

VAASAN YLIOPISTO

TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ

ENERGIA TEKNIikka

Sami Tuomisto

**BIOKAASUKÄYTTÖISIÄ TYÖKONEITA KOSKEVAN PÄÄSTÖLAINSÄÄ-
DÄNNÖN NYKYTILA JA TULEVAISUUS**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Vaasassa
31.8.2018.

Työn valvoja

Professori Seppo Niemi (TkT)

Työn ohjaaja

Jukka Kiijärvi (TkT)

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on osa energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa ja on tehty Vaasan yliopiston tekniikan- ja innovaatiojohtamisen yksikössä. Diplomityön aihe liittyy Suupohjan Koulutuskuntayhtymän Suupohjan biokonsepti- hankkeeseen. Hankkeen tavoite on biokaasupilottiympäristön luominen Suupohjaan, sekä biokaasuosaamisen kasvattaminen ja tiedon jakaminen alueella.

Kiitän työni valvojaa professori Seppo Niemeä mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja työni ohjaajaa Jukka Kiijärveä. Opiskeluaikanasi olen saanut osallistua erittäin laadukkaaseen koulutukseen sekä Seppo Niemen, että Jukka Kiijärven opetuksessa. Mieleeeni ovat jääneet monet mielenkiintoiset opetustilanteet ja keskustelut, niin moottoritekniikkaan, polttomoottorien päästöjen hallintaan, kuin muihinkin aiheisiin liittyen. Kiitän myös Vaasan yliopistoa erittäin laadukkaan maisteriohjelman järjestämisestä ja siitä, että olen opiskelun lisäksi saanut olla myös osa yliopiston työyhteisöä.

Kiitän myös Suupohjan Koulutuskuntayhtymän koulutusjohtajaa Esko Lehtimäkeä, hankkepääällikkö Pekka Soinia ja Levón- instituutin projektipääällikkö Ari Haapasta avusta diplomityöhöni liittyen.

Suuret kiitokset myös perheelleni tuestanne ja siitä, että jaksoitte kannustaa minua läpi koko opiskeluaikani.

Seinäjoella 17.8.2018

Sami Tuomisto

SISÄLLYSLUETTELO

sivu

ALKUSANAT	2
LYHENNELUETTELO	6
TIIVISTELMÄ	8
ABSTRACT	9
1 JOHDANTO	10
2 LIIKKUVAT TYÖKONEET, TYÖKONEMOOTTORIT JA POLTTOAINEET	13
2.1 Työkonemoottorit	13
2.1.1 Kipinäsytytteinen kaasumoottori	14
2.1.2 Puristussytytteinen dieselmoottori	18
2.1.3 Kaksoispolttoainemoottori	19
2.1.4 Moottorin ahtaminen	21
2.1.5 Moottorityypeissä syntyvät päästöt	23
2.1.6 Pakokaasujen puhdistustekniikat	25
2.2 Pakokaasupäästöjen mittausmenetelmät	28
2.2.1 NRSC- testisykli	29
2.2.2 NRTC- testisykli	30
2.2.3 PEMS- mittausmenetelmä	30
2.3 Maataloustraktorit	32
2.3.1 Maataloustraktorien moottorit	33
2.4 MEKA- tutkimuksen päästöihin liittyvät tulokset	34

2.5	Työkoneissa käytetyt polttoainetyypit	36
2.5.1	Dieselpolttoaine ja kaasuöljy	36
2.5.2	Metaani	37
2.5.3	Maa- ja biokaasu	38
3	TYÖKONEIDEN PÄÄSTÖLAINSÄÄDÄNTÖ VAIHE I - IV	40
3.1	Vaihe I–II päästöstandardi	40
3.2	Vaihe III A ja III B päästöstandardi	41
3.3	Vaihe IV päästöstandardi ja pakokaasupäästöjen raja-arvot	42
3.3.1	Pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot	44
3.3.2	Työkoneiden tyyppihyväksyntä	45
3.4	Kaasukäyttöisten työkoneiden valmistus Suomessa.	46
3.4.1	AGCO Power Oy	46
3.4.2	Lännen Tractors Oy	46
3.4.3	Sampo-Rosenlew Oy	47
3.4.4	Valtra Oy	47
3.5	Vaihe IV päästöstandardin mukaiset kaasutraktorit	47
3.6	Direktiiviä 97/68/EY muokkaavat direktiivit	48
4	TYÖKONEIDEN PÄÄSTÖLAINSÄÄDÄNTÖ VAIHE V	49
4.1	Vaihe V päästöstandardi ja pakokaasupäästöjen raja-arvot	50
4.1.1	Pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot	51
4.1.2	Asetuksen EU/2016/1628 voimaantulo	52
4.1.3	Kaasumootorilla varustettujen työkoneiden tyyppihyväksyntä	54
4.2	Vaihe V päästöstandardin mukaiset kaasutraktorit	54
4.3	Kaasukäyttöisten työkoneiden valmistus Suomessa	54
4.4	Asetusta EU/2016/1628 muokkaavat asetukset	55

5	HIILIVETYPÄÄSTÖJEN RAJA-ARVON MÄÄRITTÄMINEN	56
5.1	Kaksoispolttoainemoottorin hiilivetypäästöjen raja-arvon laskeminen	58
5.2	Kipinäsytytteisen kaasumoottorin hiilivetypäästöjen raja-arvon laskeminen	58
6	PÄÄSTÖLAINSÄÄDÄNNÖN NYKYTILA JA TULEVAISUUS	60
6.1	Päästölainsäädännön nykytila	60
6.1.1	Säänneltyt päästökomponentit	61
6.1.2	Hiilidioksidipäästöt	61
6.2	Päästölainsäädännön tulevaisuus	61
6.2.1	Säänneltyt päästökomponentit	62
6.2.2	Hiilidioksidipäästöt	62
6.2.3	Päästölainsäädännön tulevaisuuteen vaikuttavia seikkoja	63
7	POHDINTA	66
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	68
8.1	Kaasukäyttöisiin työkoneisiin soveltuva kaasumoottoritekniikka	68
8.2	Kaasukäyttöisiä työkoneita koskeva päästölainsäädäntö	69
9	YHTEENVETO	70
	LÄHDELUETTELO	72

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

A/F	Ilma- / polttoainesuhde (Air / Fuel Ratio)
ASC	Ammoniakkikatalysaattori (Ammonia Slip Catalyst)
cEGR	Jäähdytetty pakokaasujen takaisinkierätyk (Cooled Exhaust Gas Recirculation)
CH ₄	Metaani (Methane)
CI	Puristussytytteinen (Compression Ignited)
CNG	Puristettu maakaasu (Compressed Natural Gas)
CO	Hiilimonoksidi (Carbon Monoxide)
DF	Kaksoispolttoaine (Dual Fuel)
DOC	Dieselhapetuskatalysaattori (Diesel Oxidation Catalyst)
DPF	Diesel hiukkassuodatin (Diesel Particulate Filter)
EU	Euroopan Unioni
GER	Kaasuenergiasuhde (Gas Energy Ratio)
HC	Hiilivety (Hydrocarbon)
LNG	Nesteytetty maakaasu (Liquefied Natural Gas)
MOC	Metaanihapetuskatalysaattori (Methane Oxidation Catalyst)
NO _x	Typenoksidi (Nitrogen Oxide)
NRMM	Liikkuva työkon (Non-Road Mobile Machinery)
NRSC	Työkoneiden vakio testisykli (Non Road Steady Cycle)

NRTS	Työkoneiden muuttuva testisykli (Non Road Transient Cycle)
OC	Hapetuskatalysaattori (Oxidation Catalyst)
PEMS	Työkoneiden käytönaikainen pakokaasupäästöjen mittausmenetelmä (Portable Emission Measurement System)
PM	Hiukkasmassa (Particulate Matter)
PN	Hiukkaslukumäärä (Particulate Number)
SCR	Typenoksidien pelkistyskatalysaattori (Selective Catalytic Reduction)
SI	Kipinäsytytteinen (Spark Ignited)
SO _x	Rikkioksidi (Sulphur Oxide)
THC	Kokonaishiilivetypäästö (True Hydrocarbon)
TWC	Kolmitoimikatalysaattori (Three Way Catalytic Converter)

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja****innovaatiojohtamisen yksikkö****Tekijä:**

Sami Tuomisto

Diplomityön nimi:

Biokaasukäyttöisiä työkoneita koskevan päästölainsäädännön nykytila ja tulevaisuus

Valvoja:

Professori Seppo Niemi (TkT)

Ohjaaja:

Jukka Kiijärvi (TkT)

Tutkinto:

Diplomi-insinööri

Yksikkö:

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö

Koulutusohjelma:

Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma

Suunta:

Energiatekniikka

Opintojen aloitusvuosi:

2016

Diplomityön valmistumisvuosi:

2018

Sivumäärä: 78

TIIVISTELMÄ

Biokaasun käyttö mahdollistaa työkoneiden tuottamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen ja biokaasun käytön lisääminen on siksi tavoiteltavaa. Biokaasukäyttöisten työkoneiden tyyppihyväksyntä ei kuitenkaan ole ollut mahdollista aikaisemman päästölainsäädännön voimassaoloaikana ja vasta Vaihe V päästöstandardi tuo muutoksen tyyppihyväksyntään liittyen.

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia biokaasukäyttöisiä työkoneita koskevan päästölainsäädännön nykytilaa ja tulevaisuutta, sekä työkoneisiin soveltuvaa kaasumoottoritekniikkaa. Tutkimus suoritettiin perehtymällä kaasumoottoritekniikkaa käsittelevään kirjallisuuteen ja julkaisuihin. Päästölainsäädännön osalta tutkimuksen keskeisinä lähteinä olivat päästölainsäädäntöä koskevat Euroopan Unionin asetukset ja direktiivit, sekä päästölainsäädäntöön liittyvät muut julkaisut. Tutkimuksessa selvitettiin myös työkoneiden päästölainsäädäntöön liittyvien suomalaisten toimijoiden näkemyksiä.

Tuloksista voidaan päätellä, että Vaihe V päästöstandardin tiukkojen päästörajojen alittaminen onnistuu todennäköisimmin kipinäsyttytteisiä stökiömetrisiä kaasumoottoreita käyttäen. Vaihe V päästöstandardi mahdollistaa biokaasukäyttöisten työkoneiden tyyppihyväksynnän ja sisältää kaasumoottorien hiilivetyypäästöjen raja-arvon määrittämiseen liittyvän menetelmän. Muilta osin kaasumoottoreita koskevat kaikille moottorityypeille asetetut päästörajat. Vaihe V päästöstandardin tulevaisuudesta tai sen korvaajasta ei vielä ole olemassa virallista tietoa, eikä esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen sääntelystä ole tehty päätöksiä. Seuraava Vaihe V päästöstandardiin liittyvä arviointi on tarkoitus tehdä vuonna 2020 ja silloin arvioidaan tarve asettaa uusia säänneltyjä päästökomponentteja.

AVAINSANAT: NRMM, EU 2016/1628, Vaihe V, 97/68/EY, Vaihe I-IV, biokaasu, biokaasukäyttöiset työkoneet

UNIVERSITY OF VAASA**Unit of technology and
innovation management****Author:**

Sami Tuomisto

Topic of the Thesis:Emission legislation of the biogas powered non-road
mobile machinery**Supervisor:**

Professor Seppo Niemi (D.Sc.)

Instructor:

Jukka Kiijärvi (D.Sc.)

Degree:

Master of Science in Technology

Department:Unit of technology and
innovation management**Degree Programme:**

Energy -and information technology

Major of Subject:

Energy Technology

Year of Entering the University: 2016**Year of Completing the Thesis:** 2018**Pages:** 78

ABSTRACT

The use of biogas allows the reduction of the greenhouse gas emissions produced by the NRMM. Therefore, increasing the use of biogas is sensible. However, the type approval of biogas powered NRMM has not been possible during the period of previous emission legislation. The Stage V the emission standard will change the situation of the type approval.

The purpose of this thesis was to study the current state, and the future, of the emission legislation of the biogas powered NRMM. As well as the gas engine technology suitable for NRMM. The study was conducted by studying gas engine technology in literature and publications. Regarding emission legislation, the main sources of research were the European Union regulations and directives of emission legislation. Other publications related to emissions legislation were also studied. The study also examined the opinions of Finnish operators related to the emissions legislation of NRMM.

From the results it can be concluded that the undercutting of the strict emission limits of the Stage V emission standard is most likely to be achieved by using spark-ignited stoichiometric gas engines. The Stage V emission standard enables the type approval of biogas powered NRMM and includes a method for determining the limit value for hydrocarbon emissions producer by gas engines. Otherwise, the gas engines must undercut the emission limits similar to all types of engines. The future of the Stage V emission standards or its replacement has not yet been settled. The decisions to regulate carbon dioxide emissions in the future have not been done yet. The next assessment of the Stage V emissions standard is to be done in year 2020 and then the need to set new regulated emission components is also assessed.

KEYWORDS: NRMM, EU 2016/1628, Stage V, 97/68/EU, Stage I-IV, biogas, biogas powered machinery

1 JOHDANTO

Hiilidioksidi on merkittävin kasvihuonekaasu, jonka määrän kasvun ilmakehässä oletetaan nostavan maapallon keskilämpötilaa tulevaisuudessa. Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa ihmisten elinolosuhteisiin maapallolla ja on yleisesti todettu, että ilmaston lämpenemistä tulee rajoittaa ilmakehään vapautuvien kasvihuonekaasujen määrää rajoittamalla.

Fossiiliset polttoaineet ovat yksi merkittävimmistä ilmakehään vapautuvien hiilidioksidipäästöjen lähteistä. Työkoneissa perinteisesti käytettyjen fossiilisten diesel- ja kaasuöljyjen sekä bensiinin valmistuksessa käytetyn raakaöljyn määrä vähenee maapallolla (Demirbas 2008: 111). Korvaavina polttoaineina voidaan käyttää biopolttoaineita, kuten biokaasua. Biokaasua voidaan tuottaa esimerkiksi yhdyskunnan tuottamista jätteistä, tai maataloudessa syntyvistä biomassoista. Uusiutuvalla biokaasulla on hiilidioksidipäästöjä alentava vaikutus ja lisäksi biokaasun käytöllä voidaan alentaa myös polttomoottorien tuottamien hiukkaspäästöjen määrää (Nylund, Söderena & Rahkola 2016: 15).

Suomessa tuotettiin biokaasua vuonna 2015 920 GWh, biokaasun tuotantopotentiaalin ollessa kuitenkin vähintään 9 TWh ja tästä noin 80% maataloudessa. Maataloudessa syntyvien maatalousmassojen hyödyntäminen biokaasun tuotannossa nostaa maatilojen energiaomavaraisuutta ja alentaa maataloudessa syntyvien kasvihuonepäästöjen määrää. (Suomen Biokaasuyhdistys 2017: 1.) Maataloudessa tuotetun biokaasun on myös arveltu edistävän tieliikenteessä käytettyjen kaasukäyttöisten ajoneuvojen yleistymistä lisäämällä biokaasun tarjontaa ja laajentamalla jakeluverkostoa (Reskola 2018).

Työkoneiden polttoaineenkulutuksesta valtaosa katetaan fossiilisilla diesel- tai kaasuöljyllä ja loput, lähinnä pienten työkoneiden osalta, bensiinillä. Työkoneissa kaasupolttoaineiden käyttö on toistaiseksi vähäistä. Työkoneissa syntyviä hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää usealla tavalla ja uusiutuvien biopolttoaineiden käyttö on näistä tehokkain (Nylund ym. 2016: 14).

Työkoneissa voidaan käyttää joko kipinäsytytteisiä kaasumoottoreita tai kaksoispolttoainemoottoreita. Kipinäsytytteisten kaasumoottorien hyötysuhde on

kaksoispolttoainemoottoreita huonompi, mutta tarvittavat tekniset ratkaistu yksinkertaisempia ja mahdollisuus tiukkenevien pakokaasujen päästörajojen alittamiseen parempi. (Söderena 2017: 14 – 17.) Biokaasun käytöllä voidaan alentaa kipinäsytytteisten kaasumoottorien tuottamia hiukkaspäästöjä ja kaksoispolttoainemoottorienkin osalta niissä käyntitilanteissa, joissa kaasupolttoaineen osuus kokonaispolttoainemäärästä on suuri.

Kaasukäyttöisten työkoneneiden tyyppihyväksyntämahdollisuuden puuttuminen on hidastanut kaasukäyttöisten työkoneneiden yleistymistä Euroopan Unionin alueella. Vaikka tarve kasvihuonekaasujen päästömäärien rajoittamiseen on tunnistettu, on työkoneneita koskevan päästölainsäädännön kehittyminen tätä tavoitetta tukevaksi ollut hidasta.

Työkoneneiden päästölainsäädäntöä ohjaavat Vaihe päästöstandardit eivät aiemmin ole tunnistaneeet kaasukäyttöisiä työkonemoottoreita. Vasta uuden Vaihe V päästöstandardin myötä kaasumoottorilla varustettujen työkoneneiden pakokaasupäästöjen päästörajat on asetettu päästöstandardiin ja siten kaasukäyttöisten työkoneneiden tyyppihyväksyntä on tullut mahdolliseksi (Janin, Bravo, Adam, Wilczek, Scherm, Diedrich & Blything 2017: 17).

Vaikka kaasukäyttöisten työkoneneiden tyyppihyväksyntä on nyt mahdollista, Vaihe V päästöstandardin tiukat päästörajat saattavat aiheuttaa ongelmia kaasumoottorien osalta, vaatien työkoneneisiin parhaiten soveltuvien kaasumoottoritekniikoiden lisätutkimusta ja panostuksia tuotekehittelyyn.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan työkoneneissa tyypillisesti käytettyä NRE- moottoriluokkaa. NRE- luokka kattaa puristussytytteiset moottorit teholuokassa 0 kW–56 kW ja kaikki moottorit teholuokassa 56 kW–560 kW. Työkoneneiden moottoreissa polttoaineena voidaan käyttää usean tyyppisiä kaasuja. Tässä tutkimuksessa kaasulla tarkoitetaan metaania sisältävää maa- tai biokaasua ja kaasumoottorilla maa- tai biokaasukäyttöistä polttomoottoria.

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia kaasukäyttöisiä työkoneneita koskevan päästölainsäädännön nykytilaa ja tulevaisuutta. Päästölainsäädäntöön sisältyvien päästörajojen alittaminen vaatii työkonemoottoreissa monimutkaisten teknisten ratkaisujen käyttöä.

Vaadittavien teknisten ratkaisujen ymmärtämiseksi, tutkimuksessa tutkittiin myös kaasukäyttöisten työkonemoottorien tekniikkaan, pakokaasujen jälkikäsittelyn ja polttoaineen syötön osalta. Lisäksi perehdyttiin työkonemoottoreissa syntyviin pakokaasupäästöihin ja työkonemoottoreissa käytettyihin polttoaineisiin. Tutkimus suoritettiin perehtymällä kaasumoottoritekniikkaa käsittelevään kirjallisuuteen ja julkaisuihin. Päästölainsäädännön osalta tutkimuksen keskeisinä lähteinä olivat päästölainsäädäntöä koskevat Euroopan Unionin asetukset ja direktiivit, sekä päästölainsäädäntöön liittyvät julkaisut. Tutkimuksessa selvitettiin myös kaasukäyttöisten työkonoiden päästölainsäädäntöön liittyvien suomalaisten toimijoiden, kuten Trafín, VTT:n, Maa- ja metsätalousministeriön ja Ympäristöministeriön näkemyksiä.

Luvussa 2 perehdytään työkoneisiin, työkonoiden moottoritekniikkaan, työkonemoottoreissa syntyviin pakokaasupäästöihin, pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmiin ja työkoineissa käytettäviin polttoaineisiin diesel- ja kaasuöljyn ja kaasupolttoaineen osalta. Luvussa 3 on esitelty työkoineita koskevan päästölainsäädännön Vaihe I – IV päästöstandardit. Luvussa 4 perehdytään työkoineita koskevan päästölainsäädännön Vaihe V päästöstandardiin. Luvussa 5 on esimerkki Vaihe V päästöstandardin mukaisten kaasumoottorien hiilivety päästön laskennasta. Luvussa 6 tehdään katsaus työkoineita koskevan päästölainsäädännön nykytilaan ja tulevaisuuteen. Luvussa 7 on tutkimukseen liittyvä pohdita. Luvussa 8 on esitetty tutkimuksen tuloksista tehty johtopäätöksen. Tutkimuksen yhteenveto on esitetty luvussa 9.

2 LIIKKUVAT TYÖKONEET, TYÖKONEMOOTTORIT JA POLTTO- AINEET

Liikkuvia työkoneita ovat kaikki ei tieliikennekäyttöön tarkoitetut työkoneet, joita käytetään maastossa ja esimerkiksi maatalouden töissä ja joita ei käytetä matkustajien tai tavaroiden kuljetukseen maantieliikenteessä. Liikkuvat työkoneet ovat joko korilla varustettuja, tai ilman koria olevia koneita. Liikkuvat työkoneet voidaan varustaa pyörillä, kuten traktorit tai ne voivat olla pyörättömiä, kuten siirrettävät generaattorit ja vesipumput. Liikkuvat työkoneet voivat olla omalla voimansiirrollaan kulkevia tai siirrettäviä koneita. Liikkuvien työkoneiden luokkaan kuuluvat kaikki liikuteltavat työkoneen kevyistä raskaisiin koneisiin. (European Commission 2018.) Tässä tutkimuksessa työkoneella tarkoitetaan liikkuvaa työkoneita.

Kappaleessa 2.1 luodaan katsaus työkoneissa käytettyyn moottoritekniikkaan, moottoreissa syntyviin pakokaasupäästöihin ja pakokaasupäästöjen jälkikäsittelylaitteistoihin. Kappale 2.3 käsittelee maataloustraktoreita. Kappale 2.2 käsittelee työkoneiden päästömittaustekniikoita. Kappale 2.3 esittelee ruotsalaisen MEKA- tutkimuksen yhteydessä testatuista maataloustraktoreista saadut keskeisimmän päästöihin liittyvät tulokset. Kappale 2.4 käsittelee työkoneiden polttoaineita dieselpolttoaineen, kaasuoiljyn ja bio- ja maakaasun osalta.

2.1 Työkonemoottorit

Polttomoottorilla tai moottorilla tarkoitetaan energian muuntamiseen soveltuvaa konetta, joka muuntaa polttoaineen sisältämän kemiallisen energian mekaaniseksi energiaksi moottorin sisällä tapahtuvan palamisprosessin avulla (Heywood 1988: 1).

Termiä polttomoottori käytetään lähinnä mäntämoottoreista, vaikka kemiallista energiaa voidaan muuttaa mekaaniseksi energiaksi myös esimerkiksi kaasuturbiinin avulla. Polttomoottorit voidaan luokitella monella tapaa ja tässä tutkimuksessa käytetään luokittelua, joka jakaa moottorit sytytystavan mukaan kipinäsytytteisiin ja puristus- sytytteisiin

moottoreihin. Tässä luvussa käsitellään kipinäsytytteisiä kaasumoottoreita ja kaksoispolttoainemoottoreita. Sekä perehdytään myös puristussytytteisiin dieselmoottoreihin, joihin kaksoispolttoainemoottorit perustuvat (Söderena 2017: 15).

2.1.1 Kipinäsytytteinen kaasumoottori

Kipinäsytytteiset kaasumoottorit perustuvat nestemäisiä polttoaineita käyttäviin kipinäsytytteisiin moottoreihin (Söderena 2017: 14). Poikkeavaa on lähinnä käytettävä polttoaine ja muutokset polttoaineen syöttötekniikassa. Kipinäsytytteisissä kaasumoottoreissa ilma- polttoaineseos sytytetään puristustahdin lopussa ulkoista energianlähdettä käyttävän sytytystulpan avulla. Polttoaine voidaan syöttää palotilaan imukanavan kautta kuten kuvassa 1 on esitetty, tai suoraan palotilaan kuten kuvasta 2 voidaan havaita.



Kuva 1. Imukanavasuihkutuksen periaate (Bosch 2018).

Imukanavasuihkutteisissa kaasumoottoreissa polttoaine syötetään imukanavaan ennen imuventtiiliä. Koska polttoaine syötetään palotilaan jo puristuksen alussa, moottori puristaa ilman ja polttoaineen muodostamaa seosta. Suorasuihkutteisissa kaasumoottoreissa polttoaine syötetään sylinteriin vasta juuri ennen puristuksen loppua, ja moottori puristaa pelkkää ilmaa dieselmoottorin tapaan. (Turunen & Niemi 2002: 593.)



Kuva 2. Suorasuihkutuksen periaate (Bosch 2018).

Koska suorasuihkutteisissa kaasumootoreissa puristetaan pelkkää ilmaa, ei nakutusta ilmene ja moottorin puristussuhde, ja siten sylinterin maksimipaine, voidaan nostaa imukanavasuihkutteista kaasumootoria korkeammaksi. Sekä imukanava-, että suorasuihkutteisissa kaasumootoreissa tehon säätö perustuu seoksen määrän säätöön. Määräsäätö on tyypillisesti toteutettu imuputkeen sijoitetun kuristusläpän avulla. (Turunen & Niemi 2002: 592 - 594.)

Kipinäsytytteiset kaasumootorit käyvät joko stökiometrisellä, tai laihalla seossuhteella. Seossuhdetta kuvataan ilmakertoimen λ (lambda) avulla ja säädetään ilmamäärää säättävän kuristusläpän ja polttoaineen määräsäädön avulla.

Ilmakerroin määritetään yhtälöllä

$$\lambda = \frac{L}{L_{st}},$$

missä L tarkoittaa palamisen todellista ilma- polttoainesuhdetta ja L_{st} palamisen stökiometristä ilma- polttoainesuhdetta. Kaasumootorin käydessä stökiometrisellä ilma-

polttoainesuhteella on ilmakerroin $\lambda = 1$, jos kaasumoottori käy laihalla on ilmakerroin $\lambda > 1$. (Turunen & Niemi 2002: 592.)

Dieselmoottoria alempi sylinterin maksimipaine, sekä moottorin tehon säädän vaatima pumppaushäviöitä aiheuttava kuristusläppä heikentävät kipinäsytytteisen kaasumoottorin hyötysuhdetta dieselmoottoriin verrattuna. Toisaalta suorasuihkutuksen mahdollistama sylinterin korkeampi maksimipaine parantaa hyötysuhdetta hieman imukanava-suihkutteiseen moottoriin nähden. (Söderena 2017: 14.)

Kipinäsytytteisen kaasumoottorin paras teho saavutetaan hieman rikkaalla seossuhteella, jolloin ilmakerroin λ on luokkaa 0,8 - 0,9 (Turunen & Niemi 2002: 593). Pakokaasujen jälkikäsittelyssä käytettävä kolmitoimikatalysaattori vaatii kuitenkin toimiakseen stökiömetrisen seossuhteen.

Stökiömetristä seosta käyttävät kaasumoottorit nakuttavat herkästi ja sylinteripainetta on siksi rajoitettava. Tehollinen keskipaine on luokkaa 10...15 baria ja kokonaishyötysuhde luokkaa 35...37% (Turunen & Niemi 2002: 609). Kaikkien uusimman EURO VI päästönormin mukaisesti tieliikenteeseen hyväksytyjen kaasukäyttöisten raskaankaluston ajoneuvojen moottorit ovat kipinäsytytteisiä ja toimivat stökiömetrisellä seossuhteella (Söderena 2017: 12).

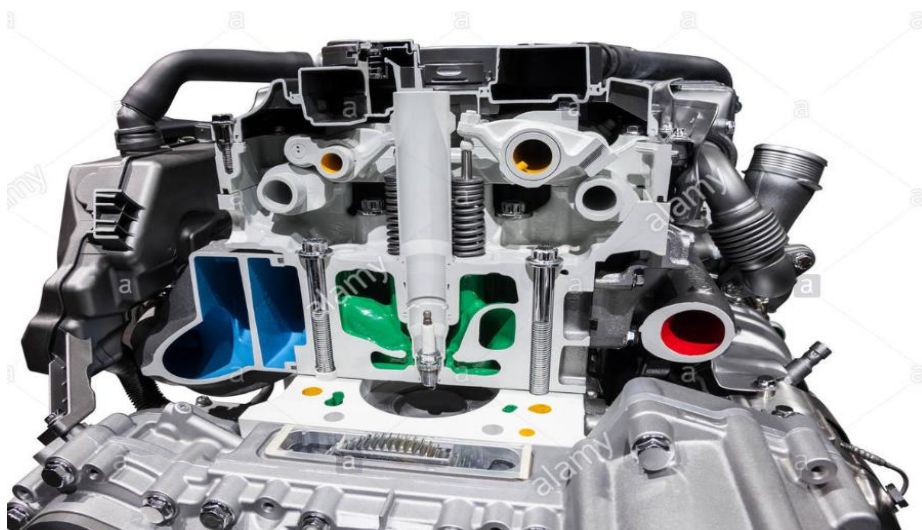
Kipinäsytytteisillä stökiömetrisillä kaasumoottoreilla varustettujen kaupunkibussien energiankulutus on noin 30% vastaavaa dieselkäyttöistä bussia suurempi. Erään turboahdetun kipinäsytytteisen kaasumoottorin hyötysuhteeksi on ilmoitettu 39% tehollisella keskipaineella 10 baria ja saman moottorin tehollisen keskipaineen maksimiksi jopa 21 baria. (Turunen & Niemi 2002: 608 - 609.) Tämä lähentelee jo dieselmoottorin vastaavia arvoja, joten hyötysuhteen parantamiseen liittyvää kehityspotentiaalia on olemassa.

Myös Söderena (2017: 14) arvioi kipinäsytytteisissä stökiömetrisissä kaasumoottoreissa olevan hyötysuhteen parantamiseen liittyvää potentiaalia, esimerkiksi mekaanisten komponenttien, kuten sylinterinkannen ja imusarjan osalta. Koska työkoneissa

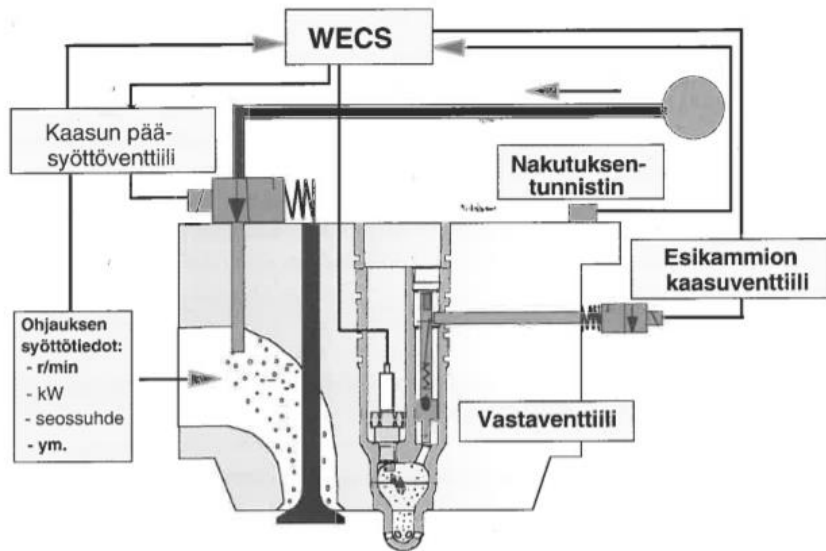
käytetään raskaskaluston kanssa samaan tekniikkaan perustuvia moottoreita, on hyötysuhteen parantuminen tekniikan kehittyessä todennäköistä myös työkonemoottorien osalta.

Kipinäsytytteisten laihaseoskaasumoottorien hyötysuhde on stökiömetrisiä kaasumoottoreita parempi. Laiha seos vähentää nakutuksen esiintymistä ja tällöin moottorin tehollinen keskipaine voidaan nostaa luokkaan 15...20 baria. Laihaa seosta käytetään etenkin suurissa kipinäsytytteisissä kaasumoottoreissa, joiden hyötysuhde voi olla välillä 42...45% (Turunen & Niemi 2002: 609).

Söderenan (2017: 14) mukaan työkoneluokan laihaseoskaasumoottoreissa ilmakertoimet liikkuvat välillä 1,1...1,4. Keskinopeiden kaasumoottorien osalta ilmakerroin on luokkaa 2. Laihaseosmoottoreissa seoksen syttymisen varmistamiseksi sytytystulpan ympärille pyritään muodostamaan stökiömetrisen seoksen alue. Pienissä moottoreissa tämä tehdään kerrostamalla stökiömetrinen seos tulpan ympärille, esimerkiksi männän laen muotoilun avulla ja keskinopeissa moottoreissa erillistä esikammiota käyttäen. (Turunen & Niemi 2002: 609.) Kuvassa 3 näkyy henkilöautoluokan imukanavasuihkutteisen kipinäsytytteisen kaasumoottorin sylinterinkannen poikkileikkaus ja kuvassa 4 keskinopean kipinäsytytteisen kaasumoottorin esikammiolla varustettu palotila ja polttoaineensyötön komponentit.



Kuva 3. Henkilöautoluokan imukanavasuihkutteisen kipinäsytytteisen kaasumoottorin sylinterinkannen poikkileikkaus (Alamy 2018).

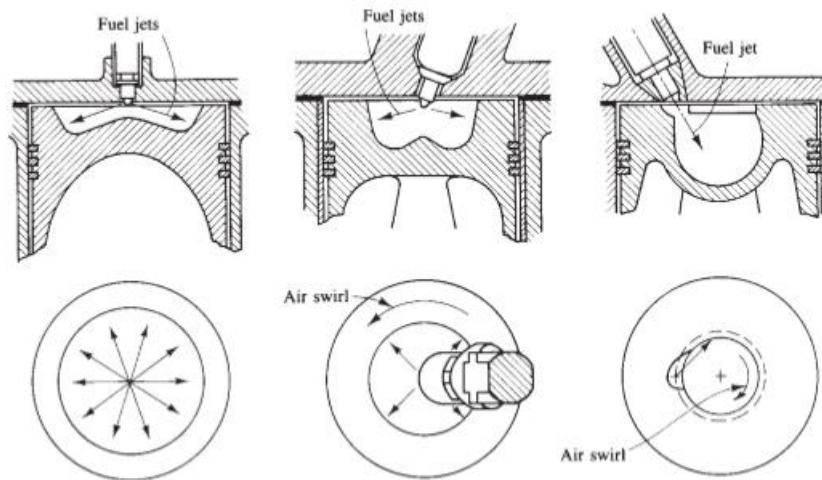


Kuva 4. Keskinopean kipinäsytytteisen kaasumootorin esikammiolla varustettu palotila ja polttoaineensyötön komponentit (Turunen & Niemi 2002: 611).

2.1.2 Puristussytytteinen dieselmoottori

Puristussytytteisissä nopeakäyntisissä työkoneluokan dieselmoottoreissa polttoaine syötetään palotilaan puristuksen loppuvaiheessa ja nykyaikaisissa dieselmoottoreissa käytetään lähinnä polttoaineen suoraruiskutusta (Turunen & Niemi 2002: 598 - 599). Työkoneluokan dieselmoottorit käyttävät polttoaineenaan dieselpolttoainetta tai kaasuöljyä. Syttymisen ajoitusta säädetään polttoaineen ruiskutushetkeä säätämällä ja polttoaine syttyy palotilassa puristuksen vaikutuksesta. Koska ulkoista energialähdettä ei käytetä, täytyy polttoaineen olla helposti syttyvää (Turunen & Niemi 2002: 603).

Heikosti syttyvää metaania sisältävät maa- ja biokaasut eivät yksinään sovellu dieselmoottorien polttoaineeksi, vaan vaativat syttyäkseen erillisen nestemäisen pilottipolttoaineen käyttöä (Turunen & Niemi 2002: 605). Kuvassa 5 on nähtävissä suoraruiskutteen dieselmoottorin tyypilliset palotilamuodot ja polttoainesuuttimen tyypilliset sijoitustavat.



Kuva 5. Dieselmoottorien tyypilliset palotilamuodot ja polttoainesuuttimen sijoitusvaihtoehdot (Heywood 1988: 494).

Dieselmoottorien tehoa säädetään polttoaineen määrän säädöllä, eikä ilmamäärän kuristussäätöä yleensä käytetä. Dieselmoottorit käyvät ilmaylimäärällä ja koska imuilman virtausta ei rajoiteta osakierroksilla, ei imukanavistoon synny juurikaan virtaushäviöitä. Virtaushäviöiden vähyys vaikuttaa positiivisesti dieselmoottorien kokonaishyötysuhteeseen. (Turunen & Niemi 2002: 597.) Sylinterin korkeampi maksimipaine, pienet virtaushäviöt imukanavistossa ja suuri ilmakerroin tekevät dieselmoottorin kokonaishyötysuhteesta korkeamman kipinäsytytteisiin kaasumoottoreihin verrattuna.

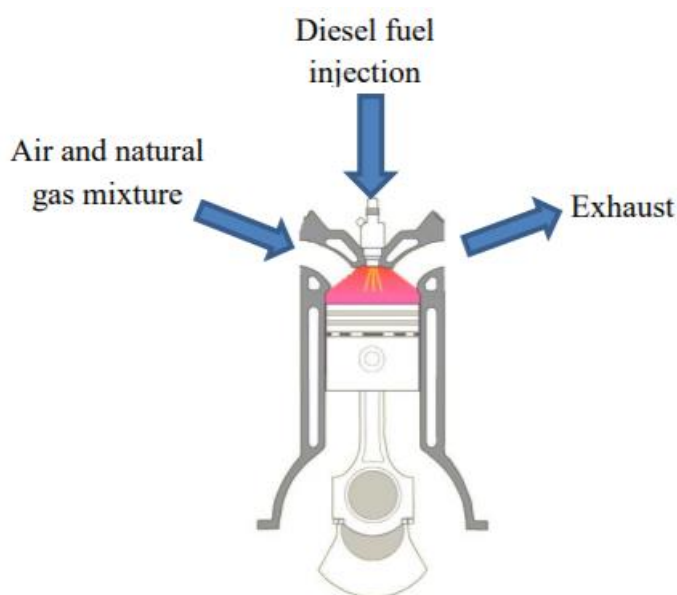
2.1.3 Kaksoispolttoainemoottori

Puristussytytteisessä kaasumoottorissa, eli kaksoispolttoainemoottorissa kaasun ja ilman seos sytytetään nestemäisen pilottipolttoaineen avulla. Pilottipolttoaineena käytetään dieselpolttoainetta tai kaasuöljyä. Herkästi syttyvä pilottipolttoaine ruiskutetaan joko esikammioon, tai suoraan palotilaan. Pilottipolttoaine syttyy ensin, sytyttäen myös heikommin syttyvät kaasupolttoaineen. (Turunen & Niemi 2002: 605.)

Kaasupolttoaine voidaan syöttää kaksoispolttoainemoottoriin useammalla eri tavalla. Esi-sekoittumispalamiseen perustuvissa moottoreissa kaasu syötetään ahtimen imupuolella, tai pienipaineisena imukanavaan. Suoraruiskutusmoottoreissa korkeasti paineistettu kaasu ruiskutetaan suoraan palotilaan. (Turunen & Niemi 2002: 605; Söderena 2017: 16.)

Koska esisekoittumispalamiseen perustuvissa kaksoispolttoainemoottoreissa puristetaan ilman ja kaasun seosta, saattaa niissä ilmetä nakutusta. Nakutuksen estämiseksi tehollista keskipainetta joudutaan rajoittamaan vastaaviin dieselmoottoareihin verrattuna. Tehollisen keskipaineen rajoitus laskee moottorin hyötysuhdetta ja alentaa moottorista saatavaa tehoa ja momenttia (Turunen & Niemi 2002: 606). Esisekoittumispalamiseen perustuvan kaksoispolttoainemoottorin periaatekuva on esitetty kuvassa 6.

Esisekoittumispalamiseen perustuvissa kaksoispolttoainemoottoreissa pilottipolttoaineen säädön hallinta on tärkeää sekä hyötysuhteen, että pakokaasupäästöjen hallinnan kannalta. Turusen ja Niemen (2002: 607.) mukaan korkeimmat teholliset keskipaineet näissä moottoreissa ovat luokkaa 20 - 23 bar ja hyötysuhde välillä 41 - 48%. Tehoa säädetään polttoaineen määrän säädöllä ja seossuhde on aina laiha ilmakertoimen ollessa kaksi tai ylikin.



Kuva 6. Esisekoittumispalamiseen perustuvan kaksoispolttoainemoottorin periaatekuva (Mansor 2014).

Esisekoittumispalamiseen perustuvat kaksoispolttoainemoottorit ovat hyötysuhteeltaan kipinäsytytteisiä kaasumoottoareita parempia, mutta eivät yllä dieselmoottoareiden tasolle. Kaksoispolttoainemoottorien pilottipolttoaineen määrä vaihtelee moottorin teknisistä ratkaisuksista, kuormitustilanteesta sekä käyttötarkoituksesta riippuen muutamasta prosentista

kymmeneen prosentteihin (Turunen & Niemi 2002: 606; Söderena 2017: 16). Esisekoittumispalamiseen perustuvat kaksoispolttoainemoottorit toimivat tarvittaessa pelkästään dieselpolttoaineella tai kaasujolla, mutta eivät ilman dieselpolttoainetta tai kaasujoa.

Suoraruiskutteiset kaksoispolttoainemoottorit tarvitsevat toimiakseen aina sekä pilottipolttoainetta, että kaasupolttoainetta. Neste- ja kaasupolttoaine ruiskutetaan suoraan sylinteriin puristuksen lopussa (Söderena 2017: 16). Koska sylinterissä puristetaan pelkästään ilmaa, ei nakutusta esiinny ja kyseiset moottorit saavuttavatkin lähes dieselmootto-reille ominaisen tehollisen keskipaineen 25 bar ja kokonaishyötysuhteen 45 - 47% (Turunen & Niemi 2002: 606).

Suoraruiskutteisten kaksoispolttoainemoottorien tekniset ratkaisut ovat esisekoittumispalamiseen perustuvia moottoreita monimutkaisempia ja kaasupolttoaineen paineistaminen korkeaan paineeseen vaatii paljon tehoa. Kaasupolttoaineen paineistamisen vaatima teho laskee moottorityypin hyvää hyötysuhdetta. Suoraruiskutteiset kaksoispolttoainemoottorit soveltuvatkin parhaiten käytettäväksi sovelluksissa, joissa suuripaineista kaasua on tarjolla (Turunen & Niemi 2002: 606).

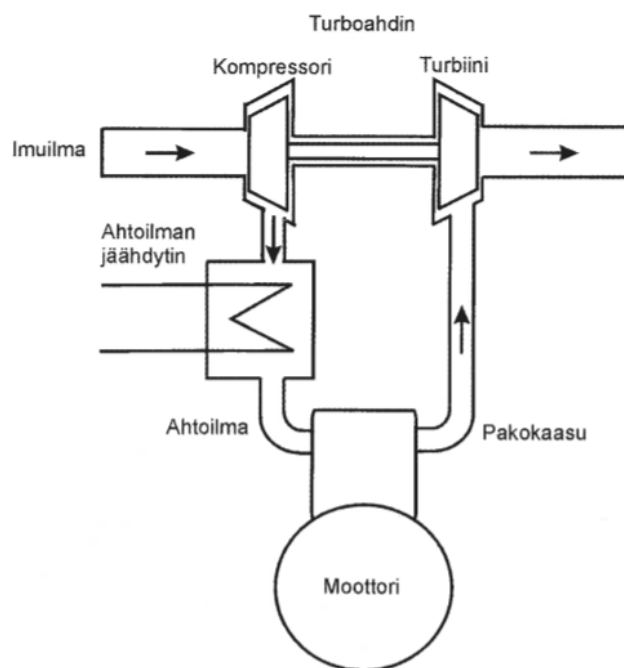
Söderenan (2017: 17) mukaan työkoneluokan moottorivalmistajilla ei tällä hetkellä ole suoraruiskutekniikkaan perustuvia kaksoispolttoainemoottoreita tarjolla, mutta muutamia moottorityypin polttoaineensyöttöön liittyvien komponenttien valmistajia, kuten Westport ja Delphi, on olemassa.

2.1.4 Moottorin ahtaminen

Polttomoottorin sylinterissä palavan polttoaineen määrän kasvattaminen työkiertoa kohti lisää moottorista saatavaa tehoa. Jotta suuremman polttoainemäärän polttaminen olisi mahdollista, tulee sylinteriin syöttää myös suurempi määrä ilmaa. Ilman tiheyttä, ja siten sylinterin ilmamäärää, voidaan kasvattaa käyttämällä ahdinta. Ahdin voi olla joko mekaaninen moottorin kampiakselilta tehonsa saava ahdin, tai moottorin pakokaasuista energiansa saava pakokaasu- eli turboahdin. (Turunen & Niemi 2002: 606.)

Nykyaikaiset työkoneneiden dieselmoottorit ovat lähes poikkeuksetta turboahdettuja. Turboahdin soveltuu dieselmoottorin lisäksi myös kipinäsytytteisen kaasumoottorin sekä myös kaksoispolttoainemoottorin ahtamiseen. Turboahdin käyttää pakokaasujen muutoin hukkaan menevää energiaa ja parantaa näin moottorin kokonaishyötysuhdetta, erityisesti keskisuurilla ja suurilla kuormilla. Myös polttoaineen ominaiskulutus, eli polttoaineen kulutus saatuun tehoon nähden pienenee, koska ahdin vähentää kaasunvaihdoista johtuvia häviöitä. (Niemi 2018b: 1.)

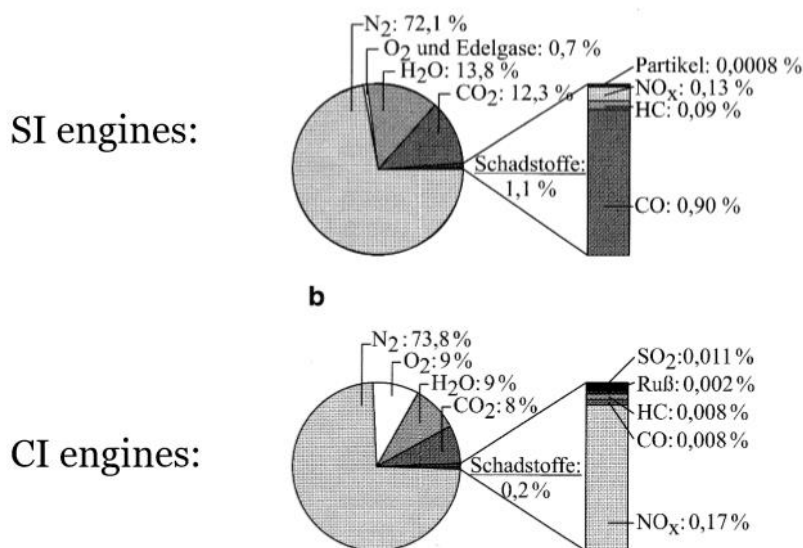
Ilman puristaminen ahtimessa nostaa puristuvan ilman lämpötilaa ja laskee ilman tiheyttä. Turboahtimien yhteydessä käytetäänkin useasti ahtoilman jäähdyttimiä ahtimelta virtaavan ilman jäähdyttämiseksi ja ilman tiivistämiseksi (Turunen & Niemi 2002: 589). Työkoneluokan moottoreissa ahtoilman jäähdytyksessä voidaan käyttää esimerkiksi ilma-ilma jäähdytintä. Tällaisessa jäähdyttimessä ahtoilma jäähtyy jäähdyttimen läpi virtaavan ilman avulla ja ahtoilman lämpötila saadaan laskettua tyypillisesti noin 50°C :een (Niemi 2018c: 14). Ahtoilman välijäähdyttimellä varustetun turboahdetun moottorin periaatekuva on nähtävissä kuvassa 7.



Kuva 7. Välijäähdyttimellä varustetun turboahdetun moottorin periaatekuva (Turunen & Niemi 2002: 590).

2.1.5 Moottorityypeissä syntyvät päästöt

Polttomoottorissa syntyviä ja pakokaasulainsäädännöllä säänneltyjä päästökomponeentteja ovat hiilimonoksidi, palamattomat hiilivedyt, typpioksidi, rikkioksidi ja kiintoainehiukkaset (Turunen & Niemi 2002: 614). Palamisessa muodostuu lisäksi hiilidioksidia ja vettä. Kuvassa 8 on nähtävissä kipinäsytytteisten ja puristusytytteisten moottorien päästökomponeentit ja niiden jakauma. Kipinäsytytteisten moottorien pakokaasujen kokonaismäärästä noin 1,1% on haitallisia päästökomponeentteja. Puristusytytteisissä moottoreissa haitallisten päästökomponeenttien osuus on pienempi, noin 0,2% pakokaasujen kokonaismäärästä.



Kuva 8. Kipinäsytytteisten ja puristusytytteisten moottorien päästökomponeenttien ja niiden jakauma (Niemi 2018d: 28).

Metaanin hiilivetyketjut ovat yksinkertaisia ja kevyitä. Tästä johtuen kipinäsytytteisten kaasumoottorien pakokaasuissa ei ole juurikaan nokea tai muita kiinteitä hiukkasia. (Turunen & Niemi 2002: 620; Söderena 2017: 12). Homogeeninen hyvin sekoittunut ilma - polttoaineseos vähentää osaltaan hiukkaspäästöjen syntymistä imukanavasuihkutuksella varustetuissa kipinäsytytteisissä kaasumoottoreissa (Söderena 2017: 14).

Hiilimonoksidia muodostuu tyypillisesti täyden kuorman tilanteissa, jolloin moottori käy hieman rikkaalla seokselle. Palamattomia hiilivetyjä syntyy olosuhteissa, joissa osa sylinteriin syötetystä polttoaineesta jää epätäydellisen palamisen takia palamatta. Tällaisia tilanteita voivat olla mm. moottorin kylmäkäynnistys tai esimerkiksi väärästä seossuhteesta tai heikosti toimivasta polttoaineen sytytyksestä johtuvat häiriötilanteet. (Turunen & Niemi 2002: 618 – 619).

Metaani on hiilivetyinä stabiili ja tarvitsee syttyäkseen korkean, noin 600°C lämpötilan. Metaania sisältäviä maa- ja biokaasua käyttävien kipinäsytytteisten kaasumoottorien pakokaasuissa on metaanipäästöistä (engl. methane slip) johtuen tyypillisesti korkeampi palamattomien hiilivetyjen osuus, kuin vastaavien nestemäisiä polttoaineita käyttävien moottorien pakokaasuissa. (NHO 2018: 13 - 14.)

Dieselmoottorien pääasiallisia päästökomponentteja ovat typpioksidit ja hiukkaset. Dieselmoottorit käyvät ilmaylimäärällä ja hiilimonoksidia sekä hiilivetyypäästöjä syntyy kipinäsytytteisiin moottoreihin verrattuna vähän. Rikkioksideja syntyy lähinnä vain moottoreissa, jotka käyttävät polttoaineenaan rikkipitoista raskasta polttoöljyä. (Niemi 2018d: 2.)

Koska polttoöljyt eivät, raskaita polttoöljyjä lukuun ottamatta, sisällä juurikaan typpeä, johtuu typenoksidien muodostuminen lähinnä palamisilman sisältämän typen hapettumisesta (Turunen & Niemi 2002: 614). Moottorin sylinterin maksimipaineen, ja siten tehon kasvattaminen, nostaa palamislämpötilaa ja lisää typenoksidien muodostumista.

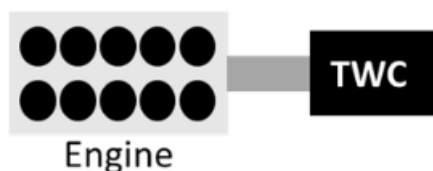
Dieselmoottoreissa hiukkasia syntyy noin kymmenkertaisesti kipinäsytytteisiin moottoreihin verrattuna ja dieselmoottoreille tyypillinen savu koostuu lähes kokonaan hiukkasista. Syyt hiukkasten muodostumiseen dieselmoottoreissa ovat monimutkaisia, eikä niitä tarkkaan tunneta, mutta kyse on kuitenkin polttoaineen epätäydellisestä palamisesta. Hiukkasten muodostumista voidaan vähentää palamista parantamalla, esimerkiksi tehottamalla seoksenmuodostusta ja moottorin riittävän ilmakertoimen avulla. (Turunen & Niemi 2002: 620.)

Kaksoispolttoainemoottoreissa syntyvät pakokaasupäästöt vastaavat suurelta osin dieselmoottorien päästöjä. Typenoksidi- ja hiukkaspäästöt ovat kuitenkin jonkin verran dieselmoottoreita pienemmät (Mansor 2014: 14 - 15). Dieselmootoreista poiketen, kaksoispolttoainemoottoreissa syntyy metaanipäästöjä kipinäsytytteisten kaasumoottorien tapaan (Niemi & Turunen 2002: 622; Söderena 2017: 15 - 16).

2.1.6 Pakokaasujen puhdistustekniikat

Polttomoottorien pakokaasupäästöjä voidaan vähentää moottorien sisäisin keinoin, kuten palamistapahtuman optimoinnilla. Ulkoisina keinoina käytetään pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistoja (Niemi 2018d: 34). Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi eri moottorityypeissä käytettävät pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot, mutta ei tarkastella moottorin sisäisiä keinoja.

Kipinäsytytteisille stökiömetrisille kaasumoottoreille pakokaasujen jälkikäsittelyssä riittää useimmiten pelkkä kolmitoimikatalysaattori. Kolmitoimikatalysaattori hapettaa hiilimonoksidin ja palamattomat hiilivedyt ja pelkistää typenoksidit. Stökiömetristen kaasumoottorien seossuhde λ on aina lähellä arvoa 1, eikä pakokaasut sisällä merkittävästi jäännöshapetta. Tällöin kolmitoimikatalysaattorin hapetusreaktio ottaa tarvitsemansa hapen typenoksideilta pelkistäen ne samalla typeksi. (Niemi 2018d: 48; Söderena 2017: 14.) Kuvassa 9 on esitetty periaatekuva kipinäsytytteisen stökiömetrisen kaasumoottorin pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistosta.



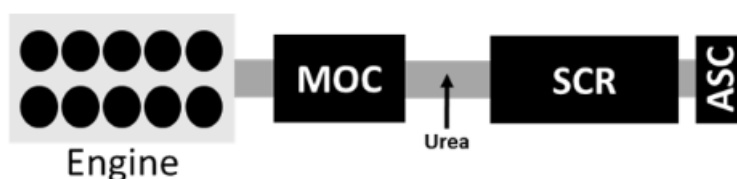
Kuva 9. Periaatekuva kipinäsytytteisen stökiömetrisen kaasumoottorin pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistosta (HDGAS: 2018).

Kipinäsytytteisten laihaseoskaasumoottorien kohdalla typenoksidien pelkistäminen ei onnistu yksinkertaisen kolmitoimikatalysaattorin avulla, koska katalysaattori ei pysty pelkistämään jäännöshapetta sisältävän pakokaasun typenoksideja.

Laihaseoskaasumootoreissa voidaan käyttää metaanikatalysaattorin ja esimerkiksi typenoksidit pelkistävän SCR- katalysaattorin yhdistelmää (Niemi 2018a: 14).

SCR- katalysaattorit käyttävät urealiuosta typenoksidien pelkistämiseen. Urea suihkuteaan kuumaan pakokaasuun ennen SCR- katalysaattoria ja urea hajoaa pakoputkistossa ammoniakiksi ja hiilidioksidiksi. Ammoniakki ja typenoksidit reagoivat SCR- katalysaattorissa, ja lopputuotteena on typpeä ja vettä. SCR- katalysaattorissa tapahtuvan reaktion tasosta riippuen ammoniakkia saattaa päästä katalysaattorista pakokaasuun. (Tuomaala & Anttila 2018: 3.)

Ammoniakin poisto pakokaasusta voidaan tehdä SCR- katalysaattorin jälkeen sijoitettavan ammoniakkihapetuskatalysaattorin avulla (Majewski 2005). Metaanikatalysaattorin, SRC- katalysaattorin sekä ammoniakikatalysaattorin sisältävän pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston periaatekuva näkyy kuvassa 10.

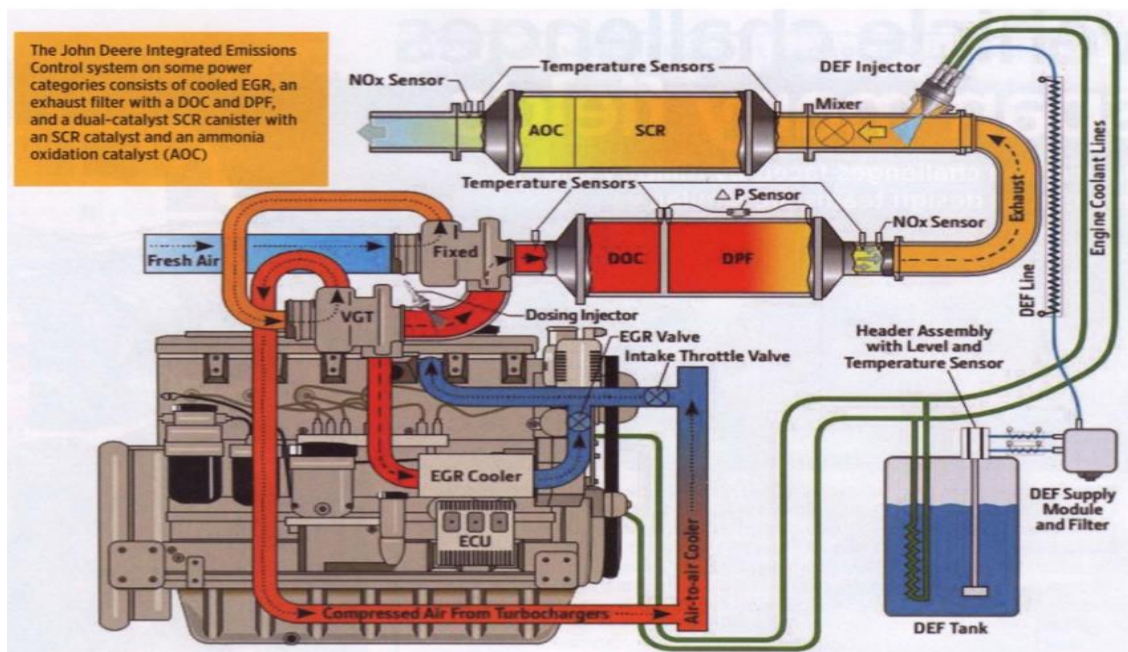


Kuva 10. Kipinäsytytteisen laihaseoskaasumootorin pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston periaatekuva (HDGAS: 2018).

Kipinäsytytteisissä kaasumootoreissa ei juurikaan synny hiukkasia, joten hiukkassuodattimen käytölle ei useinkaan ole tarvetta. Käytössä olevat kolmitoimikatalysaattorit ovat muunnoksia nestemäisiä polttoaineita käyttävien moottorien katalysaattoreista ja niissä käytetään esimerkiksi palladiumia (Pd), platinaa (Pt) ja rhodiumia (Rh) katalysaattorin tehon lisäämiseksi. (Ferri, Elsener & Krösher 2017: 1; Majewski & Jääskeläinen 2018.)

Dieselmootorien pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot ovat teknisesti monimutkaisempia, kuin kipinäsytytteisissä moottoreissa käytetyt. Koska dieselmootorit käyvät aina ilmaylimäärällä, tarvitaan typenoksidien poistoon SCR- katalysaattori. Laitteisto koostuu tyypillisesti hiilivedyt ja hiilimonoksidin hapettavasta dieselhapetuskatalysaattorista,

hiukkaset poistavasta partikkelisuodattimesta ja typenoksidit pelkistävästä SCR- katalyysaattorista. SCR- katalyysaattorin aiheuttaman ammoniakkipäästön poistoon käytetään, kipinäsytytteisten laihaseosmoottorien tapaan, ammoniakkihapetuskatalyysaattoria. Periaatekuva SCR- katalyysaattoriin liitetyn ammoniakkihapetuskatalyysaattorin sisältävästä pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmästä on esitetty kuvassa 11.

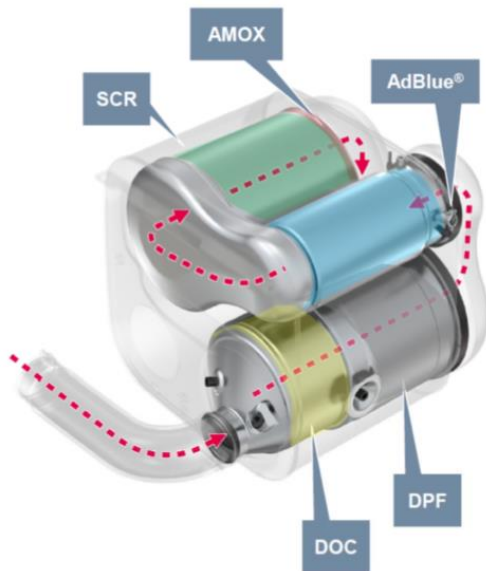


Kuva 11. Periaatekuva SCR- katalyysaattoriin liitetyn ammoniakkihapetuskatalyysaattorin sisältävästä pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmästä (Niemi 2018d: 220).

Dieselmootoreilla varustetuissa työkoneissa pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston suuri koko saattaa aiheuttaa sijoituksen suhteen hankaluuksia, kuten VTT: selvityksessä käy ilmi (Söderena 2017: 31). Järjestelmän koko kasvaa edelleen ammoniakikatalyysaattorin ansiosta. Kuvassa 12 on nähtävissä Euro VI päästötason alittava raskaan kaluston ajoneuvokäyttöön suunniteltu ammoniakikatalyysaattorin sisältävä pakokaasujen jälkikäsittelylaitteisto.

Kaksoispolttoainemoottorien pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot vastaavat pitkälti dieselmootorien järjestelmiä. Dieselhapetuskatalyysaattori poistaa pakokaasusta dieselpolttoaineesta peräisin olevat hiilivetyketjut, mutta ei pysty hapettamaan heikommin reagoivaa metaania. Dieselhapetuskatalyysaattorin lisäksi käytetäänkin

metaanihapetuskatalysaattoria metaanin hapettamiseen. (HDGAS 2018.) Metaanihapetuskatalysaattorilla varustetun kaksoispolttoainemoottorin pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston periaate on esitetty kuvassa 13.



Kuva 12. Ammoniakkihapetuskatalysaattorin sisältävä Euro VI päästötason alittava pakokaasujen jälkikäsittelylaitteisto raskaan kaluston ajoneuvokäyttöön jälkikäsittelyjärjestelmästä (Niemi 2018d: 224).



Kuva 13. Metaanihapetuskatalysaattorilla varustetun kaksoispolttoainemoottorin pakokaasujen jälkikäsittelylaitteisto (HDGAS 2018).

2.2 Pakokaasupäästöjen mittausten menetelmät

Tässä kappaleessa perehdytään työkoneiden pakokaasupäästöjen mittausten menetelmiin. Työkoneiden moottoreille laboratoriossa tehtävät pakokaasujen päästömittaukset ovat NRSC- ja NRTC- testisykliin mukaiset mittaukset. PEMS- mittausten menetelmää käytetään työkoneiden käytönaikaiseen pakokaasupäästöjen mittaukseen.

2.2.1 NRSC- testisykli

Vaihe I, II ja III A päästöstandardien mukaisille NRE- luokan vaihtuvanopeusmoottoreille pakokaasujen päästömittaus tapahtuu pelkästään NRSC- testisykliä käyttäen (EUR-Lex 2004: L141/14; DieselNet 2016b). NRSC- testisykliä käytetään myös Vaihe IV ja V päästöstandardien mukaisten moottorien päästömittaukseen (Söderena 2017: 9; EUR-Lex 2016a: L252/76).

Vakiotilaisessa NRSC- testisyklissä moottorit testataan dynamometrissä työkonesta irrotettuina. Mitattavia päästökomponentteja ovat hiilimonoksidit, hiilivedyt, typenoksidit ja hiukkaset. Kuvassa 14 on esitetty NRE moottoriluokan NRSC- testisyklit. Testisykli sisältää peräkkäisiä vakiotilaisia kuormitustilanteita moodeja, joissa moottorin vääntömomentti ja kierrosnopeus vaihtelevat (DieselNet 2001). Kuvassa 15 on nähtävissä teholuokassa 19 kW–560 kW käytetyn C1 testisyklin moodit ja niiden painotukset testissä.

Luokka	Käyntinopeus	Tarkoitus	Alaluokka	NRSC
NRE	Vaihtuva	Vaihtuvanopeuksinen moottori, jonka vertailuteho on vähemmän kuin 19 kW	NRE-v-1 NRE-v-2	G2 tai C1
		Vaihtuvanopeuksinen moottori, jonka vertailuteho on vähintään 19 kW mutta enintään 560 kW	NRE-v-3 NRE-v-4 NRE-v-5 NRE-v-6	C1
		Vaihtuvanopeuksinen moottori, jonka vertailuteho on enemmän kuin 560 kW	NRE-v-7	C1

Kuva 14. NRE moottoriluokan vaihtuvanopeusmoottorien NRSC- testisyklit (EUR-Lex 2016a: L252/111).

Mode number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Torque, %	100	75	50	25	10	100	75	50	25	10	0
Speed	Rated speed					Intermediate speed					Low idle
Off-road vehicles											
Type C1	0.15	0.15	0.15	-	0.10	0.10	0.10	0.10	-	-	0.15

Kuva 15. Teholuokassa 19 kW–560 kW käytetyn C1 testisyklin moodit ja niiden painotukset testissä. (DieselNet 2001).

2.2.2 NRTC- testisykli

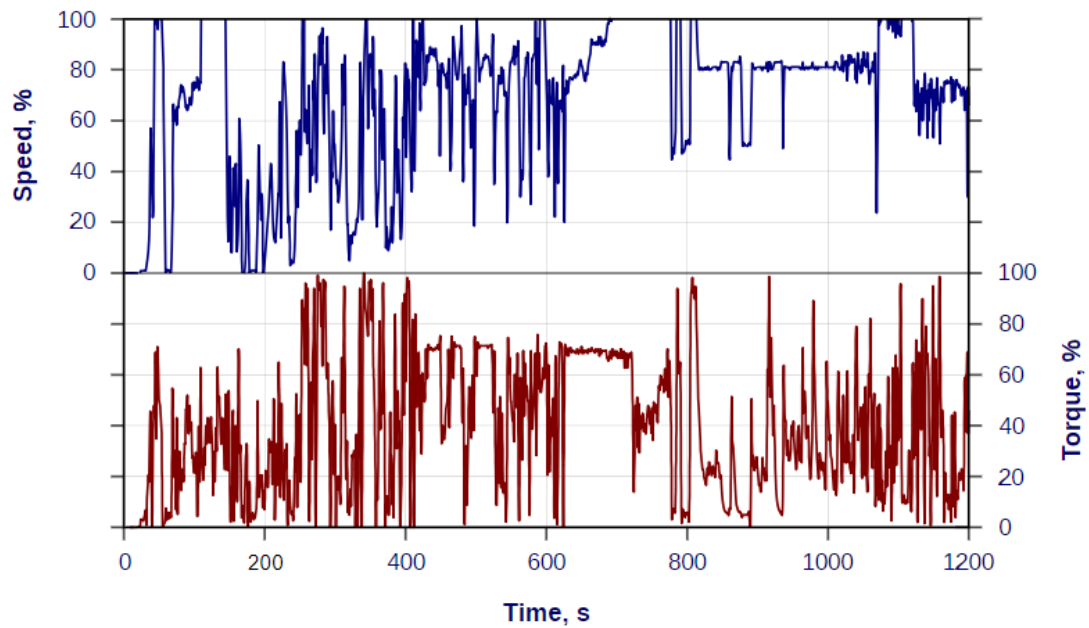
Vaihe III B, IV ja V päästöstandardien mukaisille NRE- luokan vaihtuvanopeusmoottoreille tulee tehdä NRSC- testisyklin mukaisen päästömittauksen lisäksi myös NRTC- testisyklin mukainen päästömittaus. Kuten vakiotilaisessa NRSC- testisyklissä, myös muutuvatilaisessa NRTC- testisyklissä moottorit testataan dynamometrissä työkoneesta irrotettuna. Mitattavia päästökomponentteja ovat hiilimonoksidit, hiilivedyt, typenoksidit ja hiukkaset.

Testisykli muodostuu vaihtuvanopeuksista testiajosta, joka suoritetaan kaksi kertaa. Ensimmäinen testiajo tehdään kylmälle moottorille ja toinen testiajo kuumalle moottorille. Kylmän moottorin pakokaasupäästöjen mittaustuloksen painoarvo laskennassa on 10 % ja kuuman moottorin 90 %. NRST- testisyksi jäljittelee työkoneen todellista ajotilannetta NRSC- testisykliä paremmin. (DieselNet 2016b; EUR-Lex 2004: L141/15.) Kuvassa 16 on esitetty NRTC- testisyklissä käytetyt moottorin normalisoidut nopeus ja vääntökäyrät.

2.2.3 PEMS- mittausmenetelmä

Vaihe V päästöstandardin mukaisille työkoneille tehdään laboratoriomittausten lisäksi pakokaasujen käytönaikainen päästömittaus PEMS- mittausmenetelmällä (EUR-Lex 2016b: L102/344). PEMS- mittausmenetelmässä työkoneen päästöt mitataan koneen käytön aikana, työkoneeseen asennettavan siirrettävän mittauslaitteiston avulla. Mitattavia päästökomponentteja ovat hiilimonoksidit, hiilivedyt, typenoksidit, hiukkaset ja lisäksi mitataan myös työkoneen tuottaman hiilidioksidin määrä (EUR-Lex 2016b: L102/342).

PEMS- mittausmenetelmän käyttöä työkoneissa on testattu pilottiohjelman avulla. Pilotiohjelman tarkoituksena oli kerätä mittausmenetelmän käyttöön liittyviä ja muokata tie liikenteen raskaan kaluston PEMS- mittausmenetelmää paremmin työkoneille soveltu vaksi (Bonnal, Perujo, Provenza & Villefuerte 2013: 8). Pilotista saatujen kokemusten mukaan PEMS- mittauslaitteiston asentaminen ja käyttö työkoneessa tuotti odotettua enemmän hankaluuksia, kuten myös toimivan testisyklin kehittäminen.



Kuva 16. NRTC- testisyklissä käytetyt moottorin normalisoidut nopeus ja vääntökäyrät (DieselNet 2013).

Ongelmia aiheutti mm. testilaitteiston suojaaminen pölyltä, vedeltä ja iskuilta, kuten myös laitteiston sijoituspaikkovaihtoehtojen pieni määrä. (Bonnell ym. 2013: 17-18.) Suojakoteloon asennettu PEMS- mittalaitteisto on nähtävissä kuvassa 17.

Käytön aikaista päästömittausta ei tehdä kaikille moottorivalmistajan valmistamille moottoreille, vaan yksittäisille testisuunnitelmaan valituille tietyn moottorityypin tai moottoriperheen moottorilla varustetuille työkoneille (EUR-Lex 2016b: L102/336). Testattavien työkoneiden valinta, testien suorittaminen ja tulosten raportointi on moottorivalmistajan vastuulla (Janin ym. 2017: 51).



Kuva 17. Suojakoteloon asennettu PEMS mittalaitteisto (Bonnell ym. 2013: 18).

2.3 Maataloustraktorit

Kaikki pyörillä varustetut traktorit kuuluvat ajoneuvoluokkaan T. Luokkaa ilmaisevan kirjaimen pesässä on kirjain a jos traktorin rakenteellinen suurin nopeus ei ylitä 40 km/h ja kirjain b jos nopeus ylittää 40 km/h. Tavanomaiset maatalouden töissä käytettävät traktorit kuuluvat lähinnä luokkaan T1 tai T2. T1- luokan traktoreissa kuljettajaa lähinnä sijaitsevan akselin raideväli tulee olla vähintään 1150 mm, omamassa ajokunnossa yli 600 kg ja traktorin maavaran maksimissaan 1000 mm. T2- luokassa traktorin raideväli on vähemmän kuin 1150 mm ja omamassa traktorin ollessa ajokuntoisena yli 600 kg. T2- luokassa traktorin rakenteellinen nopeus ei saa ylittää arvoa 30 km/h. (EUR-Lex 2013: L60/10.)

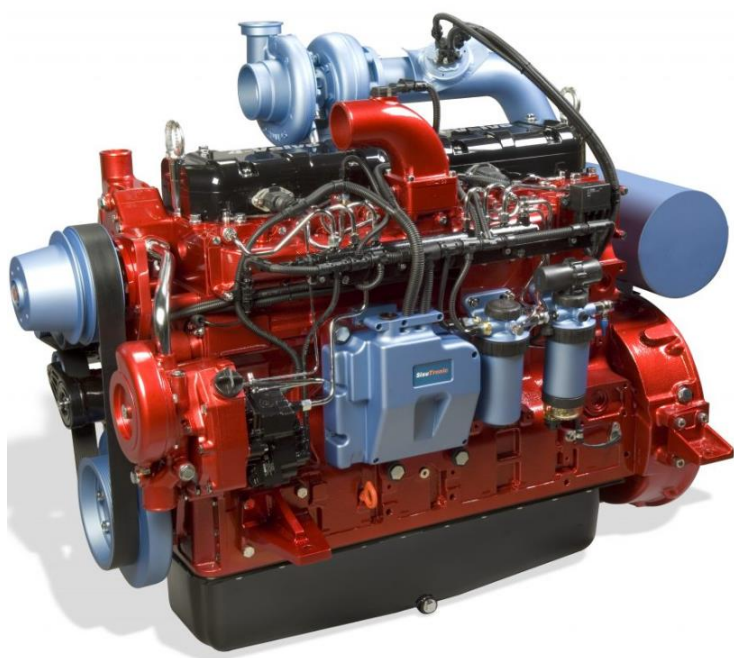
T3- luokan traktoreilla omamassa ei saa ylittää arvo 600 kg. Kyseiseen luokkaan kuuluvat pienet lähinnä puutarhoissa ja kasvimailla käytettävät traktorit. T4- luokkaan kuuluvat

erikoistraktorit, kuten matalan ja korkean maavaran traktorit ja erikoisleveät lähinnä isoilla viljelyksillä käytettävät traktorit. (EUR-Lex 2013: L60/10.)

2.3.1 Maataloustraktorien moottorit

Traktoreissa käytetään tyypillisesti nelitahtisia turboahdettuja, puristussytytteisiä ja dieselpolttoainetta tai kaasuöljyä polttoaineenaan käyttäviä dieselmoottoreita. Mahdollisia muita moottorityyppejä ovat esimerkiksi kipinäsytytteinen kaasumoottori sekä kaksoispolttoainemoottori (Söderena 2017: 5).

Päästölainsäädännössä traktorimoottorit kuuluvat lähinnä työkonemoottorien NRE-luokkaan. Tähän luokkaan kuuluvat moottorit, joiden vertailuteho on alle 560 kW (EUR-Lex 2016a: L252/66). Kuvassa 18 on ACGO Powerin valmistama nykyaikainen dieselkäyttöinen traktorimoottori.



Kuva 18. ACGO Powerin valmistama nykyaikainen traktorin dieselmoottori (Massey Ferguson 2018).

2.4 MEKA- tutkimuksen päästöihin liittyvät tulokset

MEKA- tutkimuksessa mitattiin kahden Valtra N101H ja yhden N123H traktorin pakokaasupäästöt. Pakokaasupäästömittausten tarkoituksena oli selvittää, miten kaksoispolttoainekäyttö ja eri ajotilanteet vaikuttavat päästöihin. Tutkimuksessa selvitettiin myös, miten käytönaikaisten pakokaasupäästömittausten tulokset poikkeavat laboratoriomittauksista. Mittaukset tehtiin laboratoriossa, sekä käytön aikana ja niissä mitattiin hiilimonoksidi-, hiilivety-, typenoksidi- ja hiukkaspäästöt. Lisäksi mitattiin hiilidioksidin ja metaanin määrät pakokaasussa. N123H mallissa oli täydellisen pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston sijaan ainoastaan metaanikatalysaattori. (Jordbruks verket 2015: 19.)

Tutkimuksessa pakokaasupäästöjen laboratoriomittaukset tehtiin NRTC- testisykliä käyttävän simuloidun testipenkkimittauksen avulla ja käytönaikaiset mittaukset PEMS- mittausten menetelmällä. Käytönaikaisessa mittauksessa traktorin tuottaman energian mittaaminen on ongelmallista ja tutkimuksessa käytettiin pakokaasupäästöjen ilmoittamista tuotettua hiilioksidimäärää kohti. CO₂ ikkunaksi kutsutussa mittausten menetelmässä mittausten sarja jaetaan saman hiilioksidimäärän sisältäviin osiin. Koska hiilidioksidin tuottonopeus vaihtelee kuormituksen mukaan, ollen pienin tyhjäkäynnillä ja suurin täydellä kuormalla, ovat ikkunat ajallisesti eri mittaisia. Mittauksen avulla voidaan tuotettujen pakokaasupäästöjen määrä mitata ennalta määrättyyn työkonen tuottamaan hiilidioksidimäärään nähden. Mittausmenetelmän avulla erilaisten kuormitusjaksojen ja eri polttoaineiden tuottaman pakokaasupäästön keskinäinen vertailu on mahdollista. (Jordbruks verket 2015: 25.)

Tutkimuksessa julkaistiin N123H mallista vain metaanipäästöt, eikä muiden päästökomponenttien osalta ole tietoa siitä, miten diesel- ja kaksoispolttoainekäytön pakokaasupäästöt eroavat toisistaan. Kuvassa 19 on esitetty laboratoriomittausten tulokset kaikkien kolmen traktorin metaanipäästön osalta. Uddetorpin N101H traktorin korkeampi metaanipäästö toiseen saman mallisarjan traktoriin verrattuna oli tutkimuksen mukaan yllätys. Korkeamman metaanipäästön arveltiin johtuvan traktorien erilaisesta moottorin ohjainten ohjelmoinnista. Tai Uddetorpin traktorin raskaammasta käytöstä johtuneesta metaanikatalysaattorin kulumisesta. (Jordbruks verket 2015: 31.) N123H mallin kahden mittauksen

erot johtuivat tutkimuksen mukaan traktorille mittausten välissä tehdyistä säätötoimenpiteistä. N123H mallin metaanipäästöt olivat vanhempaa N101H mallia pienemmät laboratoriomittausten lisäksi myös käytönaikaisissa PEMS- mittauksissa. (Jordbruks verket 2015: 28.)

CH ₄	Test bench (g/kWh)
N101H Uddetorp	19.74
N101H Söderåsen	7.34
N123H measurement in May	0.92
N123H measurement in August	0.69

Kuva 19. Traktorien metaanipäästöt testipenkkimittauksessa (Jordbruks verket 2015: 28).

Yhteenvetona päästömittauksista tutkimus toteaa N101H mallin metaanipäästöjen olevan huomattavat, verrattuna uudempaa teknologiaa käyttävän N123H mallin metaanipäästöihin. Kaksoispolttoainekäytön aikaiset typenoksidipäästöt olivat kaikissa kuormitustilanteissa dieselkäyttöä pienemmät. Hiukkaspäästöt vaihtelivat ja erot kaksoispolttoainekäytön ja dieselkäytön välillä olivat osittain merkittäviä, kuitenkin ilman selkeää johdonmukaisuutta. Metaanipäästöllä vähennetyt hiilivetypäästöt olivat lähellä nollaa dieselkäytössä, mutta merkittävästi korkeammat kaksoispolttoainekäytössä. Hiilimonoksidi-päästöt olivat kaikissa tilanteissa vähäiset. (Jordbruks verket 2015: 19.)

Tutkimuksen mukaan testissä olleiden traktorien kaksoispolttoainekäytön hyötysuhde oli kaiken kaikkiaan dieselkäyttöä huonompi. Pienin ero hyötysuhteessa mitattiin raskaassa vaihtelevassa ajossa ja suurin kevyessä tasaisessa ajossa. Kaksoispolttoainekäytön hyötysuhde oli molempien testattujen mallien osalta dieselkäyttöä huonompi. Pienin ero hyötysuhteessa mitattiin raskaassa vaihtelevassa ajossa ja suurin kevyessä tasaisessa ajossa. (Jordbruks verket 2015: 35.)

Simuloidussa testipenkkimittauksessa tuotettu energia mitataan traktorin voiman ulosotosta, eikä mittaustuloksessa huomioida työkoneneen energiaa kuluttavia apulaitteita. Mitatut päästöt ovat suuremmat tuotettua energiayksikköä kohti verrattaessa pelkän moottorin laboratoriotestaukseen, eikä tuloksia voi siksi suoraan verrata keskenään (Jordbruks

verket 2015: 21). PEMS mittausmenetelmän yhteensovittaminen toimimaan erilaisten työkoneiden kanssa vaatii tutkimuksen mukaan jatkokehittelyä, kuten myös mittauksen toistettavuus. Tutkimus ehdottaa erityisen työkoneetta kuormittavan peräkärryn käyttöön-ottoa. Tämä vähentäisi kuljettajan vaikutusta mittaustuloksiin ja parantaisi tulosten vertailtavuutta. (Jordbruks verket 2015: 11.)

2.5 Työkoneissa käytetyt polttoainetyypit

Kipinäsytytteisten moottorien polttoaineille tärkeitä ominaisuuksia ovat mm. riittävä haihtuvuus ja puristuskestävyys. Puristusytytteisten moottorien polttoaineen tulee olla kipinäsytytteisten moottorien polttoaineesta poiketen hyvin syttyvää. (Turunen & Niemi 2002: 585, 596, 603.) Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi dieselpolttoaineen ja kaasuöljyn sekä metaania sisältävien maa- ja biokaasujen ominaisuudet.

2.5.1 Dieselpolttoaine ja kaasuöljy

Euroopan unionin alueella polttomoottoreissa käytettyjen dieselpolttoaineiden ominaisuuksia säädellään direktiivin 2009/30/EY avulla (DieselNet 2015b; EUR-Lex 2009: L140/88). Direktiivissä dieselmootoreissa käytetty polttoaine on nimetty tieliikenteeseen tarkoitettujen ajoneuvojen osalta dieselpolttoaineeksi ja työkoneiden osalta kaasuöljyksi (EUR-Lex 2009; L140/94).

Dieselpolttoaine ja kaasuöljy ovat keskenään hyvin samankaltaisia ja niiden tärkeimpiä ominaisuuksia ovat käytettävyyys, sekä kylmäkäyttö- ja ympäristöominaisuudet. Setaaniluku, tiheys ja lämpöarvo kuvaavat polttoaineen käytettävyyttä, ja viskositeetti, suodatettavuus, samapiste ja jähmepiste kylmäkäyttöominaisuuksia. Dieselpolttoaineen ja kaasuöljyn sisältämät haitalliset aineet, kuten rikki ja aromaattit vaikuttavat polttoaineen ympäristöominaisuuksiin. (Turunen & Niemi 2002: 603.)

Direktiivissä määritelty dieselpolttoaineen setaaniluvun vähimmäisarvo on 51 ja rikki- pitoisuuden enimmäisarvo 10 mg/kg. Kaasuöljyn rikkipitoisuuden enimmäisarvo oli

aiemmin dieselpolttoainetta korkeampi, mutta vuoden 2011 alusta 10 mg/kg rikkipitoisuuden enimmäisarvo laajennettiin koskemaan myös kaasuöljyä (EUR-Lex 2009: L140/94). Kevyemmin verotettu kaasuöljy merkitään väriaineella, käytön valvomisen helpottamiseksi. Dieselpolttoaineen ja kaasuöljyn lämpöarvo on luokkaa 45 MJ/kg (World Nuclear Association 2016). Dieselpolttoaineen ympäristöperustaiset laatuvaatimukset on esitetty kuvassa 20.

2.5.2 Metaani

Metaani on yksinkertaisin hiilivety, joka koostuu yhdestä hiiliatomista ja siihen liittyneistä neljästä vetyatomista. Metaanin puristuskestävyys on korkea, mutta syttyvyys heikko. Korkea puristuskestävyys vähentää nakutusvaaraa kipinäsytytteisissä kaasumootoreissa. Huonon syttyvyyden takia metaani ei yksistään sovellu puristusydytteisten moottorien polttoaineeksi. Metaanin yksinkertaisen molekyyliarakenteen ansiosta hiukkasia syntyy huomattavasti vähemmän dieselpolttoaineeseen ja kaasuöljyyn verrattuna. (Söderena 2017: 12.) Puhtaan metaanin lämpöarvo on luokkaa 50-55 MJ/kg (World Nuclear Association 2016).

Parametrit ⁽¹⁾	Yksikkö	Raja-arvot ⁽²⁾	
		Vähimmäisarvo	Enimmäisarvo
Setaaniluku		51,0	—
Tiheys 15 °C:ssa	Kg/m ⁽³⁾	—	845,0
Tislaus:			
— 95 til.-%:n saanto tasolla:	°C	—	360,0
Polysykliset aromaattiset hiilivedyt	massa-%	—	8,0
Rikkipitoisuus	mg/kg	—	10,0
FAME-yhdisteiden pitoisuus – EN 14078	til.-%	—	7,0 ⁽³⁾

⁽¹⁾ On käytettävä standardissa EN 590:2004 määritettyjä testimenetelmiä. Jäsenvaltiot voivat ottaa käyttöön erikseen määriteltäviä muita analyysimenetelmiä standardin EN 590:2004 sijasta, jos niiden voidaan osoittaa olevan vähintään yhtä tarkkoja ja luotettavia kuin korvatut analyysimenetelmät.

⁽²⁾ Laatuvaatimuksissa ilmoitetut arvot ovat "todellisia arvoja". Raja-arvoja määritettäessä on sovellettu standardia EN ISO 4259:2006 ("Öljytuotteet. Mittaustulosten tarkkuuden määrittäminen ja soveltaminen testimenetelmiin"), ja vähimmäisarvoa määrittäessä on otettu huomioon 2 R:n minimiero nollan yläpuolella (R = uusittavuus). Yksittäisten mittausten tuloksia on tulkittava standardissa EN ISO 4259:2006 esitettyjen kriteerien perusteella.

⁽³⁾ FAME-yhdisteiden on oltava standardin EN 14214 mukaisia.

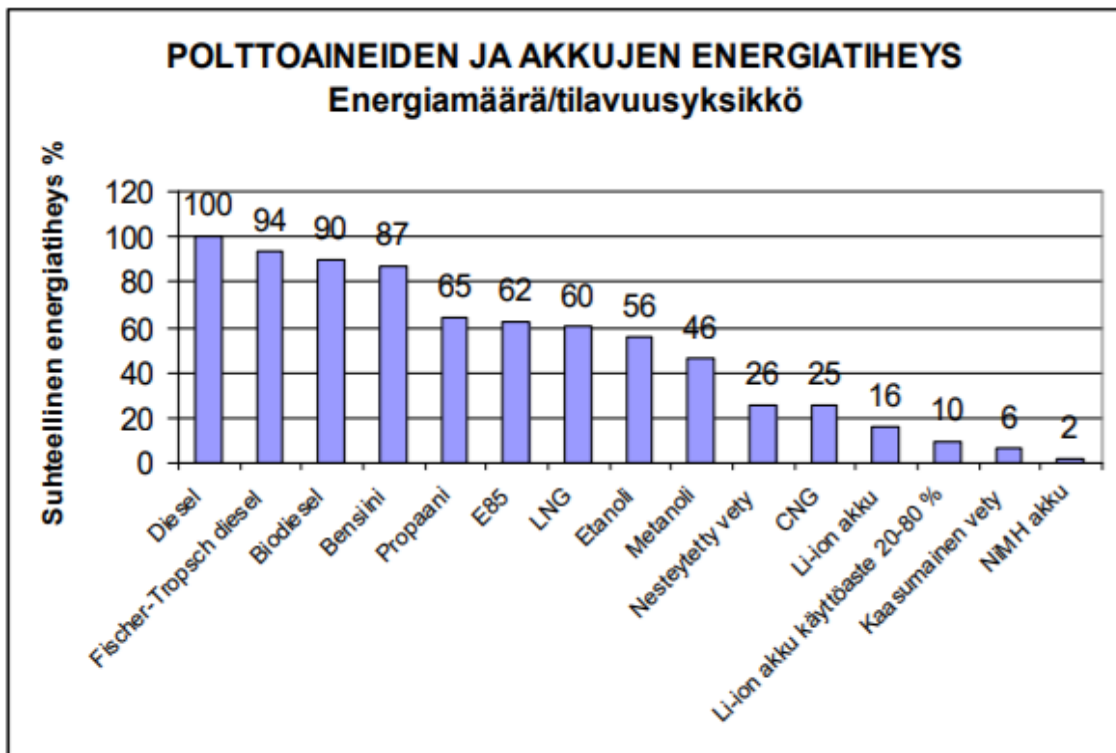
Kuva 20. Dieselpolttoaineen ympäristöperustaiset laatuvaatimukset (EUR-Lex 2009: L140/105).

2.5.3 Maa- ja biokaasu

Maakaasu sisältää 80 - 90 % metaania, loppuosan ollessa mm. etaania, butaania, hiilidioksidia ja typpeä. Maa- ja biokaasun puristuskestävyyttä voidaan arvioida metaaniluvun avulla. Puhtaan metaanin metaaniluku on 100 ja heikosti puristusta kestävä veden 0. Nämä vertailukaasut muodostavat metaanilukuasteikon peruspisteet. Maakaasulle metaaniluku on välillä 60 - 100 ja maakaasu kestääkin hyvin puristusta. (Turunen & Niemi 2002: 612). Maakaasun tehollinen lämpöarvo on luokkaa 34 - 39 MJ/m³ tuotantoalueesta riippuen ja nesteytetyn maakaasun lämpöarvo 55 MJ/kg (World Nuclear Association 2016).

Käsittelemättömän biokaasun metaanipitoisuus on maakaasua alhaisempi, ja käsittelymättömän biokaasu sisältää runsaasti kaasun energiasisältöä laskevia inerttejä kaasuja, kuten typpeä ja hiilidioksidia. Käsittelymättömän biokaasu sisältää myös epäpuhtauksia, kuten siloksaatteja, ammoniakkia ja rikkiä ja sen lämpöarvo on maakaasua alhaisempi. Käsittelymättömän biokaasu täytyy puhdistaa ja rikastaa poistamalla hiilioksidi ja epäpuhtaudet kaasusta, ennen kuin sitä voidaan paineistaa ja käyttää polttoainekaasuna. (Söderena 2017: 12.) Rikastettu biokaasu muistuttaa ominaisuuksiltaan maakaasua ja lämpöarvo on maakaasun kanssa samaa tasoa tai vähän pienempi (Turunen & Niemi 2002: 612).

Paineistetun maakaasun energiatiheys on vain noin 25 % dieselpolttoaineen ja kaasuöljyn energiatheydestä. Nesteytetyn maakaasun energiatiheys on korkeampi, ollen noin 60 % dieselpolttoaineen ja kaasuöljyn energiatheydestä (Nylund, Sipilä Mäkinen & Aakko-Saksa 2010: 22). Kuvassa 21 on esitetty puristetun ja nesteytetyn maakaasun suhteellinen energiatiheys dieselpolttoaineisiin verrattuna.



Kuva 21. Puristetun ja nesteytetyn maakaasun suhteellinen energiatiheys dieselpolttoaineisiin nähden (Nylund ym. 2010: 22).

3 TYÖKONEIDEN PÄÄSTÖLAINSÄÄDÄNTÖ VAIHE I - IV

Työkonemoottoreita koskeva eurooppalainen päästölainsäädäntö julkaistiin ensimmäisen kerran 16 päivänä joulukuuta 1997 Euroopan parlamentin ja neuvoston antamalla direktiivillä 97/68/EY (EUR-Lex 1997: L59/1).

Direktiivin mukaan komission toteuttamat tutkimukset ovat osoittaneet liikkuvien työkoneneiden tuottavan merkittävän osan ihmiselle haitallisten pakokaasupäästöjen kokonaispäästöistä. Direktiiviä antaessaan Euroopan parlamentti ja neuvosto katsoivat, että ihmisten tehokas suojaaminen ilman pilaantumiselta ja tästä johtuvilta terveysriskeiltä on tärkeää. Siksi mm. typenoksidi, hiilivety, hiilimonoksidi- ja hiukkaspäästöjä on voitava rajoittaa myös työkoneneiden osalta. (EUR-Lex 1997: L59/1.)

Työkonemoottorien pakokaasupäästöjä säätelevä lainsäädäntö koostuu Vaiheiksi (engl. Stage) kutsutuista päästöstandardeista. Vaihe I – IV päästöstandardien säätelemiä pakokaasupäästöjä ovat hiilimonoksidi, hiilivedyt, typenoksidit ja hiukkasmassa. Vaihe päästöstandardeissa työkonemoottorien pakokaasupäästöjen raja-arvot ilmoitetaan grammoina kilowattituntia kohti. (EUR-Lex 1997: L59/53.)

Tässä kappaleessa tutustutaan lyhyesti Vaihe I, II ja III päästöstandardeihin ja perehdytään tarkemmin Vaihe IV päästöstandardiin. Kappale 3.1 käsittelee Vaihe I–II päästöstandardeja. Kappale 3.2 Vaihe III A ja III B päästöstandardeja. Kappaleessa 3.3 perehdytään Vaihe IV päästöstandardiin. Kappaleessa 3.4 tutustutaan kaasukäyttöisten Vaihe IV päästöstandardin mukaisten työkoneneiden valmistuksen tilaan Suomessa. Lopuksi kappaleessa 3.5 on lueteltu direktiiviä 97/68/EY, Vaihe III A, III B ja IV päästöstandardin julkaisseen direktiivin 2004/26/EC jälkeen, muokanneet direktiivit.

3.1 Vaihe I–II päästöstandardi

Direktiivi 97/68/EY kattoi alussa vain dieselmoottorikäyttöiset työkoneneet ja Vaihe I ja II päästöstandardit julkaistiin direktiivin julkaisun yhteydessä. Vaihe I otettiin käyttöön

tammikuussa 1999 ja Vaihe II tammikuussa 2001 teholuokan 37 kW–56 kW dieselmoottorien osalta. Direktiivi 2002/88/EC laajensi direktiivin 97/68/EY Vaiheet I ja II koskemaan kipinäsytytteisiä bensiinimoottoreita 18 kW teholuokasta ylöspäin. Direktiivi 2002/88/EC tuli voimaan elokuussa 2004. (Euroopan Unioni 2018.) Kuvassa 22 on esitetty Vaihe I ja II päästöstandardien mukaiset raja-arvot pakokaasupäästöille.

Cat.	Net Power	Date*	CO	HC	NOx	PM
	<i>kW</i>		<i>g/kWh</i>			
Stage I						
A	130 ≤ P ≤ 560	1999.01	5.0	1.3	9.2	0.54
B	75 ≤ P < 130	1999.01	5.0	1.3	9.2	0.70
C	37 ≤ P < 75	1999.04	6.5	1.3	9.2	0.85
Stage II						
E	130 ≤ P ≤ 560	2002.01	3.5	1.0	6.0	0.2
F	75 ≤ P < 130	2003.01	5.0	1.0	6.0	0.3
G	37 ≤ P < 75	2004.01	5.0	1.3	7.0	0.4
D	18 ≤ P < 37	2001.01	5.5	1.5	8.0	0.8
* Stage II also applies to constant speed engines effective 2007.01						

* Stage II also applies to constant speed engines effective 2007.01

Kuva 22. Vaihe I ja II päästöstandardien mukaiset raja-arvot pakokaasupäästöille (DieselNet 2016b).

3.2 Vaihe III A ja III B päästöstandardi

Direktiivi 2004/26/EC laajensi direktiivin 97/68/EY vaikutusta ja sen myötä esiteltiin kolme uutta päästöstandardia Vaihe III A, Vaihe III B ja Vaihe IV. Vaihe III A kattaa dieselmoottorit teholuokassa 19 kW–560 kW ja tuli voimaan tammikuussa 2006. Vaihe III A sisältää myös vakiokierrosmoottorit, junaveturien moottorit ja sisävesillä käytettävät laivamoottorit. Vaihe III B koskee dieselmoottorien teholuokkaa 37 kW–560 kW ja tuli voimaan tammikuussa 2011, sisältäen mm. junaveturien moottorit. (Euroopan Unioni 2018.) Vaihe III A ja III B päästöstandardien mukaiset raja-arvot pakokaasupäästöille on esitetty kuvassa 23.

Cat.	Net Power	Date †	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
	<i>kW</i>		<i>g/kWh</i>				
Stage III A							
H	130 ≤ P ≤ 560	2006.01	3.5	-	4.0	-	0.2
I	75 ≤ P < 130	2007.01	5.0	-	4.0	-	0.3
J	37 ≤ P < 75	2008.01	5.0	-	4.7	-	0.4
K	19 ≤ P < 37	2007.01	5.5	-	7.5	-	0.6
Stage III B							
L	130 ≤ P ≤ 560	2011.01	3.5	0.19	-	2.0	0.025
M	75 ≤ P < 130	2012.01	5.0	0.19	-	3.3	0.025
N	56 ≤ P < 75	2012.01	5.0	0.19	-	3.3	0.025
P	37 ≤ P < 56	2013.01	5.0	-	4.7	-	0.025
† Dates for constant speed engines are: 2011.01 for categories H, I and K; 2012.01 for category J.							

† Dates for constant speed engines are: 2011.01 for categories H, I and K; 2012.01 for category J.

Kuva 23. Vaihe III A ja III B päästöstandardien mukaiset raja-arvot pakokaasupäästöille (DieselNet 2016b).

3.3 Vaihe IV päästöstandardi ja pakokaasupäästöjen raja-arvot

Vaihe IV päästöstandardi julkaistiin tammikuussa 2004 ja maa- ja metsätaloustraktorien osalta helmikuussa 2005. Vaihe IV päästöstandardissa pienten alla 56 kW moottorien pakokaasupäästöjen raja-arvot perustuvat edelleen Vaihe III A ja III B päästöstandardeihin ja ovat huomattavasti teholuokan 56 kW–560 kW raja-arvoja sallivammat. Vaihe IV päästöstandardin raja-arvot koskevat teholuokan 56 kW–560 kW dieselmootoreita. Vaihe IV päästöstandardin mukaisissa moottoreissa, hiilimonoksidi, hiilivety, typenoksidi ja hiukkaspäästöille asetettujen raja-arvojen lisäksi, ammoniakkipäästö ei saa ylittää raja-arvoa 25 ppm. (DieselNet 2016b.)

Vaihe IV päästöstandardin teholuokan 130 kW–560 kW hiilimonoksidipäästöjen raja-arvo on teholuokan 56 kW–130 kW raja-arvoon verrattuna 30 % tiukempi, muilta osin pakokaasupäästöjen raja-arvot ovat teholuokkien välillä yhtäläiset. (DieselNet 2016b.) Kuvassa 24 on esitetty Vaihe IV päästöstandardin mukaiset raja-arvot pakokaasupäästöille.

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

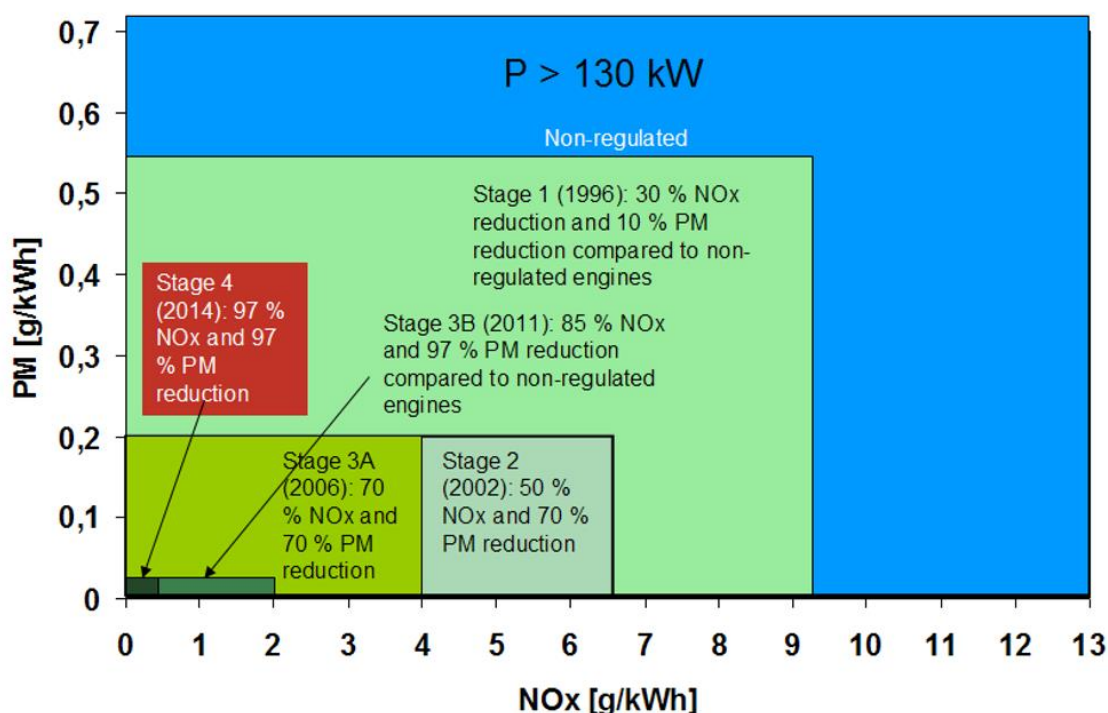
Kuva 24. Vaihe IV päästöstandardin mukaiset raja-arvot pakokaasupäästöille (Diesel-Net 2016b).

Vaihe IV päästöstandardin teholuokassa 130 kW–560 kW pakokaasupäästöjen raja-arvot ovat osittain tiukentuneet Vaihe III A päästöstandardiin verrattuna. Vaihe III A päästöstandardissa hiilivety- ja typenoksidipäästöjen raja-arvot on yhdistetty, kun Vaihe IV päästöstandardi määrittää hiilivety- ja typenoksidipäästöjen raja-arvot erikseen. Vaihe IV päästöstandardin hiilivety- ja typenoksidipäästöjen raja-arvojen yhteenlaskettu arvo on 0,59 g/kWh, ollen Vaihe III A päästöstandardin yhdistettyä hiilivety- ja typenoksidipäästöjen raja-arvoon nähden noin 85 % tiukempi. Hiukkaspäästöjen osalta tiukennus on noin 88 %. Hiilimonoksidin raja-arvot ovat Vaihe III A ja Vaihe IV päästöstandardeissa samalla tasolla. (DieselNet 2016b.)

Vaihe III A päästöstandardissa ei ole teholuokkaa 56 kW–130 kW, eikä suora vertailu päästöstandardien välillä tältä osin ole mahdollista. Vaihe IV päästöstandardin teholuokassa 56 kW–130 kW hiukkaspäästöjen raja-arvo on noin 92 % tiukempi Vaihe III A päästöstandardin teholuokkaan 75 kW–130 kW verrattuna. Muilta osin erot Vaihe IV päästöstandardin 56 kW–130 kW ja Vaihe III A päästöstandardin teholuokan 75 kW–130 kW välillä ovat samat, kuin korkeammassa 130 kW–560 kW teholuokassa. (DieselNet 2016b.)

Teholuokassa 130 kW–560 kW Vaihe III B ja IV päästöstandardien pakokaasupäästöjen raja-arvot ovat samat hiilimonoksidin, hiilivetyjen ja hiukkaspäästöjen osalta. Typenoksidipäästöjen osalta Vaihe IV päästöstandardin raja-arvo on 80 % tiukempi. Teholuokassa 56 kW–130 kW hiilimonoksidi-, hiilivety-, ja hiukkaspäästöjen raja-arvot ovat Vaihe III B ja IV päästöstandardeissa samat. Typenoksidien osalta Vaihe IV päästöstandardin raja-arvo on noin 88 % tiukempi.

Vaihe IV päästöstandardin mukaisten yli 130 kW dieselmoottorien typenoksidi- ja hiukaspäästöt ovat vähentyneet 97 % verrattuna päästöstandardeja edeltäneeseen aikaan, kuten kuvasta 25 voidaan havaita.



Kuva 25. Vaihe IV päästöstandardin mukaisten yli 130 kW dieselmoottorien typenoksidi- ja hiukaspäästöt päästöstandardeja edeltäneeseen aikaan verrattuna (Niemi 2018d: 14).

3.3.1 Pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot

Vaihe IV päästöstandardin mukaisten moottorien pakokaasujen jälkikäsittelyssä voidaan yksinkertaisimmillaan käyttää pelkkää dieselhapetuskatalysaattoria ja tämän lisäksi jäähdytystä pakokaasujen takaisinkierätyä. Jälkikäsittelylaitteistoa voidaan tarvittaessa täydentää partikkelisuodattimella. Tarvittaessa jälkikäsittelylaitteisto voi sisältää dieselhapetuskatalysaattorin, typenoksidin pelkistävät SCR- katalysaattorin, dieselpartikkeli-suodattimen ja näiden lisäksi voidaan käyttää vielä lisäksi jäähdytystä pakokaasujen takaisinkierätyä. (Nylund ym. 2016: 10.)

3.3.2 Työkoneiden tyyppihyväksyntä

Vaihe IV päästöstandardin mukaan tieliikennekäyttöisen työkoneen ensirekisteröinnin ja käyttöönoton jälkeinen muuttaminen kaasui- tai kaksoispolttoainekäyttöiseksi vaatii työkoneen muutokatsastuksen. Muutokatsastuksessa tulee osoittaa työkoneen täyttävän ensimmäisen käyttöönottoajankohdan aikana voimassa olleet päästövaatimukset. (Söderena 2017: 35.)

Vaihe IV päästöstandardi ei tunne kaasua polttoaineenaan käyttäviä moottoreita, joten ainoastaan dieselpolttoaine- ja kaasuöljykäyttöiset työkonemoottorit on tyyppihyväksytävissä Vaihe IV päästöstandardin avulla (Söderena 2017: 10). Söderenan (2017: 35) tekemän kyselyn mukaan tyyppihyväksyntä ei ole mahdollista, koska direktiivissä 97/68/EY ei ole määritelty soveltuvaa kaasumaista referenssipolttoainetta, eikä kaasupolttoaineen moottoreille asettamia erityisvaatimuksia. Direktiivi 97/68/EY ja sen liite XII sisältävät, lähinnä teoreettisen, mahdollisuuden tyyppihyväksyttää kaasu- ja kaksoispolttoainemoottorit asetuksen 595/2009 avulla. Asetuksen 595/2009 mukainen tyyppihyväksyntä tarkoittaa työkonemoottorin tyyppihyväksyntää tieliikenteen raskaan kaluston Euro VI päästöstandardin mukaisesti. (Söderena 2017: 35; EUR-Lex 2012: L353/127.)

Söderenan (2017: 6) mukaan Pohjois-Amerikassa jälkiasennetut kaksoispolttoainelaitteistot on lähes aina asennettu vanhempiin ennen vuotta 2010 valmistettuihin ajoneuvoihin, joiden päästörajat ovat uusien ajoneuvojen päästörajoja sallivammat. Dieselmootto- reista muokatut kaksoispolttoainemoottorit, jonka tyyppisiä Söderenan mainitsevat pohjoisamerikkalaiset ajoneuvot ja myös Valtran kaksoispolttoainetraktorit ovat, käyttävät esisekoittumispalamiseen perustuvaa kaasupolttoaineensyöttöä. Tällä polttoaineensyöttötekniikalla uusien tieliikenteen raskas kalustoa sekä työkoneita koskevien päästömääräysten täyttäminen on vaikeaa.

3.4 Kaasukäyttöisten työkoneiden valmistus Suomessa.

Kaasukäyttöisten työkoneiden kehitykseen ja valmistukseen liittyvä kokemus Suomessa on melko vähäistä. Ongelmaksi koetaan teknisten ongelmien lisäksi myös Vaihe IV päästöstandardista puuttuva kaasumoottorien tyyppihyväksyntämahdollisuus. Tyyppihyväksyntämahdollisuuden puuttuminen on heikentänyt valmistajien taloudellista kykyä panostaa kaasukäyttöisten työkoneiden tuotekehitystoimintaan. Kaasukäyttöisiin työkoneisiin liittyvää tutkimusta ja kehitystyötä Suomessa on tehnyt ainoastaan Valtra Oy, joka on valmistanut rajoitetun erän kaksoispolttoainemoottorilla varustettuja traktoreita. (Söderena 2017: 19.)

Tässä kappaleessa tutustutaan lyhyesti suomalaisten työkonevalmistajien näkemyksiin kaasukäyttöisten työkoneiden valmistuksen mahdollisuuksista Vaihe IV päästöstandardin voimassa oloaikana.

3.4.1 AGCO Power Oy

Yrityksen valikoimassa ei ole kaasukäyttöistä työkoneenmoottoria, eikä kaasukäyttöisten työkoneenmoottorien tuotekehitystoimintaa. Valmistusta ja tuotekehitystoiminnan aloittamista rajoittaa mm. tyyppihyväksyntämahdollisuuden puuttuminen. Yrityksen mukaan päästölainsäädäntöä tulisi kehittää siten, että vähemmän käytettävien työkoneiden päästöraajat olisivat muita työkoneita sallivammat. Ja toisaalta myös siten, että dieselpolttoaineen ohella tyyppihyväksyntä voitaisiin tehdä myös muita polttoaineita käyttäville moottoreille. (Söderena 2017: 27.)

3.4.2 Lännen Tractors Oy

Yrityksen valikoimassa ei ole kaasumoottorilla varustettuja työkoneita. Vaihe IV päästöstandardin mukaisissa koneissa on päästöjen hallintaan liittyviä ongelmia ja esimerkiksi polttoaineen kulutus on kasvanut pakokaasun jälkikäsittelylaitteistojen ansiosta. Pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistojen oikean toiminnan varmistaminen kevyellä

kuormituksella lisää mm. moottorista johtuvaa melua ja heikentää moottorien kestävyyttä. (Söderena 2017: 31.)

3.4.3 Sampo-Rosenlew Oy

Yrityksen valikoimassa ei ole kaasukäyttöisiä työkoneita, eikä yritys myöskään usko olevansa mukana kaasukäyttöisen työkoneen tuotekehityksessä lähitulevaisuuden aikana. Kaasumoottoreihin liittyvä päästölainsäädännön tuntemus on yrityksessä vähäistä, ja koska sopivaa kaasumoottoritekniikkaa ei ole tällä hetkellä saatavana, yritys näkee dieselmoottoritekniikan hyvänä vaihtoehtona myös tulevaisuudessa. (Söderena 2017: 34.)

3.4.4 Valtra Oy

Yrityksellä on olemassa oma biokaasutraktoreihin liittyvä kehitysprojekti. Projektiin liittyvät panostukset ovat olleet toistaiseksi pieniä, ja tuotekehitystoimintaa hidastaa uuden Vaihe V päästöstandardin mukaisten dieselmoottorikäyttöisten traktorien kehityksen vaatimat panostukset. Biokaasutraktorien vähäinen kysyntä vaikuttaa myös osaltaan tuotekehityksen resursseihin. (Söderena 2017: 38.)

Yritys on valmistanut pienen erän maa- ja biokaasulla toimivia kaksoispolttoainemoottoreilla varustettuja traktoreita. Traktorit eivät ole sarjatuotannossa, ja kyse on lähinnä tuotekehitystoimintaan valmistetuista prototyypeistä. Traktoreista on kerätty testitietoa mm. Saksalaisessa BioTrak- ja Ruotsalaisessa MEKA- projektissa. Traktoreista on kerätty testitietoa niin laboratoriossa, kuin myös kenttäolosuhteissa. Testeistä saadut kokemukset ovat yleisellä tasolla olleet positiivisia. (Söderena 2017: 38.)

3.5 Vaihe IV päästöstandardin mukaiset kaasutraktorit

Kaasu- ja kaksoispolttoainekäyttöisten traktorien Vaihe IV päästöstandardin mukaista tyyppihyväksyntää koskevat muita työkoneita koskevat päästölainsäädännön rajoitukset. (Söderena 2017: 37.)

3.6 Direktiiviä 97/68/EY muokkaavat direktiivit

Direktiivin 97/68/EY esittelemää Vaihe I ja II päästöstandardia on aluksi täydennetty direktiiveillä 2002/88/EC ja 2004/26/EC. Vaihe IIIA, IIIB ja IV päästöstandardien esittelyn jälkeen esiteltiin vielä viisi direktiiviä 97/68/EY muokkaavaa direktiiviä. Direktiivi 2006/105/EC muokkasi direktiivin 97/68/EY tyyppihyväksyntään liittyviä teknisiä yksityiskohtia. Direktiivi 2010/22/EU muokkasi maa- ja metsätaloustraktoreihin sovellettua aiempaa lainsäädäntöä ja direktiivi 2010/26/EU tyyppihyväksyntävaatimuksia Vaiheiden III B ja IV osalta. Direktiivi 2011/88/EU muokkasi Vaiheen III B moottorien hyväksymisprosentteihin liittyviä säädöksiä ja direktiivi 2012/46/EU liittyi moottorien pakokaasupäästöjen mittaamiseen. (Euroopan Unioni 2018; DieselNet 2016B.)

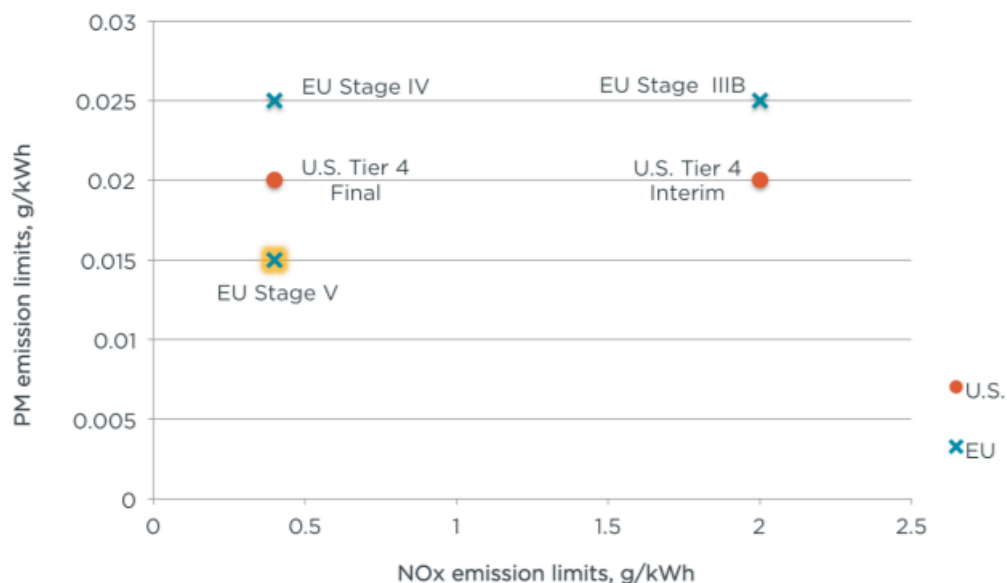
4 TYÖKONEIDEN PÄÄSTÖLAINSÄÄDÄNTÖ VAIHE V

Työkoneiden päästölainsäädännön määrittäneen direktiivin 97/68/EY korvaava asetus EU 2016/1628 annettiin Euroopan parlamentin ja neuvoston toimesta 14 päivänä syyskuuta 2016 ja asetus sisältää Vaihe V päästöstandardin. Direktiiviä 97/68/EY oli muokattu useaan kertaan ja direktiivi oli tarkoituksenmukaista korvata uudella selkeämmällä ja yksinkertaisemmalla asetuksella. Uuden asetuksen tuli olla helpommin muokattava ja sovellettavissa sellaisenaan hyväksyntäviranomaisten, tutkimuslaitosten ja valmistajien valvontaan. (EUR-Lex 2016a: L252/59.)

Vaihe V päästöstandardi tuli voimaan vuoden 2018 alusta ja otetaan käyttöön vaiheittain vuoden 2019 ja 2020 välisenä aikana, moottoritehosta riippuen. Uuden asetuksen tarkoitus on, päästörajoiden laskemisen lisäksi, yksinkertaistaa työkonemoottorien tyyppihyväksyntää koskevaa unionin lainsäädäntöä, ja varmistaa unionin sisämarkkinoiden toimivuus työkonemarkkinoiden osalta. (EUR-Lex 2016a: L252/53; Söderena 2017: 10.)

Vaihe V päästöstandardi kattaa liikkuvien työkoneiden vaihtuva- ja vakiokierrosmoottorit, kaikkien polttoaineen sytytysjärjestelmien ja polttoainetyyppien osalta. Sekä pakokaasupäästöjen osalta liikkuvat työkoneet, joihin päästöstandardin mukaiset moottorit on asennettu. (Janin ym. 2017: 13.) Vaihe V päästöstandardi ei koske käyttöpaikkaansa kiinteästi asennettuja moottoreita, kuten kiinteästi asennettuja polttomoottoritoimisia sähkögeneraattoreita (Janin ym. 2017: 18). Vaihe V päästöstandardin typenoksidipäästöjen raja-arvot ovat yhtenevät Vaihe IV- ja U.S Tier 4 Final päästöstandardien kanssa, mutta Vaihe V päästöstandardin hiukkasmassan raja-arvot ovat tiukemmat, kuten kuvasta 26 voi havaita.

Luvussa 4 tutustutaan Vaihe V päästöstandardiin. Kappale 4.1 käsittelee Vaihe V päästöstandardia ja pakokaasupäästöjen raja-arvoja. Kappaleessa 4.2 tutustutaan Vaihe V päästöstandardin mukaisia kaasutraktoreja koskevaan päästölainsäädäntöön. Kappaleessa 4.3 Luodaan katsaus Vaihe V päästöstandardin mukaisten työkoneiden valmistukseen työkonevalmistajien näkökulmasta. Lopuksi kappaleessa 4.4 on kerrottu asetusta EU/2016/1628 muokkaavat asetukset.



Kuva 26. Vaihe- ja U.S Tier päästöstandardien hiukkasmassan ja typenoksidien raja-arvojen vertailu (International council of clear transportation 2016).

4.1 Vaihe V päästöstandardi ja pakokaasupäästöjen raja-arvot

Vaihe V päästöstandardi esittelee useita muutoksia aikaisempiin Vaihe päästöstandardeihin verrattuna. Uusi päästöstandardi kattaa puristussytytteiset moottorit teholuokassa 0 kW–56 kW ja kaikki moottorit teholuokasta 56 kW ylöspäin. Vaihe V päästöstandardin sääntelemiä pakokaasupäästöjä ovat hiilimonoksidi, hiilivedyt, typenoksidit ja hiukkaspäästöt. Hiukkasmassan mittauksen lisäksi hiukkaspäästöjen mittaukseen on lisätty uusi hiukkaslukumäärän mittaus teholuokassa 19 kW–560 kW. Hiukkaslukumäärän mittauksella on mm. tarkoitus varmistaa hiukkaspäästöjen valvonnan onnistuminen myös uusien tehokkailla partikkelisuodattimilla varustettujen moottorien osalta. (DieselNet 2016b; EUR-Lex 2016a: L252/104.) Kuten aikaisempienkin päästöstandardien kohdalla, myös Vaihe V päästöstandardissa pakokaasupäästöjen raja-arvot ilmoitetaan ominaispäästöinä. Vaihe V päästöstandardin mukaisten moottorien ammoniakkipäästö ei saa ylittää raja-arvoa 25 ppm (DieselNet 2016b).

Teholuokassa 56 kW–130 kW hiilimonoksidi- ja typenoksidipäästöjen raja-arvot ovat Vaihe IV päästöstandardin kanssa yhtenevät. Hiukkasmassan osalta raja-arvo on

tiukentunut 40 %. Hiilivety päästöjen raja-arvo on dieselmoottorien osalta yhtenevä Vaihe IV päästöstandardin raja-arvon kanssa. Kaasumoottorien osalta hiilivety päästöjen raja-arvo lasketaan erityisesti kaasumoottoreja varten määritetyn laskentakaavan avulla. Partikkelilukumäärää ei ole mitattu aiemmissa päästöstandardeissa, joten vertailulukua ei ole olemassa. (DieselNet 2016b; EUR-Lex 2016a: L252/104; L252/104.)

Teholuokassa 130 kW–560 kW hiilimonoksidi- ja typenoksidipäästöjen raja-arvot ovat Vaihe IV päästöstandardin kanssa yhtenevät. Hiukkasmassan raja-arvo on myös tässä teholuokassa tiukentunut 40 %. Hiilivetyjen raja-arvo on dieselmoottorien osalta yhtenevä Vaihe IV päästöstandardin raja-arvon kanssa. Kaasumoottorien osalta hiilivety päästöjen raja-arvo lasketaan, alemman teholuokan tapaan, erityisesti kaasumoottoreja varten määritetyn laskentakaavan avulla. Partikkelilukumäärää ei ole aiemmissa päästöstandardeissa mitattu myöskään teholuokassa 130 kW–560 kW, joten vertailulukua ei ole olemassa. (DieselNet 2016b; EUR-Lex 2016a: L252/104; L252/107.) Kuvassa 27 on esitetty Vaihe V päästöstandardin mukaiset raja-arvot NRE- luokan työkonemoottorien pakokaasupäästöille.

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

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

Kuva 27. Vaihe V päästöstandardin mukaiset raja-arvot pakokaasupäästöille (DieselNet 2016b).

4.1.1 Pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot

Vaihe V päästöstandardin hiukkaspäästöjen tiukat päästörajat vaativat dieselmoottoreissa partikkelisuodattimen käyttöä. Pakokaasujen jälkikäsittelyssä yli 56 kW moottorien osalta käytetään dieselhapetuskatalysaattorista, typenoksidin pelkistävästä SCR-

katalysaattorista ja partikkelisuodattimesta koostuvaa pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistoja. (Nylund ym. 2016: 10) Kaksoispolttoainemoottorien osalta dieselhapetuskatalysaattorin lisäksi joudutaan todennäköisesti käyttämään myös metaanihapetuskatalysaattoria metaanipäästöjen poistamiseksi. Kipinäsytytteisten stökiometristen kaasumoottorien osalta riittää todennäköisesti, ainakin pienten teholuokkien osalta, niille suunnitellun kolmitoimikatalysaattorin käyttö. (Söderena 2017: 27.)

4.1.2 Asetuksen EU/2016/1628 voimaantulo

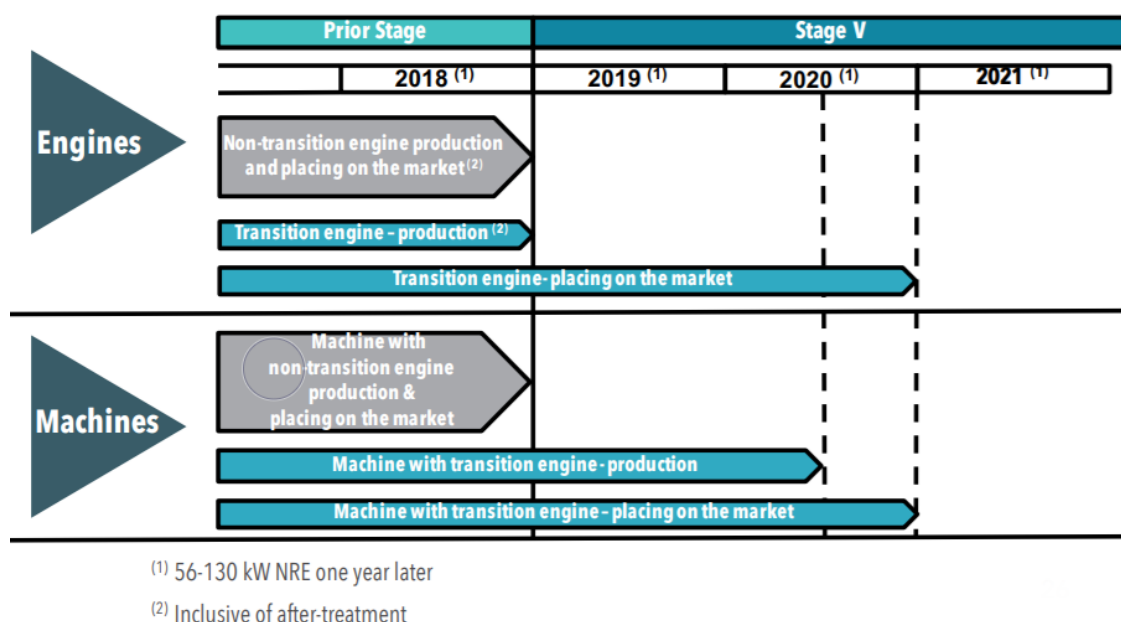
Vaihe V päästöstandardin mukaiset moottorit voi tyyppihyväksyttää aikaisintaan asetuksen EU/2016/1628 täydentävän lainsäädännön tullessa voimaan 13 päivänä huhtikuuta 2017. Vaihe V päästöstandardia edeltävien päästöstandardien mukaisten moottorien tyyppihyväksyntämahdollisuus loppui, teholuokkien alle 56 kW ja yli 130 kW osalta, 31 päivänä joulukuuta 2017. Teholuokan 56 kW–130 kW osalta viimeinen tyyppihyväksyntämahdollisuus on 31 päivänä joulukuuta 2018. Vaihe V päästöstandardia edeltävien päästöstandardien mukaisten moottorien valmistus tulee lopettaa teholuokkien alle 56 kW ja yli 130 kW osalta viimeistään 31 päivänä joulukuuta 2018. Teholuokan 56 kW–130 kW osalta viimeinen mahdollinen valmistuspäivä on 31 päivänä joulukuuta 2019. (Janin ym. 2017: 20.)

Mahdollisuus Vaihe V päästöstandardia edeltävien päästöstandardien mukaisten moottorien markkinoille asettamiselle loppuu teholuokkien alle 56 kW ja yli 130 kW osalta 31 päivänä joulukuuta 2018. Teholuokan 56 kW–130 kW osalta viimeinen mahdollinen markkinoille asettamispäivä on 31 päivänä joulukuuta 2019. Vaihe V päästöstandardia edeltävien päästöstandardien mukaisilla moottoreilla varustettujen työkonoiden markkinoille asettamisen mahdollisuus loppuu teholuokkien alle 56 kW ja yli 130 kW osalta viimeistään 31 päivänä joulukuuta 2018. Teholuokan 56 kW–130 kW osalta viimeinen mahdollinen markkinoille asettamispäivä on 31 päivänä joulukuuta 2019. (Janin ym. 2017: 21.)

Vaihe V päästöstandardia edeltävien päästöstandardien mukaisten uusien, jo rakennettujen ja EU:n alueella jo olevien ja tyyppihyväksytyjen, työkonoiden myynnille ei ole

asetettu takarajaa. Uusiin työkoneisiin tarkoitettujen Vaihe V päästöstandardia edeltävien päästöstandardien mukaisten moottorien valmistus ei ole mahdollista viimeisten sallittujen valmistuspäivämäärien jälkeen. Valmiiksi rakennettuja moottoreita voidaan kuitenkin käyttää siirtymävaiheen ajan, uusien Vaihe V päästöstandardin mukaisten työkoneiden moottoreina, ja Vaihe V päästöstandardia edeltävien päästöstandardien mukaisten työkoneiden vaihtomoottoreina. (Janin ym. 2017: 24, 29, 44.) Kuvassa 28 on esitetty työkoneemoottorien ja työkoneiden valmistuksen ja myynnin viimeiset päivämäärät siirtymäkauden aikana.

Työkoneiden alkuperäisten NRE- luokan moottorien korvaavien vaihtomoottorien valmistus on sallittu teholuokassa 19 kW–560 kW enintään 20 vuotta. Vaihtomoottorien 20 vuoden määräaika lasketaan siitä hetkestä, kun vastaavien Vaihe V päästöstandardin mukaisten moottorien markkinoille saattaminen alkoi. Määräajan lisäksi vaihtomoottorien tulee täyttää korvattavan moottorin mukaisen alkuperäisen päästöstandardin pakokaasupäästöjen raja-arvot. (EUR-Lex 2016a: L252/97.)



Kuva 28. Työkoneemoottorien ja työkoneiden valmistuksen ja myynnin viimeiset päivämäärät siirtymäkauden aikana (Janin ym. 2017: 26).

4.1.3 Kaasumootorilla varustettujen työkoneiden tyyppihyväksyntä

Kaasumootorilla varustettujen työkoneiden tyyppihyväksyntä onnistuu Vaihe V päästöstandardin mukaisten työkonemoottorien osalta, koska päästöstandardi mahdollistaa kaasukäyttöisten moottorien hiilivety- ja typenoksidipäästöjen määrittämisen. Puristussytytteisten moottorien osalta raja-arvo lasketaan hiilivety- ja typenoksidipäästöjen raja-arvojen summana teholuokassa 0 kW–56 kW ja kaikkien moottorien osalta hiilivetyjen erillisen raja-arvon avulla teholuokasta 56 kW ylöspäin. (DieselNet 2016b; EUR-Lex 2016a: L252/104.)

4.2 Vaihe V päästöstandardin mukaiset kaasutraktorit

Asetus EU/2016/1628 ei suoraan koske maa- ja metsätaloustraktoreita, joiden tyyppihyväksyntään liittyvä lainsäädäntö on määritetty asetuksella 167/2013. Asetuksessa 167/2013 maa- ja metsätaloustraktorien pakokaasupäästöjä koskeva lainsäädäntö on kuitenkin liitetty direktiiviin 97/68/EY. Asetuksen EU/2016/1628 korvattua direktiiviin 97/68/EY on katsottu, että maa- ja metsätaloustraktorien pakokaasupäästöjä koskeva lainsäädäntö siirtyy uuden asetuksen EU/2016/1628 piiriin. Kaasukäyttöisten traktorien tyyppihyväksyntää säätelee siten muita Vaihe V päästöstandardin mukaisia työkoneita koskeva päästölainsäädäntö. (Janin ym. 2017: 18.)

4.3 Kaasukäyttöisten työkoneiden valmistus Suomessa

Trafin ylitarkastajan Henri Takkisen mukaan asetus EU/2016/1628 on sellaisenaan sovellettavissa, eikä vaadi erillistä suomalaista lainsäädännöllistä toimeenpanoa (Takkinen 2018). Moottorivalmistajan on tyyppihyväksyttävä työkonemoottorit kaikille polttoainetyypeille, joita moottoreissa aiotaan käyttää. Kun työkonemoottorissa käytetään kaasupolttoaineita, on työkoneelle suoritettava myös vaatimusten mukainen pakokaasujen käytönaikainen päästömittaus. (Janin ym. 2017: 55.)

Kaasumoottorikäyttöisten työkonoiden tyyppihyväksyntä tulee Vaihe V päästöstandardin myötä mahdolliseksi, mutta päästöstandardin pakokaasupäästöjen raja-arvojen alittamiseen liittyy todennäköisesti teknisiä ongelmia. AGCO Power Oy :n mukaan kaasumoottori soveltuisi parhaiten pienitehoiseen maataloustraktoriin ja ainakin pienillä teholuokan 56 kW kipinäsytytteisillä moottoreilla Vaihe V päästöstandardin pakokaasupäästöjen raja-arvot olisi mahdollista alittaa. Kaasupolttoainelaitteiston sovittaminen dieselmoottoriin, jonka pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmä vie paljon tilaa, nähdään ongelmallisenä. Laitteiston taloudelliseen toteutettavuuteen liittyy ongelmia, kuten myös tekniikan toimintavarmuuteen. AGCO Power Oy ei näe metaanilla olevan kovin suurta osuutta työkonoiden polttoaineena, ellei käyttäjien kiinnostus kaasumoottorilla varustettuihin työkonoihin lisäänty. (Söderena 2017: 27.)

Lännen Tractors Oy:n mukaan Vaihe IV päästöstandardin mukaisten työkonoiden pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot ovat aiheuttaneen jonkin verran teknisiä ongelmia. Yritys uskoo Vaihe V päästöstandardin vaatimien jälkikäsittelyjärjestelmien aiheuttavan vielä enemmän teknisiä ongelmia, ja haittaavan työkonoiden käytettävyyttä, sekä lisäävän polttoaineenkulutusta. (Söderena 2017: 31.)

Valtra Oy näkee kaksoispolttoainemoottorin pakokaasupäästöjen hallinnan ongelmallisenä pakokaasupäästölainsäädännön tiukentuessa. Alle 56 kW teholuokassa Vaihe V päästöstandardi sallii suuremmat hiilivetyjen ja typenoksidipäästöjen yhdistetyt päästöt, verrattuna suurempiin teholuokkiin, ja tämä voisi mahdollistaa kaasupolttoaineen käytön tähän moottoriluokkaan kuuluvissa maataloustyökoneissa. (Söderena 2017: 31.)

4.4 Asetusta EU/2016/1628 muokkaavat asetukset

Asetusta EU/2016/1628 muokkaava asetus EU/2017/654 julkaistiin 19 päivänä joulukuuta 2017. Asetus EU/2017/654 täydentää asetusta EU/2016/1628 polttomoottorien päästörajojen ja tyyppihyväksynnän teknisten ja yleisten vaatimusten osalta. (EUR-Lex 2016c: L101/1.)

5 HIILIVETYPÄÄSTÖJEN RAJA-ARVON MÄÄRITTÄMINEN

Vaihe V päästöstandardin mukaisille kaasu- ja kaksoispolttoainemoottoreille sovelletaan erityistä hiilivetypäästöjen raja-arvon määrittämenetelmää, jossa hiilivetypäästöjen raja-arvo lasketaan yhtälöllä

$$HC = (0,19 + (1,5 \times A \times GER)) \text{ g/kWh}, \quad (1)$$

missä A on laskentakerroin ja GER kaasumoottorin kaasuenergiasuhde. (EUR-Lex 2016a: L252/107.) Raja-arvon laskennassa käytetyt A - kertoimet on esitetty kuvassa 29 ja ilmoitetaan asetuksessa EU/2016/1628.

Kaksoispolttoainemoottorin kaasuenergiasuhde määritetään toimintalämpötilaan lämmittelylle moottorille, kyseessä olevalle moottorityypille soveltuvan testisyklin mukaisella mittauksella (International council of clear transportation 2016: 6). Kaasuenergiasuhde määritetään jakamalla testiajon aikana käytetyn kaasupolttoaineen energiasisältö kaasupolttoaineen ja dieselpolttoaineen yhdistetyllä energiasisällöllä (United Nations 2013: 14).

Mittauksessa kaksoispolttoainemoottorin kaasuenergiasuhde lasketaan yhtälöllä

$$GER = \frac{\dot{m}_{gas} * H_{gas}}{\dot{m}_{diesel} * H_{diesel} + \dot{m}_{gas} * H_{gas}} * 100\%, \quad (2)$$

missä $\dot{m}_{gas}$ on kaasupolttoaineen massavirta, $\dot{m}_{diesel}$ on diesel- tai kaasuöljyn massavirta, H_{gas} on kaasupolttoaineen lämpöarvo ja H_{diesel} on diesel- tai kaasuöljyn lämpöarvo. (United Nations 2013: 14; Ambarita 2017: 4.)

Moottorin käyttäessä pelkästään diesel- tai kaasuöljyä on kaasuenergiasuhde 0 %. Kaksoispolttoainekäytön aikana kaasuenergiasuhde vaihtelee kaasupolttoaineen osuuden vaihdella moottorin käyntitilanteesta riippuen. Kaksoispolttoainemoottorit tarvitsevat aina dieselpolttoainetta seoksen sytyttämiseen, eikä kaasuenergiasuhde voi koskaan olla 100 %.

Päästövaihe	Moottorialaluokka	Tehoalue	Sytytystyyppi	Hiilimonoksidi (CO)	Hiilivedyt (HC)	Typen oksidit (NO _x)	Hiukkasten (PM) massa	Hiukkasten lukumäärä (PN)	A-kerroin
		kW		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	#/kWh	
Vaihe V	NRE-v-1 NRE-c-1	0 < P < 8	Puristussytytys	8,00	(HC + NO _x ≤ 7,50)		0,40 ⁽¹⁾	—	1,10
Vaihe V	NRE-v-2 NRE-c-2	8 ≤ P < 19	Puristussytytys	6,60	(HC + NO _x ≤ 7,50)		0,40	—	1,10
Vaihe V	NRE-v-3 NRE-c-3	19 ≤ P < 37	Puristussytytys	5,00	(HC + NO _x ≤ 4,70)		0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Vaihe V	NRE-v-4 NRE-c-4	37 ≤ P < 56	Puristussytytys	5,00	(HC + NO _x ≤ 4,70)		0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Vaihe V	NRE-v-5 NRE-c-5	56 ≤ P < 130	Kaikki	5,00	0,19	0,40	0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Vaihe V	NRE-v-6 NRE-c-6	130 ≤ P ≤ 560	Kaikki	3,50	0,19	0,40	0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Vaihe V	NRE-v-7 NRE-c-7	P > 560	Kaikki	3,50	0,19	3,50	0,045	—	6,00

⁽¹⁾ 0,60 käsikäynnisteille ilmajäähdytteisille suoraruiskutusmoottoreille

Kuva 29. NRE moottoriluokan päästörajat ja A kertoimet (EUR-Lex 2016a: L252/104).

Kipinäsytytteisille kaasumoottoreille kaasunenergiasuhde on aina 100%, koska moottori käyttää polttoaineenaan ainoastaan kaasua. Tällöin hiilivetyjen raja-arvo voidaan laskea yhtälöllä

$$HC = (0,19 + (1,5 \times A)) \text{ g/kWh} \quad (3)$$

Jos kaksoispolttoainemoottorin tai kipinäsytytteisen kaasumoottorin hiilivetypäästöjen laskennallinen raja-arvo on suurempi kuin yhtälön

$$HC = (0,19 + A) \text{ g/kWh} \quad (4)$$

antama arvo, hiilivetypäästöjen raja-arvona käytetään yhtälön $(0,19 + A)$ g/kWh antamaa arvoa. (EUR-Lex 2016a: L252/104.) Kappaleessa 5.2 on esitetty kaksoispolttoainemoottorin hiilivetypäästöjen raja-arvon laskentaesimerkki ja kappaleessa 5.3 kipinäsytytteisen kaasumoottorin hiilivetypäästöjen raja-arvon laskentaesimerkki.

5.1 Kaksoispolttoainemoottorin hiilivety päästöjen raja-arvon laskeminen

Kaksoispolttoainemoottorin hiilivety päästöjen raja-arvon tarkka määrittäminen vaatii moottorin kaasuenergiasuhteen mittaamista laboratorio olosuhteissa. Kuvassa 30 on esitetty teholuokan 56 kW–130 kW kaksoispolttoainemoottorin hiilivety päästöjen laskennallinen raja-arvo kaasuenergiasuhteen funktiona. Kuvaan on lisätty vaakasuora viiva, joka kuvaa yhtälön $(0,19 + A)$ g/kWh määrittämää hiilivety päästöjen maksimiarvoa. Laskennassa on käytetty hiilivety päästön raja-arvolle kaavaa

$$HC = (0,19 + (1,5 \times A \times GER)) \text{ g/kWh},$$

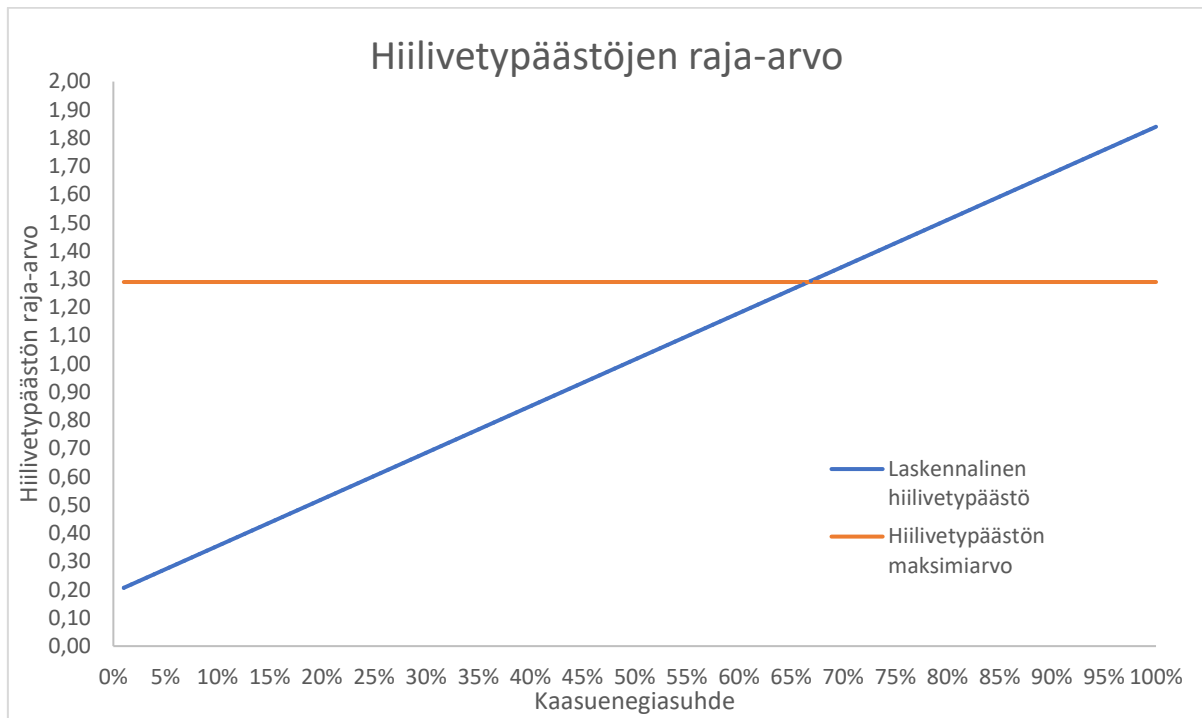
kerrointa $A = 1,1$ ja kaasuenergiasuhteelle arvoja välillä 0 - 100 %.

Teholuokan 56 kW–130 kW kaksoispolttoainemoottorin hiilivety päästön raja-arvoa rajoittaa yhtälöllä $0,19 + A$ laskettava hiilivety päästön maksimiarvo 1,29 g/kWh kaasuenergiasuhteen arvosta 66 % ylöspäin. EUR-Lex (2016a: L252/107.) Teholuokan 56 kW–130 kW kaksoispolttoainemoottorin hiilivety päästöjen raja-arvo ei siten ylitä arvoa 1,29 g/kWh, mutta voi olla tätä pienempi kaasuenergiasuhteen ollessa alle 66%.

5.2 Kipinäsytytteisen kaasumootorin hiilivety päästöjen raja-arvon laskeminen

Kipinäsytytteisen kaasumootorin kaasuenergiasuhde on aina 100% ja kerroin A teholuokan 56 kW–130 kW moottorille 1,1. Hiilivety päästöjen laskennallinen raja-arvo teholuokassa 56 kW–130 kW on kaavan $HC = (0,19 + (1,5 \times A \times GER))$ g/kWh mukaisesti aina 1,84 g/kWh. (EUR-Lex 2016a: L252/104.)

Hiilivety päästöjen raja-arvoa rajoittaa, myös kipinäsytytteisten kaasumootorien osalta, kaavalla $0,19 + A$ laskettava hiilivetyjen ominaispäästön maksimiarvo 1,29 g/kWh. Kipinäsytytteisen kaasumootorin hiilivety päästöjen raja-arvo teholuokassa 56 kW–130 kW on siten aina enintään 1,29 g/kWh. (EUR-Lex 2016a: L252/107.)



Kuva 30. Teholuokan 56 kW–130 kW kaksoispolttoainemoottorin hiilivetyjen ominaispäästön laskennallinen raja-arvo kaasuenerbiasuhteen funktiona.

6 PÄÄSTÖLAINSÄÄDÄNNÖN NYKYTILA JA TULEVAISUUS

Työkoneiden päästölainsäädäntö on tällä hetkellä siirtymävaiheessa. Vaihe IV päästöstandardin mukaisten työkonemoottorien tuotanto jatkuu siirtymäkauden loppuun, ja toisaalta Vaihe V päästöstandardin mukaisten työkonemoottorien tyyppihyväksyntä on jo tällä hetkellä mahdollista. Vaihe IV päästöstandardin mukaisten työkonemoottorien tuotannolle on annettu siirtymäkausi sen varmistamiseksi, että työkonemoottorien valmistajilla on riittävästi aikaa sopeutua uuden päästöstandardin mukaisten moottorien tuotantoon (EUR-Lex 2016a: L252/59).

Vaihe V päästöstandardin mukaisten moottorien säänneltyjen päästökomponenttien lisäksi, moottorivalmistajien tulee ilmoittaa myös moottorien tuottamien hiilidioksidipäästöjen tasot. Hiilidioksidipäästöjä koskevia raja-arvoja ei tällä hetkellä kuitenkaan ole olemassa. (Nylund ym. 2016: 13.)

Tässä kappaleessa tarkastellaan päästölainsäädännön nykytilaa ja tulevaisuutta. Kappaleessa 6.1 tarkastellaan lyhyesti lainsäädännön nykytilaa ja kappaleessa 6.2 päästölainsäädännön tulevaisuutta ja tulevaisuuteen vaikuttavia seikkoja Suomessa.

6.1 Päästölainsäädännön nykytila

Työkoneita koskeva päästölainsäädäntö perustuu siirtymäkauden jälkeen pelkästään Vaihe V päästöstandardin mukaisiin säädöksiin. Kaasumoottorien osalta siirtymäkautta ei ole, koska Vaihe V päästöstandardi on ensimmäinen kaasumoottorien tyyppihyväksynnän mahdollistava päästöstandardi (Söderena 2017: 10). Kaasupolttoaine otetaan Vaihe V päästöstandardissa huomioon hiilivetypäästöjen osalta, mutta muuten työkoneiden kaasumoottorien tulee täyttää muiden moottorityyppien kanssa yhtenevät pakokaasupäästöjen raja-arvot. (EUR-Lex 2016a: L/252/104 – 106.)

6.1.1 Säänneltyt päästökomponeentit

Kaasumoottorien osalta Vaihe V päästöstandardin päästörajojen alittamiseen on luultavasti mahdollista, ainakin pienen teholuokan kipinäsytytteisillä stökiömetrisillä kaasumoottoreilla. Kaksoispolttoainemoottorien osalta Vaihe V päästöstandardin mukaisten päästörajojen alittaminen saattaa olla ongelmallista. Moottorivalmistajien aiheeseen liittyvä käytännön kokemus näyttää tällä hetkellä olevan vielä melko vähäistä. (Söderena 2017: 27.)

6.1.2 Hiilidioksidipäästöt

Työkonemoottorien hiilidioksidipäästöjen mittaaminen on teknisesti yksinkertaista ja voidaan toteuttaa pakokaasupäästömittausten yhteydessä. Hiilidioksidipäästöjen mittaaminen moottorista ei kuitenkaan anna todenmukaista kuvaa työkoneen tuottamista käytönaikaisista hiilidioksidipäästöistä, koska työkoneen hiilidioksidipäästöt riippuvat, kuormituksen lisäksi, työkoneeseen kytketyistä lisälaitteista ja niiden tehontarpeesta. (Nylund ym. 2016: 17.)

Työkoneiden käytönaikaisten hiilidioksidipäästöjen mittaukselle ei ole olemassa valmista mittaamenetelmää. Tästä johtuen Vaihe V päästöstandardi ei tällä hetkellä sisällä rajoituksia työkonemoottorien hiilidioksidipäästöille. (Nylund ym. 2016: 1.)

6.2 Päästölainsäädännön tulevaisuus

Vaihe V päästöstandardin tulevaisuudesta tai Vaihe V päästöstandardin korvaajasta ei ole vielä olemassa virallista tietoa, eikä esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen sääntelystä ole tehty päätöksiä. Seuraava Vaihe V päästöstandardiin liittyvä arviointi on tarkoitus tehdä vuonna 2020, ja silloin arvioidaan tarve asettaa päästölainsäädäntöön uusia säänneltyjä päästökomponeentteja. (Söderena 2017: 11.) Työkoneita koskevien päästörajojen tiukennukset jatkuvat todennäköisesti myös tulevaisuudessa. Koska Vaihe V päästöstandardin säänneltyjen päästökomponeenttien raja-arvot ovat jo nyt hyvin tiukat, jatkossa

keskitytään todennäköisesti lähinnä hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseen, tieliikenteen raskaan kaluston tapaan (Nylund ym. 2016: 13).

6.2.1 Säännellyt päästökomponeentit

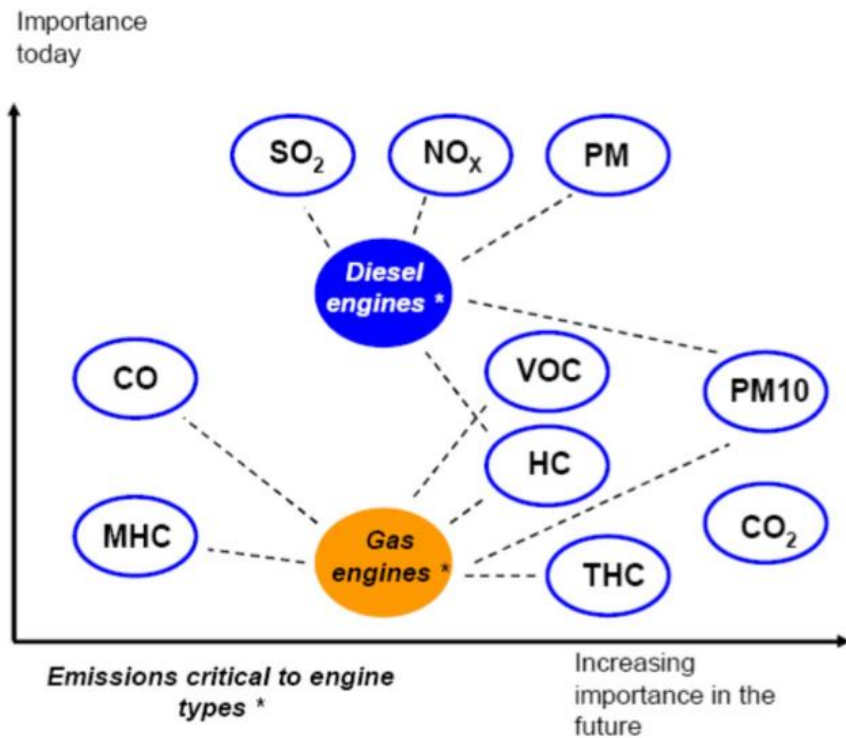
Vaikka Vaihe V päästöstandardin päästörajat ovat hyvin tiukat, on ainakin hiukkaspäästöjen rajoittaminen ajankohtaista myös tulevaisuudessa, etenkin pienikokoisten hiukkasten osalta. (Euroopan komissio 2018: 3.)

Kuvassa 31 on Wärtsilän näkemys keskinopeiden diesel- ja kaasumoottorien päästökomponeenttien rajoitustarpeen nykytilasta ja tulevaisuudesta. Wärtsilän mukaan hiilidioksidi- ja hiukkaspäästöjen lisäksi, myös kaasumoottorien metaanipäästöt sisältävien kokonaishiilivetypäästöjen rajoittamisen tarpeellisuus kasvaa tulevaisuudessa.

Vaikka kuva koskeekin keskinopeiden moottorien päästökomponeentteja, vaikuttavat samat tulevaisuuden trendit todennäköisesti myös työkoneissa käytettävään moottoriteknikkaan. Esimerkiksi kokonaishiilivetypäästöjen rajoittaminen tulee, metaanin kasvihuoneilmiötä voimistavien ominaisuuksien takia, olemaan tärkeää myös työkonemoottorien osalta.

6.2.2 Hiilidioksidipäästöt

Työkoneen hiilidioksidipäästöjen käytönaikainen mittaaminen on ongelmallista, mutta todennäköisesti mahdollista lähitulevaisuuden aikana. Mittaamisessa voidaan soveltaa esimerkiksi tieliikenteen raskaan kaluston hiilidioksidipäästöjen suunnitteilla olevaa las-kennallista VETCO- mittaussmenetelmää (Nylund ym. 2016: 13). Kun toimiva työkoneiden käytönaikaisten hiilidioksidipäästöjen mittaussmenetelmä on kehitetty, tulee työkoneita koskevien hiilidioksidipäästöjen mittaaminen ja rajoittaminen luultavasti ajankohtaiseksi (Euroopan komissio 2018: 4).



Kuva 31. Keskinopeiden diesel- ja kaasumoottorien päästökomponenttien rajoitustarve tulevaisuudessa (Niemi 2018d: 2).

6.2.3 Päästölainsäädännön tulevaisuuteen vaikuttavia seikkoja

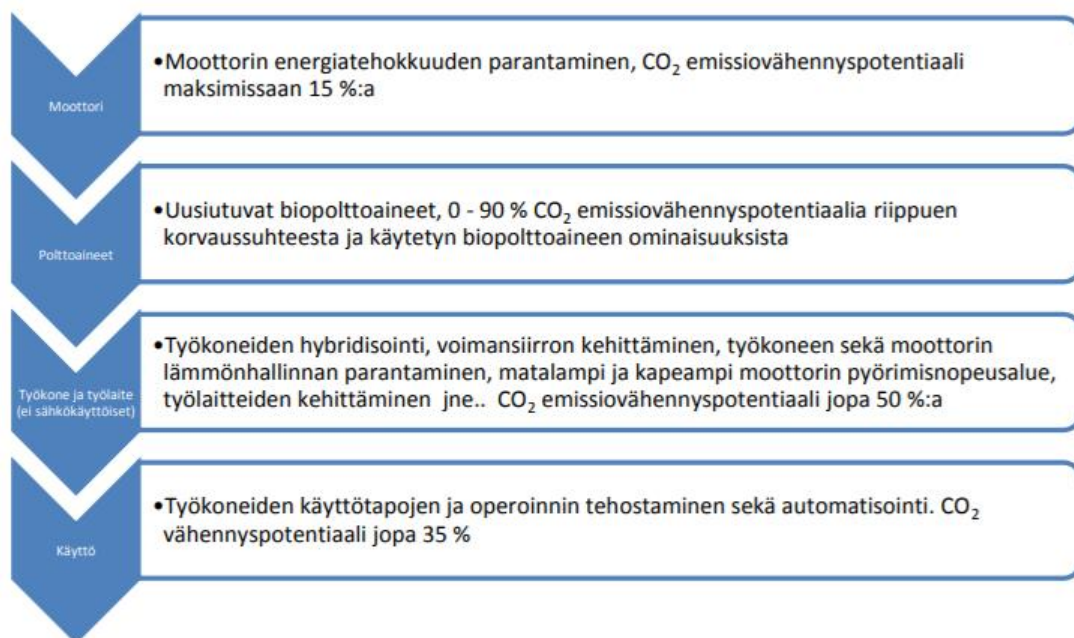
Toimivaa ratkaisua työkoneissa syntyvän hiilioksidin talteenottoon ei vielä ole olemassa, mutta työkoneiden hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää seuraavin keinoin:

- Työkonemoottorin hyötysuhteen nostaminen
- Työkoneen energiankäytön tehostaminen
- Työkoneen käytön optimointi
- Hiilidioksidipäästöjä vähentävän polttoaineen käyttö

Kuvassa 32 on esitetty eri hiilidioksidipäästöjen vähennysmenetelmien vähennyspotentiaalit työkoneille. Kaikki hiilidioksidipäästöjen vähennyskeinot ovat merkityksellisiä, mutta uusiutuvien biopolttoaineiden käytöllä saavutettava hiilidioksidinpäästöjen

vähennys voi olla huomattavasti muita keinoja tehokkaampaa. Biopolttoaineiden käytöllä hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää jopa 90%, riippuen käytetystä biopolttoaineesta ja sen syöttösuhteesta moottoriin. (Nylund ym. 2016: 14.) Koska biopolttoaineilla, kuten biokaasulla, voidaan merkittävästi vähentää työkoneen tuottamia todellisia hiilidioksidipäästöjä, tulisi näiden polttoaineiden osuutta kasvattaa.

Ympäristöministeriön erityisasiantuntijan Outi Vilénin mukaan työkoneita koskevat päästövähennystavoitteet on ensimmäistä kertaa merkitty myös Suomen keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan (KAISU) tavoitteisiin. Vilén näkee maatiloilla tuotetun biokaasun kustannustehokkaana vaihtoehtona fossiilisille polttoaineille ja biokaasun käytön lisääminen onkin yksi KAISUN tavoitteista. Vilénin mukaan tällä hetkellä biokaasutuotannon kasvua rajoittaa lähinnä kaasukäyttöisten työkoneiden vähäinen lukumäärä. Tulevaisuudessa Vaihe V päästöstandardin mahdollistama kaasumoottoreilla varustettujen työkoneiden tyyppihyväksyntä voisi kuitenkin lisätä kaasukäyttöisten traktorien tuotantoa ja osaltaan lisätä myös biokaasun tuotantoa. (Vilén 2018.)



Kuva 32. Hiilidioksidipäästöjen vähennysmenetelmien vähennyspotentiaalit työkoneille (Nylund ym. 2016: 14).

Maa- ja metsätalousministeriön ylitarkastajan Veli-Pekka Reskolan mukaan tarve työkoneiden päästöjen vähentämiselle on kasvanut. Vähentämistarve on tunnistettu kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa ja erityisesti keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelmassa KAISUSSA. Maa- ja metsätalousministeriön mielenkiinnon kohteena ovat Reskolan mukaan erityisesti maatalouden työkoneet. (Reskola 2018.)

Koska maatiloilla tuotettu rikastettu biokaasu käy sellaisenaan myös tieliikenteen polttoaineeksi, tulisi maatiloilla tuotettu biokaasu osaltaan parantamaan myös liikennekäyttöön tarkoitetun biokaasun saatavuutta. Biokaasun käyttö maatilojen omien traktorien polttoaineena nostaisi maatilojen energiaomavaraisuutta, ja toisaalta alentaisi maatiloilla käytettävien työkoneiden päästöjä. (Reskola 2018.)

Reskolan (2018) mukaan maa- ja metsätalousministeriön VTT :llä tuottaman ”Kehityspolut työkoneiden biokaasutekniikkaan” raportin jatkotoimena on käynnistymässä Business Finlandin rahoittama ja työkonevalmistajien sekä VTT :n yhdessä toteuttama hanke. Hankkeen tarkoituksena on selvittää mahdollisuuksia kotimaisten, Vaihe V päästöstandardin mukaisten, kaasukäyttöisten työkoneiden valmistuksen aloittamiseen. VTT :n Petri Söderenan mukaan hanke on vasta alussa, eikä siitä vielä ole julkaistua materiaalia tarjolla (Söderena 2018).

7 POHDINTA

Kaasukäyttöisissä työkoneissa voidaan käyttää joko kipinäsytytteisiä kaasumootoreita tai kaksoispolttoainemootoreita. Kipinäsytytteisten kaasumootorien kaksoispolttoainemootoreita huonompi hyötysuhde lisää polttoaineenkulutusta, mutta dieselpolttoainetta ei tarvita lainkaan. Kipinäsytytteiset kaasumootorit perustuvat tällä hetkellä dieselmootoritekniikkaan, eikä niitä ole suunniteltu alusta saakka kaasupolttoaineen käyttöä ajatellen. Onkin todennäköistä, että kipinäsytytteisten kaasumootorien hyötysuhteen nosto ja siten polttoaineenkulutuksen laskeminen, on moottorien kehitystyön myötä mahdollista.

Kaksoispolttoainemootorien polttoaineensyöttöön ja pakokaasujen jälkikäsitteilyyn liittyvät tekniset ratkaisut ovat monimutkaisia, eikä tällä hetkellä ole varmuutta voidaanko kaksoispolttoainemootoreilla alittaa Vaihe V päästöstandardin päästörajoja. Kaksoispolttoainemootorit tarvitsevat kaasupolttoaineen lisäksi aina myös diesel- tai kaasuöljyä ja tämä pienentää kaasupolttoaineen käytöstä saatavia hyötyjä. Toisaalta kaksoispolttoainemootoreilla voidaan, esimerkiksi kaasupolttoaineen loppuessa, ajaa myös pelkällä diesel- tai kaasuöljyllä.

Kaksoispolttoainemootorien korkeampi hyötysuhde alentaa työkonen polttoaineenkulutusta, ja kyky toimia pelkällä diesel- tai kaasuöljyllä lisää koneen käytön joustavuutta. Nämä seikat tuskin kuitenkaan riittävät syyksi kyseisen moottorityypin yleistymiseen työkoneissa. Kaksoispolttoainemootorien teknologia on kipinäsytytteisiä stökiometrisiä moottoreita monimutkaisempaa, niin polttoaineensyötön, kuin pakokaasujen jälkikäsitteilynkin osalta. Monimutkainen tekniikka lisää tyyppillisesti työkonen rikkoutumisriskiä ja nostaa käyttökustannuksia.

Uuden moottoritekniikan kehittäminen vaatii runsaasti resursseja. Kipinäsytytteisten työkonemootorien kehitystyössä voidaan hyödyntää esimerkiksi tieliikenteen raskaan kaluston kipinäsytytteisten moottorien kehitystyöstä saatuja kokemuksia. Myös kaksoispolttoainemootorien osalta löytyy toimivaksi osoittautunutta teknologiaa ja suunnittelukokemusta, mutta lähinnä keskinopeiden moottorien osalta. Keskinopeisiin moottoreihin

liittyvää teknologiaa ei kuitenkaan suoraan voida hyödyntää työkoneluokan kaksoispolttoainemoottorien kehitystyössä, koska moottorien toimintaperiaate ja -olosuhteet poikkeavat toisistaan. Keskinopeiden kaksoispolttoainemoottorien kierrosalue on tyypillisesti kapea, jolloin palamisen optimointi ja siten pakokaasupäästöjen hallinta on laajalla kierrosalueella toimivia työkonemoottoreita helpompaa. (Söderena 2017: 15.)

On todennäköistä, että ne työkoneet, joihin Vaihe V päästöstandardin mukaisia kaasumootoreita ylipäättään aiotaan käyttää, tullaan tulevaisuudessa varustamaan kipinäsytytteillä stökiömetrisillä kaasumootoreilla. Kipinäsytytteisten stökiömetristen kaasumootorien hyötysuhdetta voidaan nostaa kehitystyön avulla ja niiden yksinkertaisempi tekniikka on vahvuus työkonekäytössä. Pakokaasujen jälkikäsitteily voidaan luultavasti toteuttaa kaasumootoreille suunnitellun ja työkoneeseen helpommin sijoitettavan kolmi-toimikatalysaattorin avulla, eikä diesel- tai kaasuöljyä tarvita lainkaan.

Työkoneiden päästölainsäädännön lähitulevaisuuden määrittää Vaihe V päästöstandardi. Kaasumootorien osalta hiilivetypäästöjen raja-arvojen määrittäminen tehdään muista moottoreista poikkeavalla tavalla, muilta osin kaasumootorien päästörajat vastaavat perinteisten työkonemoottorien päästörajoja.

On yllättävää, ettei työkoneiden hiilidioksidipäästöille ole tällä hetkellä olemassa min-käänlaisia päästörajoja. Tieliikenteen raskaalle kalustolle kehitteillä oleva hiilidioksidipäästöjen mittausmenetelmä laajenee tulevaisuudessa todennäköisesti koskemaan ainakin osaa työkoneista.

Työkoneita koskeva päästölainsäädäntö on vasta nyt Vaihe V päästöstandardin myötä päässyt vaiheeseen, jossa työkoneiden kaasumootorien tyyppihyväksyntä on mahdollista. Metaanin käyttö polttoaineena vähentää moottorin tuottamia hiukkaspäästöjä ja metaania sisältävän biokaasun käytöllä voidaan vaikuttaa esimerkiksi maatalouden tuottamien kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärään. Viimeistään silloin kun kasvihuonekaasupäästöjen rajoittaminen alkaa myös työkoneiden osalta, tulisi biokaasun kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärään liittyvät vaikutukset ottaa huomioon päästölainsäädäntöä uudistettaessa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tutkittiin kaasukäyttöisiin työkoneisiin soveltuva moottoritekniikkaa ja perehdyttiin työkoneita koskevan päästölainsäädännön nykytilaan ja tulevaisuuteen.

8.1 Kaasukäyttöisiin työkoneisiin soveltuva kaasumoottoritekniikka

Tehtyjen selvitysten perusteella voi työkoneisiin soveltuvaan kaasumoottoritekniikkaan liittyen vetää seuraavat johtopäätökset:

- Tieliikenteen raskaan kaluston kaasukäyttöiset ajoneuvot perustuvat kipinäsytytteisiin moottoreihin ja niissä käytettävien kipinäsytytteisten kaasumoottorien kehitystyöstä saatavaa synergiaetua voidaan jatkossa hyödyntää myös työkoneiden kaasumoottorien kehitystyössä.
- Kipinäsytytteisissä stökiometrisissä kaasumoottoreissa pakokaasujen jälkikäsittely voidaan todennäköisesti toteuttaa kaasumoottoreille suunnitellun metaanikaatalysaattorin sisältävän kolmitoimikatalysaattorin avulla. Kolmitoimikatalysaattorin sovittaminen työkoneeseen on kaksoispolttoainemoottorin vaatimaan isokoista pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmään yksinkertaisempaa.
- Työkoneluokan esisekoittumispalamiseen perustuvien kaksoispolttoainemoottorien pakokaasupäästöjen hallinta on ongelmallista ja tulee todennäköisesti aiheuttamaan vaikeuksia Vaihe V päästöstandardin päästörajojen alittamiseen liittyen.
- Kaksoispolttoainemoottorit tarvitsevat aina diesel- tai kaasuöljyä pilottipolttoaineena. Pilottipolttoaineen osuus on joissakin kuormitustilanteissa merkittävä ja tämä vaikuttaa kaksoispolttoainemoottorien tuottamiin pakokaasupäästöihin. Koska pilottipolttoaineen osuuden kasvu vähentää kaasupolttoaineen osuutta, vähenee myös kaasupolttoaineen käytöstä saatava hyöty.
- Osa Suomalaisista työkonevalmistajista suhtautuu kaasumoottorin käyttöön työkoneissa varauksellisesti. Vaihe V päästöstandardin vaatimien pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmien, sekä kaasupolttoainetankkien sijoittaminen nähdään ongelmallisina. Kaksoispolttoainemoottorien osalta työkonevalmistajat uskovat Vaihe V päästöstandardin päästörajojen tuottavan ongelmia.

8.2 Kaasukäyttöisiä työkoneita koskeva päästölainsäädäntö

Tehtyjen selvitysten perusteella voi biokaasukäyttöisiä työkoneita koskevaan päästölainsäädäntöön liittyen vetää seuraavat johtopäätökset:

- Vaihe V päästöstandardia edeltäneestä päästölainsäädännöstä puuttunut kaasukäyttöisten työkoneiden tyyppihyväksyntämahdollisuuden on hidastanut kaasukäyttöisten työkoneiden kehitystyötä EU:n alueella.
- Työkoneiden päästölainsäädäntö on tällä hetkellä siirtymävaiheessa. Kaasumootorilla varustettujen työkoneiden osalta siirtymävaihetta ei ole, koska Vaihe V päästöstandardi on ensimmäinen päästöstandardi, joka mahdollistaa kaasukäyttöisten työkoneiden tyyppihyväksynnän.
- Kaasupolttoaine otetaan Vaihe V päästöstandardissa huomioon hiilivetypäästöjen raja-arvon määrittämisen osalta, muuten kaasumootorien tulee täyttää muiden moottorityyppien kanssa yhtenevät pakokaasupäästöjen raja-arvot.
- Vaihe V päästöstandardi ei tällä hetkellä sisällä hiilidioksidipäästöjen rajoituksia. Hiilidioksidipäästöjen rajoittaminen on kuitenkin todennäköistä tulevaisuudessa. Tällöin biokaasun käytön kokonaiskasvihuonekaasupäästöjen määrää mahdollisesti vähentävä vaikutus tulisi huomioida työkoneiden päästölainsäädännössä.
- Tulevaisuudessa työkoneiden päästölainsäädännössä keskitytään todennäköisesti hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseen sekä pienikokoisten hiukkasten aiheuttamien haittojen vähentämiseen.
- Vaihe V päästöstandardin tulevaisuudesta tai sen korvaajasta ei ole vielä olemassa virallista tietoa, eikä esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen sääntelystä ole tehty päätöksiä. Seuraava Vaihe V päästöstandardiin liittyvä arviointi on tarkoitus tehdä vuonna 2020 ja silloin arvioidaan tarve asettaa uusia säänneltyjä päästökomponentteja.

9 YHTEENVETO

Uusiutuvien biopolttoaineiden, kuten biokaasun, käyttö mahdollistaa työkoneiden tuottamien kasvihuonekaasupäästöjen merkittävät vähentämisen. Biokaasulla toimivien työkoneiden tyyppihyväksyntä ei kuitenkaan ole ollut mahdollista Vaihe V päästöstandardia edeltäneen päästölainsäädännön voimassaoloaikana. Tyyppihyväksyntämahdollisuuden puuttuminen on hidastanut biokaasukäyttöisten työkoneiden yleistymistä EU:n alueella.

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia biokaasukäyttöisiä työkoneita koskevan päästölainsäädännön nykytilaa ja tulevaisuutta, sekä auttaa lukijaa ymmärtämään kaasukäyttöisten työkonemoottorien tekniikkaan pakokaasupäästöjen, pakokaasujen jälkikäsittelyn ja polttoaineensyötön osalta. Lisäksi työssä perehdyttiin työkoneissa käytettyihin polttoaineisiin.

Kaasupolttoaineella toimiva polttomoottori voidaan toteuttaa useammalla tavalla. Työkoneisiin soveltuu parhaiten kipinäsytytteinen stökiometrinen kaasumoottori sekä dieselpolttoainetta sytytyspolttoaineena käyttävä kaksoispolttoainemoottori. Kipinäsytytteisen stökiometrisen kaasumoottorin hyötysuhde on kaksoispolttoainemoottoria huonompi, mutta kipinäsytytteisen stökiometrisen kaasumoottorin vaatimat tekniset ratkaisut ovat yksinkertaisempia.

Kipinäsytytteinen stökiometrinen kaasumoottori käyttää polttoaineenaan pelkästään kaasua, jolloin esimerkiksi maataloudessa tuotetusta biokaasusta saadaan paras hyöty. Kaksoispolttoainemoottoria voidaan tarvittaessa käyttää pelkästään dieselpolttoaineella, tai kaasuöljyllä. Kaksoispolttoainemoottori ei kuitenkaan toimi ilman pilottipolttoaineena toimivaa dieselpolttoainetta tai kaasuöljyä, eikä täyttä energiaomavaraisuutta, esimerkiksi maataloudessa voida tällä tekniikalla saavuttaa.

Kipinäsytytteisen stökiometrisen Vaihe V päästöstandardin mukaisen kaasumoottorin pakokaasujen jälkikäsittelyssä riittää todennäköisesti kolmitoimikatalysaattori. Kaksoispolttoainemoottorin pakokaasujen jälkikäsittelyssä vaaditaan monimutkaisemman järjestelmän käyttöä ja työkonekäytössä ongelmaksi muodostuu tilaa vievän laitteiston

sovittaminen työkoneseen. Tällä hetkellä näyttää siltä, että ainakin kipinäsytytteisellä stökiömetrisellä kaasumootorilla on mahdollista alittaa Vaihe V päästöstandardin päästöraajat. Kaksoispolttoainemootorin osalta Vaihe V päästöstandardin päästörajojen alittaminen on todennäköisesti ongelmallista. Kummankin tekniikan käyttö työkoneissa vaatii jatkotutkimusta ja moottorien edelleen kehittämistä.

Vaihe päästölainsäädäntö on perinteisiä polttoaineita käyttävien työkonemootorien osalta siirtymävaiheessa. Kaasukäyttöisten työkonemootorien osalta siirtymävaihetta ei ole, koska Vaihe V päästöstandardi on ensimmäinen päästöstandardi, joka mahdollistaa kaasukäyttöisten työkonemootorien ja siten työkoneiden tyyppihyväksynnän. Vaihe V päästöstandardin mukaisten kaasumootorien hiilivetypäästöjen raja-arvot lasketaan, erityisesti näille moottoreille kehitetyn menetelmän avulla, muuten kaasumootorien täytyy alittaa kaikille työkonemootoreille määritetyt pakokaasupäästöjen raja-arvot.

Biokaasun käytön edut esimerkiksi maataloudessa käytettävien työkoneiden aiheuttamien kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen alentamisessa ovat merkittäviä. Tästä syystä kaasukäyttöisten työkoneiden lukumäärän lisääminen, esimerkiksi maataloudessa on tavoiteltavaa. Suomessa onkin käynnistymässä Business Finlandin rahoittama ja työkonemootoritehtaiden, sekä VTT:n yhdessä toteuttama hanke, jonka tarkoituksena on selvittää mahdollisuuksia kotimaisten, Vaihe V päästöstandardin mukaisten, kaasukäyttöisten työkonemootorien valmistuksen aloittamiseen.

Vaikka Vaihe V päästöstandardin tulevaisuudesta tai Vaihe V päästöstandardin korvaajasta ei ole vielä olemassa virallista tietoa, on todennäköistä, että työkoneiden päästölainsäädäntö keskittyy jatkossa hiilidioksidi- ja hiukkaspäästöjen alentamiseen. Seuraava Vaihe V päästöstandardiin liittyvä arviointi tehdään todennäköisesti vuonna 2020, ja silloin on tarkoitus arvioida päästölainsäädännön säänneltyjen päästökomponentteihin liittyvä kehitystarve. Viimeistään siinä vaiheessa, kun hiilidioksidipäästöt lisätään säänneltyihin päästökomponentteihin, tulisi biokaasun vaikutukset työkoneiden aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärään liittyen selvittää ja ottaa huomioon päästölainsäädännössä.

LÄHDELUETTELO

- Alamy (2018). *Modern natural gas engine cylinder head cross section*. [Verkkodokumentti]. [13.6.2018] Saatavissa: <<https://www.alamy.com/stock-photo-modern-natural-gas-car-engine-cylinder-head-cross-section-74001665.html>>.
- Ambarita, H. (2017). *Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode*. [Verkkodokumentti]. [20.7.2018]. Saatavissa :<<https://reader.els-vier.com/reader/sd/17DABA339259C7A04DD148839C29F6F1B68A412D45BFAED37B10E0808F3991045CCA3271641EDF68C56377C0559C8134>>.
- Bonnel, B., A. Perujo, A. Provenza & P. M. Villafuerte (2013). *Non road engines conformity testing based on PEMS*. [Verkkodokumentti]. [27.6.2018]. Saatavissa: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC86958/nrmm_pilot_program_report_final_online.pdf>.
- Bosch (2018). *Gasoline injection systems*. [Verkkodokumentti]. [14.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/gasoline-injection-systems-42304.html>>.
- Demirbas, A. (2008). *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. London: Springer-Verlag. 218 p. ISBN 978-1-84628-994-1.
- DieselNet (2001). *ISO 8178*. [Verkkodokumentti]. [26.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/iso8178.php>>.
- DieselNet (2013). *Nonroad Transient Cycle (NRTC)*. [Verkkodokumentti]. [27.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/nrtc.php>>.
- DieselNet (2013). *Nonroad Transient Cycle (NRTC)*. [Verkkodokumentti]. [11.7.2018]. Saatavissa: <<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/nrtc.php>>.

- DieselNet (2015). *EU: Fuels*. [Verkkodokumentti]. [29.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.dieselnet.com/standards/eu/fuel.php>>.
- DieselNet (2015). *EU: Fuels: Automotive Diesel Fuel*. [Verkkodokumentti]. [28.6.2018] Saatavissa: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/fuel_automotive.php>.
- DieselNet (2016a). *EU: Heavy-Duty Truck and Bus Engines*. [Verkkodokumentti]. [6.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>>.
- DieselNet (2016b). *EU: Nonroad Engines*. [Verkkodokumentti]. [6.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>>.
- Elsener, M., D. Ferri & O. Krösher (2017). *Methane oxidation over a honeycomb Pd-only three-way catalyst under static and periodic operation*. [Verkkodokumentti]. [24.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337317307208?via%3Dihub>>.
- EUR-Lex (1997). *Direktiivi 97/68/EY*. [Verkkodokumentti]. [6.6.2018]. Saatavissa: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:31997L0068>>.
- EUR-Lex (2004). *Directive 2004/26/EC*. [Verkkodokumentti]. [8.7.2018]. Saatavissa: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32004L0026>>.
- EUR-Lex (2009). *Directive 2009/30/EC*. [Verkkodokumentti]. [29.6.2018]. Saatavissa: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009L0030>>.
- EUR-Lex (2012). *Directive 2012/46/EU*. [Verkkodokumentti]. [8.7.2018]. Saatavissa: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0046>>.
- EUR-Lex (2013). *Asetus (EU) N:o167/2013*. [Verkkodokumentti]. [8.6.2018]. Saatavissa: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013R0167>>.

EUR-Lex (2016a). *Asetus EU/2016/1628*. [Verkkodokumentti]. [6.6.2018]. Saatavissa: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32016R1628>>.

EUR-Lex (2016b). *Asetus (EU)/2017/655*. [Verkkodokumentti]. [11.7.2018]. Saatavissa: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017R0655>>.

EUR-Lex (2016c). *Asetus (EU)/2017/654*. [Verkkodokumentti]. [18.7.2018]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/ELI/?eliuri=eli%3Areg_del%3A2017%3A654%3Aoj>.

Euroopan komissio (2018). *Komission delegoitu asetus 12.2.2018*. [Verkkodokumentti]. [23.7.2018]. Saatavissa: <<https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/initiative/170577/attachment/090166e5b87c53fa>>.

Euroopan Unioni (2018). *Directives on emissions from non-road mobile machinery*. [Verkkodokumentti]. [5.7.2018]. Saatavissa: <<http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/11209/attachments/1/translations/en/renditions/native>>.

European Commission (2016). *A new EU Regulation for engines in non-road mobile machinery (NRMM)*. [Verkkodokumentti]. [5.7.2018]. Saatavissa: <<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2015/wp29grpe/GRPE-73-06.pdf>>.

European Commission (2018). *Non-Road mobile machinery emissions*. [Verkkodokumentti]. [6.6.2018]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/non-road-mobile-machinery_fi>.

HDGAS (2018). *Development of aftertreatment strategy for NG fueled vehicle is a joint process: Catalyst researcher's aspect*. [Verkkodokumentti]. [24.6.2018]. Saatavissa: <<http://www.hdgas.eu/development-of-aftertreatment-strategy-for-ng-fueled-vehicle-is-a-joint-process-catalyst-researchers-aspect/>>.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engines Fundamentals*. New York: McGraw-Hill Inc. 930 p. ISBN 0-07-028637-X.

Ibrahim, M.M. (2017). *Performance and emissions analysis of natural gas-diesel dual fuel mode*. [Verkkodokumentti]. [20.7.2018]. Saatavissa: <https://www.jchps.com/issues/Volume%2010_Issue%204/20171026_052334_0230717.pdf>.

Ilmasto-opas (2018). *Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku*. [Online]. [21.7.2018]. Saatavissa: <<https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.htm>>.

International council of clean transportation (2016). *European stage V non-road emission standards*. [Verkkodokumentti]. [18.7.2018]. Saatavissa: <https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Stage-V_policy%20update_ICCT_nov2016.pdf>.

Janin, O., B. Bravo, U. Adam, P. Wilczek, P. Scherm, F. Diedrich & P.E. Blything (2017). *Frequently asked questions, EU Regulation 2016/1628*. [Verkkodokumentti]. [11.7.2018]. Saatavissa: <<http://cema-agri.org/sites/default/files/publications/2017.04.13%20NRMM%20Guide.pdf>>.

Jordbruks verket (2015). *Biogas Operation in Non-Road Machinery*. [Verkkodokumentti]. [6.6.2018]. Saatavissa: <<https://webbutiken.jordbruksverket.se/sv/artiklar/ra1523e.html>>.

Majewski, W.A. & H. Jääskeläinen (2018). [Verkkodokumentti]. [26.6.2018]. Saatavissa: <https://www.dieselnet.com/tech/catalyst_methane_oxidation.php>.

Majewski, W.A. (2005). *Selective Catalytic Reduction*. [Verkkodokumentti]. [24.6.2018]. Saatavissa: https://www.dieselnet.com/tech/cat_scr.php.

- Mansor, W. N. W. (2014). *Dual fuel engine combustion and emissions – an experimental investigation coupled with computer simulation*. Colorado State University. Department of mechanical engineering. Doctoral thesis.
- Massey Ferguson (2018). *MF 8600 sarjan traktorimoottori*. [Online]. [12.6.2018]. Saatavissa: <<http://int.masseyferguson.com/mf8600.aspx>>.
- NHO (2018). *Methane slip from gas engines*. [Verkkodokumentti]. [18.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.nho.no/siteassets/nhos-filer-og-bilder/filer-og-dokumenter/nox-fondet/dette-er-nox-fondet/presentasjoner-og-rapporter/methane-slip-from-gas-engines-mainreport-1492296.pdf>>.
- Niemi, S. (2018a). *Diesel- ja kaasumoottorit*. Vaasan yliopisto. Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. Kurssimateriaali.
- Niemi, S. (2018b). *Diesel- ja kaasumoottorit*. Vaasan yliopisto. Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. Kurssimateriaali: Supercharging 1.
- Niemi, S. (2018c). *Diesel- ja kaasumoottorit*. Vaasan yliopisto. Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. Kurssimateriaali: Supercharging 3.
- Niemi, S. (2018d). *Pako- ja savukaasujen puhdistustekniikan seminaari*. Vaasan yliopisto. Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. Kurssimateriaali.
- Niemi, S. (2018e). *Poltto- ja voiteluaineita koskeva erikoistyö*. Vaasan yliopisto. Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. Kurssimateriaali: Polttoaineet.
- Nylund, N-O., K. Sipilä, T. Mäkinen & P. Aakko-Saksa (2010). *Polttoaineiden laatu- ja porrastuksen kehittäminen*. [Verkkodokumentti]. [29.6.2018]. Saatavissa: <<https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2528.pdf>>.
- Nylund, N-O., P. Söderena, P. Rahkola (2016). *Työkoneiden CO₂ päästöt ja niihin vaikuttaminen*. [Verkkodokumentti]. [21.7.2018]. Saatavissa:

<<http://www.ym.fi/download/noname/%7BEC3AFE90-B3FC-446B-90C3-4A8B253B4256%7D/125900>>.

Partinfo (2018). *LPG Conversions & LPG Spark Plugs*. [Verkkodokumentti]. [14.6.2018]. Saatavissa: <<http://www.partinfo.co.uk/articles/150>>.

Reskola, Veli-Pekka (2018). *VL: Biokaasun käyttö maatalouden moottoripolttoaineena*. Sähköpostiviesti Sami Tuomistolle 18.05.2018

Showtimesdaily (2018). *Westport & Cummins Westport for NGVs*. [Verkkodokumentti]. [14.6.2018]. Saatavissa: <<http://www.showtimesdaily.com/news-articles/westport-cummins-westport-for-ngvs>>.

Söderena, Petri (2017). *Kehityspolut työkonien biokaasutekniikkaan*. VTT. Asiakasraportti VTT-CR-01044-17.

Söderena, Petri (2018). *Biokaasun käyttö maatalouden moottoripolttoaineena*. Sähköpostiviesti Sami Tuomistolle 05.06.2018

Suomen Biokaasuyhdistys (2017) *Lausunto Maa- ja metsätalousvaliokunnalle Valtioneuvoston selvityksestä (E 100/2017 vp) EU:n liikenteen vaihtoehtoisten polttoaineiden toimintasuunnitelmasta*. [Verkkodokumentti]. [27.7.2018]. Saatavissa: <http://www.biokaasuyhdistys.net/wp-content/uploads/2018/04/Biokaasuyhdistys_Lausunto-MmV_-Vaihtoehtoisten-polttoaineiden-toimintasuunnitelma.pdf>.

Takkinen, Henri (2018). *VS: VL: Biokaasun käyttö maatalouden moottoripolttoaineena*. Sähköpostiviesti Sami Tuomistolle 07.06.2018

Tuomaala, T. & T. Antila (2018). *SCR- katalysaattorien uudet urearuiskutusjärjestelmät*. Vaasan yliopisto. Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. Pako- ja savukaasujen puhdistustekniikan seminaari. Seminaariesitelmä.

- Turunen, R. & S. Niemi (2002). Polttomoottorit. Teoksessa: Poltto ja Palaminen, 585–624. Toim. R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit. ISBN 951-666-604-3.
- United Nations (2013). *Addendum 48 – Regulation No. 49 Revision 6 - Amendment 1*. [Verkkodokumentti]. [19.7.2018]. Saatavissa: <<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R049r6am1e.doc>>.
- Vilén, Outi (2018). *Biokaasun käyttö maatalouden moottoripolttoaineena*. Sähköpostiviesti Sami Tuomistolle 06.06.2018
- World Nuclear Association (2016). *Heat Values of Various Fuels*. [Verkkodokumentti]. [29.6.2018]. Saatavissa: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>>.