

Alexi Nahkala

PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELYN KEHITYS MOOTTORITYÖKONEIDEN DIESELMOOTTOREISSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Väitöskirjatutkija Teemu Mäkiäho
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Aleksi Nahkala: Pakokaasujen jälkikäsitteilyn kehitys moottorityökoneiden dieselmootoreissa
Aleksi Nahkala: Development of exhaust emission aftertreatment in NRMM diesel engines
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2022

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan moottorityökoneiden dieselmootoreiden pakokaasujen jälkikäsitteilyn kehitystä 1990-luvulta nykypäivään. Lisäksi tarkastellaan muutamia tulevaisuuden mahdollisuuksia pohjaten tällä hetkellä julkisesti saatavilla olevaan tietoon. Moottorityökoneiden päästönhallintaa säätelee Euroopassa Stage-luokitus, joka jakautuu toistaiseksi tasoihin Stage I – Stage V. Tällä hetkellä Stage V -päästöluokka vastaa lähes raskaiden ajoneuvojen EURO VI -luokkaa, ja niissä käytettävät tekniikat ovat hyvin samankaltaisia keskenään.

Työn tarkoituksena oli tutkia, mitä jälkikäsitteilyjärjestelmiä eri Stage-luokkien aikana on käytetty sekä miten jälkikäsitteily ja päästöjenhallinta tulee todennäköisesti kehittymään tulevaisuudessa. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena. Lähteinä työhön käytettiin jälkikäsitteilyjärjestelmiä koskevassa teoriaosuudessa pääosin vertaisarvioituja artikkeleita, sääntelyyn liittyvässä osuudessa EU-direktiivejä ja moottorityökoneisiin soveltamisen osuudessa valmistajien tarjoamaa materiaalia, esimerkiksi esitteitä tai muutamia konferenssiartikkeleita.

Työn aluksi perehdytään dieselpakokaasun koostumukseen, jonka jälkeen tarkastellaan jokaisen yleisimmän käytössä olleen tai olevan jälkikäsitteilyjärjestelmän (EGR, DOC, DPF, SCR) toimintaa ja teoriaa. Tämän jälkeen perehdytään tarkemmin päästöihin liittyvään sääntelyyn, jossa tarkastellaan myös EURO-päästötasoja, sillä aikaisintaan vuonna 2025 voimaan tuleva EURO VII tulee luultavasti ohjaamaan myös seuraavan Stage-päästöluokan raja-arvoja.

Työssä perehdytään lisäksi moottorityökoneissa käytettyihin pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmiin päästöluokittain vertailemalla eroja eri valmistajien antamien tietojen perusteella. Pääosin ratkaisut ovat samankaltaisia, mutta esimerkiksi Stage IV:n aikaan valmistajat olivat jakautuneet neljään pääryhmään jälkikäsitteilylaitteyhdistelmissä. Tämän jälkeen tarkastellaan vielä jälkikäsitteilylaitteiden moottorityökoneisiin soveltamiseen liittyviä ongelmia. Lopuksi työssä pohditaan mahdollisuuksia tulevaisuuden päästörajoihin sekä siihen, onnistuisiko jälkikäsitteilylaitteita jälkiasentaa vanhempiin työkoneisiin.

E erityisesti tulevaisuuden sääntelyn ennustaminen oli varsin vaikeaa tällä hetkellä julkisesti saatavilla olevan tiedon vähyyden takia. Stage V on vasta viime vuoden aikana tullut voimaan kaikille uusille työkoneille, joten ymmärrettävästi seuraavista vaiheista ei toistaiseksi ole vielä paljoa julkisia suunnitelmia. Tätä olisi ollut hyvä tiedustella alan asiantuntijoilta ja valmistajilta.

Avainsanat: Dieselmoottori, moottorityökone, jälkikäsitteily, Stage-luokitus, DPF, DOC, EGR, SCR

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tätä työtä tehdessä opin kantapäähän kautta huolellisen suunnittelun tärkeyden. Jos saisin muuttaa jotain omassa työskentelyssäni tätä työtä tehdessä, niin olisin ehdottomasti heti kurssin aluksi aloittanut kirjoittamisprosessin ja ennen kaikkea suunnitellut työn rakenteen ja tiedonhakuprosessin paremmin. Joka tapauksessa selätin oman laiskuuteni ja sain työn valmiiksi ennen joulua, niin kuin olin suunnitellut ja ohjaajani kanssa sopinut.

Haluan kiittää erityisesti ohjaajaani Teemu Mäkiähoa, jolta sain todella hyviä vinkkejä työn kirjoittamiseen ja välillä haastavalta tuntuneeseen tiedonhakuun. Haluan kiittää myös perhettäni ja ystäviäni, joilta olen saanut saumatonta tukea aina, kun joku on tuntunut vaikealta. Lopuksi haluan kiittää tyttöystävääni, joka auttoi työn viimeistelyssä ja oikolukemisessa, vaikka hänellä itselläänkin on ollut kiireitä omien opiskelujensa takia.

Tampereella, 21.12.2022

Alexi Nahkala

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. DIESELPAKOKAASUJEN KOOSTUMUS	3
3. DIESELPAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELYJÄRJESTELMÄT	4
3.1 Pakokaasun takaisinkierrätys.....	4
3.2 Dieselhiukkassuodatin.....	6
3.3 Dieselhapetuskatalysaattori	9
3.4 Selektiivinen katalyyttinen pelkistys	11
4. PÄÄSTÖIHIN LIITTYVÄ SÄÄNTELY	15
4.1 EURO-luokitus.....	15
4.2 Stage-luokitus.....	16
4.3 Muu sääntely	20
5. PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELY MOOTTORITYÖKONEISSA	21
5.1 Pakokaasujen jälkikäsitteily päästöluokittain	21
5.2 Moottorityökoneisiin soveltamisen haasteet	22
6. JÄLKIKÄSITTELY JA PÄÄSTÖNVÄHENNYSKEINOT TULEVAISUUDESSA	25
6.1 Stage-luokituksen edelleen korottaminen.....	25
6.2 Jälkikäsitteilylaitteiden jälkiasentaminen	26
6.3 Vaihtoehtoiset polttoaineet, hybridisaatio ja sähköistyminen	26
7. YHTEENVETO.....	28
LÄHTEET	30

KUVALUETTELO

Kuva 1. Dieselpakokaasun sisältämät yhdisteet ja saastepäästöt (Reşitoğlu et al. 2015).....	3
Kuva 2. Vasemmalla matalan ja oikealla korkean paineen EGR-järjestelmä. Mukailtu lähteestä Zheng et al. (2004).....	5
Kuva 3. Seinävirtaukseen perustuvan hiukkassuodattimen rakenne. Mukailtu lähteestä Reşitoğlu et al. (2015)	7
Kuva 4. Dieselhapetuskatalysaattorin rakenne. Mukailtu lähteistä Reşitoğlu et al. (2015) ja (Zhang et al. 2022).....	10
Kuva 5. Kaksi erityyppistä SCR-järjestelmää DOC:n ja DPF:n kanssa. Mukailtu lähteestä Sala et al. (2017)	13
Kuva 6. John Deeren 9,0 ja 13,5 litraisten PowerTech PSS -moottoreiden jälkikäsitteilyjärjestelmä (John Deere 2022b).	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACEA	Euroopan autonvalmistajien liitto (engl. European Automobile Manufacturers' Association)
Al ₂ O ₃	Alumiinioksidi
AOC, ASC	Ammoniakkikatalysaattori (engl. Ammonia Oxidation Catalyst tai Ammonia Slip Catalyst)
C ₃ H ₆	Propeeni
CeO ₂	Ceriumoksidi
CO	Hiilimonoksidi, häkä
CO ₂	Hiilidioksidi
cDPF	Katalysoitu dieselhiukkassuodatin (engl. Catalyzed DPF)
CR	Yhteispaineruiskutus (engl. Common Rail)
CRT	Jatkuvasti regeneroiva suodatin (engl. Continuously Regenerating Trap)
DEF	Urealious (engl. Diesel Exhaust Fluid)
DOC	Diesel-hapetuskatalysaattori (engl. Diesel Oxidation Catalyst)
DPF	Dieselhiukkassuodatin (engl. Diesel Particulate Filter)
EAT	Jälkikäsitteilyjärjestelmät (engl. Emission Aftertreatment Systems)
EGR	Pakokaasun takaisinkierrätys (engl. Exhaust Gas Recirculation)
FBC	Polttoaineperäinen katalyytti (engl. Fuel Born Catalyst)
H ₂ O	Vesi
HC	Hiilivedyt
HNCO	Isosyaanihappo
ISM	Käytönaikainen valvonta (In-Service Monitoring)
(Mg,Fe) ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	Kordieriitti
Mn	Mangaani
N ₂	Typpi
(NH ₂) ₂ CO	Urea
(NH ₄) ₂ SO ₄	Ammoniumsulfaatti
NH ₄ HSO ₄	Ammoniumbisulfaatti
NH ₃	Ammoniakki
NO ₂	Typpidioksidi
NO _x	Typenoksidit
NRE	Työkonemoottori (engl. Non-Road Engine)
NRMM	Moottorityökoneet (engl. Non-Road Mobile Machinery)
NRSC	Työkoneiden vakio-tilainen testisykli (engl. Non-Road Steady Cycle)
NRTC	Työkoneiden muuttuvatilainen testisykli (engl. Non-Road Transient Cycle)
O ₂	Happi
OBD	Järjestelmä esimerkiksi ajoneuvon vikatietojen selvittämiseen (engl. On-board Diagnostics)
PEMS	Jälkiasennettava päästöjen mittauslaitteisto (Portable Emission Measurement System)
PM	Pienhiukkaset (engl. Particulate Matter)
PN	Hiukkasluku (engl. Particle Number)
PD	Palladium

ppm	Miljoonasosa (engl. Parts Per Million)
Pt	Platina
Rh	Rodium
SCR	Selektiivinen katalyyttinen pelkistys (engl. Selective Catalytic Reduction)
SiC	Piikarbidi
SO ₂	Rikkidioksidi
SO ₃	Rikkiatrioksidi
VGT	Muuttuvageometrinen turboahdin (engl. Variable Geometry Turbocharger)
ZrO ₂	Zirkoniumoksidi
ΔH	Entalpiamuutos
cCO_2 imu	Hiilidioksidin konsentraatio imuilmassa
cCO_2 pako	Hiilidioksidin konsentraatio pakokaasussa
C_p	Pakokaasun ominaislämpö
EGR-suhde	Takaisinkierätetyn pakokaasun määrä
EGR-%	Takaisinkierätetyn pakokaasun määrä massa- tai tilavuusprosentteina
m_a	Sylinteriin päätyvän ilman massa
m_{EGR}	Takaisinkierätetyn pakokaasun massa
m_f	Sylinteriin päätyvän polttoaineen massa
\dot{m}	Pakokaasun massavirta
Q	Tarvittava lämpö
V_a	Sylinteriin päätyvän ilman tilavuus
V_{EGR}	Takaisinkierätetyn pakokaasun tilavuus
V_f	Sylinteriin päätyvän polttoaineen tilavuus

1. JOHDANTO

Ilmaston lämpenemisen takia myös ajoneuvojen aiheuttamia päästöjä on alettu vähentämään, ja niitä onkin onnistuttu vähentämään parhaimmillaan alle 10 %:iin alkuperäisistä, muutaman vuosikymmenen takaisista päästöistä. Moottorityökoneissa päästöjä on alettu säännellä 1990-luvulla. Vuonna 1997 julkaistiin Stage I -päästöluokka, jolla asetettiin ensimmäistä kertaa raja-arvot uusien työkoneiden aiheuttamille päästöille. Stage-luokkia on sittemmin vaiheittain kiristetty, ja tällä hetkellä uusin päästöluokka on Stage V, joka on otettu käyttöön 2019–2021. Myös päästönhallintakeinot ovat kehittyneet, ja pääosin päästöjä hallitaan erilaisilla pakokaasujen jälkikäsittelykeinoilla.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan, kuinka moottorityökoneiden pakokaasujen jälkikäsittely on kehittynyt. Tutkimuskysymyksiä ovat:

1. Millaisia pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmiä moottorityökoneissa on käytetty ja miten ne tulevat kehittymään?
2. Millainen sääntely ohjaa moottorityökoneiden päästöjen raja-arvoja ja miten se tulee kehittymään lähitulevaisuudessa?

Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena käyttäen lähteinä vertaisarvioituja teoria-artikkeleita ja tutkimuksia jälkikäsittelyjärjestelmistä sekä valmistajien tarjoamaa tietoa niiden soveltamisesta moottorityökoneisiin. Lopuksi näiden tietojen pohjalta tehdään johtopäätöksiä, kuinka moottorityökoneiden päästönhallinta voisi kehittyä lähitulevaisuudessa.

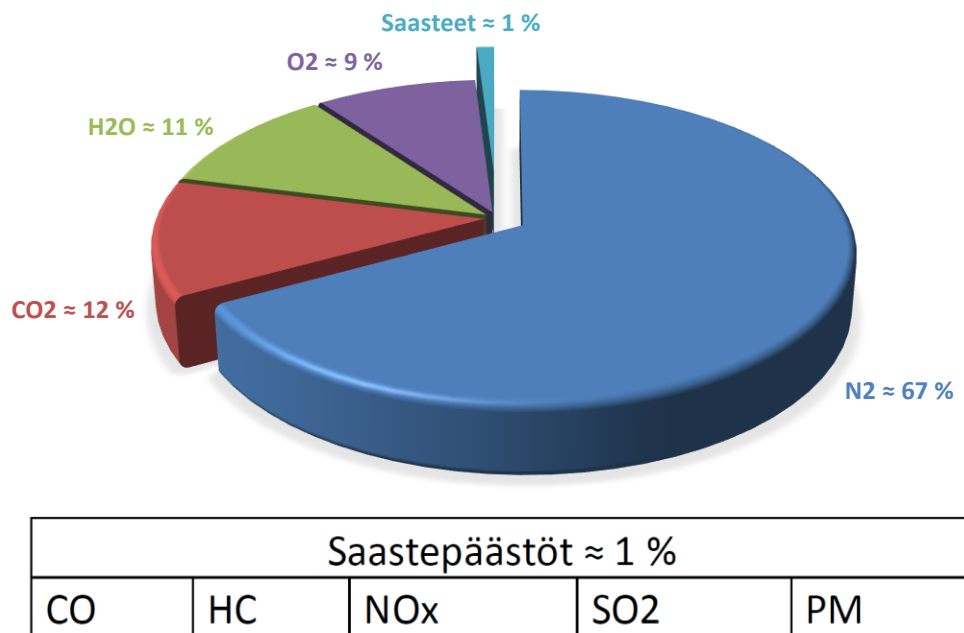
Luvussa 2 tutustutaan dieselpakokaasun koostumukseen ja erityisesti sen sisältämiin saastepäästöihin. Luvussa 3 selitetään yleisimpien käytössä olevien pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmien perusteoria sekä niiden hyvät ja huonot puolet. Näitä ovat pakokaasun takaisinkieritys EGR, dieselhapetusatalyysaattori DOC, dieselhiukkassuodatin DPF ja selektiivinen katalyyttinen pelkistys SCR. Lisäksi tutustutaan ammoniakkiatalyysaattoriin, jolla pyritään poistamaan SCR:n aiheuttamia ammoniakkipäästöjä.

Luvussa 4 tutkitaan, miten moottorityökoneiden aiheuttamia päästöjä säännellään Stage-luokituksella Euroopassa. Lisäksi raskaiden ajoneuvojen, kuten kuorma-autojen ja bussien EURO-luokitus selitetään lyhyesti, sillä tulevalla EURO VII -päästöluokan raja-arvot voivat antaa suuntaa myös mahdollisesti tuleviin Stage-luokkiin. Myös Yhdysvaltain vastaavaan Tier-luokitukseen perehdytään lyhyesti.

Luvussa 5 selvitetään, kuinka moottorityökoneiden pakokaasujen jälkikäsittely on kehittynyt Stage-luokitusten kiristyessä. Lisäksi tutkitaan, millaisia haasteita jälkikäsittelylaitteiden soveltamisessa moottorityökoneisiin on ollut esimerkiksi haastavien käyttöolosuhteiden ja ahtaiden moottoritulojen takia. Luvussa 6 pohditaan mahdollisen seuraavan päästöluokan, Stage VI:n raja-arvoja ja sitä, voitaisiinko jälkikäsittelylaitteita jälkiasentaa sellaisiin moottorityökoneisiin, joissa niitä ei vielä ole. Lopuksi luvussa tutustutaan erityisesti hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen vaihtoehtoisten polttoaineiden, hybridisaation ja sähköistymisen avulla. Lopuksi yhteenvedossa luvussa 7 tehdään viimeiset johtopäätökset työstä ja sen tuloksista.

2. DIESELPAKOKAASUJEN KOOSTUMUS

Dieselpakokaasu on dieselpolttoaineen palamisprosessissa syntyvää kaasua, joka sisältää useita eri yhdisteitä. Suurin osa pakokaasusta on kaasufaasissa, mutta se sisältää myös kiinteitä pienhiukkasia kuten nokea, siihen yhdistyneitä raskaita hiilivetyjä sekä epäorgaanisia aineita (Sharma ym. 2005; Sarvi ym. 2011). Näitä kaasumaisia yhdisteitä ja pienhiukkasia pidetään yleisesti merkittävänä terveys- ja ympäristöhaittoina, ja muiden muassa pakokaasun sisältämät typenoksidit (NO_x) aiheuttavat esimerkiksi otsonikatoa (Grewe et al. 2012). Alla olevassa kuvassa 1 on esitettyä dieselpakokaasun koostumus ympyräkaaviona.



Kuva 1. Dieselpakokaasun sisältämät yhdisteet ja saastepäästöt. Muokattu lähteestä Reşitoğlu et al. (2015), s. 17.

Dieselpakokaasu koostuu siis enimmäkseen samoista yhdisteistä kuin ilmakehän ilma. Haitallisten kaasujen ja pienhiukkasten PM (Particulate Matter) yhteismäärä eli saastepäästöt kattavat noin yhden prosentin, joka jakautuu edelleen hiilimonoksidiin (CO), hiilivetyihin (HC), typenoksideihin (NO_x), rikkidioksidiin (SO_2) sekä pienhiukkasiin. Rikkidioksidin osuus on nykyisin hyvin pieni: valmistajat suosivat alhaisemman valmisteveron takia rikitöntä polttoainetta, jonka rikkipitoisuutta valvoo Suomessa Tulli (Tulli 2022).

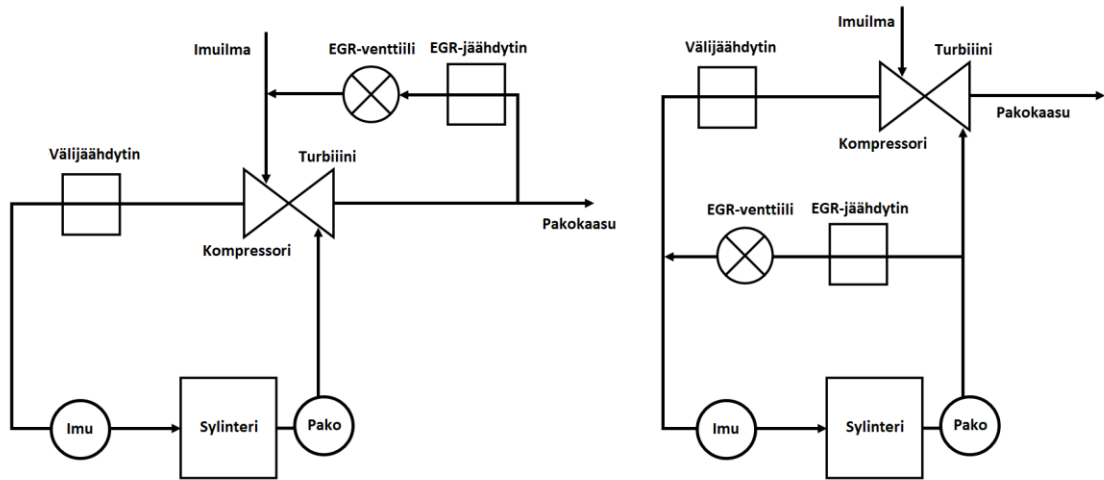
3. DIESELPAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELYJÄRJESTELMÄT

Tässä luvussa esitellään yleisimmät käytössä olevat EAT-järjestelmät (Emission Aftertreatment System) ja perehdytään niiden toimintaperiaatteisiin luvussa 2 esiteltyjen pakokaasun saastepäästöjen kanssa. Yleisimpiä jälkikäsitteilyjärjestelmiä ovat pakokaasun takaisinkierrätys (EGR), dieselhiukkassuodatin (DPF), dieselhapetuskatalysaattori (DOC) sekä selektiivinen katalyyttinen pelkistys (SCR), joista kerrotaan tarkemmin omissa aliluvuissaan. SCR-katalysaattorin yhteydessä tarkastellaan lyhyesti myös ammoniakkipäästöjä.

3.1 Pakokaasun takaisinkierrätys

EGR eli pakokaasun takaisinkierrätys tarkoittaa pakokaasun kierrättämistä moottorin imusarjaan pakoputkesta. EGR-järjestelmiä on pääasiassa kahdenlaisia, kuumia ja jäähdytettyjä. Kuumassa EGR:ssä pakokaasu johdetaan sellaisenaan takaisin imusarjaan ja jäähdytetyssä se virtaa ensin EGR-jäähdyttimen läpi. (Zheng ym. 2004; Bauner ym. 2009)

EGR-järjestelmiä on lisäksi niin sanottuja matalan ja korkean paineen järjestelmiä riippuen siitä, miten EGR on sijoitettuna moottorin yhteyteen. Matalan paineen EGR ohjaa pakokaasua tyypillisesti turboahdetun moottorin turbiinin jälkeisestä pakoputkesta imusarjaan ennen ahtimen kompressoria. Korkean paineen järjestelmässä EGR vastaavasti ohjaa pakokaasun moottorista ennen ahtimen turbiinia kompressorin jälkeiseen imusarjaan. (Zheng ym. 2004). Järjestelmiä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Vasemmalla matalan ja oikealla korkean paineen EGR-järjestelmä. Mukaillu lähteestä Zheng et al. (2004), s. 886–887.

EGR-venttiilin toimintaa voidaan ohjata joko alipaineella tai sähköisesti. Alipaineella ohjattu venttiili aukeaa, kun pakoputken ja imusarjan välinen paine-ero kasvaa riittävän suureksi (Zheng ym. 2004). Sähköisesti venttiiliä voidaan ohjata tarkemmin kuin alipaineella. Nykyaikaisten turboahdettujen moottoreiden ahtimet ovat usein niin sanottuja VGT (Variable Geometry Turbocharger) -ahtimia eli muuttuvasiipisiä ahtimia, joiden la- poja ohjataan samanaikaisesti EGR-venttiilin kanssa. (Joshi 2020)

Takaisinkierätyksellä pyritään vähentämään dieselmoottorin NO_x -päästöjä. Takaisin moottoriin kierrätetty pakokaasu on inerttiä, eli se ei enää reagoi polttoaineen ja hapen kanssa. Sen sijaan pakokaasun sisältämä hiilidioksidi ja vesihöyry syrjäyttävät osan ha- pesta, mikä laskee palamisreaktion lämpötilaa ja samalla vähentää typenoksidien muo- dostumista. (Abd-Alla 2002; Reşitoğlu ym. 2015; Dubey ym. 2019)

EGR-suhdetta eli takaisinkierätetyn pakokaasun määrää voidaan mallintaa kaavalla

$$EGR - \text{suhde} = \frac{c_{CO_2} \text{ imu}}{c_{CO_2} \text{ pako}}, \quad (1)$$

missä c_{CO_2} ovat hiilidioksidin konsentraatioita imuilmassa ja pakokaasussa (Zheng ym. 2004). Toisinaan voi olla hyödyllistä määrittää EGR-suhde massaprosentteina

$$EGR - \% = \frac{m_{EGR}}{m_a + m_f + m_{EGR}}, \quad (2)$$

missä m_{EGR} on takaisinkierätetyn pakokaasun massa sekä m_a (air) ja m_f (fuel) sylinte- riin menevän ilman ja polttoaineen massat. Vastaavasti EGR-suhde on tilavuusprosent- teina

$$EGR - \% = \frac{V_{EGR}}{V_a + V_f + V_{EGR}}, \quad (3)$$

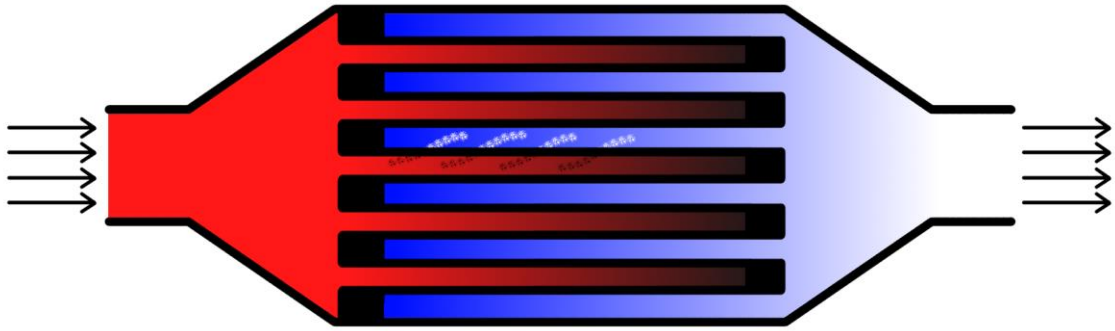
missä V_{EGR} on takaisinkierätetyn pakokaasun tilavuus, V_a on ilman tilavuus sekä V_f on polttoaineen tilavuus. (Abd-Alla 2002)

EGR ei ole kuitenkaan ongelmaton järjestelmä: koska inertti pakokaasu syrjäyttää osan moottorille tulevasta hapesta, on vaarana, että polttoaine palaa epäpuhtaammin kuin ilman takaisinkierätystä. Dubeyn et al. (2019) sekä Zhengin et al. (2004) artikkeleiden mukaan dieselmoottorin tapauksessa matalilla kuormituksilla olisi hyvä käyttää suurta EGR-suhdetta ja korkeilla kuormituksilla päinvastoin matalaa. Näin varmistetaan moottorin optimaalinen hapensaanti sekä estetään esimerkiksi savutusta (Zheng ym. 2004). Matalilla kierroksilla voidaan käyttää suurta EGR-suhdetta, sillä dieselmoottori käy suuressa ilmaylijäämässä (Reşitoğlu ym. 2015).

3.2 Dieselhiukkassuodatin

DPF (Diesel Particulate Filter) eli dieselhiukkassuodatin on nimensä mukaisesti suodatin, jonka läpi dieselmoottorin pakokaasu virtaa. DPF:ää käytetään pakokaasun sisältämien pienhiukkasten pois suodattamiseen, ja se on pitkään ollut yksi yleisimmin käytetyistä menetelmistä päästörajoitusten yhä tiukentuessa. (Khair 2003; Reşitoğlu ym. 2015)

Reşitoğlu et al. (2015) sekä Wang et al. (2021) kertovat artikkeleissaan hiukkassuodattimen perustuvan yleensä seinävirtaukseen. Suodattimen sisällä on hunajakennoa muistuttava rakenne, joka koostuu yleensä kordieriidista ($(Mg,Fe)_2Al_4Si_5O_{18}$) tai piikarbidista (SiC). Tämän toisesta päästään tukitun kennorakenteen tarkoituksena on pakottaa pakokaasu kennon kanavien huokoisten seinien läpi, jolloin pakokaasun sisältämät pienhiukkaset suodattuvat pois. Tämä on havainnollistettu kuvassa 3, jossa mustilla ja valkoisilla pisteillä kuvataan hiukkasten poissuodattuminen pakokaasuvirrasta. Pienhiukkaset kulkeutuvat edelleen diffuusion avulla huokosten pinnalta seinien sisään. (Rose ym. 2013; Reşitoğlu ym. 2015)



Kuva 3. Seinävirtaukseen perustuvan hiukkassuodattimen rakenne. Mukailtu lähteestä Reşitoğlu et al. (2015), s. 21.

Wang et al. (2021) esittelevät artikkelissaan myös muita mahdollisia DPF:n rakenteita: kuitukeraaminen suodatin, verkkosuodatin sekä vaahtokeraaminen suodatin. Kuitukeraaminen suodatin on lämmönkestoltaan erinomainen sekä keraami itsessään on hyvä suodatinmateriaali. Lisäksi valmistusprosessissa voidaan määrittää tarkemmin sen suodattavuuskyky. Haittapuolena on, että keraami ei kestä suurta lämmönvaihtelua, eikä kuitukeraamista suodatinta voida puhdistaa tai regeneroida. (Wang ym. 2021)

Verkkosuodattimella on itsessään huono suodattavuuskyky, noin 20 % – 50 %. Sitä voidaan kuitenkin parantaa sähkövaraamalla hiukkaset, jolloin ne tarttuvat tehokkaasti suodattimeen. Metallisella verkkosuodattimella on myös hyvä lämmön- ja tärinänkesto. (Wang ym. 2021)

Vaahtokeraaminen suodatin muistuttaa rakenteeltaan vaahtomuovia, ja onkin sen takia huonohko suodattavuuskyvyltään (noin 40 % – 60 %). Rakenne toisaalta sopii hyvin regeneraatioon, eikä se vahingoitu suuresta lämmönvaihtelusta. Se ei kuitenkaan kestä mekaanista värähtelyä. (Wang ym. 2021)

Guanin et al. (2015) mukaan DPF on tehokas tapa vähentää hiukkaspäästöjä, ja edellä kuvatun kaltaiset suodattimet pystyvät vähentämään jopa 95 % alle 100 nanometrin läpimittaisista hiilipitoisista ja metallisista hiukkasista. Jotkin hiukkassuodattimet pystyvät myös vähentämään hiilivetypäästöjä 85 % – 95 % sekä hiilimonoksidipäästöjä 50 % – 90 % (Guan ym. 2015).

DPF:n suodatinluonteen takia se voi tukkeutua, kun nokipartikkelit ja muut pienhiukkaset täyttävät sen. Tukkeutuminen aiheutuu useimmiten liian alhaisesta pakokaasun lämpötilasta, jolloin nokipartikkelit ynnä muut pienhiukkaset eivät hapetu eli pala pois. Suodattimen täyttötason seuraamiseksi siihen on yleensä asennettu paineanturi, joka tarkkailee

suodattimen tulo- ja lähtöpuolten välistä paine-eroa. (Guan ym. 2015) DPF:n tukkeutuminen voi aiheuttaa lisääntyneitä polttoaineenkulutusta, vahinkoja itse suodattimeen tai moottorivaurion (Khair 2003; Reşitoğlu ym. 2015).

DPF:n tukkeutumisen estäminen on mahdollista niin sanotulla regeneraatiolla, joka voi olla passiivista tai aktiivista. Jeguirimin et al. (2005) sekä Khairin (2003) mukaan passiivinen regeneraatio tapahtuu yleensä ajon tai muun pitkittyneen käytön aikana, kun pakokaasun ja samalla suodattimen lämpötila kasvaa noin 600°C:een, joka on tarvittava lämpötila alkuainehiilen palamiselle. Dieselmoottorin pakokaasun lämpötila kasvaa kuitenkin harvoin näin suureksi itsekseen, joten passiivisen regeneraation onnistumiseksi voidaan käyttää esimerkiksi katalyyttejä, jotka laskevat hiilen palamiseen tarvittavaa lämpötilaa (Khair 2003). Kolme yleistä vaihtoehtoa ovat esimerkiksi CDPF (Catalyzed DPF) eli katalysoitu DPF, CRT (Continuously Regenerating Trap) eli jatkuvasti regeneroiva suodatin sekä FBC (Fuel Born Catalyst) eli polttoaineperäinen katalyytti. CDPF:n pinta on vuorattu katalyyttina toimivalla aineella, CRT hyödyntää typpidioksidia NO₂ jatkuvaan hiilen hapettamiseen ja FBC:n sisältämät jalometallit ja metalliseokset toimivat katalyytteina. (Khair 2003; Lamharess ym. 2011; Guan ym. 2015)

Aktiivinen regeneraatio käynnistetään pääasiassa joko polttoaineella tai sähköisellä laitteella, kuten lämmittimellä tai mikroaalloilla (Khair 2003; Zink & Johnson 2005). Guanin et al. (2015) ja Zhengin et al. (2005) mukaan polttoainekäyttöinen regenerointi toimii joko syöttämällä polttoainetta heti sylinteristä lähtevän pakokaasun sekaan tai syöttämällä sitä vasta juuri ennen hiukkassuodatinta sijaitsevan hapetuskatalysaattorin sisään, jolloin polttoaine palaa ennen suodatinta ja näin lämmittää sen tarvittavaan lämpötilaan. Polttoainetta voidaan syöttää myös suoraan DPF:ään, jolloin palaminen suodattimen sisällä käynnistää regeneraation. Ulkoisesti ohjatun liekkipolttimen käyttäminen on myös eräs vaihtoehto. (Khair 2003; Zheng ym. 2005; Guan ym. 2015).

Khairin (2003) mukaan regeneraatio on yksinkertaista tehdä sähköisesti. Sähköinen lämmitin voidaan asentaa hänen mukaansa esimerkiksi keraamisen suodattimen tapauksessa suodattimen eteen (Khair, 2003). Lämmittämiseen voidaan käyttää ajoneuvon omaa tai ulkoista sähköjärjestelmää; liikkuvan ajoneuvon tapauksessa on mieluisaa käyttää ajoneuvon omaa sähköjärjestelmää, mutta paikalliskaluston tapauksessa ulkoisesti tuotettu sähkö on polttoainetaloudellisesti kannattavampaa (Khair 2003; Guan ym. 2015). Majewskin artikkelissa (Majewski 2021) olevalla kaavalla

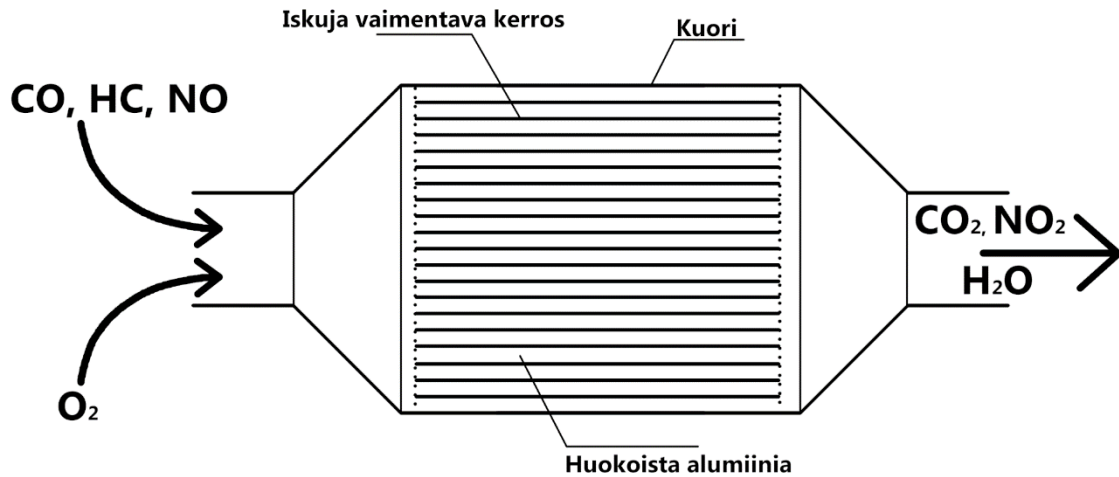
$$Q = \frac{\dot{m}C_p}{3.6} \quad (4)$$

voidaan arvioida, paljonko lämpöä tarvitaan nostamaan pakokaasun lämpötilaa yhden celsiusasteen verran per hevosvoima. Kaavassa Q on tarvittava lämpö, \dot{m} on pakokaasun massavirta ja C_p on pakokaasun ominaislämpö. Jos esimerkiksi oletetaan massavirraksi $\dot{m} = 5 \text{ kg/hp}\cdot\text{K}$ ja ominaislämmöksi $C_p = 1.028 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, niin 100-hevosvoimaisen moottorin pakokaasun lämpötilan nostaminen 100°C :lla tarvitsisi tehoa 19,2 hevosvoimaa (Majewski 2021).

Aktiivisessa regeneraatiossa DPF:n on kestävä korkeita, noin 700°C :n lämpötiloja. Tämä aiheuttaa suodattimen komponenteille suurta rasitusta, minkä takia sähköinen lämmitys ei ole kovin suosittu vaihtoehto (Khair 2003). Khairin (2003) mukaan parhaimmat mahdollisuudet regeneroimiseen ovat moottorin hallinnalla toteutettu passiivisen ja aktiivisen regeneraation yhdistelmä sekä liekkioltin, joka on luotettava ja jonka toimintaa on yksinkertaista ohjata.

3.3 Dieselhapetuskatalysaattori

Dieselhapetuskatalysaattori (DOC, Diesel Oxidation Catalyst) toimii samalla periaatteella kuin vastaavat bensiinimoottoreiden kolmitiekatalysaattorit (Zhang ym. 2022). Reşitoğlun et al. (2015) mukaan DOC on sisärakenteeltaan hunajakennomainen. Kenorakenne ei ole hiukkassuodattimen tapaan toisista päistään tukittu, vaan katalysaattorissa kaikki kennot ovat avonaisia. Sen pintakerros sisältää alumiinioksidia Al_2O_3 , ceriumoksidia CeO_2 , zirkoniumoksidia ZrO_2 sekä jalometalleja kuten platinaa Pt, palladiumia Pd ja rodiumia Rh. Pinnoitteen tarkoituksena on muodostaa mahdollisimman suuri pinta-ala jalometalleille, jotka ovat katalyytteina pakokaasun hapetusreaktioissa (Reşitoğlu ym. 2015; Zhang ym. 2022). Hapetuskatalysaattorin rakenne on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Dieselhapetuskatalysaattorin rakenne. Mukailtu lähteistä Reşitoğlu et al. (2015), s. 20 ja Zhang et al. (2022), s. 5.

DOC hapettaa hiilimonoksidia CO, hiilivetyjä HC sekä typpimonoksidia NO seuraavien reaktioyhtälöiden mukaan (Zheng & Banerjee 2009).



Hiilivetyjä kuvataan yllä olevassa reaktioyhtälössä (kaava 6) propeenilla C_3H_6 . Todellisuudessa pakokaasun sisältämät hiilivetyketjut ovat useimmiten $C_9 - C_{12}$ pitkiä. Reaktion kulku on kuitenkin sama, vain happea tarvitaan enemmän ja vastaavasti reaktiotuotteita muodostuu enemmän. (Zheng & Banerjee 2009)

Khosravin et al. (2014) artikkelin mukaan tyypillisesti Pt-, Pd- ja Rh-katalysaattorit hapettavat eniten hiilivetyjä. Tyydyttyneillä hiilivedyillä on suuri katalyyttinen aktiivisuus platinan kanssa, tyydyttymättömillä hiilivedyillä palladiumin kanssa sekä aromaattisilla hiilivedyillä rodiumin kanssa (Zhang ym. 2022). Tämä korostuu varsinkin alhaisissa lämpötiloissa esimerkiksi moottorin kylmäkäynnistyksen yhteydessä (Herreros ym. 2014). Toisaalta Herreros et al. (2014) huomauttavat, että tämä voi johtua DOC:n kennoston pintarakenteesta olevista zeoliiteista, joihin hiilivedyt tarttuvat paremmin alhaisissa lämpötiloissa.

DOC on tärkeä osa pakokaasujen jälkikäsittelyketjua etenkin, jos käytetään passiivisesti regeneroivaa DPF:ää. DOC hapettaa typpimonoksidia typpidioksidiksi, joka alentaa DPF:n passiivisen regeneraation käynnistymiseksi tarvittavaa lämpötilaa. (Maunula

2013; Zhang ym. 2022) Tangin et al. (2014) mukaan DOC:n ja passiivisesti regeneroivan CDPF:n yhdistelmä on yleisesti käytetty raskaissa ajoneuvoissa sen kustannustehokkuuden takia. Lisäksi siihen voidaan yhdistää aktiivinen regenerointi esimerkiksi syöttämällä polttoainetta DOC:n sisään (Tang ym. 2014).

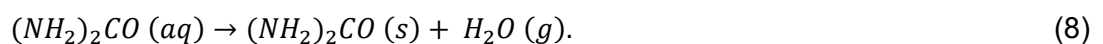
Eräs DOC:n heikkous on sen huono tehokkuus kylmäkäynnistyksessä tai muuten kylmissä olosuhteissa, joissa DOC:n lämpötila ei nouse kovin korkeaksi tai sillä kestää huomattavan kauan nousta optimaaliselle alueelle, joka on vähintään 200°C (Stadlbauer ym. 2013; Herreros ym. 2014; Zhang ym. 2022). Tällöin se ei pysty hapettamaan hiilivetyjä tai typenoksideja, minkä seurauksena ajoneuvon päästöt saattavat kasvaa (Stadlbauer ym. 2013). Eräs esitetty ratkaisu on syöttää pieniä määriä vetyä (H₂) DOC:n sisään, mikä näyttäisi parantavan hiilivetyjen, hiilimonoksidin sekä typenoksidien hapettumista (Herreros ym. 2014).

DOC on usein ensimmäinen osa jälkikäsitteilyketjua, minkä seurauksena se altistuu eniten vahingollisimmille yhdisteille. Tämä aiheuttaa komponenttien fyysistä ja kemiallista kulumista, minkä seurauksena katalyysaattorin suorituskyky heikkenee. Eräs merkittävimmistä uhkista on sen niin sanottu myrkyttyminen, jonka aiheuttaa useimmiten rikkidioksidi (SO₂). Se hapettuu katalyysaattorissa edelleen rikkitrioksidiksi (SO₃), joka muodostaa katalyysaattorin kanavien pinnalle kerroksen, joka puolestaan estää jalometalleja reagoimasta pakokaasun haitallisten yhdisteiden kanssa. (Herreros ym. 2014; Honkanen ym. 2018; Zhang ym. 2022)

3.4 Selektiivinen katalyyttinen pelkistys

Selektiivinen katalyyttinen pelkistys (SCR, Selective Catalytic Reduction) on toinen laajasti NO_x-päästöjen poistoon käytetty menetelmä. Siinä pakokaasun sekaan ruiskutetaan lisäainetta, joka reagoi ensin pakokaasun kanssa ja muodostaa seoksen, joka reagoi SCR:n katalyyttien kanssa. Lopputuloksena on ideaalisesti vettä (H₂O) ja typpidioksidia (NO₂). SCR on usein sijoitettuna hapetus-katalyysaattorin ja hiukkassuodattimen jälkeen, jolloin varsinkin hiukkassuodattimen regeneraation aiheuttama lämpö lisää voimakkaasti SCR:n katalyyttien aktiivisuutta. (Reşitoğlu ym. 2015; Han ym. 2019)

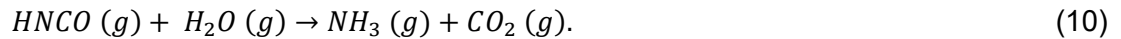
Lisäaineena käytetään ammoniakia (NH₃), jota saadaan noin 32,5 prosenttisesti urealiuoksesta ((NH₂)₂CO) (Reşitoğlu ym. 2015; Sala ym. 2017). Kun urealiuosta ruiskutetaan pakokaasun sekaan, siinä oleva vesi höyrystyy pois yhtälön 8 mukaisesti:



Jäljelle jääneet kiinteät ureahiukkaset sulavat termolyyysi-reaktiossa yhtälön 9 mukaisesti:



Reaktiotuotteina muodostuu ammoniakkia sekä isosyaanihappoa (HNCO). Termolyysi on endoterminen reaktio, eli se sitoo lämpöenergiaa. Sen entalpiamuutos on $\Delta H = +186 \text{ kJ}$. (Brzeżański & Sala 2016; Sala ym. 2017; Han ym. 2019) Isosyaanihappo reagoi helposti oksidien kanssa, joten se muodostaa hydrolyysireaktiossa vesihöyryn kanssa ammoniakkia ja hiilidioksidia yhtälön 10 mukaisesti (Guan ym. 2014; Sala ym. 2017):



Tämä reaktio on eksoterminen eli se vapauttaa lämpöenergiaa. Entalpiamuutos on tällöin $\Delta H = -96 \text{ kJ}$ (Guan ym. 2014). Isosyaanihapon hydrolyysi tapahtuu pääosin vasta katalysaattorissa, kun taas termolyysi voi tapahtua jo ennen sitä (Sala ym. 2017).

Termo- ja hydrolyysireaktioiden jälkeen katalysaattorissa tapahtuvat niin sanotut SCR-reaktiot. Dieselpakokaasun sisältämät typenoksidit NO_x ovat pääosin (>90 %) typpioksidia NO, minkä takia katalysaattorissa tapahtuva pääreaktio on



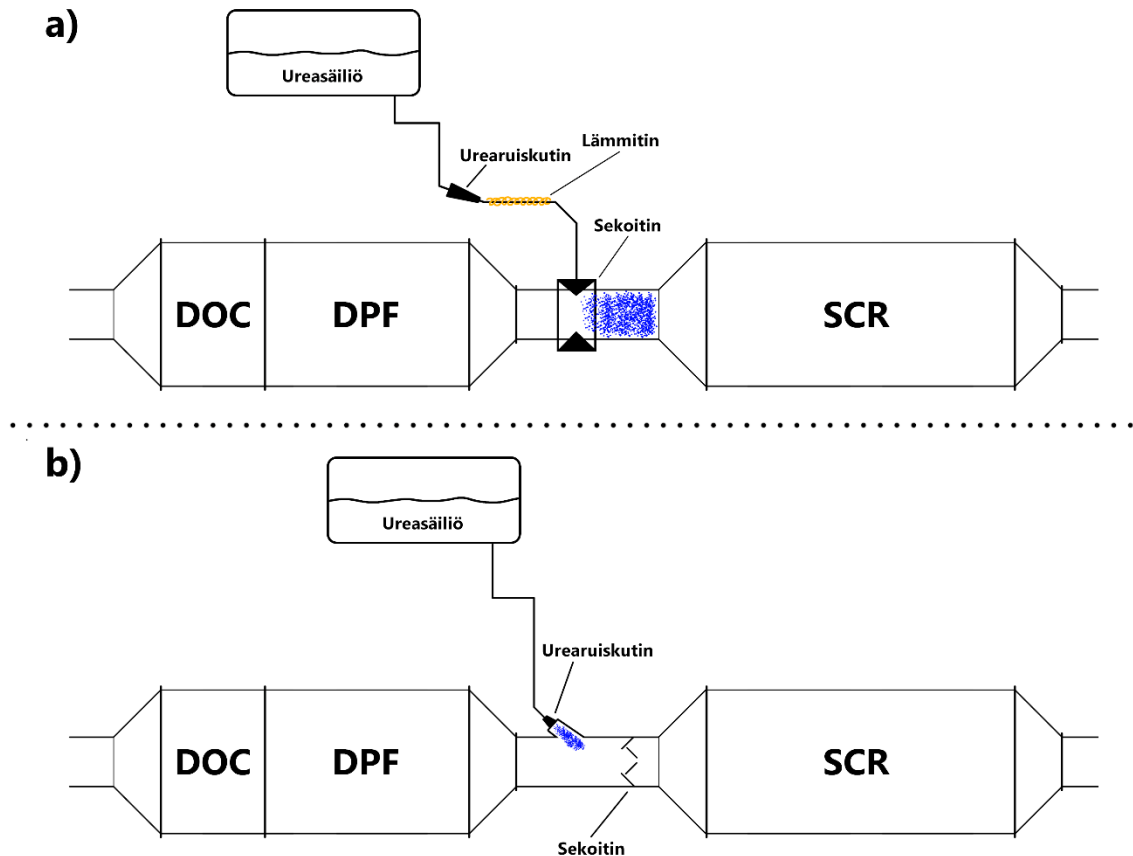
Reaktioon osallistuu ammoniakkin ja typpioksidin lisäksi happea. On olemassa myös happea kuluttamaton reaktio, mutta happilyijäämäisen dieselpakokaasun tapauksessa se ei hitautensa vuoksi ole oleellinen. (Guan ym. 2014; Han ym. 2019)

Toinen, huomattavasti nopeampi katalysaattorissa tapahtuva reaktio on



mikä kuluttaa hapen sijasta typpidioksidia NO_2 (Guan ym. 2014). Tätä tapahtuu erityisesti, jos jälkikäsitteilyketjussa käytetään oikein mitoitettua dieselhapetus-katalysaattoria ennen SCR:ää (Reşitoğlu ym. 2015). Liian suuritulavuuksista katalysaattoria käytettäessä SCR-reaktio saattaa muuttua pelkästään typpidioksidia käyttäväksi, mikä on myös nopeudeltaan hitaampi kuin typpidioksidin ja -monoksidin yhdistelmä (Guan ym. 2014).

Salan et al. (2017) artikkelissa esitellään höyrystetyn urean sumuttamisen vaikutusta katalyysin ja typenoksidien pelkistystehokkuuteen. Kuvassa 5 on esitettyä höyrystetyn ja nestemäisen urean syöttöjärjestelmät.



Kuva 5. Kaksi erityyppistä SCR-järjestelmää DOC:n ja DPF:n kanssa. Mukailtu lähteestä Sala et al. (2017), s. 7.

Valmiiksi höyrystetyn urean syöttäminen (kuvassa kohta a) lisää Salan et al. (2017) tutkimuksen mukaan typenoksidien pelkistystehokkuutta verrattuna perinteisempään nestemäisen urean syöttämiseen (kuvassa kohta b). Myös Majewskin (2018) mukaan urean pienempi pisarakoko lisää pelkistystehokkuutta. Toisaalta tehokkuus kärsi matalassa, noin 180°C:n pakokaasun lämpötilassa, jossa nestemäisen urean ruiskuttaminen oli tehokkaampaa. Ammoniakkipäästöt olivat lisäksi noin 10 % pienemmät nestemäisellä urealla. (Sala ym. 2017)

SCR:n suurimpia ongelmia ovat reaktioiden lämpötilariippuvuudet. Toisaalta urealiuoksen termolyysi alkaa noin 200°C:n lämpötilassa ja on tuottoisimmillaan noin 350°C:n lämpötilassa. Yli 600°C:n lämpötilassa ammoniakki hajoaa ennen kuin se ehtii reagoimaan typenoksidien kanssa. Lämpötilariippuvuutta pyritään usein kompensoimaan ruiskuttamalla ureaa vain silloin, kun lämpötila on reaktioille suotuisalla alueella. (Guan ym. 2014; Han ym. 2019)

Myös SCR-katalysaattori voi hapetuskatalysaattorin tavoin myrkyttyä rikkidioksidista. Gaon et al. (2018) mukaan mangaanipohjaisissa (Mn) katalysaattoreissa sen vaikutukset voidaan jakaa reversiibeliin ja irreversiibeliin deaktivoitumiseen. Reversiibelissä rikkidioksidi SO_2 hapettuu edelleen SO_3 :ksi, joka reagoi ammoniakkin NH_3 kanssa muodostaen ammoniumsulfaattia $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ja ammoniumbisulfaattia NH_4HSO_4 . Nämä peittävät katalysaattorin aktiiviset pinnat ja heikentävät typenoksidien pelkistymistä. (Gao ym. 2018) Irreversiibelissä deaktivoitumisessa SO_2 tai SO_3 reagoi suoraan katalysaattorin aktiivisten pintojen kanssa muodostaen metallisulfaatteja, jotka niin ikään peittävät katalysaattorin aktiivisia pintoja ja heikentävät pelkistämistehoa. Metallisulfaateilla on suuri lämmönkesto, joten deaktivoitumista ei voida korjata lämpökäsittelyllä. (Gao ym. 2018)

Urealiuoksen liiallinen syöttäminen katalysaattoriin saattaa kohottaa moottorin ammoniakkipäästöjä, kun kaikki reaktioissa muodostunut ammoniakki ei ehdi reagoida typenoksidien kanssa (Majewski 2018). (Bendrich ym. 2022) mukaan SCR-katalysaattorin kyky varastoida ammoniakkia heikkenee lämpötilan kasvaessa, joten esimerkiksi yllättävä moottorin kuormituksen kasvu saattaa kasvattaa ammoniakkipäästöjä rajusti, mikäli urean ruiskutus on väärin ajoitettu tai mitoitettu. Siksi sekä katalysaattorin että urean ruiskutuksen oikein mitoittaminen on tärkeää (Bendrich ym. 2022).

Ammoniakkikatalysaattoria (ASC, Ammonia Slip Catalyst, joissain yhteyksissä myös AOC, Ammonia Oxidation Catalyst) käytetään yhdistettynä SCR-katalysaattoriin tai erikseen sen jälkeen poistamaan mahdollinen ylimääräinen ammoniakki. Ammoniakkikatalysaattori hapettaa ammoniakkia takaisin typpimonoksidiksi NO, joka toisaalta heikentää typenoksidien pelkistystehokkuutta. (Majewski 2018) Bendrichin et al. (2021) mukaan ASC:lla kuitenkin pystytään korjaamaan liian suuren syöttämisen aiheuttamia ongelmia. Myös äkillisten lämpötilan kasvujen yhteydessä ASC pystyy pienentämään ammoniakkipäästöjä.

4. PÄÄSTÖIHIN LIITTYVÄ SÄÄNTELY

Tässä luvussa tutustutaan pakokaasupäästöihin liittyvään sääntelyyn. Sääntelyn tiukentamisessa ajan myötä on otettu käyttöön niin sanottuja päästöloukkia, joilla on asetettu tavoiterajat kullekin päästölajille. Euroopan alueella näistä luokituksista tunnetuin lienee EURO-luokitus, joka koskee henkilöautoja sekä raskasta liikennettä kuten kuorma-autoja (Dieselnet, 2021a). Moottorityökoneita koskee Stage-luokitus (Dieselnet, 2021b). Lisäksi esimerkiksi moottorityökoneissa käytettäviin polttoaineisiin liittyvät biopolttoaineiden edistämistä koskevat EU-direktiivit.

4.1 EURO-luokitus

EURO-luokitukset on otettu käyttöön 1990-luvun alussa, ja ne koskevat uutena Euroopan unionin alueelle myytäviä ajoneuvoja. Toistaiseksi päästöloukkia on EURO 1 – EURO 6. (Barbosa 2020; Dieselnet 2021a) EURO 7 otetaan käyttöön aikaisintaan 2025 (ACEA 2021). Kuorma- ja linja-autojen luokitukset merkitään yleensä roomalaisin numeroin EURO I-VII (Motiva 2022).

Ensimmäinen EURO-luokitus, EURO I otettiin käyttöön vuonna 1992 (Olabi ym. 2020). Se määritteli rajat hiilimonoksidi-, hiilivety-, typenoksidi- sekä hiukkaspäästöille. Siitä eteenpäin rajat ovat tiukentuneet, kun seuraava luokitus on otettu käyttöön 3–6 vuoden välein (Dieselnet 2021a; Motiva 2022). EURO-luokat ja päästörajat ovat koottuna seuraavaan taulukkoon 1.

Taulukko 1. *EURO-päästöloukat vaikutusvuosineen sekä päästörajoineen. Mukailtu lähteistä ACEA (2021) ja Dieselnet (2021a).*

Luokka	Vuosi	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)	PN (#/kWh)	Savutus (m ⁻¹)
EURO I	1992	4,5	8,0	1,1	0,4	-	-
EURO II	1996	4,0	7,0	1,1	0,15	-	-
EURO III	2000	2,1	5,0	0,66	0,1	-	0,8
EURO IV	2006	1,5	3,5	0,46	0,02	-	0,5
EURO V	2009	1,5	2,0	0,46	0,02	-	0,5
EURO VI	2013	1,5	0,4	0,13	0,01	8,0x10 ⁻¹¹	-
EURO VII	(2025)	1,5	0,23	0,13	0,008	6,0x10 ⁻¹¹	-

Päästörajoihin on sittemmin otettu mukaan myös savutus EURO III alkaen. EURO VI alkaen huomioidaan myös hiukkasluku (PN, Particle Number) joka kuvaa hiukkasten lukumäärää per kilowattitunti. Hiilimonoksidin määrä on rajoitettu 1,5 g/kWh:hon jo EURO IV:n aikana, ja muita päästörajoja on asteittain kiristetty uuden luokituksen astuessa voimaan. Huomattavinta on typenoksidien vähentäminen: toistaiseksi niitä on onnistuttu vähentämään 5 %:iin alkuperäisestä.

Taulukkoon 1 on koottu myös Euroopan autonvalmistajien liiton ACEA:n (2021) ehdotus EURO VII:n päästörajoiksi. Rajoja hiukan tiukennettaisiin verrattuna EURO VI:hin, ja lisäksi typenoksidipäästöt pyrittäisiin puolittamaan sekä pienhiukaspäästöjä hiukan laskemaan.

4.2 Stage-luokitus

Moottorityökoneiden (NRMM, Non-Road Mobile Machinery) päästöjen sääntely alkoi EU-direktiivillä (97/68/EY), joka tuli voimaan 1997. Stage-luokitus alkoi vuonna 1999 käyttöönotetulla Stage I -luokalla. Viimeisin luokka on vuosina 2019–2020 voimaan tullut Stage V. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 1997)

Stage-luokitus pohjautuu vahvasti EURO-luokitukseen. Sen piiriin kuuluvat hiilimonoksidi, hiilivedyt, typenoksidit sekä pienhiukkaset. Stage III:n ja IV:n aikana myös ammoniakkipäästöt on otettu mukaan sääntelyyn. Luokituksen kiristyessä on otettu myös enemmän ajoneuvoluokkia sekä tehoalueita mukaan sääntelyn piiriin. Taulukkoon 2 on koottu luokitukset Stage I – II.

Taulukko 2. Päästöluokat Stage I-II voimaantuloaikoineen sekä päästörajoineen. Mukailtu lähteestä *Dieselnet (2021b)*.

Luokka	Vuosi	Nettoteho (kW)	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Stage I	1/1999	130 ≤ P ≤ 560	5,0	9,2	1,3	0,54
	1/1999	75 ≤ P < 130	5,0	9,2	1,3	0,70
	4/1999	37 ≤ P < 75	6,5	9,2	1,3	0,85
Stage II	1/2002	130 ≤ P ≤ 560	3,5	6,0	1,0	0,2
	1/2003	75 ≤ P < 130	5,0	6,0	1,0	0,3
	1/2004	37 ≤ P < 75	5,0	7,0	1,3	0,4
	1/2001	18 ≤ P < 37	5,5	8,0	1,5	0,8

Stage I otettiin käyttöön kokonaisuudessaan vuonna 1999, ja se koski kolmea eri tehoaluetta, joille oli omat päästörajansa. Pääosin rajat olivat melko lähellä toisiaan ja typenoksidiilla sekä hiilivedyillä ne olivat samat jokaisella tehoalueella.

Stage II otettiin käyttöön vuosien 2002–2004 aikana kaikille Stage I:n teholuokille. Lisäksi 2001 se otettiin käyttöön myös uudelle 18–37 kW:n tehoalueelle. Varastoon jääneille moottoreille myönnettiin 0–2 vuoden myyntiaika, jonka tarkan pituuden EU:n jäsenmaat saivat itse määrittää. Stage I:n ja Stage II:n rajat koskivat moottorista ulostulevia päästöjä ilman jälkikäsittelylaitteita. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 1997)

Päästoluokat Stage III ja IV julkaistiin vuonna 2004 EU-direktiivillä 2004/26/EC. Stage III jaettiin kahteen osaan: Stage III A ja B, joista A otettiin käyttöön vuodesta 2006 alkaen ja B 2011 alkaen. Näiden päästörajat on taulukoitu seuraavaan taulukkoon 3.

Taulukko 3. *Päästoluokat Stage III A ja B voimaantuloaikoiheen sekä päästörajoineen. Mukailtu lähteestä Dieselnets (2021b).*

Luokka	Vuosi	Nettoteho (kW)	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	NOx + HC (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Stage III A	1/2006	130 ≤ P ≤ 560	3,5	-	4,0	-	0,2
	1/2007	75 ≤ P < 130	5,0	-	4,0	-	0,3
	1/2008	37 ≤ P < 75	5,0	-	4,7	-	0,4
	1/2009	19 ≤ P < 37	5,5	-	7,5	-	0,6
Stage III B	1/2011	130 ≤ P ≤ 560	3,5	2,0	-	0,19	0,025
	1/2012	75 ≤ P < 130	5,0	3,3	-	0,19	0,025
	1/2012	56 ≤ P < 75	5,0	3,3	-	0,19	0,025
	1/2013	37 ≤ P < 56	5,0	-	4,7	-	0,025

Stage III A otettiin käyttöön vuosien 2006–2009 aikana järjestyksessä suurimmasta tehoalueesta pienimpään. Siinä ei tehty muutoksia hiilimonoksidipäästörajoihin, mutta pienhiukkasten rajaa kiristettiin 0,2 yksiköllä pienimmässä teholuokassa. Erillisistä typenoksidien ja hiilivetyjen rajoista luovuttiin, ja tässä vaiheessa rajoitettiin vain niiden yhteismäärää. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2004)

Stage III B:n yhteydessä määriteltiin kaksi uutta tehoaluetta. Aiempi 37–75 kW:n tehoalue jaettiin nyt 37–56 kW:n sekä 56–75 kW:n alueisiin. Näistä pienemmässä rajoitettiin vielä typenoksidien ja hiilivetyjen yhteismäärää, mutta suuremmassa sekä muissa teholuokissa siirryttiin rajoittamaan kumpaakin yksilöllisesti. Rajat tiukentuivat huomattavasti Stage II:sta: typenoksidien määrä noin puolitettiin ja hiilivetyjen määrä laskettiin alle viidesosaan alkuperäisestä. Pienhiukkasten määrä rajoitettiin alle 10 %:iin Stage II:n ja Stage III A:n rajoista. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2004)

Stage IV:n päästörajat on esitetty seuraavassa taulukossa 4.

Taulukko 4. Stage IV:n voimaantuloajat sekä päästörajat. Mukailtu lähteestä *Dieselnet (2021b)*.

Luokka	Vuosi	Nettoteho (kW)	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Stage IV	1/2014	130 ≤ P < 560	3,5	0,4	0,19	0,025
	10/2014	56 ≤ P < 130	5,0	0,4	0,19	0,025

Tässä vaiheessa päästörajoja yhtenäistettiin. Direktiivissä oli nyt vain kaksi tehoaluetta, 56–130 kW ja 130–560 kW, jotka erosivat toisistaan vain hiilimonoksidirajoiltaan. Edellisestä vaiheesta Stage IIIB typenoksidien rajaa kiristettiin noin kymmenesosaan alkupe-
räisestä. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2004)

Päästöjen testausta varten otettiin käyttöön kaksi testisykliä, NRSC (Non-Road Steady Cycle) eli työkoneiden vakio-tilainen testisykli sekä NRTC (Non-Road Transient Cycle) eli muuttuvatilainen sykli. Näillä tutkitaan edellä mainittujen (taulukko 4) päästöjen pitoisuuksia pakokaasussa. Vakio-tilaista sykliä käytetään päästöluokissa Stage I-III A, ja siinä otetaan näytteitä lämpimän moottorin käsittelemättömästä pakokaasusta eri kierros- ja kuormitusalueilla. Lisäksi mitataan pakokaasun virtaus ja teho, ja näille mitatuille arvoille määritetään painokertoimet. Hiukkasnäyte laimennetaan suodatetulla huoneilmalla. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2004)

Muuttuvatilaisessa syklissä pyritään mallintamaan oikeita moottorin toimintaolosuhteita. Se mitataan sekä moottorin kylmäkäynnistyksen yhteydessä että kuumakäynnistyksessä. Kylmäkäynnistyksen painokerroin on 0,10 ja kuumakäynnistyksen 0,90. Näiden yhdistettyjen ja painotettujen päästöjen on täytettävä taulukoiden 3 ja 4 mukaiset päästönormit. Testiä käytetään päästöluokissa Stage IIIB ja IV kaikille moottoreille vakio-nopeusmoottoreita lukuun ottamatta. Sitä voidaan myös käyttää valmistajan valinnan mukaan luokassa III A. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2004)

NRTC-testissä määritetään moottorin tekemä työ, johon suhteutetaan mitatut massapäästöarvot kunkin päästölajin osalta. Kaasumaisten päästöjen pitoisuus mitataan pääasiassa joko anturin avulla suoraan pakokaasusta tai pussinäytteestä. Hiukkaspäästöt mitataan laimennetusta pakokaasusta, josta on eritelty suhteellinen näyte suodattimeen. Massapäästöarvot ilmoitetaan yksikössä g/kWh. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2004)

Stage III ja IV sisälsivät myös rajan ammoniakkipäästöille (Nylund ym. 2016; Dieselnet 2021b). Päästöt eivät saaneet ylittää arvoa 25 ppm testisyklin aikana (Dieselnet 2021b).

Hiilidioksidipäästöt otettiin huomioon Stage IV:stä alkaen. Niiden määrää ei vielä rajoitettu, mutta valmistajien täytyi ilmoittaa se. Käytännössä hiilidioksidipäästöt tarkoittavat suoraan polttoaineenkulutusta. (Nylund ym. 2016)

Stage III:n ja IV:n myötä kiellettiin laitteet, jotka estävät tai hidastavat minkä tahansa jälkikäsitteilyjärjestelmän toimintaa tai heikentävät sen tehokkuutta. Myös ohjelmallisesti aiheutettu jälkikäsitteilyjärjestelmien tehon heikentäminen tai niiden sammuttaminen on kiellettyä. (Dieselnet 2021b)

Stage V on toistaiseksi uusiin päästöstandardi. Siinä moottorien luokittelu muuttui: eri käyttösovelluksiin tarkoitettut moottorit jaettiin omiksi ryhmikseen, joista tässä työssä tarkastellaan ryhmää NRE (Non-road Engine) eli työkonekäyttöön tarkoitettuja moottoreita. Stage V:n päästörajat on esitetty seuraavassa taulukossa 5.

Taulukko 5. Stage V:n päästörajat. Mukailtu lähteestä Dieselnet (2021b).

Ryhmä	Vuosi	Sytytys	Tehoalue (kW)	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)	PN (#/kWh)
NRE-v/c-1	2019	CI	$0 < P < 8$	8,0	$\text{NOx} + \text{HC} \leq 7,5$		0,4	-
NRE-v/c-2	2019	CI	$8 \leq P < 19$	6,6	$\text{NOx} + \text{HC} \leq 7,5$		0,4	-
NRE-v/c-3	2019	CI	$19 \leq P < 37$	5,0	$\text{NOx} + \text{HC} \leq 4,7$		0,015	$1 \cdot 10^{12}$
NRE-v/c-4	2019	CI	$37 \leq P < 56$	5,0	$\text{NOx} + \text{HC} \leq 4,7$		0,015	$1 \cdot 10^{12}$
NRE-v/c-5	2020	Kaikki	$56 \leq P < 130$	5,0	0,4	0,19	0,015	$1 \cdot 10^{12}$
NRE-v/c-6	2019	Kaikki	$130 \leq P < 560$	3,5	0,4	0,19	0,015	$1 \cdot 10^{12}$
NRE-v/c-7	2019	Kaikki	$P > 560$	3,5	3,5	0,19	0,045	-

Taulukossa merkintä NRE-v/c tarkoittaa työkone moottoria, joka on joko muuttuvanopeuksinen (v, variable) tai vakionopeuksinen (c, constant), kuten esimerkiksi generaattorikäytössä olevat moottorit. Merkintä CI (Compression Ignition) tarkoittaa puristussytytteistä eli useimmiten dieselmootoria. Nyt myös yli 56 kW:n kipinäsytytteiset moottorit oli otettu Stage-sääntelyyn. Stage V:n päästörajat koskevat käytännössä kaikkia EU:n alueelle myytäviä työkone moottoreita pienin poikkeuksin, esimerkiksi huvikäyttöön ja pienoismalleihin valmistetut moottorit ovat sääntelyn ulkopuolella. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2016)

Päästörajajen osalta ei tehty aikaisempiin luokkiin verrattuna suurempia muutoksia. Uutena mukaan otetut, 0–19 kW:n kaksi tehoaluetta saivat muita korkeammat hiilimonoksidin, yhdistettyjen typpioksidien ja hiilivetyjen sekä hiukkaspäästöjen rajat. Täysin uutena luokitukseen otettiin EURO VI:n ja VII:n tapaan hiukkasluku PN. Lisäksi Stage V velvoittaa valmistajia tekemään ISM-testejä (In Service Monitoring) eli tutkimaan työkoneen

aiheuttamia päästöjä oikeissa työolosuhteissa (Euromot 2020). Testit suoritetaan työkoneeseen erikseen testiä varten asennettavilla PEMS-laitteilla (Portable Emission Measurement System) (Euromot 2020; Hagan ym. 2022).

4.3 Muu sääntely

Yhdysvalloissa työkoneiden pakokaasupäästöjä säädellään Tier-päästöluokituksella, joka muistuttaa hyvin pitkälti Euroopan Stage-luokitusta. Tier-luokkia on toistaiseksi 4, jotka ovat päästörajoiltaan lähes identtisiä luokkien Stage I-IV kanssa. Neljäs luokka, Tier 4, jaetaan vielä Stage III:n tapaan alaluokkiin 4i (interim) ja 4f (final). (Wisell ym. 2018) Tier-luokkien raja-arvot ja säännellyt päästöt eroavat jonkun verran Stage-luokista. Esimerkiksi Tier 2:ssa asetettiin raja vapaasti hengittävien moottoreiden huohotukselle, eli kampikammioista tuleville päästöille (Wisell ym. 2018). Wisellin et al. (2018) mukaan Tier 4 sisältää myös vaatimuksia OBD-mittausten (On-board Diagnostics) käytöstä, eli ajoneuvon toiminnan tutkimisesta sen oman ajotietokoneen tiedoista.

Euroopan unionin uusiutuvan energian käytön RED ja RED II -direktiivit (Renewable Energy Directive) määrittävät biopolttoaineen jakeluelvoitteen asteittaisesta nostamisesta. Erityisesti RED II ohjaa moottorityökoneissakin polttoaineena käytettävän kevyen polttoöljyn biojakeluelvoitteen nostamisesta. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2018) Suomessa biopolttoöljyn jakeluelvoitetta säännellään lailla biopolttoöljyn käytön edistämisestä (418/2019). RED II -direktiivi liitettiin lakiin muutoksella (605/2021). Laki edistää biopolttoöljyn käyttöä velvoittamalla jakelijat toimittamaan vuosittaiseen kulutukseen säädetty vähimmäisosuus biopolttoöljyä, joka on vuonna 2021 3 % ja vuodesta 2028 eteenpäin vähintään 10 %. (Energiavirasto 2021) Työ- ja elinkeinoministeriö (2022) esittää kuitenkin jakeluelvoitteen nostoa jopa 30 %:iin vuonna 2030. Koska kevyttä polttoöljyä käytetään työkoneiden lisäksi kotitalouksien lämmitykseen ja kiinteästi asennettujen moottoreiden polttoaineena, tällä arvioidaan saavutettavan noin 0,5 miljoonan tonnin päästövähennyksiä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022).

5. PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELY MOOTORIRITYÖKONEISSA

Tässä luvussa perehdytään luvussa 3 esiteltujen pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmien ja luvussa 4 esitellyn pakokaasupäästöjen sääntelyn avulla siihen, miten jälkikäsitteily on kehittynyt moottorityökoneissa toistaiseksi ja miten se todennäköisesti tulee jatkossa kehittymään. Luvussa 5.1 perehdytään jälkikäsitteilyn kehittymiseen päästöluokittain ja luku 5.2 keskittyy jälkikäsitteilytekniikoiden soveltavuuteen moottorityökoneissa sekä niihin soveltamiseen liittyviin haasteisiin.

5.1 Pakokaasujen jälkikäsitteily päästöluokittain

Tässä aliluvussa perehdytään siihen, mitä jälkikäsitteilyjärjestelmiä kunkin Stage-luokituksen aikana on otettu käyttöön päästömääräysten täyttämiseksi. Luvussa 4.2 todettiin Stage I-II päästörajojen koskevan vain suoraan moottorista ulostulevia päästöjä. Nämä päästörajat saavutettiin pääosin moottorin ja polttoaineensyötön optimoinnilla, kuten common rail- eli yhteispaineruiskutuksella. Se tarkoittaa sitä, että polttoainelinjassa vallitsee jatkuvasti sama korkea paine, ja polttoainesumuttimien avautumista ohjataan sähköisesti. (Wisell ym. 2018) Koska nämä keinot eivät varsinaisesti ole pakokaasujen jälkikäsitteilyä, niihin ei perehdytä tässä työssä tämän enempää.

Päästömääräysten kiristyessä Stage IIIA:ssa moottorivalmistajat alkoivat ottaa käyttöön pakokaasun takaisinkierätyksjärjestelmiä (Reuter 2017; Wisell ym. 2018; John Deere 2022a). Tehokkaimmissa moottoreissa käytettiin jäähdytettyä takaisinkierätystä (cEGR, Cooled EGR). Pienissä moottoreissa ulkoiset, jäähdytetyt ja sisäiset (iEGR, Internal EGR) takaisinkierätyksjärjestelmät olivat yleisiä. (Wisell ym. 2018) Jotkin valmistajat ottivat jo tässä vaiheessa käyttöön SCR-teknologiaa. Esimerkiksi Valtra otti ensimmäisenä traktorivalmistajana käyttöön urea-SCR-järjestelmän S-sarjan maataloustraktoreissaan (Niskanen 2010; Valtra 2022).

Moottori- ja työkonevalmistajat jakautuivat pääosin kahteen ryhmään vastatessaan Stage IIIB:n vaatimuksiin. Edelleen jatkettiin pakokaasun takaisinkierätyksen hyödyntämistä, mutta sen lisäksi SCR-järjestelmät alkoivat yleistyä. (Schrewe ym. 2017; Wisell ym. 2018; Jaussi 2021) Takaisinkierätyksen valinneet valmistajat ottivat käyttöön hapeuskatalyysaattoreita sekä mahdollisesti myös hiukkassuodattimia suurimpiin moottoreihin (Härkönen 2012; Reuter 2017; Wisell ym. 2018; Jaussi 2021).

Stage IV:ssä jatkettiin edellisestä vaiheesta tuttujen teknologioiden hyödyntämistä. Tiukentuneiden typenoksidirajojen takia SCR:n rinnalla saatettiin käyttää jäähdytettyä EGR:ää. (Wisell ym. 2018) Esimerkiksi Volvo Penta -moottoreissa päädyttiin käyttämään SCR:ää sekä kevyttä pakokaasun takaisinkieräytystä (light-EGR) (Volvo Penta 2022). Pääosin Stage IV:n aikana käytetyt tekniikat jakautuivat neljään ryhmään (Nylund ym. 2016):

1. DOC + cEGR
2. DOC + DPF + cEGR
3. DOC + SCR
4. DOC + SCR + DPF + cEGR.

Näistä kohdassa 3 on Nylundin et al. (2016) mukaan ollut käytössä myös ulkoista cEGR:ää.

Stage V:n myötä tiukentuneet hiukkaspäästöjen rajat ja uutena sääntelyyn otettu hiukkasluku tarkoittavat käytännössä hiukkassuodattimien pakollisuutta moottorityökoneissa (Nylund ym. 2016; Hydac International 2017; Reuter 2017; Wisell ym. 2018). Nylundin et al. (2016) mukaan vallitseva jälkikäsitteilyketju Stage V:ssä on DOC + SCR + DPF. Tosin esimerkiksi John Deere käyttää useimmissa moottoreissaan kyseisen ketjun lisäksi cEGR:ää (John Deere 2022b).

5.2 Moottorityökoneisiin sovittamisen haasteet

Luvussa 3 esitellyt jälkikäsitteilyjärjestelmät on otettu käyttöön usein ensin raskaassa liikenteessä, kuten kuorma-autoissa (Cartus ym. 2007). Niitä ei välttämättä ole voitu ottaa sellaisenaan käyttöön moottorityökoneissa, sillä yleensä työkoneita käytetään erilaisissa olosuhteissa ja kuormitusalueilla verrattuna raskaaseen liikenteeseen. Työkoneiden on moottoreineen ja jälkikäsitteilylaitteineen kestävä pölyisiä työympäristöjä, painepe-surilla pesua, mekaanista tärinää ja usein epätasaisesta maastosta aiheutuvaa ajoneuvon liikehdintää. (Cartus ym. 2007; Nylund ym. 2016; Wisell ym. 2018)

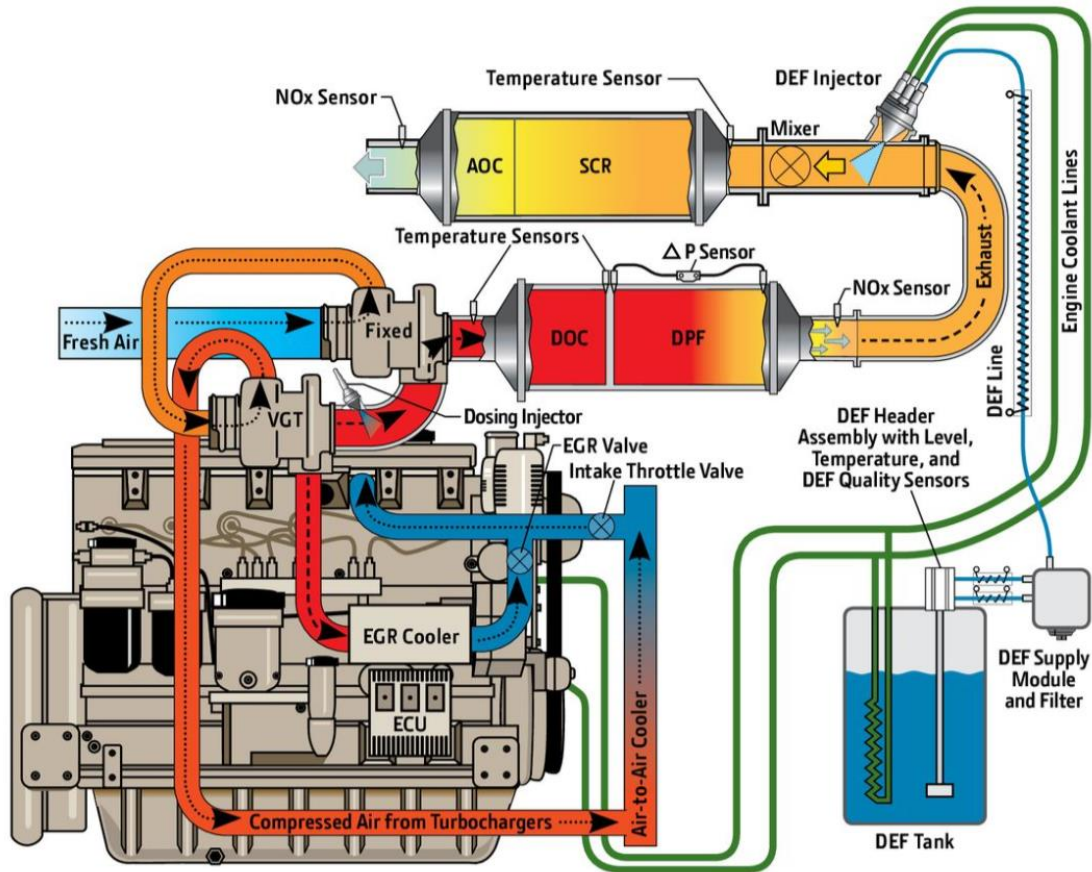
Vaativat olosuhteet tarkoittavat usein sitä, että jälkikäsitteilyjärjestelmät täytyy suojata asianmukaisesti. Koska järjestelmät sijaitsevat pakoputkistossa, ne kuumenevat pakokaasun lämpötilan mukaan. Moottorityökoneita saatetaan käyttää hyvin erilaisilla teho- ja vääntöalueilla, joten myös pakokaasun lämpötila vaihtelee. Erityisesti DPF:n regeneraation aikana se voi nousta 600–700°C:een, kun se muuten tyypillisesti vaihtelee 150–350°C:n välillä. Suuret lämpötilavaihtelut rasittavat sekä itse pakoputkiston kom-

ponentteja että niiden ympärillä olevia osia, kuten konepeittoa. Lisäksi kuumat osat täytyy suojata hyvin erityisesti leikkuupuimureissa, joita käytetään herkästi syttyvässä viljanpölyssä. (Wisell ym. 2018)

Esimerkiksi kaivinkoneita käytetään lähes paikallaan, minkä takia moottorin ohi ei virtaa vapaasti jäähdytysilmaa käytännössä ollenkaan. Tällaisissa tapauksissa moottorin ja sen lisälaitteiden jäähdytys on täysin tuulettimen ja nestejäähdyttimen varassa. Tämä puolestaan lisää polttoaineenkulutusta, sillä tuuletin joudutaan usein suunnittelemaan suuremmaksi kuin esimerkiksi raskaan liikenteen ajoneuvoissa. Tuulettimen aiheuttama lisäys polttoaineenkulutukseen on yksi syy sille, miksi cEGR:n käyttö ei ole kaikissa työkonereissa mielekästä. (Nylund ym. 2016; Wisell ym. 2018)

Toisaalta kuumien olosuhteiden lisäksi myös viileät olosuhteet aiheuttavat ongelmia etenkin SCR:n toimivuudelle. Esimerkiksi metsäkoneet saatetaan jättää metsätyömaille vuoron päätteeksi talvellakin, jolloin ongelmana on seuraava kylmäkäynnistys ja sitä seuraava aika, joka moottorilla ja jälkikäsittelylaitteistolla kuluu lämpenemiseen. Urealiuoksen (32,5 %) sulamispiste on -11°C , jolloin se todennäköisesti pääsee jäätymään kovilla pakkasilla ilman erillistä säiliön lämmitystä (aus der Wiesche 2007). Itse kylmäkäynnistyksestä aiheutuu Prestin (2019) mukaan 90 % NO_x -päästöistä ensimmäisen 600 sekunnin aikana.

Olosuhteiden asettamien haasteiden lisäksi jälkikäsittelyjärjestelmien kasvanut koko aiheuttaa haasteita. DPF:n ja katalysaattoreiden koko yleensä kasvaa moottorin litratilavuuden kasvaessa, joten suurissa moottoreissa jälkikäsittelylaitteisto saattaa vaatia huomattavan suuren tilan. Laitteiston kokoa on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. John Deeren 9,0 ja 13,5 litraisten PowerTech PSS -moottoreiden jälkikäsitelyjärjestelmä (John Deere 2022b).

John Deere on tässä tapauksessa valinnut jälkikäsitelyketjuun cEGR:n, yhdistetyn hapetuskatalysaattorin ja hiukkassuodattimen, SCR:n sekä siihen yhdistetyn ammoniakki hapetuskatalysaattorin AOC (Ammonia Oxidation Catalyst). Kuvassa urealiuoksesta käytetään lyhennettä DEF (Diesel Exhaust Fluid).

Jälkikäsitelylaitteiden sovitusta aiheuttaa suuria haasteita myös viinitarhoille tai muihin ahtaisiin tiloihin tarkoitettujen traktoreiden suunnittelussa. Nämä niin sanotut kapean raidevälin tai korkean maavaran traktorit (ajoneuvoluokat T2, C2 ja T4.1) saivat oman erityishuomionsa Stage V:ssä: 56–130 kW:n tehoalueen traktoreille myönnettiin oikeus käyttää siirtymävaiheen moottoreina Stage IIIB - tai IV-moottoreita 1.7.2021 asti, jos moottori oli valmistettu ennen 1.1.2020. 1.7.2021 jälkeen valmistetuissa traktoreissa täytyi käyttää Stage V -moottoreita. Menettely ei koskenut yli 130 kW:n tehoisia kapean raidevälin tai korkean maavaran traktoreita. (Stone 2015; CEMA 2018)

6. JÄLKIKÄSITTELY JA PÄÄSTÖNVÄHENNYSKEI- NOT TULEVAISUUDESSA

Tässä luvussa käsitellään mahdollisia lisätoimia moottorityökoneiden päästöjen edelleen pienentämiseksi. Aliluvussa 6.1 selvitetään, onko Stage-luokitukseen suunnitteilla lisävaiheita sekä pohditaan mahdollisia niihin sisällytettäviä toimia. Seuraavassa aliluvussa käsitellään jälkikäsitteilylaitteiden jälkiasentamista, jota pystytään soveltamaan pienessä mittakaavassa, mutta joka toistaiseksi ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa yleisellä tasolla tämänhetkisen lainsäädännön ja tyyppihyväksyntäkäytäntöjen takia.

6.1 Stage-luokituksen edelleen korottaminen

Toistaiseksi ei juurikaan ole saatavilla virallista tietoa mahdollisesta Stage VI -päästövaiheesta. The Institution of Agricultural Engineersin (IAgrE) Landwards-konferenssissa vuonna 2021 AGCO Power sivusi aihetta ja esitteli mahdollisuuksia tulevaisuuden sääntelyyn (Ratia 2021). Ratian (2021) konferenssiartikkelissa arvioidaan Stage VI:ssä typenoksidien ja hiukkaspäästöjen rajojen pysyvän Stage V:n tasolla. Toisaalta aiemmin luvussa 4.1 esiteltyn mahdolliseen EURO VII -luokitukseen pohjaten Stage-luokitusta voisi vielä kiristää juuri hiukkaspäästöjen osalta. Lisäksi 0–56 kW:n moottoreissa huomioidaan tällä hetkellä hiilivetyjen ja typenoksidien yhteismäärä, joka voitaneen jakaa erilleen ja kiristää seuraavassa mahdollisessa Stage-luokassa. Tällä hetkellä EURO VII on tosin vasta suunnitteilla, mutta mikäli se otetaan käyttöön, voisi samansuuntaisia päästövähennyksiä odottaa myös Stage-luokitukseen.

Ratian (2021) konferenssiartikkelin mukaan hiilidioksidipäästöihin olisi mahdollisesti suunnitteilla 15–30 %:n vähennys. Lisäksi kaikkia reaaliaikaisia päästöjä mahdollisesti seurattaisiin (Ratia 2021). Nylundin et al. (2016) tutkimuksen mukaan hiilidioksidipäästöt ovat suoraan verrannollisia polttoaineenkulutukseen, joten pienentämällä niitä voitaisiin säästää polttoainekuluissa. Heidän mukaansa moottoritasolla CO₂-päästöissä ei kuitenkaan ole suurta vähennyspotentiaalia, joten huomio tulisi kiinnittää työkonetasolle. Eri-tyisesti kuljettajaa avustavat ja tukevat järjestelmät voisivat parantaa työkoneiden energiatehokkuutta. Tällä tapaa voitaisiin CO₂-päästöjä vähentää jopa 35 %. (Nylund ym. 2016)

6.2 Jälkikäsitteilylaitteiden jälkiasentaminen

Jälkikäsitteilylaitteiden jälkiasennus (eng. ”retrofitting”) tarkoittaa jälkikäsitteilylaitteiden asentamista moottoriin tai työkoneeseen, jossa kyseisiä laitteita ei alun perin ole ollut. Toistaiseksi lainsäädäntötasolla ei vaadita jälkikäsitteilylaitteiden jälkiasennusta vanhoihin työkoneisiin tai alempien Stage-luokitustasojen korottamiseksi. Jälkiasentaminen on kuitenkin mahdollista, ja niillä on onnistuneesti vähennetty päästöjä, tosin lähinnä yksittäistapauksissa paikallisesti (Kubsh 2017; Wisell ym. 2018).

Yleisellä tasolla moottorin Stage-luokituksen korottaminen ei Nylundin (2022) AMK-opinnytetyön perusteella kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa, sillä Stage V -luokituksen saaminen vaatisi päästöjen virallista testaamista. Lisäksi virallisen hyväksynnän saaminen tai Stage-luokan korottaminen ylipäänsä vaatisi moottorin tyyppihyväksynnän muuttamista, jota Nylundin (2022) mukaan vain valmistaja voi hakea.

Nykyään yleistyvää Päästöttömät työmaat green deal -työmaakonseptia noudattavilla työmailla vaaditaan tietyn päästöluokan vaatimusten täyttäviä työkoneita. Sen mukaan tällä hetkellä uusilla työmailla tulisi käyttää vähintään Stage IV:n täyttävää kalustoa. Paikallisesti on mahdollista sopia käytettävän alempien päästöluokkien työkoneita esimerkiksi asfaltin levittämisessä. (KEINO 2022) Tällaisessa tapauksessa jälkikäsitteilylaitteiden jälkiasentaminen voisi olla perusteltua, mikäli siitä voidaan paikallisesti päästä sopuun ja päästöjen vähentäminen pystytään osoittamaan. Suomessa on Nylundin et al. (2016) sekä Pihlatien et al. (2022) mukaan käytössä huomattavan paljon vanhoja työkoneita, joten esimerkiksi vanhaa kalustoa omistava pieni aliurakoitsija saattaisi hyötyä menettelystä. Toisaalta päästöjen vähenemisen virallisesti todentaminen vaatisi testaamista, mikä on kallista eikä taloudellisesti kannattavaa ilman omaa asennus- ja testauslinjaa (Nylund 2022).

6.3 Vaihtoehtoiset polttoaineet, hybridisaatio ja sähköistyminen

Vaihtoehtoisia polttoaineita ovat esimerkiksi fossiiliset maakaasu ja nestekaasut sekä uusiutuvat biopolttoaineet, kuten biokaasu, -diesel tai -polttoöljy. Niillä ei Nylundin et al. (2016) mukaan ole juuri vaikutusta työkoneen polttoaineen kulutukseen, mutta jäte- tai tähdepohjaisilla nestemäisillä biopolttoaineilla pystytään vähentämään polttoaineiden koko elinkaaren aikaisia kasvihuonepäästöjä 80–90 %. Nämä niin sanotut drop-in-polttoaineet sopivat sellaisenaan käytettäväksi työkoneissa, ja olisivatkin hyvä keino vähentää niiden hiilidioksidipäästöjä (Nylund ym. 2016; Pihlatie ym. 2022). AGCO Power julkaisi syksyllä 2022 uuden CORE-moottoriperheensä, joka on sellaisenaan sopiva uusiutuville drop-in-polttoaineille. Uusiutuvia polttoaineita käyttämällä voidaan yhtiön mukaan

vähentää kasvihuonepäästöjä jopa 90 %. Lisäksi moottoreita on mahdollista jatkokehittää toimimaan vedyllä ja biokaasulla. (Vesterinen 2022)

(Wisell ym. 2018) mukaan hybridisaatio eli sähkön ja polttomoottorin yhdistelmä toimisi moottorityökoneissa hyvin, sillä osa toiminnoista on helppo toteuttaa sähkömoottorin avulla. Esimerkiksi ajovoimansiirron voi toteuttaa sähkömoottoreilla, mikä myös poistaa mekaanisissa vaihteistoissa tapahtuvat energiahäviöt, sillä sähköinen voimansiirto ei tarvitse perinteistä vaihteistoa (Wisell ym. 2018). Voimansiirron sähköistäminen tai hybridisaatio voisi (Nylund ym. 2016) mukaan vähentää hiilidioksidipäästöjä jopa 50 %.

Työkoneiden kokonaan sähköistämistä on sovellettu jo jonkin aikaa esimerkiksi haarukkatrukeissa. Esimerkiksi saksalaisen Jungheinrichin malliston pienimmät trukit ovat lähes yksinomaan sähköisiä (Jungheinrich 2022). Sähköiset työkoneet eivät käytön aikana aiheuta luonnollisesti lainkaan pakokaasupäästöjä (Wisell ym. 2018). Ponsse julkaisi elokuussa 2022 täyssähköisen metsäkoneen, jonka akkujen lataamiseen käytetään tois-
taiseksi polttomoottoria (Ponsse 2022). Moottorityökoneiden sähköistyminen on varsin tuore aihe, jota tutkitaan tiiviisti myös Tampereen yliopistossa (Vilkko & Nieminen 2021; Minav & Handroos 2022).

7. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia, miten pakokaasujen jälkikäsittely on kehittynyt moottorityökoneiden dieselmootoreissa. Apuna tämän tutkimiseen käytettiin moottorityökoneiden päästöjä koskevaa EU-tason lainsäädäntöä sekä yleisimpien käytössä olevien jälkikäsittelylaitteiden teoriaa. Lisäksi tietoa näiden laitteiden soveltamisesta moottorityökoneisiin etsittiin esimerkiksi valmistajien verkkosivuilta. Työn toisena tavoitteena oli tutkia, miten pakokaasujen jälkikäsittely ja tulee kehittymään noin seuraavan 10 vuoden aikana. Tähän käytettiin pohjana raskaiden ajoneuvojen EURO VII -päästötasoa, jonka raja-arvot tulevat mahdollisesti osoittamaan suuntaa myös työkoneiden seuraavan Stage-luokan raja-arvoille. Myös työkoneiden vaihtoehtoisia polttoaineita, hybridisaatiota ja sähköistymistä tutkittiin.

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen saatiin vastaus varsin helposti, sillä valmistajien välillä ei ole paljoa eroja jälkikäsittelylaitteiden valinnassa. Stage-luokituksen raja-arvot ovat asteittain tiukentuneet, minkä seurauksena Stage IIIA -vaiheesta lähtien jälkikäsittelyä on alettu hyödyntämään. Yleisimmin käytetyt jälkikäsittelyjärjestelmät ovat EGR, DOC, DPF ja SCR. Jälkikäsittely on varsin uutta teknologiaa, ja esimerkiksi SCR:ää on hyödynnetty työkoneissa vasta reilun vuosikymmenen ajan. Teknologia on siis vielä pitkälti kehitysvaiheessa, ja kehityksessä on panostettava varsinkin katalysaattoreiden koon pienentämiseen sekä luotettavuuden parantamiseen. Dieselmoottori vaikuttaa olevan tulevaisuudessakin moottorityökoneiden ensisijainen voimanlähde, joten jälkikäsittelyä on kuitenkin jatkettava, mikäli päästöjen hallinta ja vähentäminen eivät muulla tapaa onnistu.

Toiseen tutkimuskysymykseen vastaaminen oli aiemman ja nykyisen sääntelyn osalta helppoa, mutta tulevaisuuden osalta lähinnä arvailua. Jo olemassa oleviin työkoneiden Stage-luokituksiin on tuskin odotettavissa suuria tiukennuksia. Sen sijaan hiilidioksidipäästöjä saatetaan alkaa rajoittamaan seuraavan 10 vuoden aikana, minkä takia moottorin ja työkoneen käytön optimointia on hyvä tehostaa esimerkiksi lisäämällä automaatiota. Biopolttoaineilla ja muilla uusiutuvilla polttoaineilla voidaan myös saavuttaa merkittäviä vähennyksiä hiilidioksidipäästöihin.

Työssä sivuttiin myös toistaiseksi vapaaehtoista jälkikäsittelylaitteiden jälkiasentamista jo käytössä oleviin vanhempiin ja alempien päästötasojen työkoneisiin. Se todettiin mahdolliseksi ja sitä on joissain tapauksissa myös tehty, mutta laajasti sen käyttö ei lainsäädä-

dännön takia ole vielä mahdollista. Myös työkoneiden laaja kirjo hankaloittaa jälkikäsitelylaitteiden jälkeensä sovittamista niihin. Sähköistymistä ja hybridisaatiota sivuttiin myös jonkin verran. Ne ovat vielä uusia tekniikoita, joita on sovellettu lähinnä pienissä työkoneissa. Kiinnostusta on kuitenkin myös suurten koneiden sähköistämiseen, ja esimerkiksi Ponsse julkisti aiemmin tänä vuonna ensimmäisen täyssähköisen metsäkoneensa.

LÄHTEET

- Abd-Alla, G.H. (2002). Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review. *Energy Conversion and Management*, 43 (8), 1027–1042. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00091-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00091-7)
- ACEA (2021). ACEA Proposal for Euro VII. ACEA. https://www.acea.auto/files/ACEA_proposal_for_EuroVII.pdf [2022-11-01]
- Barbosa, F.C. (2020). Heavy Duty Diesel Emission Standards Regulation Evolution Review - Current Outcomes and Future Perspectives. *Proceedings of 2019 SAE Brasil Congress & Exhibition*, tammikuuta 13 2020. 2019-36–0174. <https://doi.org/10.4271/2019-36-0174>
- Bauner, D., Laestadius, S. & Iida, N. (2009). Evolving technological systems for diesel engine emission control: balancing GHG and local emissions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 11 (3), 339–365. <https://doi.org/10.1007/s10098-008-0151-x>
- Bendrich, M., Opitz, B., Scheuer, A., Hayes, R.E. & Votsmeier, M. (2022). Selective catalytic reduction: Adding an ammonia slip catalyst mitigates dosing errors. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 100 (6), 1439–1447. <https://doi.org/10.1002/cjce.24293>
- Brzeżański, M. & Sala, R. (2016). A study on the indirect urea dosing method in the Selective Catalytic Reduction system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 148, 012062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/148/1/012062>
- Cartus, T., Herrmuth, H., Scherm, P. & Stein, G. (2007). Concepts to meet non-road stage IV / Tier 4 emission legislation. *MTZ worldwide*, 68 (12), 13–16. <https://doi.org/10.1007/BF03226874>
- CEMA (2018). Frequently Asked Questions on exhaust emission requirements for tractors. CEMA. <https://www.euromot.eu/wp-content/uploads/2018/12/CEMA-Stage-V-FAQ-tractors-Dec-2018.pdf>
- Dieselnet (2021a). *Emission Standards EU: Heavy-Duty Truck and Bus Engines*. Dieselnet. <https://dieselnet.com/standards/eu/hd.php> [2022-11-01]
- Dieselnet (2021b). *Emission Standards EU: Nonroad Engines*. Dieselnet. <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#s5> [2022-11-01]
- Dubey, A., Ahmad Ansari, N., Kumar, G., Arora, A. & Sharma, A. (2019). A Review on Performance and Emission of CI Engine using Exhaust gas recirculation (EGR). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 691 (1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/691/1/012028>
- Energiavirasto (2021). Jakeluvolveoiteohje. Energiavirasto. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/103079467/Jakeluvolveoiteohje.pdf/7316f5d4-d6bc-643d-d07c-8729a30f57f7/Jakeluvolveoiteohje.pdf?t=1640179532636> [2022-12-14]
- Euromot (2020). FAQ In-service monitoring. The European Association of Internal Combustion Engine Manufacturers. <https://www.euromot.eu/wp-content/uploads/2020/03/FAQ-In-Service-Monitoring-2020-03-03.pdf> [2022-12-05]
- Euroopan parlamentti ja neuvosto (1997). EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 97/68/EY, annettu 16 päivänä joulukuuta 1997, liikkuviin työkooneisiin asennettavien polttomoottoreiden kaasu- ja hiukkaspäästöjen torjuntatimenpiteitä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä. *Euroopan yhteisöjen virallinen lehti*, 1998, 1–85
- Euroopan parlamentti ja neuvosto (2004). EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 2004/26/EY. *Euroopan yhteisöjen virallinen lehti*, 2004.

- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CE-LEX:32004L0026&from=EN> [2022-11-05]
- Euroopan parlamentti ja neuvosto (2016). EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) 2016/1628, annettu 14 päivänä syyskuuta 2016, liikkuviin työkoneisiin tarkoitettujen polttomoottoreiden kaasu- ja hiukkaspäästöjen raja-arvoihin ja tyyppihyväksyntään liittyvistä vaatimuksista, asetusten (EU) N:o 1024/2012 ja (EU) N:o 167/2013 muuttamisesta ja direktiivin 97/68/EY muuttamisesta ja kumoamisesta. *Euroopan yhteisöjen virallinen lehti*, 53–117
- Euroopan parlamentti ja neuvosto (2018). EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI (EU) 2018/2001, annettu 11 päivänä joulukuuta 2018, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (uudelleenlaadittu). *Euroopan yhteisöjen virallinen lehti*, 82–208
- Gao, C., Shi, J.-W., Fan, Z., Gao, G. & Niu, C. (2018). Sulfur and Water Resistance of Mn-Based Catalysts for Low-Temperature Selective Catalytic Reduction of NOx: A Review. *Catalysts*, 8 (1), 11. <https://doi.org/10.3390/catal8010011>
- Grewe, V., Dahlmann, K., Matthes, S. & Steinbrecht, W. (2012). Attributing ozone to NOx emissions: Implications for climate mitigation measures. *Atmospheric Environment*, 59, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.002>
- Guan, B., Zhan, R., Lin, H. & Huang, Z. (2014). Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NOx from diesel engine exhaust. *Applied Thermal Engineering*, 66 (1–2), 395–414. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.021>
- Guan, B., Zhan, R., Lin, H. & Huang, Z. (2015). Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines. *Journal of Environmental Management*, 154, 225–258. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.027>
- Hagan, R., Markey, E., Clancy, J., Keating, M., Donnelly, A., O'Connor, D.J., Morrison, L. & McGillicuddy, E.J. (2022). Non-Road Mobile Machinery Emissions and Regulations: A Review. *Air*, 1 (1), 14–36. <https://doi.org/10.3390/air1010002>
- Han, L., Cai, S., Gao, M., Hasegawa, J., Wang, P., Zhang, J., Shi, L. & Zhang, D. (2019). Selective Catalytic Reduction of NO_x with NH₃ by Using Novel Catalysts: State of the Art and Future Prospects. *Chemical Reviews*, 119 (19), 10916–10976. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00202>
- Herreros, J.M., Gill, S.S., Lefort, I., Tsolakis, A., Millington, P. & Moss, E. (2014). Enhancing the low temperature oxidation performance over a Pt and a Pt–Pd diesel oxidation catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 147, 835–841. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.10.013>
- Honkanen, M., Wang, J., Kärkkäinen, M., Huuhtanen, M., Jiang, H., Kallinen, K., Keiski, R.L., Akola, J. & Vippola, M. (2018). Regeneration of sulfur-poisoned Pd-based catalyst for natural gas oxidation. *Journal of Catalysis*, 358, 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.12.021>
- Hydac International (2017). Questions and Answers on the New EU Emission Legislation for Mobile Devices. <https://www.hydac.com/fileadmin/pdb/pdf/PRO0000000000000000000013200030011.pdf> [2022-11-16]
- Härkönen, H. (2012). Päästöt yhä tiukempaan kuriin. *Koneviesti*. 2012 (2), 42–46
- Jaussi, F. (2021). Emission Technology of non-road mobile machinery in EU and other markets. *Proceedings of 11th VERT Forum | eConference on March 25th 2021*, maaliskuuta 25 2021. vert-dpf. https://www.vert-dpf.eu/j3/images/pdf/VERT_Forum_2021/VERT-Forum-2021_EM03.pdf [2022-11-16]
- Jeguirim, M., Tschamber, V., Brillhac, J.F. & Ehrburger, P. (2005). Oxidation mechanism of carbon black by NO₂: Effect of water vapour. *Fuel*, 84 (14–15), 1949–1956. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.026>
- John Deere (2022a). Lesser-Regulated Diesel Engines. John Deere. <https://www.deere.fi/assets/publications/index.html?id=a8f3b979#1> [2022-11-18]

- John Deere (2022b). Off-Highway Diesel Engine Ratings. <https://www.deere.fi/assets/publications/index.html?id=6234d029#1> [2022-11-18]
- Joshi, A. (2020). Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions. *Proceedings of WCX SAE World Congress Experience*, huhtikuuta 14 2020. 2020-01–0352. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0352>
- Jungheinrich (2022). *Sähkötrikit ja sähkökäyttöiset vastapainotrukit*. <https://www.jungheinrich.fi/tuotteet/trikit-yhdellae-silmaeyksellae/saehkoe-ja-polttomoottorikaeyttoeiset-vastapainotrukit/saehkoetrukit-ja-vastapainotrukit> [2022-12-14]
- KEINO (2022). Päästöttömät työmaat green deal - työmaakonsepti. KEINO-Osaamiskeskus. https://www.hankintakeino.fi/sites/default/files/media/file/Paastottomat_tyomaat_green_deal_tyomaakonsepti_1.0_0.pdf
- Khair, M.K. (2003). A Review of Diesel Particulate Filter Technologies. *Proceedings of Future Transportation Technology Conference & Exposition*, kesäkuuta 23 2003. 2003-01–2303. <https://doi.org/10.4271/2003-01-2303>
- Khosravi, M., Abedi, A., Hayes, R.E., Epling, W.S. & Votsmeier, M. (2014). Kinetic modelling of Pt and Pt:Pd diesel oxidation catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 154–155, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.02.001>
- Kubsh, J. (2017). Diesel Retrofit Technologies and Experience for On-road and Off-road Vehicles. The International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Diesel-Retrofits_ICCT_Consultant-Report_13062017_vF.pdf [2022-12-12]
- Lamharess, N., Millet, C.-N., Starck, L., Jeudy, E., Lavy, J. & Da Costa, P. (2011). Catalysed diesel particulate filter: Study of the reactivity of soot arising from biodiesel combustion. *Catalysis Today*, 176 (1), 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.01.011>
- Majewski, W.A. (2018). *Urea Dosing and Injection Systems*. *DieselNet*. https://dieselnet.com/tech/cat_scr_diesel_urea_dosing.php [2022-11-11]
- Majewski, W.A. (2021). Electrically Regenerated Filters. *DieselNet Technology Guide*. DieselNet. https://dieselnet.com/tech/dpf_electric.php [2022-10-22]
- Maunula, T. (2013). Intensification of Catalytic Aftertreatments Systems for Mobile Applications. *Proceedings of SAE 2013 World Congress & Exhibition*, huhtikuuta 8 2013. 2013-01–0530. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0530>
- Minav, T. & Handroos, H. (2022). Liikkuvien työkoneiden sähköistämiseen tarvitaan kokonaisvaltaista suunnittelua, analyysia ja bisnesajattelua. Tampereen yliopisto. <https://www.tuni.fi/fi/ajankohtaista/liikkuvien-tyokoneiden-sahkoistamiseen-tarvitaan-kokonaisvaltaista-suunnittelua> [2022-12-14]
- Motiva (2022). *Työkoneet*. [motiva.fi](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/tyokoneet). https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/tyokoneet [2022-11-01]
- Niskanen, H. (2010). *60 vuotta Valtran värikkäitä vaiheita*. 1. Laukaa: Bookwellin kirjapaino Porvoo. [2022-11-16]
- Nylund, N.-O., Söderena, P. & Rahkola, P. (2016). *Työkoneiden CO₂ päästöt ja niihin vaikuttaminen*. (TransSmart koordinaatio/Helpdesk, VTT-R-04745-16). Espoo: VTT. <https://www.ym.fi/download/noname/%7BEC3AFE90-B3FC-446B-90C3-4A8B253B4256%7D/125900> [2022-11-11]
- Nylund, O. (2022). *Moottorityökoneiden päästöluokitukset ja luokituksen korottaminen*. (AMK-opinnäyte). TAMK. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/753176/Nylund_Oliver.pdf?sequence=3 [2022-12-12]
- Olabi, A.G., Maizak, D. & Wilberforce, T. (2020). Review of the regulations and techniques to eliminate toxic emissions from diesel engine cars. *Science of The Total Environment*, 748, 141249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141249>
- Pihlatie, M., Nylund, N.-O., Söderena, P., Markkanen, J., Rahkola, P., Åman, R., Muona, T., Pettinen, R., Naumanen, M., Shah, S. & Baranauskas, M. (2022). *Työkoneiden kustannustehokkaat päästövähennyskeinot*. (Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja, 2022:63). Helsinki: Valtioneuvoston kanslia.

- https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164372/VNTEAS_2022_63.pdf?sequence=1&isAllowed=y [2022-12-12]
- Ponsse (2022). *Ponsselta teknologialanseeraus: sähkökäyttöinen metsäkone. ponsse.com*. [Valmistajan verkkosivu]. https://www.ponsse.com/fi/yhtio/uutiset/a_p/P4s3zYhpxHUQ/c/ponsse-launches-new-technology-an-electric-forest-machine#/ [2022-12-14]
- Presti, M. (2019). Optimizing the Exhaust Gas Aftertreatment of Future Agricultural Machinery. *ATZheavy duty worldwide*, 12 (4), 38–41. <https://doi.org/10.1007/s41321-019-0047-1>
- Ratia, J. (2021). Electricity and Hydrogen – Potential future energy sources for agricultural machines. *Proceedings of IAgRE Landwards Conference 2021*, Online, marraskuuta 3 2021. Online: IAgRE. <https://iagre.org/upload/1636385623.pdf> [2022-12-01]
- Reşitoğlu, İ.A., Altinişik, K. & Keskin, A. (2015). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17 (1), 15–27. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>
- Reuter, F. (2017). *EU & US Emission Standards For Diesel Engines In Forest Machines. forestry.com*. <https://www.forestry.com/editorial/equipments/eu-us-emission-standards-diesel-engines-forest-machines/> [2022-11-16]
- Rose, D., Jamison, J.A., Boger, T. & Kataria, R. (2013). Light Duty Diesel Exhaust Gas After Treatment Challenges and Technologies for Post BS-IV Regulations. *Proceedings of Symposium on International Automotive Technology 2013*, tammiukuuta 9 2013. 2013-26–0051. <https://doi.org/10.4271/2013-26-0051>
- Sala, R., Bielaczyc, P. & Brzezanski, M. (2017). Concept of Vaporized Urea Dosing in Selective Catalytic Reduction. *Catalysts*, 7 (10), 307. <https://doi.org/10.3390/catal7100307>
- Sarvi, A., Lyyränen, J., Jokiniemi, J. & Zevenhoven, R. (2011). Particulate emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 1. Particle size distribution. *Fuel Processing Technology*, 92 (10), 1855–1861. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.04.031>
- Schrewe, K., Lamotte, D., Kästner, T. & Zirkwa, I. (2017). Exhaust aftertreatment according to EU Stage IV for an EU Stage III B basic engine. *ATZoffhighway worldwide*, 10 (4), 44–49. <https://doi.org/10.1007/s41321-017-0048-x>
- Sharma, M., Agarwal, A. & Bharathi, K. (2005). Characterization of exhaust particulates from diesel engine. *Atmospheric Environment*, 39 (17), 3023–3028. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.047>
- Stadlbauer, S., Waschl, H., Schilling, A. & del Re, L. (2013). DOC Temperature Control for Low Temperature Operating Ranges with Post and Main Injection Actuation. *Proceedings of SAE 2013 World Congress & Exhibition*, huhtikuuta 8 2013. 2013-01–1580. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1580>
- Stone, T. (2015). Battle in the European Parliament over narrow-track tractors. *International Industrial Vehicle Technology*. 2015. <https://www.ivtinternational.com/news/agriculture/battle-in-the-european-parliament-over-narrow-track-tractors.html> [2022-12-02]
- Tang, T., Cao, D., Zhang, J., Zhao, Y. & Shuai, S. (2014). Experimental Study of Catalyzed Diesel Particulate Filter with Exhaust Fuel Injection System for Heavy-Duty Diesel Engines. *Proceedings of SAE 2014 World Congress & Exhibition*, huhtikuuta 1 2014. 2014-01–1496. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1496>
- Tulli (2022). *Laadukasta polttoainetta tankkiin. tulli.fi*. <https://tulli.fi/web/tullilaboratorio/tullitekniset-tutkimukset/polttoainetutkimukset> [2022-12-14]
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2022). *Biopolttoöljyn jakeluvaihteen ja kestävyyslain muutos lausuntokierrokselle*. <https://tem.fi/-/biopolttoöljyn-jakeluvaihteen-ja-kestavyyslain-muutos-lausuntokierrokselle> [2022-12-14]

- Valtra (2022). *SUOMALAINEN SISU LEGENDAARINEN TEHOPAKKAUS*. *valtra.fi*. <https://www.valtra.fi/traktorit/tietoa-valtra-traktoreista/moottorit.html> [2022-11-21]
- Vesterinen, T. (2022). Agco Powerin Core-moottoriperhe on suunniteltu yhteensopivaksi tulevaisuuden vaihtoehtoisten polttoaineiden kanssa – CORE75 täyttää tiukimmatkin päästövaatimukset ilman pakokaasun takaisinkieräytystä. *Koneviesti*. 2022. <https://www.koneviesti.fi/uutiset/9ea42c27-a7e0-4a4b-874e-473ee1f5d4ef>
- Vilkko, M. & Nieminen, H. (2021). Liikkuvien työkoneiden sähköistämisestä kilpailuetuja ja ilmastohyötyjä – Tampereen yliopisto ja VTT kehittävät yhdessä teollisuuden kanssa tulevaisuuden ratkaisuja. Tampereen yliopisto. <https://www.tuni.fi/fi/ajankohtaista/liikkuvien-tyokoneiden-sahkoistamisesta-kilpailuetuja-ja-ilmastohyotyja-tampereen> [2022-12-14]
- Volvo Penta (2022). *STAGE IV EMISSION TECHNOLOGY - MAXIMIZED PERFORMANCE*. *volvopenta.com*. [Valmistajan verkkosivu]. <https://www.volvopenta.com/en-gb/industrial/benefits/emission-technology/stage-iv/> [2022-11-21]
- Wang, Z., Liu, P., Li, H., Li, R., Pan, X. & Zhao, Y. (2021). The Development of Diesel Particulate Filter Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 632 (3), 032012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/3/032012>
- aus der Wiesche, S. (2007). Numerical heat transfer and thermal engineering of AdBlue (SCR) tanks for combustion engine emission reduction. *Applied Thermal Engineering*, 27 (11–12), 1790–1798. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.008>
- Wisell, T., Jerksjö, M., Hult, C. & Lindgren, M. (2018). *Fuel and Technology Alternatives in Non-Road Engines*. IVL Swedish Environmental Research Institute. https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_50.pdf [2022-11-16]
- Zhang, Z., Tian, J., Li, J., Cao, C., Wang, S., Lv, J., Zheng, W. & Tan, D. (2022). The development of diesel oxidation catalysts and the effect of sulfur dioxide on catalysts of metal-based diesel oxidation catalysts: A review. *Fuel Processing Technology*, 233, 107317. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107317>
- Zheng, M. & Banerjee, S. (2009). Diesel oxidation catalyst and particulate filter modeling in active – Flow configurations. *Applied Thermal Engineering*, 29 (14–15), 3021–3035. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.04.017>
- Zheng, M., Reader, G.T. & Hawley, J.G. (2004). Diesel engine exhaust gas recirculation – a review on advanced and novel concepts. *Energy Conversion and Management*, 45 (6), 883–900. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00194-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00194-8)
- Zheng, M., Reader, G.T., Wang, D., Zuo, J., Kumar, R., Mulenga, M.C., Asad, U., Ting, D.S.-K. & Wang, M. (2005). A Thermal Response Analysis on the Transient Performance of Active Diesel Aftertreatment. *Proceedings of Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition*, lokakuuta 24 2005. 2005-01–3885. <https://doi.org/10.4271/2005-01-3885>
- Zink, U.H. & Johnson, T.V. (2005). State-of-the-art Filter Regeneration Management. US Department of Energy Directions in Energy Efficiency and Emissions Research (DEER), Chicago, IL. [2022-10-21]