



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

PÄÄSTÖMITTAUSSTANDARDIT SEKÄ TESTI- KÄYTÄNNÖT EUROOPASSA JA YHDYSVAL- LOISSA

Mihalis Skiathitis

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018
Ajoneuvotekniikka
Korjaamotekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikka
Auto- ja korjaamotekniikka

SKIATHITIS MIHALIS:

Päästömittaustandardit sekä testikäytännöt Euroopassa ja Yhdysvalloissa

Opinnäytetyö 46 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2018

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää vuonna 2017 voimaan tulleita päästömittausten standardimuutoksia Yhdysvaltojen sekä Euroopan alueella. Muutokset ovat tapahtuneet pääosin EPA Tier 3- ja Euro 6 -standardeissa ja niiden rakenteissa. Työssä arvioitiin lisäksi päästömittausten testikäytännöissä tapahtuneita muutoksia ja niiden vaikutuksia olemassa olevaan ajoneuvokantaan. Tarkoituksena oli toimia kirjallisuustutkimuksen tavoin, eli antaa laaja kuva päästöjen syntyyn, sääntelyyn ja rajoittamiseen vaikuttavista tekijöistä. Työssä pohditaan lisäksi nykyisen päästöjenhallintatekniikan riittävyyttä, suhteessa uusien standardien luomiin päästoluokkiin ja rajoitteisiin.

Suurimmat muutokset ovat tapahtuneet Eurooppalaisten testikäytäntöjen kesken, siirtäessä vanhemmasta uudempaan testikäytäntöön. Vanhalla NEDC-testikäytännöllä mitatut NO_x-arvot ovat olleet todellisuudessa moninkertaiset verrattuna siihen mitä ne saisivat olla. Tämän vuoksi nykyisten dieselkäyttöisten henkilöautojen ei uskota läpäisevän uutta WLTP-testikäytäntöä, sen ollessa tarkempi ja totuudenmukaisempi kuin NEDC.

Autovalmistajat uskovat kuitenkin alittavansa uudet päästörajoitukset ja testikäytännöt vielä nykyiselläkin päästöjenhallintatekniikalla. Erilaisten pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiden yhdistäminen toisiinsa on tällä hetkellä tehokkain tapa alittaa asetetut rajoitukset. Lisäksi uusinta moottoritekniikkaa hyödyntämällä saadaan palotapahtuman hallinnasta tehokas prosessi, joka yhdessä jälkikäsittelylaitteiden kanssa ehkäisee liiallisten päästöjen syntymistä vielä pitkällä tulevaisuudessakin.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Automobile and Transport Engineering
Garage engineering

MIHALIS SKIATHITIS:

Emissions standards and test procedures in Europe and the United States

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 0 pages
May 2018

The purpose of the thesis was to find out the changes in the standards of the emission measurements that came into effect in 2017 in the United States and in Europe. The changes have mainly occurred in EPA Tier 3- and Euro 6 -standards and their structures. The thesis also evaluated the changes in the test methods of the emission measurements and their effects on the existing vehicle fleet. The aim was to work with the conduct a literature research, i.e. to give a broad picture of the factors influencing the creation, regulation and limitation of emissions. The thesis also reflects on the adequacy of the current emission control techniques, in relation to the emission standards and constraints created by the new standards.

The biggest changes were made among European test practices, moving from older to more recent test practice. Actually, the NO_x values measured by the old NEDC test practice have been multiple times lower compared to what they are allowed. For this reason, existing diesel cars are not believed to pass the new WLTP test practice, it being more accurate and truthful than NEDC.

However, automakers believe that the current emission control technology can still meet the new emission limits and test practices. The combination of various exhaust after-treatment equipment is currently the most effective way to overcome the emission limitations. In addition, by utilizing the latest engine technology, the combustion process can be effectively controlled and together with after-treatment equipment, it prevents excess emissions far into the future.

Key words: exhaust gas, Euro 6, Tier 3, WLTP, RDE, NEDC

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	AUTOJEN PÄÄSTÖT	7
3	PÄÄSTÖSTANDARDIT	9
	3.1 Eurooppalainen standardi (Euro 6)	9
	3.2 Yhdysvaltalainen standardi (Tier 3)	11
	3.3 Yhdysvaltalaisten ja Eurooppalaisten standardien vertailu keskenään....	14
	3.4 Standardien käytönaikainen valvonta	15
4	TESTIKÄYTÄNNÖT	17
	4.1 Vanha Eurooppalainen testikäytäntö NEDC	17
	4.2 Uusi Eurooppalainen testikäytäntö WLTP	19
	4.3 Muutokset siirryttäessä NEDC-testikäytännöstä WLTP:seen	21
	4.4 Yhdysvaltalainen testikäytäntö FTP-75.....	22
5	MOOTTORITEKNIikka	24
	5.1 Polttoaineseoksen muodostus	26
	5.2 Hiilimonoksidi (CO)	27
	5.3 Hiilivedyt (HC)	28
	5.4 Typen oksidit (NO _x)	28
6	PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELYLAITTEISTOT	29
	6.1 Katalysaattori	29
	6.2 Polttonestehöyryjen talteenottojärjestelmä (EVAP).....	33
	6.3 Pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmä (EGR).....	34
	6.4 Urearuiskutus-järjestelmä (SCR).....	35
	6.5 Hiukkasloukku (LNT).....	36
	6.6 Hiukkassuodatin (DPF).....	36
	6.7 Toisioilmajärjestelmä (SAI)	37
	6.8 Euro 6-luokan vaatimukset	38
7	POLTTOAINEEN VAIKUTUS PÄÄSTÖIHIN	41
8	POHDINTA.....	42
	LÄHTEET.....	44

LYHENTEET JA TERMIT

CO ₂	Hiilidioksidi
PM	Hiukkasmassa
P#	Partikkelimassa
NO _x	Typen oksidit
HC	Hiilivety-yhdisteet
CO	Hiilimonoksidi (häkä)
NMOG + NO _x	Ei-metaaninen orgaaninen kaasu + typen oksidit
N ₂ O	Dityppioksidi
CH ₄	Metaani
AlO ₂	Alumiinioksidi
F-Gas	Fluorattu kasvihuonekaasu
ICCT	International Council on Clean Transportation
NEDC	New European Test Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light Test Procedure
FTP-75	Federal Test Procedure
US06	Aggressive High-Speed Driving Test
SC03	Air Conditioning Test
HWET	Highway Economy Test Cycle
UDC + EUDC	Urban Driving Cycle + Extra Urban Driving Cycle
RDE	Real Driving Emissions
CA LEV	California Low Emission Vehicle Program
EPA	Environmental Protection Agency
MDV	Medium Duty Vehicle
EGR	Exhaust Gas Recirculation
SCR	Selective Catalytic Reduction
LNT	Lean NO _x Trap
DPF	Diesel Particulate Filter
SAI	Secondary Air Injection
DEF	Diesel Exhaust Fluid

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli toimia kirjallisuustutkielman tavoin, eli antaa ajankoh-
tainen kuva käytössä olevista päästömittaustandardeista sekä testikäytännöistä Euroopan
ja Yhdysvaltojen alueella. Työ keskittyy pääsääntöisesti henkilöautojen päästöihin, eli
raskaan kaluston päästöt jätettiin huomioimatta, niiden kulkiessa omaa aikataulua. Raskas
kalusto käyttää pääsääntöisesti dieselöljyä polttoaineenaan, samalla aiheuttaen suurim-
mat typen oksidipäästöt yksilötasolla. Ongelmana on kuitenkin kaupungeissa lisääntyvät
diesel-henkilöautojen määrät, sillä ne ovat suhteessa kymmenkertaisia verrattuna raskaan
kaluston määriin. Työssä tutustutaan lisäksi päästöihin vaikuttavaan teknologiaan, selvit-
tämällä erilaisten päästöjenhallintajärjestelmien toimintaperiaatteita. Teoriaosuuden tar-
koituksena oli antaa kokonaisvaltainen kuva päästöjen synnystä ja tavoista rajoittaa niitä.
Lopuksi oli myös tarkoitus pohtia, kuinka asetettuihin tavoitteisiin päästään ja minkä-
laista päästöjenhallintatekniikkaa käyttäen.

Euroopassa käytönaikaisen valvonnan aikana mitatut diesel-päästöt ovat olleet jopa kuusi
kertaa korkeammat kuin NEDC-testimenetelmällä saadut. Tämän vuoksi useita eri auto-
valmistajia epäillään huijaamisesta. Ennen uutta testimenetelmää, voitiin testejä varten
huijaamisia (optimointeja) suorittaa monin eri tavoin. Euroopassa voimaan astunut pääs-
tömittausmenetelmä WLTP ehkäisee päästötesteissä huijaamista tehokkaasti. Testiä täy-
dennetään RDE-lisäsyklillä, jonka tarkoituksena on mallintaa liikenteessä syntyviä todellisia
päästöjä. WLTP:n avulla päästötesteistä saadut tulokset ovat lähempänä todellisuutta
ja niiden vertaaminen Yhdysvaltalaisiin testikäytäntöihin on helpompaa. Todennäköistä
onkin, että NEDC-syklillä mitatut diesel-henkilöautot eivät tule läpäisemään uutta
WLTP-testisykliä. Yhdysvalloissa etenkin typen oksidien rajoitukset kiristyvät Tier 3-
standardin myötä. Lisäksi huomioitavana asiana on Yhdysvaltalaisten standardien yhte-
näistyminen Kalifornialaisten standardien kanssa, sekä polttoaineen laadussa tapahtuva
parannus sallittuja rikki- ja hiilidioksidipitoisuuksia rajoittamalla. Suurimmat muutokset ovat siis tapah-
tuneet Eurooppalaisissa testikäytännöissä ja Yhdysvaltalaisissa standardeissa.

2 AUTOJEN PÄÄSTÖT

Autojen päästöillä tarkoitetaan yleensä polttomoottorin synnyttämiä pakokaasupäästöjä, sekä polttoaineen palamistuotteena syntyviä hiilidioksidipäästöjä (CO₂). Lainsäädännöllä säänneltyjä pakokaasupäästöjä ovat hiilimonoksidi- (CO), hiilivety- (HC), typenoksidi- (NO_x) ja pienhiukkaspäästöt (PM). Säännellyt päästöt ovat hengitysilman laatua pilaavia yhdisteitä ja niitä kutustaan myös paikallisiksi päästöiksi. Päästömittaussykliä ajettaessa on säänneltyjen päästöjen alitettava niille asetettuja raja-arvoja. CO₂-päästöille ei ole lainsäädännöllistä enimmäisrajaa, mutta niiden määrää säännellään Euroopassa autovalmistajille asetetuilla päästötavoitteilla. Myöskään niiden poistamiseen pakokaasuista, ei ainakaan vielä ole keksitty keinoa. Euroopassa hiilidioksidin määrää rajoitetaan muita maanosia enemmän. Yhdysvalloissa puolestaan on ollut jo pitkään maailman tiukimmat säänneltyjen päästöjen vaatimukset. (Autoalan Tiedotuskeskus 2018).

Autojen päästöjä säännellään nykypäivänä erilaisilla määräyksillä ja suurimmassa osassa maailmaa Yhdysvaltojen ja Euroopan toimiessa suunnannäyttäjänä muille. Eri maanosilla on omat päästömääräyksensä, joten sama autovalmistaja saattaa siis valmistaa eri markkina-alueille samaa mallia, mutta erilaista päästöjenhallintatekniikkaa käyttäen. Euroopassa säänneltyjä päästöjä säädellään erilaisilla Euro-luokilla (direktiivit) ja hiilidioksidipäästöjä niin sanotulla CO₂ -asetuksella (EY/443/2009 ja EY/333/2014). Yhdysvalloissa vastaavasti Tier-, sekä Kalifornialaisilla CA LEV -standardeilla. Henkilöautoluokissa jaetaan päästömääräykset bensiini-, sekä dieselmootoreiden kesken. Esimerkiksi Euro-luokassa mentäessä alemmaksi, eli autosta haluttaessa vähäpäästöisempi, joudutaan säänneltyjä päästöjä laskemaan. Ongelmaksi nousee kuitenkin polttoaineenkulutuksesta suoraan riippuvaisten hiilidioksidi-päästöjen nouseminen samanaikaisesti. (Motiva 2018). Teknologia molempien päästölajien vähentämiseksi on kuitenkin kehittynyt huimasti viime vuosien aikana ja niitä koskevaa tekniikkaa käsitelläänkin myöhemmissä kappaleissa.

Euroopassa päästöluokkien vaatimia mittauksia suorittavat tyyppi hyväksyntäviranomaisien ilmoittamat riippumattomat tutkimuslaitokset. Euroopassa kyseisiä laitoksia ovat esimerkiksi TÜV, ranskalainen UTAC CERAM ja espanjalainen IDIAD, Yhdysvalloissa vastaavasti EPA (Environmental Protection Agency). Mittauksien tarkoituksena on simuloida laboratorio-olosuhtein kaupunki- ja maantieajoa ja lainsäädännön mukaisesti määriteltyjen ajosykliden mukaisesti. Päästöjen testaukseen on Euroopassa jo pitkään käytetty

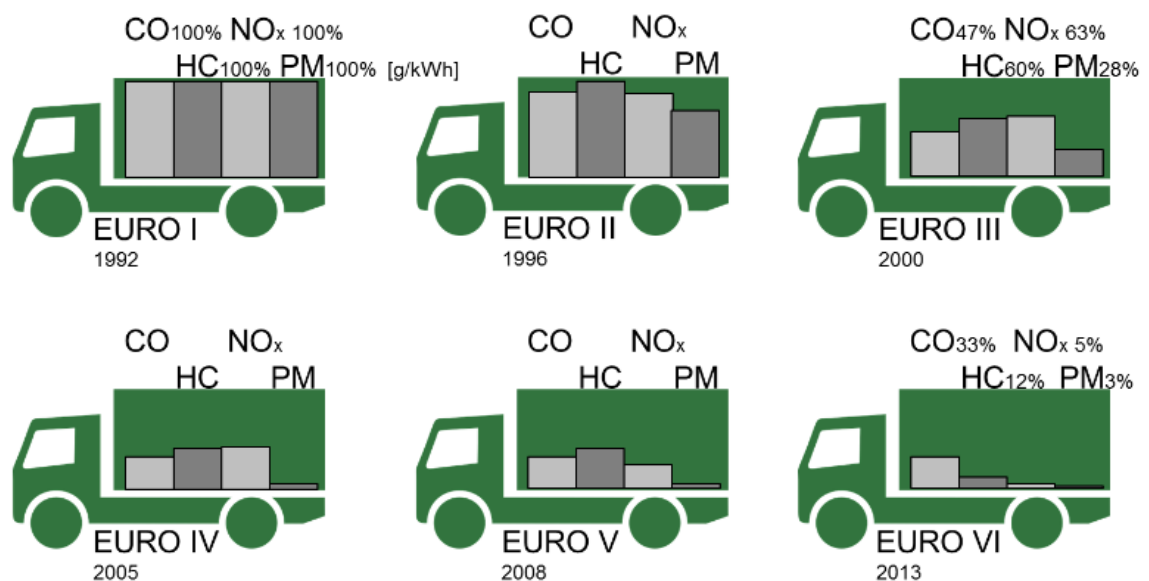
NEDC (New European Driving Cycle) -testimenetelmää, joka syyskuussa 2017 korvattiin uudella WLTP:llä (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure). WLTP:n tarkoituksena on kuvata paremmin todellisia liikenteessä syntyviä päästöjä. Laboratorio-testiä Euroopassa on lisäksi täydennetty RDE (Real Driving Emission-testillä), joka on oikeassa liikenteessä suoritettava mittaus. Tyyppihyväksyntäviranomaiset suorittavat lisäksi autojen standardoidut kulutusmittaukset. Autojen kulutuslukemat löytyvät EU-lainsäädännön mukaisesta energia-merkinnästä. Merkinnän avulla voidaan luotettavasti vertailla kulutusta ja hiilidioksidipäästöjä muiden automallien kesken. (Autoalan Tiedotuskeskus 2018)

Noin 80 % kasvihuonepäästöistä tulee energian tuotannosta ja kulutuksesta johtuen. Mukaan luetaan liikenteen päästöt, hiilidioksidipäästöjen muodostaessa niistä merkittävimmän osuuden. Energian tuotanto ja kulutus on siis riippuvaisia toisistaan. Tyypillisesti jokainen hallitus tekee kaudellaan energia- ja ilmastopoliittisen strategian. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2018). Uusin strategia hyväksyttiin hallituksen toimesta 24.11.2016. Sen tarkoituksena oli linjata konkreettisia toimia ja tavoitteita, kuinka Suomi saavuttaa hallitusohjelmassa asetetut tavoitteet, sekä EU:ssa sovitut energia- ja ilmastotavoitteet vuoteen 2030 mennessä. Huomioon otettavia ja erityisesti strategian autokantaa koskevia tavoitteita olivat vähintään 40 % päästövähennys vuoteen 2030 mennessä (vuoden 1990 tasosta). Vuoden 2050 visioidut tavoitteet ovat kasvihuonepäästöjen vähentäminen 80 – 95 % ja biopolttoaineiden osuuden nostaminen 30 %:iin. Lisäksi tavoitteena on myös saada liikennekäyttöön vähintään 250 000 sähkökäyttöistä ja 50 000 kaasukäyttöistä autoa vuoteen 2050 mennessä. Tällä hetkellä voimassa olevat tavoitteet ovat vuodelta 2007 vuoteen 2020. (Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030). Suurin osuus liikenteen päästöistä koostuu hiilidioksidipäästöistä. Hiilidioksidipäästöjä voidaan alentaa käyttämällä polttoaineita jotka saastuttavat vähemmän ja kuluttajatasolla ostamalla vähäpäästöisempiä autoja, kuten hybridi- ja sähköautoja. Ilmasto ja energiatavoitteet eivät aina suoranaisesti koske kansainvälisen liikenteen päästöjä, mutta voidaan sanoa, että aina kun on kyse esimerkiksi uusiutuvasta energiasta, on samalla kyse polttoaineista ja sitä kautta liikenteen päästöistä. Liikennettä koskevat tavoitteet ovat maakohtaisia. Tehokkain tapa on asettaa tavoitteita sähkö- hybridautojen lisääntymiselle ja samalla tukea tavoitteiden täyttymistä kaikin keinoin. Uusiutuvat polttoaineet tuottavat vähemmän hiilidioksidipäästöjä ja suurimmaksi osin vetypitoisten polttoaineiden ansiosta, niiden suurimman ilmansaasteen ollessa vesihöyry.

3 PÄÄSTÖSTANDARDIT

3.1 Eurooppalainen standardi (Euro 6)

Euro-luokan tarkoituksena on yksinkertaisesti sijoittaa auto omaan luokkaansa sen vähäpäästöisyytensä perusteella. Euro-luokan ajoneuvon on alitettava kyseiselle luokalle asetetut säänneltyjen päästöjen raja-arvot. Mitä korkeampi Euro-luokka on kyseessä, sitä puhtaammat päästöt autossa on. (Trafi 2018). Tieto Euro-luokan tasosta löytyy yleensä rekisteröintitodistuksen I-osan (tekninen osa) "Erikoisehdot ja huomautukset" -kohdasta. Katsastustoimipaikoilla lisätään tarvittaessa puuttuva tieto rekisteröintitodistukseen. Päästöluokka saadaan selville myös auton vaatimustenmukaisuustodistuksesta (CoC-todistus). (Motiva 2018).



KUVA 1. Euro-luokkien kehitys (Trafi 2018)

Kuvassa 1 havainnollistetaan päästöluokkien kehitystä Euro 1- luokasta eteenpäin. Jokaista päästölajia tarkastellaan grammoina per kulutettu energia (kilowattitunteina) (g/kWh). Jokaista uudempaa päästöluokkaa vertaillaan suhteessa Euro 1-luokkaan, (Euro 1- luokan toimiessa lähtöarvojen antajana). Kuvasta voidaan havaita Euro VI luokan CO (hiilimonoksidin) tippuneen kolmasosan siitä mitä ne olivat Euro 1 -luokassa. Vastaavasti HC (hiilivetypäästöt) ovat tippuneet noin kymmenesosan ja NO_x (typenoksidi) ja PM (pienhiukkasäästöt) ovat enää vain noin 5 % Euro 1 -luokan päästöihin verrattuna.

Jotta kuvassa 1 esiteltyä Euro-luokkien välistä kehitystä on päässyt tapahtumaan, on pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistojen tai vaihtoehtoisesti moottoritekniikan ja -hyötysuhteen täytynyt kehittyä samanaikaisesti. Yhtenä keinona voidaan pitää erilaisten jälkikäsittelylaitteistojen yhdistämistä jo olemassa olevaan tekniikkaan. **Euro 1:n** tullessa asetettiin säänneltyjen päästöjen rajoitukset CO-, HC- ja NOx-, sekä PM -päästöille. **Euro 2** tiukensi rajoja entisestään ennen kuin **Euro 3** tuli voimaan erillisellä NOx-rajoituksella. **Euro 4:n** tullessa, pieneni sallittujen Pm-päästöjen, sekä NOx-päästöjen määrä puoleen. **Euro 5:n** tullessa, pienentyivät sallitut PM-päästöt viidesosaan, pääosin dieselautoihin asennettujen hiukkassuodattimien avulla. (Autotuojat ja -teollisuus 2018).

Dieselkäyttöisille henkilöautoille **Euro 6**, tarkoitti entistä tiukempia typen oksidien (NOx) rajoituksia. NOx raja oli Euro 5:den ollessa voimassa 180 mg/km, mutta Euro 6:den tullessa ne laskivat 80 mg/km (taulukko 1). Tämä tarkoittaa, että NOx-päästöraja pieneni alle puoleen aiemmasta. Lisäksi hiilivetypäästörajoja (HC) alennettiin. Muutos toteutettiin suurilta osin lisäaineellisella pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistolla: Selective Catalytic Reduction (SCR), joka poistaa parhaimmillaan noin 90 % typen oksidipäästöistä. (Autotuojat ja -teollisuus 2018). SCR:n huono puoli on, että se aiheuttaa mahdollisia lisäkustannuksia autovalmistajalle, niiden näkyessä varsinkin matalamman hintaluokan autoissa. Muutoksen johdosta dieselmoottoreiden suosio saattaa laskea lähivuosina. (Motiva 2018).

Nykyinen käytössä oleva päästömittaustandardi Euro 6 tuli voimaan 1.9.2014 koskien uusien autojen tyyppihyväksyntää ja myöhemmin 1.9.2015 koskien niiden ensirekisteröintiä ja myyntiä. Standardi on kaikilta osin voimassa vasta vuonna 2021. Eurostandardit kestävät niin kauan, ennen kuin uusi standardi astuu voimaan. Euro 6 -standardin tullessa, bensiinikäyttöisten autojen päästörajoitukset pysyivät ennallaan. Muutos tapahtui vasta kolmen vuoden siirtymäajan jälkeen 1.9.2017, jolloin bensiiniautoille tuli samat hiukkaspäästörajat (PM), kuin dieselautoille (taulukko 1). Muutos aiheutti toimenpiteitä suoraruiskutustekniikkaa käyttävissä bensiinimoottoreissa, sillä ne tarvitsivat käytännössä hiukkassuodattimen läpäistäkseen uudet NOx rajoitukset. (Motiva 2018).

TAULUKKO 1. Euro 6 -luokka (ICCT 2015)

Euro 6 päästörajat ajoneuvoluokan mukaan	CO	THC (ei mitata)	NMHC (ei mitata)	NO _x	HC + NO _x	PM	P#
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/k	mg/km	lkm/km
Diesel							
N2 & N1 (III-luokka)	740	-	-	125	215	5	$6,0 \cdot 10^{11}$
N1 (II-luokka)	630	-	-	105	195	5	$6,0 \cdot 10^{11}$
HA & N1 (I-luokka)	500	-	-	80	170	5	$6,0 \cdot 10^{11}$
Euro 5 diesel (henkilö-auto)	500			180	230	5	$6,0 \cdot 10^{11}$
Bensiini (Hiukkasmassa (PM) vain suoraruiskutusmoottoreilla)							
N2 & N1 (III-luokka)	242	-	-	82	-	5	$6,0 \cdot 10^{11}$
N1 (II-luokka)	205	-	-	75	-	5	$6,0 \cdot 10^{11}$
HA & N1 (I-luokka)	160	-	-	60	-	5	$6,0 \cdot 10^{11}$
Euro 5 bensiini (henkilö-auto)	1000	100	68	60	-	5	$6,0 \cdot 10^{11}$

Euro 6 -luokka (taulukko 1) koostuu kolmesta eri ajoneuvoluokasta; henkilöautoista M1/HA ja N1 eli kevyistä hyötyajoneuvoista (0 - 1350 kg). Seuraava luokka koostuu N1 luokan (II) hyötyajoneuvoista (1306 - 1760 kg) ja viimeisenä N2 ja N1 luokan (III) hyötyajoneuvoista (yli 1760 kg ja 3500 - 12,000 kg). Euro 6 -standardin määrittelemä pako kaasujen hyödyllinen elinkaari on 160 000 km tai 5 vuotta, kumpi ennemmin tulee täyteen. Eli päästöluokan täyttämismuuttaminen koskee siis vähintään edellä mainittua aikaa. (ICCT 2015).

3.2 Yhdysvaltalainen standardi (Tier 3)

Tier 3 -standardi on hyvin paljon Kalifornian LEV III -standardin mukainen ja sen tarkoituksena on yhdistää standardit toisiinsa. Standardi etenee vaiheittain vuosien 2017 – 2025 aikana. Tier 3 standardit ovat vanhoja Tier 2 -standardeja tiukempia ja sisältävät lisäksi monia muita tärkeitä muutoksia. Tier 3:ssa on kuitenkin sama tuttu rakenne kuin Tier 2:ssa. Eli valmistajien on siis hyväksyttävä ajoneuvot yhdelle seitsemästä saatavilla olevasta päästöluokasta korin koon mukaan (taulukko 2). Ajoneuvot testataan Yhdysvaltalaisen FTP-75-testisyklin avulla, joten NMOG + NO_x päästöjen summan on lisäksi alitettava testissä käytetty HWET-lisäsykli (maantieajo). Tier 3 on polttoaine-neutraali standardi, joten sitä sovelletaan sekä bensiini-, että dieselajoneuvoille.

Ajoneuvoluokat jaotellaan kolmeen eri luokkaan ja ne jaetaan massan mukaan kevyimmästä raskaimpaan: light-duty vehicles (LDV), light-duty truck (LDT1) ja keskiraskaat (LDT 2, 3,4 ja MDPV). Kolmas luokka koskee vain tiettyjä raskaan kaluston luokkia (HDV), kuten raskaita avolava-autoja ja pakettiautoja. Ajoneuvon massan laskemiseen käytetään GVWR (Gross Vehicle Weight Rating) ja se määritellään ajoneuvon suurimman sallitun kuorman mukaan. Kevyttä kalustoa koskevat kaikki alle 3856 kg ja keskiraskasta 3856 - 6350 kg painoiset ajoneuvot. Ajoneuvoluokat (LDV), (LDT) ja (MDPV), ovat yhdenmukaisia Tier 2 -määritelmien kanssa. (ICCT 2015).

Päästöluokat on nimetty niiden luokkien vastaavilla NMOG + NO_x-päästöillä (mg / mi). Taulukon 2 arvot on muutettu vertailun vuoksi alkuperäisestä muodosta (mg/mi) muotoon (mg/km). Korkein päästöluokka löytyy koriga 160 (NMOG + NO_x = 100 mg / km), joka vastaa Tier 2:n koriga 5:sta. Kyseinen Tier luokka on otettu vertailun vuoksi mukaan, sen ollessa Tier 2:n keskimääräinen koriga luokka. Tier 3 standardi sisältää lisäksi ajoneuvokategorioiden vuotuisen keskiarvon, jonka NMOG + NO_x päästöt on alitettava edellä mainittujen koriga luokkien lisäksi. (ICCT 2015).

TAULUKKO 2. Tier 3 päästörajoitukset eri koriga luokille (ICCT 2015)

Tier 3 Koriga luokat (LDV ja LDT1)	NMOG + NO _x	PM	CO	HCHO
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Koriga 160	100	2	2610	2
Koriga 125	78	2	1305	2
Koriga 70	44	2	1057	2
Koriga 50	31	2	1057	2
Koriga 30	19	2	622	2
Koriga 20	12	2	622	2
Koriga 0	0	0	0	0
Tier 2, koriga 5	100	6	2610	11

NMOG + NO_x-päästöjen keskiarvojen on alitettava 19 mg/km, joka on sama kuin koriga 30 = Tier 2, koriga 2 vuoteen 2025 mennessä (taulukko 3). Tämä viimeinen keskiarvo vuonna 2025 koskee kaikkia eri koriga luokkia. Tämä on tärkeä muutos Tier 2:een verrattuna, sillä se kiristää myös raskaampien ajoneuvoluokkien päästörajoituksia tuntuvasti.

Myös hiukkasmassoille (PM) on asetettu rajoituksia, jotka on myös täytettävä vuosittain. Taulukko 4 ilmoittaa PM maksimi-arvon. Taulukon voimaantulo-prosentti tarkoittaa vaadittua prosenttiosuutta uusista ajoneuvoista, joiden tulee alittaa asetettu raja. Hiukkasmassalle (PM), on kaksi eri arvoa: ensimmäinen on uuden ajoneuvon tyyppi hyväksyntää varten ja jälkimmäinen on hyödyllisen elinkaaren aikana sallittavaa maksimi-arvoa edustava. (ICCT 2015).

Bensiinikäyttöisten ajoneuvojen ollessa kyseessä, voidaan vertailu suorittaa ottamalla Euro-standardista yhteenlasketut NMHC- ja NO_x-päästöt ja verrata niitä Tier-standardin NMOG + NO_x-päästöihin. Myös dieselaita voidaan vertailla keskenään, vaikkakin Euro-standardissa mitatut NO_x + HC päästöt sisältävät metaania, jota NMOG + NO_x määritelmä ei tunne. Voidaan kuitenkin olettaa, että päästöt ovat lähellä toisiaan, sillä diesel-polttoaine sisältää sen verran vähän metaania, jotta se vaikuttaisi vertailuun häiritsevästi. (ICCT 2015).

TAULUKKO 3. Tier 3 päästöraajat (NMOG + NO_x) (ICCT 2015)

Tier 3 NMOG + NO _x (mg/km)	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
LDV, LDT1	54	49	45	41	36	32	28	23	19
LDT2, LDT3, LDT4, MDPV	63	58	52	46	41	35	29	24	19

TAULUKKO 4. Tier 3 päästöraajat (PM) (ICCT 2015)

Tier 3 PM (mg/km)	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Voimaantulo	20 %	20 %	40 %	70 %	100 %	100 %
FTP sertifikaatio	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
FTP käytössä	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	1,9

Tier 3 -standardin mukaan hyödyllinen elinkaari auton päästöille on 150 000 mailia (noin 241 400 km), entisen 120 000 mailin (noin 193 100 km) sijasta. Tämä tarkoittaa sitä, että ajoneuvon on täytettävä sille asetetut päästövaatimukset niin kauan kuin mailit täyttyvät

tai vaihtoehtoisesti 15 vuotta, kumpi enemmän tulee täyteen. Vaatimus on identtinen California LEV III standardin kanssa. Poikkeuksia voidaan tehdä kevyemmille ajoneuvoluokille LDV ja LDT1-luokille. (ICCT 2015).

3.3 Yhdysvaltalaisen ja Eurooppalaisen standardien vertailu keskenään

Toisin kuin Eurostandardit, Yhdysvaltalaiset lähellä toisiaan olevat US Tier 3 & CA LEV III ovat polttoaneneutraaleja standardeja, eli testit ovat samanlaiset sekä diesel-, että bensiinikäyttöisille ajoneuvoille. Jokaisen ajoneuvon päästöt määritellään seitsemän eri kori-luokan avulla. Sen lisäksi jokaisen ajoneuvon on alitettava kyseiselle vuodelle asetettu keskiarvo (NMOG + NOx ja Pm). Tier 3 määrittelee kori-päästöluokat NMOG + NOx päästöjen mukaan ja Euro 6-standardi puolestaan erottelee hiilivedyt (HC), hiilimonoksidi (CO), Pienhiukkaset (Pm) ja partikkelimassat (P#) toisistaan. Tier 3:ssa on useita eri kori-luokkia, joten se antaa mahdollisuuden erotella erittäin ympäristöystävälliset ajoneuvot toisistaan. Tier 3 parantaa lisäksi polttoaineiden laatua, kiristämällä rikki- ja hiilipitoisuusrajoituksia bensiinille. Rikki- ja hiilipitoisuuden raja on sama kuin Euro 6:ssa jo vuodesta 2009. (ICCT 2015).

Eri testisyklit vaikeuttavat vertailua, mutta Euro 6D ja G-luokan tullessa Yhdysvaltalaiset Tier 2 ja 3 standardit eivät tule juuri eroamaan eurooppalaisista testisykleistä WLTP:n ja RDE:n ansiosta. Suurimmat erot syntyvät sallituissa NOx rajoissa. Tier 3 rajoittaa NOx + NMOG päästöt 100 mg/km, kun taas Euro 6C rajoittaa dieselikäyttöiselle henkilöautolle 170 mg/km. Tämä tarkoittaa sitä, että eurooppalaiset dieselikäyttöiset henkilöautot pääsevät helpommalla, etenkin kun niiden käytönaikaiset NOx-arvot ovat huomattavasti korkeammat, mitä NEDC testeissä on saatu. Myös bensiinikäyttöisillä ajoneuvoilla Tier 3-standardi on tiukempi kuin Euro 6C antaen rajaksi 160 mg/km. (ICCT 2015).

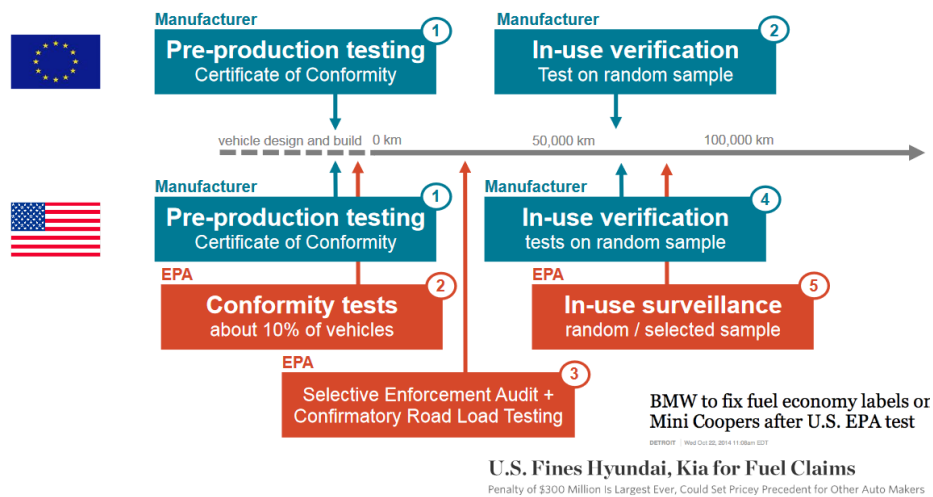
Tier 2 ja 3 sallii myös suuremmat ajoneuvomassat. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että Tier 3 sisältää ylimääräisen ajoneuvoluokan (MDV) keskisuuret hyötyajoneuvot, joka ennen määriteltiin raskaan kaluston testien mukaan. Tier 3 astui voimaan samaan aikaan kuin Euro 6C-luokka (RDE) vuodesta 2017. LEV 3 taas astui voimaan jo vuodesta 2015 ja kestää vaiheittain vuoteen 2025. Eurooppalaiset standardit ja rajoitukset kestävät niin kauan kuin uusi standardi astuu voimaan. Yhdysvalloissa standardit kestävät tiettyjä vaiheita ja ajanjaksoja joiden toteutumista seurataan. Päästörajat saattavat myös muuttua

matkan varrella. Euro 3:sta siirryttäessä Euro 6:seen bensiinikäyttöisten autojen haihtuvien päästöjen osuutta tullaan rajoittamaan lisää. Huonona puolena on Euro 6 standardissa siirtyminen vanhasta NEDC:stä WLTP:een, jolloin päästöarvot heikkenevät mittaustarkkuuden muuttuessa. (ICCT 2015).

Ilmaston lämpeneminen on tulosta fossiilisten polttoaineiden käytössä vapautuvasta ja ilmakehään kertyvästä hiilidioksidista ja muista kasvihuonepäästöistä. Auringon lämpösäteet eivät pääse takaisin avaruuteen, joten ilmasto lämpiää. Autojen pakokaasuista muodostuvista, sekä muista ilmastonmuutosta muuten kiihdyttävistä kasvihuonepäästöistä merkittävimmät ovat hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄), Fluoratut kasvihuonekaasut (F-gas) ja dityppioksidit (N₂O). Hiilidioksidi on tulosta polttoaineen puhtaasta palamisesta. Polttoaineseoksen palamisreaktiossa syntyy myös vesihöyryä, jota ei luokitella terveydelle haitalliseksi, mutta se on kasvihuoneilmiötä kiihdyttävä kaasu. (Reif ym. 2014, 410). Hiilidioksidin määrä ei kummassakaan standardissa varsinaisesti rajoiteta, mutta säänneltyjen päästöjen rajoituksilla, alentuvat myös kasvihuonekaasujen määrät samassa suhteessa niiden ollessa toisistaan riippuvaisia. Kummankin standardin uskotaan vähentävän tulevaisuuden kasvihuonekaasuja radikaalisti, vaikka Euro 6 onkin siinä suhteessa Yhdysvaltalaisista Tier 3 -standardia edellä. (ICCT 2015).

3.4 Standardien käytönaikainen valvonta

Molemmilla alueilla on autovalmistajan tehtävänä varmistaa, että standardit toteutuvat ennen tyyppihyväksyntää. Standardien toteutuvuus varmistetaan molemmilla alueilla ottamalla satunnaisia näytteitä autoista tietyn ajanjakson jälkeen. Suurena erona on Yhdysvalloissa suoritettava käytönaikainen lisävalvonta, jota Euroopassa ei tehdä. Yhdysvalloissa standardeja säätelevä EPA tekee lisäksi kolme lisävaihetta varmistaa autojen standardien mukaisuuden. (ICCT 2015). Standardien valvontaa ja niiden vaiheita esitellään tarkemmin kuvassa 7.



KUVA 7. Standardien toteutuminen ja valvonta (ICCT 2015)

Euroopassa tehdyissä käytönaikaisissa mittauksissa on todettu todellisten NO_x-arvojen Euro 6:ssa olevan paljon korkeammat, kuin mitä Euro 3:n raja antaisi myöten. Myös hiilidioksidi-, sekä kulutuslukemat ovat poikenneet sallituista rajoista. Syyn normaalista poikkeaviin arvoihin uskotaan piilevän useiden eri autovalmistajien tehdyissä päästöoptimoinneissa. Päästöoptimointiin eli huijauksiin on todettu olevan useita eri tapoja, sekä laboratorio-, että tien päällä oleviin olosuhteisiin. Päästöoptimoinnilla pyritään huijamaan testiolosuhteita niin, että ne antavat paremmat tulokset kuin normaalisti. Päästöoptimoinnit ovat laittomia ja usein myös rangaistavia toimenpiteitä. Huijanneita autovalmistajia uskotaan olevan useampi. Yleisin tapa huijaukselle on muuttaa auton moottorinohjausjärjestelmä toimimaan niin, että se antaa paremmat tulokset mitä teoriassa olisi mahdollista saavuttaa. Vanhaa NEDC-testisykliä huijattiin monin eri tavoin, mutta uuden WLTP-testisyklin ansiosta, tulee huijaamisesta tulevaisuudessa vaikeampaa. (ICCT 2015).

Valtakunnallisen sääntelyn sijaan, pyritään päästöjen määrä hallitsemaan myös kaupunkikohtaisesti. Low Emission Zones (LEZ) ovat määritelty maantieteellisiksi alueiksi, jossa tietyiltä ajoneuvoluokilta (usein luokkansa saastuttavimmat) evätään pääsy alueelle. Ideana on parantaa alueen ilmanlaatua. Tämä tarkoittaa, että alueella menestyvät hybridi- sekä sähköautot, joidenka päästöt ovat alhaiset tai miltei olemattomat. Alueella voi olla myös tiettyjen ajoneuvoluokkien kokonaisvaltainen kieltä tai tietyn päästöstandardin täyttämismvelvollisuus. Ajoneuvoja voi olla myös rajoitettu kulkemasta tiettyyn aikaan päivästä. Nykyisiltä LEZ alueilta on saatu hyviä tuloksia, eli ne ovat onnistuneesti laskeneet päästöjen määrää, tosin vain paikallisella tasolla. (ICCT 2015).

4 TESTIKÄYTÄNNÖT

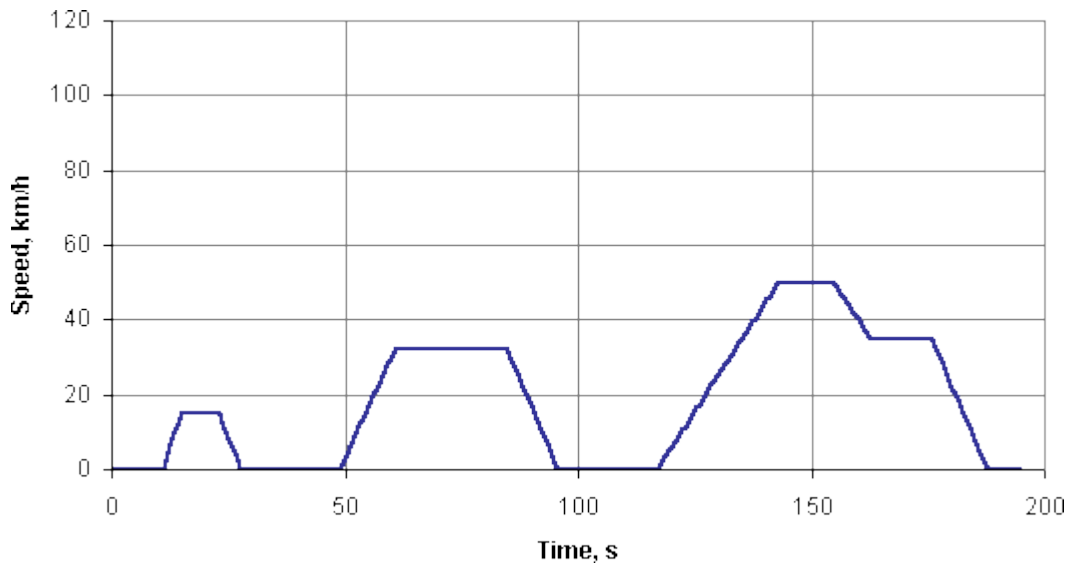
Uuteen autoon haettaessa tyyppihyväksyntää on sen täytettävä voimassaolevat päästörajitukset. Vaatimustenmukaisuus testataan erilaisilla testimenetelmillä laboratorio-olosuhteissa. Käytön aikaisesta valvonnasta Suomessa vastaa Trafin alaisuudessa toimivat katsastusasemat. Testaaminen tapahtuu erilaisilla testisykleillä riippuen maasta, josta hyväksyntä haetaan. Vuoteen 2021 mennessä autojen päästömittaus tulee muuttumaan Euroopassa NEDC:stä WLTP:hen. Nykyinen voimassa oleva NEDC- testimenetelmä luotiin vuonna 1980 ja se on jäänyt pahasti jälkeen ajastaan. NEDC:n suurin ongelma on sen pohjautuminen teoreettisiin ajotavoista määriteltyihin arvoihin. WLTP:n arvot taas pohjautuvat eri puolilta maailmaa kerättyihin todellisiin lukemiin. (Trafi 2017).

Laboratoriossa suoritettujen testisykliä tarkoituksena on antaa kuluttajalle mahdollisuus verrata luotettavasti kulutuslukemia keskenään. Jotta saataisiin mahdollisimman tarkat testitulokset, vaaditaan alustadynamometrin lisäksi oikea lämpötila, ilmankosteus ja ilmanpaine, jäljittelevien vierintä- ja ilmanvastus-voimien lisäksi (Bauer, Dietsche, Crepin & Dinkler 2002, 626). Tämän vuoksi laboratoriotestien on oltava standardisoituja toimenpiteitä, joita kaikkien autovalmistajien tulee noudattaa. (Trafi 2017).

4.1 Vanha Eurooppalainen testikäytäntö NEDC

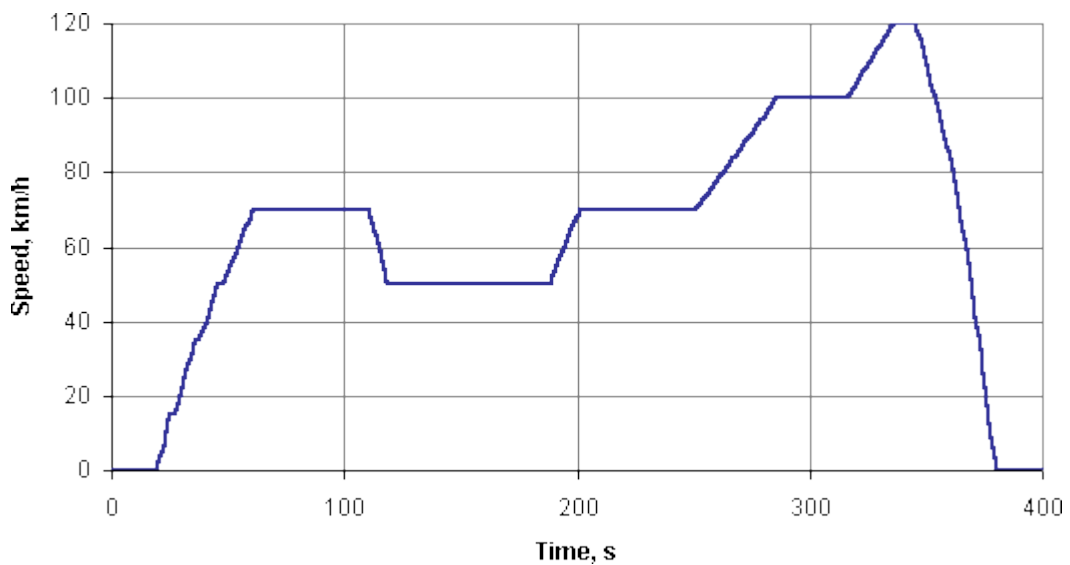
UDC + EUDC/NEDC joka tunnetaan myös MVEG-A-syklinä, on yhdistetty alustadynamometritesti Euroopan päästömittauksille. Se koostuu neljästä eri UDC kaupunkiajaja mallintavasta ajosyklistä, sekä yhdestä ylimääräisestä maantie ajo-olosuhteita mallintavasta EUDC-syklistä. Vuonna 2000 otettiin käyttöön uusi kylmäkäynnistysversio testistä NEDC, joka on lyhenne sanoista (New European Driving Cycle). (Dieselnet 2018).

NEDC aloitetaan kaupunkia mallintavalla ajosyklillä UDC:llä. Sen on tarkoitus mallintaa kaupunkiolosuhteita, kuten Pariisin tai Rooman liikennesuuhkaa. Testissä (kuva 3) mallinnetaan tyypillisiä kaupunki-olosuhteita: alhaisilla ajoneuvon nopeuksilla, alhaisella moottorin kuormituksella ja matalilla pakokaasun lämpötiloilla. (Dieselnet 2018).



KUVA 3. UDC-ajosykli: nopeus ajan suhteen (Dieselnet 2018)

EUDC-ajosykli lisättiin neljän kaupunki-olosuhteita mallintavan ajosyklin perään mallintamaan suurempia ajonopeuksia maksiminopeudella 120 km/h (kuva 4). Heikkotehokkaamman luokan autoille on lisätty vaihtoehto rajoitetulla maksiminopeudella 90 km/h. (Dieselnet 2018).



KUVA 4. EUDC-ajosykli: nopeus ajan suhteen (Dieselnet 2018)

NEDC:n ajosyklien yhdistetyn matkan (UDC + EUDC) pituudeksi saadaan 10.9314 km, matkan kestoksi noin 20 min (1180 s), tyhjäkäyntiajaksi 267 s ja matkan keskinopeudeksi 33,35 km/h. (Dieselnet 2018).

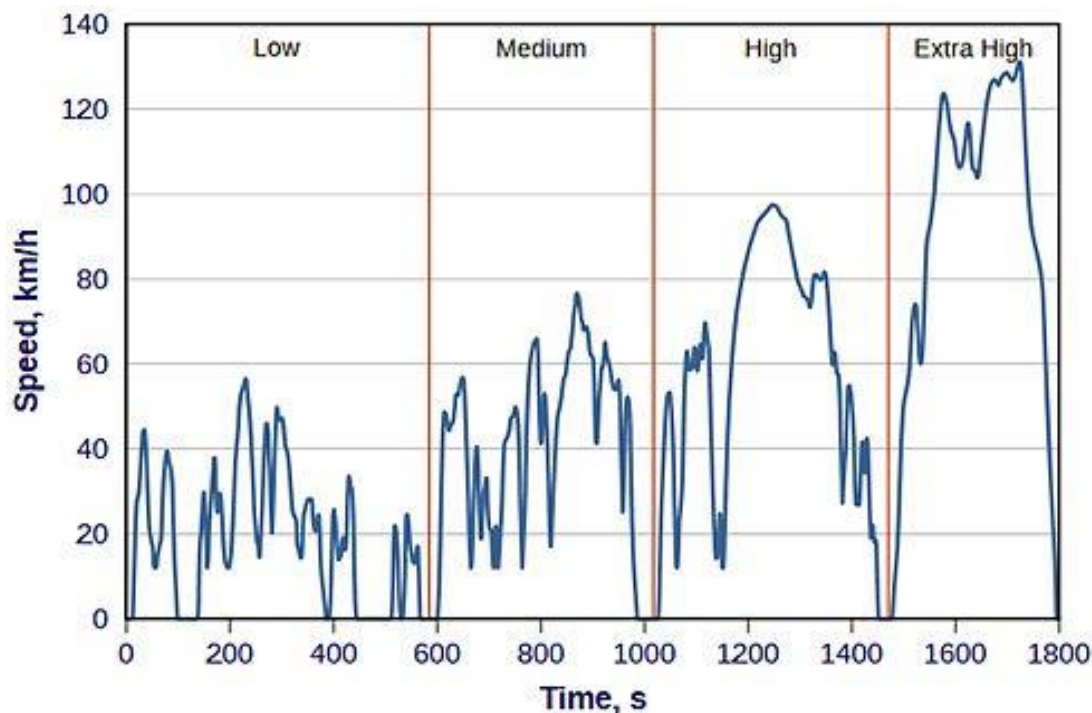
4.2 Uusi Eurooppalainen testikäytäntö WLTP

WLTP on Euroopan uusin päästömittausten menetelmä ja se tulee korvaamaan vanhan NEDC -testikäytännön. Se astuu voimaan kaksivaiheisesti: 1.9.2017 uusille autoille tyyppihyväksynnän kautta ja 1.9.2018 kaikille ensirekisteröitäville automaaleille. Uudet autot saavat vielä niin sanottuja ”häntälupia” valmistussarjansa viimeisimmille ajoneuvoille poikkeusluvilla, joten kaikki ajoneuvot saadaan WLTP:n piiriin vasta vuonna 2021. (Motiva 2017). Trafin tiedotteen mukaan WLTP-mittaus ei tule nostamaan kulutuslukemia siinä suhteessa, että hiilidioksidipäästöihin perustuva autovero nousisi, mutta tulee antamaan tarkemman kuvan automallin CO₂-päästöistä. Tämä johtuu siitä, että testi on pitkäkestoisempi ja perusteellisempi, jolloin kilometrikohtaiset CO₂-lukemat nousevat. (Trafi 2017).

WLTP:n tarkoituksena on parantaa päästömittausten todenmukaisuutta (CO₂, jokin muu päästö ja kulutuslukemat) lisäämällä laboratoriomittausten lisäksi todellisessa liikenteessä tehtäviä mittauksia (RDE) henkilö-, sekä pakettiautoille. Tarve kehittää uusi päästömittaustandardi syntyi, kun todettiin nykyisen laboratoriossa tehtävän NEDC mittauksen mallintavan todellista ajoa huonosti. Yksi suurista eroista todellisen ajon ja NEDC-syklin välillä on se, että NEDC:ssä ei käytetä ajovaloja tai lisälaitteita. WLTP-syklit jaotellaan autoluokkien mukaan neljään eri teho/painosuhteeseen. (Motiva 2017).

EU:n autoteollisuus kannattaa uutta WLTP-testimenetelmää ja on ollut mukana sen kehittämisen aktiivisesti. Mukana testimenetelmän käyttöönotossa on ensisijaisesti Euroopan unioni (28 maata). Muita ehdokasmaita ovat Turkki ehtona, että ulkomaan vientiautoja koskisi WLTP ja sisämaan vientia NEDC. Israel, Réunion, Martinique, Guadeloupe, Ranskan Guiana, St. Martin ja Mayotte (Euroopan ulkopuoliset alueet ovat ehdokaina joukossa. Käyttöönottoa osittain suunnittelevat Etelä-Korea, Japani, Intia ja Kiina. (Skoda 2017).

WLTP-ajosykli (kuva 6) muodostuu neljästä eri osuudesta ja neljästä eri keskinopeudesta: hidas, keskinopea, nopea ja erittäin nopea. Jokainen osa koostuu erilaisista ajovaiheista, pysähdyksistä, kiihdytyksistä ja jarrutuksista. Testissä tarkastetaan mallisarjansa kevyin ilman lisävarusteita, sekä raskain malli kaikkine lisävarusteineen. Sen tarkoituksena on testata kyseisten mallien moottori ja vaihteisto, eli verrata polttoainetaloudellisimman, sekä kuluttavimman mallin välillä. (Trafi 2017).



KUVA 6. WLTP: nopeus ajan suhteen (Motiva 2017)

WLTP-laboratoriomittauksia täydennetään RDE-mittauksilla (Real Driving Emissions) ja ne ovat todellisessa liikenteessä suoritettava mittauksia. RDE-testissä mitataan hiilidioksidipäästöjen lisäksi muita ihmiselle ja ympäristölle haitallisia päästöjä kuten palamatomat hiilivedyt, hiilimonoksidi (häkä) (CO) ja typenoksidit (NO_x), sekä hiukkaspäästöt (PM). (Motiva 2017).

RDE-testi ajetaan julkisilla teillä ja vaihtelevissa olosuhteissa. Autoon asennetaan mittalaitteet, jotka keräävät tietoja sen varmistamiseksi, että epäpuhtauksien kuten NO_x:ien lakisääteiset rajoitukset eivät ylity. Testi-olosuhteisiin kuuluvat alhaiset ja korkeat korkeudet, ympärivuotiset lämpötilat, hyötykuorma, mäkiä ylös ja alas, kaupunkiteitä (matala nopeus), maanteitä (keskinopeus), sekä moottoriteitä (korkeat nopeudet). Tiedot kerätään kannettavasta mittalaitteesta: Portable Emission Measuring Systems (PEMS), joka mahdollistaa ajoneuvon päästöjen kuten (NO_x) täydellisen reaaliaikaisen seurannan. Säänneltyihin päästöihin käytettävät PEMS-järjestelmät ovat monimutkaisia laitteita, jotka integroivat sisälleen kehittyneitä kaasuanalysointilaitteita, pakokaasun massavirtamittareita, sääaseman, navigoinnin ja yhteyden ajoneuvoverkkoihin. (Caremissionstestingfact 2018).

Kaikkien osapuolien, myös hyväksyntäviranomaisten täytyy oppia PEMS-järjestelmien asianmukainen käyttö. Ei ole olemassa "standardi" PEMS-laitteita ja eri valmistajien laitteet antavat joka kerta hieman erilaiset tulokset. Kerätty mittausdata analysoidaan sen varmistamiseksi, että RDE-reitin raja-olosuhteet on saavutettu ja että päästöt olivat hyväksyttävissä. RDE - vaihe 1 (NO_x - vaatimustenmukaisuuskerroin 2.1) koskee WLTP:n kanssa samaan aikaan 1.9.2017 lähtien uusien ajoneuvojen tyyppi hyväksyntää. Kaikkiin ajoneuvotyyppeihin sitä sovelletaan syyskuusta 2019 lähtien. RDE - vaihe 2 (NO_x - vaatimustenmukaisuuskerroin 1,0 ja virhemarginaali 0,5) sovelletaan tammikuusta 2020 uusien ajoneuvojen tyyppi hyväksynnässä ja sen jälkeen tammikuusta 2021 kaikille eri ajoneuvotyypeille. (Caremissionstestingfact 2018).

4.3 Muutokset siirryttäessä NEDC-testikäytännöstä WLTP:seen

WLTP astui voimaan syyskuusta 2017 alkaen ja sen tarkoituksena oli, että päästö- ja kulutuslukemat vastaisivat paremmin todellisuutta. Jotta testi vastaisi paremmin todellisuutta, on siihen lisättävä erilaisia muuttujia, jolloin testiolosuhteista saadaan vaihtelevampia. Erilaisten muuttujien avulla kuormittuu auto testin aikana tehokkaammin kuin ennen. WLTP-testin aikana seisoo auto yhä vähemmän paikallaan kuin NEDC:n aikana. Kiihdytyksiä ja jarrutuksia on enemmän ja lisäksi keski-, sekä maksiminopeutta on nostettu. Vanhan NEDC-testin aikana ajettiin enemmän tasaista vauhtia ja ilman suurempia muutoksia. Se suosi etenkin pienikokoisia turbomoottoreita. Myös enemmän paikallaan olemisen vuoksi, suosi vanha testisykli start- ja stop-järjestelmiä enemmän, niiden ollessa siihen käyttöön tarkoitettuja. Mallisarjan kevyin malli ilman lisävarusteita ja ilmanvastuksiltaan pienin, sekä raskain malli kaikkine lisävarusteineen testataan erikseen, toisin kuin NEDC:ssä. WLTP on niin tarkka, että sen tuomat muutokset uskotaan tuovan näennäisesti 20 - 30 % lisää polttoainekulutuslukumia (Motiva 2017).

Suurimmat muutokset siirryttäessä vanhasta NEDC:stä uuteen WLTP:hen on esitettyinä taulukossa 5. WLTP:n ansiosta tulevat testissä menestymään hybridautot, manuaalivaihteistot, sekä suurikokoiset moottorit. Huomioon otettavana asiana on pienten turbomoottoreiden huono menestyminen testeissä, sillä niiden todelliset lukemat poikkeavat suuresti sallituista arvoista. WLTP suosii pääasiassa hybridautoja sen tasosta riippumatta (mikrohybridi, plug in hybridi tai täyshybridi). Autovalmistajat ovat sitä mieltä, että mootto-

reiden iskuilavuuksien pienentämien eli ”downsizing” on mennyttä aikaa ja uuden testisyklin myötä aletaan moottoreita suunnittelemaan yhä enemmän kyseiselle automallille sopivaksi ”rightsizing”. (PA Consulting 2018).

TAULUKKO 5. WLTP vs NEDC (WLTP FACTS 2018)

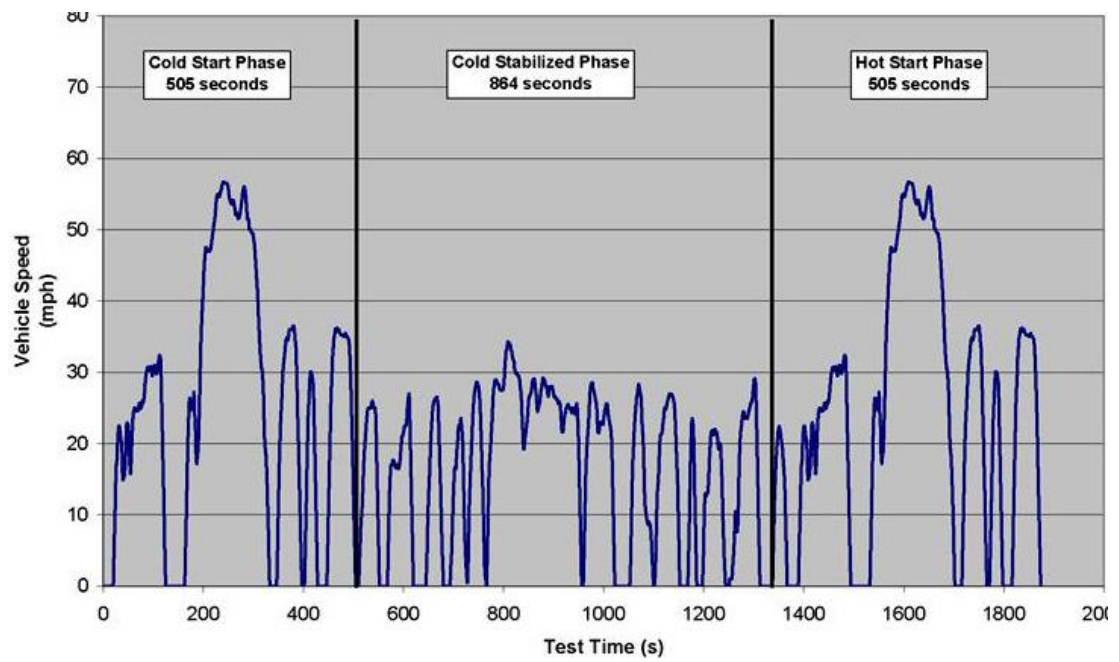
Muutokset	NEDC	WLTP
Sykli	Yksittäinen testisykli	Dynaaminen todellista ajoa muistuttava sykli
Aika	20 min	30 min
Matka	11 km	23,25 km
Ajovaihteet	(2 ajovaihdetta) 66 % kaupunki 34 % maantie	(4 Dynaamista) 52 % kaupunki 48 % maantie
Keskinopeus	34 km/h	46 km/h
Maksiminopeus	120 km/h	131 km/h
Valinnaisten varusteiden vaikutus	Ei huomioida	Huomioidaan
Vaihteiden vaihto	Kiinteät vaihteiden vaihto-ohjelmat	Ajoneuvolla yksilölliset vaihteiden vaihto-ohjelmat
Lämpötila	20 - 30°C	23°C = CO ₂ ja korjataan vastaamaan 14°C

4.4 Yhdysvaltalainen testikäytäntö FTP-75

UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) eli FTP-72 on Yhdysvalloissa käytetty päästömittaus- ja kulutustesti. Sitä ei tule sekoittaa raskaan kaluston UDDS testiin. Ajosykli simuloi kaupunkiajoa 12,07 km pituisella matkalla ja useilla pysähdyksillä. Maksiminopeus matkan aikana on 91,25 km/h ja keskinopeus 31,5 km/h. Sykli koostuu kahdesta eri vaiheesta: 1: (505 s, 5,78 km ja 42,2 km/h keskinopeus) ja 2: (806 s samoilla parametreillä) (Dieselnet 2018)

Testistä on olemassa useampi eri versio: Ruotsissa A10 tai CVS (Constant Volume Sampler) cycle) ja Australiassa ADR 27 (Australian Design Rules). Päästölukemat kirjataan ylös yksikössä g/km tai g/maili. Tunnetuin versio testisyklistä kantaa nimeä EPA FTP-75 (Federal Test Procedure). EPA (United States Environmental Protection Agency) on Yhdysvaltojen kansallinen ympäristövirasto ja sen tehtävänä on päästöstandardien luominen siellä. FTP-75:tä käytetään päästömittaus- ja kulutustestinä kevyelle kalustolle ja sen tarkoituksena on mallintaa kaupunkiajoa (kuva 5). Lisänä FTP-75:ssä on ”kuuma vaihe” joka alkaa, kun moottori on ollut sammutettuna 10 minuutin ajan. Vuonna 2008 testiä

täydennettiin kahdella lisätestillä: Aggressiivinen ajo SFTP SC06 ja maantieajo HWET: Näiden testien lisäksi voidaan tehdä valinnainen ilmastointitesti SFTP SC03. (Dieselnet 2018).



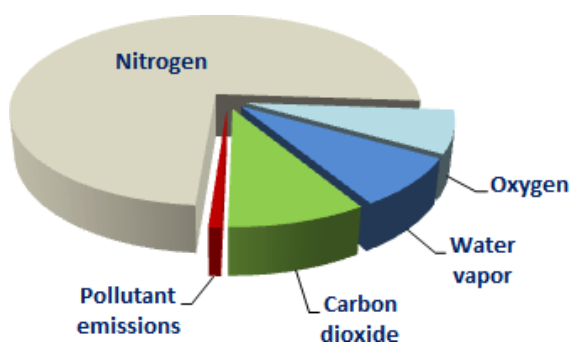
KUVA 5. FTP-75 Federal Test Procedure: nopeus ajan suhteen (EPA 2018)

5 MOOTTORITEKNIikka

Autotekniikan kehitystavoitteena on aina ollut polttoainekulutuksen vähentyminen. Ennen syy löytyi käyttäjän halusta maksaa vähemmän polttoaineesta, mutta nykyisin se on peräisin pakokaasulainsäädännöstä. Ilmastonmuutos ja kasvihuonepäästöjen vähentäminen ovat olleet jo pitkään tavoitteena. Tämä on pakottanut autovalmistajat kehittämään uusia ratkaisuja nopealla aikataululla, mutta samalla pitäen mielessä auton suorituskyvyn säilymisen ja jopa lisääntymisen. Uusia moottorimalleja autovalmistajien tuodessa markkinoille, ovat he aina pystyneet lisäämään suorituskykyä, käyttöominaisuuksia ja vähentämään kulutusta. Keskeisenä keinona ovat olleet palamisen optimointi sytytystä ja polttoaineen syöttöä kehittämällä. Seuraavissa kappaleissa tutustutaan polttoainemuodostuksen teoriaan, jotta ymmärretään säänneltyjen päästöjen syntyyn vaikuttavat tekijät ja myöhemmissä kappaleissa niitä varten tarvittavien jälkikäsitteilylaitteistojen toimintaperiaatteita (Autoalan tiedotuskeskus 2018).

Dieselmootorit ovat suunniteltuja toimimaan ilmaylimäärällä, jotta vältetään voimakkaalta savutukselta. Tämä tarkoittaa sitä, että niissä on enemmän ilmaa kuin stoikiometrisessä tilassa. Pelkistyskatalysaattori ei toimi hapettavissa olosuhteissa, joten dieselmootoreissa ei voida käyttää kolmitoimikatalysaattoria, vaan sen sijasta niissä käytetään hapettavaa katalysaattoria. Hapetuskatalysaattorit vähentävät tehokkaasti häkää ja hiilivetyjä, sekä jonkin verran hiukkaspäästöjä, ne eivät kuitenkaan vähennä typen oksideja. Tämän vuoksi dieselmootorit aiheuttavat suuremmat typen oksidipäästöt kuin bensiinimootorit. (Motiva 2006).

Dieselpäästöt ovat kemialliselta koostumuskeltaan hiilivetyjä, jotka ihanteellisesti palassa hajoavat hiilidioksidiksi ja vedeksi. Dieselpäästöt kokonaisuudessaan koostuvat lisäksi moottorin käyttämättömästä ilmaylimäärästä. Aineiden volumetrinen osuus esitetynä kuvassa 11. (Dieselnet 2018).



KUVA 11. Dieselin kemiallinen koostumus (Dieselnet 2018)

Kuten bensiinimoottoreissa, myös dieselmoottoreissa polttoaineseoksen palaminen ei aina ole ihanteellista. Tämä voi johtua esimerkiksi vaiheeseen jääneestä puristuksesta, aineiden välisestä kemiallisesta reaktiosta korkeissa lämpötiloissa, moottoriöljyn joukkoon sekoittumisesta, tai rikin polttamisesta seoksessa. Tällöin reaktiot aiheuttavat epäihanteellista palamista ja sitä kautta päästöjä, jotka ovat haitallisia sekä ihmiselle että ympäristölle. Dieselmoottorin yleisimmät päästöt ovat hiilivedyt (HC), häkä (CO), hiukasmassat (PM) ja niistä haitallisimmat ovat typenoksidit (NO_x). (Dieselnet 2018).

Ottomoottoreiden suurin kehitysaskel on ollut suoraruiskutustekniikan, sekä dieselmoottoreissa polttoaineen suihkutustekniikan kehittyminen. Moottorin osia valmistettaessa ovat toleranssit pienentyneet ja tarkkuus lisääntynyt, joten sisäisiä vastuksia on voitu pienentää. Toleranssien, sekä sisäisten vastusten pienentymiseen ovat vaikuttaneet lisäksi halu saada pienempiä moottoreita. Ahtamistekniikkaa kehittämällä on moottoritehoja voitu optimoida ja käyttöominaisuudet ovat parantuneet. Myös vaihteiden käytöllä on merkitystä energiatehokkuuden kannalta, jotta tarvittava teho saadaan mahdollisimman pienellä kulutuksella. Tämä on johtanut siihen, että vaihteiden määrä on lisääntynyt manuaali- sekä automaattivaihteistoissa. Automaattivaihteistot osaavatkin nykyään yhä paremmin valita autolle sen taloudellisimman vaihteen. (Autoalan Tiedotuskeskus 2018).

5.1 Polttoaineseoksen muodostus

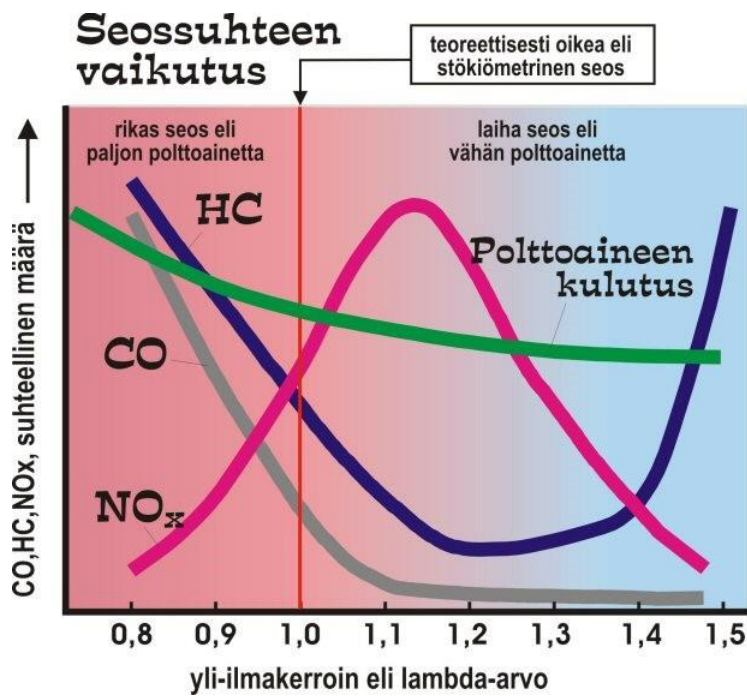
Polttoaineen täydelliseen palamiseen tarvitaan 1 kg polttonestemäärää kohden noin 14,7 kg ilmaa. Tällä seossuhteella lambda-arvo λ eli ilmakerroin on 1 (kaava 1). (Denton 2006, 122).

$$\lambda = \frac{\textit{sylinteriin tuotu ilmamäärä}}{\textit{teoreettinen ilmamäärä}} \quad (1)$$

Ilman ja polttoaineen seossuhdetta muutetaan moottorin käyttötilanteen mukaan, jotta suorituskyky, ajettavuus, kulutus ja päästöt kohtaavat. Vastaavia tilanteita ovat:

- **Kylmäkäynnistys:** Rikkaampaa seosta tarvitaan, sillä polttoaine ei höyrysty yhtä helposti.
- **Kiihdytys:** Rikkaampaa seosta käytetään parantamaan suorituskykyä.
- **Maantieajo:** Laiha seos (polttoainetaloudellisuus)
- **Tyhjäkäynti:** Polttoainetta suihkutetaan mahdollisimman vähän, (polttoainetaloudellisuus ja päästöt) (Denton 2006, 122).

Moottorin suurin teho ja tasainen käynti saavutetaan rikkaalla seoksella (ilmakerroin 0,9). Tällöin kuitenkin hiilimonoksidit CO ja hiilivety määrät HC ovat suuria, tällöin myös polttonesteen ominaiskulutus on suuri. Kuvasta 10, voidaan havaita seoksen laihentuessa haitallisten päästöjen alentuvan, lambdaan ollessa noin 1. Tällöin suurin päästöjen alentuma tapahtuu typen oksideilla. (Denton 2006, 122).



KUVA 10. Pakokaasukomponentit ilmakertoimen funktiona (Lehtimäenpaja 2016)

5.2 Hiilimonoksidi (CO)

Hiilimonoksidi CO (häkä) on väritön ja hajuton kaasu. Sen vaarallisuus perustuu sen kykyyn yhtyä veren hemoglobiiniin happea paremmin, jolloin normaalit elintoiminnot estyvät. Hiilimonoksidia eli häkää syntyy ilma-alijäämän ollessa kyseessä, epätäydellisen palamisen johdosta. Hiilimonoksidipitoisuuden vaikuttavat eniten ilman ja polttonesteen seossuhde. Palamisen aikana hiilimonoksidipitoisuus on suurimmillaan. Paisuntavaiheen aikana osa hiilimonoksidista hapettuu hiilidioksidiksi. Runsaalla happipitoisuudella (ilma-ylijäämä) jakautuu seos epätasaisesti ja seoksen muodostuminen vaihtelee työtahdistä toiseen. Runsaalla happipitoisuudella (suurella ilmaylijäämällä) korkeassa palamislämpötilassa, laajenemisvaiheessa tapahtuva jälkihappettuminen ei enää saavuta termodynaamista tasapainotilaansa ja hiilimonoksidipitoisuus nousee. (Ottomoottorien pakokaasutekniikka 1993, 3).

5.3 Hiilivedyt (HC)

Ilma-alijäämällä epätäydellisen palamisen johdosta aiheutuu palamattomien tai osittain palaneiden hiilivetyjen jääminen pakokaasuihin. Jos palaminen ei ehdi tapahtua tai seos palaa huonosti palotilan alueilla, aiheuttaa se hiilivety päästöjä. Kyseisiä alueita ovat sylinterien seinämien läheisyys, sillä paloliekki seinämän jäädyttävän vaikutuksen vuoksi sammuu, sekä kohdat joihin liekki ei ylipäänsä ulotu. Poistotahtin aikana osa palamattomista hiilivedyistä sekoittuu kuumien pakokaasujen kanssa ja osa niistä palaa. Hiilivety päästöjä syntyy lisäksi ohipuhalluksen seurauksena, sillä palamaton kaasuseos tunkeutuu männän ja sylinterin välisen raon kautta kampikammioon. Jos kampikammio tuuletetaan johtamalla kaasut imusarjaan, johdetaan nämä hiilivedyt uudestaan sylinteriin aiheuttamatta päästöjä. (Ottomoottorien pakokaasutekniikka 1993, 3).

Hiilivedyt ja häkä ovat epäpuhtaan palamisen tulosta. Rikkaalla seoksella esiintyy hapen puutetta, joka nostaa häkä ja hiilidioksidiarvoja. Laihalla seoksella on alempi liekin lämpötila, jolloin paloliekki sammuu herkemmin lähellä palokammion seiniä ja jolloin HC arvot nousevat. Nokea syntyy ainoastaan homogeenisissä moottoreissa erittäin rikkailla seoksilla. Rikki-oksidi määrä riippuu polttoaineessa olevan rikin määrästä. (Reif ym. 2014, 411).

5.4 Typen oksidit (NO_x)

Typen oksidit syntyvät neljän eri tekijän avulla: hapen, typen, korkean lämpötilan ja käytettävissä olevan ajan avulla. Koska hapen ja typen määrä on riippuvainen polttoaineseoksen rakenteesta ja käytettävissä oleva aika riippuu moottorin käyntinopeudesta, saadaan typen oksideja vähennettyä vain matalilla palokammion maksimilämpötiloilla. (Reif, ym. 2014, 411).

Typpioksidi (NO) on väritön kaasu ja hapettuu ilmassa typpioksidiksi (NO₂). Typpioksidi tunnetaan voimakkaana verimyrkkinä, sillä se vaikuttaa veren hemoglobiiniin yhtymällä nopeasti keskushermostoon. Typpioksidi (NO₂) on punaruskea kaasu, jolla on voimakas pistävä haju. Se aiheuttaa keuhkojen limakalvojen tuhoutumista. Typpimonoksidia (NO) ja typpioksidia (NO₂) merkitään yhteisesti (NO_x). (Reif, ym. 2014, 411).

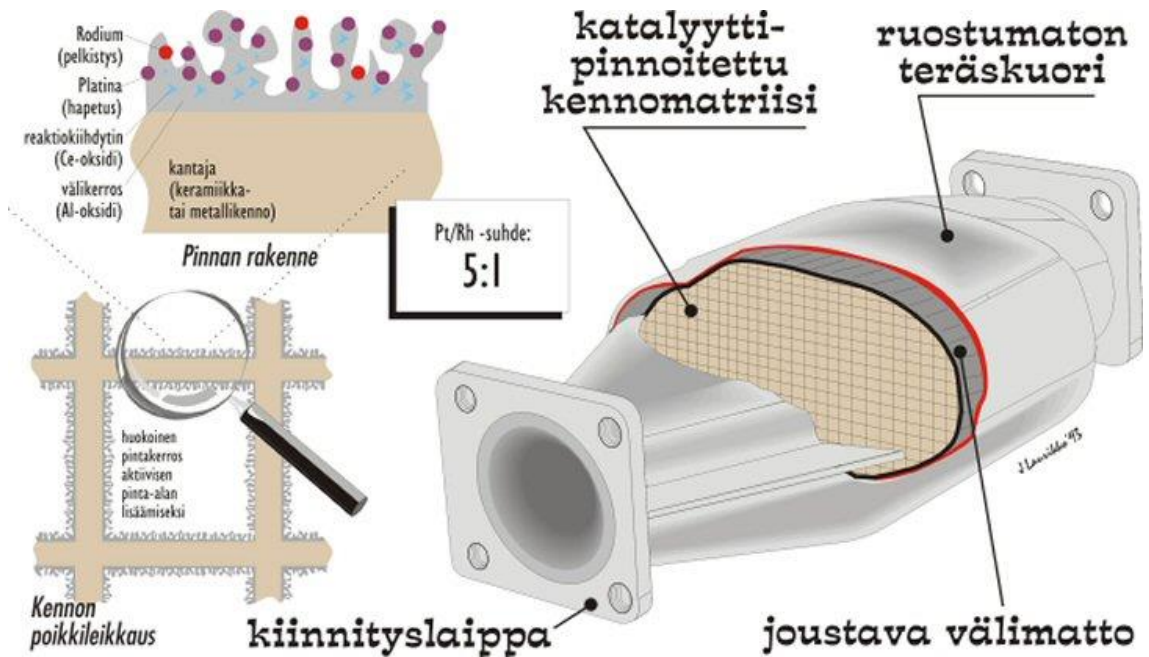
6 PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELYLAITTEISTOT

Euroopassa sekä Yhdysvalloissa ovat ilmastonmuutosta kiihdyttävät kasvihuonepäästöt laskeneet niitä rajoittavien standardien, sekä rajoitusten avulla. EU-maissa Euro-standardien, Yhdysvalloissa Tier-, ja CA LEV standardien avulla. Standardeilla rajoitetaan haitallisia hiukkaspäästöjä (PM), typen oksideja (NO_x), hiilimonoksideja (CO) ja hiilivetyjä (HC). Standardien tiukkeneminen pakottaa autonvalmistajia tehostamaan jälkikäsitteilylaitteistojensa kehitystä jatkuvalla syötöllä. Päästöihin voidaan vaikuttaa suoraan palota-
pahtuman suunnittelulla ja polttoaineen valinnalla. Loppupeleissä kuitenkin jälkikäsitteilylaitteiston suunnittelu on avainasemassa standardien tiuketessa. Tällä hetkellä olemassa olevan tekniikan avulla voidaan hiukkaspäästöjä vähentää hiukkassuodattimilla (DPF), typen oksideja pakokaasujen takaisinkierrätyksellä (EGR), NO_x-loukuilla (LNT) tai urearuiskutusjärjestelmillä (SCR). Tässä luvussa tutustutaan näihin suurimpiin teknisiin vaikuttajiin päästöjen hallinnan kannalta. Tällä hetkellä tehokkaimmat laitteistot diesel-
päästöjen kokonaisvaltaiseen laskemiseen ovat SCR ja LNT (Caremissionstestingfact 2018).

6.1 Katalysaattori

Kolmitoimikatalysaattori oli tullessaan merkittävä tekninen innovaatio ja laski päästöjä huomattavan alhaiselle tasolle. Katalysaattori vähentää hiilivety, häkä ja typenoksidien määriä tehokkaasti. Kuitenkin syntyvät hiukkaset eivät ole bensiinimoottorin ongelma, toisin kuin dieselkäyttöisten autojen. Katalysaattori tuli Euro 1 standardin myötä ja ilman sitä ei bensiinikäyttöisissä moottoreissa olisi päästy lähellekään vaadittua tasoa. Suomessa yli 70 % henkilöautoista on varustettuna katalysaattorilla. (Motiva 2006).

Katalysaattori sijaitsee moottorin jälkeen pakoputkessa. Bensiinimoottoreissa käytetään usein kolmitoimikatalysaattoria. Kolmitoimikatalysaattori koostuu viidestä eri osasta jotka ovat keramiikkataso, tärinänvaimennusverkko, ruostumaton teräskuori, pakokaasujen ohjauslevy, sekä eristelevy. Yksinkertaistettu rakenne (kuva 12). (Vihanta 1994, 56)



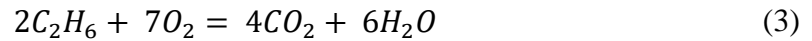
KUVA 12. Katalysaattorin rakenne (Autotieto 1993)

Keraamisen ja metallisen katalysaattorin runkorakenne pinnoitetaan alumiinioksidilla (AlO_2). Alumiinioksidin avulla saadaan katalysaattorin tehollinen pinta-ala suurennettua noin 7000-kertaiseksi. Katalysaattorin keraaminen monoliittirakenne eli tuhannet kanavat, päällystetään pienellä määrällä (noin 2 – 3 g) katalyyttinä toimivaa platinaa ja rhoodiumia. (Vihanta 1994, 56).

Kolmitoimikatalysaattorin nimitys tulee sen kyvystä puhdistaa samanaikaisesti poltto- neste/ilmaseoksen palamisesta syntyneet hiilivedyt (HC), häkä (CO), sekä typen oksidit (NO_x) vedeksi (H_2O), typeksi (NO) ja hiilidioksidiksi (CO_2). Teoriassa kemiallisia reaktioita syntyy kaksi eli hapettava ja pelkistävä, seossuhteen vaihdellessa hieman $\pm 1 - 2\%$ $\lambda = 0,995 - 1,005$ teoreettisen seossuhteen molemmiin puolin. (Vihanta 1994, 56).

Hapettava reaktio: Seoksen mennessä hieman laihan puolelle, saa pakokaasuissa oleva jäännöshappi aikaan hapettavan reaktion hiilimonoksidille, sekä hiilivedylle. Kemiallista prosessia kiihdytetään platinan avulla. Samaan aikaan katalysaattorin pintaan varastoituu vapaata happea. Kemialliset reaktiot esiteltynä kaavoissa 2 ja 3. (Vihanta 1994, 56).





Pelkistävä reaktio: Seossuhteen mennessä rikkaalle puolelle, syntyy pelkistävä reaktio tyyppien oksideille, kemiallista prosessia kiihdyttävän aineen rhodiumin avulla. Kemiallinen reaktio kaavassa 4. (Vihanta 1994, 56).



Pelkistyskatalysaattori toimii ainoastaan silloin, kun moottori käy lähellä stoikiometristä tilaa. Stoikiometrisessä tilassa sylintereihin menevän ilman ja polttoaineen suhde on sellainen, että palaminen tapahtuu ihanteellisesti ilman ylijäävää ilmaa tai polttoainetta. Jotta varmistetaan siitä, että moottori käy tätä ihanteellista käyntitilaa on autoon asennettava kaksi happianturia (lambda-anturi) ennen ja jälkeen katalysaattorin. Toisen anturin tehtävänä on toimia diagnostiikka-anturina, joka varmistaa, että puhdistaminen tapahtuu oikealla tavalla. Antureilta saatujen tietojen avulla ohjausyksikkö säätelee tarvittavan polttoainemäärän. (Motiva 2006).

Katalysaattorin puhdistusteho riippuu sen saavutettavissa olevasta toimintalämpötilasta. Esimerkiksi katsastuksen aikana viallinen katalysaattori voidaan tunnistaa viallisten päästöarvojen korjautumalla siten että, katalysaattoria lämmitetään runsaasti. Tämä johtuu siitä, että vanha katalysaattori ei lämpene yhtä nopeasti oikeaan toimintalämpötilaansa kuin uusi ja vaatii vähintään 250°C toimintalämpötilan, jotta puhdistaminen alkaa, 400 – 800°C, jotta katalysaattorilla on paras puhdistusteho ja pisin elinikä. Seuraavaksi esitellään katalysaattorin toimintalämpötilojen vaikutuksia laajemmin katalysaattorin puhdistustehoon nähden. (Vihanta 1994, 56).

Alue 2.1 Alhainen lämpötila

Ajettaessa pienillä nopeuksilla (tasaisesti), vallitsee katalysaattorissa alhainen lämpötila. Tällöin katalysaattorin karstoittuminen on voimakkaampaa, huonolaatuisen bensiinin ja öljyjen ainesosien (noki, fosfori) palaessa pois (kuva 13). (Vihanta 1994, 57).

Alue 2.3 kohonnut lämpötila

Ajettaessa täydellä kaasulla moottoritiellä, kohoaa katalysaattorin lämpötila. Lambda säätö ei tällöin ole toiminnassa ilmakertoimella lambda = 0,9 ja CO-päästöt 2...5 %. (kuva 13). (Vihanta 1994, 57).

Alue 3 korkea lämpötilataso

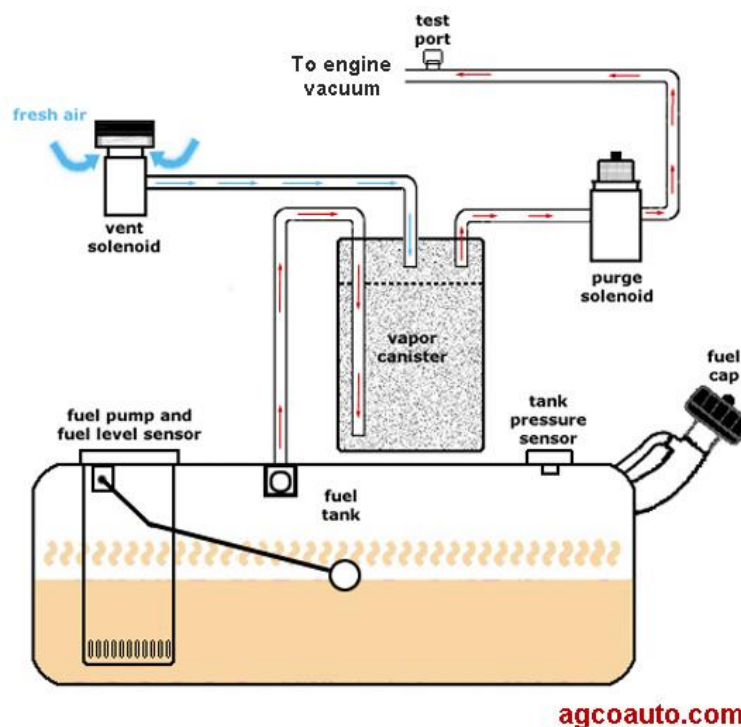
Katalysaattorin tulee saavuttaa oikea käyttölämpötilansa toimiakseen oikein. Saavuttaessaan lämpötilan 250°C alkaa katalysaattorissa puhdistusreaktio. Parasta puhdistusta varten olisi hyvä saavuttaa käyttölämpötila 400 - 800°C. Korkea lämpötila säästää katalysaattoria. Katalysaattorissa tapahtuva terminen vanheneminen alkaa jalometallien ja alumiinioksidikerroksen sintraantumisella 800 - 1000°C lämpötilassa, joka johtaa aktiivisen puhdistuspinta-alan pienenemiseen. Katalysaattorin saavuttaessa 1000°C käyttölämpötilan, vahvistuu terminen vanhentuminen erittäin nopeasti, tällöin puhdistuskyky menetetään miltei kokonaan (kuva 13). (Vihanta 1994, 57).

1500 Celsius		
		— Sulaminen — Pehmeneminen
1250	Alue 3: Ylikuumentuminen Siirtymäalue	
1000		
850	Alue 2: Varsinainen toiminta-alue	Alue 2.3 Voimakas terminen vanhentuminen
750		Alue 2.2 Keskimääräinen terminen vanhentuminen
500		Alue 2.1 Vähäinen terminen vanhentuminen
		Toiminta alkaa (80 000 km ajettu)
		Toiminta alkaa (uusi katalysaattori)
250	Alue 1: Ei toiminnassa	lyhyt vaihe (30 - 80 s) kylmäkäynnistyksen jälkeen

KUVA 13. Katalysaattorin toimintalämpötilat (KUVA: Mihalis Skiathitis 2017)

6.2 Polttonestehöyryjen talteenottojärjestelmä (EVAP)

Polttoainetta pumppaamalla säiliöstä moottorille, syrjäyttää ilma polttoaineen vaatiman tilan. Tällöin solenoidi-venttiili tarjoaa puhdasta ilmaa tilalle. Ilman korvaavaa ilmaa syntyy tyhjiö, joka voittaisi polttoainepumpun vaatiman paineen. Tällöin polttonestehöyryt vapautuisivat polttoainetankista. (AGCO 2018). Polttonestehöyryjen talteenottojärjestelmän EVAP (Evaporative Emission Control System) tärkein tehtävä on siis varmistaa, että polttonestehöyryt eivät kulkeudu ilmakehään tai matkustamoon sisälle. Polttonestesäiliöstä vapautuvat höyryt johdetaan aktiivihiilisäiliöön. Aktiivihiilisäiliöstä polttonestehöyryt johdetaan tyhjennysventtiilin avulla imetyn ilman mukana imusarjaan ja lopuksi sylinteriin. Tällöin aktiivihiilisäiliö tyhjentyy eli (regeneroituu). Moottorin ohjainlaitteen avulla regenerointivirtausta ohjataan moottorin toimintatilan mukaan. (Mencher 2006, 17). Polttonesteen talteenottojärjestelmä esitettynä kuvassa 15,

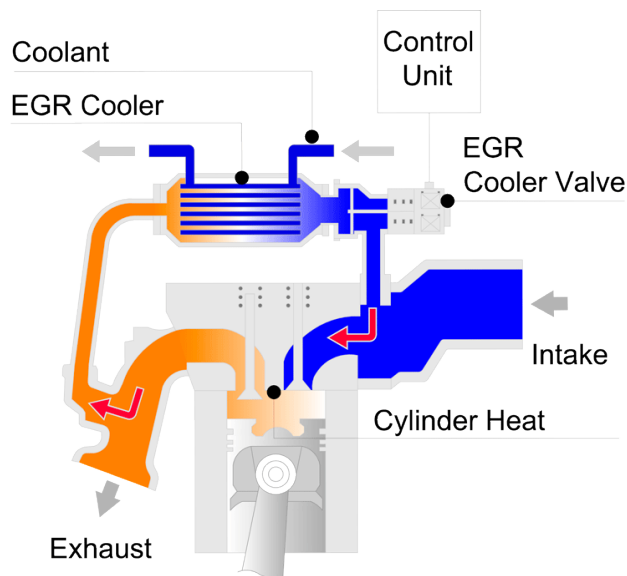


KUVA 15. Pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmä (AGCO 2018)

jossa fuel tank = polttoainetankki, fuel cap = polttoaineen korkki, vapor canister = aktiivihiilisäiliö, vent solenoid = solenoidi-venttiili, purge solenoid = tyhjennysventtiili, fuel level sensor = polttoaineen tasoanturi ja tank pressure sensor = polttoainesäiliön paineanturi.

6.3 Pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmä (EGR)

Typen oksidien (NO_x) määrää voidaan laskea käyttämällä pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmää (EGR). Typen oksidit muodostuvat, kun sylinterissä vallitsee korkea lämpötila jolloin ilmakehän happi ja typpi yhdistyvät. Mitä enemmän lämpötila nousee, sitä enemmän typen oksideja muodostuu. EGR:n ideana on alentaa palamislämpötilaa, jolloin typen oksidien syntyminen on vähäistä. EGR:ää käytettiin Yhdysvalloissa 1970 luvulla ennen kun kolmitoimikatalysaattorit yleistyivät ja Euroopassa vuodesta 1996 myytyihin dieselautoihin ja pakettiautoihin. (Motiva 2006). EGR:n huonona puolena on sen ominaisuus kuluttaa polttoainetta, joten sitä ei mielellään sovelleta raskaassa kalustossa, jossa polttoainekustannukset ovat kriittisemmässä asemassa. EGR-järjestelmä voi olla jäähdytetty kuten kuvassa 16, jolloin se saavuttaa paremman tuloksen. (Cedinox 2017).



KUVA 16. EGR-venttiilin toiminta (Cedinox 2017)

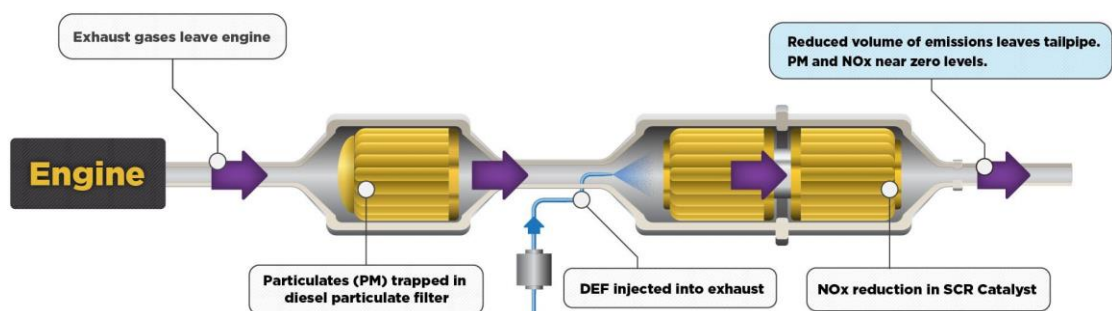
Pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmä tarvitsee yhteyden imusarjaan, jotta pakokaasut saadaan hyötykäytettyä. Pakokaasujen takaisinkierrätysventtiilin säätyvällä poikkipinta-alalla ohjataan sylinteriin uudelleen kierrätettävien pakokaasujen määrää. Takaisinkierrätetyt kaasut vaikuttavat palotapahtumaan. Niiden avulla lämpötilahuiput alenevat ja täten NO_x päästöt pienenevät. Vähentyneen imuilman johdosta myös polttoainenkulutus pienenee. Pakokaasujen takaisinkierrätysventtiilin poikkipinta-alaa ohjataan impulsisuhteella moottorin ohjainlaitteelta käsin, jolloin käsky muuttuu sähköpneumaattiseksi. Sallittu kierrätettyjen pakokaasujen määrä riippuu moottorissa vallitsevasta toimintati-

lasta ja toimintasuhteesta (esim. lämpötila). Liian suuri takaisinkierrätysaste johtaa myöhäiseen palamiseen ja jopa palamiskatkoksiin, sekä aiheuttaa moottorin epätasaisen käynnin. (Mencher 2006, 15).

6.4 Urearuiskutus-järjestelmä (SCR)

Dieselmoottorin suurimpana ongelmana ovat pakokaasujen joukossa olevat typen oksidit. Typen oksideja voidaan vähentää ruiskuttamalla ammoniakkia pakokaasujen joukkoon. SCR (Selective Catalytic Reduction) on tehokas pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmä, joka poistaa typen oksideja pelkistysreaktion avulla. Järjestelmä ruiskuttaa ureaa pakokaasujen joukkoon ja ennen varsinaista katalysaattoria. (Motiva 2006). Pelkistysaine on usein autoteollisuuteen tarkoitettua ureaa eli ammoniakkia ja tunnetaan nimellä DEF (Diesel Exhaust Fluid) tai kauppanimellä AdBlue. DEF käynnistää kemiallisen reaktion, joka muuntaa typen oksidit typeksi (N_2), vedeksi (H_2O), sekä pieniksi määriksi hiilidioksidihiuksia (CO_2) (kuva 17). Reaktiotuotteina syntyy myös meidän hengitettävän ilman luonnollisia komponentteja. SRC järjestelmän avulla voidaan yksinään vähentää typen oksideja jopa 90 %. (Diesel Technology Forum 2018). Nykypäivänä standardien tiukeudessa AdBlueta ruiskutetaan aina vain enemmän ja enemmän, tavoitteena alittaa tietty päästöluokka. Esimerkiksi Euro 4 käyttää AdBlue:ta (3 - 4 %) ja Euro 5 (5 - 7 %) polttoaineen määrästä. Urearuiskutusta ei voi käyttää lämpötilan ollessa alle $200^{\circ}C$. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, ettei ureakatalysaattori toimi, jos moottorin kuormitus on alhainen. (Dieselforum 2017).

Diesel Emissions Control System



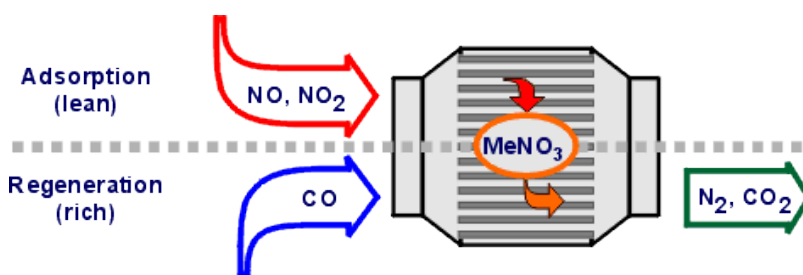
KUVA 17. SRC (Dieselforum 2017)

SCR on tällä hetkellä yksi kustannustehokkaimmista ja polttoainetaloudellisimmista päästöjenhallintateknologiajärjestelmistä. 1.1.2010 jälkeen kaikkien valmistettujen raskaiden dieselmoottoreiden on täytettävä uusimmat EPAN päästöstandartit, jotka ovat tällä hetkellä maailman tiukimmat. SCR:llä typen oksideja saadaan vähennettyä jopa 90 % ja sen lisäksi samalla vähentäen hiilivetypäästöjä (HC) ja hiilidioksidipäästöjä (CO_2) jopa 50 %, pienhiukkaspäästöjä (PM) 30 – 50 %. SCR järjestelmä voidaan liittää myös suoraan hiukkasuodattimeen vielä suuremmalla puhdistustuloksella. (Dieselforum 2017).

6.5 Hiukkasloukku (LNT)

Laihaseosmoottoreiden pakokaasujen joukossa on runsaasti typen oksideja. Niitä voidaan vähentää esimerkiksi LNT (Lean Nox Trap) - järjestelmällä. LNT:tä pidetään yhdestä lupaavimmista tulevaisuuden NO_x vähentäjistä. Typen oksidit kerätään säiliöön, jolloin kyseessä on LNT. Säiliön ja sen tyhjennykseen kykenevää järjestelmää kutsutaan NSR-järjestelmäksi (Nox Storage and Reduction) (AZO Materials 2015).

NSR-tekniikka varastoi typen oksidit silloin, kun moottoria käytetään laihalla seoksella ja puhdistaa ne myöhemmin hiilivedyllä (HC), vedyllä (H_2) tai hiilimonoksidilla (CO) typeksi (N_2). Puhdistus tapahtuu lyhyellä rikkaalla ajanjaksolla. Laitteen kemiallinen reaktio esitettynä kuvassa 18. (AZO Materials 2015).

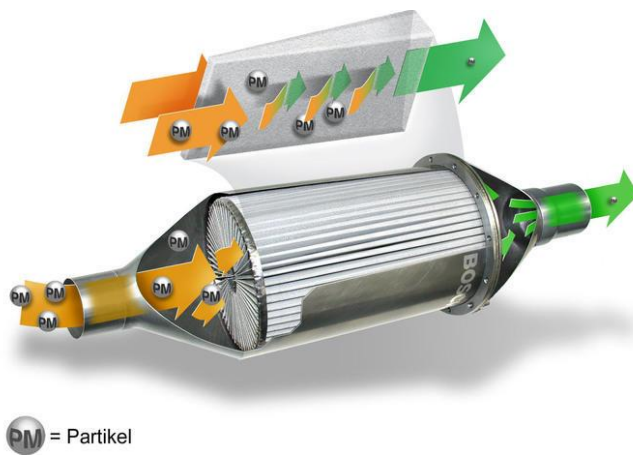


KUVA 18. Lean NOx Trap (Dieselnet 2018)

6.6 Hiukkassuodatin (DPF)

Dieselmoottoreissa syntyvät hiukkaset ovat myös ongelma. Diesel Particulate Filter (DPF) eli hiukkassuodattimet ovat laitteita jotka fyysisesti kaappaavat diesel-hiukkasia, jotta ne eivät pääsisi ilmakehään. Hiukkaset ovat pääasiassa nokea, joka poltetaan pois

regeneroinnin avulla, eli suodattimen puhdistavalla termisellä regeneroinnilla. Dieselmootoreiden hyötysuhde on korkea, joten pakokaasujen lämpötila on usein liian alhainen, jotta hiukkasten puhdistaminen suodattimessa käynnistyisi. Tätä varten hiukkasuodattimissa voidaan käyttää hapetuskatalysaattoria alentamaan noen hapettumislämpötilaa. Tällöin on kyseessä passiivinen DPF. Aktiivinen DPF nostaa lämpötilaa ajoittain riittävän korkealle, jotta suodatin puhdistuu. Tämä hoidetaan polttamalla hieman lisää polttoainetta tai lämmittämällä katalysaattoria sähköisesti. (Motiva 2006). Suodattimet ovat kehittyneet ajan kuluessa ja nykypäivänä niillä voidaan saavuttaa jopa 90 % puhdistusteho. Niillä on myös hyvä mekaaninen ja terminen kestävyys. Tällä hetkellä hiukkasuodattimista on tullut tehokkain apuväline dieselmootoreiden hiukkaspäästöjen sekä hiukkasmassojen hallintaan. (Dieselnet 2018).

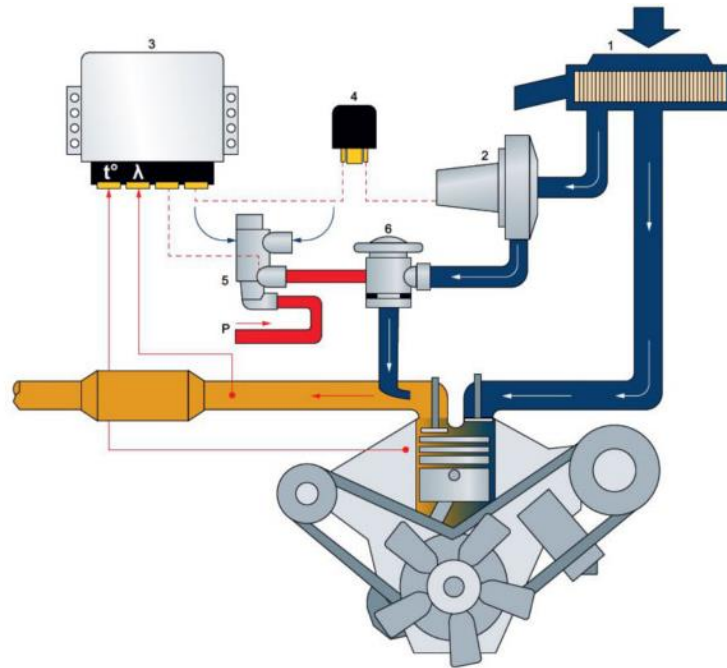


KUVA 19. Hiukkassuodatin (Motorzeitung 2015)

6.7 Toisioilmajärjestelmä (SAI)

Secondary Air System (SAI) on toisioilmajärjestelmä, jonka tarkoituksena on vähentää häkää (CO) ja hiilivetyjä (HC) kylmäkäynnistyksen aikana ja ennen kuin katalysaattori on saavuttanut oikean toimintalämpötilansa (300 – 350 °C). Kolmitoimikatalysaattorilla voidaan saavuttaa jopa 90 % puhdistusteho stoikiometrisesti toimivissa bensiinimootoreissa. Kuitenkin keskimäärin 80 % ajosyklin muodostamista päästöistä syntyvät kylmäkäynnistyksen aikana. Jos pakoputkistossa on riittävästi jäännöshappea, sekä lämpötila on tarpeeksi korkea, tapahtuu kemiallinen reaktio jolloin (HC) ja (CO) muuttuvat hiilidioksidiksi (CO₂) ja vedeksi (H₂O). Jotta kylmäkäynnistysvaiheessa taataan riittävä hapen

saanti ja seoksen ollessa rikas, lisätään järjestelmän avulla lisähapetta. Kolmitoimikatalyysaattorilla, sekä lambdasäädöllä toimivissa järjestelmissä järjestelmä lopettaa toimintansa 100 sekunnin kuluttua. Katalyysaattorin toimintalämpötila saavutetaan nopeasti kemiallisessa reaktiossa syntyvän lämmön kautta. Ilmaa voidaan syöttää joko passiivisesti sekä aktiivisesti. Passiivinen järjestelmä käyttää pakosarjan painenvaihteluita hyväksi. Aktiivisessa järjestelmässä ilmaa syötetään pumpun avulla ja sillä saavutetaan järjestelmälle parempi hallinta. (Hella 2018). Toisioilmajärjestelmän rakenne esitettynä kuvassa 20,



KUVA 20. Toisioilmajärjestelmä (Hella 2018)

jossa 1. ilmansuodatin, 2. toisioilmapumppu, 3. moottorinohjausyksikkö, 4. ohjausrele, 5. vaihdeventtiili ja 6. yhdistelmäventtiili

6.8 Euro 6-luokan vaatimukset

Euro 4:stä Euro 5:teen siirryttäessä vaadittiin bensiinimoottoreilta parempaa palotapahtuman hallintaa. Parempi palotapahtuman hallinta voidaan toteuttaa käyttämällä esimerkiksi nopeampia lambda-antureita, jolloin seoksen säätö on tarkempaa. Samaan aikaan vaadittiin myös katalyysaattorimateriaalien kehittymistä. Tällöin katalyysaattorin materiaaleina toimivat kiinteät yhdisteet, joidenka tehtävänä on vastaanottaa ja luovuttaa hapetta, vasta kunnes katalyysaattorissa vallitsee oikea lämpötila tai esimerkiksi hapen osapaine

muuttuu. Tällöin ilmaan vapautuvat NO_x, HC, ja CO reagoivat hapen kanssa vähemmän haitallisiksi yhdisteiksi ennen niiden vapautumista ilmaan. (Parkkima 2014).

Dieselmootoreilla siirryttäessä Euro 4:stä Euro 5:teen oli tärkeää kehittää polttoaineen syöttöä siihen suuntaan että hiukkassuodattimen (DPF:n) tukkiutuessa, osaisi moottorinohjausjärjestelmä käyttää moottoria rikkaammalla seoksella, jolloin hiukkassuodattimeen jääneet nokihiukkaset palaisivat pois. Samaan aikaan yleistyivät yhdistelmät kuten toisioilmajärjestelmän (SAI) ja DPF:n yhteiskäyttö. Niissä oli tarkoitus toimia samalla periaatteella, jotta suodattimen puhdistus olisi mahdollista. Hiukkasten lisäksi jouduttiin alentamaan typen oksidipäästöjä ja siihen oli hyvä käyttää hiukkasloukkaa (LNT) eli typen oksideja vähentävää suodatinta. (ICCT 2016).

Kolme vuotta Euro 6:n voimaantulosta, ei juuri standardimuutoksia päässyt tapahtumaan, ainakaan kolmeen ensimmäiseen vuoteen (bensinimootorit). Kuitenkin kolmen vuoden siirtymäajan jälkeen (1.9.2017), vaati Euro 6-standardi saman hiukkaspäästörajan (PM) bensiini-, sekä dieselmootoreille. Muutoksen vuoksi suoraruiskutteisissa bensiinimootoreissa tarvittiin käytännössä hiukkassuodatin (DPF), jotta uudet rajat saavutettaisiin.

Samaan aikaan tiukennettiin dieselmootoreiden typenoksidi-rajoituksia (NO_x). Raja tippui vain puoleen aiemmasta. Euro 6:den tuomat muutokset edellyttävät dieselmootoreilta käytännössä uudempia ja tehokkaampia pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteistoja, sekä pakokaasujen takaisinkierrätyksen (EGR):n käyttöä. Bosch:n tiedotteen mukaan, pelkkä katalysaattori riittää alle 1700 kg painoisille ajoneuvoille (suurimmalle osasta henkilöautoja). Raskailla ajoneuvoilla Euro 6 -luokka vaatii AdBlue urealiuosta käyttävän SCR-katalysaattorin. Urealiuos muuntaa haitalliset typen oksidit vaarattomaksi vesihöyryksi ja typeksi. (Bosch 2014). Euro 5 -luokasta siirtyminen Euro 6 -luokkaan ja sen vaatimat muutokset esiteltyinä taulukossa 8. (ICCT 2016)

TAULUKKO 8. Vaatimustenmukaisuuden ylläpitäminen Euro 5 ja Euro 6 (ICCT 2016)

	Euro 5	Euro 6
Bensiini	Palotapahtuman hallinta verrattuna Euro 4:ään	Monipisteruiskutus (ei vaadittuja muutoksia)
	Nopeammat happianturit	Polttoaineen syöttö ja DPF (suoraruiskutusmoottorit)
	Katalysaattoreiden valmistusmateriaalit	
	Hapen varastointikyky (katalysaattorit)	
Diesel	Palotapahtuman hallinta verrattuna Euro 4:ään	Korkeampi polttoaineen syöttöpaine
	Polttoaineen syötön mukautuminen (DPF:n generointi)	Moottorit (alle 2 l) SAI + DPF ja LNT
		Moottorit (yli 2 l) SAI + DPF + SCR
	SAI + DPF	EGR
	LNT	SAI + DPF keskikokoisiin ja isoihin moottoreihin

Bensiinimoottoreilta Euro 5:stä Euro 6:teen siirryttäessä, vaadittiin DPF:n ja sen tyhjentämiseen/puhdistukseen kykenevää järjestelmää, varsinkin suoraruiskutuksella toimivan bensiinimoottorin ollessa kyseessä. Syynä tähän oli aikaisemmin mainittu tiukentunut hiukkaspäästöraja myös bensiinimoottoreille. Dieselin kohdalla olivat suurimmat muutokset. Dieselmoottoareiden kanssa jouduttiin käyttämään erilasten jälkikäsitteilylaitteistojen yhdistelmiä kuten SAI, DPF ja LNT. Tällöin sekä typen oksidit, että hiukkaset saadaan erillisen toisioilmajärjestelmän avulla tehokkaasti puhdistettua. Euro 6:sen tiukkiin typen oksidi (NO_x) rajoituksiin alettiin käyttämään EGR:ää apuna kuten aikaisemmin mainittiin. Toisioilmajärjestelmä alkoi olla järjestelmän kulmakivi ja siihen alettiin yhdistelemään, joko urearuiskutusjärjestelmiä, hiukkasuodattimia tai hiukkasloukkua sen mukaan mikä päästöluokka on kyseessä. (ICCT 2016).

7 POLTTOAINEEN VAIKUTUS PÄÄSTÖIHIN

Moottorien kehitykseen vaikuttaa suoraan polttoaineiden kehitys. Polttoaineiden on sovelluttava käytössä oleviin moottoreihin ja tarjottavat hyvät käyttöominaisuudet. Jotta ajansaatossa on päästy kohti vähäpäästöisiä autoja, on myös polttoaineiden täytynyt kehittyä samaan tahtiin. Suurimpia muutoksia on ollut lyijyn poistaminen 1990-luvun alussa, jotta kolmitoimikatalysaattorit voitiin ottaa käyttöön. Nykypäivänä rikki on käytännössä poistettu polttoaineesta kokonaan, sillä sitä sallitaan vain pieni määrä suhteessa entiseen. Tämä on johtanut siihen, että pakokaasujen laatu on parantunut ja esimerkiksi suoraruiskutustekniikka on voitu ottaa käyttöön. (Autoalan Tiedotuskeskus 2018).

Tier 3 -standardi rajoittaa 1.1.2017 bensiinin rikkipitoisuuden 10 ppm:ään (edellisestä 30 ppm:stä). Pientä joukkoa polttoaineen valmistajista koskee heille erikseen asetettu päivämäärä 1.1.2020. Tämä ei ole radikaali muutos edellisestä 30 ppm:stä, mutta vaikuttaa merkittävästi pakokaasujen laatuun. Euroopassa vastaava rikkipitoisuuden raja on ollut 10 ppm jo vuodesta 2009 lähtien. (ICCT 2015).

Päivitetyn rikkistandardin tärkeimpänä tarkoituksena on vähentää rikin negatiivista vaikutuksia kolmitoimikatalysaattorin suorituskykyyn ja samalla helpottaen 150 000 mailin päästötason ylläpitämistä. Päästöjen vähentäminen ja ilmanlaadun parantaminen ovat miltei mahdotonta ilman, että polttoaineiden rikkipitoisuuksia lasketaan. Rikki on itsessään jo ilmansaaste, mutta reagoi voimakkaasti estäen muiden päästöjen puhdistuksen ja lopulta aiheuttaen mahdollista tuhoa pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistoissa. Harva pakokaasujen jälkikäsittelylaite toimii ilman, että rikkipitoisuudet rajoitetaan lähelle nollatasoa. ICCT (International Council on Clean Transportation) toteaaakin polttoaineiden rikkipitoisuuksia käsittelevässä raportissaan, että pitoisuuksia rajoittamalla saadaan nykyisten ajoneuvojen päästöt puhtaammiksi ja rajoittamalla lisää, voidaan uusia ajoneuvoja suunnitellessa, käyttää yhä kehittyneempiä päästöjenhallintajärjestelmiä, jolloin uudet päästöluokat saavutetaan jatkossakin. (ICCT 2003).

8 POHDINTA

Tulevaisuudessa suoritettavat päästömittaukset tulevat aiheuttamaan haasteita erityisesti dieselkäyttöisille henkilöautoille. Haasteet tulevat johtumaan etenkin poikkeavista NO_x-arvoista. Käytön aikaiset NO_x arvot ovat olleet todellisuudessa jopa kuusinkertaiset. Uusi testikäytäntö WLTP antaa paljon tarkemmat ja todenmukaisemmat päästöarvot vanhaan NEDC-testimenetelmään verrattuna. Tämän vuoksi vanhalla NEDC-testimenetelmällä mitattujen dieselautojen ei uskota läpäisevän uutta WLTP-testimenetelmällä suoritettua mittausta. WLTP tulee vaikeuttamaan päästötesteissä huijaamista tehokkaasti. Huijaamista ehkäistään WLTP:n kylkeen liitetyllä RDE-mittauksella, joka on oikeassa liikenteessä suoritettava päästömittaus. Uusien standardien muodostamat päästörajoitukset puolestaan ovat paljon tiukemmat kuin ennen, mutta niistä selvittää vielä nykyisellään päästöjenhallintateknologialla. Yhdysvalloissa vanha Tier 2 -standardi sallii samat NO_x rajoitukset kuin nykyinen Euro 6, joten Euro 6 -luokan sallimia rajoituksia voidaan pitää melko tehottomina.

Tier 3 standardi asettaa tiukat päästörajoitukset näyttäen samalla suunnan muille päästöjä sääteleville tahoille. Tier 3-standardin hyviä ominaisuuksia on sen monijakoisuus, sillä päästöluokkia on useita ja oikeasti vähäpäästöisten autojen erottaminen joukosta on helppoa. Tällöin myös autovalmistajille jää enemmän valinnanvaraa. Teknologian saralla eivät standardit ja uudet testikäytännöt sinänsä vaadi mitään uutta. Kuten todettu, uudet rajoitukset alitetaan vielä nykyisellä päästöjenhallintateknologialla. Tärkeää on hyödyntää nykyistä päästöjenhallintatekniikka yhä tehokkaammin, esimerkiksi hyödyntämällä jälkikäsitteilylaitteistojen, kuten SAI:n, DPF:n ja SCR:n kaltaisia yhdistelmiä. Päästötesteissä huijaaminen vaikeutuu, mutta siihen on aina mahdollisuus niin kauan, kun ne suoritetaan edes osittain alustadynamometreillä. Jotta Euroopassa päästäisiin vuoden 2050 päästötavoitteisiin, vaatisi se suuria harppauksia moottoritekniikan saralla. Autovalmistajat ovatkin jo ilmoittaneet, että uudet päästörajoitukset eivät tule alittumaan edes uusimmillakaan jälkikäsitteilylaitteistoilla ja toisaalta valmistuskustannukset nousisivat liian suuriksi. Useat valmistajat ovatkin juuri siksi luopumassa diesel- ja bensiinimoottoreiden valmistuksesta vuoteen 2030 mennessä. Tulevaisuudessa tullaan päästörajoituksia todennäköisesti tiukentamaan yhtä progressiivisesti kuin nyt ja seuraavaksi voidaankin alkaa

miittimään, miten sähköauto/hybridi tai vaihtoehtoisesti vetypitoisia polttoaineita käyttäviä ajoneuvoja saadaan enemmän liikenteeseen ja miten niiden kehitystä voitaisi tukea vielä enemmän.

LÄHTEET

AGCO. 2018. The evaporative emissions system. Luettu 11.4.2018.
http://www.agcoauto.com/content/news/p2_articleid/151

Autoalan tiedotuskeskus. 2018. Autoala ja ilmaston muutos. Luettu 25.5.2017.
http://autoalantiedotuskeskus.fi/ymparisto/autoala_ja_ilmastonmuutos.

Autoalan Tiedotuskeskus. 2018. Autoliikenteen päästöt. Luettu 21.4.2018.
http://www.aut.fi/ymparisto/autojen_paastot_ja_niiden_mittaus

Autoalan Tiedotuskeskus. 2018. Polttoaineet. Hybriditeknologia. Luettu 1.4.2018.
http://www.aut.fi/tieliikenne/polttoaineet_ja_moottoriteknologia

Autoalan tiedotuskeskus. 2018. Pakokaasujen säännellyt päästöt. Luettu 21.4.2018.
http://www.aut.fi/ymparisto/autojen_paastot_ja_niiden_mittaus

Autoalan Tiedotuskeskus. 2018. Päästöjä koskevaa terminologiaa. Luettu 21.4.2018.
http://www.aut.fi/ymparisto/autojen_paastot_ja_niiden_mittaus/paastojen_terminologiaa

Autoalan Tiedotuskeskus. 2018. Polttoaineet ja moottoriteknologia. Luettu 2.4.2018.
http://www.aut.fi/tieliikenne/polttoaineet_ja_moottoriteknologia

Autotuojat ja -teollisuus. 2018. Euro-päästöluokat. Luettu 24.4.2018.
http://www.autotuojat.fi/uutishuone/autoalan_termistoa/euro-paastoluokat

AZO Materials. 2015. Regeneration Mechanism of Lean NOx Trap (LNT) Catalysts. Luettu 13.3.2018. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12226>

Bosch. 2014. Euro 6 -päästönormit yksinkertaistettuina. Luettu 22.4.2018.
http://www.bosch.fi/fi/fi/newsroom_10/news_9/news-detail-page_55617.php

Bosch, R. 1993. Ottomoottorien pakokaasutekniikka. Suom. Seppälä, J. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy. Alkuperäinen teos 1989.

Caremissionstestingfact. 2018. RDE. Luettu 15.4.2018.
http://www.caremissionstestingfacts.eu/rde-real-driving-emissions-test/?gclid=EAIaI-QobChMI9LSToIy82gIVDi0ZCh1_QABKEAAYASAAEgIXp_D_BwE

Cedinox. 2017. EGR Systems. Luettu 11.4.2018.
<https://www.cedinox.es/en/actividades/highlighted/detail-highlighted/EGR-Systems/>

Denton, T. 2006. Advanced automotive fault diagnosis. 2. painos. Oxford: Elsevier Ltd.

Dieselnet. 2018. Diesel Catalysts. Luettu 11.4.2018.
https://www.dieselnet.com/tech/cat_diesel.php

Dieselnet. 2018. Diesel Particulate Filter. Luettu 21.3.2018.
<https://www.dieselnet.com/tech/dpf.php>

- Dieselnet. 2018. ECE 15 + EUDC / NEDC. Luettu 20.3.2018.
https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php
- Dieselnet. 2018. Emission Test Cycles. Light-Duty Vehicles. Luettu 20.3.2018.
<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/index.php#eu-ld>
- Dieselnet. 2018. FTP-75. Luettu 15.4.2018.
<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ftp75.php>
- Dieselnet. 2018. What Are Diesel Emissions. Luettu 28.3.2018.
https://www.dieselnet.com/tech/emi_intro.php
- Diesel Technology Forum. 2018. What Is SRC. Luettu 21.4.2018.
<https://www.dieselforum.org/about-clean-diesel/what-is-scr>
- Dipl. -Ing. Bauer H., Dipl. -Ing. Dietsche K., Dipl. -Ing. Crepin J. & Dipl. -Holzw. Dinkler F. 2002. Auto-teknillinen taskukirja. 6. painos. Stuttgart: Robert Bosch GmbH,
- EPA. 2018. Environmental Protection Agency. EPA Federal Test Procedure (FTP).
<https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp>
- Hella. 2018. Secondary air injection system. Luettu 20.3.2018.
<https://www.hella.com/techworld/uk/Technical/Car-electronics-and-electrics/Secondary-air-injection-system-3296/#>
- ICCT. 2016. A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. Luettu 22.4.2018. https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf
- ICCT. 2015. Comparison of US and EU programs to control light-duty vehicle emissions. PDF. Luettu 21.3.2018.
https://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_comparison%20Euro%20v%20US.pdf
- ICCT. 2003. Low-sulfur gasoline and diesel: The key to lower vehicle emissions. Luettu 24.4.2018. <https://www.theicct.org/publications/low-sulfur-gasoline-and-diesel-key-lower-vehicle-emissions>
- Lehtimäenpaja. 2016. Katalysaattori. Luettu 26.4.2018.
<http://lehtimakiracingteam.blogspot.fi/2016/04/moottorin-ohjaus.html>
- Motiva. 2018. Henkilöautojen päästömääräykset. Luettu 21.4.2018.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/henkiloautojen_paastomaaraykset
- Motiva. 2006. Vaihtoehtoiset polttoaineet ja ajoneuvot. Luettu 28.3.2018.
https://www.motiva.fi/files/2131/Vaihtoehtoiset_polttoaineet_ja_ajoneuvot.pdf
- Motiva. 2017. WLTP-päästömittaus. Luettu 10.3.2018.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/henkiloautojen_energiamerkinta/wltp-paastomittaus

Motorzeitung. 2015. Partikelfilter: Weiter Fördermittel für Nachrüstung. Luettu 11.4.2018. <http://motorzeitung.de/news.php?newsid=323043>

PA Consulting. The CO₂ emissions challenge. 2018. PDF. Luettu 3.5.2018. <http://www2.paconsulting.com/rs/526-HZE-833/images/PA%20CO2%20Emissions%20Report%202017.pdf>

Parkkima, O. 2014. Uusia hapen varastointimateriaaleja. Aalto-yliopiston kemian tekniikan korkeakoulu. Kemian tekniikka. Väitöskirja.

Prof. Dr. -Ing. Reif, K. & Dipl. -Ing. Dietsche, K. ym. 2014. Automotive Handbook. 9. painos. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.

Prof. Dr. -Ing. Mencher B., Dipl. -Ing. Kohler C., Dipl. -Red. Michelt U., & Dr.-Ing. Haag J., ym. 2006. Bensiinimoottorin ohjaus. Suom. Seppälä, J. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy. Alkuperäinen teos 2003.

Skoda. 2017. WLTP. Missä WLTP otetaan käyttöön. Luettu 10.3.2018. <http://www.skoda.fi/skoda/wltp>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2018. Energia- ja ilmastostrategia. Luettu 21.4.2018. <http://tem.fi/energia-ja-ilmastostrategia>

Trafi. 2018. Euro-päästöluokat. Luettu 22.4.2018. <https://www.trafi.fi/filebank/a/1484313209/5d2fd75705521db128758db11575bb91/23780-EURO-paastot.pdf>

Trafi. 2017. Autojen päästömittaus muuttuu. Luettu 10.3.2018. <https://www.trafi.fi/tieliikenne/wltp-paastomittaus>

Trafi. 2014. Liikenteen päästöt ilmaan. Luettu 25.5.2017. https://www.trafi.fi/tietopalvelut/arviointipalvelut/indikaattorit/ymparistoindikaattorit/liikenteen_paastot_ilmaan

Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Luettu 21.4.2018. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEM-jul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vihanta, H. 1994. Ottomoottorin polttoaine- ja pakokaasutekniikka. 1. painos. Kokkola: Auto-Weiss.

WLTP Facts. 2018. From NEDC to WLTP. Luettu 26.4.2018. <http://wltpfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/>