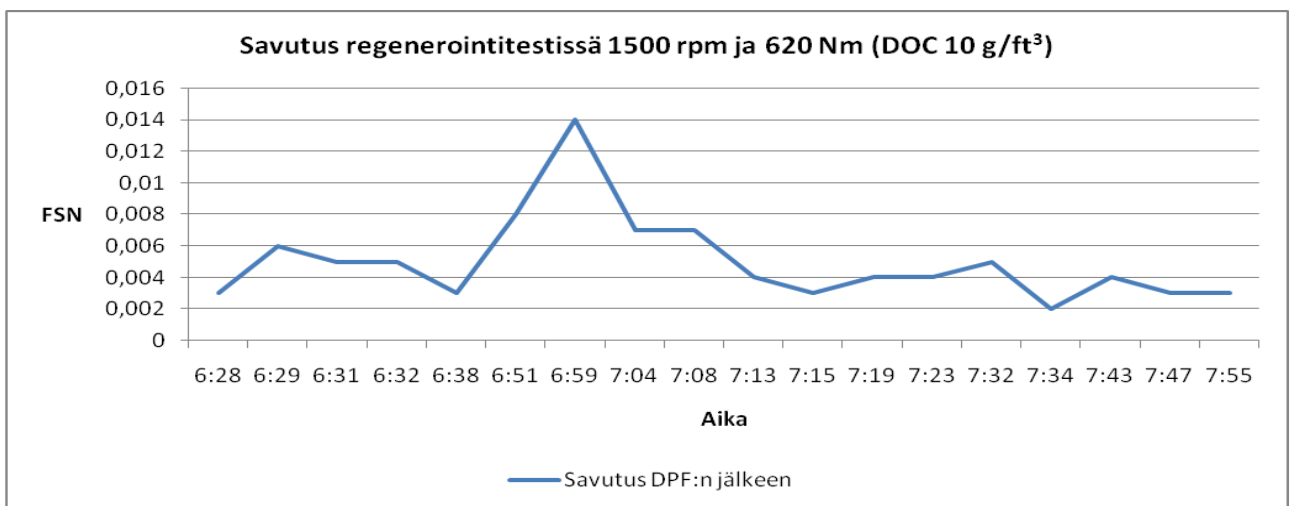
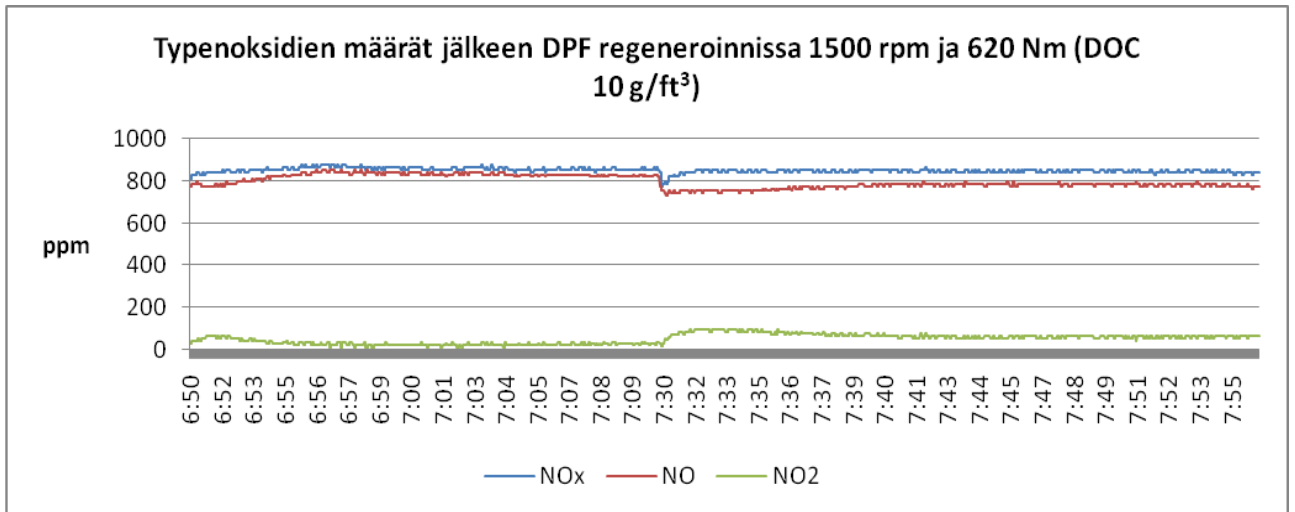
(2/8)



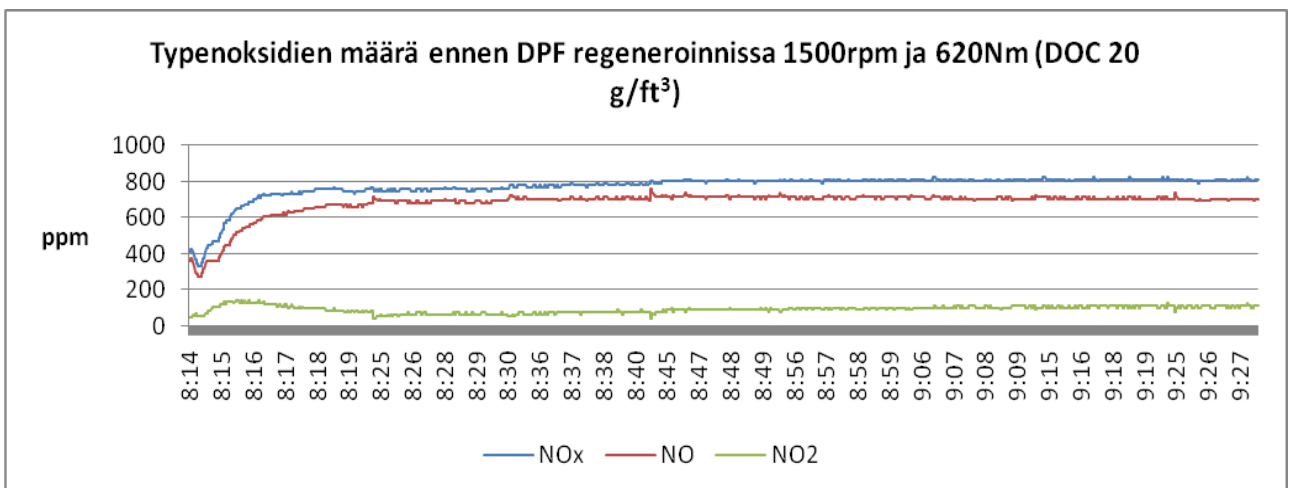
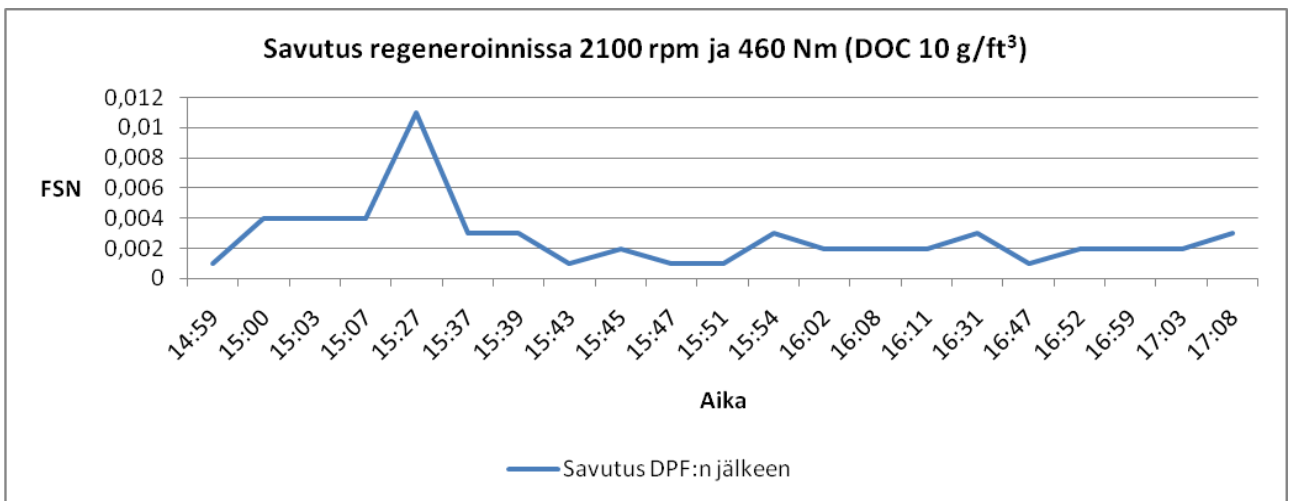
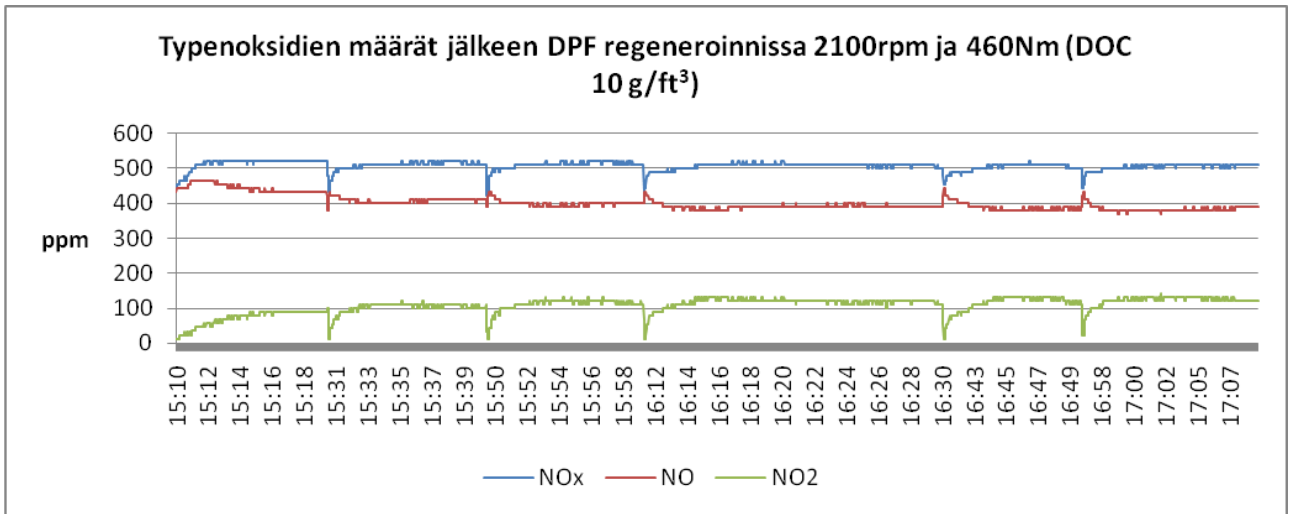
(3/8)



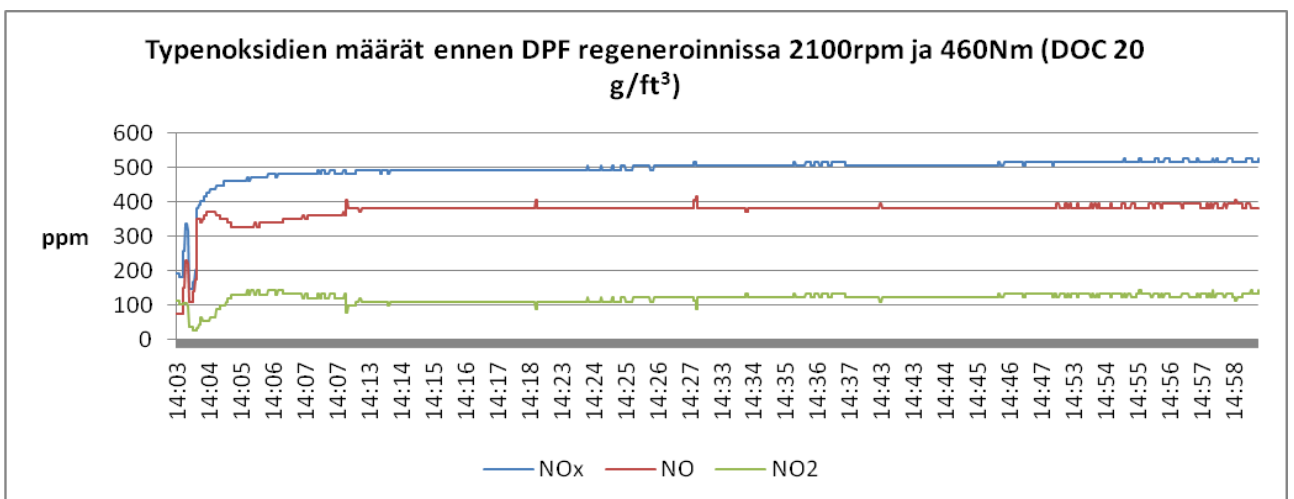
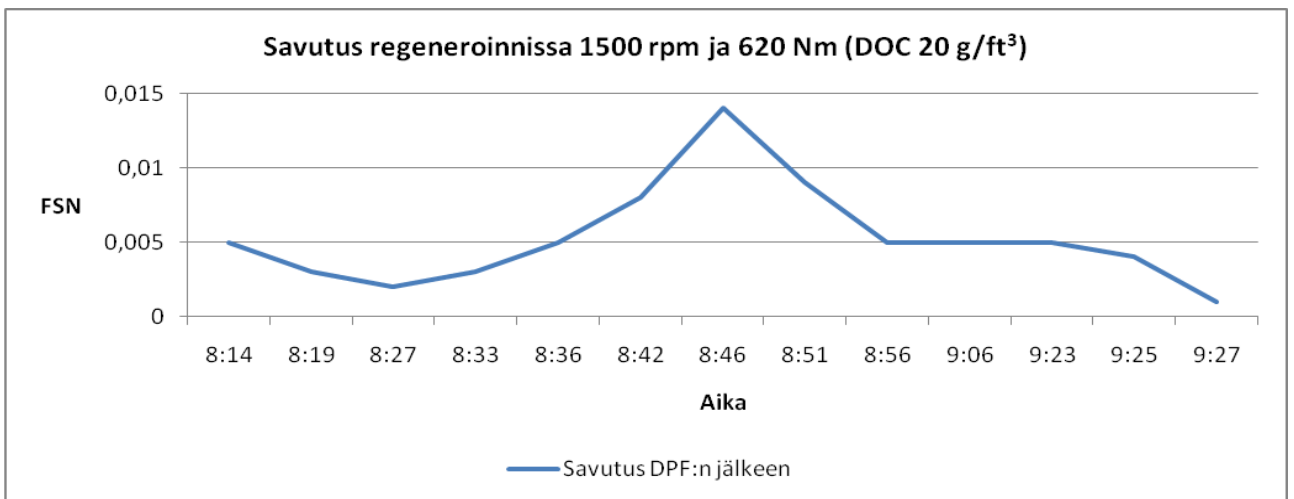
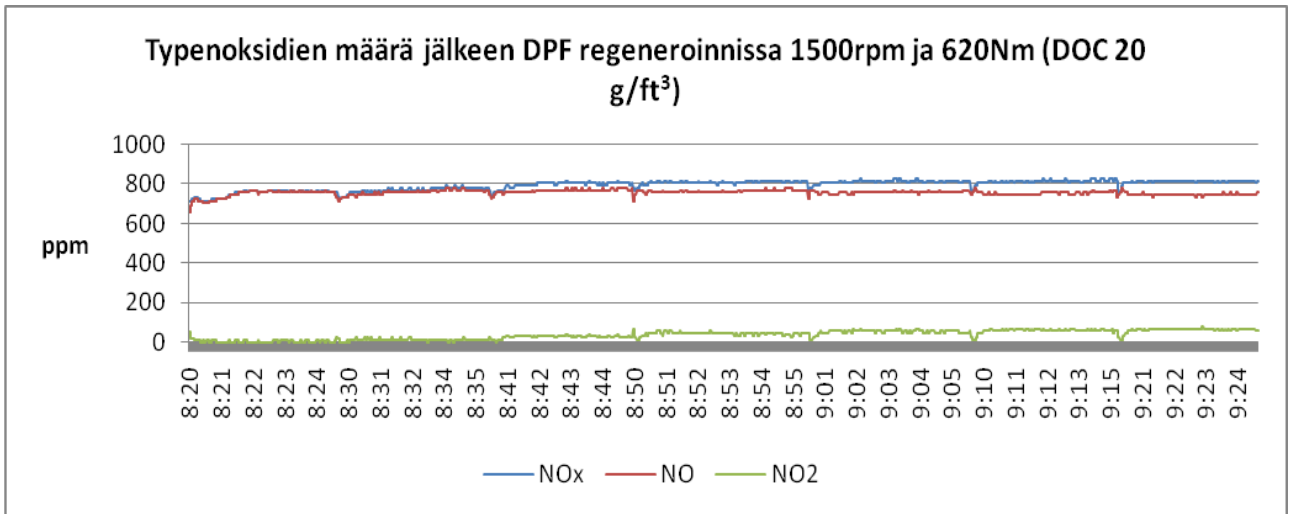
(4/8)



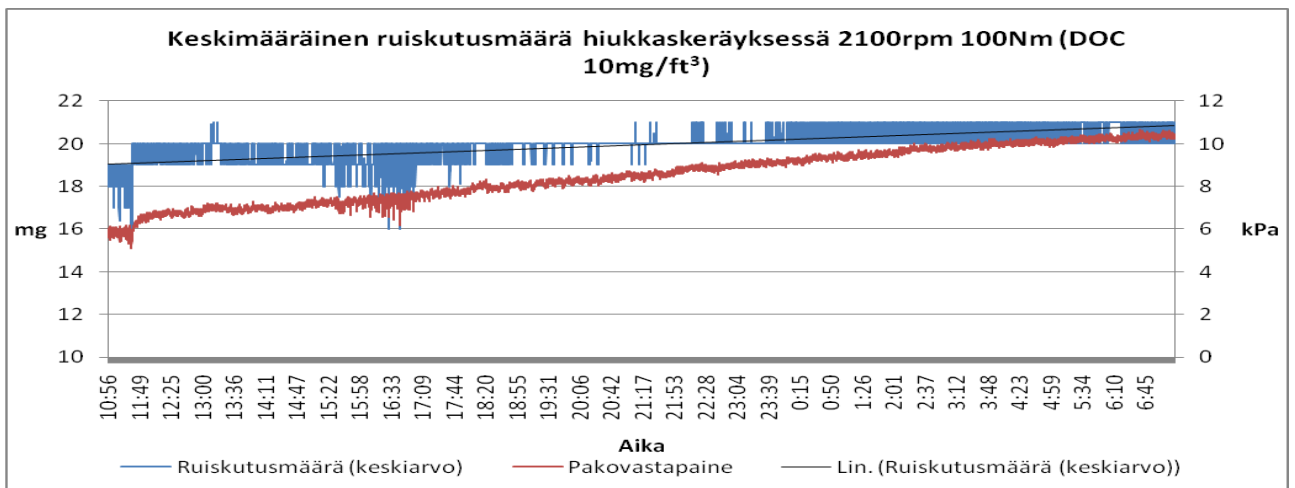
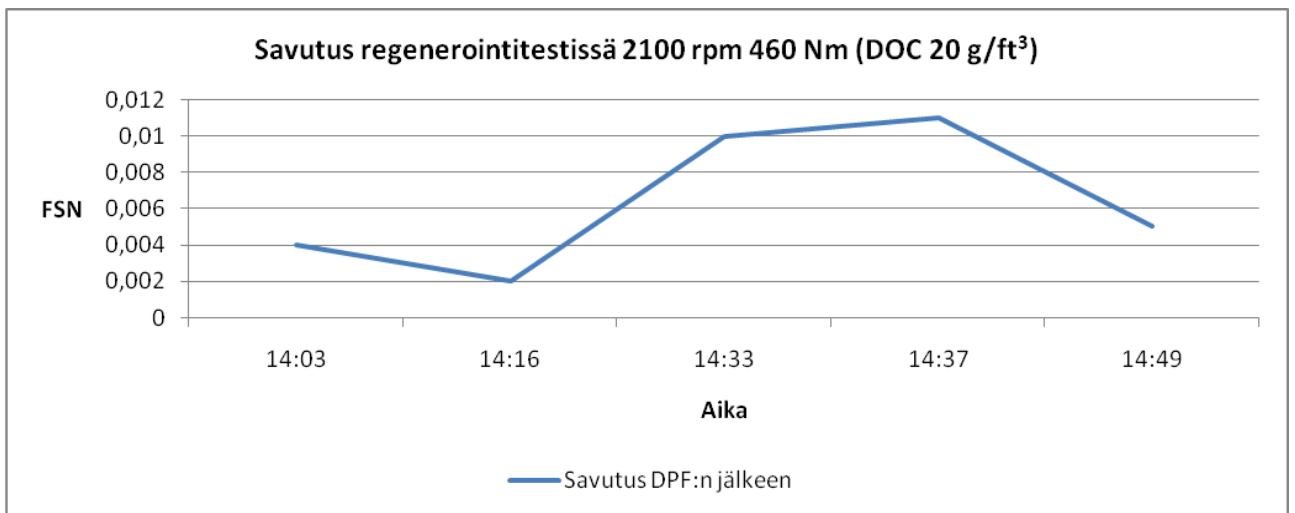
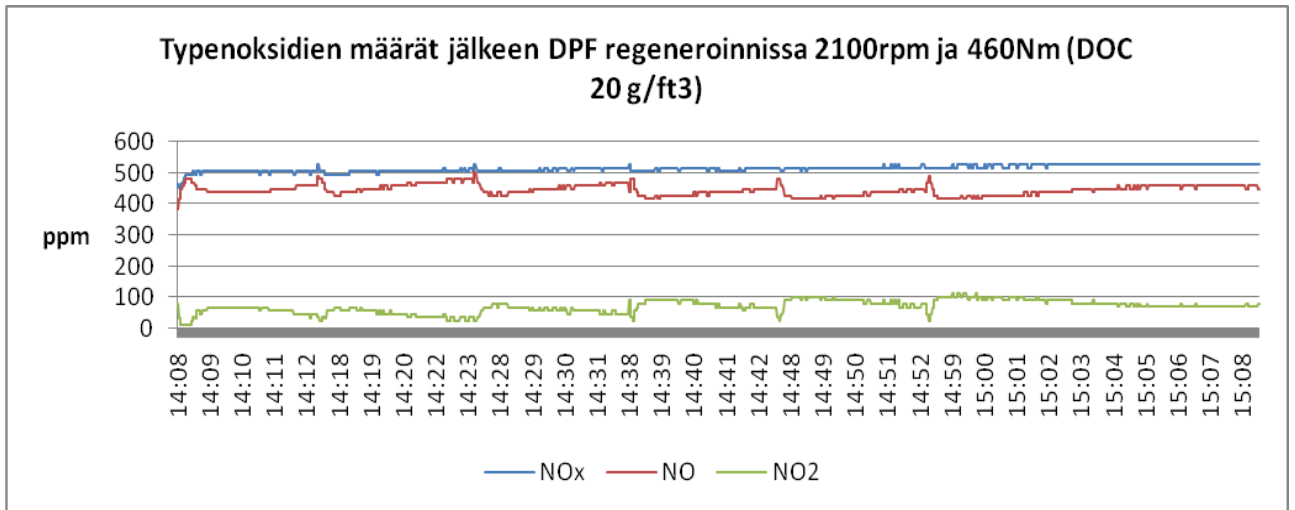
(5/8)



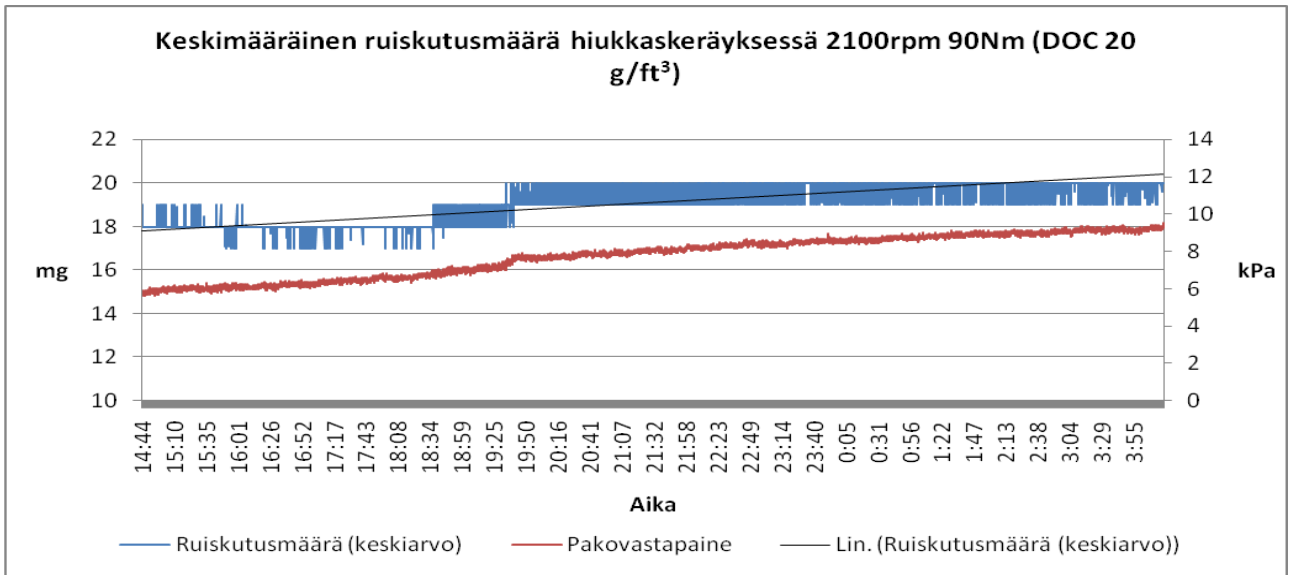
(6/8)



(7/8)



(8/8)



LIITE 2. Työssä käytetyn DOC:n ja DPF:n koot sekä koko järjestelmän poikkileikkaus.

