

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Energia- ja polttomoottoritekniikka

2017

Arto Mäkelä

AGCO POWER 44AWF -MOOTTORIN DPF- JA SCR- JÄRJESTELMIEN OPTIMOINTI

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka | Energia- ja polttomoottoritekniikka

11/2017 | 32

Ohjaaja Lauren Mika

Arto Mäkelä

AGCO POWER 44AWF-MOOTTORIN DPF- JA SCR-JÄRJESTELMIEN OPTIMOINTI

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli optimoida dieselmoottorin päästöjen jälkikäsittelyjärjestelmä uudet päästönormit täyttäväksi. Opinnäytetyössä tutkittiin AGCO Power Oy:n 44AWF -työkonedieselmoottoria, joka pyrittiin saamaan Stage 5 -päästöluokituksen täyttäväksi. Työn teki ajankohtaiseksi kiristyvät päästöluokitukset, jotka edellyttävät uusien tekniikoiden käyttöönottoa myös työkonevalmistajilta.

Tutkimus aloitettiin suorittamalla palamiskalibrointi moottorille, jonka jälkeen selvitettiin hapetuskatalyytin tuottaman typpidioksidin määrä. Seuraavaksi tarkasteltiin riittäkö alhaisemmalla katalyyttimäärällä varustettu hapetuskatalyytti mahdollistamaan hiukkassuodattimen passiivisen regeneroitumisen. Tämän jälkeen haettiin urearuiskutuksen optimaalisin taso valitulla hapetuskatalyytillä.

Tutkimus toteutettiin Turun ammattikorkeakoulun moottoritutkimuslaboratoriossa kesän 2017 aikana. Se tehtiin yhteistyössä AGCO Power Oy:n kanssa, ja tutkimuksessa käytettiin heidän toimittamaansa moottoria.

ASIASANAT:

Dieselmoottori, Katalyytti, Stage 5, Jälkikäsittely.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering | Energy and Internal Combustion Engine Technology

11/2017 | 32

Instructor Lauren Mika

Arto Mäkelä

OPTIMIZING DPF AND SCR SYSTEMS IN THE AGCO POWER 44AWF DIESEL ENGINE

The target of this thesis was to optimize after treatment system of a diesel engine to meet the new emission standards. The aim was to transform AGCO Power Ltd 44AWF -diesel engine to pass the emission standard of Stage 5. The work was done because of the tightening exhaust standards, which require the introduction of new technologies also from the manufacturers.

The study was started by performing a combustion calibration on the engine, after which the amount of nitrogen dioxide produced by the oxidation catalyst was studied. It was contemplated whether an oxidation catalyst provided with a lower catalyst amount would be sufficient to permit passive regeneration of the particulate filter. Subsequently, the optimum level of urea spraying was sought with the selected oxidation catalyst.

An experimental study was executed at the engine laboratory of Turku University of Applied Sciences during summer 2017. The study was carried out in cooperation with AGCO Power Ltd which provided motors used in the study.

KEYWORDS:

Diesel engine, Catalytic, Stage 5, After treatment.

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	8
2 DIESELMOTTOORIN PAKOKAASUN JÄLKIKÄSITTELYJÄRJESTELMÄ	9
3 UUDET PÄÄSTÖVAATIMUKSET	14
4 ERI VALMISTAJIEN TULEVAISUUDEN RATKAISUT	17
5 KOEJÄRJESTELYT	20
6 PALAMISKALIBROINTI	24
7 TYPPIDIOKSIDIN TUOTTO HAPETUSKATALYTTISSÄ	25
8 PASSIIVINEN REGENEROINTI	26
9 TYPPIDIOKSIDIN TUOTTO VAHVEMMALLA HAPETUSKATALYTTILLÄ	27
10 UREARUISKUTUKSEN OPTIMOINTI	28
11 YHTEENVETO	29
LÄHTEET	31

KUVAT

Kuva 1. Tutkittavan moottorin jälkikäsitteilyjärjestelmä (EEM 4 2017).	9
Kuva 2. DOC-suodattimen toiminta (DieselNet 2016b).	9
Kuva 3. DPF-suodatin (Sydney diesel center 2015a).	10
Kuva 4. SCR-suodatin (DieselNet 2016c).	11
Kuva 5. Stage 4 -päästöluokitus (Dieselnet 2016c).	14
Kuva 6. Päästöluokitusten tila maailmassa vuonna 2020 (Hatz Diesel 2017).	14
Kuva 7. Stage 5 -päästöluokitus. (Dieselnet 2016c).	15
Kuva 8. Tier 4 -päästöluokitus (DieselNet 2016d).	15
Kuva 9. SCRF (Larsson 2014).	17
Kuva 10. EcoFit Single Module (Cummins 2015).	17
Kuva 11. Stage 5 -system layout example (Proventia 2017a).	18
Kuva 12. TTCD 6.1 Diesel moottori (Diesel progress international 2017a).	19
Kuva 13. Tutkimusmoottori 44AWF ja sen pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmä.	20

KUVIOT

Kuvio 1. Passiivisen regeneroinnin testisykli.	23
Kuvio 2. Alennetun tehon transienttisykli.	23

TAULUKOT

Taulukko 1. Tutkimusmoottori.	20
Taulukko 2. Pyörrevirtadynamometri.	21
Taulukko 3. Pakokaasupäästöjen mittalaitteet.	22

KÄYTETYT LYHENTEET

ADBLUE	Urea-vesiliuos
ASC	Ammoniakkikatalyytti (Ammonia Slip Catalyst)
CO	Hiilimonoksidi (Carbon Monoxide)
CO ₂	Hiilidioksidi (Carbon Dioxide)
CSF	Hiukkassuodatin (Catalysed Soot Filter)
DOC	Hapetuskatalyytti (Diesel Oxidation Catalyst)
DPF	Hiukkassuodatin (Diesel Particulate Filter)
ECU	Moottorin ohjausyksikkö (Engine Control Unit)
EEM	Elektroninen moottorinohjausjärjestelmä (Electronic Engine Management)
EGR	Pakokaasun takaisinkierräys (Exhaust Gas Recirculation)
FSN	Savutuksen mittayksikkö (Filter Smoke Number)
HC	Hiilivedyt (Hydro Carbons)
MSS	Hiukkastunnistin (Micro soot sensor)
NO	Typpimonoksidi eli typpioksidi (Nitrogen Oxide)
NO ₂	Typpidioksidi (Nitrogen Dioxide)
NO _x	Typpioksidit (Oxides of Nitrogen)
NRE	Muuhun kuin tieliikenne käyttöön suunniteltu moottori. (Non-road engines)
NRTC	Dynaaminen päästöajo (Non-Road Transient Cycle)

O ₂	Happi (Oxygen)
PM	Hiukkasmassa (Particulate Matter)
PN	Hiukkasmäärä (Particle number)
ppm	Miljoonasosa (Parts per Million)
PXI	PC-pohjainen alusta testaukseen, mittauksiin ja ohjaukseen
Rpm	Pyörintänopeus [1/min] (Revolution Per Minute)
SCR	Pakokaasujen puhdistaminen pelkistyslisäaineella (Selective Catalyst Reduction)
SFC	Polttoaineen ominaiskulutus (Specific Fuel Consumption)

1 JOHDANTO

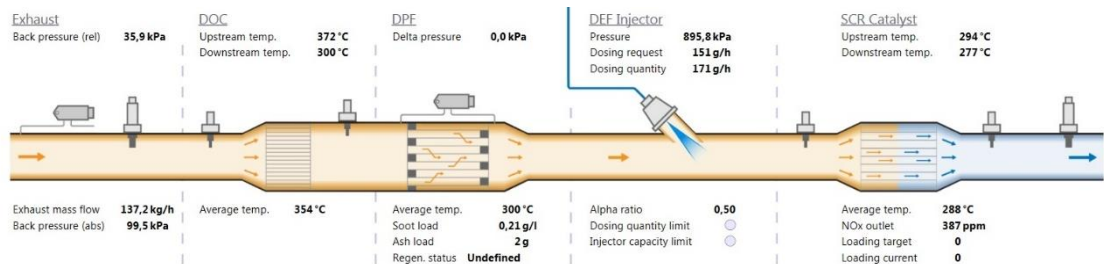
Tiukkenevat päästörajoitukset asettavat uusia haasteita moottorinvalmistajille. Käyttäjät haluavat moottoreilta entistä parempaa suorituskykyä ja alhaisempaa polttoaineen kulutusta. Päästörajoitukset asettavat valmistajat tilanteeseen, jossa moottorin suorituskykyä täytyy kehittää samalla, kun pakokaasupäästöjen tulee pienentyä. Tämän vuoksi pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmiä kehitetään jatkuvasti eteenpäin.

Päästörajoitukset ovat olleet moottoritekniikan kehityksen ajureina jo pidemmän aikaa. Vuonna 2019-2020 tulevat voimaan uudet Stage 5 -päästörajoitukset non-road-moottoreille, jotka rajoittavat sekä hiukkaspäästöjen massapohjaista lukumäärää (PM) että hiukkasten lukumäärää (PN). Uudella PN-rajalla halutaan vähentää pienien nanopartikkelien määrää, koska erityisesti niiden uskotaan vaikuttavan haitallisesti ihmisten terveyteen. Hiukkassuodatin (DPF/CSF) on tehokas keino vähentää hiukkaspäästöjä, mutta hiukkasten kerääntymisen takia se pitää myös regeneroida eli puhdistaa säännöllisin väliajoin.

Tämä tutkimus tehtiin Turun ammattikorkeakoulussa, yhteistyössä AGCO Power Oy:n kanssa. Sen tavoitteena oli saada 44AWF-työkonedieselmoottori Stage 5 -päästönormit täyttäväksi optimoimalla hiukkassuodattimen ja SCR-järjestelmän toimintaa. Tutkimuksessa tarkasteltiin DOC-katalyytin pinnoitteen vaikutusta CSF-hiukkassuodattimen regeneroitumiseen. Myös SCR-järjestelmän urearuis-kutusmäärää optimoitiin.

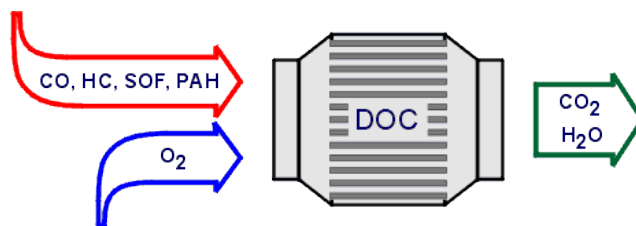
2 DIESELMOTTOORIN PAKOKAASUN JÄLKIKÄSITTELYJÄRJESTELMÄ

Dieselmototorin jälkikäsitteilyjärjestelmä koostuu useimmiten DOC + DPF(CSF) + SCR -yhdistelmästä (kuva 1). Tällä kokoonpanolla on mahdollista saavuttaa vuonna 2019-2020 tiukkenevat päästötavoitteet. (DieselNet 2016a.)



Kuva 1. Tutkittavan moottorin jälkikäsitteilyjärjestelmä (EEM 4 2017).

Diesel Oxidation Catalyst eli DOC vähentää epätäydellisestä palamisesta ja palamattomasta polttoaineesta syntyviä hiilimonoksidin (CO) ja hiilivetyjen (HC) osuutta hapettamalla ne hiilidioksidiksi ja vesihöyryksi (kuva 2). Lisäksi hiukkaskoko pienenee, kun nokihiukkasen pintaan kondensoitunut helposti palava hiilivety hapettuu. (Autoteknillinen taskukirja 2003; Reşitoğlu 2015.)



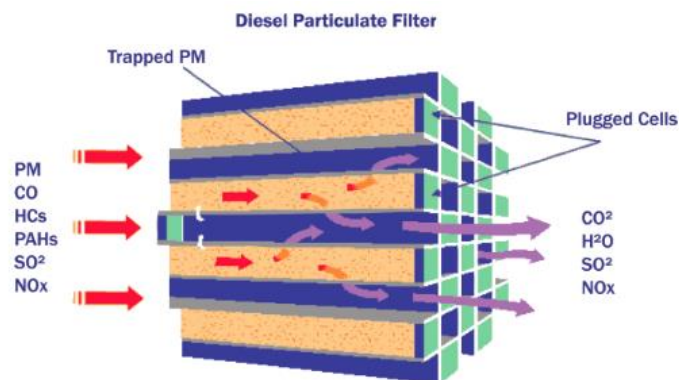
Kuva 2. DOC-suodattimen toiminta (DieselNet 2016b).

Hapettuminen tapahtuu tietystä rajalämpötilasta alkaen täydellisesti, yleisesti tämä rajalämpötila on 170–200 °C. Rajalämpötilaan vaikuttavat niin virtausnopeus, platinan määrä kuin pakokaasun koostumus. (Bosch 2010.)

Typsimonoksidin (NO) hapettuminen typpidioksidiksi (NO₂) on tärkeä reaktio nykyaikaisen dieselmototorin päästönhallinnan kannalta. Typpidioksidia voidaan käyttää tehokkaasti DPF:n regeneroinnissa, jossa se alentaa reaktiolämpötilaa

jopa 300 °C:seen asti. Tämän lisäksi siitä on hyötyä SCR-katalyytin toiminnassa. Hapettavaa DOC-katalyyttia käytetäänkin nykyään yhä useammin tuottamaan mahdollisimman paljon typpioksidia parantaakseen NO/NO₂-suhdelukua lähemmäs SCR-järjestelmälle optimaalisinta 1:1 suhdetta. (Dieselnet 2012; Nova 2006.)

DPF (Diesel Particulate Filter) on dieselhiukkassuodatin. Sen tarkoituksena on kerätä pakokaasusta partikkeleita eli nokea, joka sisältää moottoriöljyä sekä polttoainejäämiä, ja polttaa korkeassa lämpötilassa noen sisältämät saasteet tuhaksi (kuva 3). Nokipartikkeleilla on haitallisia vaikutuksia sekä ihmiseen että ympäristöön. Nokihiukkaset tulevat moottorista hapettavan katalysaattorin läpi ja tämän jälkeen menevät DPF-suodattimeen. Suodattimessa hiukkaset kerääntyvät sen seinämille. (Turbotec 2015; Reşitoğlu 2015; Sydney diesel center 2015b.)



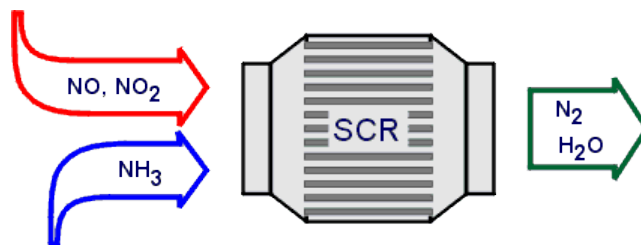
Kuva 3. DPF-suodatin (Sydney diesel center 2015a).

Hiukkassuodattimen yleisenä ongelmana on sen tukkeutuminen. Etenkin lyhyet ajomatkat ja talviolosuhteet saavat suodattimen tukkeutumaan. Suodattimen noen määrän kasvaessa myös moottorin pakokaasujen vastapaine kasvaa. Vastapaineen kasvun ja sitä kautta muuttuneen ilman ja polttoaineen suhteen (Lambda) vuoksi moottorin taloudellisuus ja suorituskyky heikkenevät sekä hiukkas-, hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöt kasvavat. (Kuusjärvi J. 2012; Hestec 2015.)

Kun hiukkasia on kerääntynyt tarpeeksi suodattimeen, ne poltetaan pois. Suodattimen puhdistamiseen käytön aikana on kaksi tapaa: aktiivinen ja passiivinen regenerointi. Aktiivisessa regeneroinnissa hiukkaset poistetaan erillisen energialähteen avulla. Passiivisessa regeneroinnissa hiukkastenpoistamiseen käytetään NO_2 -yhdistettä, joka laskee reaktiolämpötilaa $400\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$:sta aina $250\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$:seen asti ja on parempi hapetin noelle kuin happi itse. Passiivisessa regeneroinnissa ei tarvita erillisiä energialähteitänoen polttamiseen, vaan hapetuskatalysaattorin tarkoituksena on nostaa pakokaasun NO_2 -pitoisuutta ennen hiukkassuodatinta. Näin noki hapettuu jo normaalikäytössä saavutettavissa lämpötiloissa pois suodattimesta. (Betarice ym. 2012.)

Selektiivisen katalyyttisen pelkistämisen (SCR) tarkoitus on poistaa korkeassa palamislämpötilassa (yli $1600\text{ }^\circ\text{C}$) syntyneet typpioksidit pakokaasuista. Tekniikka on ollut käytössä voimalaitoksissa jo pitkään. (Mollenhauer & Tschöcke 2010; Reşitoğlu 2015.)

SCR-järjestelmällä hallitaan pakokaasupäästöjä AdBlue- eli urea- ja vesiliuosta käyttäen. Urean sisältämä ammoniakki (NH_3) reagoi pakokaasupäästöjen kanssa (kuva 4). Järjestelmä vaatii erillisen lisäainesäiliön, joka on valmistettu alumiinista tai muovista. Lisäaineen ruiskutusta ja annostelua ohjataan elektronisella ohjausjärjestelmällä. Ruiskutuksen jälkeen AdBlue ja pakokaasut kulkeutuvat SCR-katalysaattoriin, jossa ne reagoivat muodostaen typen oksidien (NO_x) päästöistä vettä (H_2O) ja typpikaasua (N_2) hävittäen typenoksideista jopa yli 90 %. (Yara 2016a; Fiebig 2014.)



Kuva 4. SCR-suodatin (DieselNet 2016c).

Ajoneuvon ollessa joutokäynnillä tai katalysaattorin lämpötilan ollessa matala (alle 200 °C) pelkistyslisäaineen annostelua ei yleensä tapahdu. Raja-arvot vaihtelevat riippuen käytettävästä katalyytistä. Platina katalyytillä 150 °C – 250 °C, Vanadia/titaani katalyytillä 250 °C – 450 °C ja zeoliitti katalyytillä 320 °C:sta aina rakenteelliseen kestävyYTEEN asti. Moottorin sammuttua järjestelmä tyhjentää putkiin jääneen ylimääräisen urean takaisin säiliöön. (Scania SCR 2010; Nova 2006.)

Ammoniakki molekyylien (NH₃) ihanteellista suhdetta NO_x-molekyyliin kutsutaan alfa-suhteeksi (alpha ratio) 1. Alhaisissa lämpötiloissa, NO_x-konversion ollessa pienempi, on järkevää alentaa alfa-suhdetta alle yhden ylimääräisen ammoniakkin vähentämiseksi. Korkeammassa lämpötiloissa NO_x-konversioteho voi puolestaan olla korkeampi, kun alfa-suhde on suurempi kuin 1 ilman ylimääräistä ammoniakkia. (Girard 2007.)

Suurin ongelma SCR-järjestelmissä on AdBlue:n heikko pakkaskestävyys ja aineen joutuminen kosketuksiin ilman kanssa, jolloin se kiteytyy. Kiteytynyt urea- ja vesiliuos saattaa tukkia ruiskutusputken. (Yara 2016b.)

SCR-suodatin sisältää yleensä myös ammoniakkia hapettavan katalyytin (ASC), jonka tarkoituksena on eliminoida dynaamisessa ajossa syntyvä ylimääräinen ammoniakki hapettamalla se osittain typpioksidiksi (NO). Syntyvä typpioksidi reagoi vielä ammoniakkin kanssa, joten jäljelle jää vain vettä ja typpikaasua. (Umicore 2016.)

Typpioksidien poistojärjestelmä (SCR) voidaan myös yhdistää päällystämällä partikkelisuodatin (DPF) sopivilla katalyyteillä tilan säästämiseksi. Ongelmaksi muodostuvat vastapaineen kohoaminen ja eri aktiivisten komponenttien jakautuminen tasaisesti. (Czerwinski 2015.)

NO_x-konversion lisäämiseksi kylmäkäynnistyksessä pakoputken lämpötilan nousussa kuluva aika on kriittinen. Pienemmässä järjestelmästä ureaa voidaan ruiskuttaa aikaisemmin, sillä ammoniakkin ja urean väliseen reaktioon tarvittava lämpötila saavutetaan nopeammin. (Czerwinski 2015.)

Dieselmoottorin päästöihin ja erityisesti NO_x-päästöihin voidaan vaikuttaa myös moottorin sisäisillä muutoksilla, pakokaasun takaisinkierrätyksellä (EGR) käytettävällä polttoaineella sekä öljyllä. Moottorin sisäisten muutosten käyttö on kustannustehokas ratkaisu. Moottorin perustekniikan optimointi on kuitenkin haasteellista, sillä yhden parametrin muuttaminen vaikuttaa moneen eri asiaan. Tämän takia otetaan käyttöön tietoteknisiä malleja, joissa käytetään ennustavia algoritmeja. Niillä voidaan paremmin hallita miten nämä monimutkaiset järjestelmän käyttäytyvät erilaisissa tilanteissa. (Berger 2012; Weber ym. 2009; Yuan 2015.)

3 UUDET PÄÄSTÖVAATIMUKSET

Dieselmootorin päästöjen rajoittamisessa perusongelmana on hiukkasten ja NOx:n samanaikainen alentaminen. Aikainen polttoaineenruiskutus vähentää hiukkasia ja polttoaineen kulutusta, mutta lisää NOx-päästöä. Tällöin typen oksidien ja hiukkasten välistä riippuvuutta voidaan pienentää pakokaasujen jälkikäsitteilytekniikan avulla. (Nylund, Erkkilä & Hartikka 2007.)

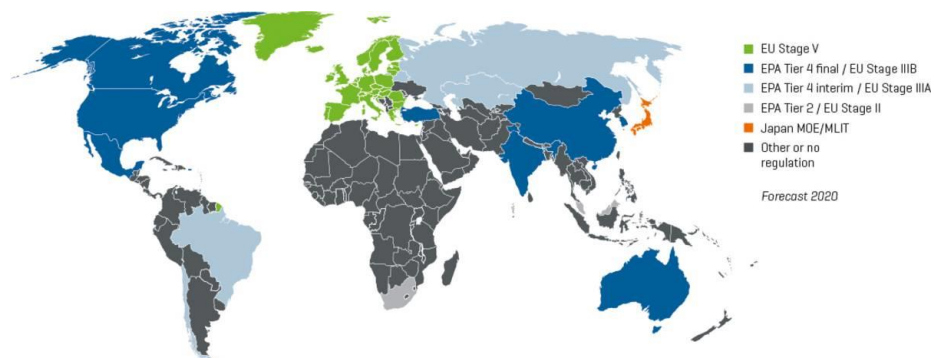
Pakokaasupäästönormit astuvat voimaan eri aikoina riippuen sijainnista. Tämänhetkinen päästöluokitus NRE dieselmootoreille Euroopassa on Stage 4 (Kuva 5). Se lisäsi tiukemman 0.4 g/kWh NOx-päästöjen rajan, mikä sai aikaan laajamittaisemman SCR-järjestelmän käytön. (DieselNet 2016c.)

Stage IV emission standards for nonroad diesel engines

Cat.	Net Power	Date	CO	HC	NOx	PM
	<i>kW</i>					
Q	130 ≤ P ≤ 560	2014.01	3.5	0.19	0.4	0.025
R	56 ≤ P < 130	2014.10	5.0	0.19	0.4	0.025

Kuva 5. Stage 4 -päästöluokitus (Dieselnet 2016c).

Myös Yhdysvalloissa ja Japanissa siirryttiin vuoden 2014 alussa tiukemman päästöluokituksen piiriin. Kehittyvien alueiden, kuten Aasian, Brasilian ja Venäjän pakokaasupäästönormit astuvat voimaan myöhemmin. Kehittyvissä maissa on tällä hetkellä voimassa Stage 3A. Moottorivalmistajat joutuvat kehittämään erillisiä moottoreita myös näiden lievemmin säänneltyjen päästönormien mukaisiksi (kuva 6). Vuonna 2019-2020 Euroopassa astuu voimaan EU:n päästöluokitus Stage 5 (kuva 7). (DieselNet 2016c.)



Kuva 6. Päästöluokituksen tila maailmassa vuonna 2020 (Hatz Diesel 2017).

Uusi päästöluokitus tuo mukanaan uuden hiukkasmäärä (PN) rajan työko-nemoottorien päästöille 19 kW ja 560 kW välille (kuva 7). PN-raja on suunniteltu varmistamaan, että hiukkasten säätöteknologiat, kuten DPF hiukkassuodattimet wall-flow tekniikalla, tulevat käyttöön kaikille moottoreille. Näin terveyden kan-nalta haitallista hiukkasmäärää saadaan supistettua. Stage 5 -asetus kiristää myös massapohjaisen PM-rajan samoille moottoreille 0,025 g / kWh:sta aina 0,015 g / kWh: iin asti. (DieselNet 2016c.)

Category	Ign.	Net Power	Date	CO	HC	NOx	PM	PN
		kW						
				g/kWh				1/kWh
NRE-v/c-1	CI	P < 8	2019	8.00	7.50 ^{a,c}		0.40 ^b	-
NRE-v/c-2	CI	8 ≤ P < 19	2019	6.60	7.50 ^{a,c}		0.40	-
NRE-v/c-3	CI	19 ≤ P < 37	2019	5.00	4.70 ^{a,c}		0.015	1×10 ¹²
NRE-v/c-4	CI	37 ≤ P < 56	2019	5.00	4.70 ^{a,c}		0.015	1×10 ¹²
NRE-v/c-5	All	56 ≤ P < 130	2020	5.00	0.19 ^c	0.40	0.015	1×10 ¹²
NRE-v/c-6	All	130 ≤ P ≤ 560	2019	3.50	0.19 ^c	0.40	0.015	1×10 ¹²
NRE-v/c-7	All	P > 560	2019	3.50	0.19 ^d	3.50	0.045	-

^a HC+NOx
^b 0.60 for hand-startable, air-cooled direct injection engines
^c A = 1.10 for gas engines
^d A = 6.00 for gas engines

Kuva 7. Stage 5 -päästöluokitus. (Dieselnet 2016c).

Stage 5 ei ole erityisen vaikea tavoite verrattuna aikaisempaan asetukseen. Useimmat moottorin valmistajat yksinkertaisesti optimoivat moottorin käyttöpara-metreja, hiukkassuodattimia ja hapetuskatalysaattoreita (Jackson 2016.)

Vaikka Euroopassa siirrytään Stage 5 -päästönormeihin, Yhdysvaltain ympäris-tönsuojeluvirasto (EPA) ei tee tiukennuksia vaan asetukset pysyvät edelleen Tier 4 tasolla. Suurimpina eroina on hiukkasmassan (PM) laveammat rajoitukset sekä hiukkasmäärän (PN) rajoittamattomuus, joka antaa mahdollisuuden käyttää jälki-käsittelyjärjestelmiä joissa ei ole hiukkassuodattimia. (DieselNet 2016d.)

Engine Power	Year	CO	NMHC	NMHC+NO _x	NO _x	PM
kW < 8 (hp < 11)	2008	8.0 (6.0)	-	7.5 (5.6)	-	0.4 ^a (0.3)
8 ≤ kW < 19 (11 ≤ hp < 25)	2008	6.6 (4.9)	-	7.5 (5.6)	-	0.4 (0.3)
19 ≤ kW < 37 (25 ≤ hp < 50)	2008	5.5 (4.1)	-	7.5 (5.6)	-	0.3 (0.22)
37 ≤ kW < 56 (50 ≤ hp < 75)	2013	5.5 (4.1)	-	4.7 (3.5)	-	0.03 (0.022)
56 ≤ kW < 130 (75 ≤ hp < 175)	2008	5.0 (3.7)	-	4.7 (3.5)	-	0.3 ^b (0.22)
130 ≤ kW ≤ 560 (175 ≤ hp ≤ 750)	2013	5.0 (3.7)	-	4.7 (3.5)	-	0.03 (0.022)
	2012-2014 ^c	5.0 (3.7)	0.19 (0.14)	-	0.40 (0.30)	0.02 (0.015)
	2011-2014 ^d	3.5 (2.6)	0.19 (0.14)	-	0.40 (0.30)	0.02 (0.015)

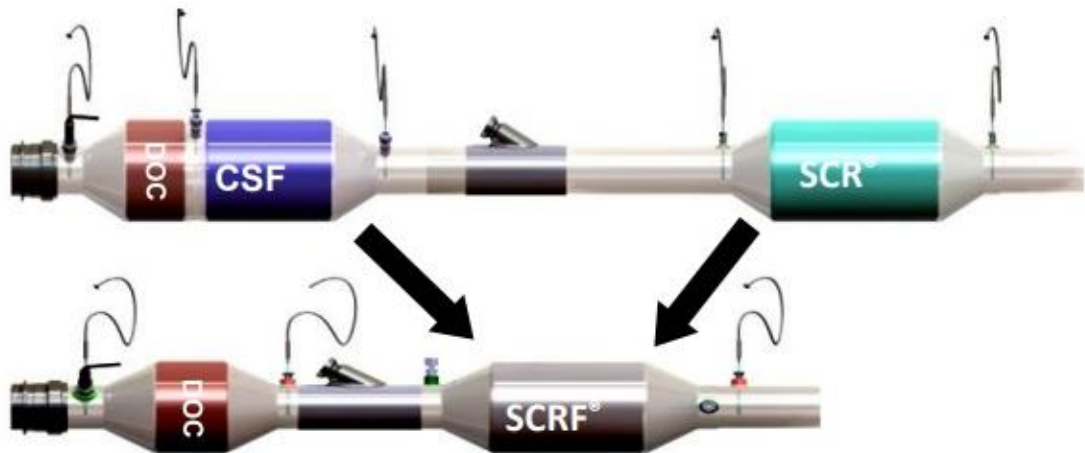
Kuva 8. Tier 4 -päästöluokitus (DieselNet 2016d).

Tärkeimpänä tekijänä uuden päästönormin saavuttamisessa on hiukkasuodattimen toiminnan optimointi. Suurin osa valmistajista onkin nyt pakotettu asentamaan partikkelisuodattimet kaikkiin moottoriluokkiin vuoteen 2020 mennessä aiemman pakokaasun takaisinkierrätyksen (EGR), ruiskutusmäärän ja ajoituksen säädön lisäksi. Tämä aiheuttaa luonnollisesti lisäkustannuksia ja haasteita. Haasteet liittyvät suurilta osin partikkelisuodattimen regeneroitumisen optimointiin ja tilahaasteisiin pakoputkistossa. (ICCT 2016.)

Useimmat valmistajat ovat tehneet tulevaisuuden suunnitelmansa niin, että hiukkasuodattimen koko pienenee. Jotkut tarjoavat "One can" -ratkaisuja, joissa DPF-, DOC- ja SCR ovat yhdistettyinä yhteen säiliöön. (Jackson 2015.)

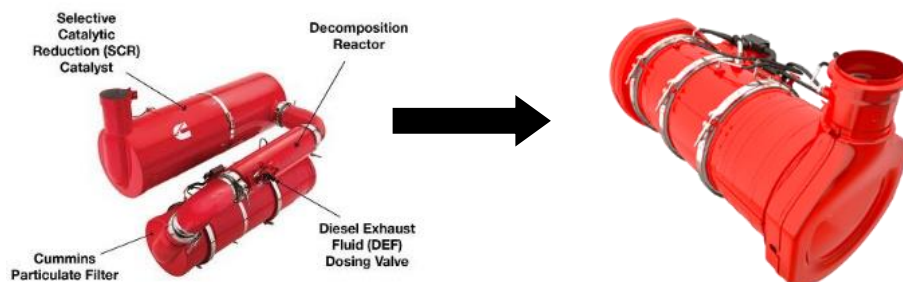
4 ERI VALMISTAJIEN TULEVAISUUDEN RATKAISUT

Johnson Matthey:n näkemys nojaa suodatintekniikkaan. Tavoitteena on yhdistää SCR-urearuiskutusjärjestelmä ja partikkelisuodatin (kuva 9). Uusi SCRF® teknologia mahtuisi pienempään tilaan säilyttäen samalla korkean NO_x-konversion ja hyvän passiivisen regeneroinnin. Haasteena ovat kohoava vastapaine sekä typidioksidin riittävyys, kun sekä nokihiukkasten hapetus, että ammoniakkin pelkistys reaktio tapahtuvat samassa tilassa. (Larsson 2014.)



Kuva 9. SCRF (Larsson 2014).

Cumminnsin tavoitteena on yhdistää tehokas partikkelisuodatin (DPF), Hapetuskatalyytti (DOC) ja urearuiskutus (SCR) samaan pakettiin (kuva 10). Nämä uudet moottorit eivät vaadi pakokaasujen kierrätystä (EGR) mikä vähentää moottorin karstoittumista ja polttoaineen kulutusta, sekä parantaa moottorin tehoa. Urea-ruiskutuksen pisarakokoa kutistamalla mahdollistetaan noin puolet pienempi ja kevyempi jälkikäsitteilyjärjestelmä. Myös vastapaineen luvataan laskevan verrattuna SCR ja DPF(CSF) yhdistelmään. (Grayson 2015.)



Kuva 10. EcoFit Single Module (Cummins 2015).

Cummins kehittää myös elektronista moottorinohjausta (EEM) Stage 5 -moottorien myötä. Yhtiön omien väitteiden mukaan se saisi Start and Stop järjestelmälleen noin 3 % polttoaineen säästöt. (Jackson 2015.)

Proventia jatkaa yhteistyötä AGCO Powerin kanssa myös Stage 5 -moottorien osalta ja on kehittämässä erittäin pieneen tilaan mahtuvan jälkikäsittelyjärjestelmän (kuva 11). Proventia näkee, että tulevaisuuden päästörajoitukset saavutetaan SCR ja DPF tulee yhdistää. Tiukat päästörajat vaativat SCR-järjestelmän toiminnan tehostamista sekä tarkkaa lämmön- ja ureasekoituksen hallintaa. (Proventia 2017b; DieselNet 2017.)



Kuva 11. Stage 5 -system layout example (Proventia 2017a).

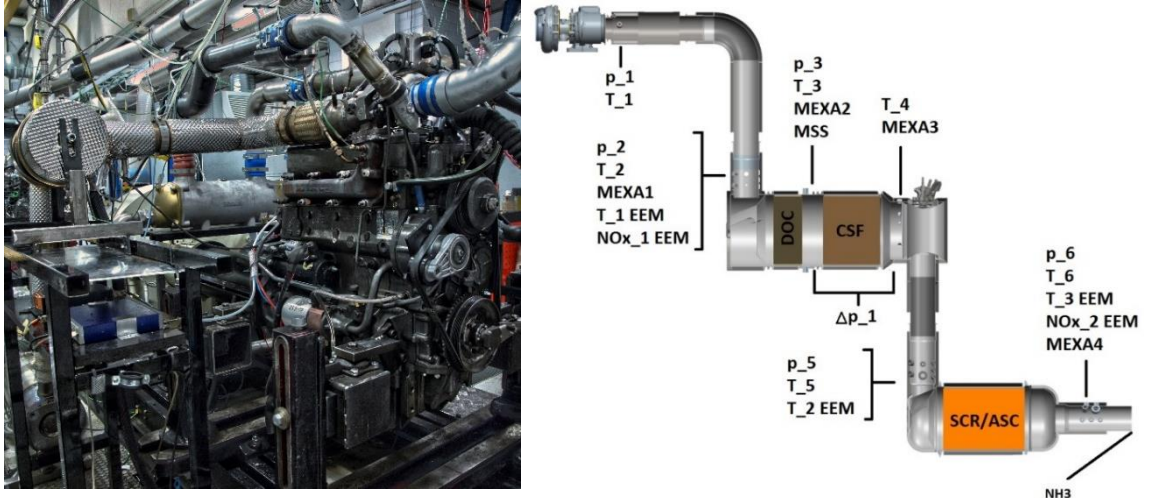
Deutz on saanut ensimmäisenä Stage 5 -sertifikaatin TTCD 6.1 moottorilleen (kuva 12). Erittäin tehokas partikkelisuodatin mahdollistaa tiukentuneen partikkelimäärärajan alittamisen. (Diesel progress international 2017b.)

Tehontarpeen ollessa pieni, dieselmoottorien rinnalle on alettu tuomaan myös nestekaasukäyttöisiä moottoreita. Kaasunkäytöllä päästään Stage 5 -päästötasolle ilman kalliita pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteita. Lisäksi kaasulla palaminen tapahtuu niin puhtaasti, että moottoreita voi käyttää tietyin edellytyksin sisätiloissa. (Konepörssi 2017.)



Kuva 12. TTCD 6.1 Diesel moottori (Diesel progress international 2017a).

5 KOEJÄRJESTELYT



Kuva 13. Tutkimusmoottori 44AWF ja sen pakokaasun jälkikäsittelyjärjestelmä.

Tutkimusmoottorina oli AGCO Power Oy:n valmistama 44AWF(ECO)-työkone-dieselmoottori (kuva 13 ja taulukko 1). Moottori oli pakokaasuahdettu ja varustettu ahtoilman jäähdytyksellä, Common Rail -yhteispaineruiskutuksella sekä sähköisesti ohjattavalla turbiininoitusventtiilillä. Moottorinohjausjärjestelmän hallintaohjelmana toimi AGCO Powerin EEM 4 sekä TestCell 4.

Taulukko 1. Tutkimusmoottori.

Valmistaja	AGCO Power Oy
Tyyppi	44 AWF
Moottorityyppi	4 syl. Rivimoottori
Sylinterin halkaisija	108 mm
Iskunpituus	120 mm
Iskutilavuus	4,4 dm ³
Nimellisteho	100 kW/2200 rpm
Maksimivääntömometti	540 Nm
Turbo	

Moottorin kuormittamiseen käytettiin Schenck WT-470 -pyörrevirtadynamometriä (Taulukko 2). National-Instruments PXI:n ja TestCell 4 ohjelman avulla ohjattiin pyörrevirtajarrua ja moottoria valvomosta manuaalisesti tai sykliajo-ohjelman avulla.

Taulukko 2. Pyörrevirtadynamometri.

Valmistaja	Schenck
Malli	WT470
Nimellisteho	470 kW
Suurin pyörimisnopeus	4000 rpm
Nimellisvääntömomentti	3000 Nm
Hitausmomentti	1,96 kgm ²
Paino	1350 kg

Tutkimusmoottorin pakokaasupäästöjä mitattiin ottamalla näytteitä pakoputken eri kohdista kuvassa 13 näkyvien mittauspaikkojen MEXA 1-4 mukaisesti. Näyte otettiin lämmitettyyn mittalinjaan, mistä se johdettiin pakokaasumittauskaappiin. Pakokaasumittauskaappi jakoi näytteen pakokaasuanalysaattoreille. Tutkimusajoissa mitattiin hapen, hiilimonoksidin, hiilidioksidin, hiilivetyjen, pienhiukkasten, typpimonoksidin ja typen oksidien tasoja pakokaasussa pakokaasuanalysaattorien avulla (taulukko 3).

Analysaattorit kalibroitiin aina ennen päivän ensimmäistä tutkimusajoa ja tasot tarkastettiin jokaisen päivän lopuksi. Kalibroinnin yhteydessä käytiin läpi mahdolliset vuodot. Savutusta mitattiin AVL FSN-mittarilla. Hiukkaspäästöjä MSS-mittalaitteilla (Micro soot sensor). Ammoniakin määrää mitattiin NEO monitorin LaserGas mittarilla.

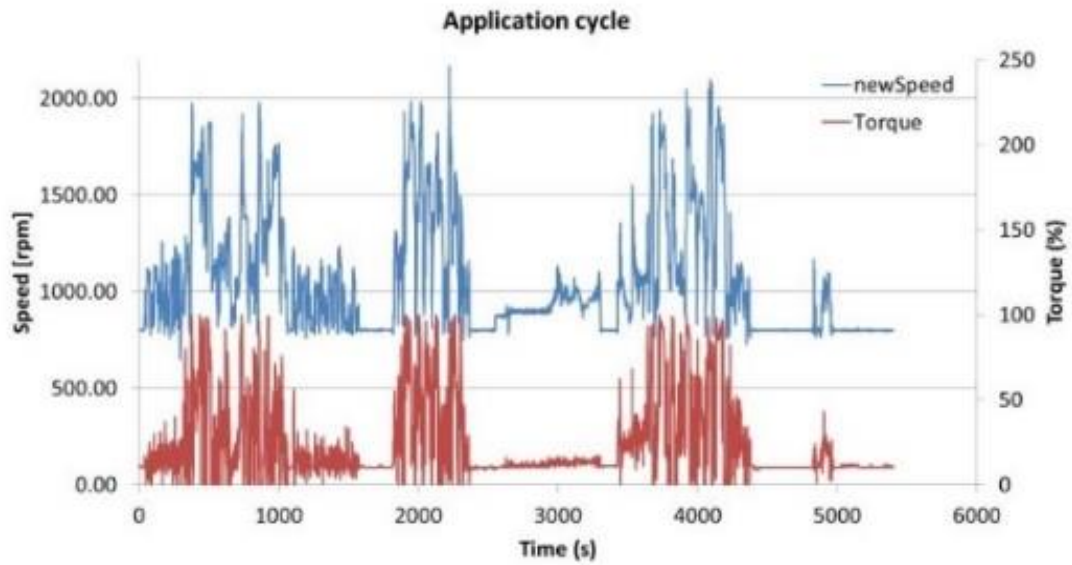
Päästölaskennan korjauskertoimia varten tutkimustiloista mitattiin huoneen lämpötilaa, ilmankosteutta ja ilmanpainetta. Tutkimusmoottorista mitattiin painetta venymäliuskaan perustuvilla antureilla ja lämpötilaa K-tyypin sekä PT-100 -tyypin antureilla. Ilman massavirran mittaukseen käytettiin ABB:n Sensyflow:ta.

Keskeisimmät mittaukset olivat tämän tutkimuksen osalta CSF/DPF-partikkeli-suodattimen paine-ero, NO_x-päästöt, pienhiukkasten määrä ja ammoniakkipäästö. Näiden lisäksi mitattiin moottorille tulevan imuilman- ja polttoaineen massavirtaa imuilman-, imusarjan-, sekä pakosarjan painetta, hiilivetyjen määrä ja savutusta. Moottorin vääntömometti ja pyörintänopeus saatiin moottoridynamometrillä ja Testcell 4 ohjelmasta.

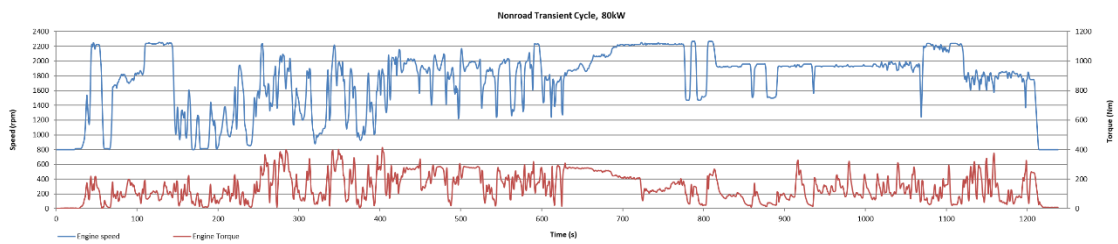
Taulukko 3. Pakokaasupäästöjen mittalaitteet.

Mitattava suure/päästö		Mittalaite
Happi	O ₂	Siemens Oxymat 61
Hiilimonoksidi	CO	Siemens Ultramat 6
Hiilidioksidi	CO ₂	Siemens Ultramat 6
Hiilivety	HC	J.U.M. Engineering THC Analyzer VE7
Pienhiukkaset	PM	AVL 483 Micro Soot Sensor
Savutus	FSN	AVL 415 SE
Typpimonoksidi	NO	Eco Physics CLD 822 M
Typpidioksidi	NO ₂	Eco Physics CLD 700 EI ja Siemens Smart NO _x -sensor
Ammoniakki	NH ₃	LaserGas 2 SP

Staattisten ajopisteiden lisäksi hiukkassuodattimen tutkimisessa käytettiin AGCO Powerin toimittamaa sykliä (kuvio 1). Urearuiskutuksen optimoinnissa NRTC-sykliä muokattiin matalatehoiseksi vääntökertoimella 0,71 (kuvio 2).



Kuvio 1. Passiivisen regeneroinnin testisykli.



Kuvio 2. Alennetun tehon transienttisykli.

6 PALAMISKALIBROINTI

Tarkat tutkimustulokset on esitetty vain Agco Powerille toimitetussa kappaleessa.

7 TYPPIDIOKSIDIN TUOTTO HAPETUSKATALYTTISSÄ

Tarkat tutkimustulokset on esitetty vain Agco Powerille toimitetussa kappaleessa.

8 PASSIIVINEN REGENEROINTI

Tarkat tutkimustulokset on esitetty vain Agco Powerille toimitetussa kappaleessa.

9 TYPPIDIOKSIDIN TUOTTO VAHVEMMALLA HAPETUSKATALYTTILLÄ

Tarkat tutkimustulokset on esitetty vain Agco Powerille toimitetussa kappaleessa.

10 UREARUISKUTUKSEN OPTIMOINTI

Tarkat tutkimustulokset on esitetty vain Agco Powerille toimitetussa kappaleessa.

11 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin dieselmootoreiden pakokaasupäästöjä sekä niiden jälkikäsittelyjärjestelmiä. Päästönormit kiristyvät entisestään, joten aihe on ajankohtainen. Työ toteutettiin perehtymällä päästöluokitukseen ja pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmiä käsitteleviin artikkeleihin, kirjoihin, lakeihin ja julkaisuihin. Työn tuloksena syntyi kokonaiskuva pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmän toiminnasta laboratoriossa olevaan AGCO Powerin testimoottoriin.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia 44MD-sarjatuotantomootorin soveltumista päästöiltään Stage 5 -päästönormin mukaiseksi. Referenssimittauksina tehdyn palamiskalibrointitutkimuksen jälkeen laitteistoon asennettiin hiukkasuodatin. DOC + CSF(DPF) + SCR -kokoonpanolla tutkittiin hapetuskatalyytin NO₂-tuottoa, partikkelisuodattimen passiivista regeneroitumista sekä urearuiskutuksen optimaalisinta tasoa.

Parhain NO₂/NO_x-suhde pienemmän platinamäärän sisältävällä katalyytillä saatiin 2200 kierroksella, 300 °C:n lämpötilalla. Pienemmillä 1500 kierroksilla paras tulos saatiin, 350 °C:n lämpötilalla.

Passiivinen regenerointi ei ollut riittävää pienemmän platinamäärän sisältävällä hapetuskatalyytillä. Nokea jäi ennen puhdistusta suodattimeen ja kun noki poltettiin pois, tuhkaa jäi vielä liikaa suodattimeen. Hapetuskatalyytti vaihdettiin vahvempaan, joka nosti NO₂/NO_x-suhdetta.

Urearuiskutuksen optimoinnissa konversiorajan ylittävä alfa-suhde 1500 kierroksella oli 1,15. 2200 kierroksella konversioraja ylittyi alfa-suhteella 1,1. NRTC-ajossa parhaaksi alfa-suhteeksi saatiin 1,2.

Tutkimuksissa viereisten moottoripaikkojen käyttö vaikutti imusarjan lämpötiloihin. Tätä korjattiin lisäämällä tarvittaessa välijäähdyttimen tehoa. Johtosarjan ja uuden EEM- päivityksen yhteensopivuusongelmien, epäonnistuneen tietokantatallennuksen sekä laitteistorikkojen vuoksi täydellisiä tuloksia ei valitettavasti

saatu. Myös ammoniakkia mittaavan LaserGas 2 SP:n toiminta transienttialojssa jätti tilaa jatkotutkimukselle.

LÄHTEET

Autoteknillinen taskukirja. 2003. Suomentaja Autoalan Koulutuskeskus Oy. 6. Painos.

Berger, R. 2012. Turbocharging future large four-stroke engine. MTZ industrial Special Edition MTZ | March 2012.

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

Bosch. 2010. Dieselmootorin ohjausjärjestelmät.

Brigitte Bandl-Konrad b, Michel Weibel b, Bernd Krutzsch 2006. Reactivity of NO/ NO₂-NH₃ SCR system for diesel exhaust aftertreatment: Identification of the reaction network as a function of temperature and NO₂ feed content

Cummins 2015. EcoFit Single Module <https://www.equipmentworld.com/wp-content/uploads/sites/2/2015/04/CES-EcoFit-Single-Module.png>

Czerwinski 2015. Emission Reduction with Diesel Particle Filter with SCR Coating (SDPF) [Verkkodokumentti]. Emission Control Science and Technology. Viitattu 18.09.2017 <https://link.springer.com/article/10.1007/s40825-015-0018-7>

Diesel progress international 2017a. TTCD 6.1 diesel engine https://dieselprogress.com/wp-content/uploads/2017/09/TCD_6_1_AGRI_front_I_-2-696x759.jpg

Diesel progress international 2017b. Deutz Engine Receives EU Stage 5 Certification [verkkodokumentti]. Viitattu 1.10.2017. <https://dieselprogress.com/deutz-engine-receives-eu-stage-5-certification/>

Dieselnet 2012. DOC toimintaperiaate [verkkodokumentti]. Viitattu 12.10.2017 https://www.dieselnet.com/tech/cat_doc.php

DieselNet 2016a. Dieselmootorin jälkikäsitteily [verkkodokumentti]. Viitattu 5.9.2017 https://www.dieselnet.com/tech/engine_heavy-duty_aftertreatment.php

DieselNet 2016b. DOC katalyytti. Viitattu 10.10.2017 <https://www.dieselnet.com/tech/images/cat/diesel/doc.gif>

DieselNet 2016c. Päästöstandardit ei tieliikennekäyttöön suunnitelluille moottoreille. [verkkodokumentti] Viitattu 19.9.2017. <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>

Dieselnet 2016c. SCR katalyytti. Viitattu 17.10.2017 <https://www.dieselnet.com/tech/images/cat/diesel/scr.gif>

Dieselnet 2016c. Stage 4 päästöluokitus. <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>

Dieselnet 2016c. Stage 5 -päästöluokitus. (<https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>)

DieselNet 2016d. Tier 4 päästöluokitus. [verkkodokumentti]. Viitattu 19.9.2017. <https://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php>

DieselNet 2016d. Tier 4 -päästöluokitus. <https://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php>

Dieselnet 2017. Proventia to develop aftertreatment systems for AGCO Stage V engines [verkkodokumentti]. Viitattu 2.10.2017. <https://www.dieselnet.com/news/2017/03proventia.php>

EEM 4 2017. Tutkittavan moottorin jälkikäsitteilyjärjestelmä. [Kuvankaappaus] Viitattu 7.10.2017
EEM 4 moottorinhallinta ohjelmasta.

Fiebig 2014. Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions [Verkkodokumentti]. Journal of Occupational Medicine and Toxicology. Viitattu 18.09.2017

Girard, J., Snow, R., Cavataio, G., and Lambert, C. 2007. The Influence of Ammonia to NOX Ratio on SCR Performance. SAE Technical Paper. [Verkkodokumentti]. Viitattu 10.11.2017
<https://doi.org/10.4271/2007-01-1581>.

Grayson 2015. Cummins details what new emissions regs will look like in Europe, prospects for Tier 5 in the U.S., and what its next-gen solution entails [verkkodokumentti]. Viitattu 5.10.2017.
<http://www.equipmentworld.com/cummins-details-what-new-emissions-regs-will-look-like-in-europe-prospects-for-tier-5-in-the-u-s-and-what-its-next-gen-solution-entails/>

Hestec 2015. DPF-partikkelisuodatin [verkkodokumentti]. Viitattu 8.10.2017 (<http://www.hestec.fi/chiptuning/dpf>.)

ICCT (International council on clean transportation) 2016 [verkkodokumentti]. Viitattu 20.10.2017.
http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Stage-V_policy%20update_ICCT_nov2016.pdf

Jackson / Equipment world 2015. Are you ready for Tier 5 emissions regulations? [verkkodokumentti] Viitattu 10.10.2017. <http://www.equipmentworld.com/are-you-ready-for-tier-5-emissions-regulations/>

Jackson / Equipment world 2016. Goodbye EGR, Cummins reveals cool-running Stage V engines with simplified tech and a mod-free, one-world capability. [verkkodokumentti] Viitattu 10.10.2017 <http://www.equipmentworld.com/goodbye-erg-cummins-reveals-cool-running-stage-v-engines-with-simplified-technology-and-a-mod-free-one-world-capability/>

Konepörssi 2017. Deutz - kurkistus tulevaisuuteen [verkkodokumentti]. Viitattu 20.10.2017.
<http://www.koneporssi.com/uutiset/deutz-kurkistus-tulevaisuuteen/>

Kuusjärvi, J. 2012. Hiukkassuodattimen puhdistusaine kokeessa [Verkkodokumentti]. Viitattu 08.09.2017. <http://www.ammattiautot.fi/uutiset/dpf-puhtaaksi-fortella-hiukkassuodattimenpuhdistusaine-kokeessa/>

Larsson / Johnson Matthey 2014. Aftertreatment solutions for Tier4 and beyond [verkkodokumentti]. Viitattu 10.10.2017. <https://futurepowertrains.co.uk/2014/presentations/Mikael-Larsson.pdf>

Larsson 2014. Aftertreatment solutions for Tier4 and beyond <https://futurepowertrains.co.uk/2014/presentations/Mikael-Larsson.pdf>

Mollenhauer, K.& Tschoeke, H. 2010, Handbook of Diesel Engines. 461,462

Nova 2006. Reactivity of NO/ NO₂-NH₃ SCR system for diesel exhaust aftertreatment: Identification of the reaction network as a function of temperature and NO₂ feed content [verkkodokumentti]. Viitattu 18.10.2017 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337306002128>

Nylund, N-O., Erkkilä, K. & Hartikka, 2007. Kaupunkibussien polttoaineenkulutus ja pakokaasupäästöt: Uusimman dieseltekniikansuorituskyky. [verkkodokumentti]. Viitattu 16.4.2017.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2372.pdf>

Proventia 2017a. Stage 5 system layout example https://www.proventia.com/docs/graf/Stage_5_system_layout_example4.png

Proventia 2017b. SCR and Stage 5 emission standard [verkkodokumentti]. Viitattu 5.10.2017. https://www.proventia.com/emission_control/oem/technologies/selective_catalytic_reduction

Päästöluokituksen tila maailmassa vuonna 2020. http://www.hatz-diesel.com/fileadmin/_processed_/7/a/csm_Map_global_emissions_regulations_en_hi_502c23414e.jpg

Reşitoğlu 2015. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems [verkkodokumentti]. Clean Technologies and Environmental Policy. Viitattu 15.10.2017 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-014-0793-9>

Scania SCR. 2010. itseopiskelukäsikirja. 9.2.2010

Sydney diesel centre 2015a. DPF suodatin. Viitattu 18.10.2017 <http://www.sydneydieselcentre.com.au/wp-content/uploads/2016/01/diesel-particulate.png>

Sydney diesel centre 2015b. DPF suodatin [verkkodokumentti]. Viitattu 10.10.2017 <http://www.sydneydieselcentre.com.au/diesel-particulate-filter/>

Turbotec. 2015. DPF-partikkelisuodatin [verkkodokumentti]. Viitattu 8.9.2017 <http://www.turbotec.com/henkiloautot/chiptuning/dpf.php>

Umicore 2016. Ammonia Slip Catalyst (ASC) [Verkkodokumentti]. Viitattu 15.10.2017 <http://ac.umicore.com/en/technologies/ammonia-slip-catalyst/>

Weber, O.; Jörgl, V; Bullmer, W & Wyatt S. 2009. Variable valve timing complementing hybrid-EGR at diesel engines. MTZ 04/2009 volume 70.

Yara 2016a. NOx kaasujen vähentäminen [Verkkodokumentti]. Viitattu 10.09.2017 <http://www.yara.fi/nox-paastojen-vahentaminen/adblue-ajoneuvoille/mika-on-adblue/>

Yara 2016b. Miten AdBlue-liuosta käytetään? [Verkkodokumentti] Viitattu 11.09.2017 <http://www.yara.fi/nox-paastojen-vahentaminen/adblue-ajoneuvoille/kuinka-kaytan-adblue-liuosta/>

Yuan 2015. Diesel Engine SCR Control: Current Development and Future Challenges [Verkkodokumentti]. Emission Control Science and Technology. Viitattu 18.10.2017 <https://link.springer.com/article/10.1007/s40825-015-0013-z>