



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**ELIAS KOSKELA
KULJETTAJAN AJOTYYLIN VAIKUTUS TYÖKONEEN
PAKOKAASUPÄÄSTÖIHIN**

Diplomityö

Tarkastaja: prof. Seppo Tikkanen

Tarkastaja ja aihe hyväksytty teknisten
tieteiden tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 07.09.2016

TIIVISTELMÄ

ELIAS KOSKELA: Kuljettajan ajotyylin vaikutus työkoneen pakokaasupäästöihin
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 64 sivua, 5 liitesivua
Huhtikuu 2017
Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Fluid Power
Tarkastaja: prof. Seppo Tikkanen
Avainsanat: PEMS, NO_x, PM, päästömittaus

Tässä työssä tutkitaan ajotyylin vaikutusta työkoneen pakokaasupäästöihin. Tavoitteena on selvittää onko erilaisilla ajotyyleillä merkitystä pakokaasupäästöjen syntymiselle. Toisena tavoitteena on tutustua liikuteltavan päästömittausjärjestelmän (engl. *Portable Emissions Measurement System*, PEMS) soveltuvuuteen työkonemittauksissa. Työ on pohjustusta tulevaan tutkimukseen.

Tutkittava työkone on 5400 kg:n painoinen laajasti useissa kaupungeissa käytössä oleva taajamatraktori, jossa on hydraulikalla toteutettu ajovoimansiirto ja nostolaite. Mittaukset suoritetaan AVL:n päästömittausjärjestelmällä, joka pystyy mittaamaan kaasumaisia päästöjä, pienhiukkaspäästöjä ja polttoaineen kulutusta. Työkierroissa käytetään kahta kuljettajaa, joista toinen ajaa aggressiivisella ajotyylillä ja toinen rauhallisella ajotyylillä.

Pakokaasukomponenteista tarkastellaan typen oksideja, typpidioksidia, pienhiukkasia, häkää ja palamattomia hiilivetyjä. Mittaukset tehdään kahdella eri työsyklillä. Ensimmäisessä syklistä kuormataan soraa ja toisessa syklistä kuljetetaan 1500 kg:n kuormaa. Ensimmäisessä työsyklissä ajonopeus on matala ja painotus on kuormaustyössä. Toisessa työsyklissä kuormausta on vähän ja painotus on ajamisessa.

Ajoon painottuvassa testisyklissä pakokaasukomponenttien päästökertoimet ovat kuormaukseen painottuvaa sykliä pienemmät. Kuormaukseen painottuvassa työsyklissä aggressiivinen ajotyyli tuottaa pienemmät tai yhtä suuret päästökertoimet. Ajoon painottuvassa työsyklissä aggressiivinen ajotyyli tuottaa pienemmät päästökertoimet typen oksideissa, typpidioksidissa ja palamattomissa hiilivedyissä, mutta muissa pakokaasukomponenteissa päästöt ovat suuremmat. Yksittäisen testin sisällä ajotyylien välinen ero päästöissä on 0 - 43 %. Työn perusteella ajotyylillä on vaikutusta pakokaasupäästöihin. Moottorista löytyi päästökomponenteille epäedullisia alueita, joita voi olla mahdollista välttää ajovoimansiirron optimoinnilla. Mittausjärjestelmä sopii tieteelliseen tutkimukseen tietyin varauksin.

ABSTRACT

ELIAS KOSKELA: Effects of driving style on the emissions of a non-road mobile machine

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 64 pages, 5 Appendix pages

April 2017

Master's Degree Programme in Automation Technology

Major: Fluid Power

Examiner: Prof. Seppo Tikkanen

Keywords: PEMS, NO_x, PM, exhaust emissions

This study consists of finding the effects of driving style on the emissions of a non-road mobile machine. The goal is to find out what kind of differences the varied driving styles can cause on the emission levels and what do they consist of. This thesis explains the implementation and challenges of commissioning a Portable Emissions Measurement System (PEMS). This work gives a foundation for future research.

The machine under study is a widely used 5400 kg front end loader. The machine has a hydraulic drive transmission and boom. The measurements are performed with an AVL PEMS, which can measure gaseous emissions, particulate emissions and fuel consumption. This work utilizes two drivers, both of which have their own driving style. Selected driving styles are aggressive and calm.

Emission components under study are nitrogen oxides, nitrogen dioxide, particulate matter, carbon monoxide and unburnt hydrocarbons. Measurements consists of two test cycles, which are loading gravel and carrying a load of 1500 kg. The first cycle has a lower speed and more weight on loading. The second cycle is mostly driving with an additional weight.

The driving focused cycle has lower exhaust emissions in general. On the first cycle, the aggressive driving style produces lower or similar exhaust emissions. The situation changes on the driving focused cycle, where aggressive style produces lower emissions in terms of nitrogen oxides, nitrogen dioxide and unburnt hydrocarbons. The other components remain higher. The highest difference in emissions inside a single cycle is up to 43 %. According to this study, driving style has an impact on the emissions. The engine has unfavorable emission sections; however, they could be avoided with proper power train optimization. The measuring system fits academic research with few exceptions.

ALKUSANAT

Työ on tehty Tampereen teknillisellä yliopistolla AUT-laboratorion rahoituksella. Laboratorio on juuri aloittanut päästömittaukseen liittyvän tutkimuksen. Aihepiiri on itselleni mielenkiintoinen aluevaltaus, joka on myös ajankohtainen ja ympäristöystävällisyyttä tukeva. Aihepiiri on haastava ja mielenkiintoinen, sitä voi katsoa monesta näkökulmasta ja aihepiirin asiat kytkeytyvät tiiviisti toisiinsa.

Työn ohjaajana ja tarkastajana toimi prof. Seppo Tikkanen, jolle aihepiiri on tuttu vuosien takaa. Haluan kiittää häntä tärkeästä tuesta, suuntaviivoista ja kannustuksesta. Käytännön osuus suoritettiin diplomi-insinööri Ville Aholan kanssa, joka teki väitöskirjaan tulevat mittaukset samassa yhteydessä. Haluan kiittää häntä tuesta, ennakkoluulottomasta asenteesta ja hyvistä letkautuksista. Kiitän myös diplomi-insinööri Miika Ahopeltoa ja tutkimuslaboratorion henkilökuntaa. Kiitos opiskelukavereille ja Kavitaation porukalle kaikista vuosien varrella tapahtuneista seikkailuista.

Viimeisenä haluan kiittää perhettä tuesta ja kannustuksesta.

Tampere, 22.3.2017

Elias Koskela

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Pakokaasupäästöt ja niiden säätely dieselajoneuvoissa	3
2.1 Ohjaava lainsäädäntö	3
2.2 Palaminen moottorissa	6
2.3 Kaasumaiset päästöt	8
2.4 Pienhiukkaspäästöt	10
3. Päästömittausjärjestelmän esittely	13
3.1 Kaasumaisten päästöjen mittauslaitteisto	14
3.2 Pienhiukkaspäästöjen mittauslaitteisto	15
3.3 Oheislaitteet	17
3.4 Jälkikäsittely	18
4. Mittausjärjestelyt	19
4.1 Mitattava työkone	19
4.2 Pyöräkuormaajan valmistelu	21
4.3 Mittausjärjestelmän valmistelu	22
4.3.1 Mittauslaitteiston kalibrointi	23
4.3.2 Pienhiukkassuodattimen valmistelu	24
4.4 Testisykliä määrittäminen	25
4.5 Kuljettajien ajotyylit	28
4.6 Datan kerääminen ja muokkaus	28
5. Tulokset	30
5.1 NO _x ja PM staattisessa kuormituksessa	30
5.2 Lyhyt kuormaussykli	36
5.2.1 Rauhallinen ajotyyli	37
5.2.2 Aggressiivinen ajotyyli	39
5.2.3 Vertailu	41
5.3 Pitkä ajosykli	44

5.3.1	Rauhallinen ajotyyli	45
5.3.2	Aggressiivinen ajotyyli	47
5.3.3	Vertailu	50
6.	Johtopäätökset	54
6.1	Ajotyylin vaikutus pakokaasupäästöihin	54
6.2	NO _x -käytös pienellä pyörimisnopeudella	56
6.3	Mittauslaitteiston soveltuvuus käytönaikaisten päästöjen mittaamiseen	57
6.4	Järjestelmän potentiaali	58
7.	Yhteenveto	60
	Lähteet	62
	LIITE A	65
	LIITE B	67
	LIITE C	69

KUVALUETTELO

2.1	Henkilöautoliikenteen testisyklejä Yhdysvalloista, Japanista ja Euroopasta. Syklit ovat profiililtaan erilaisia ja niiden dynaaminen vaihtelu on suurta. [19]	4
2.2	Paloprosessin eteneminen dieselmoottorissa [18, s. 128].	6
2.3	Konsepti dieselin ruiskutuksesta palokammioon. Muokattu lähteestä [12].	7
2.4	Alkeellisen hiiliatomin kasvu nokihiukkaseksi [18].	11
2.5	Ylemmässä kuvassa pienhiukkasten erottelu orgaanisten ja epäorgaanisten aineiden välillä. Alhaalla pienhiukkasten prosentuaalinen koostumus. [18]	11
3.1	Keskellä GAS PEMS, ylhäällä järjestelmää ohjaava PC, alhaalla virtalähde.	14
3.2	Kaasumaisia pakokaasupäästöjä mittaavan laitteen yksinkertaistettu virtauskaavio.	14
3.3	Pienhiukkaspäästöjen mittalaitteet. Ylempi laite mittaa noen pitoisuuden ja alempi pienhiukkasten massan.	16
3.4	Päästömittauslaitteisto, polttoaineen tilavuusvirran mittaussykko, polttokaasu, akusto ja generaattori koneen kyydissä.	17
4.1	Mittauksissa käytettävä muunneltu Wille 655 C -taajamakone. Päästömittausjärjestelmä on asennettu takarungon päälle.	20
4.2	Kaasumaisten pakokaasupäästöjen kalibrintikaasut.	23
4.3	Pienhiukkassuodattimien lastausta kuljetusliuskoihin.	25
4.4	Lyhyt kuormaussykli. Mustalla merkitty viiva kuvastaa täyttä kauhaa ja harmaa tyhjää. Ei mittakaavassa. [11]	26

4.5 Pitkä kuormaussykli. Musta ja punainen viiva ajetaan 1500 kg punuksen kanssa. Sininen viiva ajetaan tyhjänä. Merikontti on sininen suorakulmio vasemmassa alareunassa ja purkupaikkaa edustaa risti kuvan oikeassa reunassa. Ei mittakaavassa.	27
4.6 PEMS:in eri laitteiden kytkeytyminen toisiinsa [2, 3].	29
5.1 Typpioksidin pitoisuuskartta eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla. . .	31
5.2 Typpidioksidin pitoisuuskartta eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla. .	32
5.3 Typen oksidien pitoisuuskartta eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla. .	33
5.4 Pienhiukkasten pitoisuuskartta eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla. .	33
5.5 Typpioksidin päästökertoimet eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla. . .	34
5.6 Typpidioksidin päästökertoimet eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.	34
5.7 Typen oksidien päästökertoimet eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.	35
5.8 Pienhiukkasten päästökertoimet eri kuormilla ja moottorin pyörimisnopeuksilla.	35
5.9 Lyhyen kuormaussyklin rauhallisemman ajotyylin päästöpitoisuuksien kuvaaja. Punainen pystyviiva tarkoittaa kauhan täyttöä, vihreä kauhan tyhjennystä ja sininen suunnanvaihtoa.	38
5.10 Lyhyen kuormaussyklin aggressiivisemman ajotyylin päästöpitoisuuksien kuvaaja. Punainen pystyviiva tarkoittaa kauhan täyttöä, vihreä kauhan tyhjennystä ja sininen suunnanvaihtoa.	40
5.11 Lyhyen kuormaussyklin päästöpitoisuuksien vertailukuvaaja. Kuvajien aika-akseli on asetettu samaksi. Punainen viiva edustaa rauhallisemman ajotyylin kuljettajaa ja musta aggressiivisemman ajotyylin kuljettajaa.	42
5.12 Lyhyen kuormaussyklin molempien ajotyylien päästökertoimet. Kuvassa on esitetty typen oksidit, typpidioksidi, pienhiukkaset, häikä ja palamattomat hiilivedyt. Tummempi väri edustaa rauhallisen ajotyylin kuljettajaa ja vaaleampi aggressiivisen ajotyylin kuljettajaa. . .	43

5.13	Pitkän ajosyklin rauhallisemman ajotyylin päästöpitoisuuksien kuvaaja. Punainen viiva tarkoittaa yli 95 % suhteellista kuormitusta, sininen viiva moottorijarrua tai alamäkeä ja vihreä viiva kuorman nostoa tai laskua. Päästödata ilmoitettu ajaumakorjattuna, ympäristökorjattuna ja märkänä.	46
5.14	Pitkän ajosyklin aggressiivisen ajotyylin päästöpitoisuuksien kuvaaja. Punainen viiva tarkoittaa yli 95 % suhteellista kuormitusta, sininen viiva moottorijarrua tai alamäkeä ja vihreä viiva kuorman nostoa tai laskua. Päästödata ilmoitettu ajaumakorjattuna, ympäristökorjattuna ja märkänä.	48
5.15	Pitkän ajosyklin molempien ajotyylien päästöpitoisuuksien vertailukuvaaja. Kuvaajien aika-akseli on asetettu samaksi. Punainen viiva edustaa rauhallisemman ajotyylin kuljettajaa ja musta aggressiivisemmän ajotyylin kuljettajaa.	51
5.16	Pitkän ajosyklin molempien kuljettajien päästökertoimet. Kuvassa on esitetty typen oksidit, typpidioksidi, pienhiukkaset, häikä ja palamattomat hiilivedyt. Tummempi väri edustaa rauhallisen ajotyylin kuljettajaa ja vaaleampi aggressiivisen ajotyylin kuljettajaa.	52
A.1	Moottorin kuormituspisteet staattisessa mittauksessa.	65
A.2	Moottorin kuormituspisteet lyhyessä kuormaussyklissä. Vasemmalla rauhallinen ajotyyli ja oikealla aggressiivinen ajotyyli.	65
A.3	Moottorin kuormituspisteet pitkässä ajosyklissä. Vasemmalla rauhallinen ajotyyli ja oikealla aggressiivinen ajotyyli.	66
B.1	GAS PEMS:in ohjekirjasta leikattuja teknisiä tietoja [2].	67
B.2	PM PEMS:in ohjekirjasta leikattuja teknisiä tietoja [3].	68
C.1	Lyhyen kuormaussyklin aikana vapautuneet päästöt grammoina. Vasemmalla rauhallinen ajotyyli ja oikealla aggressiivinen ajotyyli. Rauhallisessa ajotyyliässä kuormattiin arviolta 85 % aggressiivisen ajotyylin kuormaamasta sorasta. Ei vertailukelpoisia keskenään.	69
C.2	Pitkän ajosyklin aikana vapautuneet päästöt grammoina. Vasemmalla rauhallinen ajotyyli ja oikealla aggressiivinen ajotyyli.	69

TAULUKKOLUETTELO

2.1	Liikkuvien työkoneiden kaasu- ja hiukkaspäästöjen kehitys Euroopassa tehoalueella $130 \leq P \leq 560$ kW [10, 27].	5
4.1	Koneen teknisiä tietoja [25].	20
4.2	Kalibrointikaasujen analysointisertifikaatin tiedot.	24
4.3	Lyhyen kuormausyklin osiin jaetut työvaiheet [11].	27
5.1	Mittauspisteiden moottorille aiheuttamat kuormitukset. Prosentuaalinen arvo on kuormituksen suhteellinen vääntömomentti (Vääntökäyrästä). Luvut ovat moottorinohjauksen datasta keskiarvoistettuja arvoja.	30
5.2	Tietoja lyhyestä kuormausykklistä ja moottorin toiminnasta.	36
5.3	Tietoja pitkästä syklistä ja moottorin toiminnasta.	45

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BS	Hyötysuhdetta kuvaava päästökerroin [g/kWh] (engl. <i>Brake Specific</i>)
CAN	Tiedonsiirtoväylä (engl. <i>Controller Area Network</i>)
CO	Hiilimonoksidi
CO ₂	Hiilidioksidi
DC	Ajaumakorjattu (engl. <i>Drift Corrected</i>)
DPF	Hiukkassuodatin (engl. <i>Diesel Particulate Filter</i>)
EPA	Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto (engl. <i>Environmental Protection Agency</i>)
FID	Liekki-ionisaattoridetektori (engl. <i>Flame Ionization Detector</i>)
GFM	Gravimetrinen suodatusyksikkö (engl. <i>Gravimetric Filter Unit</i>)
GPS	Satelliittipaikannusjärjestelmä (engl. <i>Global Positioning System</i>)
HC	Hiilivety
HCN	Vetycyanidi
NDUV	Typen oksidien analysaattori (engl. <i>Non-Dispersive Ultraviolet</i>)
NDIR	Häkäkaasun ja hiilidioksidin analysaattori (engl. <i>Non-Dispersive Infrared</i>)
NO	Typpioksidi
NO ₂	Typpidioksidi
NO _x	Typen oksidit
O ₂	Happi
OH	Hydroksyyli
PC	Tietokone (engl. <i>Personal Computer</i>)
PEMS	Liikuteltava päästömittausjärjestelmä (engl. <i>Portable Emissions Measurement System</i>)
PM	Pienhiukkaset (engl. <i>Particulate Matter</i>)
SCR	NO _x -katalysaattori (engl. <i>Selective Catalytic Reduction</i>)
λ	Ilman ja polttoaineen suhde verrattuna stoikiometriseen arvoon
P	Teho [kW]
T	Lämpötila [K]
T_{\min}	Paikallisesti pienin vääntömomentti [Nm, %]
T_{\max}	Paikallisesti suurin vääntömomentti [Nm, %]

1. JOHDANTO

Tässä diplomityössä selvitetään vaikuttaako kuljettajan ajotyyli pakokaasupäästöjen syntymiseen. Aihe on mielenkiintoinen ja ajankohtaisen työstä tekee vuonna 2015 julki tullut Volkswagenin päästöskandaali, joka kertoo surullista tarinaa siitä, kuinka kovia riskejä ajoneuvovalmistajat ottavat välttyäkseen pakokaasupäästöjen rajoittamisen aiheuttavilta haitoilta. Haittoja ovat esimerkiksi polttoaineenkulutuksen nousu ja pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmien kustannukset [19, s. 458-460][22]. Henkilöautoissa jo tehtävät pienhiukkaslukumäärän mittaukset otetaan käyttöön myös liikkuvissa työkoneissa Euroopan komission asetuksen 2016/1628 myötä vuosina 2018 - 2019. Pienhiukkaslukumäärän mittauksen lisäksi haasteita aiheuttaa käytönaikaisten pakokaasupäästöjen testaus ja madaltunut pienhiukkaspäästön raja. [10]

Tämä diplomityö aloittaa päästömittaukseen liittyvän tutkimuksen Tampereen teknillisen yliopiston Automaatio ja hydraulikka -laboratoriossa. Työ vastaa tutkimuskysymyksiin ”Vaikuttaako kuljettajan ajotyyli työkoneen pakokaasupäästöjen syntymiseen?”, ”Kuinka mittausjärjestelmä käyttöön otetaan?” ja ”Kuinka mittausjärjestelmä soveltuu päästömittaukseen?” Mittaaminen toteutetaan liikutettavalla päästömittausjärjestelmällä, josta käytetään lyhennettä PEMS (engl. *Portable Emissions Measurement System*). Järjestelmä mahdollistaa laboratorio-olosuhteista koneille luonnolliseen työympäristöön siirtymisen, joten se avaa tutkimukselle uusia mahdollisuuksia ja näkökulmia. Mittausjärjestelmä itsessään on melko uusi konsepti ja Suomessa harvinainen. Se on kehittynyt nykymuotoonsa 90-luvun lopulta lähtien [5].

Pakokaasupäästöjen reaktiokemiaa on tutkittu vuosikymmeniä [13]. Pakokaasupäästöjä on tutkittu maailmalla erilaisilla moottorin parametreilla [26], ajoneuvoilla ja testisykleillä [6, 28]. Inhimillisen käytöksen aiheuttamia eroja pakokaasupäästöissä ei ole aiemmin tutkittu, joten tämä työ tuo uutta tietoa keskittymällä pääasiassa ajotyylin aiheuttamiin vaikutuksiin. Tampereen teknillisessä yliopistossa pakokaasupäästöjä on tutkittu fysiikan laboratorion toimesta. Wihersaari tutki pakokaasupäästöjen mittaamista todellisissa käyttöolosuhteissa, mutta hieman eri näkökulmasta [27].

Tavoitteena on selvittää vaikuttaako kuljettajien inhimilliset erot pakokaasupitoisuuksiin ja g/kWh-päästökertoimiin. Analysoinnissa käytetään staattisen mittauksen tuloksia ja niiden avulla yritetään ymmärtää pakokaasupäästöjen muodostumisen syitä. Toinen tavoite on tutustua mittausjärjestelmään ja selvittää sen käyttötyökoneympäristössä, mitä ongelmia ja haasteita mittaaminen tuottaa sekä minkälaisia rajoituksia järjestelmällä on.

Työ koostuu seitsemästä luvusta. Toisessa luvussa käsitellään pakokaasupäästöjä ja niiden säätelyä. Kolmannessa luvussa esitellään päästömittausjärjestelmä ja sen oheislaitteet. Neljännessä luvussa avataan mittausjärjestelyjä, joihin kuuluu erilaisia ennen mittausta tehtäviä valmisteluja ja määrittelyjä. Viidennessä luvussa esitellään tulokset, jotka koostuvat kahdesta osiosta. Ensimmäisessä osiossa kartoitetaan typen oksidit ja pienhiukkaspäästöt staattisella päästökartoituksella. Pakokaasupäästöjen pitoisuudet mitataan neljällä eri pyörimisnopeudella ja neljällä kuormituksella. Toisessa vaiheessa mitataan kahden ajotyylin pakokaasupäästöt kahdella erilaisella työkoneen luontaisia tehtäviä mukailevalla testisyklillä. Molemmille ajotyyleille on omat kuljettajat. Kuudenteen lukuun on koottu johdopäätökset. Luvussa esitellään ajotyylin vaikutusta lopullisiin pakokaasupäästöihin, analysoidaan moottorille ominaista pakokaasukäytöstä sekä mittaustyön aikana kohdattuja haasteita ja rajoituksia. Lopussa pohditaan järjestelmän tulevaisuuden potentiaalia tutkimuksen ja kehitystyön kannalta. Viimeisenä on yhteenveto.

2. PAKOKAASUPÄÄSTÖT JA NIIDEN SÄÄTELY DIESELAJONEUVOISSA

Maailmanlaajuinen energiankulutus on suurimmalla tasollaan koskaan aikaisemmin [29]. *The World Bankin* laatimien tilastojen mukaan sähkönkulutus on kasvanut 1970-luvulta lähes kolminkertaiseksi. Kasvu on ollut tasaista ja jatkuvaa. Tilastoista näkee kehittyneiden maiden sähkönkulutuksen tasaantuneen tai jopa laske-
neen. Väkiluvultaan valtavat maat, kuten Kiina ja Intia, tahtovat lisää energiaa ja ne kasvattavat sähköntuotantoaan kiihtyvällä tahdilla. Aasian maiden keskiluok-
kaistuminen tulee jatkamaan kasvavaa trendiä myös tulevaisuudessa. [29]

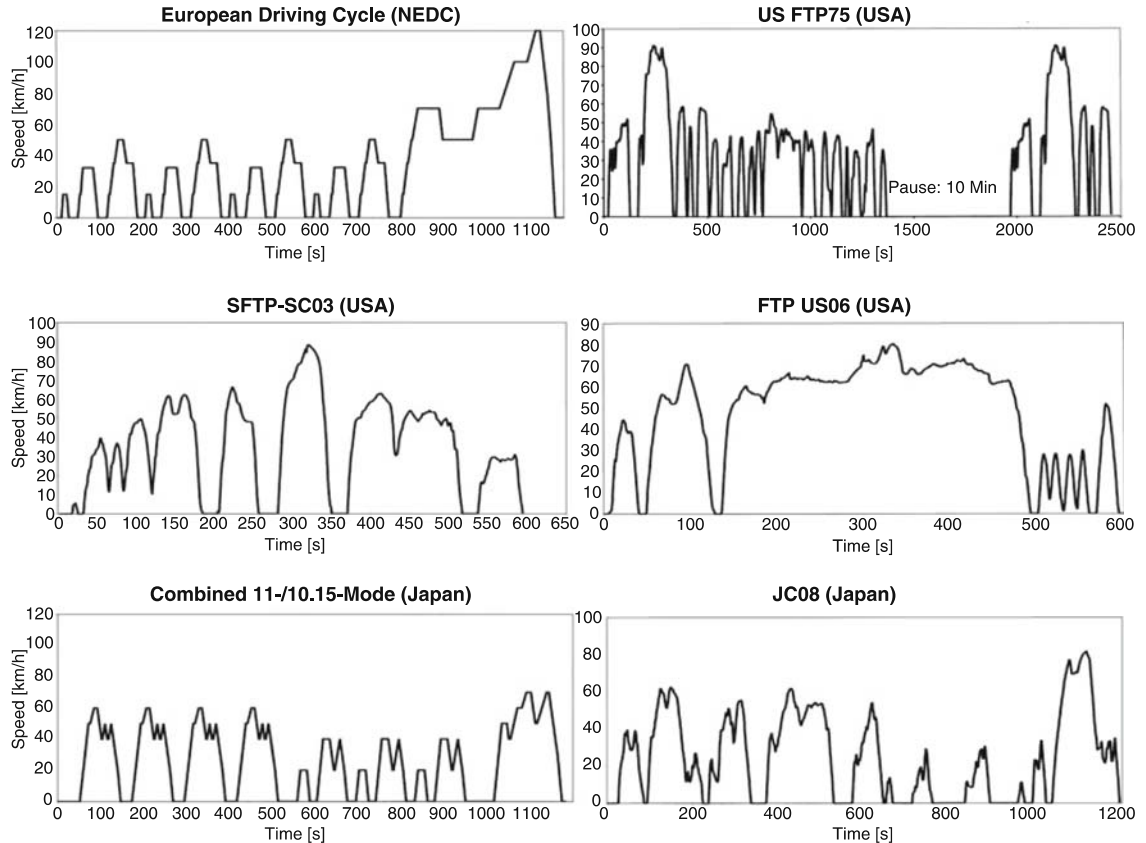
Energiankulutuksen lisääntyminen vaikeuttaa kasvihuoneilmiön hallitsemista, sillä edelleen merkittävä osa maailman sähköstä tuotetaan uusiutumattomilla, kaasumai-
sia ja pienhiukkaspäästöjä tuottavilla energianlähteillä [30]. Päästöjen negatiiviset
vaikutukset elinympäristölle ja ihmisille ovat saaneet lainsäätäjät rajoittamaan nii-
den muodostumista. Liikenne on yksi merkittävä päästöjen aiheuttaja [8], joten
ajoneuvoliikenteen viime vuosikymmeninä merkittäviä askelia ottanut päästöjä kos-
keva lainsäädäntö [10] on antanut innostuksen myös tämän tutkimuksen ja diplomi-
työn tekemiseen.

2.1 Ohjaava lainsäädäntö

Autojen ja kevyiden kuorma-autojen päästöjä on alettu rajoittaa 1990-luvun alku-
puolelta [4]. Kansainvälisesti merkittävimpiä ohjaavia säätöelimiä ovat Euroopan
komissio ja Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluvirasto EPA (engl. *Environmental Pro-
tection Agency*). Maailmalla valtioiden kansalliset asetukset pohjautuvat pitkälti
kahteen edellä mainittujen tahojen säädöksiin. Uuden päästöstandardin käyttöö-
nto tarkoittaa sitä, että mitattavan ajoneuvon täytyy alittaa tietyt kaasu- ja pien-
hiukkaspäästön raja-arvot määrättyllä testisykllillä. Päästöpolitiikka aiheuttaa kus-
tannuksia ajoneuvovalmistajille ja viime kädessä kuluttajalle lisääntyneen työn ja
kalliiden oheislaitteiden muodossa.

Merkittävän kansainvälisen standardin käyttö oman kansallisen päästöasetuksen

pohjana ei ole tae ajantasaisesta ja puhtaasta liikenteen päästöjalanjäljestä. Kiina käyttää standardin pohjana Euroopan komission laatimaa Stage-normistoa, joskin puoli vuosikymmentä vanhaa asetusta. Näillä näkymin Euroopassa vuodesta 2014 käytössä ollut henkilöautoliikenteen Euro 6 -standardi otetaan Kiinassa käyttöön vuosina 2018 – 2019. [4, 19]



Kuva 2.1. Henkilöautoliikenteen testisyklejä Yhdysvalloista, Japanista ja Euroopasta. Syklit ovat profiiltaan erilaisia ja niiden dynaaminen vaihtelu on suurta. [19]

Standardien välisten päästökerrointen ylärajat eivät ole vertailukelpoisia keskenään, sillä niissä käytetään erilaisia nopeus- ja kuormitusyklejä (Kuva 2.1). Testisykli standardointi ja käytännön toteutus on haastavaa, koska todellista ajotilannetta vastaavan toistettavan testiolosuhteen laatiminen on vaikeaa. Testisyklin vaihtelun lisäksi paloprosessiin ja mittaukseen vaikuttavia tekijöitä, kuten tien profiili, lämpötila, kosteus, tuuli ja polttoaine on mahdotonta rakentaa identtisiksi laboratorioolosuhteiden ulkopuolella. Tähän asti testit on suoritettu jarrudynamometrissä, joten todellisten käytönaikaisten päästöjen selvittämiseen tarvitaan edelleen näyttöä.

Merkittävimmät päästöstandardit ovat laajoja [4]. Standardit on jaettu eri luokkiin ajoneuvon käytön ja koon perusteella. Joka luokalla on tarkoitukseen sopivat tes-

tisyklit ja sallittavan päästökertoimen ylärajat. Yleisellä tasolla erottavia tekijöitä ovat ajoneuvon massa, teho, kuutiolavuus ja käyttövoima. Työkoneille on omat päästöasetukset ja ne poikkeavat ajoneuvojen päästöasetuksista siten, että rajoitukset koskevat moottorivalmistajia työkonevalmistajien sijaan. Ensimmäistä eurooppalaista liikkuvien työkoneiden päästöasetusta kutsutaan nimellä Stage 1, joka koskee ”kaikkia korilla varustettuja tai korittomia, pyörällisiä tai pyörättömiä liikkuvia koneita, siirrettäviä laitteita tai ajoneuvoja, joita ei ole tarkoitettu matkustajien tai tavaroiden kuljetukseen tieliikenteessä, myös sellaisten ajoneuvojen alustaan asennettuja koneita, jotka on tarkoitettu matkustajien tai tavaroiden kuljetukseen tieliikenteessä.” [10] Tässä työssä kiinnostus kohdistuu liikkuvien työkoneiden Euroopan komission direktiiveihin. Joulukuussa 1997 asetettu kantadirektiivi 97/68/EC poistui käytöstä 31.12.2016 ja korvautui 14.9.2016 julkaistulla Stage 5 -direktiivillä 2016/1628 [10]. Stage 5 tuo uutena asiana koneen käytönaikaisen testauksen, päästörajat alle 19 kW:n moottoreille, pienhiukkasten lukumäärän mittauksen ja alemman ylärajan pienhiukkasten massalle. Käytönaikaisessa testauksessa mitataan ainoastaan kaasumaiset päästöt. Testauksessa koneelle määritetään tuntiperusteinen käyttöikä, jonka tietyissä pisteissä mittaukset suoritetaan. Kirjoitushetkellä Euroopan komissio ei ole julkaissut virallista tietoa mittausten toteuttamisesta. [9, 10]

Taulukko 2.1. *Liikkuvien työkoneiden kaasu- ja hiukkaspäästöjen kehitys Euroopassa tehoalueella $130 \leq P \leq 560$ kW [10, 27].*

Taso (Stage)	Voimassa	CO	HC	NO _x	HC + NO _x	PM	PN
		g/kWh					#/kWh
1	1/1991	5,0	1,3	9,2	-	0,54	-
2	1/2002	3,5	1,0	6,0	-	0,2	-
3A	1/2006	3,5	-	-	4,0	0,2	-
3B	1/2011	3,5	0,19	2,0	-	0,025	-
4	1/2014	3,5	0,19	0,4	-	0,025	-
5	1/2019	3,5	0,19	0,4	-	0,015	1×10^{12}

Wihersaaren laatimassa taulukossa 2.1 on esitetty eri tasojen (Stage) päästökerroimia energiapohjaisessa g/kWh -muodossa [27]. Työn kirjoitushetkellä rajoitetaan häkää (CO), palamattomia hiilivetyjä (HC), typen oksideja (NO_x) ja pienhiukkasia (PM), sekä tulevaisuudessa pienhiukkasten lukumäärää (PN). Vuosien aikana erityisesti NO_x- ja PM-päästöjen rajoja on laskettu merkittävästi.

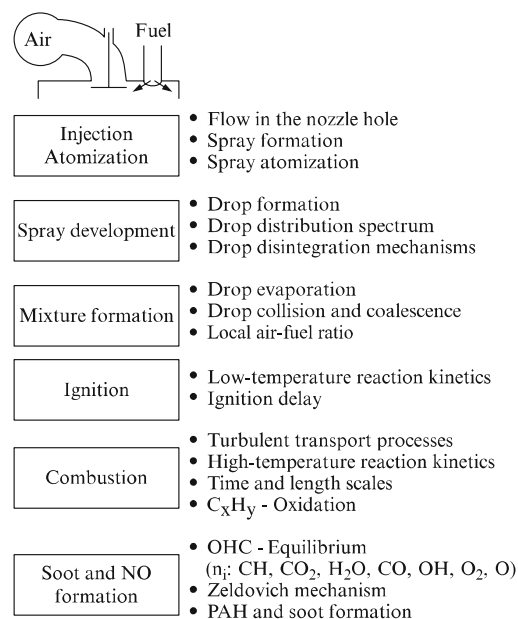
Moottorin tai moottoriperheen tyyppihyväksynnässä osoitetaan moottorin alittavan sille asetetut raja-arvot. Päästörajoja on tiukennettu vuosien varrella moottorinohjauksen ja pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmien kehittyessä. Uusimmat säädökset pakottavat konevalmistajia käyttämään pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmiä, jotta

tyyppihyväksynnästä pääsee hyväksytysti läpi. Hiukkassuodattimet (engl. *Diesel Particulate Filter*) ja SCR:t (engl. *Selective Catalytic Reduction*) ovat kalliita, eikä moottorivalmistajat niitä mielellään asenna.

2.2 Palaminen moottorissa

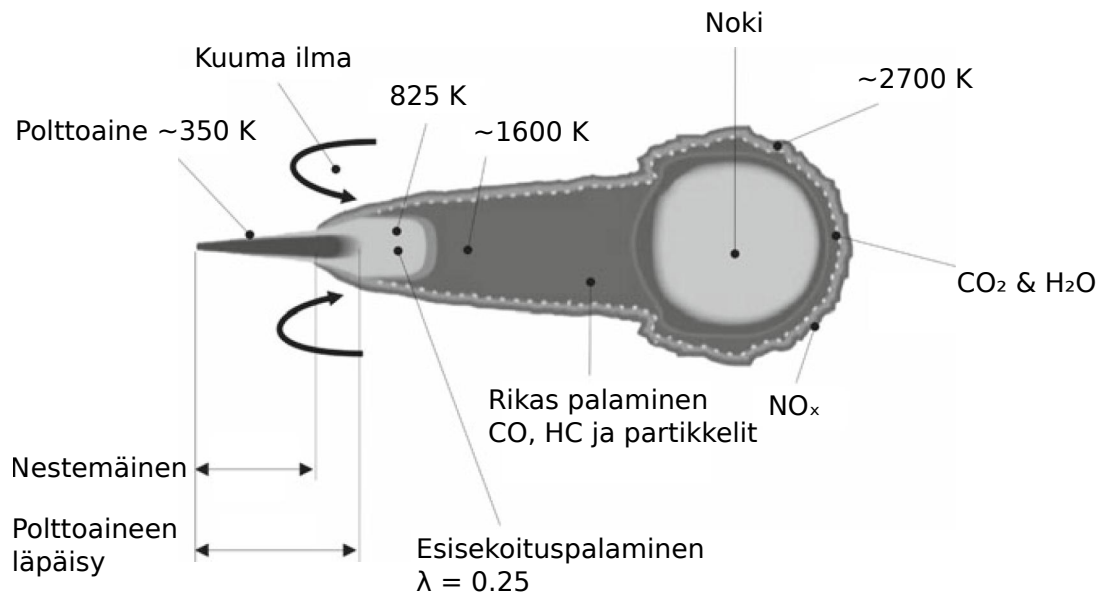
Dieselmoottorin palamisprosessi on tapahtumaketjujen sarja, joka oikein hallittuna muuttaa kemiallisen energian liike-energiaksi. Dieselmoottorit perustuvat Diesel-työkiertoon, jonka neljä vaihetta ovat imutahti, puristustahti, työtahti ja poistotahti. Pääasiallinen ero Otto-kierrolla toimivaan moottoriin on polttoaineen sytytymisessä. Dieselmoottorissa ei ole sytytystulppia, vaan polttoaine syttyy itsestään paineen ja lämmön alla. [13]

Toinen merkittävä ero työkiertojen välillä on polttoaineen syötössä. Dieselmoottorissa polttoaine ruiskutetaan ruiskutussuuttimien läpi suoraan palokammioon paineistetun ja kuuman ilman sekaan. Bensiinimoottorissa polttoaine ja ilma sekoitetaan jo imukanavassa ja se sytytetään sytytystulpalla. Dieselmoottorissa polttoaine-ilma -seos homogenoituu vain osittain. Palorintama alkaa edetä lähes välittömästi ruiskutuksen alkaessa ja palorintaman etenemistä rajoittaa polttoaine-ilma -seoksen muodostuminen. Polttoaineen sekoittumisnopeutta voidaan edesauttaa ruiskutus-suuttimien järkevän suunnittelun avustuksella, mutta bensiinimoottorissa tehokkaalle palamiselle on silti paremmat edellytykset. [13]



Kuva 2.2. Paloprosessin eteneminen dieselmoottorissa [18, s. 128].

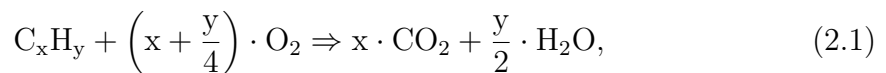
Kuvassa 2.2 on avattu moottorin paloprosessia. Polttoaine ruiskutetaan palokammioon ja se alkaa atomisoitua pieniksi pisaroiksi. Atomisoitumisen jälkeen polttoaine alkaa höyrystyä, joka on edellytys itsesyttymiselle. Polttoaine sekoittuu ilman kanssa heterogeenisellä tavalla, jossa seoksen muodostuminen rajoittaa palamisnopeutta. Lopulta seos syttyy pienen viiveen jälkeen sen saavuttaessa itsesyttymislämpötilan. Syttymisen jälkeen reaktio alkaa edetä ja seos palaa tyypillisesti laihalla seoksella. Pienet muutokset ruiskutuksen ajoituksessa ja ruiskutusnopeudessa muuttavat moottorin ja palamisen luonnetta, joka ilmenee käyttäjälle muuttuneena tehona, polttoaineen kulutuksena ja pakokaasupäästöinä. [18, s. 126-127]



Kuva 2.3. *Konsepti dieselin ruiskutuksesta palokammioon. Muokattu lähteestä [12].*

Kuvassa 2.3 on esitetty dieselmoottorille ominainen palorintaman muoto polttoaineen ruiskutuksen aikana. Kuvassa vasemmalla oleva piikki on nestemäistä polttoainetta. Polttoaineen ja ilman laihat seosalueet ovat palorintaman reunoilla ja rikkaat alueet lähellä ruiskutussuutinta ja sumupilven sisällä. Kuvassa on esitetty pakokaasupäästöjen päästökomenttien syntykohtia, joissa typen oksidit ja hiilidioksidi muodostuvat palorintamassa ruiskutuspilven reunalla sekä pienhiukkaset, noki ja häkä, jotka muodostuvat rikkaammilla alueilla. [18, 24]

Dieselmoottorilla onnistunut ja tehokas palotapahtuma ei vaadi stoikiometrista seosta. Ideaalissa palamisessa lopputuotteena muodostuu hiilidioksidia (CO₂) ja vettä (H₂O). Bensiini- ja dieselmoottoreissa ideaalinen palaminen noudattaa kaavaa



missä C on hiili, H on vety ja O on happi. Termit x ja y viittaavat polttoaineen vety-hiili suhteeseen. Dieselöljyssä on satoja erilaisia hiilivetyjä, joilla on erilainen molekyyli rakenne ja massa. Hiilivetyjen ominaisuudet vaihtelevat, jonka vuoksi polttoaineen laatua valvotaan erilaisilla standardeilla. [18, s. 119]

Palaminen ei noudata ideaalista palamista, jonka vuoksi palotapahtumassa syntyy kaasumaisia päästöjä ja pienhiukkasia. Tyypillisesti palotapahtuman oheistuotteena syntyy häkää, hiilidioksidia, palamattomia tai osittain palaneita hiilivetyjä, typen oksideja, pienhiukkasia, nokea (engl. *soot*), rikkiyhdisteitä, aldehydejä, syanidia, ammoniakkia, bentseeniä ja polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä. Typpioksidin NO ja typpidioksidin NO₂ muodostuminen on kytköksissä toisiinsa, joten ne ilmoitetaan yhteisnimellä NO_x. Lisää päästöihin perehdytään seuraavissa alaluvuissa 2.3 ja 2.4. [19, s. 443]

2.3 Kaasumaiset päästöt

Kaasumaisia päästöjä ovat NO_x, CO, CO₂ ja HC, joista merkittävimpiä ovat NO_x ja CO₂. Häkä on hajuton ja väritön kaasu. Se on myrkyllinen ja suurissa konsentraatioissa palava. Häkäpäästöt ovat dieselmoottoreissa yleisesti ottaen alhaiset, koska happiylijäämäinen palaminen vie kemiallisia lopputuotteita luonnollisesti kohti hiilidioksidin syntymistä. Moottorin oikein suunniteltu huuhtelugeometria ja imukanavistossa muodostuvat pyörteet vähentävät häkäpäästöjä. Häkä muodostuu paikallisesti rikkaissa osissa sylinteriä ja kaasun määrä lähtee kasvuun seoksen rikkautta kuvaavan λ-arvon laskiessa alle yhden. Rikkaan seoksen vähähappinen paloympäristö on merkittävä tekijä kaasun syntymiselle. Häkäkaasulle on ominaista oksidoitua hitaammalla prosessilla jälleen hiilidioksidiksi. Häkäkaasun syntyminen on osittain lämpötilariippuvaista, sillä CO – CO₂ oksidoitumisprosessi hidastuu lämpötilan kasvaessa. [13, s. 592] [19, s. 449]

Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu ja polttomoottorikäytössä sitä muodostuu hiilivetyjen palaessa (Kaava 2.1). Moottorissa syntyneen hiilidioksidin määrä on lähes suoraan verrannollinen käytetyn polttoaineen määrään. Liikenteen lisäksi kaasua syntyy teollisuudessa ja maataloudessa [8]. Yhdysvaltain kauppaministeriön alla toimivan liittovaltion sää- ja valtamerentutkimusorganisaation mukaan hiilidioksidin määrä maailmanlaajuisesti on historian korkeimmalla tasolla. Kesäkuussa 2015 ilmakehässä olevan hiilidioksidin pitoisuus ylitti ensimmäistä kertaa 400 ppm. [7] Hiilidioksidin määrä lisääntyy vuosittain, eikä kansallisista vähennystoimenpiteistä tunnu olevan apua. Suurin osa maailman hiilidioksidista syntyy Kiinassa, Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa [8].

Typen oksidien määrää (Taulukko 2.1) on rajoitettu voimakkaasti viime vuosikymmeninä sen haitallisten ominaisuuksien vuoksi. Ympäristöhaitoista puhuttaessa esiin nousee NO_2 . Se on punertavan ruskea pistävän hajuisen kaasu. Typpidioksidi on voimakas hapetin ja muodostaa kosteuden kanssa happosateita. Kaasua pidetään hengitysteille haitallisena. Typpidioksidi absorboi auringon säteilyä ja tekee näkyvyydestä utuisen. [19, s. 425] [21, s. 46-48]

Termisessä typpioksidin muodostumisketjussa typpioksidi muodostuu paikallisesti kuumissa osissa sylinteriä ja vaatii muodostuakseen vähintään 1800 - 2200 K lämpötilan. Korkeimmat NO_x -päästöt syntyvät laihalla seoksella ja kaasusta suurin osa on NO -kaasua. Zeldovichin vuonna 1946 esittämät reaktiot kuvaavat NO muodostumista:



Typpioksidin muodostumisen edellytys on atomaarisen hapen liittyminen reaktioketjuun. Lämpötilasta 1800 K alkaen happimolekyylit hajoaa atomaariseksi hapeksi, joka on edellytys Zeldovichin ensimmäiselle reaktiolle 2.2. Palokammiossa oleva happiatomi reagoi typpimolekyylin kanssa muodostaen typpioksidia ja atomaarista typpeä. Reaktiossa 2.3 happimolekyylit muodostaa reaktion 2.2 tuotteena syntyneen typen kanssa typpioksidia ja jälleen kerran atomaarista happea. Viimeinen reaktio kuvaa NO :n muodostumista sylinterin rikkaassa osassa palorintaman takana. Reaktiossa 2.4 typpioksidia ja vetyä muodostuu aiemmin ketjussa syntyneestä atomaarisesta tyyppistä ja hydroksyylistä (OH). [13, s. 572-578][18][19, s. 445-446]

Toinen muodostumisprosessi on Fenimoren NO , joka toimii suhteellisen matalalla lämpötilalla (1000 K). Fenimoren NO -prosessi alkaa palorintamasta, HC -radikaalien ja typen reagoinnin myötä. Reaktio muodostaa vetysyanidia (HCN), joka muuttuu typpioksidiksi. On olemassa myös muita mekanismeja, kuten polttoaine-mekanismi ja N_2O -mekanismi, mutta ne eivät ole Imperaton mukaan dieselmoottoireissa yhtä merkittäviä. [15]

Typpidioksidin muodostumisen teitä ei tunneta yhtä tarkasti. Todennäköisimmät tiet NO_2 muodostumiselle ovat:



Diesel-palotapahtuman kemiallinen tasapaino ei anna viitteitä NO_2 muodostumiselle, mutta sitä kuitenkin vapautuu merkittäviä määriä. Yllättävästi NO_2/NO -suhde on suurimmillaan pienillä kuormituksilla. Dieselmootoreiden NO_x -päästöissä erityisen haitallisen NO_2 :n osuus on 5 - 15 %. [13, s. 572-578], [18, s. 221], [19, s. 445-446]

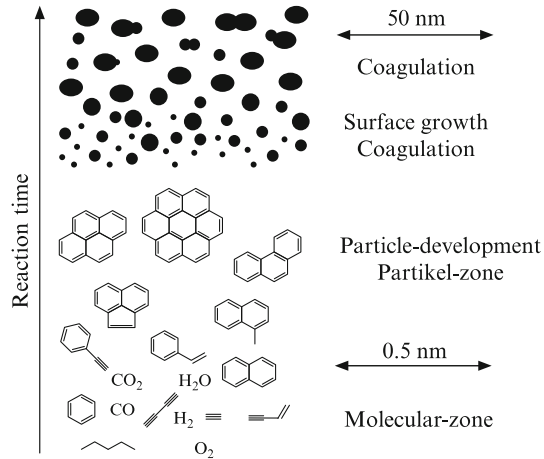
Palamattomat hiilivedyt, jotka lyhennetään HC (engl. *Hydrocarbon*), muodostuvat nimensä mukaisesti palokammiossa palamatta jääneestä polttoaineesta tai öljystä. Palamattomat hiilivedyt ovat kaasumaisia, joko osittain tai täysin palaneita hiilivetyjä. Kirjallisuudessa on esitetty kaksi tietä palamattomien hiilivetyjen syntymiselle. Ensimmäisessä tavassa polttoaineen ja ilman seos on liian laiha itsesyttymiselle ja palorintaman ylläpitämiselle. Toisessa tavassa seos on liian rikas. Heterogeenisen seoksen vuoksi palotilassa voi olla paikallisesti laihoja ja rikkaita alueita yhtäaikaisesti. Yleisesti ottaen moottorin HC-emissiot indikoivat palamisen tehotomuutta. Puhdas palaminen tarvitsee polttoaineen riittävän sumuttumisen ja höyrystymisen. Vajaata palamista saattaa ilmetä, mikäli ruiskutus osuu kylmiin sylinteriseinämiin tai ruiskutus ei ole tarpeeksi hienoa. Sylinteriseinämän pinnankarheus vaikuttaa sylinteriseinämän pinta-alaan, joten karhea sylinteriseinäma kasvattaa kylmää pintaa ja edesauttaa palamattomien hiilivetyjen syntymistä. Edellisten mekanismien lisäksi palotilan korkea paine auttaa palotuotteita työntymään pieniin taskuihin, joissa ei ole palamista edellyttäviä olosuhteita. Kyseisiä pieniä taskuja löytyy esimerkiksi männänrenkaiden takaa sekä männän ja sylinteriputken välistä. [13]

2.4 Pienhiukkaspäästöt

Myös pienhiukkasten kohdalla törmätään epäideaalin lämpövoimakoneen ihmiselle ja ympäristölle aiheuttamiin haittavaikutuksiin. Dieselmootoreissa syntyneet ihmiselle haitalliset pienhiukkaset ovat lähtöisin polttoaineen hiilivedyistä. Polttoaineen ruiskutukselle ominainen muoto aiheuttaa polttoainesumun keskiosiin vähähap-pisen alueen, jossa hiilivedyt eivät pala puhtaasti. Ilmiötä kutsutaan pyrolyysiksi, siinä kuumennetaan orgaanisia aineita hapen pääsemättä osallistumaan reaktioon ja lopputuloksena hiilivedyt hajoavat. Polttoaineen lisäksi voiteluöljyllä on vaikutusta pienhiukkaspäästöjen muodostumisessa. [13]

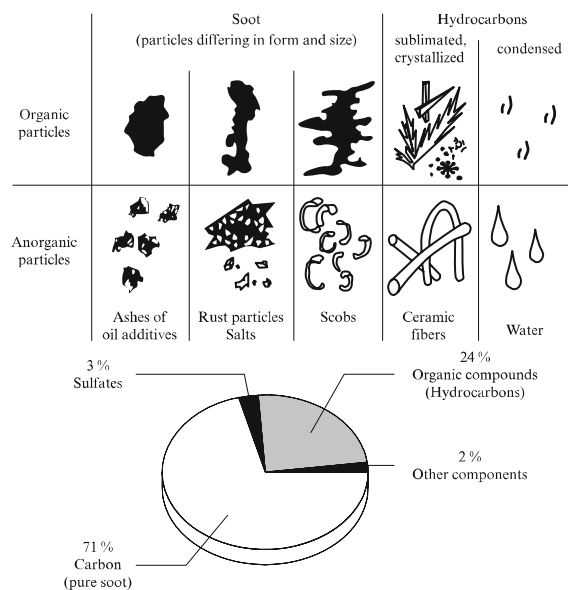
Arkikielessä pienhiukkaspäästöt ja nokipäästöt ovat samankaltaisia ja hieman haastavia erottaa toisistaan. Pääsääntöisesti noki on 20 - 30 nm halkaisijallaan olevaa pallomaista elementaarista hiiltä. Tämä pallomainen nokihiukkanen on kasvanut kaasumaisten hiilivetyjen liittymisen, koaguloitumisen ja yhdistymisen seurauksena (Kuva 2.4). Kun nokihiukkasia on tarpeeksi paljon ja ne ovat tarpeeksi suuria, niin

ne voi havaita pakoputken päästä tulevana sakeana tummana pilvenä. Nykyaikaisissa autoissa pöllähtäviä pilviä harvemmin näkee, sillä pakokaasun takaisinkierrätysjärjestelmät ja pienhiukkassuodattimet ovat saaneet aikaan sen, että nokihiukkasia on määrällisesti vähemmän ja ne ovat kooltaan pienempiä. [18, 19]



Kuva 2.4. Alkeellisen hiiliatomin kasvu nokihiukkaseksi [18].

Kuvassa 2.5 on havainnollistettu tarkemmin pienhiukkasten komponentteja. Pienhiukkaset ovat nokihiukkaseksi esiasteita, joihin on yhdistynyt lisää nokea, hiilivetyjä, voiteluöljyn lisäaineita, ruostetta ja kosteutta. Pienhiukkasten keskimääräinen koko on nokihiukkasta huomattavasti suurempi, noin 100 - 120 nm. Osuudella 70 - 75 % noki on suurin yksittäinen osa pienhiukkaspäästöjä. Muita merkittäviä aineita ovat orgaaniset yhdisteet ja polttoaineessa oleva rikki. [13, 18]



Kuva 2.5. Ylemmässä kuvassa pienhiukkasten erottelu orgaanisten ja epäorgaanisten aineiden välillä. Alhaalla pienhiukkasten prosentuaalinen koostumus. [18]

Moottorin ruiskutuksen ajankohdalla, profiililla, kammiopaineilla, ruiskutuksen määrällä ja lämpötilalla on merkittävä vaikutus pienhiukkaspäästöjen syntymiselle. Lähtökohtaisesti pienhiukkaspäästöt syntyvät paikallisesti rikkaassa osassa sylinteriä ja korkeassa $1500 < T < 1900$ °C lämpötilassa. Syntymisprosesseja on useita ja ne ovat osittain päällekkäisiä, mutta 90 % noesta syntyy palokammiossa ennen pako-kanavistoa.

3. PÄÄSTÖMITTAUSJÄRJESTELMÄN ESITTELY

Työssä käytetty päästömittausjärjestelmä on tarkoitettu autojen, kuorma-autojen ja koneiden pakokaasupäästöjen mittaukseen. Järjestelmästä käytetään nimeä PEMS, joka tulee sanoista *Portable Emissions Measurement System* – liikuteltava päästömittausjärjestelmä. Järjestelmä soveltuu bensiini- ja dieselmootoreiden mittaamiseen. Laitteisto mahdollistaa todenmukaisen käyttötilanteen päästömittauksen ja siten siirtymisen laboratorio-olosuhteista ajoneuvoille ja koneille luonnolliseen testausympäristöön. Laitteisto mittaa palamattomat hiilivedyt (HC), typpioksidin (NO), typpidioksidin (NO₂), häkäkaasun (CO), hiilidioksidin (CO₂), hapen (O₂), noen ja pienhiukkaset (PM). Järjestelmä jakautuu kahteen pääyksikköön, jotka ovat kaasumaisten pakokaasupäästöjen mittausyksikkö GAS PEMS ja pienhiukkaspäästöjen mittausyksikkö PM PEMS.

Ensimmäinen laitteisto on kehitetty 90-luvun lopulla Hondan toimesta [5]. Mittausjärjestelmä on Suomessa harvinainen, mutta vastaavia laitteita on käytössä maissa, joissa valmistetaan autoja. Mittausjärjestelmien valmistajia ovat mm. AVL, Sensors ja Horiba.

Varsinaisten päästömittausten lisäksi järjestelmä kerää ympäristötietoa lämpötila- ja kosteusanturilla sekä reittidataa GPS:llä (engl. *Global Positioning System*). Mittausjärjestelmä liitetään mitattavan ajoneuvon tai koneen CAN-väylälle (engl. *Controller Area Network*) moottorin ohjausyksikön tietojen keräämiseksi. Tiedot keräävä System Control PC (engl. *Personal Computer*) yhdistää mittausdatan valmistajan oman jälkikäsitteilyohjelmiston ymmärtämään muotoon.

Järjestelmä on tehty vastaamaan Euroopan komission ja EPA:n määräyksiä päästömittaukseen liittyen, joten mittalaitteet täyttävät standardien asettamat vaatimukset. Järjestelmään on tehty raportointityökaluja, jotka osittain helpottavat tyyppi-hyväksynnän tekemistä. [2, 3]

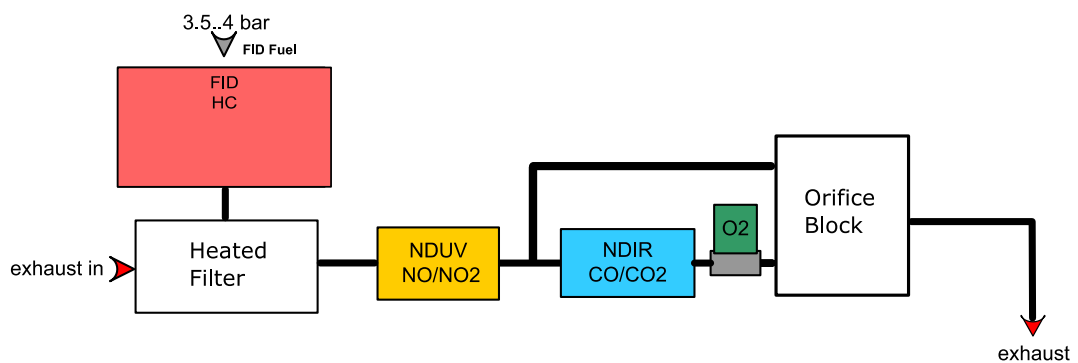
3.1 Kaasumaisten päästöjen mittauslaitteisto

Kuvassa 3.1 keskimäinen laite on kaasumaisten pakokaasupäästöjen mittalaite. Laite on fyysisiltä mitoiltaan $47 \times 36 \times 67$ cm ja se painaa ilman lisälaitteita noin 50 kg. Etupaneelissa vasemmalta oikealle on virtapainike, indikaattoriledit, nol-lakaasun, kalibrointikaasun ja polttokaasun tuontiliittimet, lämmitetty suodatin ja lämmitetty näytteenottolinja.



Kuva 3.1. Keskellä GAS PEMS, ylhäällä järjestelmää ohjaava PC, alhaalla virtalähde.

Kuvassa 3.2 on yksinkertaistettu esitys laitteen virtauskaaviosta. Kuvasta puuttuvat anturointi, pumput, venttiilit, viilennyselementit, ilmalinjat, huuhtelulinjat ja kalibrointilinjat.



Kuva 3.2. Kaasumaisia pakokaasupäästöjä mittaavan laitteen yksinkertaistettu virtauskaavio.

Näyte otetaan lämmitettyyn, 190°C näytelinjaan, joka näkyy kuvan 3.1 oikeassa reunassa. Näytelinja johtaa lämmitetylle suodattimelle, joka pitää näytteen korkeassa lämpötilassa. Pienhiukkaset suodatetaan pois raa'asta pakokaasusta ja virtaus

jaetaan kahteen osavirtaukseen, jotka kulkevat palamattomat hiilivedyt mittaavaan liekki-ionisaattoridetektoriin FID:iin (engl. *Flame Ionization Detector*) ja typen oksidien analysaattori NDUV:iin (engl. *Non-Dispersive Ultraviolet*). Seuraavaksi mittausvuorossa on häkäkaasu ja hiilidioksidi, jotka mitataan infrapunaan perustuvalla NDIR-analisaattorilla (engl. *Non-Dispersive Infrared*). Viimeisenä ennen kuristinta mitataan happi (Kuvassa 3.2 lohko O₂). Kuristinlohkon tehtävä on säätää näytteen virtausnopeutta. Kuristinlohkosta näyte poistetaan ulkoilmaan.

Liekki-ionisaattoridetektorin jälkeisillä analysaattoreilla on tietty toimintalämpötila, joten kuuma pakokaasu viilennetään mittauslämpötilaan kaksivaiheisella viilennyksellä. Ensimmäinen vaihe viilentää näytteen NDUV:lle sopivaksi ja toinen vaihe NDIR:lle sopivaksi. Viilennys toteutetaan peltier-elementeillä, joita valmistaja kutsuu TEC:ksi (engl. *Thermoelectric Chiller*). [2]

Yksikköä voidaan käyttää myös itsenäisesti ilman System Control PC:tä. Mittausdataa voidaan lukea ethernetin ja analogiulostulojen kautta. Järjestelmän näytteenottotaajuus on kaasumaisille komponenteille 5 Hz ja käyttötiedoille 1 Hz. Palamattomien hiilivetyjen mittalaite FID käyttää orgaanisten yhdisteiden mittaamisen apuna vetykaasua. Polttokaasu sisältää 40 % vetyä ja tasapainokaasuna toimii helium. Kaasun paine säädetään pullon regulaattorilla FID:lle sopivaksi. Pulloa kannetaan työkoneneen vasemmassa takareunassa ja se on merkitty kuvassa 3.4 vihreällä muovisella sauvalla. Mittalaitteen mittaustarkkuus on esitetty liitteen B kuvassa B.1.

3.2 Pienhiukkaspäästöjen mittauslaitteisto

Kuvassa 3.3 näkyvä ylempi laite on nokipitoisuuden mittalaite ja alempi on pienhiukkasten massan mittaava gravimetrinen suodatinyksikkö, jota kutsutaan tästä eteenpäin GFM:ksi (engl. *Gravimetric Filter Unit*). Kasattuna laite on fyysisiltä mitoiltaan 47 × 46 × 61 cm ja se painaa ilman lisälaitteita noin 50 kg. Alemman laitteen luukun taakse asennetaan pienhiukkassuodatin (Kuva 4.3), josta pienhiukkasmassa lopulta punnitaan. Muut letkut liittyvät järjestelmän huuhteluun, laimennukseen ja pakokaasujen poistoon.

Noen mittaus perustuu fotoakustiseen ilmiöön. Krämerin et al. mukaan noki absorboi moduloitua näkyvää valoa, joka tiettyjen vaiheiden jälkeen saa nokihiukkaset lämmittämään ympäröivää kaasua. Ilmiö saa kaasun paineen vaihtelevaan, jonka voi havaita mikrofonilla. Mikrofonin signaali voidaan muuntaa sähköiseksi noen massapitoisuuden signaaliksi. [17] Nokimittauksen näytteenottotaajuus on 5 Hz. Pakokaasunäyte otetaan pakoputkesta mittapähän, jonka jälkeen se laimennetaan



Kuva 3.3. Pienhiukkaspäästöjen mittalaitteet. Ylempi laite mittaa noen pitoisuuden ja alempi pienhiukkasten massan.

puhdistetulla ilmalla haluttuun laimennussuhteeseen näytelinjaan asennetulla laimennuskennolla. Laimennussuhde on käyttäjän määriteltävissä ja se riippuu ajon pituudesta, halutusta suodattimen kuormasta ja teknisistä vaatimuksista. Laitteistolle soveltuva laimennussuhde on 2 - 50, mutta käytännöllinen laimennussuhde on 6 - 12 välissä. Laimennussuhteen kasvattaminen pidentää mittausaikaa, sillä suodatin täyttyy hitaammin.

Pienhiukkaspäästöjen mittalaitteessa nokianturi ja pienhiukkasmassan suodatin ovat rinnakkain. Laimennettu näyte tuodaan GFM:ään (Kuvassa 3.3 alemman yksikön vasemmassa ylälaidassa sijaitsevaan liittimeen), josta se jaetaan liittimen alapuolista letkua pitkin nokianturille ja edelleen GFM:n sisällä olevalle ja myöhemmin punnittavalle hiukkassuodattimelle. Nokianturi mittaa noen pitoisuuden, jonka jälkeen virtaus ohjataan takaisin GFM:ään näytteen virtausnopeuden säätämiseksi. Kirjallisuuden mukaan fotoakustisen nokimittauksen etuja ovat korkea herkkyys, signaalin lineaarinen käyttäytyminen noen määrän kanssa, hyvä aikaresoluutio ja korkea dynamiikka [19, s. 480].

Laimennettu pakokaasunäyte viedään GFM:ssä suoraan pienhiukkassuodattimelle, jonka jälkeen se ohjataan kuristuselementille virtausnopeuden säätöä varten. Molempien yksiköiden virtausnopeuden säätö toteutetaan säädettävän kuristuksen ja näytepumpun yhteistoiminnalla. Laimennukselle on GFM:ssä itsenäinen järjestelmä. Laimennusilma suodatetaan puhtaaksi kahden rinnakkain olevan aktiivihiiisuodattimen ja niiden kanssa sarjassa olevan HEPA-suodattimen avulla. Puhdistetun

laimennusilman massavirtaus määritetään GFM:ssä sopivaksi ohjausjärjestelmän avulla.

Mitattu pienhiukkaskuorma muutetaan pitoisuudeksi ja päästökertoimeksi jälkikäsitteilyohjelmistossa. Pienhiukkaspitoisuudelle lasketaan skaalauskerroin, joka perustuu suodattimen pienhiukkasmassaan, noen mittauksen pitoisuuksiin ja mittalaitteiden läpi kulkevien kaasujen virtausnopeuksiin. Pienhiukkaspitoisuus muodostetaan kertomalla nokipitoisuus edellä mainitulla skaalauskerroimella. [3] Mittalaitteen mittaustarkkuus on esitetty liitteen B kuvassa B.2.

3.3 Oheislaitteet

Järjestelmän aivoina toimii System Control PC, joka on esitetty kuvassa 3.1. Tie-tokoneessa on tavallinen Windows-käyttöjärjestelmä ja tarvittavat ohjelmistot mit-tausten suorittamiseen ja parametrisointiin. Yksikköön liitetään ethernetillä molem-mat päästömittauslaitteistot, CAN-väylällä moottorinohjausjärjestelmä, erikoisliit-timillä lämpötilamittaus ja GPS, sekä USB:llä sarjaporttimuuntimeen tuleva polt-toaineen tilavuusvirtamittaus.



Kuva 3.4. Päästömittauslaitteisto, polttoaineen tilavuusvirran mittausyksikkö, polt-toakaasu, akusto ja generaattori koneen kyhdissä.

Järjestelmässä on AVL:n toimittama polttoaineen tilavuusvirran mittalaite, joka on peltisessä laatikossa kuvan 3.4 oikeassa yläreunassa. Yksikkö on fyysisiltä mitoiltaan $47 \times 37 \times 55$ cm ja se painaa 35 kg. Järjestelmä koostuu kahdesta moduulista, jotka

ovat mittausmoduuli ja käsitteilymoduuli. Mittalaitteessa on polttoaineen tilavuusvirran mittauksen lisäksi tiheyden mittaus. Mittauksen jänniteulostulon tarkkuus on $\pm 0,1$ % todellisesta arvosta. [1]

Järjestelmällä on ajoneuvon virransyötöstä erillinen sähköjärjestelmä, jotta mittausjärjestelmän 1,5 - 2 kW:n tehonkulutus ei kuormita työkoneen voimalähdettä [2, 3]. Tässä työssä polttoaineen tilavuusvirran mittalaite on kuitenkin kytketty ajoneuvon sähköjärjestelmään ja se aiheuttaa koneelle noin 0,47 kW:n jatkuvan kuorman [1]. Virransyöttö koostuu AVL:n virtalähteestä, kahdesta akusta, laturista ja bensiinikäyttöisestä generaattorista. Akkuja voi ladata seinäpistokkeesta tai mukana kulkevasta generaattorista. Kuvassa 3.4 akut sijaitsevat vasemman takarenkään päälle rakennetun telineen vasemmassa reunassa, generaattori oikeassa reunassa ja laturi vasemman takarenkään takana olevan kaapin sisällä. Akuilta virta ohjataan AVL:n virtalähteelle (Kuvan 3.1 alareuna), joka jakaa virran PC:lle ja PEMS:lle.

3.4 Jälkikäsitteily

Mittausjärjestelmässä olevan tietokoneen ohjelmistot keräävät yhteen jokaisen eri yksikön mittausdatan. Mittauksen jälkeen ohjelmisto tallentaa datan jälkikäsitteilyohjelmiston ymmärtämään muotoon. Mittausdata käsitellään ja analysoidaan AVL jälkikäsitteilyohjelmistolla.

Kaasupitoisuudet eivät ole samassa vaiheessa, koska eri yksiköillä on erilainen viive näytteen saapumisesta analysaattorille. Kaasumaisten- ja pienhiukkaspäästöjen virtaukset ovat rinnakkain keskenään, mutta kaasumaisten päästöjen analysaattorissa analysaattorit ovat sarjassa. Lisäksi näyteletkujen pituudet saattavat vaihdella.

Viiveiden vuoksi jälkikäsitteilyohjelmiston yksi tehtävä on synkronoida kaasupitoisuudet samaan vaiheeseen. Se tehdään tietojen syötön yhteydessä puoliautomaattisesti graafisella työkalulla. Jälkikäsitteilyohjelmisto laskee viranomaisten vaatimat päästöpitoisuuksien korjaukset ja lopulliset päästökertoimet automaattisesti. Jälkikäsitteilyohjelmisto helpottaa mittajan työtä ohjelmistoon integroidulla laskennalla.

4. MITTAUSJÄRJESTELYT

Päästömittaukset suoritettiin TTY-säätiön omalla AUT-laboratorion alaisuudessa toimivalla aidatulla ja kestopäällystetyllä testausalueella. Testiradalle on tehty soralla täytetty kaivanto kaivurin testikäyttöä ajatellen. Lyhyessä kuormausykyssä kuormataan kaivannossa olevaa soraa. Pitkässä ajosyklissä käytetään testialuetta ja sen lähiympäristöä. Testialueella on konetta äärimmilleen kuormittava ylämäki, jossa viimeistään pitäisi näkyä eroja päästötasoissa. Ylämäen jyrkkyys on noin 15 % ja korkeusero noin kuusi metriä. Yksityiskohtaisempi työkierron erittely löytyy alaluvusta 4.4.

Lyhyen kuormausykyllä aikana oli aurinkoista, -6°C , suhteellinen kosteus 80 %, kevyttä tuulta ja luminen alusta. Pitkän ajosyklillä aikana oli pilvistä, -4°C , suhteellinen kosteus 95 % ja luminen alusta.

4.1 Mitattava työkonne

Mittauksessa käytetään laboratorion käytössä olevaa voimakkaasti muokattua Wille-taajamakonetta. Koneen ajovoimansiirtoon, työhydrauliikkaan ja voimanlähteeseen tehdyt muutokset eivät edusta konevalmistajan ilmoittamia arvoja, eikä tämän työn tulokset edusta alkuperäisen Wille 655 C -koneen päästöpuhtuuksia.

Kauhakuormaajia käytetään teollisuudessa paljon. Kone on vahvan ajovoimansiirtonsa vuoksi monikäyttöinen. Tyypillisin tehtävä on materiaalin kuormaus, jota tässäkin työssä käytetään. Pääasiallisten työtehtävien lisäksi sitä voidaan käyttää muissa yleishyödyllisissä tehtävissä, joita ovat esimerkiksi harjaaminen, hiekoitus ja auraaminen. Eri alojen yleisimmistä pyöräkuormaajan työtehtävistä löytyy paljon yhtäläisyyksiä.

Koneen nostolaitteessa käytetään mittausten aikana trukkipiikkejä ja maakauhaa. Nostolaitteen nostokyky on noin 3000 kg. Kone on nelivetoinen ja vaihdelaatiossa on kaksi vaihdetta, joista nopeammalla huippunopeus noin 40 km/h. Koneen voimansiirtolinjan vetovoima jää varsinaista pyöräkuormaajaa matalammaksi ja raskaisiin kuormaustöihin soveltuvuus on korkeintaan kohtalainen. Huipputehon



Kuva 4.1. Mittauksissa käytettävä muunneltu Wille 655 C -taajamakone. Päästömittausjärjestelmä on asennettu takarungon päälle.

kone saavuttaa kiihdytettäessä huippunopeuteen. Työhydrauliikan tehovaatimukset ovat kuormauksessa huomattavasti ajovoimansiirtoa pienemmät.

Taulukko 4.1. Koneen teknisiä tietoja [25].

Runko	Vilakone Wille 655 C
Fyysiset mitat	5000 x 2000 x 2400 mm
Paino	5400 kg
Moottori	Caterpillar C4.4, R4 4.4L
Teho	97 kW @ 2200 rpm
Vääntömomentti	516 Nm @ 1400 rpm
Imujärjestelmä	Turboahdettu, välijäähdytetty
Polttoaineen syöttö	Common Rail, suoraruiskutus
Päästötaso	Stage 3A
Ajovoimansiirto	Hydrostaattinen

Taulukossa 4.1 on listattu koneen teknisiä tietoja. Kone liikkuu 97 kW:n moottorilla jouhevasti. Hydraulijärjestelmä on muokattu tutkimuskäyttöön paremmin sopivaksi ja sitä on anturoitu erittäin voimakkaasti. Työhydrauliikalle on valittavissa proportionaalinen ja digitaalinen venttiilistö. Tässä työssä käytetään perinteistä proportionaaliventtiilistöä. Ajovoimansiirto käyttää yhtä 85 cm³ säätötilavuuksista hydraulimoottoria ja sitä käytetään noin 185 l/min tuottavalla säätöväkierrotilavuuksisella aksiaalimäntäpumpulla. Kone on elektronisesti ohjattu ja eri ohjaimet keskustelevat CAN-väylän kautta.

Tämän koneen päästölainsäädäntö perustuu vuonna 2007 käyttöön otettuun Stage 3A standardiin, jossa tämän teholuokan koneen ylärajat ovat CO:lle 5,0 g/kWh, HC + NO_x:lle 4,0 g/kWh ja PM:lle 0,3 g/kWh [10]. Koneessa ei ole nykyaikaisia pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmiä, kuten urearuiskutusta tai partikkeliloukkaa. [25]

4.2 Pyöräkuormaajan valmistelu

Päästömittauslaitteisto on asennettu koneen takarungon päällä olevalle tasolle ja se näkyy kuvassa 4.1. Asennustelineen päällä näkyy System Control PC, kaasumaisien päästöjen mittalaite, polttoaineen tilavuusvirtamittari, akut ja takarenaan takana olevassa kaapissa oleva latauselektroniikka. Pienhiukkaspäästöjen mittalaite sijaitsee GAS PEMS:in takapuolella. Järjestelmän ja pukin välissä on valmistajan toimittamat kiinnikkeet, joissa on vaimennuskumit ja värähtelyä vaimentava jousimekanismi. Kestopäällysteestä huolimatta painava mittausjärjestelmä heiluu kiihdytyksissä, käänöksissä ja painaumissa melko paljon. Tasaisen alustan ansiosta ajotyylin pystyi pitämään tarkoituksenmukaisena lyhyttä hiekkaosiota lukuun ottamatta.

Mitattava työkone ajetaan toimintalämpötilaan ennen mittauksia. Kylmä moottori vaikuttaa polttoaineen kulutukseen ja päästöihin negatiivisesti. Merkittävimpiä tekijöitä ovat kylmä voiteluöljy, sylinterikammion kylmät kosketuspinnat ja kylmä hydraulioöljy. Öljyn lämmittäminen vähentää pakokaasupäästöjä, koska voitelu tehostuu, öljyn sisäinen kitka pienenee ja moottorin lämpölaajeneminen loppuu. [23] Moottorin perusteellinen lämpeäminen vähentää päästöjä myös sen takia, että kylmä palotila ja sen seinämät heikentävät tehokasta dieselin palamista.

Mitattavan koneen polttoainesäiliö täytettiin ennen mittauksia ja mittausten välillä käytettiin samaa polttoainetta, jotta mittaustulokset pysyisivät yhtenäisinä. Jäähdytysneste lämmitettiin ajolla termostaatin maksimiarvoon, joka oli tällä koneella väylädatan mukaan 74 – 76 °C. Hydraulisia toimilaitteita lämmitettiin liikuttamalla, pienillä nostotöillä ja ajamalla. Puolen tunnin testiajon jälkeen hydraulioöljy oli noin kädenlämpöistä. Myöhemmin kävi ilmi, että jäähdytysnesteen lämpeäminen toimintalämpötilaansa ei vielä tarkoita lämmintä moottoria, sillä Brittiläisen tutkimuksen [23] mukaan tyhjäkäynnillä lämpeävän bensiinimoottorin öljy saavuttaa toimintalämpönsä huomattavasti jäähdytysnestettä myöhemmin.

4.3 Mittausjärjestelmän valmistelu

Työssä käytetty PEMS on pyritty suunnittelemaan mahdollisimman käyttäjäystävälliseksi. Mittausjärjestelmän käynnistysvaiheessa molemmista yksiköissä on odotusajat mittalaitteiden sisäistä valmistelua varten. Kaasumaisten päästöjen analyysaattorissa on lämmitetty näytelinja ja suodatin, jotka lämpeävät sähkövastuksilla lämpötilaan 191 °C. Järjestelmä on valmis käyttöön noin 45 minuutin odotusajan jälkeen. Myös pienhiukkasanalyysaattorissa on näytelinjojen lämpötilan säätöä ja sisäistä käsittelyä, mutta PM PEMS lämpeää toimintavalmiiksi huomattavasti GAS PEMS:iä nopeammin.

Mittausjärjestelmien huoltoväli on noin 200 tuntia ja mittausten aikana huollosta oli aikaa noin 150 tuntia. Mittausjärjestelmässä on erilaisia suodattimia näytteen ja ilman suodattamiselle, suodattimet tarkistetaan ja tarvittaessa vaihdetaan ennen mittausta. Näytelinjat ja mittapäät nokeentuvat ja myös ne tarkistetaan, puhdistetaan tai vaihdetaan ennen mittausta.

Palamattomia hiilivetyjä mittaava liekki-ionisaatiodektori polttaa mittauksessa vedyn ja heliumin seosta, joten käyttäjän täytyy varmistaa vetykaasun riittävyys ja valita paineregulaattorista oikea syöttöpaine (noin 3,5 bar). Mittalaitteissa ei haluta käyttää työkoneen tuottamaa sähköä, joten saatavuus varmistetaan lataamalla PEMS:lle tarkoitettut akut täyteen, täyttämällä kannettavan bensiinigeneraattorin polttoainesäiliö ja lämmittämällä generaattori käyttölämpötilaan. Mittausjärjestelmän kalibrointitoimenpiteistä lisää alaluvussa 4.3.1.

GAS PEMS:ssä oleva TEC jäähdyttää lämmitetyltä suodattimelta tulevan kuuman näytteen NDUV ja NDIR analyysaattoreille sopivaan lämpötilaan. Kuumen ilman viilennys tuottaa kondenssivettä, joka johdetaan järjestelmästä ulos letkua pitkin. Talvikelillä GAS PEMS:stä ulos tuleva letku voi jäättyä kondenssiveden vuoksi umpeen, joten se tulee eristää tai laittaa suojaan paikkaan.

Viralliset testit vaativat vuotojen testausohjelman ajamisen. Ohjelma ajetaan läpi ennen mittausten alkua. Idea testissä on tarkistaa järjestelmän sisäinen tiiveys. Testissä tulpataan näytteenottolinjat ja automaattinen ohjelma testaa vuodot muuttamalla sisäistä painetasoa ja tarkkailemalla sitä paineantureista. Testeissä käytettiin PM PEMS:n laimennussuhdetta 10. Pienhiukkassuodattimen valmistelusta lisää alaluvussa 4.3.2. [2]

4.3.1 Mittauslaitteiston kalibrointi

Kaasumaisten päästöjen mittausjärjestelmä kalibroidaan ennen ja jälkeen testin. Ensimmäisessä vaiheessa analysaattorit kalibroidaan oikeaan näyttämään. Toisessa vaiheessa tarkistetaan nollapisteen siirtymä jokaiselle päästökomponentille. Pääasiallisten kalibroitikaasujen lisäksi järjestelmä vaatii nollakaasun, joka on synteettistä ilmaa.



Kuva 4.2. Kaasumaisten pakokaasupäästöjen kalibrointikaasut.

Mittausjärjestelmän etupaneelissa on sisääntulo kalibrointi- ja nollakaasuille. Nollakaasu ajetaan järjestelmään kalibroinnin yhteydessä ja juuri ennen mittauksen aloittamista. Nollakaasusta järjestelmä saa nollapisteen ja pystyy kohdistamaan mitattavan kaasupitoisuuden tarkasti oikeaan tasoon. Kalibrointikaasut on valittu valmistajan suositusten mukaisesti, eikä niiden pitoisuus saisi olla pienempi kuin 80 % odotetusta pitoisuudesta testin aikana. Kuvassa 4.2 on kuormalavallinen erilaisia mittauksissa käytettyjä kalibrointikaasuja.

Järjestelmässä on kalibroitautomaattikka. Käyttäjän tehtäväksi jää vaihtaa oikea kaasupullo etupaneelin liittimeen kalibrointivelhon sitä kysyessä. Kalibrointiin tarkoitettuja pulloja on viisi. Liekki-ionisaatiodetektorille on varattu yksi kaasupullo, jossa on palamattomia hiilivetyjä kuvaavaa propaania. Analysaattori antaa tuloksen C1-muodossa, joka tarkoittaa sitä, että se laskee jokaisen hiiliatomin erikseen. Yhdessä propaanimolekyylissä on kolme hiiliatomia, joten analysaattorissa

sen pitoisuus näkyy kolminkertaisena. Kaksi seuraavaa pulloa kuuluvat NDIR-analysaattorille, hiilidioksidille ja hiilimonoksidille on omat pullonsa. Typen oksideja UV-aallonpituuksilla havaitseva NDUV vaatii kaksi kalibrointikaasua. Toinen pulloista sisältää typpioksidia ja typen oksideja, toinen typpidioksidia ja happea. Kalibrointikaasujen lisäksi tarvitaan nollakaasu ja FID:n vety-helium polttokaasu. Kalibrointikaasujen tarkempi erittely taulukossa 4.2. [2]

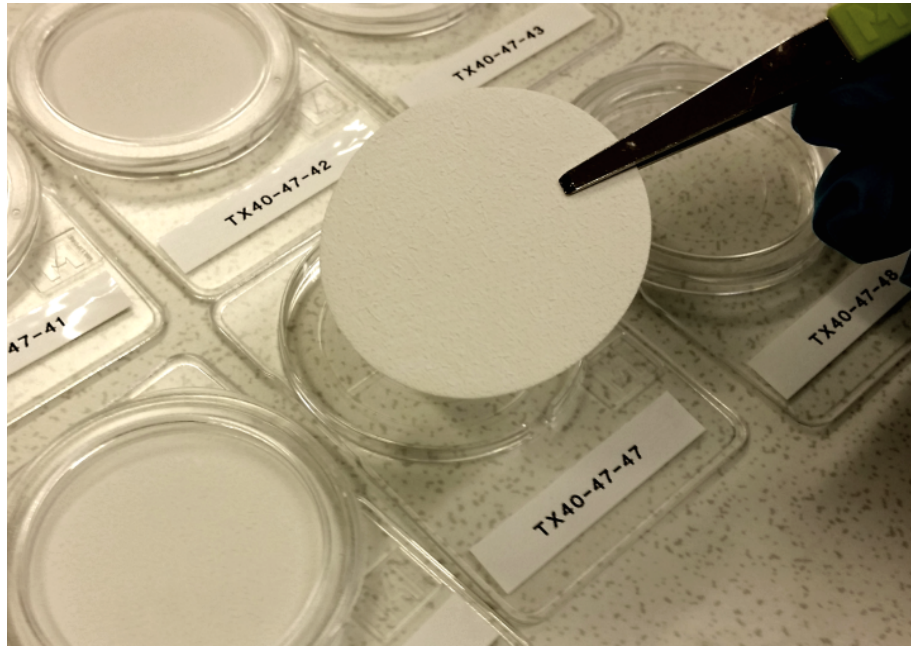
Taulukko 4.2. Kalibrointikaasujen analysointisertifikaatin tiedot.

Pullo	Kaasu	Pitoisuus	Paine [bar]	Lisätietoja
1	C ₃ H ₈	403 ppm	150	Propaani C1 1209 ppm Pohjakaasu typpi
	O ₂	21 %		
	N ₂	bal.		
2	CO	4500 ppm	150	Pohjakaasu typpi
	N ₂	bal.		
3	CO ₂	14 %	140	Pohjakaasu typpi
	N ₂	bal.		
4	NO	1510 ppm	150	Pohjakaasu typpi
	NO _x	1520 ppm		
	N ₂	bal.		
5	NO ₂	1470 ppm	72	Pohjakaasu typpi
	O ₂	21 %		
	N ₂	bal.		
6	O ₂	21 %	160	Synteettinen ilma
	N ₂	79 %		

Järjestelmän kalibrointi pidentää mittaukseen kuluvaa aikaa. Järjestelmä kalibroi yhtä kaasua muutaman minuutin. Pulloja on useita, joten mittauksista ennen tehtävään kalibrointiin kuluu noin 40 minuuttia. Mittauksen jälkeen kalibrointi toistetaan, joskin hieman lyhyemmällä ohjelmalla pituuden jäädessä 30 minuuttiin. Kaiken kaikkiaan puolen tunnin mittaukseen kuluu noin 4 - 6 tuntia.

4.3.2 Pienhiukkassuodattimen valmistelu

Pienhiukkasten pitoisuus on sidoksissa fotoakustisessa mittalaitteessa tehtävään nokimittaukseen ja pienhiukkasten absoluuttiseen massaansa. Ennen mittauksia laitteeseen asennetaan noin 80 mg painava ja 47 mm halkaisijaltaan oleva suodatin, jonka läpi laimennettu pakokaasu ohjataan. Moottorissa syntyneet pienhiukkaset jäävät suodattimelle, joka voidaan sen jälkeen punnita. Suodatin täyttyy melko nopeasti, joten laitevalmistaja suosittelee suodattimen suurimmaksi kuormaksi noin 700 µg:a. Suodattimen täyttyminen kasvattaa suodattimen paine-eroa, joten se näkyy mittauksissa pienentyneenä tilavuusvirtana suodattimen läpi.



Kuva 4.3. Pienhiukkassuodattimien lastausta kuljetusliuskoihin.

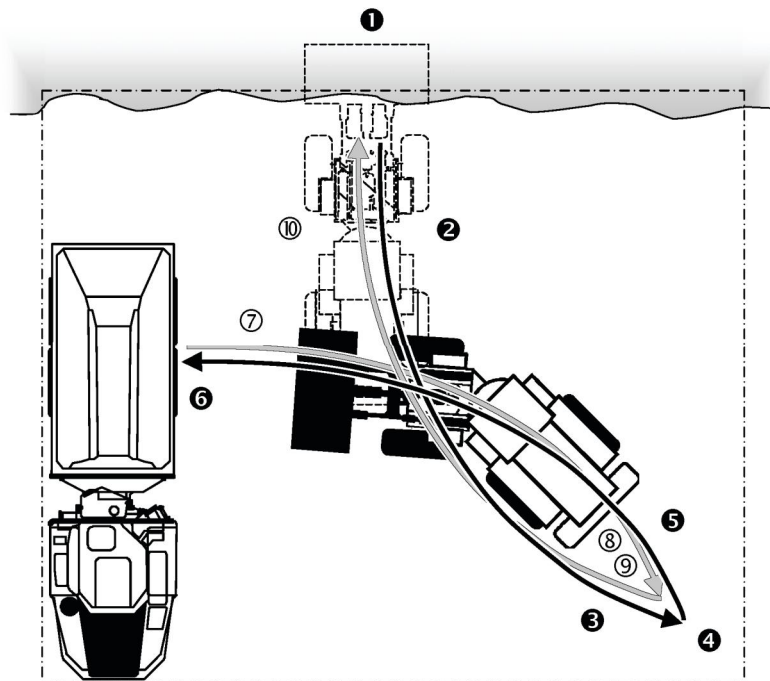
Euroopan komissio on määritellyt alle 70 mm:n suodattimille mittauksen tarkkuudeksi $2 \mu\text{g}$ ja erotuskyvyksi $1 \mu\text{g}$ [9, lisäys 1, kohta 1.5.2.3]. Suodattimien punnitseminen on mittateknisesti haastavaa ja vaa'at ovat kalliita. Suodatinta kuljetetaan ympäristön saasteilta suojaavissa liuskoissa (Kuva 4.3), mutta jossain vaiheessa se täytyy siirtää koneen sisälle ja sieltä pois. Ennen mittausta suodatin laitetaan GFM:n suojakasettiin ja kasetti asetetaan suojaavan luukun taakse mittalaitteeseen. Suodatinkasetin ja suodattimen liikuttamiseen on olemassa erikoisvalmisteisia suojakoteloita, mutta tässä tapauksessa niiden käytettävyys ei ollut erityisen hyvää.

Suodattimet punnitaan ja dokumentoidaan ennen päästömittausta ja sen jälkeen. Pienhiukkaskuorman massa lasketaan esi- ja jälkipunnituksen erotuksena. Ennen punnitusta suodattimia tasapainotetaan neljä tuntia huoneilman lämpötilaan ja kosteuteen. Molemmat punnitukset mittaukset tehdään samalla mittalaitteella ja samassa tilassa. Etsinnöistä huolimatta TTY:ltä ei löytynyt tarpeeksi tarkkaa vaakaa, joten suodattimien punnitukset hoidettiin ulkoisen tahon toimesta.

4.4 Testisyklien määrittäminen

Työkierron valinnalla voidaan vaikuttaa mittaustulosten edustavuuteen. Tässä työssä mittauksiin pyrittiin tekemään luonnolliset työsyklit. Valitut työsyklit ovat lyhyt kuormaussykli ja pitkä ajosykli. Työssä tutkitaan eroja ajotyösykliä välisissä päästöissä, joten syklin ei tarvitse olla standardisoitu. Lyhyttä kuormaussykliä havainnollistaa kuva 4.4 ja taulukko 4.3. Pitkää ajosykliä havainnollistaa kuva 4.5.

Kuvassa 4.4 lyhyen kuormaussyklin kulku. Lyhyt kuormaussykli tunnetaan kirjallisuudessa [11] myös y-syklinä tai v-syklinä. Varastona toimii kasa soraa, joka oli tarkoitus kuormata korkealaitaiselle karrille. Teknisistä haasteista johtuen testissä jäljiteltiin karrille kuormaamista nostamalla kauha kahden metrin korkeuteen ennen tyhjennystä. Kauhana käytettiin 600 litran maakauhaa. Sorakasa ja purkupaikka ovat vierekkäin, noin kahdeksan metrin etäisyydellä toisistaan ja ne osoittavat kuvasta 4.4 poiketen samaan suuntaan. Syklin aikana kauhakuormaaaja liikkuu pienellä alueella, ajaminen on sahaavaa ja kuljettaja joutuu valmistautumaan suunnan muutokseen lähes jatkuvasti. Energiaa kuluu työliikkeisiin ja suunnanvaihtoihin. Lyhyelle kuormaussyklille ei määritelty täyttö-tyhjennys syklien määrää. Molemmilla kuljettajilla oli tavoiteaika 30 minuuttia. Mittaus lopetettiin, mikäli kuljettaja siirsi sorakasan kokonaisuudessaan. Ajo keskeytettiin viimeistään 30 minuutin tavoiteajan täytyessä. Teknisistä vaikeuksista johtuen kuormatun soran punnitseminen ei onnistunut. Kuormatun hiekan määrä arvioitiin silmämääräisesti. Tavoiteaika asetettiin 30 minuuttiin, jotta pienhiukkassuodatin ei pääse täyttymään ja testi onnistuu.



Kuva 4.4. Lyhyt kuormaussykli. Mustalla merkitty viiva kuvastaa täyttä kauhaa ja harmaa tyhjää. Ei mittakaavassa. [11]

Taulukossa 4.3 on esitetty lyhyen kuormaussyklin vaiheet. Yksinkertaisellakin työsyklillä on monta työvaihetta. Sujuva kuljettaja ennakoiki tapahtumat ja yksittäisen vaiheen sisällä tehtävässä tarkastelussa kuljettaja käyttäytyy dynaamisesti ja pyrkii valmistautumaan seuraavaan vaiheeseen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Työtehtävässä on useita ajovoimansiirron ja työhydrauliikan tehontarpeen

etäisyys toisistaan. Sykli on esitetty kuvassa 4.5. Ensimmäisessä vaiheessa punnus kuljetetaan 2,6 metriä korkean merikontin päältä maanpinnan tasossa sijaitsevalle purkupaikalle. Merikontti on esitetty kuvan vasemmassa alareunassa sinisenä suorakulmiona. Toisessa vaiheessa kuljettaja kiertää kuvassa sinisellä piirretyn 280 metrin lenkin tyhjänä, jolloin moottori rasittuu ajamiselle ominaisella tavalla. Kolmannessa vaiheessa kuljettaja nostaa punnuksen purkupaikalta ja kuljettaa sen merikontin päälle.

Taakkana toimii 1500 kg:n painoinen punnus, joka on sidottu trukkilavaan kuormaliinoilla. Koneen nostimessa on trukkipiikit punnuksen käsittelyä varten. Pitkässä ajosyklissä taakan kanssa ylämäkeen ajaminen voi näkyä mittausdatassa tyhjänä ajamista kovempaan kuormituksena, sillä taakan massa on merkittävä lisäys koneen 5400 kg:n massaan. Pitkässä ajosyklissä ajovoimansiirron merkitys korostuu ja työhydrauliikan osuus on pieni. Testiradalla on noin 15 %:n nousu, joka sijaitsee kuvassa 4.5 vasemmalta katsottuna ensimmäisen puun alapuolella.

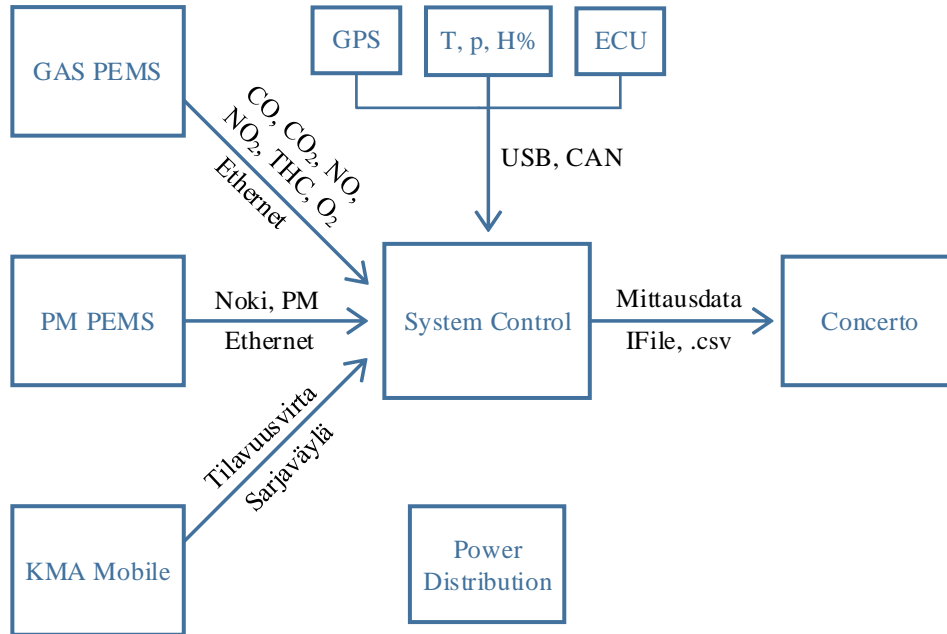
4.5 Kuljettajien ajotyylit

Työssä vertaillaan kahden kuljettajan ja samalla kahden ajotavan vaikutusta pako-kaasupäästöihin. Toinen kuljettajista oli aloittelija ja toinen kokeneempi harrastelijatason kuljettaja. Aloittelijalla kertyneitä työtunteja on vain muutama, ajaminen on varovaista ja koneen työliikkeet ovat epäammattimaisempia. Harrastelijatason kuljettajalla on aiempaa kokemusta kyseisen koneen käytöstä ja hän käyttää vastaavia koneita vapaa-ajalla. Kokeneempaa kuljettajaa kehoitettiin tekemään työt mahdollisimman ripeästi jäljitelläkseen poikkeuksellisen kiireistä työpäivää. Pieni näytejoukko pakotti tekemään kuljettajien välille selvän eron, jotta datasta varmasti löytyisi eroavaisuuksia. Aloittelijalla työtehtävät kestivät kauemmin. Kokeneemalla kuljettajalla oli parempi työn tuottavuus, kuten oli odotettavissa. Aloittelijatason kuljettajaa kutsutaan tässä työssä rauhallisen ajotyylin kuljettajaksi ja kokeneempaa harrastelijaa aggressiivisen ajotyylin kuljettajaksi.

4.6 Datan kerääminen ja muokkaus

Käytössä oleva PEMS on pitkälti automatisoitu mittausjärjestelmä. Järjestelmään on rakennettu korkean tason käyttöliittymät, joten käyttäjän ei tarvitse opiskella kaikkea taustalla tapahtuvaa matematiikkaa, joskin tietyn tason tietämys on välttämätöntä tukemaan sujuvaa käyttökokemusta. Mittausjärjestelmä on hajautettu useampaan laitteeseen, jolloin liikuteltavaksi suunniteltuna se mahtuu paremmin mitattavan ajoneuvon tai koneen kyytiin.

Järjestelmän keskusyksikkönä toimii System Control -moduuli, johon kaikki lisälaitteet kiinnitetään USB:llä, ethernetillä tai CAN-väylällä. Liitettävät laitteet voivat toimia myös itsenäisesti ja System Control:ia pystyy laajentamaan uusilla laitteilla. Käytössä olevan PEMS-järjestelmän kytkeytyminen on esitetty kuvassa 4.6.



Kuva 4.6. PEMS:in eri laitteiden kytkeytyminen toisiinsa [2, 3].

Ethernetillä kytketyt GAS PEMS ja PM PEMS päivittävät mittausdataa taajuu-
della 5 Hz. Tilavuusvirtamittauksen data päivittyy sarjaväylän kautta ja poltto-
moottorin data CAN-väylän kautta. Datat jälkikäsitteilyohjelma Concertossa mit-
tadata esitetään sekuntin näytevälillä.

Jälkikäsitteilyohjelmassa on ominaisuus vaiheen asettamiselle, jolloin kaikki data
mittausdatassa alkaa samasta pisteestä. Mittausjärjestelmän keskusyksikkö, System
Control, tallentaa mittausdatat AVL:n omassa *IFile*-muodossa, joka ei ole tekstikä-
sitteilyohjelmilla luettavissa. Yksiköissä GAS PEMS ja PM PEMS on mahdollisuus
taulukkomuotoisen .csv mittausdatat tallennukselle. Polttoaineen tilavuusvirran
mittauslaite kytketään System Controliin, joka tallentaa laitteen signaalit *IFileen*,
mutta se on myös luettavissa CAN-väylältä erikseen. Concertossa on mahdollisuus
viedä valmiiksi käsitelty data Excel-tiedostoon, joka mahdollistaa tarkan paikallisen
analyysin. Työn kuvaajat on piirretty Matlabilla .csv tiedostojen datalla.

5. TULOKSET

Wille-työkoneella on suoritettu kolme erilaista mittausta päästöjen selvittämiseksi. Alaluvussa 5.1 kartoitetaan NO_x- ja PM-päästöt staattisessa kuormitustilanteessa. Kaksi seuraavaa alalukua keskittyvät työkoneen dynaamiseen ajoon ja niiden aiheuttamiin pakokaasupäästöihin. Alaluvussa 5.2 esitetään lyhyen kuormitusyklin tulokset ja alaluvussa 5.3 pitkän ajosyklin tulokset.

5.1 NO_x ja PM staattisessa kuormituksessa

Moottorin tasaisen kuormitustilan pakokaasupäästöt on kartoitettu käyttämällä 16:ta eri kuormituspistettä. Kartoituksissa esitetään pitoisuudet ja päästökertoimien arvot. Pyörimisnopeuksiksi valittiin neljä pyörimisnopeutta, jotka ovat 950, 1300, 1600 ja 1900 rpm. Pyörimisnopeuden todellisen ja tavoitearvon välillä oli maksimissaan 3 %:n käyttäjän aiheuttama virhe. Järjestelmää kuormitettiin ohjaamalla hydraulipumpun tuottama öljy paineenrajoitusventtiilin läpi neljällä eri paineenrajoitusventtiilin arvolla, jotka olivat 50, 125, 175 ja 250 bar. Paikallisesti pienimmät ja suurimmat kuormitukset ja moottorinohjaukselta saadut suhteelliset kuormitukset on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Mittauspisteiden moottorille aiheuttamat kuormitukset. Prosentuaalinen arvo on kuormituksen suhteellinen vääntömomentti (Vääntökäyrästä). Luvut ovat moottorinohjauksen datasta keskiarvoistettuja arvoja.

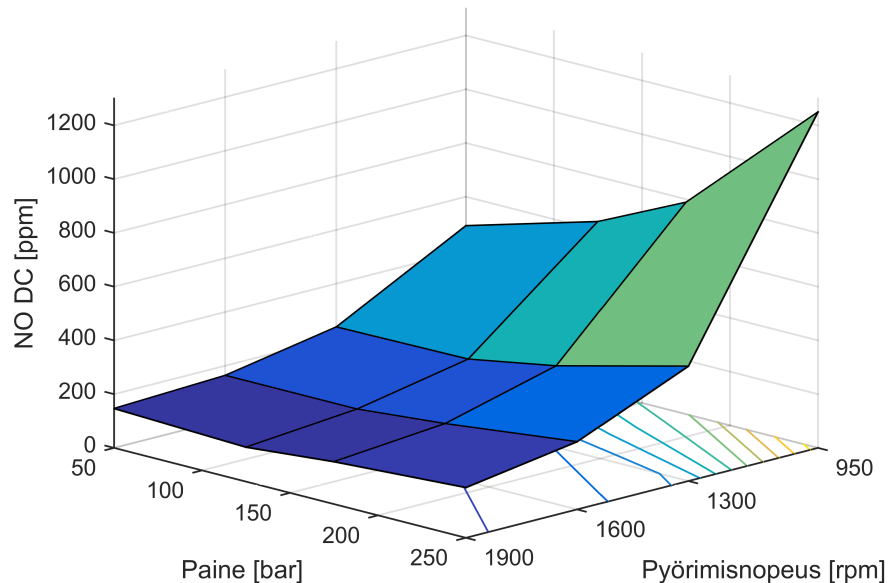
Pyörimisn. [rpm]	T _{min} @50 bar [Nm]	T _{min} @50 bar [%]	T _{max} @250 bar [Nm]	T _{max} @250 bar [%]
950	68	20	340	80
1300	76	19	356	71
1600	95	23	364	74
1900	87	23	354	78

Moottorin ohjausyksiköltä saatavat kuormitukset ovat laskettuja arvoja. Arvoissa on virhettä erityisesti pienillä kierrosnopeuksilla ja se vaikuttaa työn g/kWh-tuloksiin. Kovalla kuormituksella vääntömomentti täsmää suhteellisen kuormituksen kanssa

kohtalaisen hyvin. Tarkka kuormituksen selvittäminen vaatii vääntömomentin mittauksen, jota ei ollut tässä työssä saatavilla.

Mittauksessa ei ole moottorin äärimmäisen kuormituksen pisteitä, mutta tasaisesta vääntökäyrästä johtuen suhteelliset huippukuormitukset liikkuvat 71 - 80 % välillä matalimpien ollessa noin 20 % luokkaa. Mittauksessa oli vaarana hydraulioöljyn liiallinen lämpeneminen, sillä kaikki teho ajettiin lämmöksi. Liiallisesta lämpenemisestä ei koitunut ongelmaa, mutta hydraulioöljyn viskositeetissa oli vaihtelua ja se saattoi vaikuttaa hydraulisten toimilaitteiden hyötysuhteisiin.

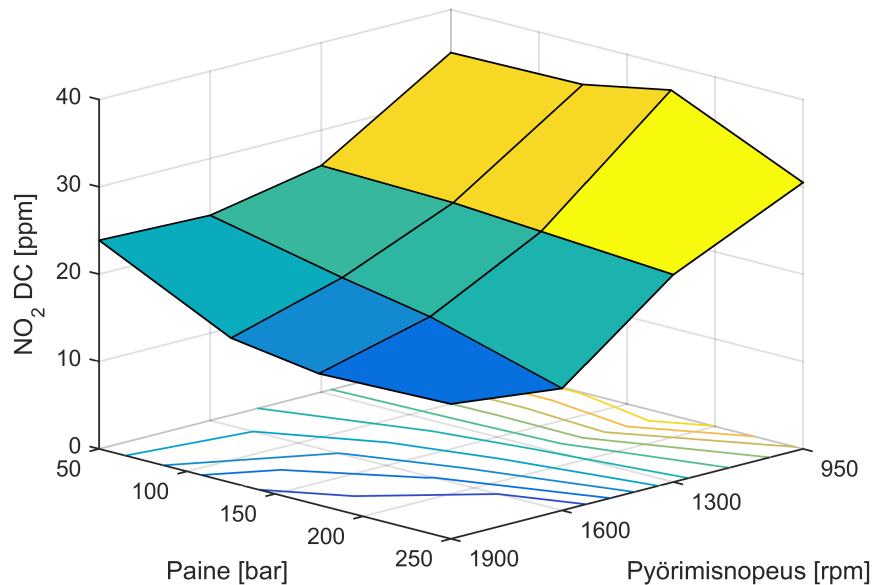
Kuvissa 5.1 - 5.8 kuormituspisteiden mittaamisen yksittäiset ajot kestivät 45 sekuntia. Päästöpuhtisuuden ja päästökertoimen arvo on laskettu keskiarvottamalla 30 - 35 sekunnin jakso, jossa suhteellinen kuormitus ja pyörimisnopeus on asettunut tavoitteeseensa. Tämän alaluvun kuvaajissa x-akselilla on pyörimisnopeus (rpm), y-akselilla koneelle kuormitusta aiheuttava painetaso (bar) ja z-akselilla päästöpuhtisuuden (ppm) tai päästökertoimen (g/kWh) arvo. Tämän alaluvun päästökertoimet on ilmoitettu ajaumakorjattuina, märkinä ja ilmastokorjattuina. Moottorin vääntökäyrä ja kuvitetut kuormituspisteet on esitetty liitteessä A.



Kuva 5.1. Typpioksidin pitoisuuskartta eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.

Mittauksessa NO-pitoisuus (Kuva 5.1) on korkeimmillaan suurella kuormituksella ja alhaisella pyörimisnopeudella. Toimintapisteessä 950 rpm ja 250 bar hydraulipumpun aiheuttama kuormitus sai koneen käyntiäänien poikkeuksellisen raskaaksi. Kyseisessä pisteessä mitattiin korkein NO-pitoisuus 1250 ppm. Suurella käyntinopeudella typpioksidipäästö on yleisesti matalimmillaan, pienin päästöpuhtisuus 128

ppm on saavutetaan pisteessä 1900 rpm ja 125 bar. Suurimman ja pienimmän päästöpitoisuuden välillä on lähes 10-kertainen ero.

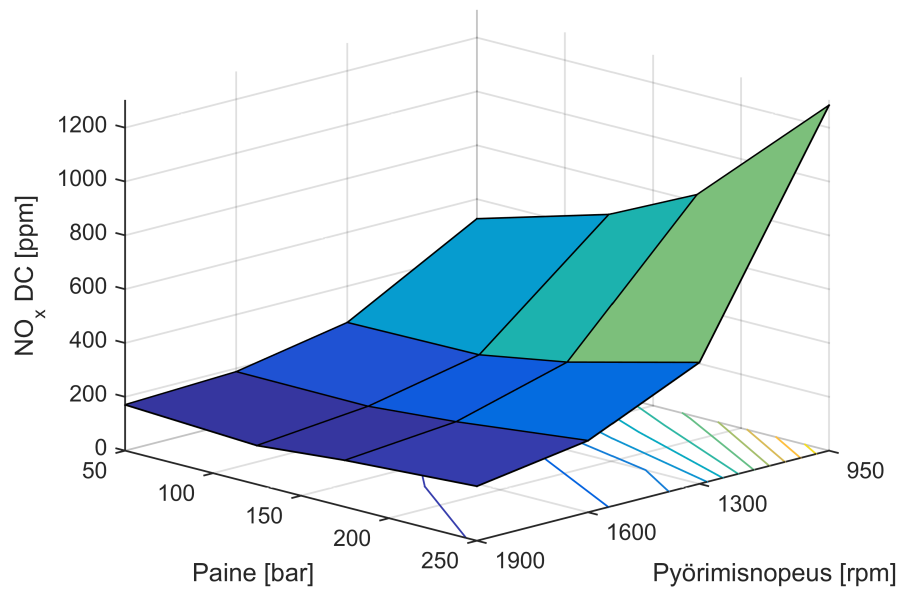


Kuva 5.2. Typpidioksidin pitoisuuskartta eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.

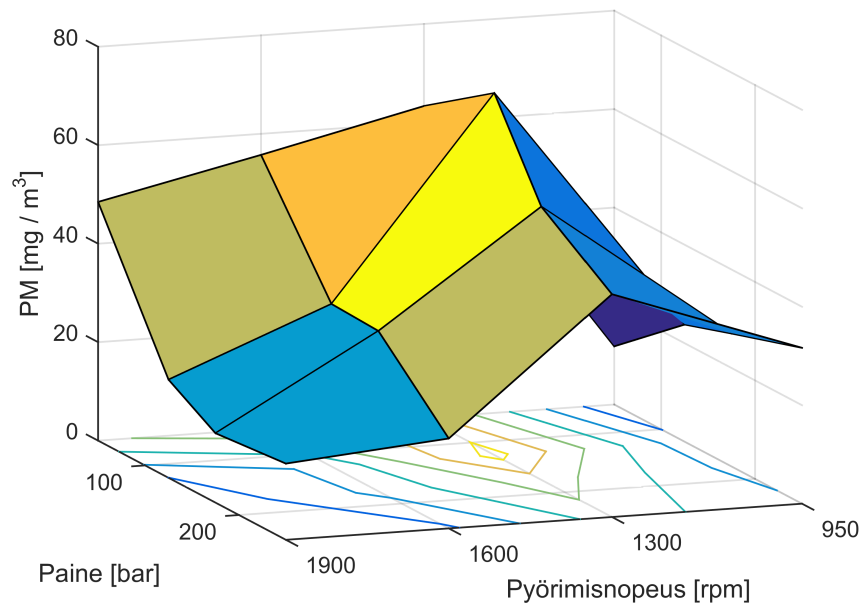
Tässä mittauksessa typpidioksidin muodostuminen (Kuva 5.2) noudattaa osittain typpioksidin muodostumista. Kuormituspisteittäin typpidioksidia muodostuu noin 2,4 - 14 % typen oksidien pitoisuudesta. Suurimmat NO₂-pitoisuudet muodostuvat pienillä kierroksilla ja pienimmät pitoisuudet kuormituksen alla suurilla kierroksilla. Pitoisuuden maksimi 37 ppm löytyy pisteestä 950 rpm ja 175 bar. Pienin NO₂-pitoisuus 14 ppm on pisteessä 1600 rpm ja 250 bar. Pienimmän ja suurimman päästökertoimen välillä ero on noin 2,7-kertainen. Kuvasta 5.2 näkee, että tehon kasvaessa NO₂-pitoisuus lähtee pieneneään.

Typen oksidit muodostuvat typpioksidista ja typpidioksidista. Typpidioksidin vaikutus NO_x-päästöihin on pieni. Suurin osa NO_x:sta on NO:a, joten NO_x-kuvaaja (Kuva 5.3) näyttää pitkälti samalta NO-kuvaajan (Kuva 5.1) kanssa. Suurin NO_x-pitoisuus 1283 ppm saavutetaan pisteessä 950 rpm 250 bar ja pienin 144 ppm pisteessä 1900 rpm 125 bar.

Pienhiukkasten ja noen muodostuminen (Kuva 5.4) tapahtuu kuormituksesta riippumatta pääsääntöisesti keskialueen kierrosnopeuksilla, jossa sijaitsee moottorin huipuväännön alue (Liite A). Matalasta resoluutiosta johtuen päästöpitoisuuden huippu on noin 1300 rpm:n lähetyvillä. Ero pienimmän ja suurimman PM-pitoisuuden välillä on noin kuusinkertainen. Vähiten pienhiukkasia muodostuu kierrosnopeuksilla 950 rpm ja 1900 rpm painottuen kuormitusten tehoääripäihin. Pienhiukkasten



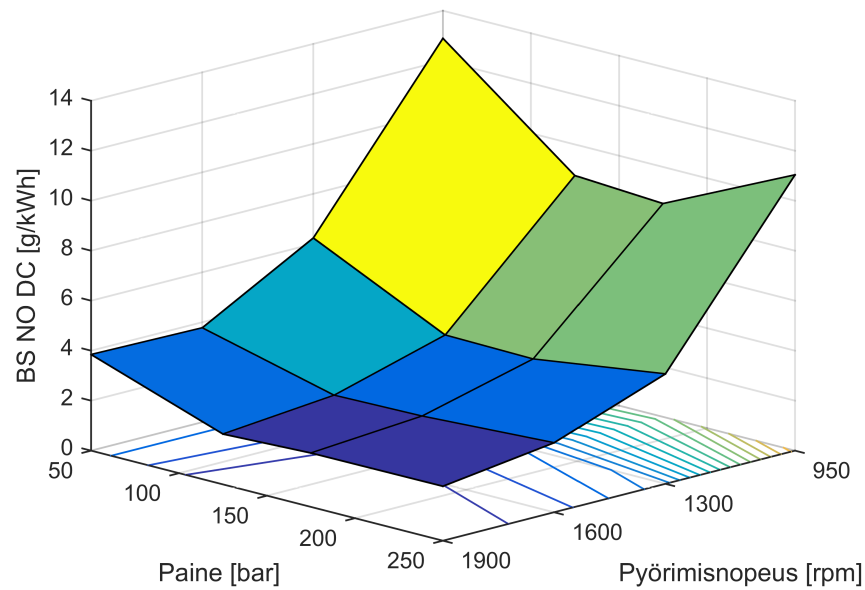
Kuva 5.3. Typen oksidien pitoisuuskartta eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.



Kuva 5.4. Pienhiukkasten pitoisuuskartta eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.

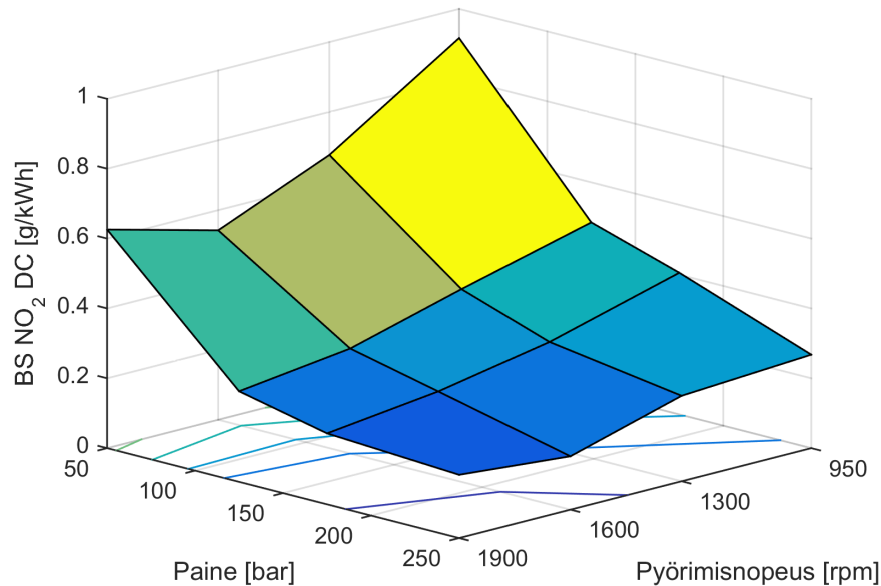
pitoisuuden maksimi 74 mg/m^3 saavutetaan pisteessä 1300 rpm 125 bar. Koko kartoituksen ajalta pienin pitoisuus on 12 mg/m^3 .

Seuraavaksi esitellään g/kWh-muotoinen energiaperustainen esitystapa, joka sitoo päästöpuiteisuuden tehtyyn työhön. Päästökertoimenä ilmoitettu esitystapa painottaa pientä tehoa. Kuvassa 5.5 NO-päästökertoimen huippu $12,9 \text{ g/kWh}$ on kohdassa 950 rpm 50 bar. Pienin päästökerroin $2,0 \text{ g/kWh}$ on kohdassa 1900 rpm



Kuva 5.5. Typpioksidin päästökertoimet eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.

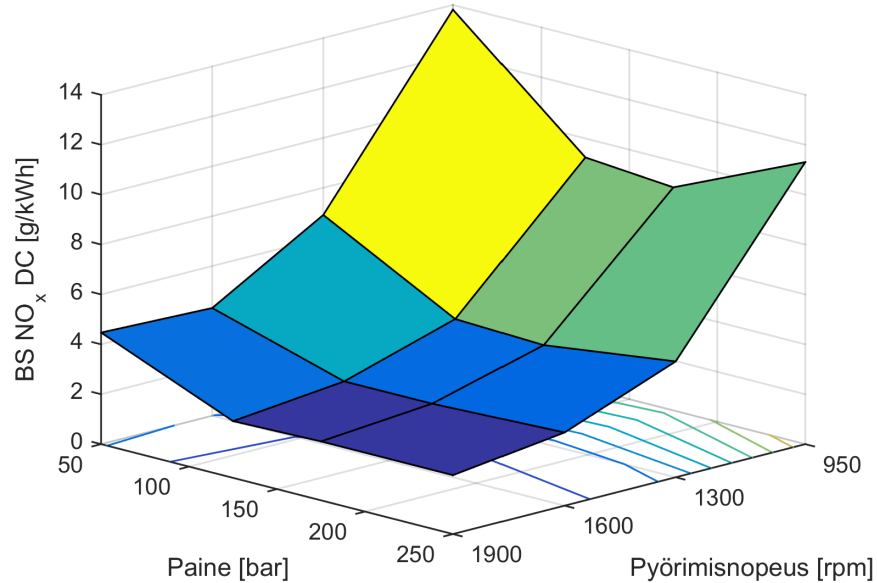
125 bar. Yleisesti ottaen typpioksidin päästökertoimet ovat suurimmillaan pienillä kierroksilla ja pienimmillään suurilla kierroksilla.



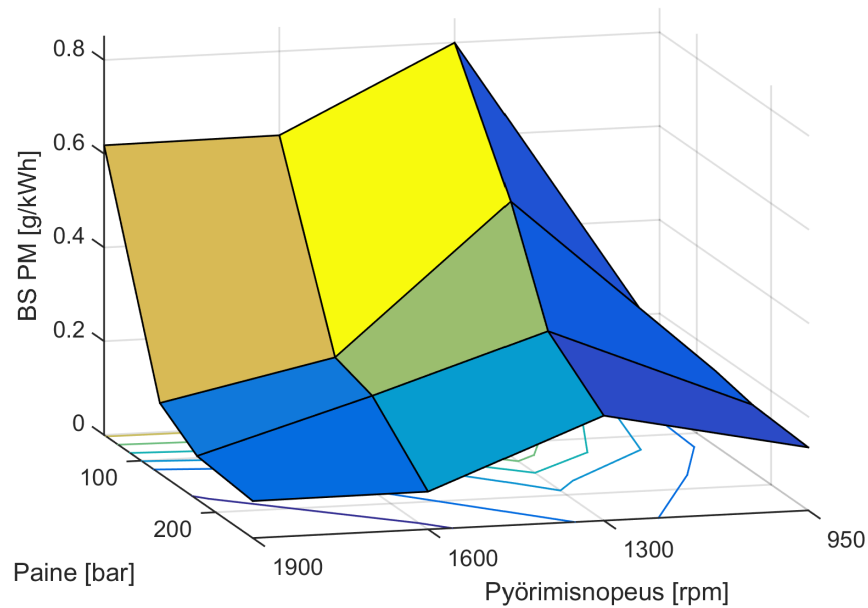
Kuva 5.6. Typpidioksidin päästökertoimet eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.

Päästökertoimia käytettäessä NO₂-komponentin (Kuva 5.6) profiili on kääntynyt 90 astetta vastapäivään z-akselin ympäri. Vähiten typpidioksidia muodostuu suurella pyörimisnopeudella ja suurella kuormituksella, eniten pienellä pyörimisnopeudella ja pienellä kuormalla. Typpidioksidin suurin päästökerroin 0,92 g/kWh on pisteessä

950 rpm 50 bar ja pienin 0,15 g/kWh pisteessä 1600 rpm 250 bar.



Kuva 5.7. Typen oksidien päästökertoimet eri kuormilla ja pyörimisnopeuksilla.



Kuva 5.8. Pienhiukkasten päästökertoimet eri kuormilla ja moottorin pyörimisnopeuksilla.

Typen oksidien kuvaaja 5.7 noudattaa NO-kuvaajaa 5.5, mutta hieman eri tavalla painottuneena. Päästökertoimen huippu 13,8 g/kWh on pisteessä 950 rpm 50 bar ja minimi 2,2 g/kWh pisteessä 1600 rpm 250 bar. Korkeilla kierroksilla ajettaessa NO_x-päästökerroin on yleisesti pienimmillään.

Kuvasta 5.8 nähdään, että eniten pienhiukkasia energiayksikköä kohden syntyy pisteessä 1300 rpm 50 bar, jolloin päästökertoimen arvo on 0,80 g/kWh. Päästökertoimen pienin arvo 0,08 g/kWh syntyy pisteessä 1900 rpm 250 bar. Pienhiukkasten suurimmat päästökertoimet ovat painottuneet pyörimisnopeuden keskivaiheille ja pienelle kuormalle. Pienhiukkasia muodostuu runsaasti myös korkealla pyörimisnopeudella, kunhan kuormitus on pieni.

5.2 Lyhyt kuormaussykli

Alaluvussa esitellään lyhyen kuormaussyklin päästöpitoisuuksien kuvaajat molemmille kuljettajille, päästöpitoisuuksien vertailukuvaaja ja päästökertoimet. Kuvaajat on leikattu havainnollistamisen selkeyttämiseksi alkuperäisestä pitkästä mittausdatasta.

Taulukkoon 5.2 on kasattu tietoja lyhyestä kuormaussyklistä. Aggressiivisen ajotyylin kuljettajalla moottorin keskimääräinen pyörimisnopeus on noin 130 rpm suurempi ja aggressiivisen ajotyylin kuljettaja aiheutti moottorille keskimääräisesti 43 % suuremman vääntömomentin. Syklin tavoitepituudeksi asetettiin 30 minuuttia, mutta aggressiivisen ajotyylin kuljettaja ehti siirtää koko kasan soraa ajassa 25 min 4 s. Rauhallisemman ajotyylin kuljettaja käytti kasan siirtämiseen 23 min 29 s, mutta ehti siirtää silmämääräisesti arvioiden vain 85 % hiekasta. Aggressiivisen ajotyylin tuottavuus oli 2,4 kasaa tunnissa ja rauhallisen ajotyylin 2,2 kasaa tunnissa. Aggressiivisemmän ajotyylin työ oli 10 % tuottavampaa.

Taulukko 5.2. Tietoja lyhyestä kuormaussyklistä ja moottorin toiminnasta.

Kuorma	Pyörimisn. kesk. [rpm]	Vääntöm. kesk. [Nm]	Polttoaine [l]	Työ [kWh]	Aika [s]
Rauhallinen	1390	87	1,90	5,15	1409
Aggressiivinen	1528	124	2,85	8,79	1504

Realityökorjatut polttoaineenkulutukset ovat 2,3 l/kasa ja 2,9 l/kasa. Ajotyylin ja ammattitaidon aiheuttama tuottavuuden 10 % kasvaminen tarkoittaa tässä mittauksessa noin 27 % suurempaa polttoaineenkulutusta. Pakokaasupäästöjä tutkittaessa käytetään päästökertointa g/kWh, joten vaihteleva kuorman määrä ei haittaa, sillä yksikkö ottaa käytetyn tehon huomioon.

Lyhyen kuormaussyklin tulokset koostuvat pyörimisnopeudesta, suhteellisesta kuormasta, typen oksideista, pienhiukkasista, häkäkaasusta ja palamattomista hiilivedyistä. Edellä mainittujen lisäksi Euroopan komissio vaatii pienhiukkaslukumäärän mittauksen, mutta käyttämässämme Stage 3A -tason moottorissa lukumäärää ei

ole tarvinut selvittää, eikä käytettävä mittausjärjestelmä mahdollista pienhiukkaskulumäärän mittaamista. Jälkikäsitteilyohjelmisto ottaa huomioon mittalaitteiden nollapisteen siirtymän ja tekee tarvittavat muuttuvien ympäristöolosuhteiden vaatimat korjaukset.

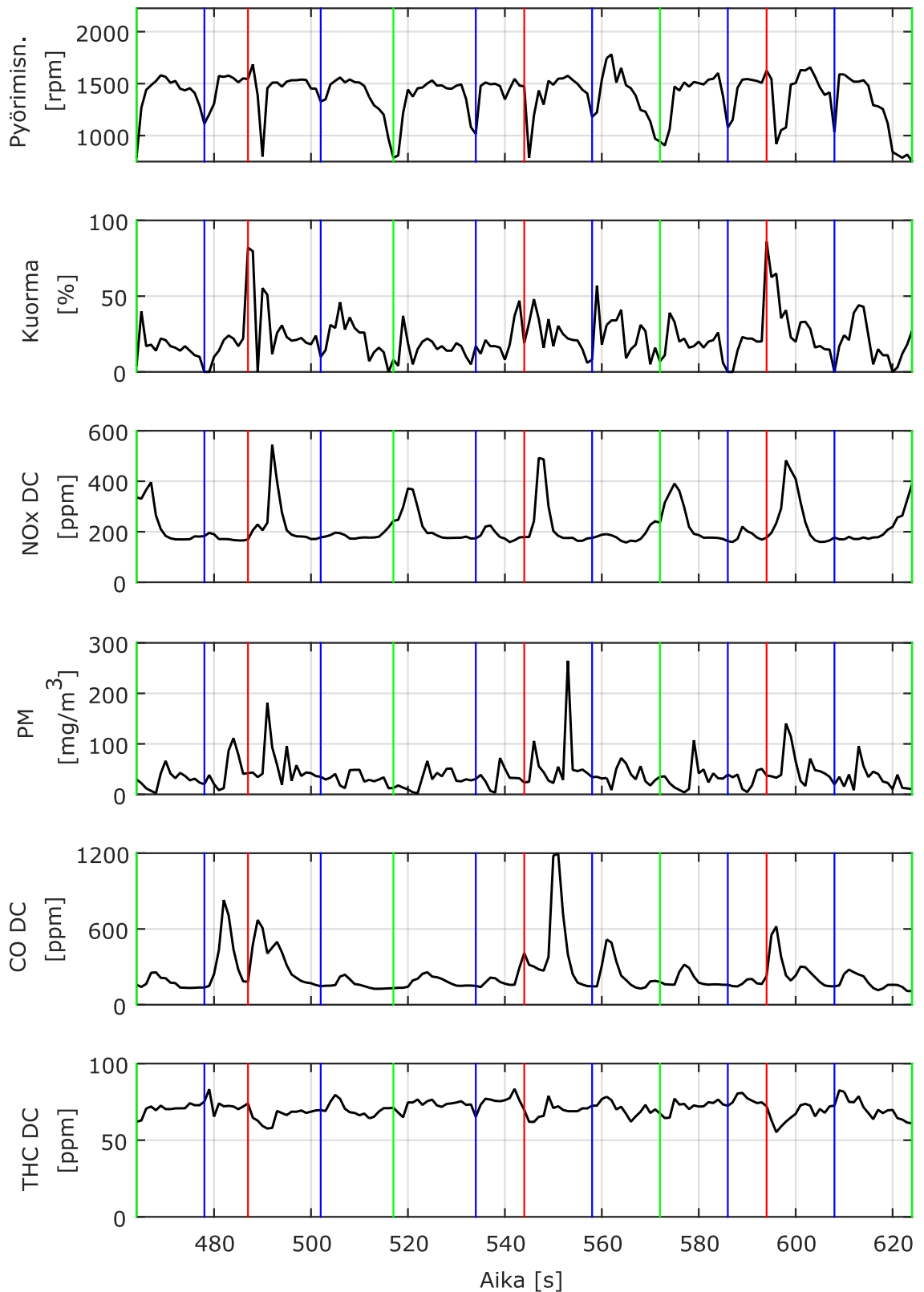
5.2.1 Rauhallinen ajotyyli

Tämän alaluvun pitoisuudet on kerätty mittauksesta, jota kuva 5.9 edustaa. Kuvassa y-akseleilla on pyörimisnopeus, suhteellinen kuormitus, typen oksidit, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Kuvaajasta 5.9 näkee, että rauhallisen ajotyylin kuljettajan korkein pyörimisnopeus on noin 1750 rpm. Suhteellinen kuorma ei nouse täyteen kuormitukseen, joten moottorilta otettu teho jää parhaimmillaan keskitasoiseksi. Lyhyt vaihteleva kuormaustyö ei siis käytä moottorin koko kapasiteettia ja se näkyy myös keskimääräisestä tehosta, joka on vain 13,2 kW.

Mittausdatasta on vaikea hahmottaa työn vaiheet, joten kuvaajaan on lisätty pystyviivoja hahmottamaan syklin kulkua. Punainen pystyviiva tarkoittaa kauhan täyttämistä, vihreä viiva kauhan tyhjennystä ja sininen viiva sorakasalta peruuttamisen jälkeen tapahtuvaa suunnanvaihtoa. Kuormauksen aikana moottorin suhteellinen kuormitus nousee korkeimmilleen kauhan täyttämisen yhteydessä, jolloin ajovoimansiirto ja työhydrauliikka ovat aktiivisia samanaikaisesti. Kauhaa tyhjentäessä suhteellinen vääntömomentti ei nouse erityisen korkeaksi edes pienellä pyörimisnopeudella. Suunnanvaihdon aikana kuormitus loppuu hetkellisesti, kun vaihde kytketään pois päältä.

Mitatun koneen typen oksidien tyypillinen vaihteluväli on 190 - 550 ppm ja keskimääräisellä pyörimisnopeudella ja kuormituksella taso on noin 200 ppm. Kauhan täyttämisen yhteydessä NO_x-pitoisuus nousee äkillisesti 400 - 550 ppm:ään, jolloin pyörimisnopeus käy lähellä tyhjäkäyntiä ja suhteellinen kuorma nousee keskitasoon. Pyörimisnopeuden noustessa takaisin lähelle 1500 rpm:ää pitoisuus laskee yhtä äkillisesti takaisin tasoon 200 ppm. Sama toistuu tyhjentäessä kauhaa, tosin hieman maltillisemmin pitoisuuden jäädessä 400 ppm:ään. Ajosuunnan vaihdolla ei ole merkittävää vaikutusta NO_x-tasoon.

Pienhiukkasten massa oli 537 μg . Kuvassa 5.9 massan jakautuminen näkyy maksimissaan 280 mg/m^3 pitoisuutena vaihteluvälin ollessa 0 - 280 mg/m^3 . Kuvaajassa näkyy paikallisia kohtia, joissa pienhiukkaspitoisuus nousee jyrkästi ja äkillisesti. Pienhiukkasten paikallisten maksimien syntyminen painottuu transienttitiiloihin, joissa kuormitus ja/tai pyörimisnopeus muuttuu. Alaluvun 5.1 staattisen



Kuva 5.9. Lyhyen kuormaussyklin rauhallisemman ajotyylin päästöpitoisuuksien kuvaaja. Punainen pystyviiva tarkoittaa kauhan täyttöä, vihreä kauhan tyhjennystä ja sininen suunnanvaihtoa.

kuormituksen kuvaajassa 5.4 pienhiukkaspitoisuudet ovat lähellä lyhyen syklin keskimääräisen ajotilanteen arvoja.

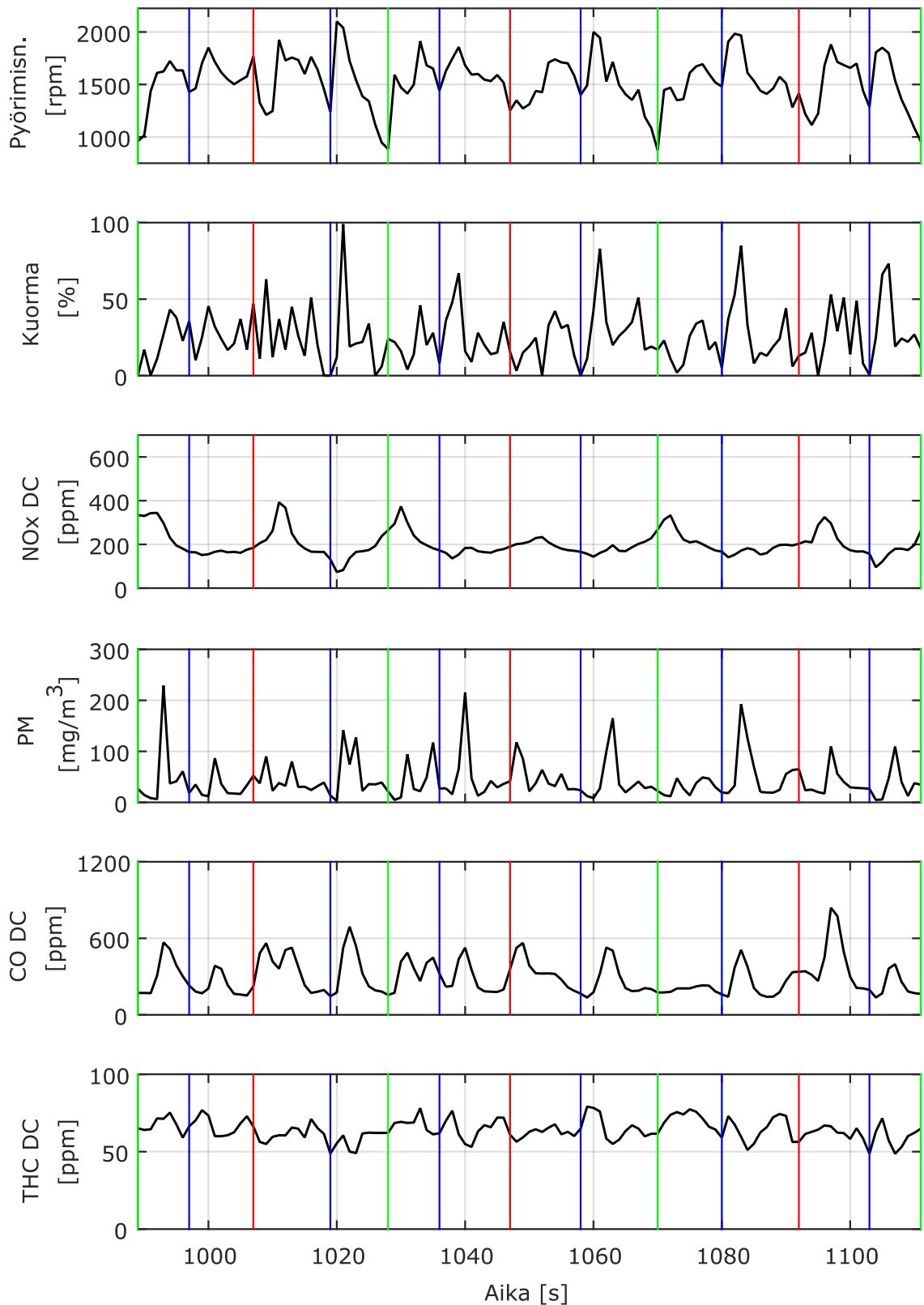
Hiilimonoksidin vaihteluväli liikkuu 150 - 1200 ppm:n välillä. Kauhan täyttämisen yhteydessä syntyneet paikalliset huiput liikkuvat 500 - 1200 ppm:n välissä. Kauhan tyhjentämisen ja ajosuunnan vaihtamisen yhteydessä CO-pitoisuus nousee, mutta ei yhtä paljon kuin kauhan täyttämisen yhteydessä. Tavallinen CO-pitoisuus liikkuu 150 - 250 ppm:n välissä. Palamattomien hiilivetyjen vaihteluväli liikkuu 55 - 80 ppm:n välissä. Kauhan täyttämisen yhteydessä ja suhteellisen kuormituksen kasvaessa THC-pitoisuus lähtee lievään laskuun ja saavuttaa kauhan täytyessä alimman arvonsa 55 ppm. Mittauksen kokonaispäästöt grammoina on esitetty liitteen C kuvassa C.1

5.2.2 Aggressiivinen ajotyyli

Tämän alaluvun tulokset on kerätty mittauksesta, jota kuva 5.10 edustaa. Kuvassa y-akseleilla on pyörimisnopeus, suhteellinen kuormitus, typen oksidit, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Lyhyen kuormaussyklin aggressiivisemmän ajotyylin kuljettaja käyttää konetta raskaasti ja polttoainetta säästämättä. Kuljettaja käyttää moottoria yli 2000 rpm:n pyörimisnopeuksilla. Kohdassa 1022 s suhteellinen kuorma käy täydessä kuormituksessa, jota ei aikaisemmalla kuljettajalla tapahtunut. Ajo ja sen aiheuttama kuormitus on vaihtelevaa ja raskasta, mutta moottorilla se ei näy maksimaalisena rasituksena. Syklin aikana keskimääräinen teho on ainoastaan 21,2 kW.

Kuvassa 5.10 näkyvät värilliset pystyviivat noudattavat samaa periaatetta kuvan 5.9 kanssa. Kuormitus käy suurimmillaan kuljettajan vaihtaessa ajosuuntaa. Kova kiihdytys saa suhteellisen kuormituksen ja pyörimisnopeuden nousemaan korkeaksi, jolloin hetkellinen teho käy keskikorkeana tai korkeana. Kauhan täytössä näkyy kuljettajan pidempi kokemus vastaavista tehtävistä, sillä hän pystyy täyttämään kauhan suhteellisen pienellä moottorin vääntömomentilla.

Typen oksidien pitoisuuden vaihteluväli liikkuu 100 - 400 ppm:n välillä. Pienimmät NO_x-pitoisuudet saavutetaan vaihtaessa ajosuuntaa ja suurimmat tyhjentäessä tai täyttäessä kauhaa. Huipputasot ovat yhtä korkeat riippumatta siitä, onko kyseessä kauhan tyhjennys vai täyttö. Aggressiivisemmälläkin ajotyylillä suurimmat NO_x-pitoisuudet saavutetaan pienellä moottorin pyörimisnopeudella. Kiihdytyksessä NO_x laskee alle perustason ja ajonopeuden noustessa se tasoittuu 190 ppm:n tasoon.



Kuva 5.10. Lyhyen kuormaus syklin aggressiivisemmän ajotyylin päästöpuoisuuksien kuvaaja. Punainen pystyviiva tarkoittaa kauhan täyttöä, vihreä kauhan tyhjennystä ja sininen suunnanvaihtoa.

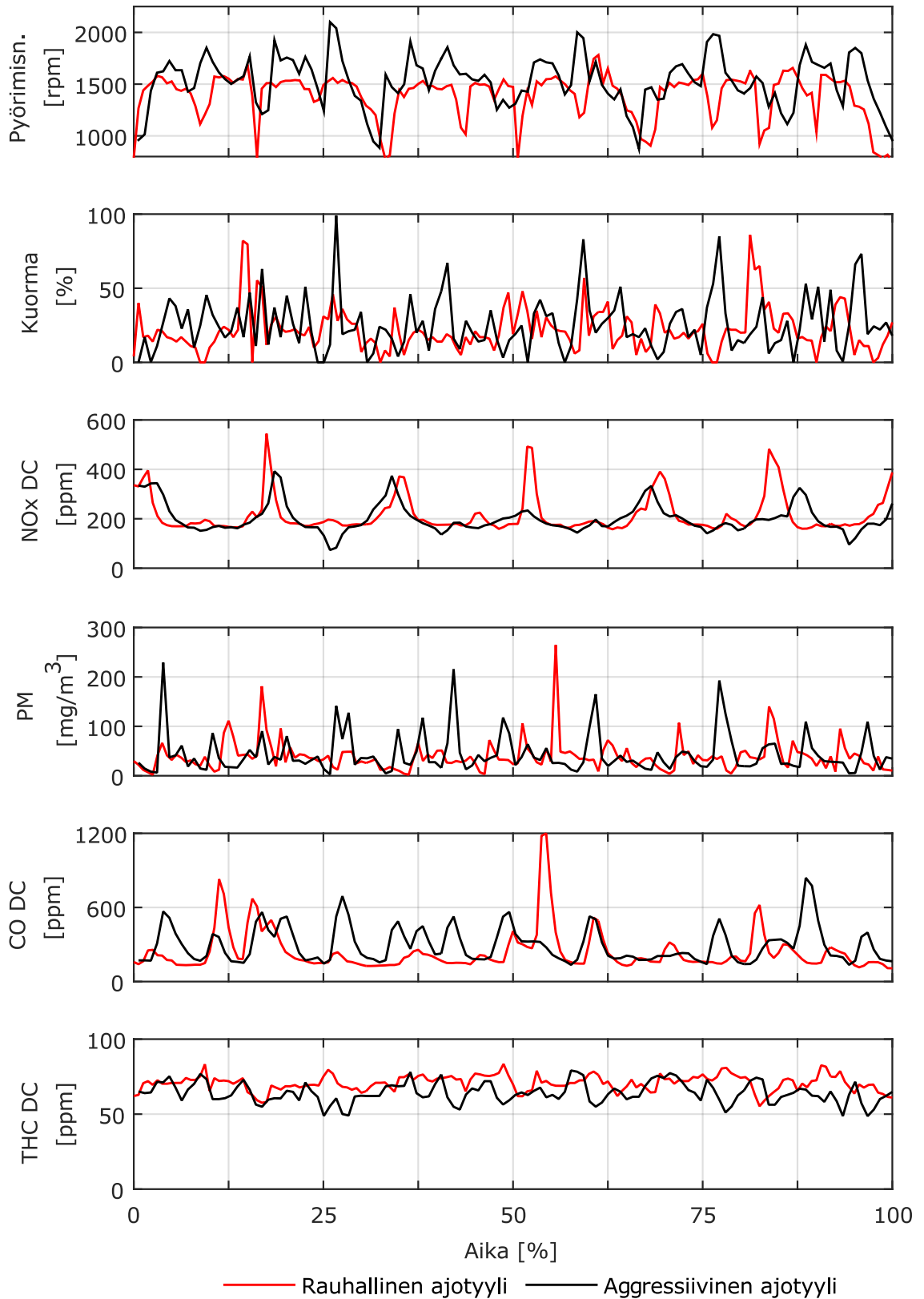
Pienhiukkasten suodattimelta punnittu massa oli 637 μg . Pienhiukkaspitoisuudet liikkuvat välillä 0 - 225 ppm. Pienhiukkasten syntyminen jakautuu kahteen, tasaiseen rasiinukseen ja vaihtelevaan rasiinukseen. Tasaisessa rasiinuksessa, keskimääräisen pyörimisnopeuden ja matalan vääntömomentin tilanteessa PM-pitoisuus pysyy kohtalaisen tasaisena tasolla 40 - 50 ppm. Kuljettajan rasiinusta moottoria vaihtelevasti tai kuljettajan tehdessä moottorille nopeita transientteja PM-pitoisuus nousee äkillisesti. Paikallisesti korkeat pitoisuudet liikkuvat 125 - 225 ppm:n välillä ja ne näyttävät syntyneen kuorman täytön, tyhjennyksen tai ajosuunnan vaihdon yhteydessä.

Aggressiivisemmän ajotyylin häkäpitoisuuden kuvaaja mukaillee pienhiukkaspitoisuuden muotoa. Kuljettajan CO-pitoisuuden vaihteluväli on 200 - 700 ppm. Paikalliset maksimipitoisuudet syntyvät samassa kohdassa paikallisten pienhiukkasmaksimien kanssa. Tasaisella ja keskiarvoisella kuormituksella häkäpitoisuus pysyy alhaalla noin 200 ppm:n tasolla. Palamattomien hiilivetyjen pitoisuuden vaihteluväli on 50 - 75 ppm ja kuvaajan signaali on vaihteleva. Kauhan täytön yhteydessä pitoisuus hieman laskee ja täytettäessä pysyy samana tai nousee. Ajosuunnan vaihdon yhteydessä pitoisuus nousee hieman. Mittauksen kokonaispäästöt on esitetty liitteen C kuvassa C.1.

5.2.3 Vertailu

Kuvassa 5.11 on esitetty molempien kuljettajien mittausdata samassa kuvaajassa, joissa y-akseleilla ovat pyörimisnopeus, suhteellinen kuormitus, typen oksidit, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Aggressiivisemmän kuljettajan pyörimisnopeudet liikkuvat tasaisesti 1500 rpm:n molemmilla puolilla, kun rauhallisen kuljettajan pyörimisnopeudet pysyivät pääsääntöisesti alle 1500 rpm. Erilaiset ajotyylit saavat työkoneen toimimaan eri toimintapisteessä, joten eroja on myös lopullisissa päästökertoimissa. Suhteellista kuormitusta tarkastellessa aggressiivinen ajotyyli aiheutti enemmän vaihtelevaa, jopa värähtelevää kuormitusta.

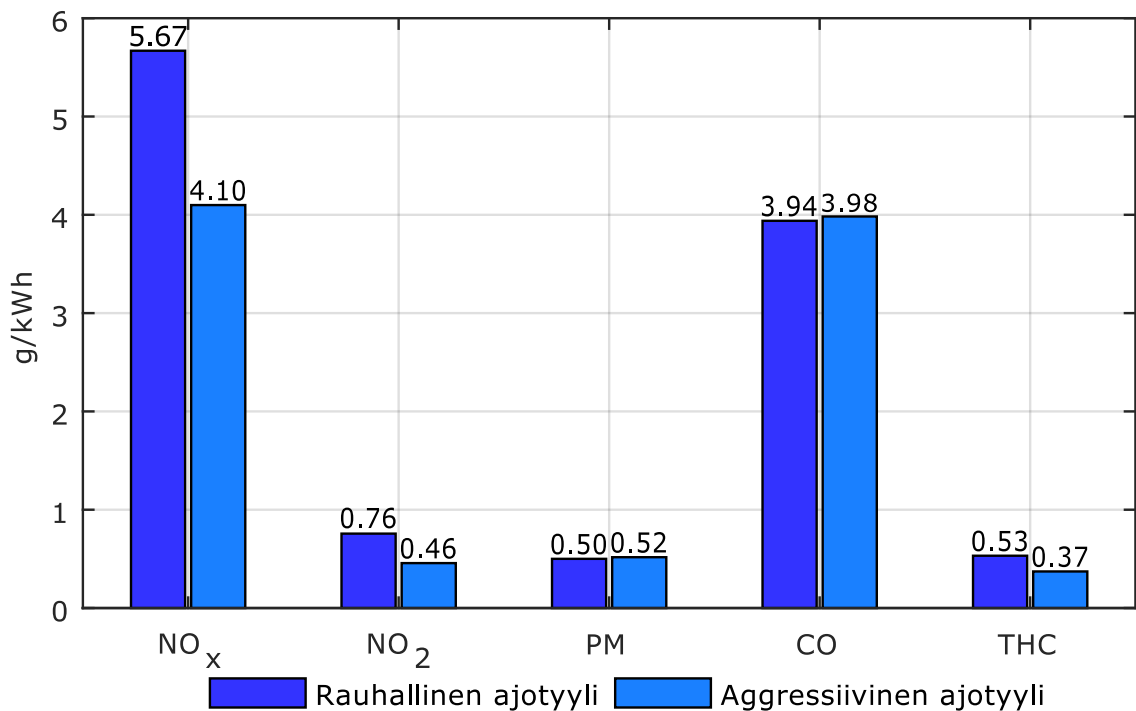
Typen oksideja tarkasteltaessa pitoisuudet olivat lähellä toisiaan, mutta rauhallisen kuljettajan paikalliset minimi- ja maksimipitoisuudet olivat suurempia. Aggressiivisella ajotyylillä NO_x -pitoisuus laskee parhaillaan noin 100 ppm:n tasoon, kun taas rauhallinen ajotyyli pääsi hieman alle 200 ppm:n pitoisuuksiin. Typen oksidit tarvitsevat syntyäkseen korkean lämpötilan (Luku 2.2), joka on seurausta kovasta kuormituksesta. On yllättävää nähdä pienillä kierrosnopeuksilla ja kuormilla syntyneitä korkeita NO_x -pitoisuuksia. Pienen pyörimisnopeuden korkeista NO_x -pitoisuuksista lisää alaluvussa 6.2.



Kuva 5.11. Lyhyen kuormaus syklin päästö pitoisuuksien vertailukuvaaja. Kuvaajien aika-akseli on asetettu samaksi. Punainen viiva edustaa rauhallisemman ajotyylin kuljettajaa ja musta aggressiivisemmän ajotyylin kuljettajaa.

Pienhiukkasten tapauksessa aggressiivisen ajotyylin vaihtelevampi kuormitus ja kovemmat kiihdytykset aiheuttavat pienhiukkaspitoisuuden enemmän korkeita 100 - 225 mg/m³ päästöhuippuja. Rauhallisemmalla ajotyylillä huippuja syntyy, mutta ne ovat keskimääräisesti alhaisempia. Pitoisuuden perustaso on molemmilla kuljettajilla lähellä toisiaan.

Häkäpitoisuuksien vaihteluväli on molemmilla kuljettajilla samankaltainen pois lukiin rauhallisen ajotyylin yksittäistä häkähuippua kohdassa 53 %. Päästön normaalitasossa ei ole suurta vaihtelua. Tässäkin tapauksessa aggressiivisemmalla ajotyylillä vaihtelu on suurempaa, ajotyyli aiheuttaa häkähuippuja toistuvammin ja päästöhuippujen syntyminen on ennustettavampaa. Rauhallisella ajotyylillä häkäpitoisuuden nouseminen satunnaisempaa. Palamattomia hiilivetyjä tarkasteltaessa rauhallisen kuljettajan normaali päästötaso on noin 10 ppm suurempi. Vaihteluväli on molemmilla 25 ppm:n sisällä.



Kuva 5.12. Lyhyen kuormaus syklin molempien ajotyylien päästökertoimet. Kuvassa on esitetty typen oksidit, typpidioksidi, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Tummempi väri edustaa rauhallisen ajotyylin kuljettajaa ja vaaleampi aggressiivisen ajotyylin kuljettajaa.

Kuvassa 5.12 on esitetty lopulliset päästökertoimet lyhyen ajosyklin ajalta. Rauhallisen ajotyylin lopullinen NO_x-päästökerroin 5,67 g/kWh on 38 % aggressiivista ajotyyliä suurempi. Rauhallisempi kuljettaja kuormitti työkonetta syklin aikana vähemmän, jolloin keskimääräinen pyörimisnopeus ja vääntömomentti liikkuivat staattisen kuormituksen kartalla lähempänä epäedullisen päästökertoimen aluetta

(Kuva 5.7). Aggressiivisempi ajotyyli taas laajemmalla toiminta-alueellaan poistui epäedulliselta alueelta useammin. Molempien kuljettajien typpidioksidipäästöt noudattavat NO_x -päästökertoimia osittain, mutta rauhallisen kuljettajan NO_2 toiminta-alue on NO_x -aluettakin epäedullisempi. Pienhiukkasten päästökertoimet rauhalliselle ja aggressiiviselle kuljettajalle ovat 0,50 g/kWh ja 0,52 g/kWh. Edestakaisessa pumppaavassa ajossa pienhiukkaspäästöt ovat molemmilla kuljettajilla ajotyylistä riippumatta samat. Häkäkaasun päästökertoimia tarkasteltaessa aggressiivisempi kuljettaja tuottaa hieman enemmän häkää energiayksikköä kohti. Rauhallisen kuljettajan CO-päästökerroin on 3,94 g/kWh ja aggressiivisen 3,98 g/kWh. Pitoisuuksia katsottaessa ero näyttää suuremmalta, kuin se oikeasti on. Palamattomia hiilivetyjä rauhallisella kuljettajalla syntyy 0,53 g/kWh ja aggressiivisella 0,37 g/kWh, jossa on selvä ero aggressiivisen kuljettajan eduksi.

Vertailtaessa Stage 3A -standardin päästötasoja kone suoriutuu HC + NO_x testistä huonosti molemmilla ajotyyleillä. Arvot ylittävät vaaditun 4,0 g/kWh, sillä rauhallinen ajotyylin päästökerroin on 6,2 g/kWh ja aggressiivisen 4,5 g/kWh. Pienhiukkaspäästöjen kohdalla molemmat kuljettajat ylittävät vaaditun 0,3 g/kWh päästökertoimien arvolla 0,5 g/kWh. Häkäkaasun kohdalla standardin 5,0 g/kWh taso ei ylity, sillä päästökertoimet ovat 3,9 g/kWh ja 4,0 g/kWh.

Päästökertoimia tarkasteltaessa täytyy huomioida absoluuttisen työn lisäksi reaalinen fyysisesti tehty työ. Siirrettyä tonnia kohden aggressiivisempi kuljettaja vie voiton, sillä syklin aikana kokeneempi kuljettaja siirtää soraa noin 15 - 20 % enemmän aikayksikköä kohti.

5.3 Pitkä ajosykli

Alaluvussa esitellään pitkän ajosyklin päästöpitoisuuksien kuvaajat molemmille ajotyyleille, vertailukuvaaja, päästökertoimet ja tietoa syklistä sekä moottorin toiminta-alueesta. Kuvaajien y-akseleilla on pyörimisnopeus, suhteellinen kuormitus, typen oksidit, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Kuvaajat on leikattu havainnollistamisen selkeyttämiseksi alkuperäisestä pitkästä mittausdatasta.

Taulukossa 5.3 on tietoja pitkästä ajosyklistä ja moottorin toimintapisteistä. Aggressiivisemmalla ajotyylillä moottorin keskimääräinen pyörimisnopeus on 1575 rpm, joka on 96 rpm rauhallisen ajotyylin keskimääräistä pyörimisnopeutta suurempi. Vääntömomentin osalta aggressiivinen ajotyyli aiheutti 114 Nm:n keskimääräisen vääntömomentin, joka on 15 % rauhallisen kuljettajan keskimääräistä vääntömomenttia suurempi. Syklin tavoitepituudeksi asetettiin 30 minuuttia. Molemmat kuljettajat ajoivat kuusi kierrosta pitkää ajosykliä. Aggressiivinen kuljettaja käytti

sykliin 24 min 38 s, kun taas rauhallinen kuljettaja 28 min 35 s. Aggressiivinen kuljettaja ajaa syklin 14,6 kertaa tunnissa ja rauhallinen kuljettaja 12,6 kertaa tunnissa. Tuottavuudessa on 16 %:n ero aggressiivisen kuljettajan eduksi.

Taulukko 5.3. Tietoja pitkästä syklisestä ja moottorin toiminnasta.

Kuorma	Pyörimisn. kesk. [rpm]	Vääntöm. kesk. [Nm]	Polttoaine [l]	Työ [kWh]	Aika [s]
Rauhallinen	1479	99	2,90	8,36	1715
Aggressiivinen	1575	114	3,18	8,81	1478

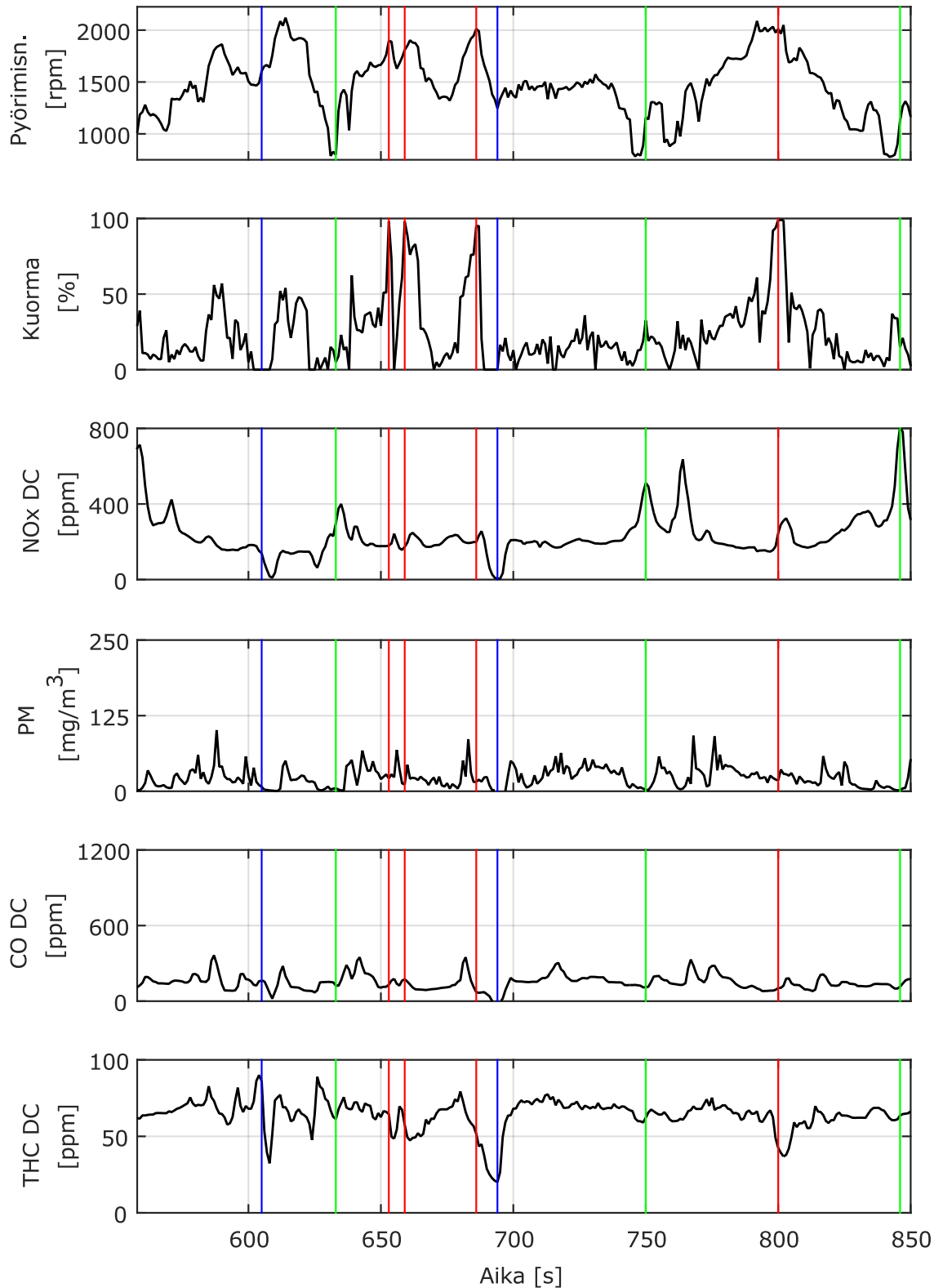
Aggressiivisen ajotyylin polttoaineenkulutus on 10 % suurempi, mutta 16 % suurempi tuottavuus kompensoi polttoaineeseen ja henkilöstökuluihin kulunutta rahaa.

5.3.1 Rauhallinen ajotyyl

Tämän alaluvun pitoisuudet on kerätty mittauksesta, jota kuva 5.13 edustaa. Kuvassa y-akseleilla on pyörimisnopeus, suhteellinen kuormitus, typen oksidit, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Pitkässä ajosyklissä ajonopeus määräytyy pitkälti pyörimisnopeuden mukaan. Syklissä kierretään ennalta määritettyä ajoreittiä, jossa on hidasta, keskinopeaa ja nopeaa ajoa. Ajosyklin aikana polttomoottorin pyörimisnopeuden vaihtelu on laajaa, moottorin koko toiminta-alueella tapahtuvaa vaihtelua. Kuormaa käsiteltäessä moottorin pyörimisnopeus on lähellä tyhjäkäyntiä, kun taas nopeilla siirtymisosoituksilla pyörimisnopeus nousee lähelle huippuaan. Mittauksen keskimääräinen teho on 17,6 kW, joka jää noin 80 kW maksimitehosta.

Moottorilta otettava kuormitus on pääsääntöisesti enemmän kuin 15 % maksimikuormituksesta, pois lukien hetkittäiset tyhjäkäynnit kuormaukseen valmistautuessa. Kiihdytysten ja ylämäkiosuuden aikana kuormitus nousee paikoitellen huippuunsa. Rauhallisen ajotyylin päästöpitoisuuksien kuvaaja on esitetty kuvassa 5.13, ja siihen on merkitty punaisia pystyviivoja esittämään yli 95 % kuormitusta, vihreitä pystyviivoja esittämään kuormankäsittelyä ja sinisiä pystyviivoja esittämään alamäessä tai nopean siirtymän jälkeen tapahtuvaa moottorijarrutusta. Korkeimmillaan moottorin kuormitus on kiihdytettäessä nopeaan siirtymäajoon kohdassa 690 s ja noustessa testiradan ylämäkiosuutta ylös kohdassa 800 s. Moottorijarrutusta tapahtuu ajettaessa alas mäkeä kohdassa 610 s ja nopean siirtymäosuuden jälkeen hidastettaessa kohdassa 695 s.

Typen oksidit nousevat koneelle ominaiseen tapaan suurimmiksi käsiteltäessä kuormaa. Paikallisesti korkea NO_x-vaihteluväli on 400 - 800 ppm. Kovat kiihdytykset



Kuva 5.13. Pitkän ajosyklin rauhallisemman ajotyylin päästöpitoisuuksien kuvaaja. Punainen viiva tarkoittaa yli 95 % suhteellista kuormitusta, sininen viiva moottorijarrua tai alamäkeä ja vihreä viiva kuorman nostoa tai laskua. Päästödata ilmoitettu ajaumakorjattuna, ympäristökorjattuna ja märkänä.

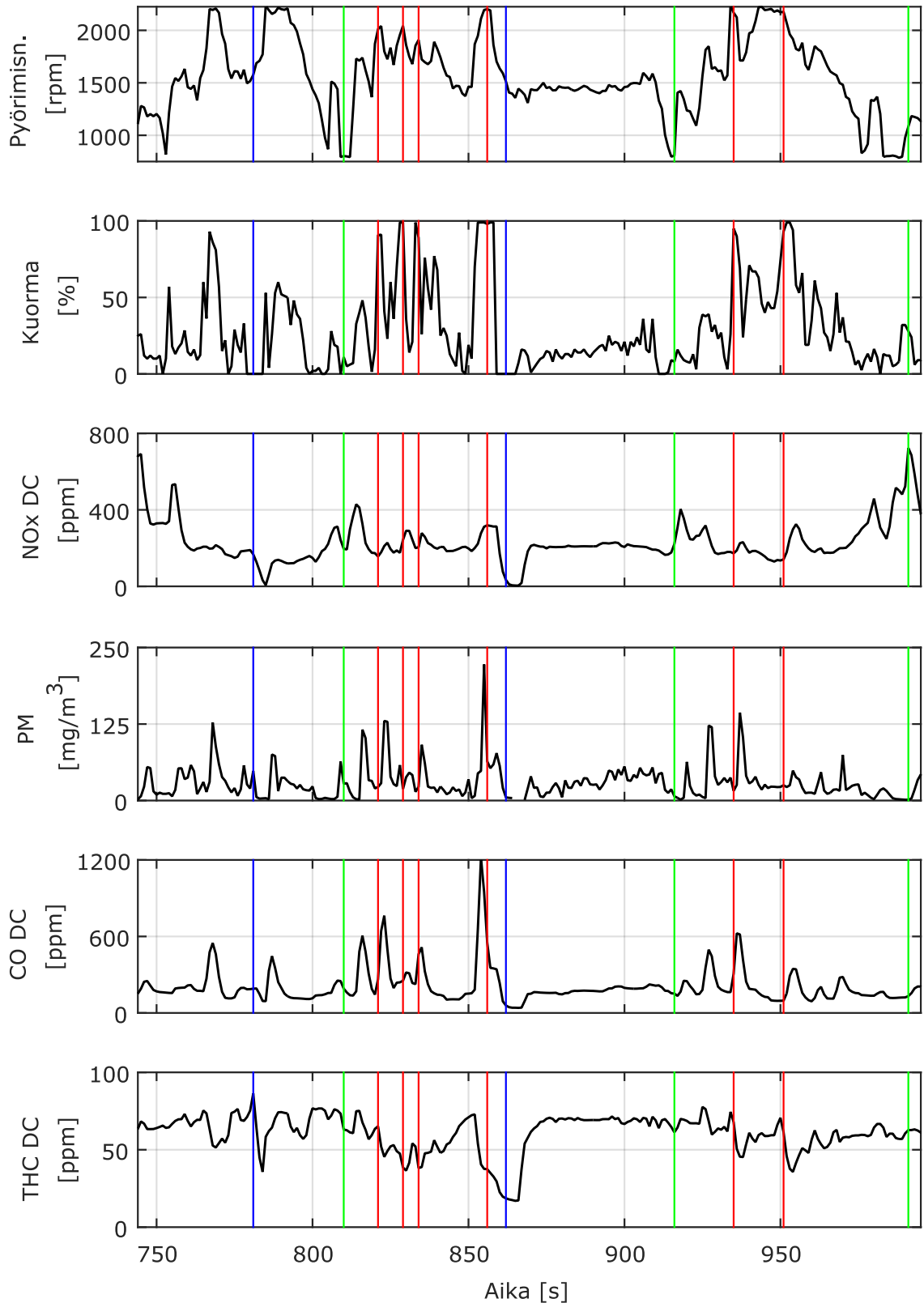
aiheuttavat parhaimmillaan vain 150 ppm:n nousun NO_x-pitoisuudessa. Moottorijarrutuksessa NO_x-pitoisuus laskee nolnaan, koska lämpötila sylinterin palotilassa laskee, eikä NO_x-mekanismit (Alaluku 2.3) pääse aktivoitumaan. Ilman työkoneen pienen pyörimisnopeuden korkeita NO_x-pitoisuuksia vaihteluväli liikkuisi 0 - 400 ppm välissä. Tavanomainen pitoisuus on noin 200 ppm, jolloin työkoneella tehdään keskimatalan kuormituksen töitä keskimääräisellä pyörimisnopeudella. Mielenkiintoisena huomiona syklin aikana syntyneet päästöpitoisuudet noudattavat osittain alaluvussa 5.1 mitattuja staattisen kuormitustilanteen NO_x-pitoisuuksia.

Pienhiukkassuodattimen pienhiukkasmassa oli 427 µg. Pienhiukkaspäästöjen muodostuminen on vaihtelevaa ja yllättäen korkeimmat pitoisuudet eivät muodostu erikoishuomion alle otettujen työtehtävien aikana. Tämän ajosyklin perusteella kova kuormitus ei takaa korkeita pienhiukkaspäästöjä. Moottorijarrutuksen ja kuormankäsittelyn aikana PM-pitoisuudet ovat matalia. Suurimmat pienhiukkaspitoisuudet syntyvät keskimääräisen pyörimisnopeuden ja keskimatalan kuormituksen alueella siirryttäessä kuormauspisteeltä toiselle. Pienhiukkaspitoisuudet nousevat otannan aikana korkeintaan 100 mg/m³ tasolle ja pienimmillään laskevat nolnaan. Pitoisuuden keskiarvo syklin aikana on 24 mg/m³ ja se noudattaa osittain kuvassa 5.4 esiteltyä staattisen kuormituksen pienhiukkaspitoisuutta. Syklin aikana vietetään korkeimman päästöpitoisuuden alueella vain vähän aikaa.

Otannan häkäpitoisuuden kuvaaja noudattaa osittain PM-pitoisuuden muotoa. Suodattamalla PM-datasta suuritaajuuksinen värähtely pois, olisivat CO ja PM kuvaajat melko samankaltaisia. Häkäkaasun syntyminen johtuu epäpuhtaasta palamisesta, joten se on todennäköisesti yhteydessä PM-päästön syntymismekanismeihin, joita ovat alaluvussa 2.3 mainitut rikas seos ja vähähappinen paloympäristö. Häkäkaasun vaihteluväli on otannassa 0 - 380 ppm, keskiarvon ollessa 164 ppm. Palamattomien hiilivetyjen vaihteluväli on 25 - 90 ppm, joka on lyhyttä kuormaussykliä suurempi vaihteluväli. Moottorijarrutuksen aikana häkäkaasun pitoisuus laskee lähelle nolaa ja palamattomien hiilivetyjen pitoisuus laskee noin 25 ppm:ään. Palamattomien hiilivetyjen vaihtelu on otannan alkupuolella vaihtelevampaa, niin kuin kuormituskin on. Mittauksen kokonaispäästö on esitetty liitteen C kuvassa C.2.

5.3.2 Aggressiivinen ajotyyli

Tämän alaluvun pitoisuudet on kerätty mittauksesta, jota kuva 5.14 edustaa. Kuvassa y-akseleilla on pyörimisnopeus, suhteellinen kuormitus, typen oksidit, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Pitkän ajosyklin aggressiivisen ajotyylin kaasupolkimen käyttö on määrätietoista. Ajorutiini näkyy määrätietoisesta pyörimisnopeudesta ja kuljettaja tietää minkä pyörimisnopeuden kuhunkin



Kuva 5.14. Pitkän ajosyklin aggressiivisen ajotyylin päästöpitaisuuksien kuvaaja. Punainen viiva tarkoittaa yli 95 % suhteellista kuormitusta, sininen viiva moottorijarrua tai alamäkeä ja vihreä viiva kuorman nostoa tai laskua. Päästödata ilmoitettu ajaumakorjattuna, ympäristökorjattuna ja märkänä.

ajonopeuteen tarvitsee. Pyörimisnopeuden vaihteluväli liikkuu tyhjäkäynnin ja korkeimman pyörimisnopeuden välissä riippuen syklin vaiheesta. Nopeilla siirtymäosuuksilla pyörimisnopeus asettuu maksimiarvoonsa ja kuormaa liikuteltaessa tippuu hetkellisesti tyhjäkäynnille.

Keskimääräinen teho on 21,6 kW, joka jää 75,4 kW huipputehosta, jota käytetään ainoastaan kahdessa kohtaa sykliä, nopealla siirtymäosuudella kohdassa 860 s ja ylämäessä kohdassa 955 s.

Yhden syklin aikana ylämäki ajetaan kahdesti. Ensimmäisellä ilman kuormaa tapahtuvalla ajokerralla suhteellinen kuormitus on sahaavaa ja liikkuu 20 - 100 % välillä. Toisella kerralla ylämäkeen ajetaan kuorman kanssa, jolloin ajo on huolellisempaa ja kuormitus on vähemmän vaihtelevaa. Ilman huipputehon alueita suhteellinen kuormitus liikkuu pääosin 0 - 50 % välillä. Moottorijarrulla kuljettaja on kohdissa 780 s ja 864 s.

Tässäkin mittauksessa NO_x-pitoisuudet noudattavat aiempaa kaavaa, jossa suurimmat NO_x-päästöt syntyvät kuormaamisen yhteydessä lähellä tyhjäkäyntiä. Typen oksidien vaihteluväli on 0 - 800 ppm. Kiihdyttäminen ja suuri teho nostavat NO_x-pitoisuutta noin 125 ppm. Keskimääräisen pyörimisnopeuden ja keskimatalan suhteellisen kuormituksen alla pitoisuus on noin 200 ppm. NO_x-pitoisuudet noudattavat osittain staattisen kuormitustilanteen pitoisuuksia (Alaluku 5.1).

Punnittu pienhiukkasmassa oli 480 µg. Pienhiukkaspitoisuudet liikkuvat vaihteluvälillä 0 - 125 mg/m³ yhtä 225 mg/m³ huippua lukuun ottamatta, joka muodostuu nopeaan ajoon siirryttäessä. Otannan alkupuoliskolla pitoisuuden vaihtelu on loppupuoliskoa hieman tasaisempaa. Ilman kuormaa ylämäkeen ajettaessa pitoisuudet liikkuvat maksimissaan 125 mg/m³ tasossa, kun taas kuorman kanssa ylämäkeen mentäessä pitoisuus huipputehon aikana on 30 - 40 mg/m³. Pienhiukkaspäästöjen muodostumisen voimakkuuteen liittyy kierrosnopeuden ja suhteellisen vääntömomentin nopea vaihtelu ja se ilmenee myös tässä ajossa. Moottorijarrutuksen aikana PM-pitoisuus laskee nollaan ja keskimääräisellä pyörimisnopeudella ja keskimatalalla suhteellisella kuormituksella PM-pitoisuudet liikkuvat 50 - 60 mg/m³ tasossa.

Häkäkaasun muodostuminen noudattaa PM-pitoisuutta tässäkin mittauksessa. Pitoisuuden vaihteluväli on 50 - 1200 ppm. Vääntömomentin värähtelyt eivät vaikuta CO-pitoisuuteen yhtä voimakkaasti, vaan signaali näyttää suodatetummalta. Kaasun keskimääräinen pitoisuus mittauksen ajalta on 224 ppm. Kova kuormitus ei tarkoita korkeaa CO-pitoisuutta, vaan suurin osa korkeista tai keskikorkeista pitoisuuksista muodostuu keskimääräisen ja vaihtelevan suhteellisen kuormituksen aikana. Palamattomien hiilivetyjen pitoisuudet liikkuvat 20 - 70 ppm välissä. Kova

kuormitus saa HC-pitoisuuden laskemaan. Syklin alkupuoliskolla pitoisuuden vaihtelu on loppupuoliskoa vaihtelevampaa. Keskimääräinen HC-pitoisuus on 62 ppm. Mittauksen kokonaispäästöt grammoina on esitetty liitteen C kuvassa C.2.

5.3.3 Vertailu

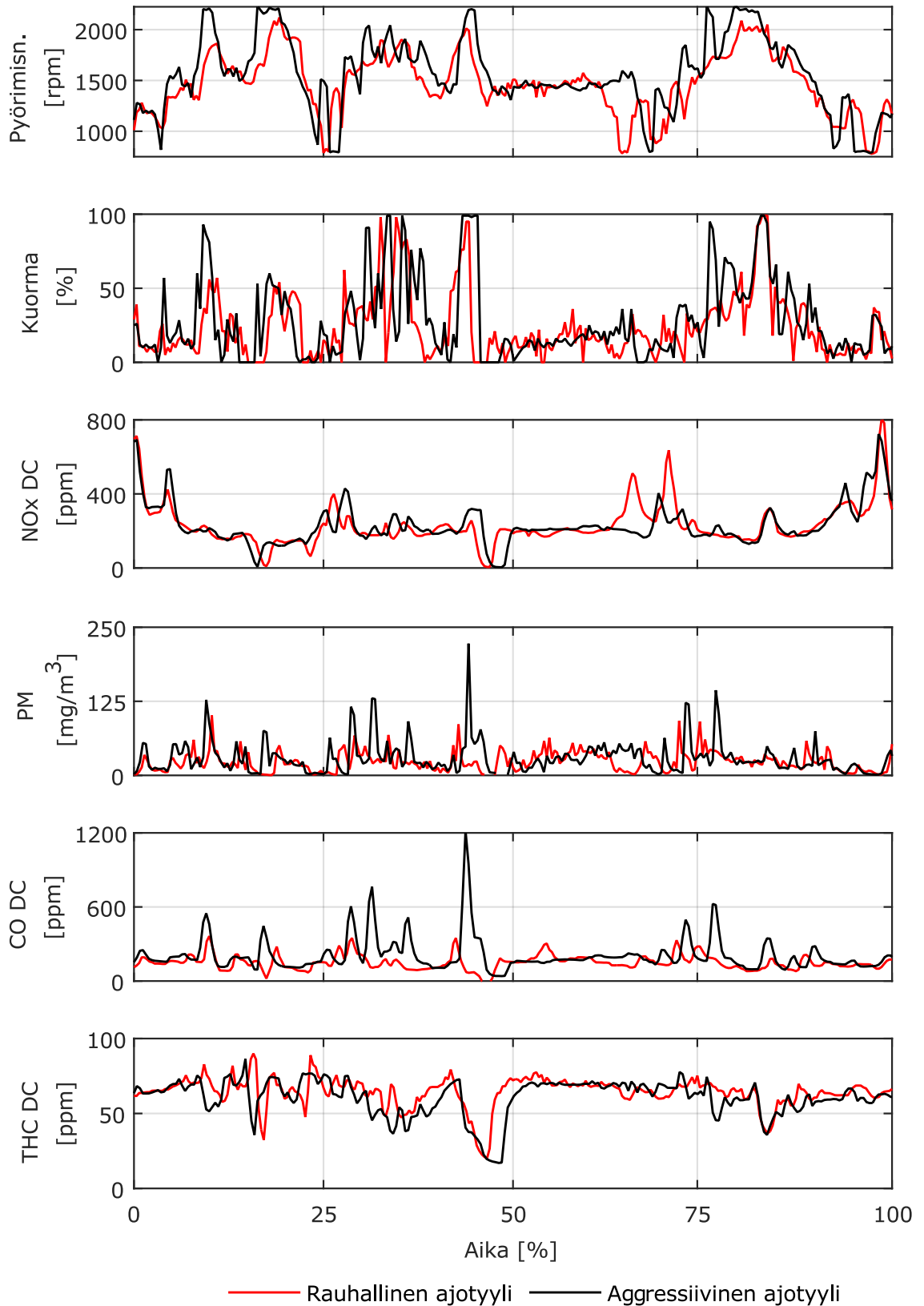
Molempien ajotyylien verrokkikuvaaja on esitetty kuvassa 5.15. Kuvan y-akseleilla ovat pyörimisnopeus, suhteellinen kuormitus, typen oksidit, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Pyörimisnopeuden kuvaajasta näkee aggressiivisen ajotyylin voimakkaamman kaasupolkimen käytön, sillä pyörimisnopeus on lähes koko syklin ajalta rauhallista ajotyyliä korkeampi. Huippukierrosnopeuksilla vietetty aika on aggressiivisen ajotyylin kuljettajalla huomattavasti pidempi. Kaasupolkimen voimakkaamman käytön ero näkyy myös suhteellisessa kuormituksessa. Erilainen kuormitus saa työkoneen toimimaan eri kohdassa vääntökäyrästä, joten samaan aikaan työkone liikkuu eri kohdalla staattisen päästömittauksen kartastoa, joka voi tarkoittaa erilaisia pakokaasupäästöjen pitoisuuksia ja päästökertoimia.

Typen oksidien kuvaajasta näkee, että täyden kuormituksen alla kohdassa 45 % aggressiivinen kuljettaja saa aikaan leveämmän alueen NO_x-pitoisuudessa. Keskimatalan kuormituksen ja keskimääräisen pyörimisnopeuden aikana NO_x-pitoisuudet ovat hyvin lähellä toisiaan.

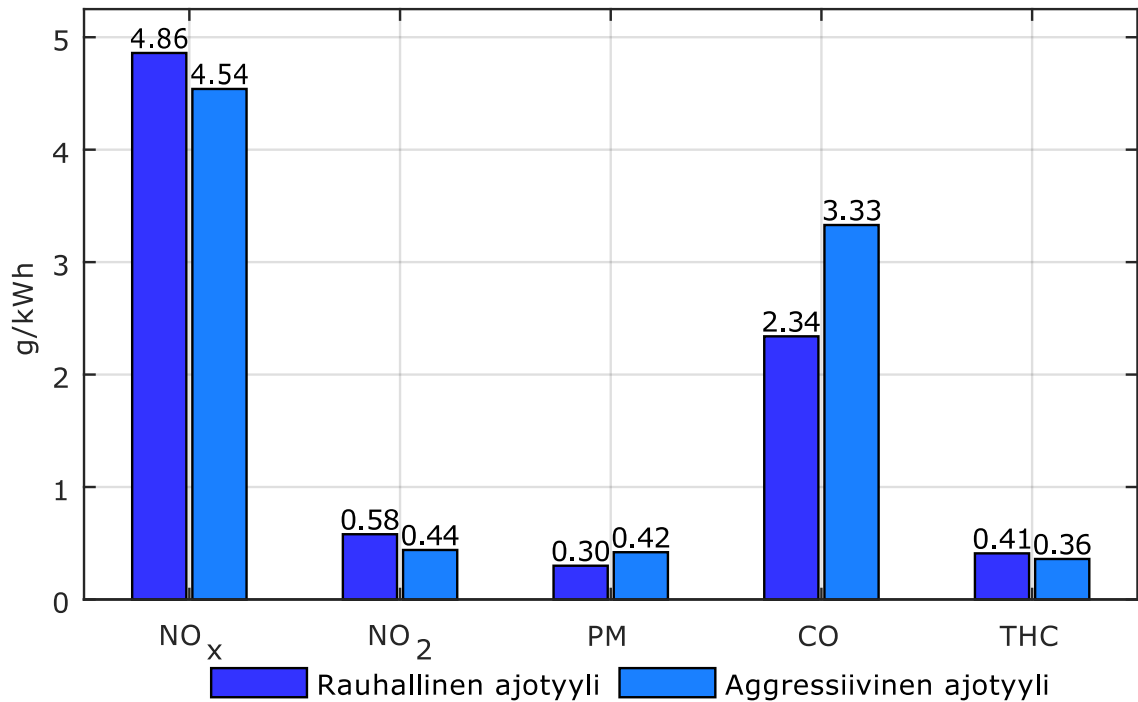
Päällekkäin olevien pienhiukkaspäästöjen kuvaajasta näkee, että aggressiivisen ajotyylin paikalliset huiput ovat huomattavasti korkeampia. Tavanomaisen ajon aikana päästöpitoisuudet ovat kohtalaisen lähellä toisiaan. Kovan kiihdytyksen aikana kohdassa 45 % aggressiivinen ajotyyli aiheuttaa erityisen korkean 230 mg/m³ pitoisuuden. Rauhallisemman kuljettajan tasaisempi ajotyyli näkyy matalampina PM-pitoisuuksina.

Häkäkaasussa erot ovat selvästi rauhallisen kuljettajan eduksi. Paikalliset pitoisuus-huiput ovat ajoittain jopa kolminkertaisia rauhallisen ajotyylin kuljettajan eduksi. Häkäkaasun muodostuminen tapahtuu pääosin samassa kohtaa testisykliä. Palamattomien hiilivetyjen kuvaajat ovat samankaltaisia keskenään, joskin rauhallisen ajotyylin perustaso on hieman korkeampi. Aggressiivisen ajotyylin kuljettajan voimakkaampi ja pidempi kaasutus saa palamattomat hiilivedyt laskemaan matalammaksi.

Kuvassa 5.16 on esitetty lopulliset päästökertoimet molemmille ajotyyille. Rauhallisen ajotyylin kuljettaja tuottaa typen oksideja testin aikana 4,86 g/kWh, kun taas aggressiivisen ajotyylin kuljettaja tuottaa 4,53 g/kWh. Prosenttiyksikköinä



Kuva 5.15. Pitkän ajosyklin molempien ajotyylien päästöpitoisuuksien vertailukuvaaja. Kuvaajien aika-akseli on asetettu samaksi. Punainen viiva edustaa rauhallisemman ajotyylin kuljettajaa ja musta aggressiivisemmän ajotyylin kuljettajaa.



Kuva 5.16. Pitkän ajosyklin molempien kuljettajien päästökertoimet. Kuvassa on esitetty typen oksidit, typpidioksidi, pienhiukkaset, häkä ja palamattomat hiilivedyt. Tummempi väri edustaa rauhallisen ajotyylin kuljettajaa ja vaaleampi aggressiivisen ajotyylin kuljettajaa.

ilmoitettuna se tarkoittaa noin 7 % eroa aggressiivisen kuljettajan eduksi. Typpidioksidin päästökertoimet ovat 0,58 g/kWh ja 0,44 g/kWh aggressiivisen kuljettajan eduksi. Typpidioksidin muodostumisessa kuljettajilla on noin 33 % ero. Staattisen kuormituksen kuvaaja 5.6 tukee NO_x ja NO₂ päästökertoimien välistä prosentuaalista eroa, sillä keskiarvoinen vääntömomentti tuottaa suhteessa enemmän NO₂:a verrattuna typen oksideihin.

Aggressiivisen kuljettajan vaihtelevampi kuormitus ja korkeammat PM-pitoisuudet näkyvät korkeampana PM-päästökertoimen arvona. Aggressiivisen ajotyylin kuljettaja tuottaa pienhiukkasia 0,42 g/kWh, kun taas rauhallisemman ajotyylin kuljettaja 0,30 g/kWh.

Epäpuhdasta ja vähähappista palamista edustavaa häkää muodostuu aggressiivisen kuljettajan toimesta huomattavasti, noin 42 % enemmän. Päästökertoimen arvot ovat 2,34 g/kWh rauhallisen ajotyylin kuljettajalle ja 3,33 g/kWh aggressiivisen ajotyylin kuljettajalle. Palamattomia hiilivetyjä muodostuu aggressiivisen ajotyylin kuljettajalla vähemmän. Rauhallisen ajotyylin kuljettajan päästökerroin on 0,41 g/kWh ja aggressiivisen ajotyylin 0,36 g/kWh.

Rinnastettaessa mittaus Stage 3A -standardiin kone suoriutuu HC + NO_x testissä

huonosti molemmilla ajotyyleillä. Arvot ylittävät vaaditun 4,0 g/kWh, sillä rauhallinen ajotyylin päästökerroin on 5,3 g/kWh ja aggressiivisen 4,9 g/kWh. Pienhiukkasten kohdalla aggressiivinen ajotyyli ylittää vaaditun 0,3 g/kWh päästökertoimien päästökertoimen arvolla 0,4 g/kWh, kun taas rauhallinen ajotyyli on juuri ylärajan tuntumassa päästökertoimen arvolla 0,3 g/kWh. Häkäkaasun kohdalla standardin 5,0 g/kWh taso ei ylity, sillä ajotyylien päästökertoimet ovat 2,3 g/kWh ja 3,3 g/kWh.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Ajotyylin vaikutus pakokaasupäästöihin

Tuloksien perusteella ajotyyli vaikuttaa pakokaasupäästöihin. Tuloksia voidaan tarkastella useasta näkökulmasta, joita vaihtelemalla tulosten merkitys muuttuu. Tässä työssä tarkastelu suoritettiin energiaperusteisesti, jolloin tarkastellaan, kuinka monta massayksikköä pakokaasupäästöä syntyy tehtyä energiayksikköä kohti.

Staattisissa mittauksissa esitettiin, että typen oksidien ja pienhiukkaspäästöjen määrät vaihtelevat moottorin eri toimintapisteissä (Kuvat 5.5 - 5.8 ja liite A). Ainakin typen oksidien pitoisuudet noudattivat osittain staattisen mittauksen kuvaajia. Suurempi mittauspisteiden määrä ja tarkempi data-analytiikka antaisi paremman kuvan vastaavuudesta.

Rauhallisen ajotyylin keskimääräinen teho oli aggressiivisen ajotyylin keskimääräistä tehoa matalampi. Lyhyessä kuormausykyssä erot olivat molemmissa ajosykkeissä keskimääräisen pyörimisnopeuden osalta 10 % ja keskimääräisen vääntömomentin osalta 43 % matalammat, pitkässä ajosyklissä vastaavat lukemat olivat 6 % ja 15 %. Kyseiset erot keskiarvoisten toimintapisteiden siirtymisessä saivat aikaan eroja myös lopullisissa, kuvissa 5.12 ja 5.16) esitetyissä päästökertoimissa.

Lyhyessä kuormausykyssä moottori toimii pitkälti osakuormalla. Lyhyet etäisyydet rajoittavat työkoneen nopeutta, juuri kun nopeutta alkaa kertyä, niin täytyy alkaa valmistautua seuraavaan kauhan täyttämiseen tai tyhjäämiseen. Pakokaasupäästöissä moottorin pieni toiminta-alue näkyy kohtalaisen samankaltaisina päästökerrotoimina, ainakin pienhiukkas- ja häkäpäästöjen osalta. Erot syntyvät typen oksideissa ja palamattomissa hiilivedyissä, joissa rauhallisempi ajotyyli tuottaa 38 - 43 % suuremmat päästöt kilowattituntia kohti.

Pitkässä ajosyklissä kuljettajalle jää enemmän vapauksia toteuttaa omaa ajotyyliään, koska koneella ajetaan vaihtelevilla nopeuksilla. Testiradan monipuolisen reitin vuoksi moottorin toiminta-alue on lyhyttä kuormausykyä laajempi (Liite A). Molemmat kuljettajat käyttävät hyväksi koko tehoalueen tyhjäkäynnistä huipputehohon. Aggressiivisemmän kuljettajan huipputehон kuormituspisteet ovat jakautuneet laa-

jemmalle alueelle ja moottorin kovempi kuormitus on selvästi eroteltavissa kuvassa A.3. Päästökertoimien osalta kuljettajien välinen ero typen oksidien kohdalla on vain 7 %. Pienhiukkas- ja häkäpäästön päästökertoimet ovat muuttuneet samankaltaisista reilun kolmanneksen pienemmäksi rauhallisen ajotyylin eduksi. Palamattomien hiilivetyjen välinen ero on kutistunut kahteentoista prosenttiin.

Koneen huipputehoa käytettiin vain hetkittäin. Testisykliä aikana moottorin keskimääräinen teho oli noin 20 % huipputehosta, joka tarkoittaa sitä, että konetta ajetaan usein osakuormalla. Dieselmoottoireiden parhaimmat hyötysuhteet löytyvät läheltä huippuväännön aluetta [13]. Käyttämämme kone ei toiminut parhaan hyötysuhteen alueella (Liite A). Olisi mielenkiintoista nähdä, millaisiksi polttoaineen kulutus ja päästökäsitteiden päästökertoimet olisivat muuttuneet, mikäli moottorin ja ajovoimansiirron keskinäinen toiminta optimoitaisiin.

Työssä ajettujen syklien perusteella tehokas ajo ja ammattitaito kasvattavat työn tehokkuutta. Tässä työssä aggressiivisen ajotyylin omaava kuljettaja oli ammattitaitoisempi ja suoritti työn ajosyklistä riippuen 10 - 16 % tehokkaammin. Aggressiivisempi ajotyyli aiheuttaa merkittävästi suuremman polttoaineen kulutuksen ja edelleen suuremman määrän hiilidioksidia. Energiaperusteisen päästökertoimen käyttö ei kerro ympäristölle aiheutuvia kokonaispäästöjä, joita voi tarkastella liitteestä C.

Tutkimuskysymyksessä kysytään: Vaikuttaako kuljettajan ajotyyli koneen pakokaasupäästöihin? Tämän työn perusteella kaasukomponenttien päästökertoimet muuttuvat moottorin kuormituksen muuttuessa. Päästökertoimet voivat vaihdella testisyklin sisällä eri kuljettajien välillä jopa 43 %. Tulosten perusteella typen oksideja syntyy enemmän keskimääräisen tehon ollessa alhainen. Pitkässä ajosyklistä aggressiivinen ajotyyli tuottaa enemmän pienhiukkasia verrattuna rauhalliseen ajotyyliin, mutta lyhyessä kuormaussyklistä päästökertoimet ovat samat. Häkäkaasu ja pienhiukkaset noudattavat päästökertoimissa toisiaan. Palamattomia hiilivetyjä syntyy aggressiivisella ajotyyllillä rauhallista ajotyyliä vähemmän riippumatta testisyklistä.

Tuloksiin vaikuttaa tarkastelun näkökulma ja eri tyyppiset tuottavuus- ja polttoainekorjaukset. Lyhyessä kuormaussyklistä päästökertoimien arvot ovat pitkää ajosykliä keskimäärin korkeampia, mutta pitkässä ajosyklistä tulee enemmän vaihtelua päästökertoimissa ajotyylien välillä. Mittaustulokset eivät ole täysin verrattavissa päästöstandardeissa esitettyihin kaasukomponenttien päästökertoimiin. Data-analytiikassa ei ole käytetty kaikkia tyyppihyväksynnässä tarvittavia liikkuville työkonelille tarkennettuja menetelmiä. Lisäksi työssä valittiin tarkoituksella tes-

tisyklit, jotka eivät noudata minkään standardin testisyklejä. Käytetyt testisyklit sen sijaan noudattavat todellisuudessa käytettyjä ajosyklejä kohtalaisen hyvin. Testeissä käytetty koneen kokoonpano poikkeaa tyyppihyväksynnässä käytetystä kokoonpanosta, joten kone ei myöskään edusta alkuperäistä tuotantomallin konetta.

Pienen näytejoukon vuoksi tulokset eivät ole täysin luotettavia. Työ kuitenkin osoittaa, että tuloksissa saattaa olla eroja ajotyöliien välillä. Tuloksia ei pidä yleistää konekantaan. Työkoneiden ajovoimansiirron ja moottorin välisissä ohjauksissa on eroja valmistajien välillä sekä moottorin teknisessä suunnittelussa on eroja moottorivalmistajien välillä. Tämän työn tulokset kertovat ainoastaan mitatun koneen pakokaasupäästöistä.

6.2 NO_x-käytös pienellä pyörimisnopeudella

Matalalla pyörimisnopeudella syntyneet korkeat NO_x-päästöt herättivät kirjoittajassa ihmetystä. Uludogan et al. mallintivat suoraruiskutuksella toimivaa dieselmoottoria erilaisilla pyörimisnopeuksilla ja ruiskutusajoituksilla julkaisussa *Modelling the Effect of Engine Speed on the Combustion Process and Emissions in a DI Diesel Engines*. Erityisesti pienellä pyörimisnopeudella aikainen, 20 - 30 astetta ennen yläkuolokohtaa alkava ruiskutus nosti NO_x-päästöjä merkittävästi. Aikaisin ruiskutettu polttoaine sekoittuu pyörteiden auttamana hyvin ennen syttymisen alkua ja syttyessään nostaa sylinteripaineen korkeaksi ja nopeammin, kuin myöhäisemmällä ruiskutuksen aloitusajankohdalla. Uludoganin tuloksista selviää, että pienemmillä pyörimisnopeuksilla suurempi osa kaasumassasta on paikallisesti yli 2600 K lämpötilassa verrattuna korkeaan pyörimisnopeuteen. Tekstin mukaan pyörimisnopeuden kasvattaminen laskee NO_x-päästöjä, madaltaa paikallisesti korkeita lämpötiloja, pienentää keskimääräistä lämpötilaa, mutta kuitenkin nostaa pakolämpötilaa. Alaluvussa 2.3 esitellyt typen oksidien muodostumista kuvaavat Zeldovichin reaktiot vaativat korkean lämpötilan, joten Uludoganin teksti tukee käyttämämme työkoneen NO_x-päästöjen syntymistä. Mitatun koneen ruiskutuksenakko saattaa olla pienillä pyörimisnopeuksilla aikainen, jolloin tulokset näyttävät kovia NO_x-pitoisuuksia. [26]

Joidenkin mittausten ja simulointien mukaan ilmiö saattaa olla normaali. Koosupin tutkimuksessa [16, s. 84] mitattiin Scanian moottoria ja sen mukaan korkeat NO_x-pitoisuudet syntyvät pienillä kierroksilla. Myös sveitsiläis-italialaisen tutkimuksen [20, s. 3153] tekemä simulointi tukee pienien kierrosten korkeita NO_x-pitoisuuksia. Toteamiselle tarvitaan kuitenkin lisää näyttöä. Typen oksidien syntymismekanismi antavat lukijalle helposti kuvan, jossa typen oksidien syntyminen painottuisi korkeille kierroksille.

6.3 Mittauslaitteiston soveltuvuus käytönaikaisten päästöjen mittaamiseen

Mittaustekninen tarkastelu

Mittausyksiköiden näytteenottotaajuus on 5 Hz, mutta työkoneiden dieselmootto-reita käytetään noin 15 - 50 Hz taajuuksilla. Nyquistin näytteenottoteoreeman mukaan PEMS:in näytteenottotaajuudella ei voi muodostaa alkuperäistä päästösignaalia [14, s. 3-5]. Mittalaitella ei pysty tarkastelemaan pienen aikavälin sisällä tapahtuvia muutoksia. Järjestelmä soveltuu keskiarvoisten pitoisuuksien mittaamiseen. Jälkikäsitelyjärjestelmä muokkaa tulokset 1 Hz muotoon. Yhden sekunnin aikana moottorissa ehtii tapahtua paljon, joten yksityiskohtaisessa analyysissä mittauksen hitaus kannattaa huomioida.

Mittalaitteilta tulevat signaalit ovat hieman eri vaiheessa ja ne korjataan jälkikäsitelyohjelmassa samaksi. Ohjelmiston puoliautomaattinen korjausominaisuus ei toimi täydellisesti ja siinä saattaa tapahtua muutaman sekunnin virhe. Korjaustoiminto vaatii toisinaan käyttäjän näkemystä oikean kohdan havaitsemiseksi. Tässäkin työssä ongelmaa saattoi esiintyä, mutta se on vaikeaa havaita. Pitkässä mittauksessa muutamana sekunnin heitolla ei ole suurta merkitystä, mutta asia on hyvä tiedostaa.

Pienhiukkasmassa jaetaan pitoisuudeksi nokianturin pitoisuutta seuraten. Laskennassa on kaksi vaihtoehtoa, joista yksinkertaisempi muodostaa PM-pitoisuuden nokipitoisuuden ja kertoimen perusteella, kun taas monimutkaisempi vaihtoehto muodostaa PM-pitoisuuden kertoimen ja HC-pitoisuuden mukaan. Signaalihäiriöt tai signaalin katkeilu FID:ssä voi pahimmillaan vääristää PM-pitoisuuksia. Pienhiukkas-suodattimen punnitseminen on erittäin tarkkaa työtä. Tarkan PM-massan saamiseksi käyttäjän täytyy tehdä toimenpiteitä pitääkseen suodatin puhtaana saasteista. Suodattimien punnitseminen tarvitsee tarkoitukseen suunnitellut tilat, erityisen tarkat laitteet ja ammattitaitoisen mittausteknikon.

Mittausjärjestelmän mukana tuleva lämpötila- ja kosteusmittauksen anturi on hidas. Mittaukset suoritettiin talvikelissä, ja PEMS kalibroitiin ennen testejä lämpimässä hallissa. Anturi saavutti ulkoilman lämpötilan vasta mittauksen loppupuolella, joka tarkoittaa sitä, että ilmastokorjatut NO_x-pitoisuudet ovat hieman pielessä. Kesämittauksissa ongelma ei ole yhtä suuri.

Ympäristö ja sää

Pohjoiset olosuhteet aiheuttavat mittaukselle rajoituksia. Ohjekirjassa suositeltu alin mittauslämpötila on GAS PEMS:lle -10 °C ja PM PEMS:lle 5 °C. Liekki-ionisaattoridetektorin antoi häiriöitä jo -7 °C lämpötilassa, joten talvella mittaami-

nen on haastavaa. Laitteiden sisällä on lämpötilaeroja, joten sisään kertyy kosteutta ja se poistetaan letkua pitkin ympäristöön. Huonossa tapauksessa poistoletku voi jäätyä umpeen ja kosteus jää laitteen sisälle.

Laite on arvokas ja sen huoltaminen on kallista. Järjestelmillä on IP 24 suojaus, joten vesisateessa mittaaminen ilman suojausta altistaa laitteiston rikkoontumiselle. Mittausteknisesti testit kannattaa tehdä mahdollisimman samankaltaisissa olosuhteissa, joten sateinen sää ja alle 5 °C lämpötila ei ole suositeltavaa.

Fyysinen koko

Järjestelmän nimestä PEMS annetaan ymmärtää, että se olisi kannettava. Datalehdistä kerätty yhteismassa järjestelmälle oheislaitteineen on 253 kg, joten kiinnitysrautoineen massa nousee noin 320 kilogrammaan. Työkoneen 5400 kg:n massa kasvaa noin 6 %. Pieneen 1200 kg:n henkilöautoon sovitettuna, jos se on edes mahdollista, 253 kg:n järjestelmä lisää ajoneuvon massaa 21 %. Henkilöautossa moottori kuormittuu voimakkaammin ja keskimääräisen vääntömomentin alue vääntökäyrästä siirtyy lähemmäksi maksimikuormitusta, joka ainakin tässä työssä muutti päästökertoimen lopullisia arvoja. Suuren massan lisäksi haasteita aiheuttaa tilavuus. Pienten ajoneuvojen tavaratilat ovat rajallisia ja järjestelmän niihin mahduttaminen on haastavaa.

6.4 Järjestelmän potentiaali

Mikäli järjestelmällä haluaa mitata tyyppihyväksynnän ulkopuolisia tutkimuskäyttöön sopivia mittauksia, on käyttäjän tiedettävä järjestelmän rajat ja ominaisuudet. Työsyklin suunnittelutaito määrittää mittauksen edustavuuden. Yksi oivallinen tutkimuskohde voisi olla ajoneuvon tai koneen hybridisointi, jossa moottorin pyörimisnopeus on hitaasti vaihtuva ja osittain vakio.

Tulevat käytönaikaisten pakokaasupäästöjen mittaukset saattavat lisätä järjestelmien lukumäärää ja tuoda ostohintaa alemmaksi. Tällä hetkellä järjestelmät ovat kalliin urheiluauton hintaisia. Käytönaikaiset mittaukset voivat tuoda päättäjien ajatusmaailmaa lähemmäksi vuosikatsastuksen yhteydessä tehtävää päästömittausta, joka laajentuisi esimerkiksi typen oksideihin ja pienhiukkaspäästöihin.

Tämän tutkimuksen perusteella mittausjärjestelmästä voi olla apua moottorin päästöjen kannalta huonojen tilojen välttämiseen. Mittauksissa käytetty kone aiheutti pienellä pyörimisnopeudella korkeita NO_x-pitoisuuksia. Ajovoimansiirron tai työhydrauliikan optimoinnilla voi olla mahdollista välttää esimerkiksi pientä pyörimisnopeutta ja korkeaa kuormitusta. Oikeaoppisella ja onnistuneella optimoinnilla

polttoaineenkulutusta voi olla mahdollista pienentää pakokaasupäästöjen siitä kärsimättä.

Tämä järjestelmä osoitti, että työkone ei toimi lähellä hyvän hyötysuhteen aluetta, joka sijaitsee korkealla kuormituksella lähellä vääntömomentin huippua. Koneen ajovoimansiirron ja moottorin moottorinohjausyksikön toiminnan optimointi voi laskea polttoainekulutusta. Pakokaasupäästöjen mittauksen lisäksi järjestelmällä voi varauksin tutkia koneen yleistä käytöstä, mikäli järjestelmään liitetään esimerkiksi hyvin anturoitu hydraulikka.

7. YHTEENVETO

Tämä työ on yksi ensimmäisistä Tampereen teknillisen yliopiston AUT-laboratorion päästömittauksiin liittyvistä tutkimuksista. Työ avaa tutkimuskysymyksiä ”Vaikuttaako kuljettajan ajotyyli työkoneen pakokaasupäästöjen syntymiseen?”, ”Kuinka järjestelmä käyttöön otetaan?” ja ”Kuinka järjestelmä soveltuu päästömittaukseen?”. Työ on pohjustus tulevalle tutkimukselle.

Työssä lähdettiin liikkeelle esittelemällä työkoneiden päästöjä rajoittavaa lainsäädäntöä, kertomalla moottorin sisällä tapahtuvasta paloprosessista ja avaamalla eri tyyppisten pakokaasukomponenttien syntymistä. Pakokaasupäästöjä rajoittava lainsäädäntö on kehittynyt viime vuosikymmeninä ja tulee kehittymään myös jatkossa. Päästöstandardien kehittyminen ja tulevaisuudessa alkava työkoneiden käytönaikeiden pakokaasupäästöjen testaus olivat merkittäviä tekijöitä tämän tutkimuksen aloittamiselle.

Seuraavaksi esitettiin mittauksissa käytettävä päästömittausjärjestelmä ja siihen liittyvät oheislaitteet. Järjestelmässä on useita analysointilaitteita ja järjestelmää tukevia lisälaitteita, jotka tarvitsivat erityistä huomiota. Mittausta edeltäviin toimenpiteisiin kuului muun muassa signaalien ja parametrien opiskelu ja niiden ymmärtäminen.

Mittausjärjestelyissä esiteltiin mitattava kone, mittausta edeltävät valmistelut, valitut testisyklit ja kuljettajan merkitys. Luvussa avattiin myös datankeräysjärjestelmää, jossa kootaan kaikkien laitteiden signaalit yhteen tietokoneeseen. Mittausssyklin määrittäminen vaikuttaa datan vertailukelpoisuuteen ja sillä voidaan pakottaa kone toimimaan tietyllä tehoalueella. Ajosyklit kuvasivat työkoneen tehtäviä hyvin ja 25 - 30 minuutin mittausjaksosta sai tarpeellisen määrän dataa. Työssä käytettiin kahta kuljettajaa. Kuljettajille ohjeistetut ajotyylit ymmärrettiin hyvin ja he tuottivat vertailukelpoista dataa. Työkokemuksen aiheuttama työn tuottavuuden kasvu oli ajateltua korkeampi ja siten vaikutti mittausaikaan lyhentävästi.

Koneelle tehty staattisen kuormituksen kartoitus auttoi ymmärtämään pakokaasupitoisuuksien muodostumista. Pääasiallisten ajosykliden pitoisuudet ovat osittain

rinnastettavissa staattisen kuormituksen mittaukseen, ainakin typen oksidien kohdalla. Staattisen kuormituksen kartoitus tarvitsee sekä lisää tutkimusta että korkeamman resoluution. Käytetyssä moottorissa oli staattisten kartoituksen mukaan NO_x- ja PM-päästöjen kannalta epäedullisia kohtia, joita voi olla mahdollista välttää optimoimalla koneen ohjausjärjestelmää.

Pakokaasupäästöjen määrä vaihteli ajotytylien välillä ja myös testien välillä. Lyhyessä kuormaussyklissä pakokaasupäästöt olivat hieman pitkää ajosykliä suuremmat. Suurimmillaan ajotytylien välisissä päästökertoimissa on testin sisällä 43 % ero. Lyhyt kuormaussykli suosi aggressiivista ajotytyliä, eikä rauhallinen ajotytyli tuottanut missään kaasukomponentissa matalampia päästökertoimia. Syklin NO_x-päästöissä oli noin kolmanneksen ero ja PM-päästöissä ero oli olematon. Pitkässä ajosyklissä NO_x-päästöjen ero kaventui, mutta pienhiukkaspäästöihin tuli yli kolmanneksen ero rauhallisen ajotytylin eduksi. Pitkässä ajosyklissä ei ole selvää voittajaa. Tulosten yksityiskohtainen, lyhyen aikaikkunan sisällä tapahtuva tulkinta on haastavaa, sillä järjestelmä keskiarvoistaa signaaleita ja se on suunniteltu pitkään mittaukseen.

Mittausjärjestelmä sopii pakokaasupäästöjen mittaamiseen tietyin varauksin. Järjestelmä ei sovellu lyhyiden transienttien mittaamiseen sen matalan näytteenotto-
taajuuden vuoksi. Järjestelmää ei ole suunniteltu käytettäväksi talvella, eikä se sovellu sadekelin mittauksiin ilman asiallisia suojarusteita. Mittausjärjestelmä avaa mahdollisuuksia jopa polttoaineen kulutuksen ja pakokaasupäästöjen yhtäaikaiseen optimoimiseen. Järjestelmä tarjoaa kattavan määrän signaaleita ja älykkäällä data-analytiikalla voi olla mahdollista toteuttaa uusia sovelluksia puhtaamman ilmaston tavoittelemiseksi.

LÄHTEET

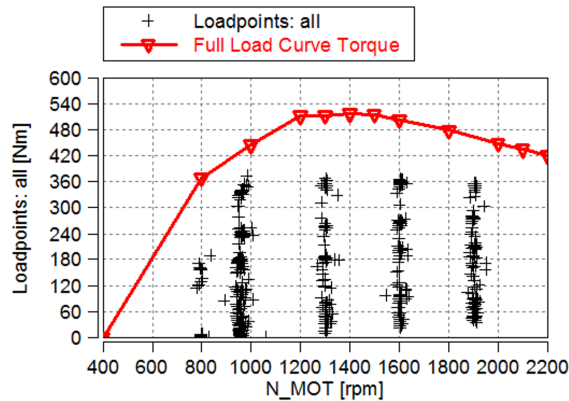
- [1] *AVL KMA MOBILE - Product Guide AT2262E*, AVL List GmbH, 2011.
- [2] *AVL GAS PEMS - Product Guide AT4291E*, AVL List GmbH, 2012.
- [3] *AVL PM-PEMS - Product Guide AT5791E*, AVL List GmbH, 2014.
- [4] DieselNet, “Emission standards,” Saatavissa: <https://www.dieseln.net/standards/#int>, 2016, viitattu 14.12.2016.
- [5] DieselNet, “Measurement of emissions,” Saatavissa: <https://www.dieseln.net.com/tech/measure.php>, 2017, viitattu 2.2.2017.
- [6] T. Durbin, K. Johnson, and H. Jung, “Study of in-use emissions from diesel off-road equipment,” College of Engineering-Center for Environmental Research and Technology University of California, Riverside, CA, USA, Tech. Rep., 2013.
- [7] *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*, Earth System Research Laboratory, 2016, saatavissa: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>, viitattu 27.10.2016.
- [8] *Global Greenhouse Gas Emissions Data*, EPA, 2017, saatavissa: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>, viitattu 7.2.2017.
- [9] *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 97/68/EY*, Euroopan komissio, 1997, saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1997/68/oj>, viitattu 14.12.2016.
- [10] *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2016/1628*, Euroopan komissio, 2016, saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj>, viitattu 22.9.2016.
- [11] R. Filla, “Quantifying operability of working machines,” Division of Fluid And Mechatronic Systems, Department of Management and Engineering, Linköping University, Sweden, Tech. Rep., 2011.
- [12] P. Flynn, R. Durrett, G. Hunter, A. zur Loye, and O. Akinyemi, “Diesel combustion: An integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics, and empirical validation,” in *1999 Society of Automotive Engineers International Congress and Exposition*, Feb. 1999.
- [13] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Singapore, 1988, 930 p.

- [14] H. Huttunen, *Signaalinkasittelyn perusteet*. Tampereen teknillinen yliopisto, Signaalinkasittelyn laitos, 2014.
- [15] M. Imperato, “Studies on the reduction of nitrogen oxides emission in a large-bore diesel engine,” PhD dissertation, Aalto University, 2016.
- [16] K. Koosup, “Modeling and simulation of transient performance and emission of diesel engine,” Master’s thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [17] L. Kramer, Z. Bozoki, and R. Niessner, “Characterisation of a mobile photoacoustic sensor for atmospheric black carbon monitoring,” *Analytical Sciences*, vol. 17, pp. 563–566, Apr. 2000.
- [18] G. P. Merker, C. Schwarz, and R. Teichmann, *Combustion Engines Development - Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation*. Vieweg and Teubner, Wiesbaden, Germany, 2009, 642 p.
- [19] K. Mollenhauer and H. Tschöcke, *Handbook of Diesel Engines*. Springer, Berlin, Germany, 2010, 636 p.
- [20] T. Nuesch, A. Cerofolini, G. Mancini, N. Cavina, C. Onder, and L. Guzzella, “Equivalent consumption minimization strategy for the control of real driving nox emissions of a diesel hybrid electric vehicle,” *Energies*, vol. 7, pp. 3148–3178, May 2014.
- [21] W. H. Organization, *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*. WHO Regional Office for Europe, 2003, 94 p.
- [22] F. Posada, S. Chambliss, and K. Blumberg, “Costs of emission reduction technologies for heavy-duty diesel vehicles,” *The International Council on Clean Transportation*, Feb. 2016.
- [23] A. Roberts, R. Brooks, and P. Shipway, “Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions,” *Energy Conversion and Management*, vol. 82, pp. 327–350, Jun. 2014.
- [24] R. Stone, *Introduction to Internal Combustion Engines*, 3rd ed. Palgrave, Houndmills, Basingstoke, Hampshire RG21 6XS and London, UK, 1999, 635 p.
- [25] *M12 machine*, Tampereen teknillinen yliopisto - Automaatio ja hydraulikka, 2015.

- [26] A. Uludogan, D. Foster, and R. Reitz, “Modelling the effect of engine speed on the combustion process and emissions in a di diesel engine,” in *1996 Society of Automotive Engineers Inc.*, 1996.
- [27] H. Wihersaari, “Application of Portable Emission Measurement System to Non-road Mobile Machinery,” Master’s thesis, Tampere University of Technology, 2015.
- [28] K. Willner and G. Taylor, “Swedish in-service testing program on emissions from passenger cars and light-duty trucks - report for the swedish transport agency,” AVL, Tech. Rep., 2011.
- [29] *Electric power consumption (kWh per capita)*, The World Bank, 2016, saatavissa: <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?end=2013&start=1971&view=chart>, viitattu 13.12.2016.
- [30] *Fossil fuel energy consumption (% of total)*, The World Bank, 2017, saatavissa: <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS?end=2013&start=1971&view=chart>, viitattu 6.2.2017.

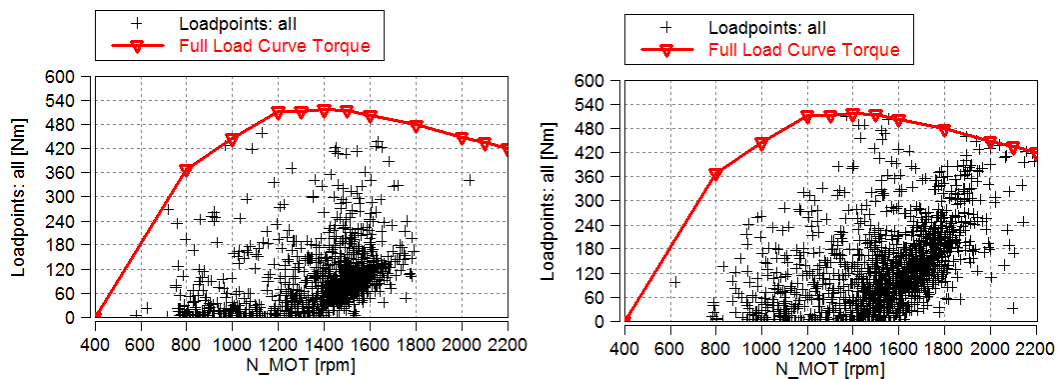
LIITE A

Kuvassa A.1 on moottorin vääntökäyrästä ja staattisessa kuormituspisteessä mitatut kuormituspisteet. Kuvassa on selvästi nähtävissä pyörimisnopeudet 950, 1300, 1600 ja 1900 rpm. Painetasolla 50 bar moottorin kuormitus liikkuu noin 60 Nm tuntumassa, kun taas painetasolla 250 bar kuormitus on noin 360 Nm.



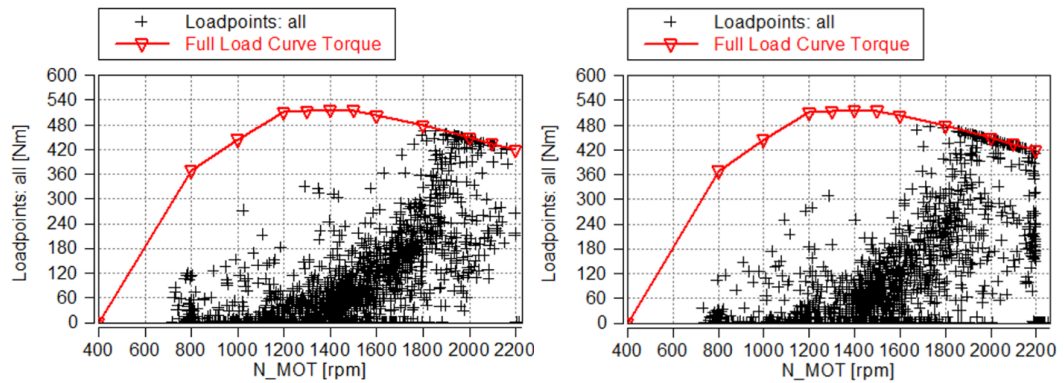
Kuva A.1. Moottorin kuormituspisteet staattisessa mittauksessa.

Kuvassa A.2 näkyy lyhyen kuormaussyklin aikana muodostuneet kuormituspisteet. Rauhallisen ajotyylin kuormituspisteet ovat aggressiivista ajotyyliä huomattavasti kapeammalla alueella. Typen oksidien kohdalla rauhallinen ajotyyli pysyy päästökomponentin muodostumiselle huonolla alueella kauemmin.



Kuva A.2. Moottorin kuormituspisteet lyhyessä kuormaussyklissä. Vasemmalla rauhallinen ajotyyli ja oikealla aggressiivinen ajotyyli.

Kuvassa A.3 on pitkän ajosyklin kuormituspisteet. Aggressiivisen ajotyylin kuormituspisteet ulottuvat enemmän oikealle ja ylös, joka tarkoittaa sitä, että aggressiivinen kuljettaja liikkuu useammin huipputehon alueella.



Kuva A.3. Moottorin kuormituspisteet pitkässä ajosyklissä. Vasemmalla rauhallinen ajotyylä ja oikealla aggressiivinen ajotyylä.

LIITE B

Kuvassa B.1 on esitetty kaasumaisten pakokaasupäästöjen mittalaitteen teknisiä tietoja. Kuvassa on esitetty käytettävä mitta-alue, tarkkuus ja signaalin lineaarisuus. Kuvassa B.2 on esitetty noen mittalaitteen ja pienihiukkasmassan mittalaitteen teknisiä tietoja. Kuvat on leikattu valmistajan ohjekirjasta.

	Range	Display Resolution	Accuracy	Linearity
CO	Linearized range: 0 ... 49 999 ppm Display range: 0 ... 15 vol%	1 ppm	0 ... 1499 ppm: ±30 ppm abs. 1500 ppm ... 49999 ppm: ±2% rel.	Slope: $0.99 \leq \text{Slope} \leq 1.01$ Intercept = 0.5% SEE: ≤ 1% of range and $R^2: \geq 0.999$
CO₂	0 ... 20 vol%	0.01 vol%	0 ... 9.99 vol%: ±0.1 vol% abs. 10 ... 20 vol%: ±2% rel.	Slope: $0.99 \leq \text{Slope} \leq 1.01$ Intercept = 0.5% SEE: ≤ 1% of range and $R^2: \geq 0.999$
NO	0 ... 5 000 ppm	0.1 ppm	0 ... 5000 ppm: ±0.2% FS or ±2% rel.	Slope: $0.99 \leq \text{Slope} \leq 1.01$ Intercept = 0.5% SEE: ≤ 1% of range and $R^2: \geq 0.999$
NO₂	0 ... 2 500 ppm	0.1 ppm	0 ... 2500 ppm: ±0.2% FS or ±2% rel.	Slope: $0.99 \leq \text{Slope} \leq 1.01$ Intercept = 0.5% SEE: ≤ 1% of range and $R^2: \geq 0.999$
THC	0 ... 30 000 ppm	0.1 ppmC1	0 ... 249 ppmC1: ±5 ppmC1 250 ... 30000 ppmC1: ±2% rel.	Slope: $0.99 \leq \text{Slope} \leq 1.01$ Intercept = 0.5% SEE: ≤ 1% of range and $R^2: \geq 0.999$
O₂	0 ... 25%	0.1 vol%	±1 vol% of full scale at constant temperature and pressure	—
fully warmed up, at 24 V, laboratory conditions and with dry calibration gases				

Kuva B.1. GAS PEMS:in ohjekirjasta leikattuja teknisiä tietoja [2].

9.1 Sensor Unit

Measured quantity

Soot concentration ("elementary carbon") $< 50 \text{ mg/m}^3$

Display resolution (digital)

0.001 mg/m^3

Data rate

Digital: max. 5 Hz for measurement values, max. 1 Hz for service values

Analog: 100 Hz

Noise

$\leq 0.01 \text{ mg/m}^3$

(defined as 3 times the standard deviation of the measurement variation of the zero signal [clean, filtered air] with 1 s data smoothing)

Drift

$\leq 0.01 \text{ mg/m}^3$ per hour

(defined as change of the average of the zero signal [clean, filtered air] over one hour)

Detection Limit

$< 0.005 \text{ mg/m}^3$ sensor signal (defined as a 30 second averaged value indicating within 95 % probability of a non-zero soot concentration in the sensor volume)

9.2 Gravimetric Filter Module (GFM)

Measured quantity

Dilution ratio DR 2 to 50 for constant DR control

Dilution ratio DR 2 to 100 for variable DR control

Diluted exhaust flow through the filter

Accuracy DR

according to the requirements of ISO 16183

DR transfer time

according to the requirements of ISO 16183

Kuva B.2. PM PEMS:in ohjekirjasta leikattuja teknisiä tietoja [3].

LIITE C

Tässä liitteessä on esitetty lyhyen kuormaussyklin ja pitkän ajosyklin aikana muodostuneet kokonaispäästöt. Tulokset on esitetty grammoina. Päästökerroin g/kWh muodostetaan jakamalla päästökomponentin massa syklin aikana tehdyllä työllä. Lyhyen kuormaussyklin tiedot on esitetty kuvassa C.1 ja pitkän ajosyklin tiedot kuvassa C.2.

tot THC DC	2.73804	g	tot THC DC	3.27470	g
tot NMHC DC	2.68328	g	tot NMHC DC	3.20920	g
tot CH4 DC	0.06748	g	tot CH4 DC	0.08071	g
tot CO DC	20.28310	g	tot CO DC	35.02509	g
tot CO2 DC	5034.91209	g	tot CO2 DC	7534.95756	g
tot NO DC	25.29348	g	tot NO DC	32.03089	g
tot NO2 DC	3.89847	g	tot NO2 DC	4.01942	g
tot NOx DC	29.19196	g	tot NOx DC	36.05031	g
tot Soot	2.37816	g	tot Soot	4.00495	g
tot Soot meas	2.37816	g	tot Soot meas	4.00495	g
tot PM	2.57633	g	tot PM	4.54956	g
tot PN	n/a	#	tot PN	n/a	#

Kuva C.1. Lyhyen kuormaussyklin aikana vapautuneet päästöt grammoina. Vasemmalla rauhallinen ajotyylä ja oikealla aggressiivinen ajotyylä. Rauhallisessa ajotyylissä kuormattiin arviolta 85 % aggressiivisen ajotyylin kuormaamasta so-rasta. Ei vertailukelpoisia keskenään.

tot THC DC	3.40296	g	tot THC	3.20410	g
tot NMHC DC	3.33490	g	tot NMHC	3.14002	g
tot CH4 DC	0.08387	g	tot CH4	0.07897	g
tot CO DC	19.57917	g	tot CO	29.38302	g
tot CO2 DC	7703.91835	g	tot CO2	8424.81890	g
tot NO DC	35.77174	g	tot NO	36.10293	g
tot NO2 DC	4.83948	g	tot NO2	3.84854	g
tot NOx DC	40.61122	g	tot NOx	39.95147	g
tot Soot	2.38156	g	tot Soot	3.33601	g
tot Soot meas	2.38156	g	tot Soot meas	3.33601	g
tot PM	2.51821	g	tot PM	3.65707	g
tot PN	n/a	#	tot PN	n/a	#

Kuva C.2. Pitkän ajosyklin aikana vapautuneet päästöt grammoina. Vasemmalla rauhallinen ajotyylä ja oikealla aggressiivinen ajotyylä.