



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

KIM KULMALA

**HENKILÖAUTOJEN OTTO- JA DIESELMOOTTORIEN
PÄÄSTÖNVÄHENNYSTEKNIIKAT**

Kandidaatintyö

Kemian ja biotekniikan laboratorio

Tarkastaja: Yliopistonlehtori
Henrik Tolvanen

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

Kulmala, Kim: Henkilöautojen otto- ja dieselmoottorien päästönvähennystekniikat

Kandidaatintyö, 37 sivua

Syyskuu 2018

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: Yliopistonlehtori Henrik Tolvanen

Avainsanat: Ottomoottori, dieselmoottori, päästönvähennystekniikat

Otto- ja dieselmoottorien päästönvähennystekniikoiden kehitys on tärkeää, sillä liikenteen aiheuttamat päästöt aiheuttavat vakavia ympäristö- ja terveyshaittoja. Polttomoottorit muodostavat ylivoimaisen enemmistön liikenteen voimanlähteistä ja muutokset ajoneuvokannassa ovat hitaita. Lisäksi ajoneuvojen elinkaari on pitkä, joten otto- ja dieselmoottoreita käytetään vielä pitkään, vaikka vaihtoehtoiset energialähteet valtaisivat markkinat. On siis tärkeää kehittää otto- ja dieselmoottorien päästönvähennystekniikoista entistä parempia, sillä molempien moottorien ominaisuudet ovat liikennekäyttöön erittäin sopivia.

Tämä työ on kirjallisuusselvitys erilaisten päästönvähennystekniikoiden käytöstä ja potentiaalista sekä niiden tulevaisuudesta. Erilaisia tekniikoita on käytetty jo vuosikymmeniä ja uusia tekniikoita kehitetään jatkuvasti. Uusien tekniikoiden lisäksi oleellinen asia on kehittää jo olemassa olevia päästönvähennystekniikoita tehokkaammiksi ja toimimaan paremmin uusien tekniikoiden kanssa. Polttomoottorien kehitys riippuu teknisten tekijöiden lisäksi taloudellisista ja poliittisista tekijöistä, joten on epävarmaa, millainen asema polttomoottoreilla on tulevaisuudessa. Nykyiset suurkaupunkien rajoitukset dieselautoille keskustoissa saattavat laajentua koskemaan aiempaa suurempaa osaa ajoneuvoista, jolloin esimerkiksi sähköautot saavat kilpailuedun.

Lupaavimmiksi tulevaisuuden tekniikoiksi osoittautuivat matalan lämpötilan poltto (LTC) ja veden ruiskutus palotilaan. Veden ruiskutusta palotilaan voidaan käyttää nykyisissä moottorityypeissä pienehköillä muutoksilla, joten toteutus voi olla valmistajille vaivaton tapa vähentää päästöjä uusissa ajoneuvoissa. LTC-tekniikoista lupaavin on HCCI-tekniikka, jossa yhdistetään otto- ja dieselmoottorien ominaisuuksia. Etuna on myös entistä monipuolisempien polttoaineiden käytön mahdollistaminen.

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CCC	Lähelle moottoria asennettava katalysaattori	
CI	Puristussytytteinen moottori	
DOC	Diesel-hapetuskatalysaattori	
DPF	Hiukkassuodatin	
EGR	Pakokaasujen takaisinkierrätys	
EU	Euroopan unioni	
HC	Hiilivedyt	
HCCI	Yhtenäisen seoksen puristussytytys	
HCSI	Yhtenäisen seoksen kipinäsytytys	
LNT	NO _x -adsorboija	
LTC	Matalan lämpötilan poltto	
PM	Pienhiukkaset	
SCR	Valikoiva katalyyttinen pelkistys	
SI	Kipinäsytytteinen moottori	
c_p	Lämpökapasiteetti vakioaineessa	[J/kgK]
c_v	Lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa	[J/kgK]
γ	Lämpökapasiteettien suhde	[-]
η	Hyötysuhde	[-]
λ	Ilmakerroin	[-]
ρ	Täytössuhde	[-]
CO	Hiilimonoksidi	
CO_2	Hiilidioksidi	
$CO(NH_2)_2$	Urea	
H_2O	Vesi	
N	Typpi atomi	
N_2	Typpimolekyyli	
NH_3	Ammoniakki	
NO_x	Typhen oksidit	
NO	Typpioksidi	
NO_2	Typpidioksidi	
O	Happiatomi	
O_2	Happimolekyyli	

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

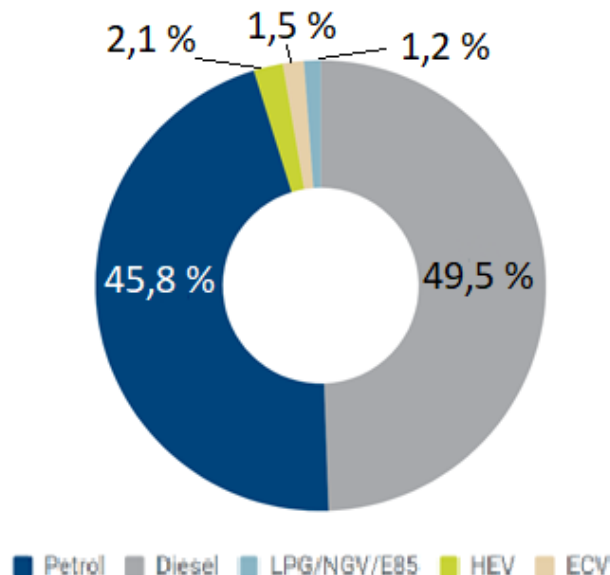
Lyhenteet ja merkinnät

1.	Johdanto	1
2.	Moottorityyppien ominaisuudet ja eroavaisuudet	3
2.1	Moottorityyppien toiminta	3
2.2	Hyötysuhde	4
2.3	Polttoaineen ruiskutus ja sytytys sekä nakutus	6
2.4	Bensiinin ja dieselin eroja	7
2.5	Päästöt ja niihin vaikuttavat tekijät	8
3.	Päästönvähennyksen historiaa	12
4.	Käytössä olevat päästönvähennystekniikat	15
5.1	Katalyyttiset reaktiot	15
5.1.1	Kaksi- ja kolmitoimikatalysaattorit	15
5.1.2	Valikoiva katalyyttinen pelkistys	17
5.2	Pakokaasujen takaisinkierrätys	19
5.3	Hiukkassuodatin	20
5.4	Typen oksidien adsorboija	22
5.	Päästönvähennystekniikoiden tulevaisuus	23
6.1	Veden ruiskuttaminen palotilaan	23
6.2	Matalan lämpötilan poltto	24
6.3	Lainsäädäntö	25
6.4	Markkinoita ohjaavat tekijät	28
6.5	Nykyisten tekniikoiden tulevaisuus	30
6.	Yhteenveto	32
	Lähteet	34

1. JOHDANTO

Otto- ja dieselmoottorit ovat liikennekäytössä käytetyimmät moottorityypit. Liikenteestä aiheutuvat päästöt ovat merkittävä osa koko maailman päästöistä, eikä polttomoottoreille ole varteenotettavia kilpailijoita markkinoiden laajuuteen verrattuna. Nestemäiset polttoaineet ovat helppoja käsitellä ja omaavat suuren energiatiheuden. Ilmastonmuutoksen ja ympäristön saastumisen myötä päästöjen vähentämisestä on tullut entistäkin tärkeämpi asia. Sen takia polttomoottorien päästönvähennystekniikat ovat yhä tärkeämmässä roolissa tulevaisuudessa. Syntyvät päästöt aiheuttavat ympäristön pilaantumista ja terveydellisiä ongelmia ihmisille. Etenkin pienhiukkaset, joita polttomoottoreista syntyy runsaita määriä ilman puhdistavia tekniikoita, aiheuttavat maailmanlaajuisesti jopa miljoonia kuolemia sydän- ja keuhkosairauksien kautta. Samalla pienhiukkasille altistuminen lyhentää populaation elinajanodotetta jopa yli kahdeksan kuukautta. [1]

Liikenteestä syntyy myös suhteellisesti valtava määrä typen oksideja ja jonkin verran palamattomia hiilivetyjä. Nämä yhdisteet ovat osallisia savusumun syntymiseen. Savusumu on yleistä suurissa kaupungeissa ja aiheuttaa vakavia hengitystieoireita ja mahdollisesti syöpää. [2, 3]



Kuva 1. Euroopan unionissa myytyjen uusien autojen osuudet vuonna 2015 energialähteen mukaan. [4]

Kuten kuva 1 osoittaa, polttomoottorien osuus uusien autojen myynnistä on merkittävä (95,3 %). Vuonna 2017 Euroopassa myytiin noin 15,6 miljoonaa uutta henkilöautoa [5].

Vaihtoehtoiset polttoaineet tai sähköautot eivät ole valtaamassa markkinoita ainakaan välittömässä tulevaisuudessa, joten on oleellista kehittää polttomoottoreita puhtaammiksi. Henkilöautojen käyttöikä on melko pitkä, joten uudet tekniikat eivät vaikuta välittömästi liikenteen aiheuttamiin kokonaispäästöihin.

Päästönvähennystekniikoita kehitetään jatkuvasti paremmaksi ja toimimaan toisten tekniikoiden kanssa yhdessä. Nykyisten tekniikoiden optimoinnin lisäksi kehityksessä on useita lupaavia tekniikoita, lupaavimpina veden suihkutuspalotilaan ja matalan lämpötilan poltto (LTC). Erityisesti matalan lämpötilan poltto on kohdannut useita haasteita kehityksensä aikana, mutta tekniikassa on myös useita etuja. [6]

Liikennepäästöjen vaikutuksista ympäristöön on tehty paljon tutkimusta, mutta tutkimuksia päästönvähennystekniikoiden kehityksestä sekä otto- ja dieselmoottorien tulevaisuudesta on melko vähän. Useimmat tutkimukset käsittelevät vain tiettyä tekniikkaa ja sen potentiaalisia etuja. Viime vuosina on tutkittu paljon vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöä otto- ja dieselmoottoreissa ja sitä, miten niiden käyttö vaikuttaisi päästöihin. Itse päästönvähennystekniikoiden kehitykseen kantaottavia tutkimuksia on harvassa. Koska polttavin ongelma päästöjen osalta tällä hetkellä on ilmastomuutoksen hillitseminen, suuri osa tutkimuksesta tähtää hiilineutraalien polttoaineiden tutkimukseen sekä polttoaineiden lisäaineiden vaikutuksiin.

Tässä kirjallisuusselvityksessä kartoitetaan erilaisten polttomoottorien päästönvähennystekniikoiden potentiaalia ja sopivuutta ajoneuvojen mittakaavaan. Ensin käsitellään otto- ja dieselmoottorien ominaisuuksia ja olennaisimpia eroavaisuuksia. Tämän jälkeen esitellään päästönvähennysten historiaa sekä selvitetään nykytilannetta ja esitellään BAT-tasoisia tekniikoita (best available technology, paras käytettävissä oleva tekniikka). Nykytilanteesta siirrytään tulevaisuuteen ja arvioidaan tämän hetken kehityksen perusteella, mihin suuntaan päästönvähennystekniikat ovat menossa teknologiselta kannalta sekä huomioidaan lainsäädännön ja markkinoiden vaikutusta. Tarkastelu kohdennetaan Euroopan unionin alueella säädettyihin direktiiveihin ja lainsäädäntöön. Lopuksi on yhteenveto, jossa tiivistetään tutkimuksen aikana saavutettu tieto.

Tutkimuksessa pyritään vastaamaan kahteen tutkimuskysymykseen. Yritetään vastata siihen, että kykenevätkö polttomoottorit kilpailemaan päästöjen osalta muiden vaihtoehtoisten tekniikoiden, kuten sähköautojen kanssa. Toinen kysymys on, että ovatko nykyiset päästönvähennystekniikat kehitettävissä tehokkaammiksi vai onko näköpiirissä korvaavaa tekniikkaa.

2. MOOTTORITYYPPIEN OMINAISUUDET JA EROAVAISUUDET

Diesel- ja ottomoottorien oleellisin käytännön ero on niiden käyttämä polttoaine. Dieselmoottorit käyttävät polttoaineenaan dieselöljyä tai biodieseliä, kun ottomoottoreissa käytetään yleisimmin bensiiniä. Bensiiniin voidaan lisätä etanolia hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Seuraavaksi käsitellään merkittävimpiä teknisiä eroavaisuuksia diesel- ja ottomoottorien välillä. Eroavaisuudet johtuvat polttoprosessin kemiallisista ominaisuuksista ja niiden ohjaamista teknisistä ratkaisuista. Dieselmoottoreita kutsutaan usein puristusyttytteisiksi moottoreiksi (engl. compression ignition, CI) ja ottomoottoreita kipinäsytytteisiksi (engl. spark ignition, SI) moottoreiksi polttoaineiden syttymisen eroavaisuuksien takia.

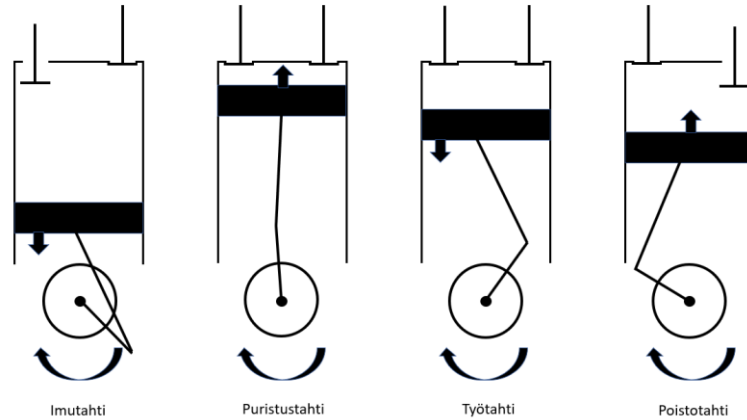
Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään moottorityyppien perustoimintaa, jonka jälkeen siirrytään käsittelemään otto- ja dieselprosessien eroavaisuuksia.

2.1 Otto- ja dieselmoottorien toiminta

Molemmat työssä esiteltävät moottorityypit, otto- ja dieselmoottorit, ovat tyypiltään mäntämoottoreita. Moottori saa tehonsa palotilassa palavasta polttoaineesta, jolloin joka sylinterissä sijaitseva mäntä liikkuu työtahdin aikana alaspäin. Tämä ylös-alassuuntainen liike muunnetaan pyörimisliikkeeksi kampiakselilla kiertokangen välityksellä.

Kummastakin moottorityypistä on olemassa kaksi- ja nelitahtiversiot, mutta käsittely rajataan ainoastaan nelitahtimoottoreihin. Kaksitahtimoottoreita ei käytetä kovin laajasti liikennekäytössä, lukuun ottamatta mm. mopoja, joissa on usein kaksitahtinen bensiinimoottori. Ilma kulkee sylintereihin venttiilien kautta: imuventtiilistä otetaan ilmaa sisään ja pakuventtiilin kautta pakokaasut poistetaan. Ottomoottorissa polttoaine syötetään ilman mukana imuventtiilin kautta, kun taas dieselmoottorissa polttoaine ruiskutetaan suuttimien läpi. Nelitahtimoottorissa on nimensä mukaisesti neljä tahtia.

1. Imutahti: alaspäin liikkuva mäntä vetää sylinterin täyteen ilmaa imuventtiilin kautta.
2. Puristustahti: mäntä liikkuu ylöspäin puristaen ilman puristussuhteen osoittamaan paineeseen.
3. Työtahti: polttoaine syttyy kipinän (otto) tai paineen aiheuttaman lämpötilan nousun (diesel) vaikutuksesta ja mäntä liikkuu alaspäin. Ainoa tahti, joka tekee työtä.
4. Poistotahti: mäntä liikkuu ylöspäin poistaen pakokaasut pakuventtiilin kautta.



Kuva 2. Nelitahtimoottorin tahdit kuvattuna tapahtumajärjestyksessä. Näkyvissä pako- ja imuventtiilit, mäntä, kiertokanki ja kampiakseli.

Kuten kuvasta 2 huomataan, kampiakseli pyörii kahdesti jokaista työtahtia kohti. Tämä periaate on sama kaikissa nelitahtisissa mäntämoottoreissa. Erona otto- ja dieselmootoreissa on kuitenkin se, että ottomoottorissa polttoaineen syöttö (lämmön tuonti) tapahtuu vakiotilavuudessa, kun dieselmootorissa se tapahtuu vakiopaineessa.

2.2 Hyötysuhde

Moottorityyppien teoreettiset ja käytännölliset hyötysuhteet eroavat toisistaan.

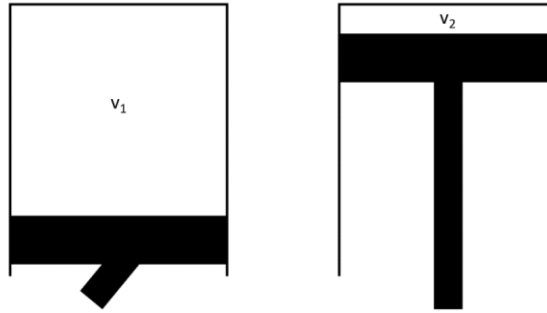
Ottomoottorin hyötysuhde ilmaistaan puristussuhteen avulla

$$\eta_{otto} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}, \quad (3.1)$$

jossa r (-) ilmaisee puristussuhdetta ja määritetään seuraavalla tavalla:

$$r = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3} \quad (3.2)$$

Tilavuus v_1 tarkoittaa sylinterin tilavuutta, kun mäntä on alakuolokohdassa ja v_2 tarkoittaa sylinterin tilavuutta, kun mäntä saavuttaa yläkuolokohdan. Ekspansiosuhde on yhtä suuri kuin puristussuhde, sillä mäntä palaa yläkuolokohdan jälkeen alakuolokohtaan.



Kuva 3. Puristussuhteen r määrittävät tilavuudet v_1 ja v_2 .

Kuvassa 3 esitellään sylinterin ja männän periaatekuva, jossa tilanteessa 1 mäntä on alakuolokohdassa ja tilanteessa 2 yläkuolokohdassa. Näiden tilavuuksien suhteesta saadaan puristussuhde r . Tilavuus v_3 on sylinterin tilavuus, kun seos sytytetään ja tilavuus v_4 kuvaa sylinterin tilavuutta työtahdin jälkeen.

Lämpökapasiteettien suhde γ (-) määritetään lämpökapasiteettien suhteista:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.3)$$

Edellä mainittu hyötysuhde olettaa ilman ideaalikaasuksi, jolloin lämpökapasiteettien suhde $\gamma = 1,4$. [7] Puristussuhteen kaavassa tilavuuksien suhde tarkoittaa prosessin suurimman tilavuuden jakamista pienimmällä tilavuudella. Puristussuhteen arvo on siis aina $r > 1$.

Nähdään, että hyötysuhde paranee, kun puristussuhdetta kasvatetaan. Puristussuhdetta ei voida kasvattaa polttoaineen oktaaniarvoa vastaavan puristussuhteen yläpuolelle tai alkaa esiintyä nakutusilmiötä. Tässä ilmiössä polttoaineen ja ilman seos syttyy ennen kuin olisi optimaalista, jolloin syntyy ylimääräisiä häviöitä.

Dieselmoottorin hyötysuhteelle saadaan kaava

$$\eta_{diesel} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} * \left[\frac{\rho^{\gamma}-1}{\gamma(\rho-1)} \right], \quad (3.4)$$

jossa ρ (-) ilmaisee täytössuhdetta, joka määritetään tilavuuksien suhteesta:

$$\rho = \frac{v_3}{v_2}, \quad (3.5)$$

r on puristussuhde ja γ on lämpökapasiteettien suhde. Ainoa ero ottomoottorin hyötysuhteeseen on hakasulkeiden sisällä olevat termit. [7] Koska täytössuhde ρ on aina

suurempi kuin 1, voidaan todeta dieselmoottorin hyötysuhteen olevan huonompi kuin ottomoottorin hyötysuhde samalla puristusuhdeella.

Käytännössä kuitenkin dieselmoottorin hyötysuhde on merkittävästi ottomoottoria parempi, sillä dieselmoottoreissa voidaan käyttää merkittävästi korkeampia puristusuhdeita. Dieselmoottoreissa puristetaan vain ilmaa, joten ei-haluttua nakutusta ei yleensä esiinny.

2.3 Polttoaineen ruiskutus ja sytytys sekä nakutus

Polttoaine voidaan ruiskuttaa palotilaan usealla eri tavalla. Yleisimpiä nykyisin käytössä olevia järjestelmiä ovat monipisteruiskutus sekä epäsuora- ja suorasuihkutus. Vanhempia, laajasta käytöstä poistuneita ruiskutusjärjestelmiä on muun muassa yksipisteruiskutus ja keskusruiskutus sekä kaasutin.

Suorassa suihkutuksessa polttoaine ruiskutetaan suoraan palotilaan suurella paineella joka saattaa olla yhteispaineruiskutusmoottoreissa jopa 2000 bariin. jolloin polttoaine pisaroituu mahdollisimman pieniksi pisaroiksi. Pieni pisarakoko vaikuttaa suoraan palamisnopeuteen ja sen kautta palamisen täydellisyyteen. Suorasuihkutus on yleisin järjestelmä nykyaikaisissa dieselmoottoreissa. Käytössä on yhteispaine- ja pumppusuutinsuorasuihkutusjärjestelmiä. [8]

Epäsuorassa suihkutuksessa polttoaine ruiskutetaan ensin esikammioon, jossa ilma ja polttoaine sekoittuvat. Palaminen alkaa esikammiossa, joka on yhteydessä palotilaan rei'illä. Palaminen etenee palotilaan reikien kautta. Esikammion tarkoituksena oli taata parempi polttoaineen ja ilman sekoittuminen. Järjestelmä on melko epätarkka verrattuna suorasuihkutteiseen järjestelmään. [8]

Suorasuihkutusjärjestelmä on kalliimpi valmistaa kuin epäsuorasuihkutusjärjestelmä, koska järjestelmän pitää kestää ja tuottaa huomattavasti korkeampia paineita. Suorasuihkutteinen järjestelmä on päästöjen kannalta epäsuorasuihkutteista järjestelmää parempi, sillä palaminen on täydellisempää paineen tuottaman pienen pisarakoon johdosta. Monipisteruiskutus on yleinen järjestelmä bensiinikäyttöisissä ajoneuvoissa, mutta suorasuihkutteiset järjestelmät ovat syrjäyttämässä monipisteruiskutusjärjestelmiä. Syynä on parempi palaminen ja päästöjen vähentäminen.

Polttoaineen sytytyksessä on merkittävä ero diesel- ja ottomoottorin välillä. Dieselmoottorissa polttoaine ruiskutetaan puristustahdissa korkeaan paineeseen puristettuun ilmaan, jolloin dieselpolttoaine syttyy paineen ja lämpötilan yhteisvaikutuksesta. Suurin haaste on polttoaineen oikea-aikainen ruiskutus palotilaan, ettei turhaa nakutusta synny. Dieselmoottorille on ominaista sen luonnollinen nakutus ja siitä johtuu selvästi kuultava nakutusääni moottorin käydessä. [9]

Ottomoottorissa sytytys tapahtuu sytytystulpalla, joka koostuu kahdesta elektrodista ja eristemateriaalista. Polttoaine-ilmaseos ruiskutetaan palotilaan ennen puristustahtia, joten sylinterissä puristetaan polttoaineen ja ilman seosta. Seos sytytetään tarkasti määritettyyn aikaan, koska väärään aikaan tapahtuva sytytys aiheuttaisi rasisusta moottorille. Ottomoottorin matalammat puristussuhteet johtuvat juuri tästä syystä: polttoaine-ilmaseosta ei voida puristaa liian kovalla puristussuhteella, ettei seos syty ennaikaisesti ja väärästä paikasta. [9] Luvussa *Hyötysuhde* esiteltiin otto- ja dieselmoottorien hyötysuhteiden teoreettiset kaavat (3.1 ja 3.4) ja niihin vaikuttavat muuttujat. Vaikka todettiin, että dieselmoottorin hyötysuhde on samalla puristussuhteella huonompi kuin ottomoottorin, dieselmoottorissa voidaan sallia selvästi korkeammat puristussuhteet. Tämän seurauksena dieselmoottorin hyötysuhde on käytännössä parempi.

Nakutus on ilmiö moottorissa, jossa polttoaine syttyy ennaikaisesti. Ilmiö on ongelma erityisesti ottomoottoreissa, sillä sylinterissä puristetaan ilman ja polttoaineen seosta. Jos polttoaineen puristuskestävyys ei ole riittävä moottorin ominaisuuksiin nähden, liekkirintama saattaa lähteä etenemään väärästä paikasta liian aikaisin. Nakutuksen syntyyn vaikuttaa polttoaineen ominaisuuksien ja puristussuhteen lisäksi monet tekijät, kuten moottorin jäädytys, seossuhde, sytytyksen ajoitus, kuormitus ja palokammion geometria. [7, 9] Nykymoottoreissa kuormituksen lisääntyessä muun muassa sytytyksen ajoitusta muuttamalla kompensoidaan nakutuksen syntymistä. Seuraavassa kappaleessa käsitellään bensiinin puristuskestävyyttä eli sitä, miten polttoaine ikään kuin vastustaa nakutusta.

2.4 Bensiinin ja dieselin eroja

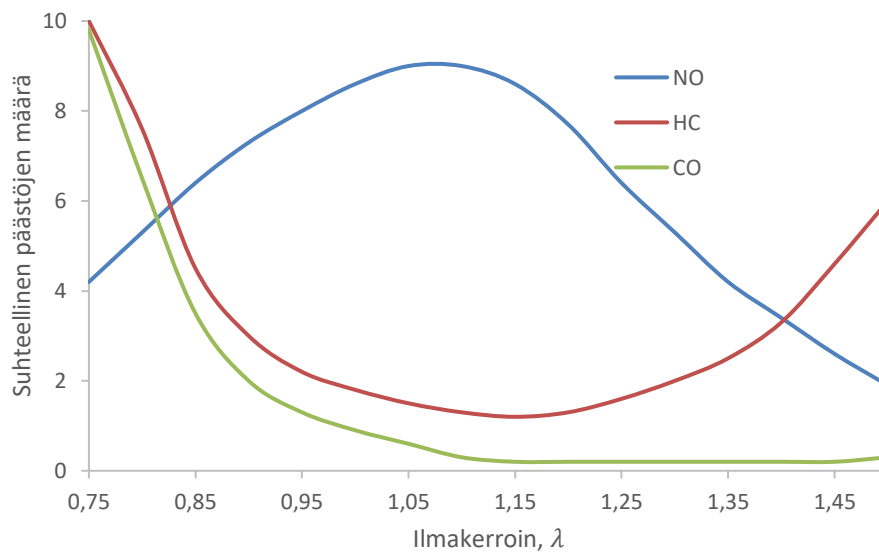
Bensiinin laadun mittana käytetään oktaanilukua, joka kuvaa puristuskestävyyttä. Oktaaniluku on verrokkiarvo, joka määritellään vertaamalla polttoainetta n-heptaanin ja iso-oktaanin nakutukseen. Iso-oktaanille on asetettu arvo 100 ja n-heptaanille arvo 0. Esimerkiksi 98-oktaaninen polttoaine nakuttaa ja palaa samalla tavalla kuin 98 tilavuusprosenttia iso-oktaania ja 2 tilavuusprosenttia n-heptaanin sisältävä seos. [9] Iso-oktaanin oktaaniluku 100 ei ole paras mahdollinen, vaan useat, etenkin kilpa-autoissa käytettävät polttoaineet ylittävät lukuarvon 100. Käytettäviä oktaanilukuja on kaksi, jotka eroavat jonkin verran toisistaan. RON (research octane number) on lukuarvo standardiolosuhteissa mitatulle standardimoottorille ja MON (motor octane number) kuvaa kovempaan rasitukseen joutuvaa moottoria. RON-oktaaniluku on tyypillisesti jonkin verran korkeampi kuin MON. Euroopassa käytetään RON-oktaanilukua. [10] Suomessa tieliikenneajoneuvojen käytössä on 95- ja 98-oktaanista bensiiniä.

Dieselpolttoaineen hyvyttä mitataan setaaniluvulla. Setaaniluku kuvaa polttoaineen kykyä itsesyttää. Mitä korkeampi setaaniluku on, sitä helpommin polttoaine syttyy moottorissa. Setaaniluku sijoittuu asteikolle 1–100 ja Suomessa sekä Euroopan unionissa setaaniarvon on oltava vähintään 51 [11]. Yleensä polttoaineella, jolla on korkea oktaaniluku, on matala setaaniluku, joten lukuja voidaan pitää tietyssä mielessä

toistensa vastakohtina. Setaani- ja oktaanilukujen oleellisten erojen seurauksena polttoaineita ei voi käyttää ristiin: dieselpolttoaine ei toimi ottomoottorissa ja päinvastoin.

2.5 Päästöt ja niihin vaikuttavat tekijät

Polttomoottorissa syntyy lukuisia haitallisia päästöjä. Palamisessa toivotut päästöt ovat hiilidioksidi ja vesi, mutta kaikki polttoaine ei pala loppuun asti tai ei reagoi hapen kanssa. Seuraavaksi käsitellään polttomoottoreissa syntyviä terveydelle ja ympäristölle vaarallisia päästöjä ja niiden syntymismekanismeja. Päästöjen määrää mitataan usein miljoonasosilla (ppm) tai ajoneuvojen yhteydessä päästögrammaa per kilometri (g/km).



Kuva 4. Ilmakertoimen vaikutus päästöihin. Kun ilmakerroin $\lambda > 1$, kyseessä on laiha seos ja kun $\lambda < 1$, kyseessä on rikas seos. Muokattu lähteestä [12].

Useat tekijät vaikuttavat siihen, kuinka paljon ja minkälaisia päästöjä syntyy. Kuvassa 4 on esitetty ilmakertoimen vaikutusta eri päästöjen muodostumisessa. Kuvasta voidaan päätellä, että ei ole olemassa optimaalista ilmakerrointa, jolla kaikki päästöt voitaisiin minimoida, joten pakokaasujen jälkikäsittely on tarpeen.

NO_x

Typen oksideja syntyy korkeissa lämpötiloissa, kun ilman molekulaarinen typpi hajoaa ja reagoi hapen kanssa. Moottoreissa syntyy typpioksidia (NO) ja typpidioksidia (NO₂). Typpioksidia syntyy merkittävästi enemmän kuin typpidioksidia, mutta dieselmoottoreissa typpidioksidin määrä typen oksideista voi olla jopa kolmasosa. Typpioksidi reagoi ilmakehään päästessään typpidioksidiksi. Kun typpidioksidi joutuu kosketuksiin hiilivetyjen ja auringonvalon kanssa, syntyy savusumua, joka on terveydelle hyvin haitallista. Koska dieselmoottorien palamislämpötila on korkeampi kuin ottomoottoreissa, dieselmoottoreissa syntyy merkittävästi enemmän typen oksideja. [9]

Polttomoottoreissa vallitseva mekanismi typen oksidien syntymiselle on laajennettu Zeldovichin mekanismi.



Reaktio 1 on endoterminen reaktio ja mekanismin reaktioista hitain. Siksi reaktio 1 on rajoittava tekijä typen oksidien muodostumisessa. Reaktiot 2 ja 3 ovat eksotermisiä ja ne ovat nopeampia kuin reaktio 1. Tasapaino riippuu voimakkaasti lämpötilasta: lämpötilan kasvaessa reaktiot etenevät voimakkaammin tuotteiden suuntaan. [9]

Hiilimonoksidi

Hiilimonoksidia (CO) syntyy, kun happea ei ole riittävästi hapettamaan kaikkea polttoainetta. Polttomoottoreissa ali-ilmainen tilanne syntyy yleensä kuormitustilanteessa, kun polttoainetta syötetään ylimäärin jäähdyttämään palotilaa. Ottomoottoreissa hiilimonoksidia muodostuu enemmän kuin dieselmootoreissa, sillä ottomoottoreissa palaminen tapahtuu optimaalisesti stökiometrisellä suhteella ($\lambda = 1$), kun taas dieselmootorissa ilmakerroin on luokkaa 1,2. Hiilimonoksidia syntyy myös dissosioitumalla hiilidioksidista.



Merkittävä osa palamisen vapauttamasta energiasta on peräisin reaktiosta 4, mutta jos palamislämpötila on riittävän suuri, reaktion tasapaino siirtyy lähtöaineiden suuntaan. Polttoaine-ilmasuhde on silti huomattavasti merkittävämpi tekijä hiilimonoksidin synnyssä kuin dissosiaatio.

Hiilivedyt

Pakokaasuissa olevat hiilivedyt ovat palamatonta polttoainetta. Hiilivetyjä on satoja erilaisia, mutta polttomoottorien päästöissä on noin 20:ta erilaista yhdistettä, joiden pitoisuudet ovat merkittäviä. Useat hiilivedyt ovat myrkyllisiä, kuten formaldehydi ja bentseeni. Hiilivedyt muodostuvat eri tavoilla otto- ja dieselmootoreissa syttymismekanismista johtuen. [9]

Ottomoottoreissa osa polttoaineesta jää palamatta jokaisella työkierrolla. Merkittävin syy palamattomiin hiilivetyihin ovat pienet raot (engl. crevices) palotilan geometriassa. Rakoja on muun muassa männän ympärillä männänrenkaiden kohdalla, venttiilien istukoissa ja kannentiivisteessä. Sylinteripaineen noustessa pieni osa ilma-

polttoaineseoksesta päätyy rakoihin, joissa syttymistä ei välttämättä pääse tapahtumaan, jos seos on sammumisetäisyyden (engl. quenching distance) päässä palotilasta.

Toinen merkittävä mekanismi hiilivetyjen määrään pakokaasuissa on sylinteriin pääsevä öljy. Polttoaine, kuten bensiini, liukenee hyvin öljyyn ja tällöin palaminen heikentyy. Poistotahdin paisumisen aikana osa palamattomista hiilivedyistä vapautuu pakokaasujen joukkoon johtaen ylimääräisiin päästöihin. Kolmas tärkeä mekanismi on hiilikertymät palotilassa. Kertymät ovat huokoisia ja pieni osa seoksesta jää palamatta samaan tapaan kuin rakojen tapauksessa adsorption vaikutuksesta.

Etenkin kylmäkäynnistyksen yhteydessä kaikki polttoaine ei höyrysty riittävän tehokkaasti jättäen palotilaan nestepisaroita. Neste reagoi hapen kanssa huonommin kuin höyrystynyt polttoaine ja osa polttoaineesta saattaa päätyä suoraan pakoventtiilistä pakoputkeen tai adsorption kautta rakoihin ja kertymiin, josta pienempi osa pääsee palamattomana palotilasta ulos.

Dieselmoottorissa puhdas palaminen perustuu tehokkaaseen ilman ja polttoaineen sekoittumiseen ruiskutushetkellä. Mitä pienempiä pisarat ovat, sitä nopeammin palaminen tapahtuu. Sekoittumiselle ja palamiselle on kuitenkin hyvin rajallinen määrä aikaa, koska polttoaineen ruiskutus tapahtuu samaan aikaan kuin sen pitäisi jo syttyä. Palotilaan muodostuu alueita, jotka ovat rikkaampia ja laihempia. Laihemmillä alueilla kaikki polttoaine ei pala ja tuloksena on palamattomia hiilivetyjä. Parhaaksi keinoksi on todettu polttoaineen syöttöpaineen nostaminen hyvin korkealle, sadoista jopa tuhansiin bareihin. Kuten ottomoottorin tapauksessa, sylinterin öljyisyys, raot ja hiilikertymät vaikuttavat myös dieselmoottorissa syntyviin hiilivetyihin. [9]

Pienhiukkaset

Pienhiukkaset (engl. particulate matter, PM) ovat nimensä mukaisesti pieniä, halkaisijaltaan alle 10 mikrometrin kiinteitä hiukkasia. Ne kulkeutuvat helposti ilmassa pitkiäkin matkoja ja terveysvaikutukset ovat hyvin merkittäviä. 2,5—10 mikrometrisiä pienhiukkasia kutsutaan karkeiksi ja alle 2,5 mikrometrisiä hienoiksi. Alle 2,5 mikrometrin hiukkaset ovat vaarallisimpia keuhkoille, koska ne pääsevät helposti keuhkoihin, kulkeutuvat satoja kilometrejä ja niiden elinikä ilmakehässä on jopa viikkoja. [1]

Lämpötila on merkittävä tekijä etenkin NO_x-päästöjen synnyn kannalta. Lämpötilan kasvaessa ilman mukana moottoriin siirtynyt typpi alkaa dissosioitua molekulaariseksi typeksi. Molekulaarinen typpi reagoi ilman hapen kanssa, jolloin muodostuu typen oksideita. Toisaalta jos palamislämpötila on liian alhainen, kaikki hiili ja hiilimonoksidi ei reagoi hiilidioksidiksi, jolloin pienhiukkas- ja hiilimonoksidipäästöt kasvavat.

Käytännössä päästöjen syntyyn vaikuttaa myös merkittävästi polttoaineen ja ilman sekoittuminen, sillä sekoittuminen ei ole koskaan ideaalista. Palotilaan syntyy rikkaita ja laihoja alueita, jolloin osa polttoaineesta ei reagoi hapen kanssa. Tällaisessa tilanteessa voi syntyä merkittäviä määriä palamattomia hiilivetyjä ja hiilimonoksidia.

3. PÄÄSTÖNVÄHENNYKSEN HISTORIAA

Ilmastonmuutoksen ja päästöjen aiheuttamien ympäristö- sekä terveysongelmien takia on alettu kiinnittää entistä enemmän päästöjen vähentämiseen. Euroopan unioni ja Euroopan talousalue ottivat käyttöönsä Euro-päästöluokitukset vuonna 1992, joilla säädellään sallittujen päästöjen määrää.

Bensiinikäyttöiset ottomoottorit ovat olleet perinteisesti suositumpi vaihtoehto kuluttajille ympäri maailman, mutta dieselmoottorien ominaisuuksien kehittyessä on dieselajoneuvojen myynti kasvanut. Euroopan unionin alueella dieselmoottorilla varustettujen henkilöautojen suosio on kasvanut merkittävästi 1990-luvulta lähtien: vuonna 1990 rekisteröidyistä henkilöautoista 13,8 % käytti voimanlähteenä dieseliä, kun vastaava lukema oli vuonna 2015 jopa 55,7 %. Dieselmoottorien suosio on kääntynyt jälleen lievään laskuun ja vuonna 2017 uusista henkilöautoista 44,4 % oli dieseleitä. [13]

Taulukko 1. Dieselmoottoreiden päästövaatimusten kehitys EU:n alueella N- ja M-luokan ajoneuvoissa (g/km). IDI tarkoittaa epäsuorasuihkutteista ja DI tarkoittaa suorasuihkutteista moottoria. Mukailtu lähdettä [14].

Standardi	Voimaan	CO	HC	HC + NO _x	NO _x	PM
Euro 1	7/1992	1,0	-	0,97	-	0,14
Euro 2, IDI	1/1996	1,0	-	0,7	-	0,08
Euro 2, DI	1/1996	0,64	-	0,9	-	0,10
Euro 3	1/2000	0,50	-	0,56	0,50	0,05
Euro 4	1/2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
Euro 5a	9/2009	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro 5b	9/2011	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro 6	9/2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005

Taulukko 2. Bensiinimoottoreiden päästövaatimusten kehitys EU:n alueella N- ja M-luokan ajoneuvoissa (g/km). Mukailtu lähdettä [14].

Standardi	Voimaan	CO	HC	HC + NO _x	NO _x	PM
Euro 1	7/1992	2,2	-	0,97	-	-
Euro 2	1/1996	2,3	0,20	0,5	-	-
Euro 3	1/2000	1,0	0,10	-	0,15	-
Euro 4	1/2005	1,0	0,10	-	0,08	-
Euro 5	9/2009	1,0	0,10	-	0,06	0,005
Euro 6	9/2014	1,0	0,10	-	0,06	0,005

Taulukoista 1 ja 2 voidaan tulkita, että liikenteen päästöjä on Euroopassa rajoitettu voimakkaasti 1990-luvun alun tasoista. Etenkin pienhiukkasten (PM) ja typen oksidien (NO_x) määrää on pyritty vähentämään runsaasti.

Koska polttoaineella on suuri merkitys sen poltossa syntyviin päästöihin, on pyritty kohti laadukkaampia ja puhtaampia moottoripolttoaineita. Toisin kuin ajoneuvoihin asennettavat päästönvähennystekniikat, puhtaampi polttoaine vaikuttaa välittömästi koko autokantaan. Polttoaineisiin lisätään useita erilaisia lisäaineita ominaisuuksien parantamiseksi. Useat lisäaineet ovat haitallisia katalysaattoreille ja niiden toiminnalle tai aiheuttavat haitallisia päästöjä ympäristöön.

Bensiinissä käytettiin aiemmin oktaaniluvun nostamiseksi tetraetyylilyijyä. Ainetta pidettiin erinomaisena ratkaisuna nakutukseen. Tetraetyylilyijyn myrkyllisyys tunnettiin melko hyvin, mutta myrkytyskuolemia silti todettiin useissa tuotantolaitoksissa ennen vaadittavia turvallisuustoimenpiteitä. Ainetta valmistavat yritykset ja useat laboratoriot väittivät lyijypitoisia yhdisteitä turvallisiksi, mutta lyijy reagoi polttoaineen sisältämien bromi- ja klooriyhdisteiden kanssa epäorgaanisiksi lyijy-yhdisteiksi. Nämä yhdisteet oli todettu vaarallisiksi terveydelle jo vuosikymmeniä aiemmin. Katalysaattorien tullessa markkinoille Yhdysvalloissa ja Euroopassa, huomattiin lyijy-yhdisteiden haittaavan katalyyttien toimintaa. Tetraetyylilyijyn ympäristö- ja terveysongelmat sekä katalysaattorien toiminnan haittaaminen johti lyijypitoisten lisäaineiden kieltoon Euroopassa ja Yhdysvalloissa. [15] Suomessa lyijypitoinen bensiini kiellettiin vuonna 1994 [16]. Lyijyttömässä bensiinissä lyijyä sallitaan nykyään 5 milligrammaa polttoainelitraa kohden [10].

Raskaalle kalustolle on määritelty omat Euro-päästöluokitukset ja ne erotetaan N- ja M-luokkien standardeista roomalaisella numeroinnilla (esim. Euro VI). Tässä kirjallisuusselityksessä ei oteta kantaa raskaan kaluston päästöihin, sillä standardit, moottorien koot ja useat tekniset ratkaisut eroavat kevyestä kalustosta. Mainittakoon silti, että polttomoottoreilla liikkuva raskas kalusto on lähes yksinomaan dieselkäyttöistä ja samoja päästönvähennystekniikoita voidaan käyttää suuremmassakin mittakaavassa.

Päästöstandardien merkitys joutui kyseenalaiseen valoon, kun Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto paljasti Volkswagen Groupin huijauksen, joka on saanut nimekseen *dieselgate*. Huijaus toteutettiin ajoneuvojen ohjelmiston avulla: ajotietokone havaitsee, milloin päästömittauksia suoritetaan ja säätää moottorin toimintaa. Todellisessa tilanteessa joitain päästöjä syntyi huomattavasti enemmän, kuin valmistaja oli ilmoittanut. Etenkin hiilidioksidia ja typen oksideja syntyi liikaa. Typen oksidien määrät olivat dieselmootoreissa jopa kymmeniä kertoja sallittuja arvoja suurempia. [17, 18]

Volkswagen Group ei ole ainoa valmistaja, jonka ajoneuvot eivät noudata päästöstandardeja todellisessa tilanteessa. Beevers et al. esittää tutkimuksessaan, että

Euro 6 -standardin dieselmoottorit päästävät moninkertaisia tai jopa monikymmenkertaisia NO_x-päästöjä verrattuna sallittuun. Etenkin kaupunkiajossa erot mittauksissa ja todellisuudessa on merkittäviä, kun taas maantieajossa todellisuus on lähempänä standardeja, mutta ei monessa tapauksessa pääse niihin. Väitetään, että jopa yhdeksän kymmenestä dieselautosta ei noudata Euro-standardeja. [19]

4. KÄYTÖSSÄ OLEVAT PÄÄSTÖNVÄHENNYS-TEKNIIKAT

Tässä kappaleessa käsitellään nykyään ajoneuvoissa käytettäviä päästönvähennystekniikoita, joita käytetään maailmanlaajuisesti sarjatuotantoajoneuvoissa. Kappaleessa *tulevaisuus* esitellään kehitteillä olevia tekniikoita sekä sellaisia tekniikoita, jotka eivät ole saavuttaneet laajaa käyttöä teknisistä, taloudellisista tai muista syistä johtuen. Käsittelystä rajataan ulos moottorin säätötekniikat, kuten virtausoptimointi, sytytyksen ajoitus ja polttoaineen syötön optimointi. Vaikka edellä mainituilla tekniikoilla voidaan saavuttaa melko merkittäviä päästövähennyksiä, ne eivät ole universaaleja tekniikoita, vaan valmistaja- ja moottorikohtaisia optimointitoimenpiteitä.

Jotkut tekniikat soveltuvat paremmin dieselmoottoreille kuin bensiinimoottoreille. Dieselmoottorien yksi merkittävistä ongelmista on typen oksidien päästöt ja monet tekniikat ovat kehitetty vähentämään erityisesti typen oksideja.

4.1 Katalyyttiset reaktiot

Katalysaattori (engl. catalytic converter) on komponentti pakokaasujärjestelmässä, jonka tehtävänä on saattaa haitallisia yhdisteitä vaarattomiksi katalyyttisillä reaktioilla. Ajoneuvojen päästöjen puhdistamiseen käytetään yleensä platina-, palladium- tai rodiumkatalyytteja ja usein eri katalyyttien yhdistelmiä. Esimerkiksi platina soveltuu hiilivetyjen ja hiilimonoksidin poistamiseen, kun taas rodiumia käytetään typen oksidien poistamiseen. SCR-katalysaattoreissa käytetään usein metallien oksideja katalyytteinä kuten titaanioksidia. Katalysaattorin sisällä on keraaminen kennostorakenne, jonka pinnalle on seostettu varsinainen katalyytti. [12]

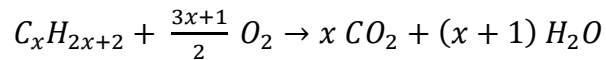
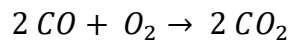
Reaktiot katalysaattorissa jaetaan hapetus- ja pelkistysreaktioihin. Hiilimonoksidi ja palamattomat hiilivedyt saatetaan vaarattomaan muotoon hapettamalla ja typen oksidit pelkistämällä.

4.1.1 Kaksi- ja kolmitoimikatalysaattorit

Yleensä katalysaattoreista puhuttaessa viitataan kaksi- ja kolmitoimisiin katalysaattoreihin. Näiden katalysaattorien ero on niiden käsittelemissä päästöissä. Kaksitoimikatalysaattorissa tapahtuu pelkästään hapetusreaktioita, eli kaksitoimikatalysaattori ei osallistu typen oksidien hajottamiseen molekulaariseksi typeksi. Vaikka kolmitoimikatalysaattori on syrjäyttänyt monipuolisuutensa takia kaksitoimikatalysaattorin, käytetään kaksitoimisia katalysaattoreita kuitenkin

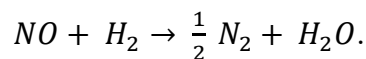
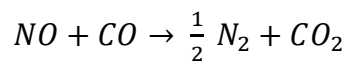
dieselmoottorien yhteydessä. Tällaisia katalysaattoreita kutsutaan dieselhapetuskatalysaattoreiksi (engl. diesel oxidation catalytic converter, DOC), sillä niissä tapahtuu vain hapetusreaktioita. [12]

Hapetusreaktioiden reaktioyhtälöt on esitetty alla.



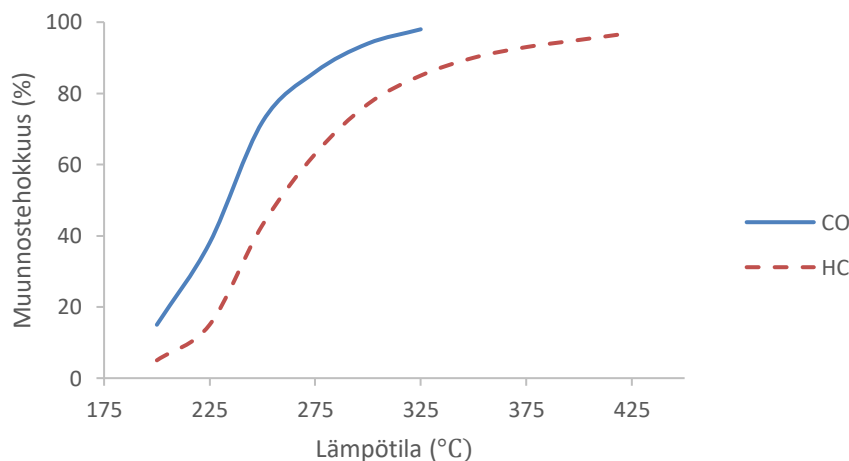
Hapetusreaktiot tapahtuvat parhaiten yli-ilmaisissa seoksissa ($\lambda > 1$), jolloin ylimääräinen happi ajaa reaktiota voimakkaammin reaktiotuotteiden puolelle. [9]

Katalysaattorissa tapahtuvat pelkistysreaktiot on esitetty alla olevissa reaktiokaavoissa.



Pelkistysreaktiot tapahtuvat tehokkaimmin ja nopeimmin ali-ilmaisissa ($\lambda < 1$) olosuhteissa. [9]

Katalysaattorin tulee olla tarpeeksi lämmin, jotta katalysoidut reaktiot tapahtuvat riittävän tehokkaasti. Kolmitoimikatalysaattorien tyypillinen katalyyttisten reaktioiden tehokas aloituslämpötila (engl. light-off temperature) on luokkaa 250–350 °C ja se määritetään lämpötilasta, jolla katalysaattori saavuttaa 50 %:n konversioasteen. [12] Lämpötilat riippuvat merkittävästi käytetystä katalyytistä.



Kuva 5. Katalysaattorin lämpötilan vaikutus päästöjen muunnostehokkuuteen. Mukailtu lähde [20].

Kylmäkäynnistyksen yhteydessä moottori ja muut komponentit ovat ympäristön lämpötilassa ja katalysaattori ei toimi lähelläkään optimilämpötilaa. Lafyatis et al. esittävät, että jopa 80-90 % hiilivety päästöistä syntyvät kylmäkäynnistyksen aikana [21]. Katalysaattorin nopeaan lämmittämiseen voidaan käyttää sähkövastuksia tai lämmittää se kemiallisesti polttamalla hiilimonoksidia ja vetyä katalysaattorissa käyttämällä rikasta polttoaine-ilmaseosta. Lämpeneminen on tehokasta molemmilla tavoilla, mutta molemmat nostavat polttoaineenkulutusta ja kemiallinen lämmittäminen synnyttää suuret määrät hiilivety päästöjä. [12]

Katalysaattoriin voidaan suunnitella niin sanottu hiilivetyadsorboija (engl. hydrocarbon adsorber), joka sitoo lämmittämisenä syntyvät hiilivedyt itseensä, kunnes riittävän korkea lämpötila on saavutettu. Tarpeeksi korkeassa lämpötilassa adsorboija vapauttaa hiilivedyt ja katalysaattorin toimiessa optimialueella hiilivedyt kyetään hapettaamaan. [12]

Kiristyvät päästöstandardit asettavat kylmäkäynnistyksen yhteydessä syntyvien päästöjen vähentämisen merkittävään asemaan. Jos suurin osa päästöistä syntyy kylmäkäynnistyksessä, on oleellista saavuttaa riittävä toimintalämpötila nopeasti. Hyväksi ratkaisuksi on todettu lähelle moottoria asennettavat katalysaattorit (engl. closely coupled catalyst, CCC). Lämpeneminen nopeutuu merkittävästi: auton alla oleva katalysaattori lämpenee tyypillisesti 90–120 sekunnissa, kun CCC-katalysaattori lämpenee jopa 10 sekunnissa. [12]

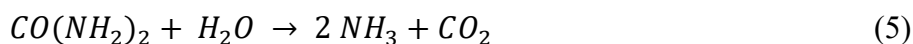
Oleellinen osa katalysaattorijärjestelmää on lambda-anturi eli anturi, joka mittaa jäännöshapen määrää pakokaasussa. Anturi välittää tiedon moottorinohjausjärjestelmälle, joka säätelee polttoaineen ja ilman seosta jatkuvasti. Suomen katsastuslaki vaatii, että lambda-arvo sijoittuu välille 0,97–1,03 [22].

4.1.2 Valikoiva katalyyttinen pelkistys

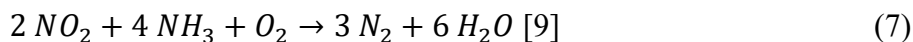
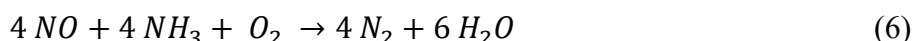
Valikoiva katalyyttinen pelkistys (selective catalytic reduction, SCR) on dieselmoottorien yhteydessä käytettävä tekniikka, jolla pyritään vähentämään typen oksidien määrää pakokaasuissa. SCR-tekniikassa pakokaasujen sekaan ruiskutetaan veden ja urean liuosta, josta ureaa on 32,5 massaprosenttia. Seoksesta käytetään lyhennettä DEF (diesel exhaust fluid) ja sen yleisemmin tunnettu nimi on sen kaupp nimi, AdBlue. [23]

SCR-järjestelmä sijoitetaan diesel-hapetuskatalysaattorin ja hiukkassuodattimen jälkeen katalyyttien myrkyttymisen estämiseksi. Järjestelmään kuuluu DEF-säiliö, ruiskutuslaitteisto ja kaksiosainen katalysaattori. Katalysaattorin ensimmäisessä osassa urea reagoi muodostaen ammoniakkia ja toisessa osassa ammoniakki reagoi typen oksidien kanssa muodostaen vaarattomia tuotteita.

Reaktio 5 on urean hajoamisen kokonaisreaktio, joka koostuu kolmesta muusta reaktiosta. Kaksi reaktiosta ei vaadi katalyyttiä.



Ammoniakki reagoi typen oksidien kanssa seuraavalla tavalla.



Tuotteina on siis vettä ja molekulaarista typpeä. Suurin osa typen oksideista on typpioksidia (NO), joten reaktio 6 on hallitseva. Reaktiot 6 ja 7 voivat tapahtua myös hapettomasti, mutta tällöin reaktiot ovat hitaampia. Dieselmoottorien pakokaasuissa on aina ylimääräistä ilmaa, joten hapettomat reaktiot ovat käytännössä merkityksettömiä. [23]

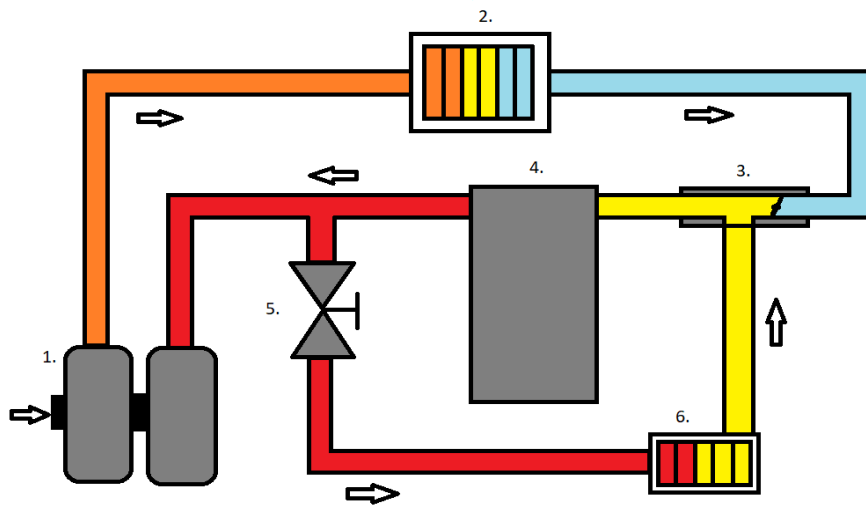
Urea täytyy liuottaa veteen, jotta ruiskutus olisi mahdollista. Urea on kiteistä ainetta puhtaana, mutta liukenee veteen hyvin. Liuoksessa on monia haasteita, kuten melko korkea jäätymispiste (-11 °C), hajoaminen melko alhaisissa lämpötiloissa ja korkeat vaatimukset puhtaudelle. Etenkin annostelu pakokaasuihin on ongelma: matalilla kuormituksilla pakokaasujen lämpötila laskee ja samalla reaktioiden kinetiikka hidastuu. Samalla voi muodostua ei-haluttuja sivutuotteita ja katalysaattoriin saattaa jäädä kertymiä heikentämään sen tehoa. Urean lisäksi on tutkittu muitakin ammoniakkia muodostavia aineita, mutta urea tuottaa eniten ammoniakkia tilavuus- ja massayksikköä kohden. [23]

Vanadiumpohjaiset (V_2O_5) SCR-katalysaattorit, joita sanotaan V-SCR -katalysaattoreiksi, ovat yleisesti käytettyjä SCR-järjestelmissä niiden hinnan, suorituskyvyn ja kohtalaisen lämmönkestävyyden vuoksi. Aktiivinen hiukkassuodatin, jota käsitellään tarkemmin myöhemmin, voi aiheuttaa vanadiumkatalyytin tuhoutumista ja irtoamista pakokaasuihin sen tuottamien kovien lämpötilojen takia. Nämä vanadiumyhdisteet ovat myrkyllisiä, joten vaihtoehtoisia katalyyttejä etsitään. Wolframin tai bariumin lisääminen vanadiumkatalyyttiin on havaittu parantavan lämmönkestävyyttä, mutta ne heikentävät typen oksidien pelkistämistä. Seosaineiden on myös todettu pienentävän katalyytin myrkyttymistä rikkidioksidin toimesta. Käytettyjä katalyyttejä on myös zeoliittipohjaiset katalyytit, yhdessä kuparin ja raudan kanssa. Erilaisia katalyyttejä voidaan yhdistellä tehon maksimoimiseksi eri lämpötila-alueilla. [23, 24]

Urean ruiskutus pakokaasuvirtaan aloitetaan yleensä vasta, kun pakoputkisto ja katalyytti on lämmennyt riittävästi, noin 200 °C lämpötilaan. Urea hajoaa ammoniakiksi ja isosyaanihapoksi. Nämä kaksi yhdistettä muodostavat reagoidessaan melamiinia, joka kertyy alhaisissa lämpötiloissa katalyytin pinnalle myrkyttäen sen. On siis oleellista, että komponentit lämpenevät riittävästi ennen urean ruiskuttamista. Tämä tarkoittaa sitä, että SCR ei toimi kylmäkäynnistyksen yhteydessä ja tällöin syntyvät typen oksidit jäävät käsittelemättä. Urean ruiskutusta lisätään lämpötilan noustessa stökiometriseen seokseen asti. [25]

4.2 Pakokaasujen takaisinkieritys

Pakokaasujen takaisinkieritysjärjestelmän (engl. exhaust gas recirculation, EGR) tavoitteena on vähentää typen oksidien päästöjä alentamalla moottorissa tapahtuvan palamisen keskilämpötilaa. Järjestelmä koostuu takaisinkieritysventtiilistä, venttiilin ohjauksesta ja mahdollisesti jäähdyttimestä. Ohjaus voidaan toteuttaa alipaineella tai sähköisesti. EGR-venttiiliä käytetään yleensä dieselmoottorien yhteydessä, sillä venttiili alentaa palamislämpötilaa eli vähentää typen oksidien syntyä. Dieselmoottoreissa vallitsevat yli-ilmaiset olosuhteet, joten EGR-venttiilin käytöstä saadaan enemmän hyötyä. Viime vuosina kuitenkin EGR-venttiili on yleistynyt turboahdettujen ottomoottorien yhteydessä kiristyneiden päästöstandardien vuoksi [26].



Kuva 6. EGR-venttiilin sijainti moottorin ilmavirtoihin nähden. Ilman kulku kuvattu nuolilla ja sen lämpötila väreillä, jossa punainen on kuumin ja sininen viilein. 1. Turboahdin, 2. välijäähdytin, (3. kaasuläppä,) 4. moottori, 5. EGR-venttiili, 6. EGR-ilman jäähdytin. Mukailtu lähde [27].

EGR-venttiili sijaitsee pako- ja imusarjan välissä ja sallii kaasujen kulun vain pakopuolelta imupuolelle. Palamislämpötilaa alennetaan siis sekoittamalla osa pakokaasuista imuilmaan ja samalla palotilaan johdettavan ilman määrä vähenee. Kuvassa 6 havainnollistetaan kaasujen virtauksia ja lämpötiloja.

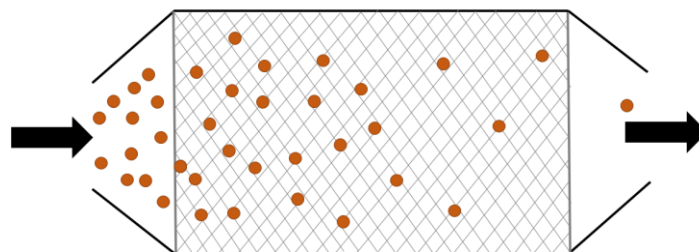
EGR-venttiili toimii yleensä vain osakaasulla ja sulkeutuu täysin kuorman kasvaessa lähelle maksimia tai moottorin ollessa tyhjäkäynnillä. Kierrätetyssä kaasussa on osakaasulla suuri määrä happea ja pieni määrä varsinaisia pakokaasuja, jolloin kaasua voidaan kierrättää suurempia määriä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että venttiili on auki osakaasulla. Kuorman lisääntyessä hapen määrä vähenee kierrätetyissä kaasuissa ja varsinaisten pakokaasujen osuus kasvaa. Kierrätyksen tuloksena olisi palamattomia hiukkasia ja ylimääräisiä päästöjä. Tämän takia venttiili suljetaan kovassa kuormassa. [28]

EGR-venttiilin käytöllä saattaa olla myös ei-haluttuja vaikutuksia moottorin toimintaan ja päästöihin. Nokipartikkelien lisääntyminen aiheuttaa ylimääräistä kulutusta moottorin osille ja muodostaa karstaa moottoriin sekä öljyn enneaikaista likaantumista. Pienhiukkas- ja nokipäästöt lisääntyvät, koska palamislämpötilan laskiessa ne eivät ehdi reagoida hapen kanssa kokonaan. Korkeampia polttoainenkulutuksia on myös väitetty esiintyvän. [28, 29] Dieselmootoreissa ylimääräisten päästöjen hallintaan voidaan käyttää hiukkassuodatinta, jota käsitellään seuraavassa luvussa.

Usein vuosien käytön jälkeen EGR-venttiilit tukkeutuvat noen muodostaman karstan takia ja venttiili voi toimia tehottomasti tai jopa jumittua tiettyyn asentoon, jolloin moottori ei toimi tarkoituksenmukaisesti (tehonpuute, epätasainen käynti, päästöjen lisääntyminen). Ongelmat venttiilissä voivat saada ajoneuvon käyttäjän poistamaan venttiilin käytöstä esimerkiksi tukkimalla sen metallilevyllä, jolloin takaisinkierto estetään ja vältetään uuden venttiilin hankinnalta.

4.3 Hiukkassuodatin

Hiukkassuodatin, josta käytetään usein lyhennettä DPF (engl. diesel particulate filter) on dieselmootorien yhteydessä käytetty suodatin, joka suodattaa poltossa syntyneitä pienhiukkasia ja nokea sekä hiilivetyjä. Hiukkassuodatin sopii erittäin hyvin käytettäväksi esimerkiksi EGR:n kanssa, sillä mahdolliset lisääntyneet hiilivety- ja pienhiukkaspäästöt voidaan suodattaa helposti. Suomen kielessä käytetään myös usein sanaa *hiukkasloukku* kuvaamaan sitä, että hiukkaset jäävät ikään kuin ansaan suodattimen rakenteisiin.



Kuva 7. Hiukkassuodattimen periaatekuva.

Kuvassa 7 esitellään hiukkassuodattimen peruseriaate. Vasemmalta virtaa pakokaasuja moottorilta, joissa on pienhiukkasia ja hiilivetyjä. Hiukkassuodatin suodattaa kennomaisella rakenteellaan hiukkasia, jolloin ympäristöön poistettava pakokaasu on merkittävästi puhtaampaa.

Hiukkassuodattimia on kahdenlaisia: kertakäyttöisiä ja regeneroitavia. Kertakäyttöiset suodattimet on vaihdettava niiden tukkeuduttua. Ne ovat harvinaisia ajoneuvoissa niiden vaatiman jatkuvan huollon takia. Yleisimpiä suodattimia ovat regeneroitavat hiukkassuodattimet. Hiukkassuodattimen tukkeutuessa riittävästi moottorin ohjelmaa muutetaan siten, että pakokaasujen lämpötila nousee merkittävästi. Tukkeutuminen

havaitaan paineanturien mittaamalla paine-erolla. Noki ja pienhiukkaset palavat korkeassa lämpötilassa mahdollisen katalyytin avulla ja hiukkassuodatin palautuu alkuperäiseen tilaansa. Jotta suodatin regeneroituisi riittävästi, on ajoneuvolla ajettava melko korkealla kuormituksella, jotta pakokaasujen lämpötila nousee riittävästi. Regenerointi aiheuttaa lievästi kohonnutta polttoaineen kulutusta ja typen oksidien lisääntymistä lämpötilan noustessa. [30]

Hiukkassuodattimen rakennevaatimukset ovat kovat. Samassa kompaktissa ja kustannustehokkaassa komponentissa tulee olla suodatinosa ja katalyytti, sekä sen on kestävä jopa 1000 °C lämpötiloja regeneroinnin aikana. Suodatin lämpenee paitsi pakokaasujen vaikutuksesta, myös hiukkasten palamisesta, josta vapautuu merkittäviä määriä lämpöä. [30] Toisaalta hiukkassuodatin toimii samalla äänenvaimentimena, jolloin erillistä äänenvaimenninta ei välttämättä tarvita. Näin voidaan säästää valmistuskustannuksissa. [31]

Suodattimen suodatinosa muodostuu huokoisesta kennomaisesta keraamirakenteesta, joka voidaan toteuttaa muun muassa sintraamalla. Rakenteen tiheys on olennainen asia: liian tiheässä rakenteessa tukkeutuminen voi olla liian nopeaa sekä paine-ero liian suuri, mutta liian harva rakenne on heikompi ja päästää pienempiä partikkeleita suodattimen läpi. Paine-ero on olennaisin suunnitteluparametri, sillä kaasun virtausta ei haluta haitata turhaan. Paine-eron tulisi siis olla mahdollisimman pieni. Huomioon pitää myös ottaa rakenteen permeabiliteetti, koska sekin vaikuttaa virtausnopeuteen. Kennon materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi piikarbidia tai alumiinin ja titaanin seosta. [31]

Hiukkassuodatin ei ole uusi keksintö, mutta vasta 2000-luvun alussa PSA Group (Peugeot ja Citroën) alkoi käyttää suodatinta lähes kaikissa dieselajoneuvoissaan. PSA Group kehitti myös ratkaisun, jolla suodattimen regenerointi ei vaadi niin korkeaa lämpötilaa. Ratkaisu on ruiskuttaa regeneroinnin alkaessa polttoaineen sekaan ceriumpohjaista lisäainetta. Lisäaine alentaa regeneroinnin vaatimaa lämpötilaa noin 600 °C:sta jopa 450 °C:een. Huolta aiheutti uusien anturien, pumpun ja säiliön toiminta, mutta järjestelmä on osoittautunut erittäin luotettavaksi ja toimivaksi. [30, 32]

Vaikka regeneroitavat hiukkassuodattimet ovat pitkäikäisiä, moottorin ikääntyessä suodattimeen päätyy polttoainetta ja moottoriöljyä sekä regeneroinnissa syntyvää tuhkaa. Paine-eron kasvaessa liian suureksi jatkuvasti, on hiukkassuodattimen pesu tai vaihto tarpeen. PSA Groupin ensimmäisen sukupolven suodattimilla oli 80000 kilometrin huoltoväli, kun kolmannen sukupolven (2004-) suodattimilla huoltoväli oli pidentynyt 250000 kilometriin. [31] Huollon tarpeeseen vaikuttaa tietenkin myös ajoneuvon käyttö: jos suodatin pääsee vain harvoin regeneroitumaan, se voi tukkeutua ennen aikaisesti. Tämän kaltainen tilanne voi syntyä autoissa, joilla ajetaan lyhyttä matkaa tai pääasiassa kaupunkiajtoa.

4.4 Typen oksidien adsorboija

Typen oksidien adsorboija (engl. NO_x adsorber, myös lean NO_x trap, LNT) on komponentti, joka nimensä mukaisesti adsorboi typen oksideja pakokaasuista sienimäiseen rakenteeseen. Niitä käytetään dieselmoottorien typen oksidien käsittelyyn, sillä kuten aiemmin on mainittu, kolmitoimikatalysaattorit eivät toimi dieselmoottorien yhteydessä happiylimäärän takia. Adsorboijia on aktiivisia ja passiivisia. Aktiivisessa adsorboijassa pakokaasuihin voidaan ruiskuttaa polttoainetta, jolloin ylimääräinen happi reagoi polttoaineen kanssa. Tällöin adsorboijan adsorboimat typen oksidit voidaan käsitellä katalyyttisesti kolmitoimikatalysaattorin tapaan.

Passiivinen adsorboija on uudempi ja yksinkertaisempi versio tekniikasta. Passiivisen adsorboijan tarkoitus on sitoa typen oksideja pakokaasuista kylmäkäynnistyksen yhteydessä. Koska monet tekniikat eivät toimi alhaisissa lämpötiloissa, pitää niiden lämmitä toimintalämpötilaansa ennen kuin niiden teho on tarkoitettulla tasolla. Passiivinen adsorboija sitoo typen oksidit, kunnes se lämpenee riittävästi, jolloin komponentti vapauttaa typen oksidit. Sen jälkeen typen oksidit voidaan käsitellä esimerkiksi valikoivalla katalyyttisellä pelkistyksellä (SCR). [33]

Passiivisissa adsorboijissa haasteena on materiaalin valinta. Paras materiaali olisi ominaisuuksiltaan sellainen, että se sitoisi typen oksideja jo ympäristön lämpötilasta lähtien, mutta samalla se kykenisi vapauttamaan ne tarpeeksi alhaisessa lämpötilassa. SCR-järjestelmän toiminta-alue alkaa noin 200 °C:sta, jolloin adsorboijan tulisi aloittaa desorptio. Jos desorptiota ei tapahdu riittävästi ajon aikana, ei adsorboija kykene sitomaan niin paljon typen oksideja kuin se on suunniteltu sitovan. Hondan tutkijat ovat paljastaneet, että Pd/ZSM-5 -yhdiste pystyisi sitomaan typen oksideja kuin myös hiilivetyjä. Honda kutsuu tätä uutta komponenttia NO_x trap three-way catalyst -nimellä (lyhenne N-TWC), eli NO_x-ansa ja kolmitoimikatalysaattori yhdistettynä. [25, 34]

5. PÄÄSTÖNVÄHENNYSTEKNIIKOIDEN TULEVAISUUS

Kiristyvät päästöstandardit sekä huoli ympäristön ja ihmisten terveydestä asettavat päästönvähennystekniikoille kovat tavoitteet tulevaisuudessa. Valmistajat optimoivat jo olemassa olevia tekniikoita jatkuvasti toimimaan tehokkaammin, mutta samalla markkinoille on tulossa joitain uusia lupaavia tekniikoita. Päästönvähennystekniikoihin vaikuttaa kuitenkin hyvin monet muutkin asiat kuin pelkkä tekninen toteutus. Lainsäädännöllä ja markkinoiden kehittyminen vaikuttaa merkittävästi siihen, miten päästönvähennystekniikat pitäisi toteuttaa. On myös epäselvää, miten esimerkiksi sähköautot vaikuttavat polttomoottoreiden tulevaisuuteen ja siten päästönvähennystekniikoiden kehityksen tarpeeseen.

Tämän luvun tavoitteena on vastata tutkimuskysymyksiin. Ensimmäinen tutkimuskysymys on, että onko polttomoottoreilla riittävät kehitysmahdollisuudet kilpailla muiden tekniikoiden kanssa tulevaisuudessa. Toinen tutkimuskysymys on, että tulevatko nykyiset päästönvähennystekniikat turhiksi vai onko niille tehokkaampia vaihtoehtoja.

5.1 Veden ruiskuttaminen palotilaan

Kuten mainittiin luvussa *Päästöt ja niihin vaikuttavat tekijät*, palamislämpötilan kasvaminen vaikuttaa suoraan NO_x-päästöjen syntymiseen ja vähentävästi pienhiukkasten ja hiilimonoksidin syntymiseen. Kun moottoria käytetään kovalla kuormalla, sen lämpötila nousee merkittävästi. Jussa Nieminen kirjoittaa Tekniikan Maailman artikkelissa [35] ongelmasta, joka korostuu pienissä, voimakkaasti ahdetuissa moottoreissa. Nykyään bensiinimoottoreissa palamislämpötilaa alennetaan kovilla kuormilla ruiskuttamalla ylimääräistä polttoainetta sitomaan energiaa. Palamislämpötila alenee, mutta ylimääräisen polttoaineen takia kaikki polttoaine ei pala. Moottorissa syntyy tällöin enemmän häkä- ja hiilivetypäästöjä ja koska seos on ali-ilmainen, katalysaattori ei toimi kykene hapettamaan päästöjä vaarattomaan muotoon. Huomioon tulee ottaa myös veden hajotessa syntyvä happi. Ilmanottoa tulee siis säätää, kun vettä ruiskutetaan. [36]

Tekniikan Maailman artikkeli esittelee BMW:n ensimmäistä sarjatuotantoautoa, BMW M4 GTS -mallia, jossa ylimääräisen polttoaineen sijaan palotilaan ruiskutetaan vettä kovassa kuormituksessa. Vaikka kyseessä on urheiluauto, on tekniikka toteutettavissa pienemmissäkin moottoreissa. [35] Koska vedellä on korkea ominaislämpökapasiteetti, sitä ei tarvitse ruiskuttaa palotilaan kovinkaan paljoa eli vaikutusta palamistapahtumaan ei ole.

BMW:n käyttämä järjestelmä on saksalaisen osavalmistajan Boschin kehittämä ja se kutsuu järjestelmää nimellä WaterBoost. Bosch väittää, että veden ruiskutus palotilaan voi vähentää polttoaineenkulutusta jopa 13 % sekä lisää tehoa ja vääntöä. [37]

Veden ruiskuttaminen palotilaan ei ole uusi keksintö, sillä sitä on käytetty jo vuosikymmeniä sitten tehokkaissa ahdetuissa ajoneuvoissa, esimerkiksi Saab 99 Turbossa. Ahdin lämmittää tuloilmaa merkittävästi ja veden ruiskuttamisella pyrittiin alentamaan palotapahtuman ja ilman lämpötilaa. Koska kylmemmän ilman tiheys on suurempi, saadaan samaan tilavuuteen enemmän happea, jolloin palaminen tapahtuu tehokkaammin. Tarkoituksena siis ei suinkaan ollut päästöjen vähentäminen, vaan tehon lisääminen. Nykyään ahtamisen aiheuttama ilman lämpeneminen on ratkaistu välijäähdyttimellä, joka on jäähdytykseen merkittävästi tehokkaampi menetelmä. [38]

5.2 Matalan lämpötilan poltto

Matalan lämpötilan poltto (engl. low temperature combustion, LTC) on kehityksessä oleva polttotekniikka, jossa yhdistyy otto- ja dieselmootorin ominaisuuksia. LTC-tekniikassa polttoaineen ja ilman seos syötetään sylinteriin kuten ottomootorissa. Toisin kuin ottomootorissa, polttoaine sytytetään puristuksen avulla kuten dieselmootorissa. LTC-tekniikan yhteydessä ei siis tarvita sytytystulppaa tai korkeapaineisia suuttimia. LTC-tekniikat eivät ole uusi keksintö, mutta tekniikkaa ei ole onnistuttu vielä toteuttamaan toimivasti laajassa liikennekäytössä. LTC-tekniikalla voidaan vähentää pienhiukkas- ja NO_x-päästöjä merkittävästi, mutta HC- ja CO-päästöt saattavat olla korkeampia. [6]

LTC-tekniikoita on useita erilaisia, mutta lupaavin tekniikka on HCCI (engl. homogenous charge compression ignition). Tässä luvussa keskitytään HCCI-tekniikkaan. HCCI-tekniikassa yhdistyy otto- ja dieselmootorien edut ja näin tekniikalla saavutetaan dieselmootorin tasoinen hyötysuhde pienemmillä päästöillä ja pienemmällä kulutuksella.

Taulukko 3. HCCI-tekniikan vertailua otto- ja dieselmootoreiden ominaisuuksiin. Mukailtu lähdettä [39].

	Otto	Diesel	HCCI
Polttoaine	Bensiini	Diesel	Useita
Puristuskestävyys	Korkea	Matala	Riippuu
λ	1	1,2 – 2	2 – 8
Sytytys	Kipinä	Puristus	Puristus
Palamislämpötila	Korkea	Korkea,	Matala,
Päästöt	Matala	NO _x ja PM korkeat	Erittäin matala
Hyötysuhde	Matala	Korkea	Korkea

Taulukossa 3 esitellään HCCI-tekniikan ominaisuuksia verrattuna otto- ja dieselmootoreihin. HCCI-tekniikassa on merkittäviä etuja perinteisiin polttomootoreihin verrattuna: hyötysuhteen ja matalampien päästöjen lisäksi voidaan käyttää useita erilaisia polttoaineita, kunhan moottori on säädetty puristus- ja polttoaine-ilmasuhteeltaan polttoaineelle sopivaksi. Päästöjen vähennys perustuu seoksen erittäin tasaiseen sekoittumiseen, jolloin palaminen ei tapahdu liekkirintaman avulla (otto) eikä liian rikkaita alueita synny (diesel). Tasainen sekoittuminen minimoi paikalliset lämpötilamaksimit, jolloin typen oksidien muodostuminen minimoituu, sekä palamattomia hiukkasia ei synny. [6]

HCCI-tekniikassa, kuten muissakin LTC-tekniikoissa, on vielä merkittäviä haasteita ennen sarjatuotantoa. Sytytyksen ajoituksen määrittäminen on hankalaa, sillä kemiallinen kinetiikka määrittää syttymisen alkuketken. Palamista voidaan hallita lämpötila-aikahistorialla, jonka avulla moottorinohjaus säätelee polttoaineen ja ilman seosta. Syttyminen täytyy tapahtua mahdollisimman lähellä yläkuolokohtaa, jotta päästään parhaaseen hyötysuhteeseen ja vältytään turhalta moottorin rasitukselta. [6]

LTC-tekniikan on havaittu toimivan parhaiten matalilla ja keskikovilla kuormituksilla. Liikennekäytössä on olennaista, että moottoria voidaan kuormittaa ajoittain kovilla kuormituksilla. Korkeilla kuormilla LTC-moottorin päästöt kasvavat merkittävästi, moottori rasittuu sekä tehon ja tiheyden suhde pienenee. Ratkaisuksi on esitetty hybridimallia, jossa käytettäisiin ominaisuuksia diesel- (HCCI) ja ottomootoreista (HCSI, engl. homogenous charge spark ignition). Matalilla kuormilla moottori toimisi HCCI:n periaatteiden mukaan ja korkeammilla kuormilla käytettäisiin HCSI:n periaatteita. Tämä tarkoittaa sitä, että sytytys hoidettaisiin sytytystulpan avulla korkeilla kuormilla. [40]

5.3 Lainsäädäntö

Euroopan unioni on rajoittanut liikenteen päästöjä yhteisesti vuodesta 1992 Euro-päästöstandardien avulla. Uusin standardi, Euro 6, astui voimaan vuonna 2014.

Jotta päästöjä voitaisiin mitata luotettavasti, testausmenetelmien tulisi olla standardoituja sekä kuvata todellisia olosuhteita mahdollisimman hyvin. Luvussa *Päästönvähennyksen historiaa* esiteltiin mm. Volkswagen Groupin käyttämää huijausohjelmistoa. Ajoneuvojen todellisten päästöjen tulisi vastata mitattuja arvoja tai mittausten hyödyllisyys on hyvin arveluttavaa. Weiss et al. [41] on mitannut tutkimuksessaan, että Euro 4-, 5- ja 6-standardien ajoneuvot kaikki ylittivät Euro-standardien vaatimukset typen oksideista moninkertaisesti. Euroopan komissio julkaisi toukokuussa 2018 tiedotteen, jossa kerrotaan uuden, RDE-testin (engl. real driving emissions, todelliset ajon aikana syntyvät päästöt) käyttöönotosta. Testi toteutetaan käyttämällä kannettavaa päästönmittaustyökalua (engl. portable emission measurement system, PEMS) ja ajamalla ajoneuvolla todellisella tiellä oikeissa olosuhteissa. Mittaus on jo pakollinen

uusissa tyyppihyväksyttävissä ajoneuvomalleissa ja tulee pakolliseksi vanhempiinkin ajoneuvomalleihin vuonna 2019. [42]

Useat suuret kaupungit, kuten Madrid, Pariisi ja Lontoo, harkitsevat dieselautojen pääsyn kieltämistä kaupunkien keskustaan kokonaan vaarallisten päästöjen takia. Lontoossa on jo käytössä matalien päästöjen alue (engl. low emission zone, LEZ), joka kattaa suur-Lontoon alueen. Vuonna 2008 voimaan tullut laki koskee ainoastaan raskasta kalustoa, joka ei noudata Euro IV -standardeja sekä minibusseja, jotka eivät noudata Euro III -standardeja. Suur-Lontoon alueella ajavien ajoneuvojen on kuuluttava rekisteriin, jota valvotaan ajoneuvoja rekisterikilpiä tunnistavan järjestelmän avulla. [43] Vuonna 2019 Lontoo ottaa käyttöön erittäin matalien päästöjen alueen, joka kattaa Lontoosta vain pienen, pahiten liikenteen saastuttaman alueen. Alue koskee kaikkia ajoneuvoja toisin kuin LEZ. Alueelle pääsyyn vaaditaan dieselautoilta Euro 6 -luokitusta ja bensiiniautoilta Euro 4 -luokitusta. Jos vaatimukset eivät täyty, peritään ajoneuvon omistajalta maksu alueelle pääsyyn. [44] Kaupunkien tavoitteet parantaa ilmanlaatua voivat johtaa alati tiukentuviin vaatimuksiin tai jopa kieltoihin.

Dieselmääräiset ajoneuvot ovat nauttineet etuasemasta Euroopassa jo pitkään. Niitä on pidetty taloudellisempina ja puhtaampana vaihtoehtona bensiinimoottoreille. Kuluttajien käyttäytymistä on ohjannut teknisten etujen lisäksi muun muassa dieselöljyn kevyempi verotus. Suomessa vuoden 2017 alusta bensiinin veron osuus oli 70,25 snt/l, kun taas dieselin veron osuus oli vain 53,02 snt/l [45]. Verotuksella voi olla ratkaiseva merkitys kuluttajien ajoneuvovalinnassa: jos dieselöljyn verotus nousee samalle tai korkeammalle tasolle kuin bensiinin, se tekisi dieselautoista vähemmän houkuttelevia vaihtoehtoja. Jos taas sähköauton hankintahinta ei olisi diesel- tai bensiiniautoa merkittävästi suurempi, sähköauto saattaa olla halvempi ja puhtaampi vaihtoehto.

Suomessa henkilöautoja verotetaan suoraan käyttöasteesta riippumatta kahdella tapaa: perusverolla ja käyttövoimaverolla. Perusvero perustuu ajoneuvon päästämiin CO₂-päästöihin. Mitä alhaisemmat hiilidioksidipäästöt ajoneuvossa on, sitä alhaisempi vero on. Hiilidioksidipäästöarvo lasketaan valmistajan ilmoittamasta yhdistetystä kulutuksesta. Vanhemmilla autoilla, joilla ei ole virallista hiilidioksidipäästöarvoa, verotus perustuu kokonaisuutensa. Käyttövoimaveron suuruus riippuu ajoneuvon massasta sekä käyttövoimasta. Bensiiniautoista ei makseta käyttövoimaveroa ollenkaan, mutta diesel-, hybridi-, sähkö- ja kaasuautoista veroa maksetaan taulukon 4 mukaisesti. [46]

Taulukko 4. Käyttövoimaverot käyttövoiman mukaan Suomessa vuoden 2013 alusta.

[46]

Käyttövoima	Snt/pv/alkava 100 kg
Diesel	5,5
Sähkö	1,5
Sähkö ja bensiini	0,5

Sähkö ja diesel	4,9
Metaani	3,1

Tyypillinen keskiluokan dieselauto painaa 1500 kilogrammaa, jolloin käyttövoimaveroa maksettaisiin vuodessa 301,13 euroa. Vastaavan massaisesta sähköautosta veroa kertyisi 82,13 euroa. Tyypillisen melko modernin dieselauton päästöt ovat luokkaa 150 g/km, jolloin perusvero on suuruudeltaan 188,70 euroa vuodessa. Sähköauton päästöt ovat 0 g/km, jolloin perusveroa peritään 69,71 euroa vuodessa. [46] 150 g/km hiilidioksidia päästävästä bensiiniautosta maksettaisiin sama perusvero kuin dieselautosta: 188,70 euroa vuodessa. Taulukossa 5 esitellään laskelmat kustannuksista tilanteessa, jossa autolla ajetaan 18000 kilometriä vuodessa huomioiden verojen ja polttoaineiden hinnat. Käytetään kulutusarvoina bensiiniautolle 6 l/100 km, dieselautolle 5 l/100 km ja sähköautolle 12 kWh/100 km Ylläpitokustannuksia ei huomioida.

Taulukko 5. Kustannusarvio diesel-, bensiini- ja sähköautojen käyttökustannuksista, kun ajetaan 18000 kilometriä vuodessa.

	Perusvero	Käyttövoimavero	Polttoaineen hinta	Kulutus	Hinta (€/a)
Diesel	188,70	301,13	1,35 (€/l)	5 l/100 km	1704,83
Bensiini	188,70	-	1,6 (€/l)	6 l/100 km	1916,7
Sähkö	69,71	82,13	0,16 (€/kWh)	12 kWh/100 km	497,44

Huomataan, että sähköauton käyttö on huomattavasti halvempaa kuin diesel- tai bensiiniauton käyttö. Sähköautojen tarjonnan ollessa vielä melko huonoa ja muun muassa akkujen kapasiteettien ja latauksen rajoitukset ohjaavat ihmisiä vielä pois sähköautojen luota. Jos Suomessa päätettäisiin panostaa sähköautoihin enemmän, voitaisiin ajoneuvojen ja polttoaineen verotuksella vaikuttaa tähän merkittävästi. Taulukossa 6 on esitelty mahdollisia hinnannuutoksia tulevaisuudessa kuhunkin käyttövoimaan. Tässä tapauksessa sähköauto saisi merkittäviä verohyötyjä ja fossiilisia polttoaineita verotettaisiin entistä kovemmin sekä verot näitä käyttävissä ajoneuvoissa kasvavat. Kuvitteellisesti perusvero tuplaantuu ja dieselin käyttövoimavero kasvaa yli puolella.

Taulukko 6. Hypoteettinen skenaario, jossa sähköauton verotus kevenisi ja fossiilisia polttoaineita käyttävien ajoneuvojen ja polttoaineiden verotus kovenisi. Ajomäärä 18000 kilometriä vuodessa.

	Perusvero	Käyttövoimavero	Polttoaineen hinta	Kulutus	Hinta (€/a)
Diesel	377,4	450	2,00 (€/l)	5 l/100 km	2627,4
Bensiini	377,4	-	2,00 (€/l)	6 l/100 km	2537,4
Sähkö	-	-	0,16 (€/kWh)	12 kWh/100 km	345,6

Vaikka ero käyttökustannuksissa on jo nyt sähköauton puolella, verotusmuutosten myötä ero voi olla vielä suurempi.

Riippuen Euroopan unionin direktiiveistä, kansallisista laeista ja paikallisista rajoituksista, polttomoottorikäyttöisistä ajoneuvoista voi tulla hyvin kalliita tai vaikeita käyttää. Poliittinen ilmapiiri ja yleiset asenteet ovat arvaamattomia pitkällä tähtäimellä, mutta tällä hetkellä trendit vaikuttavat olevan sähköautojen ja biopohjaisten polttoaineiden suunnalla. Biopohjaiset polttoaineet voidaan sekoittaa fossiilisten polttoaineiden kanssa ja toimivat olemassa olevassakin autokannassa. Biopohjaisten polttoaineiden lisääntymisen skenaariossa otto- ja dieselmoottorit ovat keskipisteessä ja päästönvähennystekniikat entistä tärkeämpiä. On kuitenkin epäselvää, kuinka suuri osa liikenteen tarpeista voidaan kattaa biopohjaisilla polttoaineilla.

Useat maat ovat alkaneet suosia sähköautoja päästökseen päästötavoitteisiinsa. Edelläkävijä sähköautojen lisäämisessä on Norja, joka ei kuulu Euroopan unioniin. Norja on myöntänyt lainsäädännössään merkittäviä etuja sähköautojen ostajille ja omistajille, kuten ilmaisen parkkeerauksen ja tietullit, bussikaistojen käytön ja merkittäviä veroetuja sekä hankintahinnasta että käytöstä. Sähköautojen osuus uusista autoista vuonna 2017 oli 21 %, missä ei ole mukana hybridautoja. [47]

Koska ajoneuvon elinikä on pitkä, sen vaikutukset ympäristöön ovat pitkäikäisiä. Euroopan unionin autokannan keski-ikä oli 10,7 vuotta vuonna 2015. Vastaavasti Suomessa keski-ikä oli 12,7 vuotta. Ajoneuvojen keski-ikä on ollut jatkuvassa kasvussa, sillä esimerkiksi vuonna 2007 EU:n autokannan keski-ikä oli 8,4 vuotta. [48] Keskimäärin EU:ssa ajoneuvot ovat siis Euro 5 -luokitusta noudattavia ja Suomessa Euro 4 -luokituksen mukaisia. Jos autokannan vanheneminen jatkuu, uusien päästömääräysten merkitys pienenee niitä noudattavien ajoneuvojen määrän pienentyessä. Vanhoihin autoihin voitaisiin vaatia päästöjä vähentävien laitteiden asennusta lainsäädännön avulla. Esimerkiksi dieselautoihin voitaisiin vaatia hiukkassuodattimen jälkiasennusta, ellei sellaista ole. On kuitenkin mahdollista, että kustannukset olisivat käytettyihin autoihin suhteettoman korkeat eikä puhdistustehokkuus olisi läheskään niin hyvä kuin tekniikoihin optimoitujen ajoneuvojen kanssa.

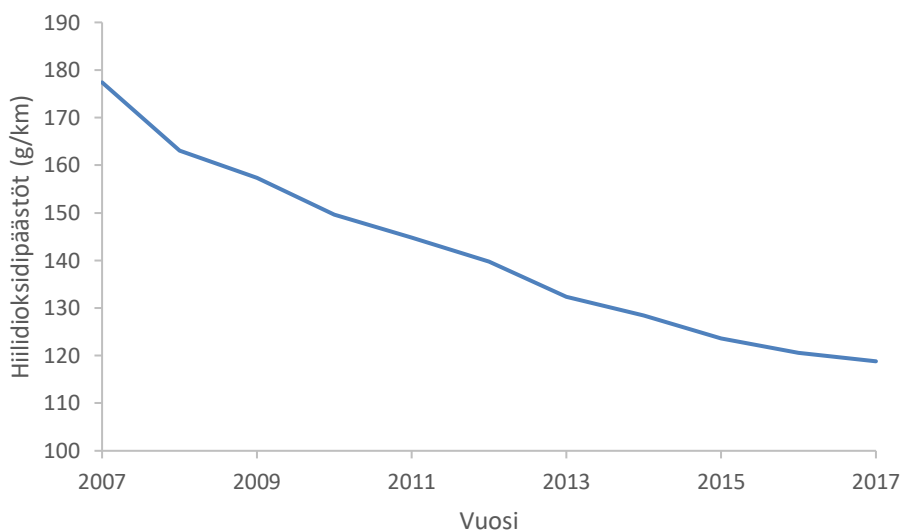
5.4 Markkinoita ohjaavat tekijät

Polttomoottorikäyttöiset henkilöautot ovat olleet ja todennäköisesti tulevat olemaan suosituin vaihtoehto markkinoilla. Luvussa *Johdanto* esiteltiin kuva 1, josta käy ilmi, että polttomoottorit ovat ylivoimaisia markkinoilla tällä hetkellä. Syitä, miksi polttomoottorit ovat autojen käyttäjille mieluisin vaihtoehto, on monia: valmis ja kattava jakeluinfrastruktuuri, nopea tankkaus, luotettavuus, tarjonnan monipuolisuus ja hinta.

Dieselautojen maine on vaurioitunut monien päästöhuijausten ja niistä johtuvien negatiivisten mielikuvien takia etenkin Saksassa. Myös monien kaupunkien suunnitelmat

kieltää dieselaivot keskustoissaan aiheuttaa epävarmuutta. Saksassa on jo havaittavissa kuluttajien suuntautumista pois dieselaivojen käytöstä. Kuluttajat eivät uskalla ostaa dieselaivoja ennen kuin Saksan ympäristöministeriö tekee päätöksiä koskien dieselaivojen päästöjä. Dieselaivojen hinnat ovat romahtaneet ja monilla autoliikkeillä on suuria määriä jopa Euro 5 -standardin autoja myymättä. [49] Monet autovalmistajat, kuten Volkswagen Group, on tarjonnut merkittävää korvausta Euro 1-4 -standardien dieselaivoneuvoista uuden auton oston yhteydessä. Korvaus sai autonmyynnin Saksassa kasvamaan ennätyslukemiin: 531200 uutta ajoneuvoa myytiin tammi- ja helmikuun aikana. Korvaus on osoittautunut mahdollisesti nopeimmaksi ja helpoimmaksi tavaksi uusien maan vanhaa dieselaivotkantaa. Volkswagen Group tarjoaa vanhasta dieselaivotasta 2000—10000 euron korvausta uuteen autoon riippuen auton koosta ja hinnasta. [50, 51]

Kuluttajien mieltymykset ovat siirtyneet vuosikymmenten varrella pienempiin ja taloudellisempiin autoihin. Ajoneuvon kulutuksen pienentyessä sen päästöpotentiali pienenee: mitä vähemmän ajoneuvo kuluttaa, sitä pienemmät sen ominaispäästöt ovat ennen niiden käsittelyä.



Kuva 8. Suomessa uusien henkilöautojen hiilidioksidipäästöt jaettuna vuositasolle. Yksikkönä g/km. Mukailtu lähde [52].

Kuvassa 8 on kuvattu Suomessa rekisteröityjen henkilöautojen keskimääräisiä hiilidioksidipäästöjä. Mukaan on laskettu kaikki henkilöautot käyttövoimasta riippumatta. Ajoneuvon hiilidioksidipäästöt lasketaan valmistajan ilmoittaman yhdistetyn polttoainekulutuksen mukaan, joten alhaisempi hiilidioksidipäästöarvo tarkoittaa alhaisempaa kulutusta. Vuodesta 2007 vuoteen 2017 hiilidioksidipäästöt ja kulutus on keskimäärin laskenut 33 %. Tämä on seurausta valmistajien kehityksestä pienempiin kulutuksiin ja kuluttajien halu käyttää vähemmän päästäviä ja kuluttavia autoja. Alhaisempi kulutus merkitsee pienempiä veroja ja polttoainekustannuksia kuluttajalle. Jos valmistaja tarjoaa vastaavaa ajoneuvoa (teho, ajo-ominaisuudet, varusteet) pienemmällä kulutuksella kuin toinen valmistaja, kuluttaja todennäköisesti valitsee

pienemmän kulutuksen ajoneuvon. Tästä johtuen valmistajien välinen kilpailu mahdollisimman pienestä kulutuksesta ajaa jatkuvasti pienempiä kulutuksia kohti.

Monilla markkinoilla hybridautot ovat osoittautuneet suosituiksi. Toyota Prius löysi laajat markkinat muun muassa Yhdysvalloista. Hybridautot ovat osittain sähköllä, osittain polttomoottorilla toimivia ajoneuvoja. Hybridautot ovat varustettu akustolla, sähkömoottorilla ja polttomoottorilla. Niin sanotuissa perinteisissä hybridautoissa polttomoottoria käytetään lataamaan akkuja, joiden latauduttua energia käytetään sähkömoottorissa. Jos sähköä ei ole saatavilla tai tehoa vaaditaan enemmän, polttomoottoria voidaan käyttää ajamiseen. Käytännön ajossa polttomoottoria ja sähkömoottoria käytetään yhdessä ajamiseen.

Plug in -hybridautoissa on mahdollisuus liittää ajoneuvo sähköverkkoon akkujen lataamiseksi. Jos akkujen varaustaso tyhjenee riittävästi, akkuja voidaan ladata polttomoottorin avulla. Periaatteessa plug in -hybridautolla voidaan ajaa pelkällä sähköllä, mutta todellisuudessa akkujen kapasiteetti on niin vaatimaton, että niillä voidaan ajaa joitain kymmeniä kilometrejä. Polttomoottorien matalapäästöisyys on oleellinen asia hybridautojen yhteydessä, joten jos markkinatilanne ja ihmisten asenteet ovat myönteisempiä hybridiratkaisuja kohtaan, polttomoottorien merkitys ei todennäköisesti vähene.

5.5 Nykyisten tekniikoiden tulevaisuus

Jo olemassa olevilla tekniikoilla, kuten kolmitoimikatalyysaattoreilla, on saavutettu merkittäviä vähennyksiä ajoneuvojen haitallisiin päästöihin, kuten typen oksideihin ja palamattomiin hiilivetyihin. Luvussa *Päästönvähennyksen historiaa* esiteltiin otto- ja dieselmoottorien päästöstandardien kehitystä Euroopassa. Ajoneuvojen päästöjä on kyetty vähentämään kehittämällä vanhoja tekniikoita paremmaksi ja tietenkin keksimällä uusia keinoja päästöjen vähentämiseksi. Vaikka uudet tekniikat, kuten SCR, ovat osoittautuneet tehokkaiksi keinoiksi, eivät ne silti syrjäytä vanhempia tekniikoita, sillä tekniikat usein täydentävät toisiaan ja täten toimivat yhdessä tehokkaammin kuin erikseen. Jos jokin uusi tekniikka yrittäisi syrjäyttää toisen tekniikan suoraan, olisi se myös käytännössä hankalaa kustannusten kannalta. Esimerkiksi kolmitoimikatalyysaattorien valmistusmäärät ovat valtavia sekä valmistusmenetelmät vakiintuneita, joten uuden, suoraan kilpailevan tekniikan olisi vaikeaa vallata markkinoita.

Vaikka päästönvähennystekniikoiden kehityksessä tapahtuisi merkittävä käänne, esimerkiksi matalan lämpötilan polttoa käyttävien moottorien sarjatuotanto, ei tarve perinteisille päästönvähennystekniikoille lopu. Käytännön olosuhteissa on mahdotonta kehittää polttomoottori, jonka pakokaasut eivät vaadi jälkikäsittelyä. Jos oletetaan tulevaisuuden moottorin olevan ideaalinen siinä mielessä, että polttoaineen ja ilman sekoittuminen ja annostelu on täysin ideaalia, ei syntyisi hiilimonoksidia tai palamattomia

hiilivetyjä, olisi ongelmana silti typen oksidit. Koska polttoaineen polttamiseen käytetään ilmaa, jossa suurin osa on typpeä, moottorin korkeissa lämpötiloissa osa tyypestä dissosioituu ja muodostaa hapen kanssa typen oksideja. Palamislämpötilan laskeminen vähentää typen oksidien syntyä, mutta samalla Carnot'n kierron mukaisesti hyötysuhde laskee. On siis käytännössä parempi antaa typen oksidien muodostua palotilassa ja jälkikäsitteilyllä saattaa ne vaarattomaan muotoon. Nykyisten tekniikoiden kehittäminen on siis joka tapauksessa perusteltua ja tarpeellista.

Tässä työssä ei käsitelty moottoria ohjaavia laitteita, mutta ohjauslaitteistojen kehityksessä on merkittävä potentiaali päästönvähennystekniikoiden hallinnan kannalta. Ohjauksen avulla tekniikoiden toimintaa voidaan muuttaa olosuhteiden mukaan parhaan mahdollisen lopputulokseen pääsemiseksi. Monimutkaiset ohjausjärjestelmät ovat joidenkin tekniikoiden toimivuuden kannalta ehdottomia, jolloin koko päästönvähennysjärjestelmä saattaa olla muutaman anturitiedon ja tietokoneen virheettömän toiminnan varassa. Ajoneuvojen monimutkaisuus kasvaa entisestään, jolloin riski ajoneuvon hajoamiseenkin kasvaa. Ajoneuvon vanhetessa järjestelmät saattavat aiheuttaa suuria kustannuksia omistajilleen, jotta ajoneuvo läpäisisi päästömittaukset. Siksi järjestelmissä olisi parasta tähdätä mahdollisimman luotettavaan ja itsenäiseen toimintaan jos mahdollista. Toisaalta monet säätötekniikat, kuten venttiilien muuttuva ajoitus, ovat toimineet erinomaisesti, eivätkä ne ole osoittautuneet kohtuuttomiksi ongelmiksi korjata.

Katalyyttien materiaaleja sekä erilaisia lisäaineita (esim. AdBlue) kehitetään paremmin sopiviksi. Haasteina ja rajoituksina monille muuten erinomaisille materiaaleille ja aineille ovat muun muassa väärä toimintalämpötila, niiden mahdollisesti aiheuttamat myrkylliset päästöt ja kestävyys liikennekäytössä. Rajoitteena on tietenkin myös materiaalien hinta. Erinomainen, mutta liian kallis lisäaine tai katalyytti ei todennäköisesti sovellu sarjatuotantoon tai kuluttajien käyttöön korkean hintansa takia.

Tilanne, jossa nykyisten polttomoottorien päästönvähennystekniikoiden merkitys vähenisi, olisi se, että siirryttäisiin pois polttomoottoriautoista. Vaihtoehdot polttomoottoriautoille ovat käytännössä polttokenno- tai sähköautot. Polttomoottorien käyttämät nestemäiset polttoaineet ovat energiatihedeltään ja varastoitavuudeltaan ylivoimaisia molempiin vaihtoehtoihin verrattuna. Lisäksi polttomoottoreiden ei tarvitse tulevaisuudessa käyttää fossiilisia polttoaineita polttoaineinaan, vaan biopohjaiset polttoaineet toimivat lähes yhtä hyvin polttomoottoreissa. Vaihtoehtoisia polttoaineita tutkitaan runsaasti ympäri maailmaa ja niitä on saatavilla kuluttajille. Esimerkiksi Nesteen kehittämä biodiesel on ominaisuuksiltaan äärimmäisen lähellä dieseliä, mutta se on valmistettu uusiutuvista raaka-aineista. Näiden biopolttoaineiden polttaminen tapahtuu samojen periaatteiden mukaan kuin fossiilisten polttoaineiden ja niistä syntyy samankaltaisia päästöjä. Nykyiset päästönvähennystekniikat soveltuvat näiden päästöjen käsitteilyyn, joten niiden merkitys ei vähenisi biopolttoaineskenaariossa.

6. YHTEENVETO

Otto- ja dieselmoottorien päästönvähennystekniikat ovat kehittyneet valtavasti viimeisten vuosikymmenten aikana. Päästönvähennystekniikoiden kehitystä on ajanut ja ajaa edelleen ympäristön pilaantumisen estäminen, negatiivisten terveysvaikutusten minimointi sekä ilmanlaadun ja sitä kautta viihtyvyyden parantaminen.

Eri päästönvähennystekniikoilla kyetään vaikuttamaan erilaisiin päästöihin. Merkittävimmät ja haitallisimmat päästöt, joita polttomoottoreista syntyy, ovat hiilimonoksidi (CO), pienhiukkaset (PM), hiilivedyt (HC) ja typen oksidit (NO_x). Monista haitallisista päästöistä (rikin oksidit (SO_x) ja lyijy-yhdisteet) on päästy eroon muun muassa parantamalla polttoaineen laatua ja kehittämällä parempia lisäaineita korvaamaan lyijy.

Otto- ja dieselmoottoreissa syntyy eri määriä eri päästöjä. Dieselmoottoreissa syntyy paljon typen oksideja korkeamman palamislämpötilan takia, jotka ovat hyvin haitallisia ympäristölle. Typen oksidit ovat myös yksi savusumua aiheuttavista yhdisteistä. Tämän takia monet tekniikat ovat kehitetty alentamaan palamisen keskilämpötilaa, kuten EGR (pakokaasujen takaisinkierätyks) tai käsittelemään päästöjä niiden syntymisen jälkeen, kuten SCR (valikoiva katalyyttinen pelkistys). Dieselmoottorissa syntyy myös paljon pienhiukkasia epätäydellisen palamisen ja sekoittumisen takia ja ongelmaan on kehitetty melko tehokas ratkaisu: hiukkassuodatin. Hiukkaset jäävät hiukkassuodattimen kennorakenteeseen kiinni ja suodattimen tukkiuduttua riittävästi se voidaan regeneroida esimerkiksi katalyytin ja lämpötilan noston avulla. Hiukkaset saatetaan hiilidioksidiksi ja vedeksi regeneroinnin yhteydessä.

Uudenlaisia päästönvähennystekniikoita tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti. Lupaavimpia tekniikoita ovat veden ruiskutus palotilaan ja matalan lämpötilan poltto (LTC) bensiinimoottoreissa. Molempien tavoitteena on alentaa moottorin keskilämpötilaa palamisen aikana, jolloin typen oksideja ei synny niin paljoa. Veden ruiskutuksen palotilaan on tarkoitus rajoittaa moottorin lämpötilaa kuormitustilanteissa, kun taas LTC:ssä tavoitteena on mahdollisimman hyvä sekoittuminen minimoiden paikallisia lämpötilamaksimeja. Toteutuessaan sarjatuotannossa näillä tekniikoilla saattaa olla merkittävä vaikutus päästöihin, kulutukseen sekä ajoneuvojen tehoon ja vääntöön.

Otto- ja dieselmoottorien tulevaisuus riippuu merkittävästi lainsäädännöstä, markkinoista ja asenteista niitä kohtaan. Liikenteen ympäristövaikutuksia yritetään minimoida, mutta se on haastavaa varsinkin, kun ajoneuvojen määrä maailmassa kasvaa entisten kehitysmaiden teollistuessa. Sähköautosta on tulossa varteenotettava kilpailija polttomoottorikäyttöisille ajoneuvoille, sillä useat suuret ajoneuvovalmistajat suuntaavat kehitystään entistä enemmän sähköautoihin. Sähköautojen menestys on vielä melko vaatimatonta, mutta niiden hintojen pudotessa ja akkutekniikan kehittyessä sähköautot saattavat vallata markkinoita. Polttokennoajoneuvot ovat myös vieläkin kysymysmerkki.

Suurimpina haasteina polttokennoissa on niiden hinta, vedyn tai muun kaasumaisen polttoaineen valmistus ja varastointi sekä infrastruktuurin puute. Verotuslainsäädännöllä ja tiukentuvilla päästöstandardeilla kuluttajia voidaan ohjata valitsemaan mahdollisimman vähäpäästöinen vaihtoehto.

Päästönvähennystekniikoiden kehitys on erittäin oleellista, jotta polttomoottoriajoneuvojen kilpailukyky säilyy tulevaisuudessa. Polttomoottoriajoneuvot tulevat todennäköisesti olemaan merkittävä osa uusista autoista vielä pitkään, vaikka esimerkiksi sähköautoteknologia kokisi läpimurtoja. Markkinoilla olevista sähköllä toimivista ajoneuvoista suurin osa on joko hybrideitä tai plug in -hybrideitä, joissa molemmissa on sähkömoottorin ja akuston lisäksi polttomoottori. Hybridiratkaisut saattavat olla tulevaisuudessa käytännöllisin ja luotettavin ratkaisu ajoneuvojen voimanlähteeksi. On siis tärkeää, että polttomoottorien päästöjä kyetään alentamaan mahdollisimman paljon, sillä niiden käytöstä tuskin luovutaan vielä pitkään aikaan, jos koskaan.

LÄHTEET

- [1] K-H. Kim, E. Kabir, S. Kabir, A review on the human health impact of airborne particulate matter, in: *Environment International*, 2015, pp. 136-143.
- [2] Maigeng Z., Guojun H., Maoyong F., Zhaoxi W., Yang L., Jing M., Zongwei M., Jiangmei L., Yunning L., Linhong W., Smog episodes, fine particulate pollution and mortality in China, in: *Environmental Research*, 2015, pp. 396-404.
- [3] C. Muilwijk, P. J. C. Schrijvers, S. Wuerz, S. Kenjere, Simulations of photochemical smog formation in complex urban areas, in: *Atmospheric Environment*, 2016, pp. 470-484.
- [4] Passenger car fleet by fuel type, ACEA, 2017, Saatavissa: <http://www.acea.be/statistics/article/Passenger-Car-Fleet-by-Fuel-Type>.
- [5] H. Bekker, 2017 (Full Year) Europe: Car Sales per EU and EFTA Country, Car Sales Statistics, 2018, Saatavissa: <https://www.best-selling-cars.com/europe/2017-full-year-europe-car-sales-per-eu-efta-country/>.
- [6] A. K. Agarwal, A. P. Singh, R. K. Maurya, Evolution, challenges and path forward for low temperature combustion engines, in: *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, pp. 1-56.
- [7] R.K. Rajput, *Internal Combustion Engines*, Laxmi Publications, 2005, 95–112 p.
- [8] K. Mollenhauer, H. Tschöke, *Handbook of diesel engines*, Springer, Berlin [u.a.], 2010, 61—190 p.
- [9] C.R. Ferguson, A.T. Kirkpatrick, *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*, John Wiley & Sons, Incorporated, New York, 2015, 201—247 p.
- [10] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 228:2012 + A1:2017, Automotive fuels. Unleaded petrol. Requirements and test methods, 2017, pp. 7—17.
- [11] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 590:2013 + A1:2017, Automotive fuels. Diesel. Requirements and test methods, 2017, pp. 7—14.
- [12] J. Kaspar, P. Fornasiero, N. Hickey, Automotive catalytic converters: current status and some perspectives, in: *Catalysis Today*, 2003, pp. 419-449.
- [13] AAA Data, Share of diesel in new passenger cars, ACEA, 2018, Saatavissa: <http://www.acea.be/statistics/tag/category/share-of-diesel-in-new-passenger-cars>.
- [14] M. Nesbit, M. Fergusson, A. Colsa, J. Ohlendorf, C. Hayes, K. Paquel, J. Schweitzer, Comparative study on the differences between the EU and US legislation on emissions in the automotive sector, 2016, pp. 21–27. Saatavissa:

[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587331/IPOL_STU\(2016\)587331_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587331/IPOL_STU(2016)587331_EN.pdf).

[15] D. Seyferth, The Rise and Fall of Tetraethyllead. 2. Organometallics, Iss. 25, 2003, pp. 5154—5178.

[16] A. Juva, Bensiiniopas, Neste, Espoo, 2015, p. 21

[17] C. Brand, Beyond ‘Dieselgate’: Implications of unaccounted and future air pollutant emissions and energy use for cars in the United Kingdom, Energy Policy, 2016, pp. 1-12.

[18] T. Zachariadis, After ‘dieselgate’: Regulations or economic incentives for a successful environmental policy, Atmospheric Environment, 2016, pp. 1-3.

[19] S. Beevers, E. Westmoreland, M. de Jong, M. Williams, D. Carslaw, Trends in NO_x and NO₂ emissions from road traffic in Great Britain, Atmospheric Environment, 2012, pp. 107-116.

[20] A. Roberts, R. Brooks, P. Shipway, Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions, Energy Conversion and Management, 2014, pp. 327-350.

[21] D. Lafyatis, G. Ansell, S. Bennett, J. Frost, P. Millington, R. Rajaram, A. Walker, T. Ballinger, Ambient temperature light-off for automobile emission control, in: Applied Catalysis B: Environmental, 1998, pp. 123-135.

[22] S. Siironen, J. Hautaviita, K. Kallio, T. Wallenius, K. Kuikka, M. Hirvelä, H. Pellikka & A. Kalliomäki, Katsastuksen arviointiperusteet, 2007, Saatavissa: <https://www.trafi.fi/tieliikenne/katsastus/maaraaikaikatsastus>

[23] B. Guan, R. Zhan, He L., Zhen H., Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NO_x from diesel engine exhaust, in: Applied Thermal Engineering, 2014, pp. 395-414.

[24] J. W. Choung, I-S. Nam, S-W. Ham, Effect of promoters including tungsten and barium on the thermal stability of V₂O₅/sulfated TiO₂ catalyst for NO reduction by NH₃, in: Catalysis Today, 2006, pp. 242-247.

[25] S. Jones, Y. Ji, A. Bueno-Lopez, Y. Song, M. Crocker, CeO₂-M₂O₃ Passive NO_x Adsorbers for Cold Start Applications, Emission Control Science and Technology, Vol. 3, Iss. 1, 2017, pp. 59-72. Saatavissa: <https://search.proquest.com/docview/1880759254>.

[26] H. Wei, T. Zhu, G. Shu, L. Tan, Y. Wang, Gasoline engine exhaust gas recirculation – A review, Applied Energy, 2012, pp. 534-544.

[27] H. Jääskeläinen, M. K. Khair, EGR Systems & Components, Dieselnet, 2012, Saatavissa: https://www.dieselnet.com/tech/engine_egr_sys.php.

- [28] D. Agarwal, S. K. Singh, A. K. Agarwal, Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine, *Applied Energy*, 2011, pp. 2900-2907.
- [29] V. Pradeep, R. P. Sharma, Use of HOT EGR for NO_x control in a compression ignition engine fuelled with bio-diesel from *Jatropha* oil, *Renewable Energy*, 2007, pp. 1136-1154.
- [30] D. Fino, S. Bensaid, M. Piumetti, N. Russo, A review on the catalytic combustion of soot in Diesel particulate filters for automotive applications: From powder catalysts to structured reactors, *Applied Catalysis A: General*, Vol. 509, 2016, pp. 75-96.
Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.libproxy.tut.fi/science/article/pii/S0926860X15301939>.
- [31] A. Joerg, Ceramic Diesel Particulate Filters, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol. 2, Iss. 6, 2005, pp. 429-439. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2005.02044.x>.
- [32] D. Fino, P. Fino, G. Saracco, V. Specchia, Innovative means for the catalytic regeneration of particulate traps for diesel exhaust cleaning, *Chemical Engineering Science*, 2003, pp. 951-958.
- [33] Yaying Ji, Dongyan Xu, Shuli Bai, Uschi Graham, Mark Crocker, Bingbing Chen, Chuan Shi, Deb Harris, Dave Scapens, John Darab, Pt- and Pd-Promoted CeO₂-ZrO₂ for Passive NO_x Adsorber Applications, 2016, pp. 111-125. Saatavissa: <https://pubs-acrs-org.libproxy.tut.fi/doi/pdf/10.1021/acs.iecr.6b03793>.
- [34] Y. Murata, T. Morita, K. Wada, H. Ohno, NO_x Trap Three-Way Catalyst (N-TWC) Concept, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, Vol. 8, Iss. 2, 2015, pp. 454-459. Saatavissa: <https://www.jstor.org/stable/26273099>.
- [35] Jussa Nieminen, Miten se toimii: polttomoottorin vesisuihkutus, *Otava Media*, Iss. 2, 2017, pp. 30-31.
- [36] W. Mingrui, N. T. Sa, R. F. Turkson, Liu J., G. Guanlun, Water injection for higher engine performance and lower emissions, in: *Journal of the Energy Institute*, 2017, pp. 285-299.
- [37] Hybrid Cars: Bosch Water Injection Designed to Cut Fuel Consumption and Carbon Emissions, *Newstex*, Chatham, 2016, Saatavissa: <https://search.proquest.com/docview/1815526158>.
- [38] A. Boretti, Water injection in directly injected turbocharged spark ignition engines, *Applied Thermal Engineering*, 2013, pp. 62-68.
- [39] Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, pp. 741-783.
- [40] A. Alkidas, Combustion advancements in gasoline engines, *Energy Conversion and Management*, 2007, pp. 2751-2761.

[41] M. Weiss, P. Bonnel, J. Kuhlwein, A. Provenza, U. Lambrecht, S. Alessandrini, M. Carriero, R. Colombo, F. Forni, G. Lanappe, P. Le Lijour, U. Manfredi, F. Montigny, M. Sculati, Will Euro 6 reduce the NOx emissions of new diesel cars? – Insights from on-road tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS), Atmospheric Environment, 2012, pp. 657-665.

[42] Testing of emissions from cars, European Commission, 2018, Saatavissa: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-18-3646_en.htm.

[43] A. Jones, R. Harrison, B. Barratt, G. Fuller A large reduction in airborne particle number concentrations at the time of the introduction of “sulphur free” diesel and the London Low Emission Zone, Atmospheric Environment, 2012, pp. 129-138.

[44] Ultra Low Emission Zone, Transport for London, 2017, Saatavissa: <https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone#on-this-page-3>.

[45] Polttoaineerotus kiristyy vuoden 2017 alussa, Öljy- ja biopolttoaineala, 2016, Saatavissa: <http://www.oil.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/polttoaineerotus-kiristyy-vuoden-2017-alussa>.

[46] Veron rakenne ja määrä, Trafi, 2018, Saatavissa: https://www.trafi.fi/tieliikenne/verotus/ajoneuvovero/veron_rakenne_ja_maara.

[47] Norwegian EV policy, Norsk Elbilforening, 2018, Saatavissa: <https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/>.

[48] Average vehicle age, ACEA, 2015, Saatavissa <http://www.acea.be/statistics/tag/category/average-vehicle-age>.

[49] E. Behrmann, Germany’s ‘Diesel Fear’ Leaves \$5 Billion in Used Cars Gathering Dust, Bloomberg, 2017, Saatavissa: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-08-24/germany-s-diesel-fear-sees-5-billion-in-used-cars-gather-dust>.

[50] C. Hertzner, VW may extend diesel rebates in Germany, Automotive News Europe, 2018, Saatavissa: <http://europe.autonews.com/article/20180312/ANE/180319944/vw-may-extend-diesel-rebates-in-germany>.

[51] C. Rauwald, VW Group brands offer rebates in Germany to trade in older diesel cars, Automotive News Europe, 2017 Saatavissa: <http://europe.autonews.com/article/20170808/ANE/170809746/vw-group-brands-offer-rebates-in-germany-to-trade-in-older-diesel-cars>.

[52] Ensirekisteröityjen henkilöautojen keskimääräiset CO₂-päästöt, Trafi, 2018, Saatavissa: https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ensirekisteroinnit/ensirekisterointien_paastotilastot.