

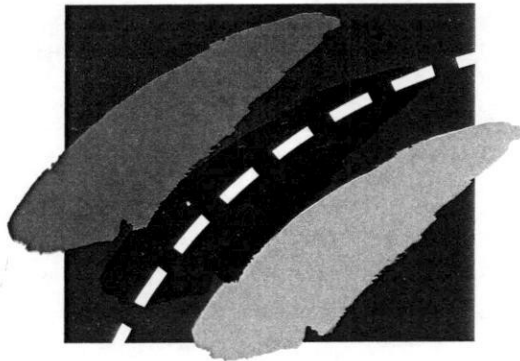
MOBILE
LIIKENTEEN ENERGIANKÄYTTÖ JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

MOBILE 210T

PIENMOOTTOREIDEN PÄÄSTÖT

Reduction of exhaust emissions from small utility engines

VAKOLAn tutkimusselostus 77



MOBILE

Jukka Ahokas
Esa Elonen

Maatalouden tutkimuskeskus
Maatalousteknologian tutkimuslaitos
1997

MOBILE 210T

Pienmoottoreiden päästöt

Reduction of exhaust emissions from small utility engines

VAKOLAn tutkimusselostus 77

Jukka Ahokas
Esa Elonen

VAKOLAn tutkimusselostus 77

Korjaus s. 49 taulukko 11. Taulukossa on HC-arvoissa virheitä. Henkilöautojen vuotuinen HC-päästö on 40 075 t/a (taulukossa 43 167) ja linja-autojen 2 618 (taulukossa 12 440).

Maatalouden tutkimuskeskus
Maatalousteknologian tutkimuslaitos

MOBILE

Liikenteen ja energiankäytön ja ympäristövaikutusten tutkimusohjelma

Koordinointi:

VTT ENERGIA/Moottoritekniikka

PL 1601, 02044 VTT

puh. (09) 4561, telefax (09) 460 493

Tutkimusohjelman johtaja: TkL Nils-Olof Nylund

TEKES

TEKNOLOGIAN
KEHITTÄMISKESKUS



LIIKENTEEN ENERGIANKÄYTÖN JA YMPÄRIS-
TÖVAIKUTUSTEN TUTKIMUSOHJELMA
VTT ENERGIA/Moottoritekniikka
PL 1601, 02044 VTT
puh. 09 4561, telefax 09 460 493

Julkaisun sarja ja numero
210T-2
VAKOLAn tutkimusselostus 77

Projektin tunnus:
MOBILE 210T

Julkaisu-aika:
1.9.1997

Julkaisun tekijät:
Ahokas Jukka ja Elonen Esa

Projektin nimi:
Pientyökoneiden päästöjen vähentäminen

Julkaisun nimike:
Pienmoottoreiden pakokaasupäästöt

Tiivistelmä:

Pientyökoneita käytetään ammattikäytössä metsä-, puutarha- ja kunnallisteknisissä töissä ja harraste- ja kotitaloustöissä. Vaikka näiden moottoritehot ovat alhaiset ja yksittäisen koneen kuluttama polttoainemäärä on vähäinen, koko maata ajatellen lukumäärä on merkittävä ja sitä kautta myös päästöt ovat merkittäviä. Maassamme on arvoitu olevan noin 1,4 miljoonaa siirrettävää tai käsikäyttöistä bensiinillä toimivaa pientyökoneita. Niiden vuotuisiksi polttoaineen kulutukseksi on arvioitu 39 milj. l, hiilivety-päästö on 3500, häkäpäästö 23400 ja typpioksidipäästö 100 tonnia vuodessa. Pientyökoneiden hiilivety- ja häkäpäästöt ovat suuruusluokaltaan yhtä suuret kuin katalyysaattorilla varustettujen henkilöautojen vastaavat päästöt.

Pientyökoneiden moottoreilta odotetaan halpuutta ja keveyttä. Tämän takia moottorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja päästöihin ei ole kiinnitetty paljoakaan huomiota. Monasti käyttäjä voi tai joutuu säätämään pienmoottorin kaasuttimen seossuhteen ja kaksitahtimoottoreissa sekoittamaan voiteluöljyn polttoaineeseen.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin pienmoottoreiden päästöjä kirjallisuustutkimuksen ja omien mittausten avulla. Moottoreiden kaasuttimien seossuhteet vaikuttavat voimakkaasti päästömääriin. Säätämällä seossuhteita laihaksi tai rikkaaksi vähennetään tai lisätään HC- ja CO-päästöjä 20 - 80 %. Samalla myös NO_x-päästöt muuttuvat, mutta ne ovat suuruusluokaltaan silti usein pieniä. Päästöjä voidaan vähentää myös katalyysaattoreilla, ne vaikuttavat päästöihin useita kymmeniä prosentteja.

Pienmoottoreiden päästöjä voidaan vähentää helposti ja huomattavasti, mutta se vaatii näiden moottoreiden päästöongelman tunnistamisen, päästötutkimusten tekemistä sekä päästörajojen käyttöönottoa. Tämä pakottaa valmistajat kehittämään vähäpäästöisempiä moottoreita. Tämä johtaisi myös kalliimpaan tekniikkaan, jolloin pientyökoneiden myyntihinnat kohoaisivat.

Ruohonleikkuun ja maisemanhoidon osalta pitää myös harkita niiden tarpeellisuutta sekä kasvien kasvatustapoja. Oikeilla lajikkeilla (lyhytkasvuinen) ja pienillä lannoitemäärillä hoitotarvetta voidaan vähentää. Samoin käyttötarkoitus vaikuttaa hoitotarpeeseen. Esimerkiksi niitty tarvitsee vähemmän hoitoa kuin nurmikko.

Julkaisija:
Maatalouden tutkimuskeskus, Maatalousteknologian tutkimuslaitos

Avainsanat:
Pienmoottorit, moottorisahat, ruohonleikkurit,
päästöt

ISSN
0782-0054

ISBN

Tilausosoite:
MTT/VAKOLA
Vakolantie 55
03400 Vihti

Luokitus (UDK):

Kieli:
Suomi

Sivuja:



RESEARCH PROGRAMME ON ENERGY AND THE ENVIRONMENT IN TRANSPORTATION
VTT ENERGY / Engine Technology
P:O. Box 1601, FIN-02044 VTT
tel +358-0-4561, fax +358-0-460493

Publication series, volume number or report code:
210T-2
Study report

Project code:
MOBILE 210T

Published
1.9.1997

Author(s):
Ahokas Jukka and Elonen Esa

Project name:
Emission Reduction in Small Utility Machines

Name of publication:
Reduction of Exhaust Emission from Small Utility Engines

Abstract:

Small utility engines are used in professional work in forestry, agriculture and in municipalities and in hobbies and household work. Although engine powers of these engines are low and the consumed fuel of a single engine is slight, the number of these machines is large and therefore their emissions are significant. The estimated number of movable or hand held gasoline engines in our country is about 1.4 million units.

Their annual fuel consumption is estimated to be 39 million liters, their hydrocarbon emission 3500, carbon monoxide emission 23 400 and emissions of oxides of nitrogen 100 tons. The hydrocarbon and carbon monoxide emissions are as high as the corresponding emissions of passenger cars which are equipped with catalysers.

The small utility engines are expected to be cheap and light. For this reason the engines have simple construction and not much attention has been paid to their emissions. Many times the user can or must adjust the air-fuel ratio of the engine carburetor and in two-stroke engines he must mix the lubricating oil into the fuel.

This study was done to find out the emissions of small utility engines as found in literature and also with own measurements. The air-fuel ratio has a strong influence on emissions. By adjusting the ratio lean or rich it is possible to reduce or increase HC and CO emissions 20 - 80%. At the same time also the NO_x emissions change but their magnitude is often low in any case. It is also possible to reduce small engine emissions with catalyst, their effect on emissions is several tens of percents.

It is possible to reduce small engine emissions easily and remarkably but it calls for recognition of their emissions, emission studies and limits for emissions. This would force the manufacturers to design low-emission engines. This would also lead to more expensive technology, which would raise their prices.

As to lawn mowing and environmental work one must also consider their necessity and the way the plants are grown. With proper plant selection, e.g. short varieties, and with small amounts of fertilizers the need for care can be decreased. Also the usage of the vegetation influence on the need for care, e.g. a meadow requires less care than a lawn.

Publisher:
Agricultural Research Centre of Finland, Institute of Agricultural Engineering

Keywords:
Small utility engines, chainsaws, lawn mowers,
exhaust emissions

ISSN
0782-0054

ISBN

Address for orders:
MTT/VAKOLA
Vakolantie 55
03400 Vihti

Classification (UDK):

Language:
Finnish

Pages:

ALKULAUSE

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää pientyökoneissa käytettävien moottoreiden päästöjä ja niiden merkitystä maassamme. Yksittäisten pientyökoneiden moottoreiden polttoaineen kulutukset ja päästöt ovat pieniä, mutta niiden suuri lukumäärä tekee koko maan tasolta tarkasteltuna päästömäärät merkittäviksi. Tämä tutkimus on pientyökoneiden osalta ensimmäinen maassamme tehty laajempi näiden moottoreiden päästöselvitys.

Tutkimuksen rahoitus on saatu Kauppa- ja teollisuusministeriön, nyttemmin Teknologian Kehittämiskeskuksen energiateknologian MOBILE tutkimusohjelmasta.

Työ aloitettiin vuonna 1994, mutta lähinnä analysointien toiminnassa esiintyneiden ongelmien takia valmistuminen on viivästynyt alkuperäisestä aikataulusta. Työhön ovat osallistuneet MTT/VAKOLAn lisäksi Neste Öljytutkimus, Oy Electrolux Ab, Promotor Oy sekä Oy Elfving Ab. Yhteistyötahoille haluamme osoittaa kiitokset hyvästä yhteistyöstä.

Vihti 28.7.1997

Tekijät

TERMEJÄ JA SYMBOLEJA

BE95ER	95 oktaaninen Neste Futura bensiini
BE98ER	98 oktaaninen Neste Futura bensiini
CO	Hiilimonoksidi eli häkä
CO-päästö	Häkäpäästö
HC	Hiilivety, yleinen merkintätapa, jolla tarkoitetaan hiilivetyjä yksilöimättä tarkemmin kemiallista koostumusta
HC-päästö	Hiilivety päästö
Hiilivety päästö	Polttoaineet ovat erilaista hiilivedyistä muodostuneita. Täydellisessä palamisessa ne muuttuvat hiilidioksidiksi ja vedeksi. Palaminen on yleensä epätäydellistä, jolloin pakokaasuissa on mukana palamattomia hiilivetyjä. Näiden kokonaismäärä pystytään mittaamaan liekki-ionisaatioanalyysointilla. Hiilivety-yhdisteitä on olemassa hyvin paljon ja niiden haitallisuus vaihtelee kemiallisen koostumuksen mukaan. Eri hiilivetyjen analysoiminen vaatii erikoisanalysointit.
Hiukkaspäästö	Palamisessa syntyy nokipartikkeleita, sumua ja pisaroita. Nämä kaikki muodostavat hiukkaspäästön.
Häkäpäästö	Hiilivedyn palaminen voi jäädä kesken tai palamisilmaa ei ole riittävästi, jolloin hiilivety päästöjen lisäksi pakokaasuissa on hiilimonoksidia eli häkää. Usein häkä- ja hiilivety päästöt esiintyvät yhtä aikaa.
Ilmakerroin	Ilmakerroin λ ilmaisee moottorin käyttämän ilmamäärän suhteen teoreettisesti tarvittavaan ilmamäärään.
pkb	Neste Futura Green-pienmoottoribensiini
Laiha seos	Palamisessa käytetään ilmaa enemmän kuin mitä teoreettisesti tarvitaan. Ilmakerroin λ on tällöin yli yhden. Laiha seos alentaa häkä- ja hiilivety päästöjä mutta lisää typenoksidien päästöjä.
NO	Typpioksidi
NO ₂	Typpidioksidi
NO _x	Typenoksidi, tällä tarkoitetaan typen oksidien kokonaismäärää ja päästö sisältää typpioksidia, typpidioksidia ja mahdollisesti jotain muutakin typen oksidia. Typen oksidien kokonaismäärä ja typpioksidin ja typpidioksidin osuudet analysoidaan kemiluminesenssianalysointilla.
NO _x -päästö	Typen oksidien päästö.
Rikas seos	Palamisessa käytetään ilmaa vähemmän kuin mitä teoreettisesti tarvitaan. Ilmakerroin λ on tällöin alle yhden. Ottomoottori toimii yleensä parhaiten hieman rikkaalla seoksella.
Seossuhde	Yhden polttoaine kg:n polttamiseen käytetty ilmamäärä. Bensiiniä käytettäessä tarvitaan luokkaa 14 - 16 kg ilmaa yhtä bensiini kg kohti.
Stökiometrinen	Palamisilmaa on juuri teoreettisen määrän verran. Ilmakerroin λ on tällöin yksi.
Typenoksidit	NO _x
Typen oksidien päästö	NO _x -päästö, palamisilmassa oleva typpi reagoi hapen kanssa, kun lämpötila on korkea ja kun runsaasti happea on saatavilla. Tällöin muodostuu typen oksideja.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Alkulause

Termejä ja symboleja

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	13
2	LAITTEISTOT JA MITTAUSMENETELMÄT	13
	2.1 Koemoottorit	13
	2.2 Polttoaineet ja kaasuttimien säädöt	15
	2.3 Katalysaattorit	17
	2.4 Tehonmittaus	18
	2.5 Päästömittaus	18
	2.6 Tulosten laskeminen ja ilmoittaminen	20
	2.6.1 Palaminen, seossuhde ja ilmakerroin	21
	2.6.2 Häkäpäästö, CO	22
	2.6.3 Hiilivety päästöt, HC	23
	2.6.4 Typen oksidit, NO _x	23
	2.6.5 Ominaispäästö	23
	2.7 Huomioita pienmoottoreiden mittausmenetelmistä	24
	2.7.1 Tehonmittausjaru	24
	2.7.2 Polttoaineenkulutuksen mittaaminen	25
	2.7.3 Seossuhteen mittaaminen	26
	2.7.4 Kuormitusykladit	26
	2.7.5 Päästömittauslaitteisto	27
3	NELITAHTISTEN PIENMOOTTORIEN PÄÄSTÖT	27
	3.1 Sprint- ja Europa-moottoreiden päästöt	28
	3.2 Katalysaattorin vaikutus Sprint-moottorin päästöihin	30
	3.3 Seossuhteen vaikutus päästöihin	30
	3.4 Ajoituksen vaikutus päästöihin	32
	3.5 Pakokaasujen ilmastuksen vaikutus päästöihin	32
	3.6 Pakokaasujen kierrätyksen vaikutus päästöihin	33
	3.7 Katalysaattorien vaikutus päästöihin	33
	3.8 Käynnistyksen vaikutus päästöihin	34
	3.9 Nelitahtisten pienmoottoreiden päästöjen vähentäminen	34
4	KAKSITAHTISTEN PIENMOOTTORIEN PÄÄSTÖT	35
	4.1 Seossuhteen vaikutus	36
	4.2 Polttoaineen vaikutus	38
	4.3 Öljyn vaikutus päästöihin	40
	4.4 Katalysaattorin vaikutus	43
	4.5 Moottorin rakenteen vaikutus	46
	4.6 Päästöjen vähentäminen	46
5	TULOSTEN MERKITYS JA YHTEENVETO	47
6	SAMMANFATTNING	50
	Lähdeluettelo	52

1 JOHDANTO

Pienmoottoreita käytetään ammattikäytössä metsä-, puutarha- ja kunnallisteknisissä töissä, esimerkiksi puiden kaadossa, ruohon leikkuussa ja metsän raivauksessa. Tämän lisäksi niitä käytetään suuria määriä harraste- ja kotitaloustöissä, puiden kaatoon ja katkaisuun, ruohon leikkuuseen, pensasaitojen hoitoon yms. Vaikka näiden koneiden moottoritehot ovat alhaiset ja yksittäisen koneen kuluttama polttoainemäärä on vähäinen, koko maata ajatellen lukumäärä on merkittävä ja sitä kautta myös päästöt ovat merkittäviä. Maassamme on arvioitu olevan n 1,4 miljoonaa siirrettävää tai käsikäyttöistä bensiinillä toimivaa pientyökoneita. Niiden vuotuiseksi polttoaineen kulutukseksi on arvioitu 39 milj. l, joka on 2 % henkilöautojen polttoaineen kulutuksesta. Hiilivety päästö on 3500, häkä- 23400 ja typpioksidi- 100 tonnia vuodessa. Pientyökonekannan vuotuiset hiilivety- ja häkäpäästöt ovat suuruusluokaltaan yhtä suuret kuin katalyysaattorilla varustetun henkilöautokannan vastaavat päästöt ja selvästi suuremmat kuin lento-, laiva- ja rautatieliikenteen yhteen lasketut hiilivety- ja häkäpäästöt.

Pientyökoneiden moottoreilta odotetaan halpuutta ja keveyttä. Tämän takia moottorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja päästöihin ei ole kiinnitetty paljoakaan huomiota. Monasti käyttäjä voi tai joutuu säätämään pienmoottorin kaasuttimen seossuhteen ilman kunnollisia ohjeita ja mittalaitteita, jolloin ilma-polttoaineseoksen pitoisuudet vaihtelevat merkittävästi. Kaksitahtisissa moottoreissa voiteluöljy sekoitetaan usein polttoaineeseen. Tämä tehdään joko huoltamoilla tai käyttäjä tekee sen itse. Etenkin jälkimmäisessä tapauksessa öljyn määrä bensiinissä voi vaihdella huomattavasti.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin pienmoottoreiden päästöjä kirjallisuustutkimuksen ja omien mittausten avulla. Mittauksissa pyrittiin selvittämään, miten erilaiset kaasuttimen säädöt, erilaiset voiteluainesuhteet ja voiteluaineet sekä erilaiset bensiinilaadut vaikuttavat päästöihin.

Tämä tutkimus on osa Teknologian Kehittämiskeskuksen energiateknologian MOBILE tutkimusohjelmaa.

2 LAITTEISTOT JA MITTAUSMENETELMÄT

2.1 Koemoottorit

Tässä tutkimuksessa mitattiin kahden nelitahtisen ottomoottorin sekä kolmen kaksitahtisen ottomoottorin pakokaasupäästöjä. Nelitahtimoottoreista toinen oli tyypiltään sivuventtiilimoottori ja toinen kansiventtiilimoottori. Sivuventtiilimoottorin päästöt mitattiin sekä katalyysaattorin kanssa että ilman.

Kaksitahtimoottoreista kaksi mitattiin sekä ilman katalyysaattoria että katalyysaattorin kanssa vaihtamalla normaalin äänenvaimentimen tilalle katalyysaattorilla varustettu vaimennin. Moottoreiden tekniset tiedot ovat taulukossa 1.

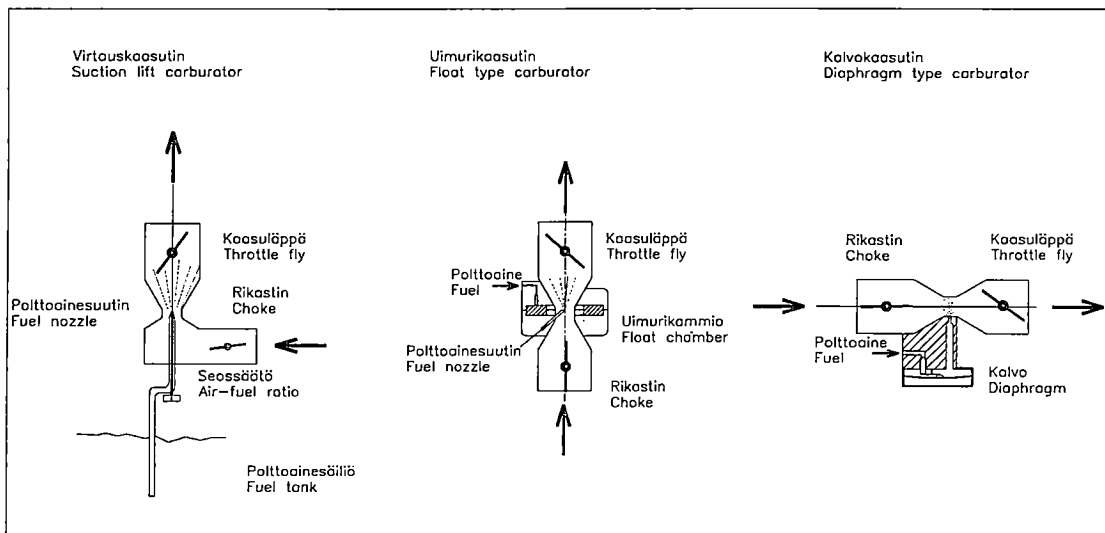
Taulukko 1. Valmistajien ilmoitusten mukaiset moottoreiden tekniset tiedot.
Table 1. Specifications of the engines as stated by the manufacturers.

Merkki ja malli <i>Make and model</i>	Sylinteri-tilavuus <i>Cylinder volume</i> cm ³	Nimellisteho <i>Rated power</i> kW	Suurin pyörimisnopeus <i>Maximum speed</i> r/min	Toimintatapa ja rakenne <i>Type and construction</i>	Kaasutintyyppi <i>Type of carburator</i>
Briggs & Stratton Europa	147	3,7	-	4-tahti, kansi-venttiilimoottori <i>4-stroke, overhead valves</i>	Walbro LMS uimurikaasutin <i>Float type carburator</i>
Briggs & Stratton Sprint 375	147	2,8	-	4-tahti, sivu-venttiilimoottori <i>4-stroke, side valves</i>	Pulsa-Jet virtauskaasutin <i>Suction lift carburator</i>
Stihl 026	49	2,6	15 000	2-tahti <i>2-stroke</i>	Walbro WT 194 kalvokaasutin <i>Diaphragm type</i>
Jonsered 2036	36	1,4	13 000	2-tahti <i>2-stroke</i>	Walbro WT 239 kalvokaasutin <i>Diaphragm type</i>
Husqvarna 242	42	2,3	15 500	2-tahti <i>2-stroke</i>	Walbro HDA 98 kalvokaasutin <i>Diaphragm type</i>

Pienmoottoreiden kaasuttimet ovat tyypiltään virtaus-, uimuri- tai kalvokaasuttimia, kuva 2. Imukaasuttimessa kaasuttimen kurkun alipainetta voidaan käyttää myös polttoaineen siirtoon säiliöstä kaasuttimeen, jolloin varsinaista polttoainepumppua ei tarvita. Tällöin polttoaineen pinnan korkeus säiliössä vaikuttaa myös seossuhteeseen. Virtauskaasuttimissa käytetään tämän takia monasti välisäilötä, jonka polttoaineen pinta pidetään polttoainepumpun avulla tasaisena. Uimurikaasuttimessa uimuri pitää polttoaineen pinnan tasaisena sulkemalla ja avaamalla neulaventtiiliä. Uimurikaasutinta käytettäessä polttoainesäiliön pitää olla kaasutinta ylempänä tai polttoainejärjestelmässä pitää olla polttoainepumppu. Kalvokaasutin sopii hyvin moottorisahakäyttöön, koska siinä moottori toimii yhtä hyvin kaikissa asennoissa. Kaasuttimen kalvoon vaikuttaa toiselta puolelta kurkun alipaine sekä jousikuorma ja toiselta puolelta ilmanpaine. Tämä säättää polttoaineen virtausta sulkemalla ja avaamalla neulaventtiiliä. Moottorisahakäytössä kalvokaasuttimen yhteydessä on usein kalvopumppu, joka kampikammion painevaihtelun avulla pumppaa polttoaineen kaasuttimeen.

Pienmoottoreiden kaasuttimet ovat edellä esitettyjä periaatteita monipuolisimpia ja niissä on usein sekä tyhjäkäyntiseoksen että normaalin käyntiseoksen säätömahdollisuus sekä tyhjäkäynnin pyörimisnopeuden säätö. Kaasutin- ja moottorityypistä riippuen

kaasuttimille on omat perussäätönsä ja hienosäätö tehdään usein käyttötuntuman mukaan. Uusimmissa kaasuttimissa säätömahdollisuuksia on vähennetty, jolloin kaasutinta ei voida enää säätää täysin väärin. Koemootoreista Husqvarnan ja Jonsere-din kaasuttimen säätömahdollisuuksia oli rajoitettu. Kaasuttimet olivat ns. 'semi-fix' malleja, joissa polttoainevirtauksesta 90 % oli kiinteää ja 10 % oli käyttäjän säädettävissä. Moottorisahojen säätöohjeet on lähes aina annettu käyttöohjekirjassa. Ruohonleikkureiden ja jyrshinten kaasuttimien säätöohjeita ei useinkaan ole käyttöohjeissa. Käytön aikainen tärinä voi aiheuttaa säätöruuvien kiertymisen itsestään, samoin suuttimien kuluminen muuttaa seossuhteita. Myös ilmanpaine, lämpötila, kosteus ja polttoaineen laatu vaihtelevat ja vaikuttavat moottorin toimintaan. Näiden syiden takia kaasuttimen seosta joudutaan käytön aikana säätämään.



Kuva 1. Pienmoottoreiden kaasutintyyppejä.

Figure 1. Carburetor types used in small utility engines

2.2 Polttoaineet ja kaasuttimien säädöt

Kokeissa polttoaineina käytettiin henkilöautoille tarkoitettuja 98- ja 95-oktaanisia bensiinejä (BE95ER ja BE98ER) sekä pienmoottoreille tarkoitettua pienmoottoribensiiniä (pkb). Henkilöautobensiinit olivat ns. reformuloituja laatuja eli tavalliseen bensiiniin verrattuna niissä on vähemmän rikkiä ja bentseeniä. Palamista tehostetaan pienellä happilisäyksellä. Pienmoottoribensiini on tarkoitettu esimerkiksi moottorisahoihin, ruohonleikkureihin ja tämän tyyppisiin koneisiin. Pienmoottoribensiinin koostumuksella on haluttu vähentää tyypillisiä pienmoottoreiden haittatekijöitä. Pienmoottorikäytössä käyttäjä joutuu paljon läheisempään kosketukseen sekä pako-kaasuihin että tankatessa bensiinihöyryihin. Toisiin koebensiineihin verrattuna pienmoottoribensiini ei sisällä happea eikä bentseeniä. Hermostoon vaikuttavia aromaattisia hiilivetyjä ja limakalvoja ärsyttäviä olefiineja siinä on hyvin vähän. Moottori- ja raivaussahojen polttoainesäiliöt ovat yleensä laitteen rungossa, jolloin käytössä ja etenkin kesäaikaan polttoaineen lämpötila kohoaa huomattavan korkeaksi. Pienmoottoribensiinin etuna on vähäinen höyrystyminen, joka vähentää hiilivetyaltistusta. Koepolttoaineet eivät sisältäneet lyijyä eivätkä sitä korvaavia lisäaineita.

Kaikki koepolttoaineet poikkesivat siten ns. tavallisista bensiinilaaduista ja niille oli ominaista tavanomaista bensiiniä puhtaampi palaminen. Polttoaineiden tekniset tiedot ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Kokeissa käytettyjen polttoaineiden tekniset tiedot.
Table 2. Technical specifications of test fuels.

Bensiini <i>Gasoline</i>	C/H massasuhde <i>C/H mass ratio</i>	H/C atomisuhde <i>H/C atomic ratio</i>	O/C atomisuhde <i>O/C atomic ratio</i>	Teoreettinen ilman- tarve kg ilma/kg ben- siini <i>Theoretical air demand kg air/kg fuel</i>
Pienmoottoribensiini <i>Power tool gasoline</i> pkb	5,17	2,30	0,00	15,2
BE95ER	6,28	1,90	0,019	14,2
BE98ER	6,38	1,87	0,019	14,2

Kaksitahtimoottoreiden polttoaineisiin sekoitettiin voiteluöljyä seuraavasti:

- BE98ER ja BE95ER, voiteluaineena 2% ja 4% mineraaliöljyä (Esso Special 2T) tai 2% ja 4% synteettistä öljyä (Motul 600-2T)
- pienmoottoribensiini (pkb), voiteluaineena 2% synteettistä, pienmoottoribensiiniä varten tarkoitettua öljyä (OK Kristal 2T-öljy)

Kaksitahtimoottorin öljyille on omat erityisvaatimuksensa, sen lisäksi että niiden on voideltava moottori kunnolla, niiden myös pitää palaa polttoaineen kanssa vähäpäästöisesti. Polttoaineen palamiseen ja päästöihin vaikuttaa siten myös voiteluaineen ominaisuudet. Koetulokset voivat siten muuttua voiteluöljymerkin tai -mallin vaihtuessa.

Kaksitahtimoottorien mittauksessa käytettiin laihaa, normaalia sekä rikasta seossuhdetta. Seossuhde muutettiin säätämällä kaasuttimen pääsuutinruuvia kumpaankin suuntaan käyttöohjeen mukaisesta perusasetuksesta. Moottorien perusasetus säädettiin pyörimisnopeusmittarin avulla käyttöohjeiden mukaisesti. Perussäädössä käytettiin BE98ER-bensiiniä, jossa voiteluaineena oli 2 % mineraaliöljyä. Seossuhde ei saa olla niin laiha, että valmistajan sallima suurin pyörimisnopeus ylitettäisiin. Tämä säätötapa ei siten anna tiettyä seossuhdetta, vaan seossuhde määräytyy suurimman sallitun nopeuden mukaan. Pyörimisnopeusmittareita on käytössä hyvin varustetuissa huoltopisteissä. Käyttäjän säätäessä seossuhdetta hienosäätö joudutaan tekemään käyttötuntuman mukaan. Sahat olisi voitu säätää seossuhteen mukaan, mutta silloin säätö ei olisi vastannut käytäntöä. Säätäminen rikkaalle ja laihalle antoi eri moottoreissa erisuuren seossuhteen muutoksen, jolloin säädön aiheuttamat erot ovat eri moottoreilla erisuuruiset. Husqvarnan ja Jonseredin moottoreiden seossuhteiden säätöjä oli uusimman suuntauksen mukaisesti rajoitettu, jolloin seoksia ei voitu säätää hyvin rikkaaksi tai laihaaksi. Täten maininta rikas, normaali tai laiha säätö ovat eri moottoreilla erisuuria.

Seossuhteen säätö vaikuttaa moottorin suurimpaan pyörimisnopeuteen, polttoaineen kulutukseen, suurimpaan tehoon ja sitä vastaavaan moottorin nopeuteen. Käytettäessä

laihaa seosta vapaa sekä suurimman tehon pyörimisnopeus kasvavat ja vastaavasti rikasta seosta käytettäessä ne alenevat. Päästöt mitattiin siten, että BE98ER-bensiinillä 2 % mineraaliöljyseoksella tehdyn perussäädön jälkeen polttoaineita vaihdettiin säätöjä enää muuttamatta. Tällöin kaasuttimen säätö pysyi samana eri polttoaineita käytettäessä.

Seossuhde vaikuttaa hyvin selvästi ja voimakkaasti päästöihin. Rikas seos aiheuttaa suuret CO- ja HC-päästöt sekä pienet NO_x-päästöt. Rikasta seosta käytettäessä palamisilmaa on teoreettista määrää vähemmän ja osa polttoaineesta jää palamatta, jolloin CO- ja HC-päästöt lisääntyvät. NO_x-päästöt vastaavasti alenevat, koska palamislämpötila alenee ja seoksessa ei myöskään ole ylimääräistä happea.

Seosta laihennettaessa palamisilmaa tulee enemmän ja CO- ja HC-päästöt vähenevät. Palamislämpötilan nousu ja ylimääräinen ilma aikaansaavat NO_x-päästöjen lisääntymisen. Seosta ei voida laihentaa rajattomasti, koska laiha seos aiheuttaa liian korkean pyörimisnopeuden ja myös palamishäiriöitä ilmaantuu, jolloin taasen HC päästöt lisääntyvät.

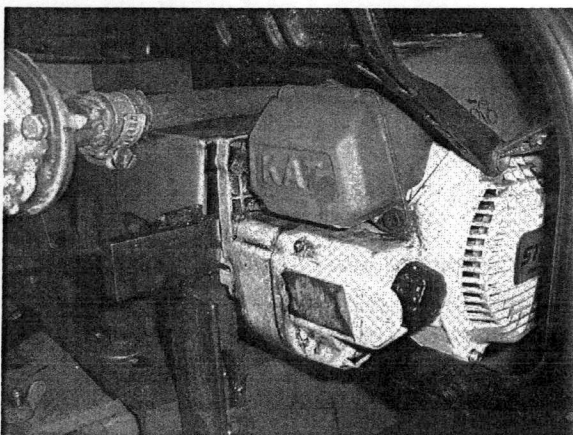
2.3 Katalysaattorit

Koemoottoreiden katalysaattorit vähensivät kahta tai kolmea päästökomenttia katalysaattorissa tapahtuvan jälkipalamisen avulla. Ne asennettiin normaalin äänenvaimentimen tilalle. Katalysaattorissa tapahtuva jälkipalaminen kohottaa pakokaasujen lämpötilaa ja mitä rikkaampi seos on, sitä enemmän poltettavia kaasuja on ja sitä korkeampia ovat lämpötilat. Liian korkea lämpötila aiheuttaa katalysaattorin palamisen. Tämän takia rikkaita seoksia pitäisi välttää. Katalysaattorin kanssa on käytettävä lyijytöntä polttoainetta, koska lyijy reagoi katalyytin kanssa tuhoten katalysaattorin.

Nelitahtisen moottorin katalysaattoriin oli yhdistetty pakokaasujen ilmastus, jossa ylimääräistä ilmaa puhallettiin pakosarjaan.

Taulukko 3. Koemoottoreiden katalysaattoreiden vaikutus päästöihin, tiedot saatu käyttöohjeista.

Table 3. The effect of catalyst on emissions, information is taken from engine manuals.



Kuva 2. Stihl moottorisahan katalysaattori.
Figure 2. Catalyst on Stihl chain saw

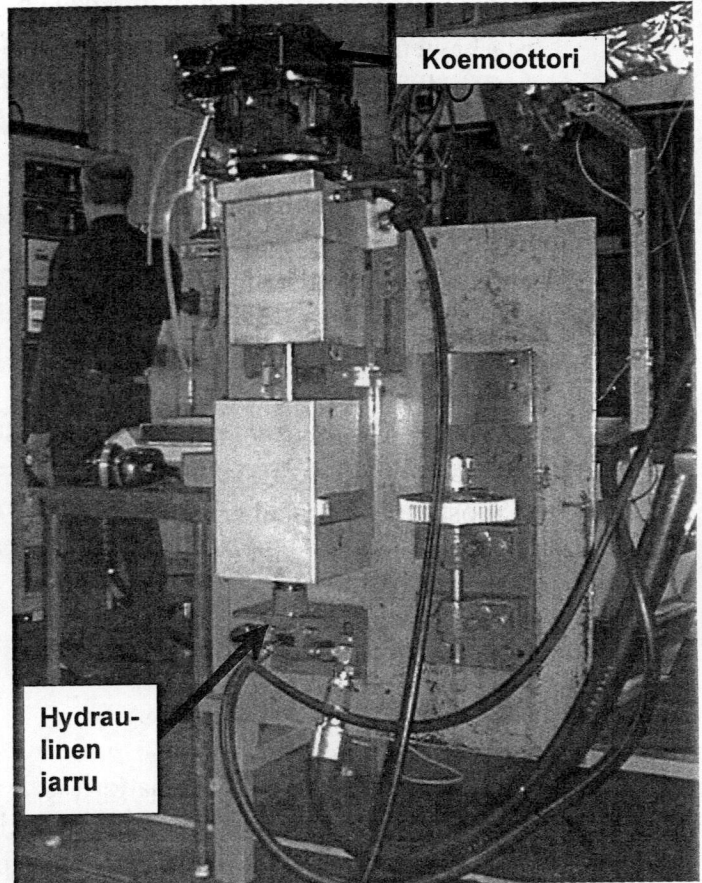
Moottori <i>Engine</i>	Vaikutus <i>Effect on emissions</i>
Briggs & Stratton	Ei tietoja <i>No information</i>
Husqvarna 242	HC, NO ja aldehydipäästöt <i>HC, NO and aldehyde emissions</i>
Stihl 026	HC ja CO päästöt <i>HC and CO emissions</i>

2.4 Tehonmittaus

Kaikkien moottoreiden tehot mitattiin samalla öljyhydraulisella tehojarrulla. Kuormitus aikaansaatiin kuristamalla moottorin pyörittämän hydraulipumpun paluuvirtausta. Kuvassa 3 on moottori koepenkkiin asennettuna.

Kaksitahtimoottoreiden pyörimisnopeus alennettiin hihnavoimansiirron avulla hydraulipumpulle sopivaksi. Alennus tapahtui suhteessa 3:1. Nelitahtimoottorit kiinnitettiin suoraan hydraulipumppuun. Teho laskettiin hydraulipaineen, pyörimisnopeuden sekä pumpun hyötysuhteen avulla.

Polttoaineen kulutus mitattiin sähköisellä tarkkuusvaa'alla.

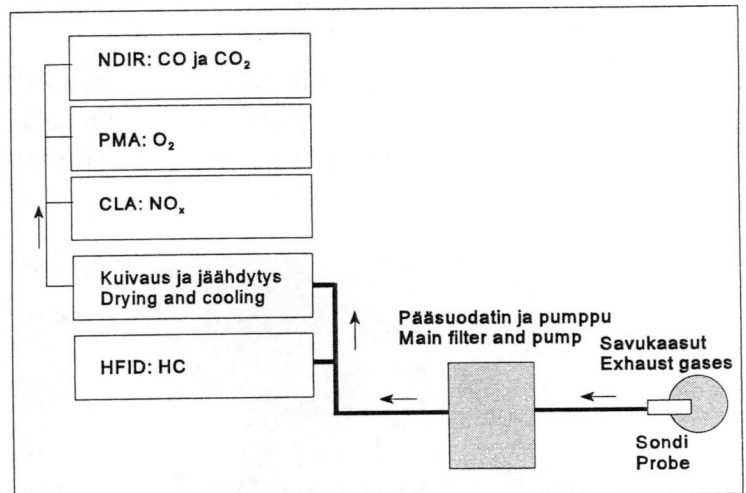


Kuva 3. Moottori koepenkkiin asennettuna
Figure 3. Engine and test bench. The test engine (on top) is connected to a hydraulic brake.

2.5 Päästömittaus

Pienmoottoreiden päästömittausmenetelmiä on SAE J1088 standardissa ja ISO 8178 standardisarjassa. Päästömittausstandardeissa on määritelty mittalaitteiden tyypit ja mittausmenetelmät. Tämän tutkimuksen mittauslaitteisto on standardien mukainen kaasumaisten päästöjen mittauslaitteisto. Päästömittauslaitteiston periaate on kuvan 4 mukainen. Päästöt analysoitiin seuraavilla analysaattoreilla:

palamattomat hiilivedyt:
liekki-ionisaatioanalysaattori, analyysi määristä savukaasuista



Kuva 4. Päästömittauslaitteiston periaate, NDIR = infrapunaanalysaattori, PMA = paramagneettinen analysaattori, CLA = kemiluminesenssianalysaattori, HFID = liekki-ionisaatioanalysaattori

Figure 4. Principle of the emission measuring system, NDIR= infrared analyzer, PMA= paramagnetic analyzer, CLA= chemiluminescent analyzer, HFID= heated flame ionization detector

- typen oksidit: kemiluminesenssianalysointilaite, analyysi kuivista savukaasuista
- hiilimonoksidi ja -dioksidi: infrapuna-analysointilaite, analyysi kuivista savukaasuista
- happi: paramagneettinen analysointilaite, analyysi kuivista savukaasuista

Näytteenottolinja kaikkine osineen sondilta kaasun kuivaukseen ja jäähdytykseen pidettiin 190 °C lämpötilassa. Ainoastaan hiilivedyt mitattiin lämpimästä, kuivaamattomasta näytteestä. Muut komponentit mitattiin kuivatusta näytteestä.

Päästömittauksessa moottoreita kuormitettiin standardin mukaisin kuormitusyyskein. Näitä syklejä on tehty erilaisille moottorityypeille ja samasta mittaustuloksesta voidaan usein laskea usean eri käyttötarkoituksen mukaisia päästömääriä. Molemmissa standardeissa (SAE J1088 ja ISO 8178) pienmoottoreiden kuormitusyyskein ovat samanlaiset.



Kuva 5. Päästöanalysointilaite
Figure 5. The emission analyzers used in the study.

Taulukko 4. Päästömittauksessa käytetyt kuormitusyyskein (SAE J1088).
Table 4. Test cycles in the emission measurements (SAE J1088).

Ruohonleikkurit, jyrsimet, lumilingot yms Lawn mowers, rotary tillers, snow blowers etc.						
Pyörimisnopeus Speed	85 % nimellisaopeudesta 85 % of rated speed					Tyhjä-käynti Idle
Kuormituspiste Mode number	1	2	3	4	5	6
Kuormitus % Torque %	100	75	50	25	10	0
Painokertoimet Weighting factors	0,09	0,2	0,29	0,3	0,07	0,05
Moottorisahat, raivaussahat, leikkurit yms Chain saws, brush saws, trimmers etc.						
Pyörimisnopeus Speed	Nimellisaopeus Rated speed		Tyhjäkäynti Idle			
Kuormituspiste Mode number	1		2			
Kuormitus % Torque %	100		0			
Painokertoimet Weighting factors	0,9		0,1			

Kokeissa käytetyt kuormitusykliä ovat taulukossa 4. Nelitahtisten mm ruohonleikkureihin, jyrsimiin ja lumilinkoihin tarkoitettujen pienmoottoreiden päästö mitataan kuuden kuormituspisteen avulla, joista lasketaan painotettu päästöarvo. Pyörimisnopeus on 85 % nimellisnopeudesta ja kuormat ovat: 100, 75, 50, 25, 10 ja 0 %. Näiden mittauspisteiden painot ovat vastaavasti: 9, 20, 29, 30, 7 ja 5 %. Painotus korostaa keskikuormien (75 %, 50 % ja 25 %) osuutta kokonaispäästössä.

Kaksitahtisten käsissä pidettävien moottoreiden, jotka on tarkoitettu lähinnä moottorisaha-tyyppiseen käyttöön, kuormituspisteitä on vain kaksi, joutokäynti ja täysi teho. Täyden tehon kohdan painokerroin on kokonaispäästössä 90 % ja joutokäynnin 10 %.

Päästömittaustandardit eivät määritä päästörajoja, vaan ainoastaan mittausten menetelmät, kuormitusykliä ja painokertoimet kokonaispäästön laskentaa varten. Päästörajat määrittelee paikallinen viranomais ja esimerkiksi Suomessa ei ole annettu pienmoottoreille päästörajoja. Kuuluisin päästörajoista on Kaliforniassa käytetty CARB-sääntö (*California Exhaust ...*), taulukko 5. Nämä rajat on samat sekä otto- että dieselmootoreille. Pien-dieselmootoreille on kaasumaisten päästöjen lisäksi annettu hiukkaspäästöjen rajat.

Taulukko 5. CARB (Californian Air Resource Board) päästörajat pienmoottoreille.

Table 5. Maximum allowed emissions for small utility engines according to CARB (Californian Air Resource Board).

Sylinteritilavuus <i>Displacement</i>	Voimaantulo- vuosi <i>Effective year</i>	HC + NO _x g/kWh	CO g/kWh
Alle 225 cm ³ <i>Under 225 cm³</i>	1994	16,1	402
	1999	4,3	134
225 cm ³ tai suurempi <i>225 cm³ or more</i>	1994	13,4	402
	1999	4,3	134

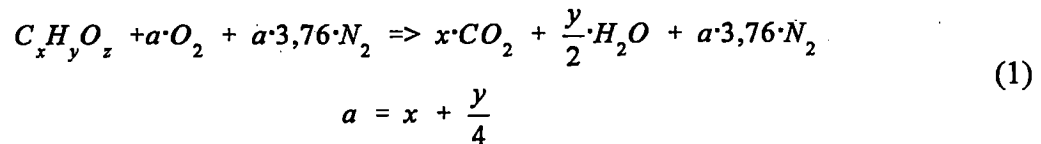
Jos näitä rajoja verrataan esimerkiksi hieman suurempien dieselmootoreiden rajoihin, EU on ehdottanut 37-75 kW työkonedieselmootoreille seuraavia rajoja: CO-päästö 6,5 g/kWh, HC-päästö 1,3 g/kWh, NO_x-päästö 9,2 g/kWh ja hiukkaspäästö 0,85 g/kWh. CARB-säännön mukainen CO raja on siten vuoden 1999 jälkeen yli 20-kertainen ja HC + NO_x raja on noin 40 % EU:n ehdotuksesta.

2.6 Tulosten laskeminen ja ilmoittaminen

Tulokset on ilmoitettu palamattomien hiilivetyjen, typen oksidien sekä hiilimonoksidin määränä tehtyä työtä kohti (g/kWh). Tulokset on laskettu pakokaasuista SAE J1088-standardin mukaista polttoainevirtausmenetelmää käyttäen. Polttoaineen palamisen ja seossuhteen laskenta on tehty *Srivastava ym.* esittämällä tavalla ja ilmakertoimen laskenta *Douglasin* esittämällä tavalla.

2.6.1 Palaminen, seossuhde ja ilmakerroin

Polttoaineen kemiallinen koostumus voidaan esittää muodossa $C_xH_yO_z$. Ottamalla huomioon, että ilmassa on jokaista O_2 moolia kohti 3,76 moolia typpeä, saadaan seuraava reaktio:



- x = hiiliatomien määrä polttoainemolekyylissä
- y = vetyatomien määrä polttoainemolekyylissä
- z = happiatomien määrä polttoainemolekyylissä

Yhtälössä ei ole otettu huomioon ilman sisältämää vesimäärää. Teoreettinen palamisilmamäärä s_{teor} saadaan seuraavasti:

$$s_{teor} = \frac{a \cdot 32 + a \cdot 3,76 \cdot 28}{x \cdot 12 + y \cdot 1 + z \cdot 16} \quad (2)$$

jossa 32 on happimolekyylin O_2 atomipaino, 28 on typpimolekyylin N_2 atomipaino, 12 on hiilen C atomipaino, 1 on vedyn H atomipaino ja 16 on happiatomin O atomipaino. Bensiinin tarvitsema teoreettinen ilmamäärä on luokkaa 14 - 16 kg ilmaa yhtä polttoaine-kg kohti. Ilmamäärä vaihtelee bensiinin koostumuksen mukaan.

Seossuhteella tarkoitetaan yhden polttoaine-kg:n polttamiseen käytettyä todellista ilmamäärää.

Ilmakertoimella (λ) tarkoitetaan polttamiseen käytetyn ja teoreettisen ilmamäärän suhdetta.

$$\lambda = \frac{s_{tod}}{s_{teor}} \quad (3)$$

Jos ilmakerroin on yli yhden, seoksessa on teoreettiseen ilmamäärään nähden ylimääräistä palamisilmaa ja seoksen sanotaan olevan laiha. Jos ilmakerroin on alle yhden, seoksessa on liian vähän palamisilmaa ja seosta sanotaan rikkaaksi. Ottomoottorin teho on suurimmillaan ja käynti tasainen, kun seos on hieman rikas.

Päästöjen laskennassa tarvitaan polttoaineen molekyylipaino. Se voidaan laskea seuraavasti:

$$m_{pa} = 12,011 + 1,008 y' + 15,999 z' \quad (4)$$
$$y' = \frac{H}{C} \quad ja \quad z' = \frac{O}{C}$$

- y' = polttoaineen vety/hiili-atomisuhde
- z' = polttoaineen happi/hiili-atomisuhde

Polttoaineiden y ja x arvoina käytettiin taulukon 2 mukaisia arvoja. Osa savukaasujen päästöistä mitattiin kuivatuista ja osa määristä savukaasuista. Laskennassa käytettiin märkien savukaasujen mukaisia arvoja, jolloin kuivista savukaasuista mitatut pitoisuudet pitää muuntaa märiksi seuraavasti:

$$K = \frac{1}{1 + 0,005 (V_{co,k} + V_{co2,k})y - 0,01 H_{2,k}} \quad (5)$$

K = muuntokerroin
 $V_{co,k}$ = kuiva CO-pitoisuus, %
 $V_{co2,k}$ = kuiva CO₂-pitoisuus, %
y = polttoaineen vety/hiili-atomisuhde
 $H_{2,k}$ = 2-t-koneille = 0, muille koneille:

$$H_{2,k} = \frac{0,5 y V_{co,k} (V_{co,k} + V_{co2,k})}{V_{co,k} + 3 V_{co2,k}} \quad (6)$$

Etenkin kaksitahtisten pienmoottoreiden palamisilmamäärän mittaaminen on vaikea toteuttaa, koska virtausmittaus häiritsee moottorin normaalia kaasunvaihtoa ja tämä muuttaa moottorin suoritusarvoja. Seossuhde laskettiin tämän takia mitatuista pakokaasuista *Douglasin* esittämän menetelmän mukaan. Laskenta perustuu savukaasuanalyysin ja palamisreaktioiden avulla laskettuihin hiili-, vety- ja happitasapainoihin. Lisäksi pakokaasujen vetypitoisuudeksi on otettu mittauksissa saatu yhteys, että vetypitoisuus on puolet häkäpitoisuuden arvosta. Tällöin ilmakerroin saadaan yhtälöstä:

$$\lambda = K_f \frac{0,25 V_{co} + V_{co2} + V_{o2} + 0,25 y' (V_{co} + V_{co2}) + 0,5 V_{nox}}{V_{co} + V_{co2} + V_{hc}} \quad (7)$$

$$K_f = \frac{138,18}{12,011 + 1,008 y'}$$

Menetelmä ei ole täysin tarkka, virhe voi olla suurimmillaan jopa muutaman prosentin luokkaa. Tarkempi kuvaus menetelmästä löytyy lähdeviitteestä.

2.6.2 Häkäpäästö, CO

Häkäpäästöt yksikköinä g/h lasketaan seuraavasti:

$$P_{co} = \frac{28,01}{m_{pa}} \frac{V_{co}}{V_{kok}} q_{g/h} \quad (8)$$

P_{co} = häkäpäästö [g/h]
 m_{pa} = polttoaineen molekyylipaino
 V_{co} = märkä häkäpäästö [%]
 V_{kok} = kaasumaisten päästöjen kokonaismäärä tilavuus-% määristä pakokaasuista,
($V_{kok} = V_{CO} + V_{CO2} + V_{HC}$)

2.6.3 Hiilivetyypäästöt, HC

Hiilivetyypäästöt yksikköinä g/h lasketaan seuraavasti:

$$P_{hc} = \frac{1}{V_{kok}} \frac{V_{hc}}{10000} q_{g/h} \quad (9)$$

- P_{hc} = hiilivetyypäästö [g/h]
 $q_{g/h}$ = polttoaineen kulutus [g/h]
 V_{kok} = kaasumaisten päästöjen kokonaismäärä tilavuus-% määristä pakokaasuista
 V_{hc} = hiilivedyn märkäpäästö [ppm]

2.6.4 Typen oksidit, NO_x

Typipäästö g/h lasketaan seuraavasti:

$$P_{nox} = \frac{46,01}{m_{pa}} \frac{1}{V_{kok}} \frac{V_{nox}}{10000} K_v q_{g/h} \quad (10)$$

- P_{nox} = typen oksidien päästö [g/h]
 V_{nox} = märkä NO_x päästö [ppm]
 K_v = kosteuden muodostumisen korjauskerroin, 2-t-moottoreilla $K_v = 1$

Palamisilman vesisisältö vaikuttaa NO_x-päästöihin. Tämä otetaan huomioon bensiinimoottoreille seuraavasti:

$$K_v = \frac{1}{[1 - 0.0329(H - 10,71)]} \quad (11)$$

- H = ilman kosteus, g H₂O/kg kuiva ilma

SAE J1088-standardi toteaa tästä kertoimesta, että sitä ei ole tarkistettu pienmoottoreille ja koska niiden NO_x päästöt ovat pieniä, kerroin on laboratoriokokeissa usein lähellä ykköstä. 2-t koneille kertoimen arvona on yksi.

2.6.5 Ominaispäästö

Eri komponenttien ominaispäästöt saadaan jakamalla päästö määrät (g/h) käyttöteholla. Eri sykleissä mitatut ominaispäästöt voidaan yhdistää syklien painokertoimien avulla, taulukko 4. Komponenttikohtaiset, painotetut ominaispäästöt lasketaan seuraavasti:

$$p_x = \frac{\sum p_i \cdot k_i}{\sum P_i \cdot k_i} \quad (12)$$

p_x	=	päästökomponentin x painotettu ominaispäästö
p_i	=	päästökomponentin päästö syklin kohdassa i
P_i	=	teho syklin kohdassa i
k_i	=	syklin kohdan painokerroin

2.7 Huomioita pienmoottoreiden mittausmenetelmistä

Pienmoottoreiden mittauksia on tehty maassamme suhteellisen vähän. Näitä moottoreita käytetään eniten maa- ja metsätaloudessa ja niihin liittyvissä töissä. Tästä johtuen laitoksemme on tutkinut jatkuvasti näitä koneita erilaisten testausten ja turvatarkastusten yhteydessä. Näissä koneiden tehot on mitattu lähempänä varsinaista työvaihetta esimerkiksi puun sahaustehona eikä suoraan kampiakselitehona. Pienmoottoreille ei myöskään ole aiemmin tehty meillä päästömittauksia. Pienmoottoreiden rakenteet ja toimintatavat voivat poiketa toisistaan hyvin paljon. Tämän tutkimuksen aikana tuli esiin useita ongelmia ja tämä kappale on tarkoitettu näiden ongelmien esittämiseen, jotta mahdolliset uudet tutkimukset ja tutkijat voivat helpommin onnistua.

2.7.1 Tehonmittausjarru

Laitoksen pienmoottoreiden mittausjarru oli vesidynamometriytyyppinen. Moottorisahojen pyörimisnopeuksien kasvusta johtuen sitä ei voitu enään käyttää suoraan niiden kampiakselitehon mittaamiseen, koska sallittu pyörimisnopeus oli paljon sahojen suurinta pyörimisnopeutta alempi. Se ei myöskään soveltunut ruohonleikkureiden moottoreiden mittaamiseen, koska niissä kampiakselit ovat pystysuorassa ja tehojarru oli tarkoitettu koneille, joissa kampiakseli on vaakasuorassa. Vesidynamometri ei myöskään sovellu kylmäkokeisiin.

Uusi tehonmittausjarru rakennettiin öljyhydrauliikan avulla toimivaksi siten, että moottori käytti hydraulipumppua ja sen tuottamaa virtausta kuristettiin paineventtiilin avulla. Koska pienmoottoreiden tehot ovat alhaiset ja mittausjaksot lyhyitä, suuri öljytilavuus yhdessä suuren öljysäilön kanssa riitti laitteiston jäähtytykseen. Laitteisto mahdollisti sekä pystyettä vaakakampiakselisten moottoreiden mittaukset, koska laite voitiin saranoidensa avulla kääntää pystyasentoon. Kuvassa 3 laitteisto on pystyasentoon käännettynä sekä kuvassa 2 vaaka-asennossa. Öljyhydrauliikka mahdollisti myös kylmäkokeiden teon, koska jäätymisvaaraa ei ollut ja jarru oli helposti siirrettävissä. Moottorin kuormittaminen ja kuorman pysyminen öljyjarrulla oli helppoa.

Moottorisahojen suurimmat pyörimisnopeudet ovat 15 000 - 16 000 r/min ja nimellistehon kohdalla nopeus on 9000 - 10 000 r/min. Vastaavasti ruohonleikkureiden ja jyrshinten moottoreiden pyörimisnopeudet ovat 2 000 - 3 000 r/min. Suuren nopeuseron takia moottorisahojen mittauksissa käytettiin hammashihnavälitystä alentamaan pyörimisnopeutta.

Teho mitattiin aluksi moottorin jälkeen voimansiirrossa olevan vääntömomenttianturin avulla. Laitteisto ylikuormittui ja rikkoutui, jonka jälkeen teho mitattiin hydraulipumpun virtauksen ja paineen avulla. Pumpun hyötysuhteet otettiin huomioon valmistajan käyrästä mukaisina. Hammashihnan hyötysuhde arvioitiin hammashihnavoimansiirrolle tyypillisten arvojen perusteella.

Moottorit kiinnitettiin jäykästi koepenkkiin ja moottorin kampiakseliin asennettiin joustava sakarakytkin, jossa sakaroiden välissä oli muovinen hammastus. Kampiakselit kuumenivat kuitenkin niin voimakkaasti, että muovinen hammastus pehmeni ja muutti muotoaan. Ongelma korjattiin lisäämällä kytkimeen ilmapuhallus. Moottorisahojen suurista pyörimisnopeuksista johtuen kytkinten on oltava kevyitä. Raskaat kytkimet aiheuttavat helposti epätasapainoa ja värinää. Tämän seurauksena yhden koemoottorin kampiakseli katkesi mittausten aikana.

Tehon mittaaminen epäsuorasti heikentää mittaustarkkuutta ja suora mittaustapa olisi suositeltavampi. Tällöin tehojarruun on kuitenkin asennettava oma vauhtipyörä, koska yksisylinteristen pienten moottoreiden vääntömomentin huippuarvojen ja keskiarvojen ero on suuri. Käytettäessä vääntömomenttianturia sen mittausalue ei ilman vauhtipyörää riitä antamaan riittävän voimakasta signaalia ja samalla kestävästi esiintyvät suuret raskautukset.

2.7.2 Polttoaineenkulutuksen mittaaminen

Moottorisahojen polttoaineen kulutus on helppo mitata, koska niissä on kalvokaasuttimet. Kalvokaasuttimessa on oma polttoaineen siirtopumppu, mikä mahdollistaa moottorin käytön missä asennossa tahansa ja polttoainesäiliön paikka tai täyttöaste ei vaikuta kaasuttimen toimintaan. Oman polttoainesäiliön asemasta polttoaine otettiin erillisestä vaa'an päällä olleesta säiliöstä. Polttoaineen lämpötila ei kuitenkaan ole sama kuin omasta säiliöstä otettuna. Koska sahojen polttoainesäiliöt ovat niiden rungossa, polttoaine lämpenee voimakkaasti.

Ruohonleikkureiden ja jyrksinten moottoreissa käytetään usein virtauskaasuttimia (kuva 1), jolloin polttoainesäiliö ja kaasutin on rakennettu yhteen ja polttoaineen pinnan korkeus vaikuttaa usein seossuhteeseen. Helpoimmin tällaisen moottorin polttoaineen kulutus voidaan mitata yhdistämällä moottorin säiliö ulkopuoliseen vaa'alla olevaan säiliöön. Moottorin lämpötilojen on tällöin annettava tasaantua normaalia pidempään, koska lämpötilan muutokset vaikuttavat moottorin polttoainesäiliössä olevaan polttoaineeseen. Sen tilavuus laajenee lämmitessään, jolloin mitattu kulutus on todellista pienempi ja kutistuu jäähtyessään, jolloin mitattu kulutus on todellista suurempi. Jos moottorin kaasutin yritetään erottaa polttoainesäiliöstä, alkuperäisenlaisen olosuhteen luominen kaasuttimelle on hankalaa.

Polttoaineen kulutus voidaan mitata myös tilavuusmuutoksena, mutta tällöin tilavuudet joudutaan laskemalla muuntamaan massoiksi ominaispäästöjen laskentaa varten. Laskennassa pitää ottaa huomioon lämpötilan aiheuttama polttoaineen tiheyden muutos.

2.7.3 Seossuhteen mittaaminen

Seossuhde voidaan laskea suoraan, jos mitataan sekä polttoaineen kulutus että moottorin käyttämä ilmamäärä tai sen synnyttämä pakokaasumäärä. Ilmamäärän mittaustapa on esitetty SAEJ1088-päästömittaustandardissa. Sen mukaan moottorin imupuolelle asennetaan riittävän iso tasaussäiliö, josta moottori imee palamisilman. Ilmamäärä mitataan säiliöön virtaavan ilman perusteella. Ylimääräiset painehäviöt kompensoidaan puhaltimen avulla. Moottorisahojen moottoreilla ilmamäärän mittaaminen on hankalaa, koska moottorin toiminta riippuu olennaisesti imu- ja pakoputkistojen mitoista. Lisäksi ilmasuodatin on rakennettu kaasuttimen välittömään läheisyyteen, jolloin kaikki ylimääräiset liitokset ovat hankalia toteuttaa. SAE J1088 mukainen ilmamäärän mittausteisto ei toiminut tämän tutkimuksen moottorisahamoottoreiden yhteydessä. Tämän takia seossuhteet määritettiin laskennallisesti kappaleessa 2.6.1 esitetyllä tavalla. Laskenta antoi suuruusluokaltaan oikeita seossuhteita, mutta ajoittain arvot antoivat huomattavan laihon seossuhteita. Tämän takia seossuhteita ei ole käytetty enemmälti tulosten analyysissä. Poikkeava tulos voi olla myös merkki analysointivuosista tai virheellisestä toiminnasta.

2.7.4 Kuormitusyykli

Moottorisahojen moottorit on tehty pääasiassa puun katkaisu- ja karsintatöihin. Päästömittauksen kuormitusyykli kuvaa moottorin käyttöä katkaisuun ja siinä toistuvat peräkkäin täysin moottoriteho ja tyhjäkäynti. Käytännössä täyden tehon osuus riippuu puun halkaisijasta ja se kestää enimmillään muutaman minuutin. Päästömittauksen ongelmana on, että muutaman minuutin aikana moottorin toimintaa ei saada vakiinnutettua. Hitaimmin muuttuvat NO_x-päästöt, koska ne riippuvat lämpötilasta ja vakiintuvat vasta kun moottorin käyntilämpötila on vakiintunut. Käytettäessä laihaa seosta myös moottorin voitelu heikkenee. Tällöin päästömittauksissa tulee ongelmaksi moottorin kestävyys, moottori voi vaurioitua ennenkuin sen toiminta on tasaantunut. Pisimmät yhtäjaksoiset kuormitusjaksot olivat tässä tutkimuksessa 15 min mittaisia. Tämä ei vielä aiheuttanut moottorivaurioita.

Kuormitusyykli on toisinaan kuvattu mittaustandardeissa epämääräisesti ja ne voidaan tulkita eri tavoilla. Tulkintavirhe tapahtui tämän tutkimuksen ruohonleikkurimoottoreiden kuormitusyyklien osalta. Mittaustandardi ei määrittänyt täysin yksiselitteisesti mittausten peruspistettä. Se voitiin tulkita joko nimellistehoksi tai 85 % nimellistehosta. Peruspisteeksi valittiin moottorin nimellisteho. Standardien uusimmissa versioissa termien merkitystä on tarkennettu, jolloin tulkintoja ei synny ja niiden mukaan kuormituksen perustana olisi pitänyt olla 85 % nimellistehosta.

Yksisylinteriset moottorit ovat herkkiä käyntihäiriöille ja nämä aiheuttavat samalla vaihtelua päästöihin. Tämä tietää luontaisesti hajontaa tuloksissa. Ruohonleikkureiden moottorit on varustettu hyvin yksinkertaisilla säätimillä, mitkä ei toimi eri kuormitustilanteissa aina samalla lailla. *Crabtree ym.* mittasivat pienen nelitahtisen moottorin HC- ja CO-päästöjen variaatiokertoimiksi tyypillisesti 20 % ja suurimmillaan jopa lähes 40 %. Pienmoottoreiden mittaustuloksissa on siten aina melkoisesti hajontaa ja osa mitatuista eroista voi hyvinkin johtua tästä hajonnasta.

2.7.5 Päästömittauslaitteisto

Pienmoottorien HC- ja CO-päästöt ovat selvästi isompia moottoreita suurempia. Tämä aiheutti ongelmia lähinnä HC-analysaattorin toiminnassa. Ensimmäinen analysaattori jouduttiin vaihtamaan käyttöönsä sopimattomana ja toista jouduttiin säätämään useaan otteeseen ennenkuin se toimi vaatimusten ja odotusten mukaisesti.

Kaksitahtisten moottoreiden mittauksissa ongelmana oli analysaattoreiden suodinten toistuva ja nopea tukkeutuminen. Ilmeisesti pakokaasuissa oli teflonsuotimien kanssa reagoivia aineksia tai runsaasti hiukkasia. Katalysaattoria käytettäessä tätä ongelmaa ei ilmennyt.

Pakokaasujen poisto ja näytteenotto on pienmoottoreissa myös usein hankalaa. Äänenvaimentimet ovat usein levymäisiä, joissa on pakokaasuaukko sivussa. Tähän joudutaan juottamaan lisäputki, jotta pakokaasut saataisiin kerätyksi. Etenkin kaksitahtisissa moottoreissa muutos voi vaikuttaa moottorin toimintaan. Yksisyylinterien moottoreiden huonosta tasapainotuksesta johtuen sen tärinä on voimakasta ja tämä rikkoi helposti asennetun lisäputken.

Kaksitahtisten moottoreiden pakokaasut poikkeavat nelitahtisista siinä, että niissä on runsaasti happea. Suurimmillaan pakokaasujen happipitoisuus voi olla 10 % ja enemmänkin. Nelitahtisen moottorien pakokaasujen runsas happipitoisuus on aina merkki järjestelmävuodoista, kaksitahtisissa välttämättä ei.

Katalysaattoreiden käyttö nostaa pakokaasujen lämpötilaa. Tämä voi tulla näytteenottolinjassa ongelmaksi. Parhaimmat joustavat näytelinjan teflonputket kestävät noin 300 - 400 °C lämpötilan. Katalysaattorissa pakokaasujen lämpötila kohoaa helposti 600 °C lämpötilaan ja ylikin sen. Koska äänenvaimennin on pieni, savukaasut eivät jäähy ja kuumat kaasut joutuvat suoraan näytelinjaan. Tämä aiheuttaa teflonputkiin hiushalkemia ja sitä kautta vuotoja.

Tutkimusohjelmaan kuului myös päästöjen mittaaminen kylmässä. Näitä koetuloksia ei kuitenkaan voitu käyttää, koska näytteenottolinja oli liian kylmä ja vesi kondensoitui niihin. Syynä tähän oli lämmitetyn linjan termostaatin paikka. Se on vain toisessa päässä linjaa ja tämä pää oli lämpimässä, jolloin linjan alkupää oli kylmänä.

3 NELITAHTISTEN PIENMOOTTORIEN PÄÄSTÖT

Sujuvuuden vuoksi Briggs & Stratton Europa-kansiventtiilimoottoria kutsutaan jatkossa nimellä Europa ja Briggs & Stratton 375 Sprint-sivuventtiilimoottoria nimellä Sprint. Mittausstandardista poiketen nelitahtisten moottoreiden kokeet tehtiin nimellisnopeuden kohdalta eikä 85 % kohdalta. Moottoreiden mitatut nimellistehot ovat taulukossa 6. Europan ilmakerroin oli hieman yli yhden eli moottori kävi laihalla seoksella. Sen sijaan Sprintin ilmakerroin oli alle yhden eli se kävi rikkaalla seoksella.

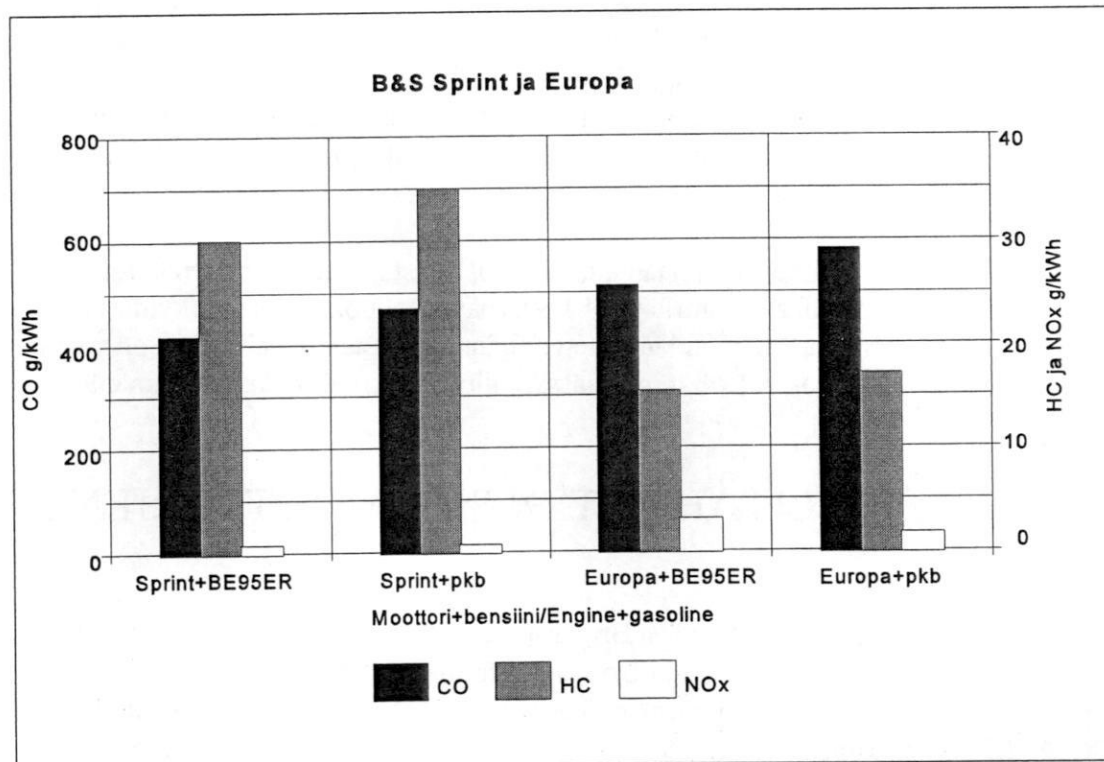
Taulukko 6. Nelitahtimoottoreiden nimellistehoa vastaavat mittausarvot käytettäessä BE95ER-bensiiniä.

Table 6. Measurement results of 4-stroke engines at rated power with BE95ER fuel.

Moottori <i>Engine</i>	Nimellis-teho <i>Rated power</i> kW	Moottorin nopeus <i>Engine speed</i> r/min	Polttoaineen kulutus <i>Fuel consumption</i> g/h	Polttoaineen ominaiskulutus <i>Specific fuel consumption</i> g/kWh	Ilmakerroin <i>λ-value</i> λ
Europa Briggs & Stratton Europa	2,4	2853	972	410	1,1
Sprint Briggs & Stratton 375 Sprint	1,2	2139	462	400	0,8

3.1 Sprint- ja Europa-moottoreiden päästöt

Kuvassa 6 on moottoreiden painotetut kokonaispäästöt komponenteittaan. Sprintin rikas seos näkyy HC-päästöissä Euroopan arvoja suurempina arvoina ja myös NO_x-päästöissä pienempinä arvoina. CO-päästö on ollut Europalla Sprintin päästöä suurempi.

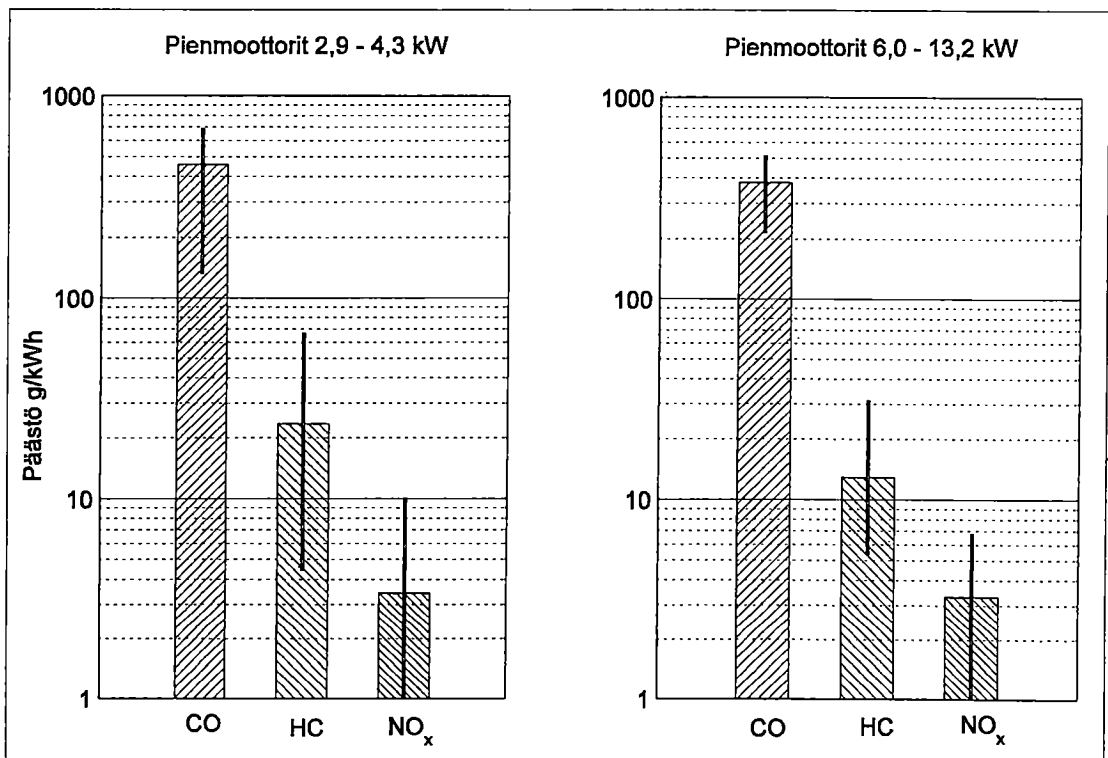


Kuva 6. Sprintin ja Europan kokonaispäästöt ilman katalysaattoria. Vasen asteikko CO- päästö, oikea asteikko HC- ja NO_x-päästöt.

Figure 6. Emissions of Sprint and Europa engines without catalyst. Left axis CO emission, right axis HC and NO_x emissions.

Pienmoottoribensiini (pkb) lisäsi hieman HC- ja CO-päästöjä ja vähensi NO_x-päästöjä BE95ER-bensiiniin verrattuna kummassakin moottorissa. Pienmoottoribensiini tarvitsee palamiseen enemmän ilmaa kuin muut koebensiinit (taulukko 2). Vaihdettaessa polttoainetta ilman kaasuttimen säätöjen muutosta moottori toimii pienmoottoribensiiniä käytettäessä rikkaammalla seoksella ja siitä lähinnä johtuu päästöjen muutokset.

Tyypillisiä nelitahtisten pienmoottoreiden SAE J1088 mukaan mitattuja päästöarvoja on kuvassa 7 (*White ym., Burrahm ym., Crabtee ym., Sun ym.*). Kun pienistä, lähinnä työnnettävien ruohonleikkureiden moottoreista siirrytään suurempiin ajettavien pienetraktoreiden yms. moottoreihin, kokonaispäästöt sekä päästöjen hajonta vähenevät hieman. Verrattaessa mitattuja tuloksia kuvan 7 arvoihin nähdään niiden olevan suuruusluokaltaan samoja. Tuloksissa on vaihtelua, jotka johtuvat mm. olosuhteiden, moottoreiden, säätöjen ja polttoaineiden erilaisuuksista. Päästöjä voidaan vähentää polttoaineen, moottorin apulaitteiden, kuten katalysaattorin, pakokaasujen kierrätyksen tai pakokaasujen ilmastuksen sekä moottorin rakenteen avulla. Parannusten käyttöönoton esteenä on vaatimus moottorin halvasta hinnasta sekä sähkölaitteistojen puute.

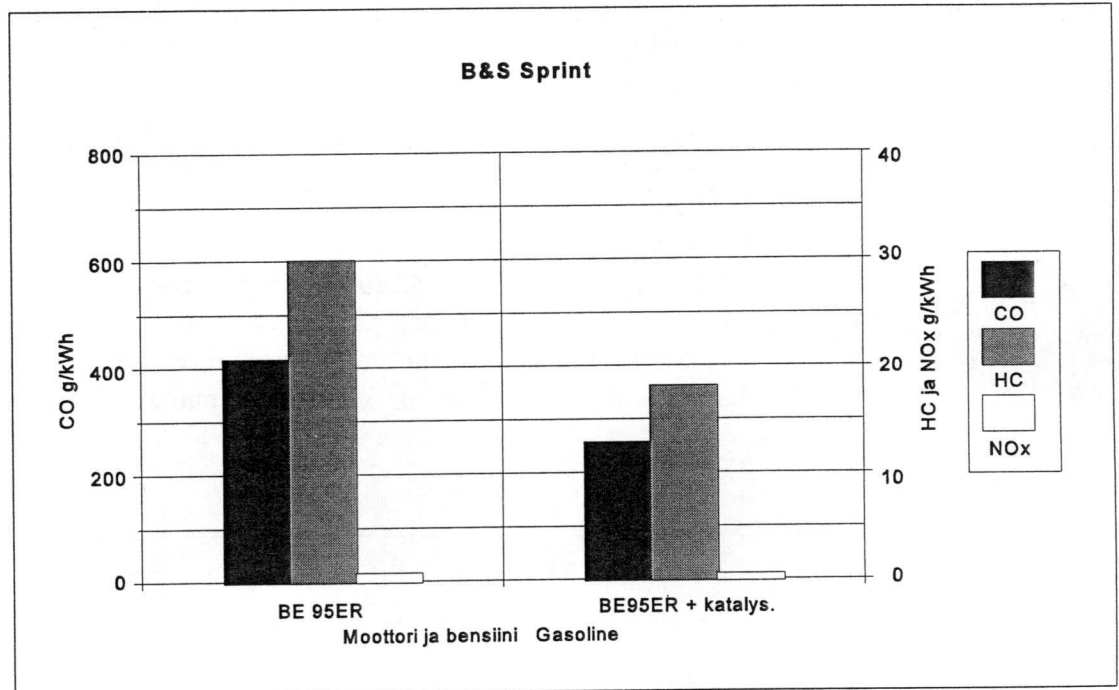


Kuva 7. Pienmoottoreiden SAE päästöarvoja (*White ym., Burrahm ym., Crabtee ym., Sun ym.*), 2,9 - 4,3 kW:n moottoreita 11 kpl ja 6,0 - 13,2 kW:n moottoreita 6 kpl. Pylväät kuvaavat päästöjen keskiarvoja ja viivat vaihtelualuetta.

Figure 7. SAE emission figures of small utility engines (*White et al., Burrahm et al., Crabtee et al., Sun et al.*). Left side: 11 engines between 2,9 and 4,3 kw, right side 6 engines between 6,0 and 13,2 kw. Bars represent the mean values and the lines represent variation.

3.2 Katalysaattorin vaikutus Sprint-moottorin päästöihin

Kuvassa 8 näkyy katalysaattorin vaikutus Sprint-moottorin päästöihin käytettäessä BE95ER-bensiiniä.

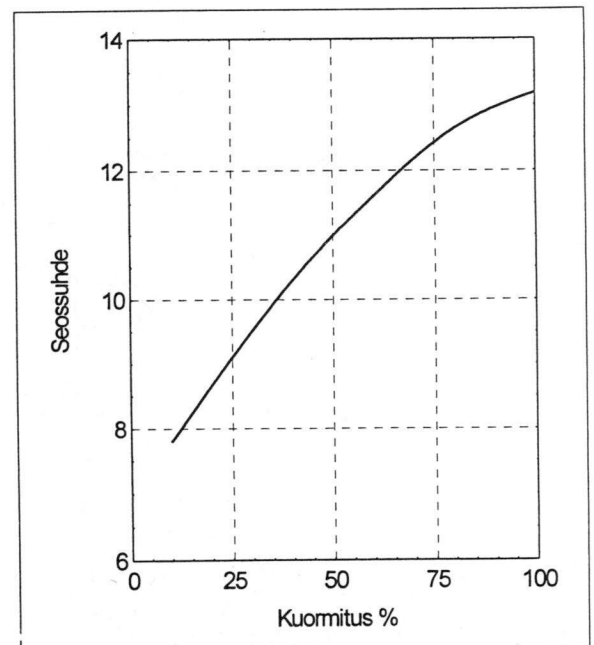


Kuva 8. Katalysaattorin vaikutus Sprint moottorin päästöihin.
Figure 8. The effect of catalyst on engine emissions of the Sprint engine.

Kyseinen katalysaattori ei pystynyt vähentämään NO_x -päästöjä. Katalysaattorin lisäksi pakosarjaan puhalletaan lisäilmaa. Tämä ilma polttaa palamattomia hiilivetyjä ja häkää. Mittausten mukaan katalysaattori yhdessä ilmastuksen kanssa alensi HC- ja CO-päästöjä noin 40 %.

3.3 Seossuhteen vaikutus päästöihin

Pienmoottoreissa käytetään kustannusten takia yksinkertaisia kaasuttimia ja rikasta polttoaineen seosta. Käyttämällä laihaa seosta päästöjä voitaisiin vähentää, mutta se aiheuttaisi nykyisissä moottoreissa moottorin ylikuumentumista sekä mahdollisesti epävakautta käyntiä, mikä lisäisi jälleen päästöjä. Moottorin rakennetta pitäisi muuttaa mm. parantamalla jäähdytystä ja muotoilemalla palotila uudelleen. Laiha



Kuva 9. Kuormituksen vaikutus pienmoottorin ilma-polttoainesuhteeseen (Crabtree ym).
Figure 9. The effect of load on air-fuel ratio in a small utility engine. (Crabtree et al.)

seos vähentää HC- ja CO-päästöjä, koska palamiseen tarvittavaa happea on enemmän saatavissa, mutta se lisää NO_x-päästöjä korkeamman palamislämpötilan ja ylimääräisen hapen takia. Kalifornian päästörajoissa HC- ja NO_x-päästöt on yhdistetty yhdeksi lukemaksi. Seossuhteen laihentamisella CO- ja HC-päästöt alenisivat, mutta samalla NO_x-päästö kasvaa lähes saman verran kuin HC-päästö alenee. HC + NO_x-summa pysyy usein samansuuruisena, jolloin pakokaasumääräyksiä ajatellen muutoksesta ei ole etua.

Pienmoottoreiden seossuhteet muuttuvat kuormitusten mukana. Laihimmillaan seos on kuormitettaessa moottoria täysin ja osakuormilla seossuhde muuttuu rikkaaksi. *Crabtree ym.* mittasivat pienmoottorin seossuhteeksi osakuormilla n. 7 ja täydellä kuormalla n. 13. Tämä seossuhteen muutos vaikutti päästöihin niin, että osakuormilla HC- ja CO-päästöjen pitoisuudet kasvoivat. Käytettäessä moottoreita täydellä kuormalla seossuhteet ovat luokkaa 10 - 13.

Helppoin tapa seossuhteen muutokselle on kaasuttimen polttoainesuuttimen vaihto tai säätö. *Burrahm ym.* muuttivat nelitahtisen, teholtaan 4,7 kW:n moottorin seossuhdetta vaihtamalla polttoainesuutinta. Moottorin teho muuttui vain hieman ja seossuhde muuttui normaalisuuttimen arvosta 13,3 arvoon 15,9 eli rikas seos muuttui hieman laihaksi seokseksi. Moottorin teho aleni 4,7 kW:sta 4,25 kW:iin. HC-päästöt alenisivat 25 %, CO-päästöt 86 % ja NO_x-päästöt lisääntyivät 132 %. *White ym.* vaihtoivat 3,3 kW tehoisen ruohonleikkurin moottorin suuttimen siten, että seossuhde muuttui arvosta 11,4 arvoon 13,8. Tämä vähensi HC-päästöjä 56 %, CO-päästöjä 81 % ja lisäsi NO_x-päästöjä 222 %. Kun moottoriin asennettiin vielä pakokaasujen kierrätys NO_x-päästöt alenisivat 44 % ja nyt myös HC + NO_x-summa aleni Kalifornian määräysten mukaan laskettuna. Kun moottoriin vaihdettiin vielä laihemman seossuhteen antava suutin, ilma-polttoainesuhde kasvoi arvoon 15,9. Tämä aiheutti syttymisongelmia, jonka seurauksena HC-päästöt lisääntyivät ja teho aleni merkittävästi.

Sun ym. mittasivat 2,7 kW:n tehoisen ruohonleikkurimoottorin päästöjä. Moottori oli varustettu laitteistolla, joka antoi lisäilmaa kaasuttimeen silloin, kun seossuhde oli rikas. Tällä pyrittiin pitämään seossuhde tasaisena. Moottorin päästöt vähenivät SAE J1088-testin mukaan mitattaessa, mutta ruohonleikkua simuloivassa transienttikokeessa päästöt lisääntyivät. Tämä johtui säädössä käytetyn askelmoottorin hitaudesta, se ei pystynyt seuraamaan nopeita kuormanmuutoksia. Moottori antoi siten virallisen kokeen mukaan pienempiä päästöjä, mutta todellista työtä vastaavissa kokeissa päästöt lisääntyivät.

Jos moottorissa on säädettävä pääsuutin, käyttäjä voi itse säätää kaasuttimien seossuhteita. Kuten edellä on esitetty, säätö vaikuttaa voimakkaasti päästöihin ja itse tehty säätö voi joko vähentää tai lisätä päästöjä. Käyttäjä ei tiedä ilman mittalaitteita seossuhteen arvoa. Koska pienmoottorit ovat yksisylinterisiä, niiden tärinä on voimakasta ja se aikaansaa helposti säätöjen muuttumista säätöruuvien pyöriessä tärinästä itsestään. Tällöin säädöt eivät pysy kohdallaan, vaan ne muuttuvat itsestään. Samoin suuttimien kuluminen vaikuttaa seossuhteeseen.

Pienmoottoreiden kaasuttimet voitaisiin korvata elektronisilla polttoaineen suihkutuslaitteilla samoin kuin autoissa on tehty. Nämä mahdollistavat tarkemman seossuhteen säädön ja olosuhteiden paremman huomion oton (lämpötila, paine, kuormitus). *Swanson* kokeili

elektronista polttoaineen suihkutusjärjestelmää teholtaan 8 kW moottorissa. Järjestelmä vähensi CO-päästöjä 14,2 % ja yhdistettyä HC + NO_x-päästöä 16,5 %. Sen lisäksi moottorin toiminta ja käytettävyys paranivat. Elektronisten suihkutuslaitteiden haittana on korkea hinta. Niiden yleistymistä pienmoottoreissa haittaa myös sähköjärjestelmien puuttuminen.

3.4 Ajoituksen vaikutus päästöihin

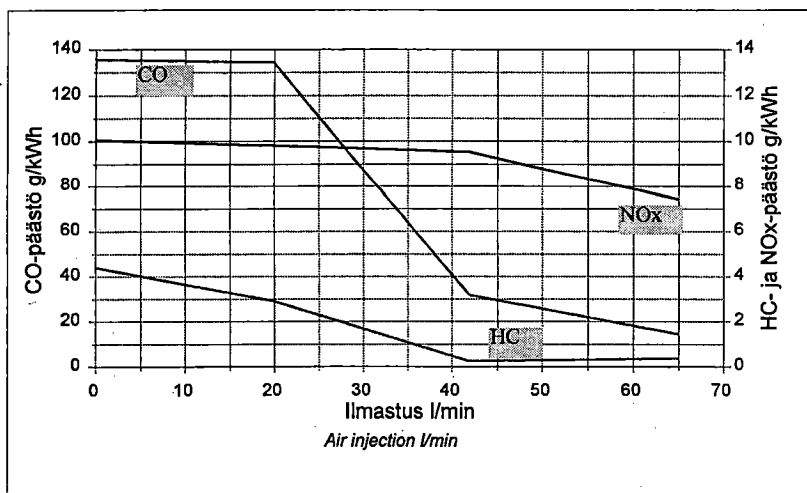
Sytytyksen ajoitus voi vaikuttaa myös päästöihin. Kun ajoitusta aikaistetaan, odotettavissa on NO_x-päästöjen lisääntyminen ja HC- sekä CO-päästöjen väheneminen. *Burrahm ym.* kokeilivat ajoituksen vaikutus omassa koemoottorissaan. Se ei vaikuttanut tehoon eikä päästöihin, kun ajoitusta vaihdettiin 10° ja 22° väliltä. Tämän alueen ulkopuolella moottorin käynti muuttui epätasaiseksi.

3.5 Pakokaasujen ilmastuksen vaikutus päästöihin

Ilmastuksessa pakokaasuihin suihkutetaan ilmaa, jotta HC- ja CO-päästöt vähenisivät. Ottomoottoreita käytetään usein rikkaalla seoksella tai lähellä stökiometristä seosta. Tällöin polttoaine ei saa riittävästi happea, jotta seoksesta tulisi täysin homogeeninen ja täydellisesti palava. Puhaltamalla ilmaa pakokaasuihin nämä palamattomat hiilivedyt saadaan poltettua. Tämä on helppoa suurissa moottoreissa, joissa on massiiviset ja kuumat pakosarjat ja pitkät pakoputkistot. Palamattomilla kaasuilla on tällöin riittävän korkea lämpötila ja pitkä palamisaika. Pienmoottoreissa ilmastus ei ole yhtä tehokasta, koska pakosarjat ovat peltisiä ja lyhyitä. Etenkin osatehoilla moottoreiden pakokaasut voivat olla kylmiä, jolloin ilmastus ei toimi. Kun HC-päästö vähenee ja NO_x-päästö pysyy samansuuruisena, niiden summa vähenee ja silloin on helpompi alittaa esimerkiksi Kalifornian päästörajat.

White ym. käyttivät ilmastusta 8,1 kW tehoisessa pienmoottorissa. Kun lisäilma puhallettiin suoraan äänenvaimentimeen, ainoastaan HC-päästöt alenivat 33 %. Kun puhalluspaikka muutettiin äänenvaimentimen tulopuolelle, HC-päästöt alenivat 77 % ja CO-päästöt 64 %. Syynä parantuneeseen tulokseen oli ilman puhaltaminen kuumempiin pakokaasuihin ja myös lisääntynyt reagointiaika.

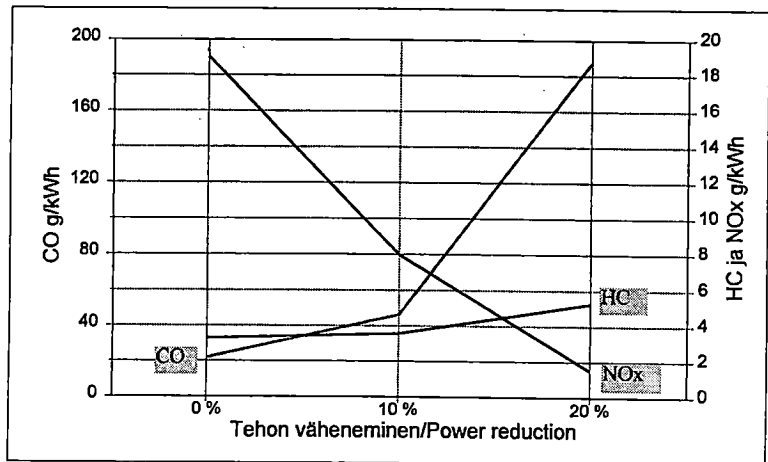
Burrahm ym. kokeilivat ilmastusta nelitahtisessa teholtaan 4,6 kW:n moottorissa. Ilmastus aikaansai merkittävän vähennyksen HC- ja CO-päästöissä sekä pienen vähennyksen NO_x-päästöissä, kuva 10.



Kuva 10. Ilmastuksen vaikutus pienmoottorin päästöihin (*Burrahm ym.*).
Figure 10. Effect of air injection into the exhaust on emission (*Burrahm et al.*).

3.6 Pakokaasujen kierrätyksen vaikutus päästöihin

Kierrättämällä osa pakokaasuista takaisin sylinteriin saadaan laimennettua seosta sekä laskettua palamislämpötilaa. Lämpötilan aleneminen johtuu siitä, että pakokaasut hidastavat palamista, ja siitä, että niiden lämpökapasiteetti on ilmaa suurempi, jolloin ne myös sitovat lämpöä. Lämpötilan aleneminen alentaa NO_x-päästöjä. *Burrahm ym.* kokeilivat pakokaasujen kierrätystä samassa nelitahtisessa moottorissa, jossa he kokeilivat ilmastusta. Kierrätys lisäsi palamattomien kaasujen HC ja CO määriä, mutta vähensi NO_x-päästöjä, kuva 11. Kierrätys vähensi moottorin tehoa, kokeessa käytettiin kahta kierrätysmäärää, joissa tehon vähenemiset olivat 10 ja 20 %.



Kuva 11. Pakokaasujen kierrätyksen vaikutus päästöihin, kierrätysmäärä on ilmoitettu tehon vähenemisen avulla (*Burrahm ym.*).

Kun samaan moottoriin yhdistettiin ilmastus, saatiin samanaikaisesti sekä palamattomien kaasujen CO- ja HC-päästöt sekä NO_x-päästöt vähenemään.

Figure 11. Effect of exhaust gas recirculation on emission, the amount of recirculation is expressed with power reduction (*Burrahm et al.*).

3.7 Katalysaattorien vaikutus päästöihin

Autoissa käytetään kolmitiekatalysaattoreita, jotka vähentävät jokaista kolmea (HC, CO ja NO_x) päästökomponenttia. Nämä järjestelmät vaativat aina tarkan seossuhteen mittauksen ja säädön, mikä nostaa järjestelmän hinnan korkeaksi.

White ym. asensivat 3,3 kW tehoiseen ruohonleikkurin moottoriin kaksitoimikatalysaattorin. Tämä alensi HC-päästöjä 52 % ja CO-päästöjä 43 %. Katalysaattorin toimintaa rajoitti pakokaasujen happipitoisuus. Lisäämällä vielä pakokaasujen ilmastus päästöt alenivat alkuperäiseen verrattuna, HC-päästö 88 % ja CO-päästö 83 %. 3,7 kW sivuventtiilimoottoriin asennettu katalysaattori vähensi 42 % HC-päästöjä ja 39 % CO-päästöjä. Katalysaattori muutti moottorin pakokaasujen painetta ja se lisäsi moottorin tehoa, mikä alensi päästöjä, koska päästöt lasketaan tehtyä työtä kohti (g/kWh). Lisäämällä pakokaasujen ilmastus moottoriin päästöt alenivat alkuperäisestä HC-päästöistä 99 % ja CO-päästöistä 96 %.

Crabtree ym. kokeilivat pienmoottorissa sekä kaksi- että kolmitiekatalysaattoria. Käytettäessä kaksitiekatalysaattoria ja ilmastusta CO ja HC-päästöt alenivat 95 % ja kolmitiekatalysaattoria käytettäessä CO, HC ja NO_x-päästöt alenivat 90 %.

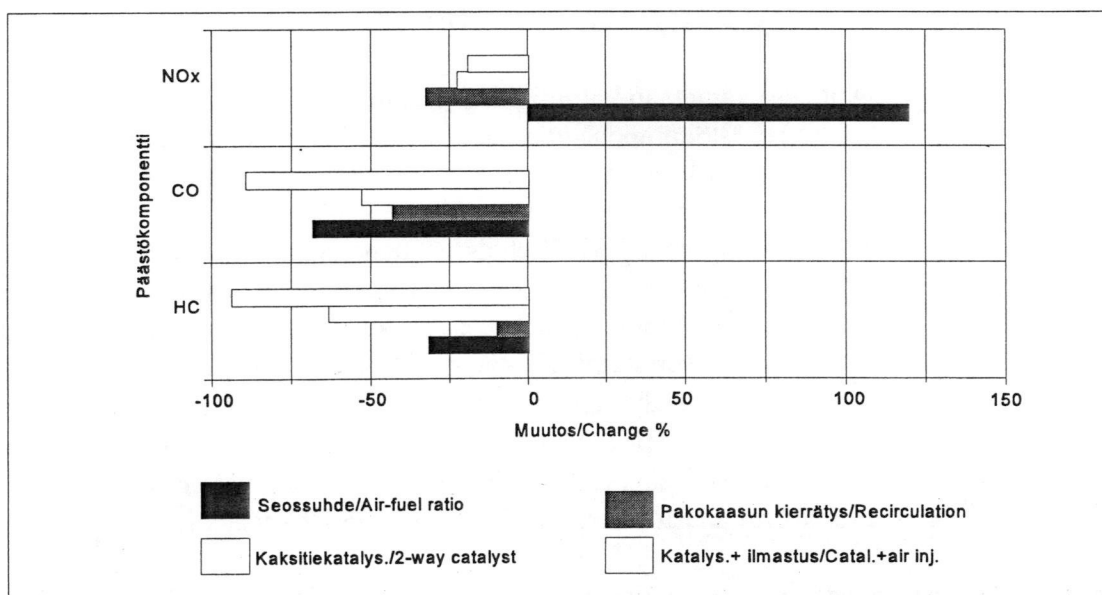
Sun ym. käyttivät piengeneraattorien moottoreissa kolmitiekatalysaattoria, jolloin HC- sekä CO-päästöt vähenivät 97 % sekä NO_x-päästöt 19 %. Samalla pakokaasujen lämpötila kohosi 262 C-asteesta 699 C-asteeseen. Näin korkea lämpötila aiheuttaa korkean pakosarjan ja -putken pintalämpötilan, jolloin seurauksena voi olla käyttäjälle palovammoja tai ympäristölle palovaara.

3.8 Käynnistyksen vaikutus päästöihin

Sun ym. mittasivat kahden nelitahtisen moottorin päästöjä käynnistettäessä. Käynnistyslämpötilaa ei ole kirjattu. Moottoreiden HC-päästöt olivat alussa jopa kahdeksankertaisia lämpimän moottorin päästöihin verrattuna. Muutaman minuutin kuluttua tämä tasaantui. CO-päästöt olivat alussa normaalia alempia ja nekin tasaantuivat muutaman minuutin kuluttua. NO_x-päästöt alkoivat nollalukemista ja niiden tasaantuminen kesti useita minuutteja. Pienemmän moottorin päästöt tasaantuivat nopeammin, koska se saavutti käyntilämpötilansa nopeammin.

3.9 Nelitahtisten pienmoottoreiden päästöjen vähentäminen

Eri toimenpiteiden vaikutus päästöihin on esitetty kuvassa 12. Luvut ovat kirjallisuudesta löydettyistä arvoista laskettuja keskiarvoja. Kuvaa voidaan pitää vain suuntaa antavana ja se näyttää mitä mahdollisuuksia on alentaa nykyisten moottoreiden päästöjä. Päästöihin vaikuttaa hyvin voimakkaasti seossuhde ja lisävarusteiden vaikutuksessa on osaltaan myös mukana laihemmasta seossuhteesta saatava hyöty. Nykyisiä moottoreita ei ole suunniteltu vähäpäästöisiksi vaan halvoiksi ja keveiksi. Tulokset olisivat toisenlaisia, jos moottorit suunniteltaisiin alusta alkaen vähäpäästöisiksi.



Kuva 12. Eri tekijöiden vaikutus pienmoottorin päästöihin. Seossuhde kuvaa laihasta seoksesta johtuvaa muutosta.

Figure 12. Effect of different factors on emissions in small utility engines. Air-fuel ratio represents the effect of lean adjustment.

4 KAKSITAHTISTEN PIENMOOTTORIEN PÄÄSTÖT

Mittauksissa oli mukana kolme kaksitahtista moottoria. Näitä moottoreita käytetään sekä moottorisahoissa että raivaussahoissa. Näistä moottoreista käytetään seuraavia nimityksiä: Husqvarna = Husqvarna 242, Jonsered = Jonsered 2036 ja Stihl = Stihl 026. Moottorit olivat käyttöikältään erilaisia ja tämän takia osa moottoreiden päästöeroista johtuu moottorin iästä. Moottoreiden suoritusarvot nimellistehon kohdalla ja käyttöohjeen mukaisia säätöjä käytettäessä on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Kaksitahtisten moottoreiden nimellistehon kohdalla mitatut suoritusarvot, bensiini BE98ER, säätö normaali käyttöohjeiden mukainen.

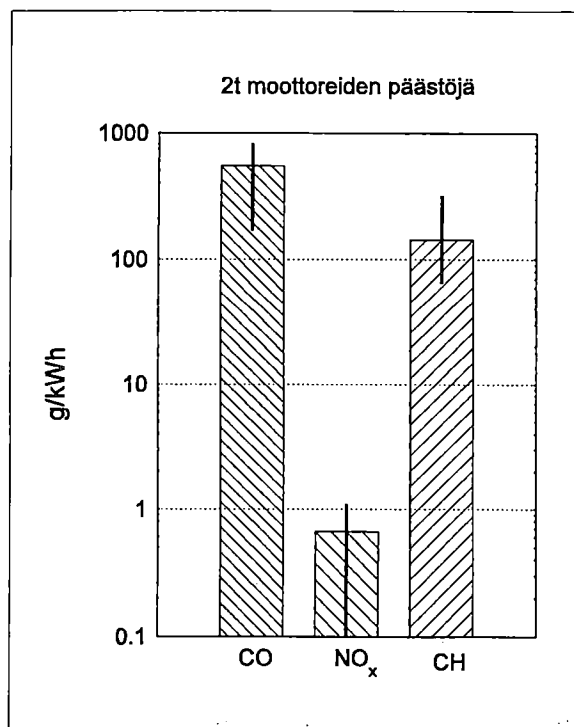
Table 7. Performance of 2-stroke engines, measured values at rated power, fuel BE95ER, adjustment according to the owner's manual.

Moottori	Nimellisteho	Nimellistehon nopeus	Polttoaineen kulutus	Polttoaineen ominaiskulutus	Ilma-kerroin
Engine	Rated power kW	Speed at rated power r/min	Fuel consumption g/h	Specific fuel consumption g/kWh	λ -value
Husqvarna Husqvarna 242	1,5	9930	1200	814	0,9
Jonsered Jonsered 2036	1,2	9520	1091	913	1,1
Stihl Stihl 026	2,2	9410	1630	730	1,0

Kuvassa 13 on esitetty yhteenveto kaksitahtisten pienmoottoreiden päästömittausarvoista. Arvot on saatu kirjallisuudesta (*Sun ym.*) ja tämän tutkimuksen mittaustuloksista. Nelitahtisiin moottoriin verrattuna HC-päästö on viisinkertainen, CO-päästö reilut 20 % suurempi ja NO_x-päästö n. 70 % pienempi. Nämä luvut kuvaavat kaksitahtisten moottoreiden huonompaa polttoaineen palamista.

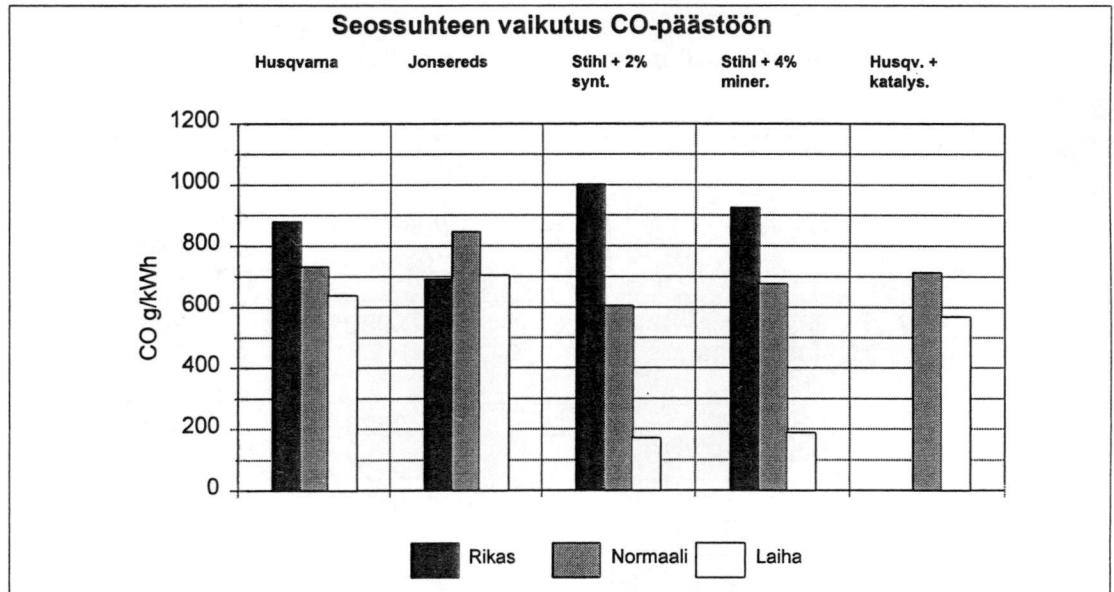
Kuva 13. Kahdeksan kaksitahtisen pienmoottorin päästöarvoja. Arvot on saatu kirjallisuudesta (Sun ym.) ja tämän tutkimuksen tuloksista. Pylväät kuvaavat päästöjen keskiarvoja ja viivat vaihtelua.

Figure 13. Emissions of eight 2-stroke small utility engines. The values are taken from the literature (Sun et al.) and from the results of this study. Bars represent mean values and lines variation.



4.1 Seossuhteen vaikutus

Kuvissa 14 - 16 on esitetty seossuhteiden vaikutus kaksitahtisten ilman katalysaattoria olevien moottoreiden päästöihin. Husqvarnan normaali säädöstä ei voitu seosta laihentaa kovinkaan paljoa, koska moottorin käynti muuttui epätasaiseksi. Tämän takia normaalisäädön ja laiha säädön tulokset ovat lähempänä toisiaan kuin normaalin ja rikkaan seoksen tulokset. Jonseredin rikas säätö, normaali säätö ja laiha säätö antoivat kaikki suuruusluokaltaan saman ilmakertoimen. Jonseredin säätöalue on kapea ja säätö ei vaikuta juuri paljoakaan seossuhteeseen eikä myöskään päästöarvoihin. Stihlin säätöalue oli laajin ja seoksen voi säätää sekä hyvin laihaaksi että rikkaaksi.

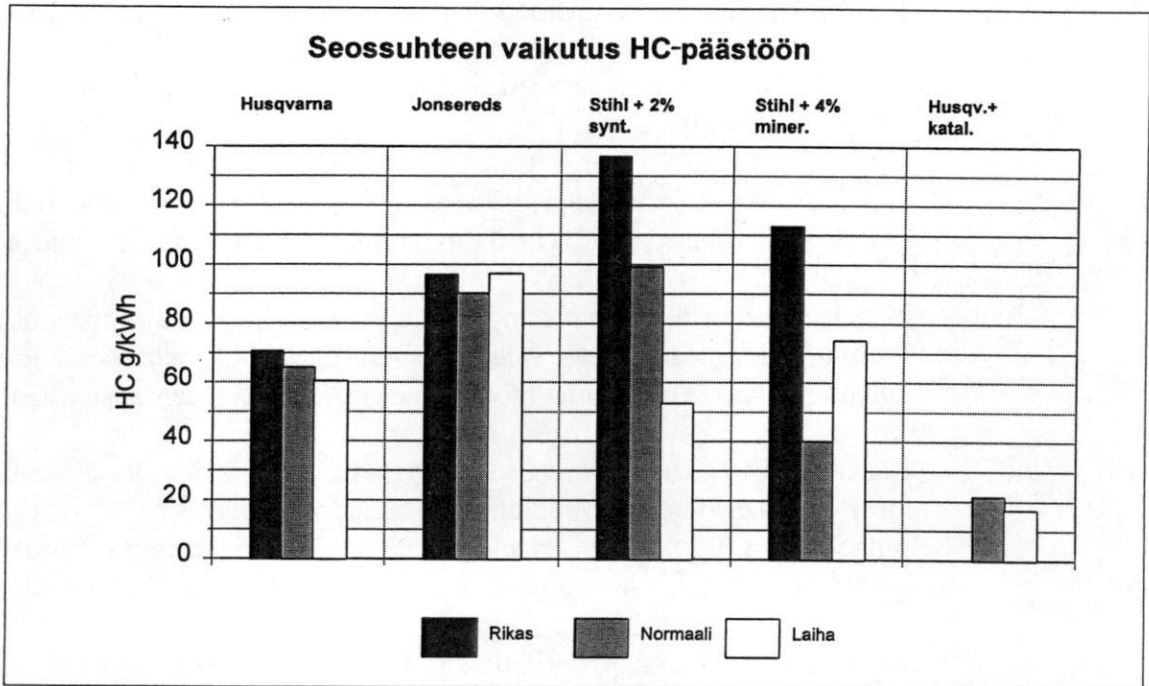


Kuva 14. Kaksitahtisen moottorin seossäädön vaikutus CO-päästöihin. Bensiini oli BE98ER, öljyseokset: Husqvarnan 2 % synteettinen, Jonseredin 2 % mineraali, Stihlin joko 2 % synteettinen tai 4 % mineraali.

Figure 14. Effect of Air-fuel ratio on CO emissions. The fuel was BE98ER, the oil percentage in the fuel was: Husqvarna 2% synthetic, Jonsered 2% mineral, Stihl 2% synthetic and Stihl 4% mineral oil.

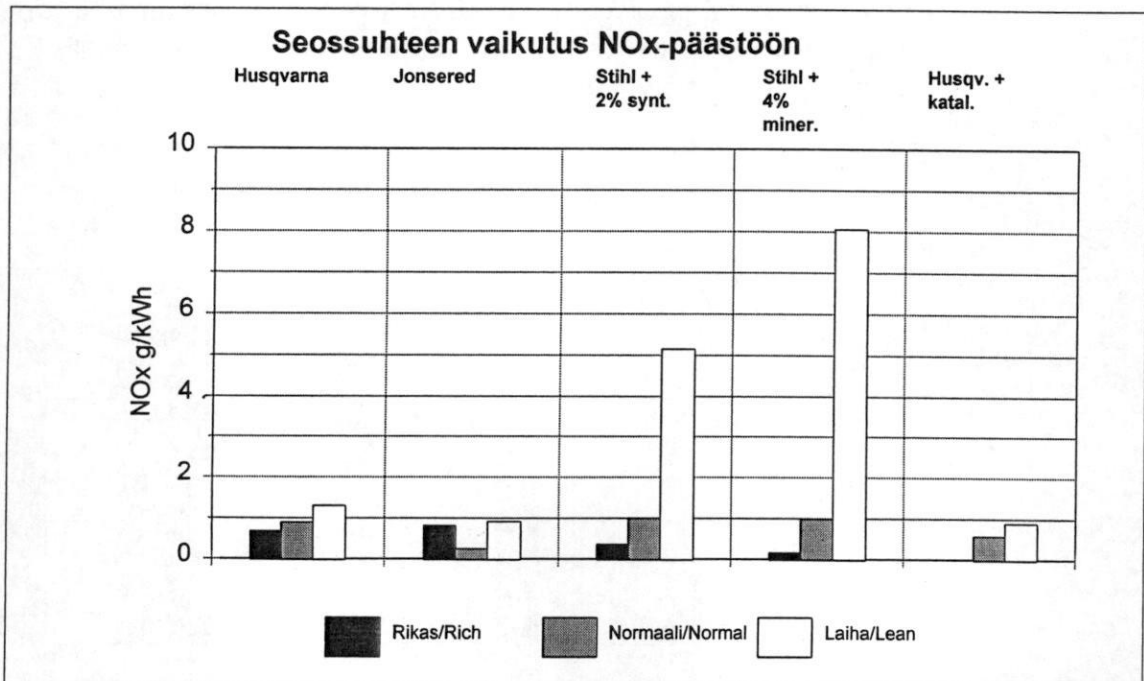
Säätö vaikuttaa hyvin selvästi ja voimakkaasti päästöihin. Rikas seos aiheuttaa suuret CO- ja HC-päästöt sekä pienet NO_x-päästöt. Rikasta seosta käytettäessä palamisilmaa on teoreettista määrää vähemmän ja osa polttoaineesta jää palamatta, jolloin CO- ja HC-päästöt lisääntyvät. NO_x-päästöt vastaavasti alenevat, koska palamislämpötila alenee ja seoksessa ei myöskään ole ylimääräistä happea. Seosta ei voida laihentaa rajattomasti, koska laiha seos aiheuttaa liian suuren pyörimisnopeuden, voiteluhäiriötä ja myös palamishäiriötä ilmaantuu, jolloin taasen HC-päästöt lisääntyvät.

Normaaliin seokseen verrattuna laiha seos vähensi suurimmillaan CO-päästöjä 72 %, HC-päästöjä 47 % ja lisäsi NO_x-päästöjä 721 %. Rikas seos vastaavasti suurimmillaan lisäsi CO-päästöjä 65 %, HC-päästöjä 181 % ja vähensi NO_x-päästöjä 84 %. *Sun ym.* käyttivät kolmea moottorisahan moottoria ja näiden seossuhteita he muuttivat myös laihaaksi ja rikkaaksi. Laiha seos vähensi suurimmillaan CO-päästöjä 34 %, HC-päästöjä 10 % ja lisäsi NO_x-päästöjä 51 %. Rikas seos vastaavasti lisäsi CO-päästöjä 166 %, HC-päästöjä 16 % ja vähensi NO_x-päästöjä 51 %.



Kuva 15. Kaksitahtisen moottorin seossäädön vaikutus HC-päästöihin. Bensiini oli BE98ER, öljyseokset: Husqvarnan 2 % synteettinen, Jonseredin 2 % mineraali, Stihlin joko 2 % synteettinen tai 4 % mineraali.

Figure 15. Effect of Air-Fuel ratio on HC emissions. The fuel was BE98ER, the oil percentage in the fuel was: Husqvarna 2% synthetic, Jonsered 2% mineral, Stihl 2% synthetic and Stihl 4% mineral oil.



Kuva 16. Kaksitahtisen moottorin seossäädön vaikutus NO_x-päästöihin. Bensiini oli BE98ER, öljyseokset: Husqvarnan 2 % synteettinen, Jonseredin 2 % mineraali, Stihlin joko 2 % synteettinen tai 4 % mineraali.

Figure 16. Effect of Air-fuel ratio on NO_x emissions. The fuel was BE98ER, the oil percentage in the fuel was: Husqvarna 2% synthetic, Jonsered 2% mineral, Stihl 2% synthetic and Stihl 4% mineral.

Sekä CO- että HC-päästöt ovat kaksitahtisissa pienmoottoreissa luonnoistaan suuria. Näihin voidaan vaikuttaa kaasuttimen seossuhteen säädöllä helposti useita kymmeniä prosentteja. Verrattaessa säätöjen ääriarvojen aiheuttamia päästömääriä toisiinsa, ero voi olla helposti kaksin- tai kolminkertainen.

NO_x-päästöt ovat tämän tyyppisissä moottoreissa pienet ja vaikka säätö vaikuttaa prosentteina laskettuna voimakkaasti NO_x-päästöihin, ne ovat kuitenkin suuruusluokaltaan silti pieniä.

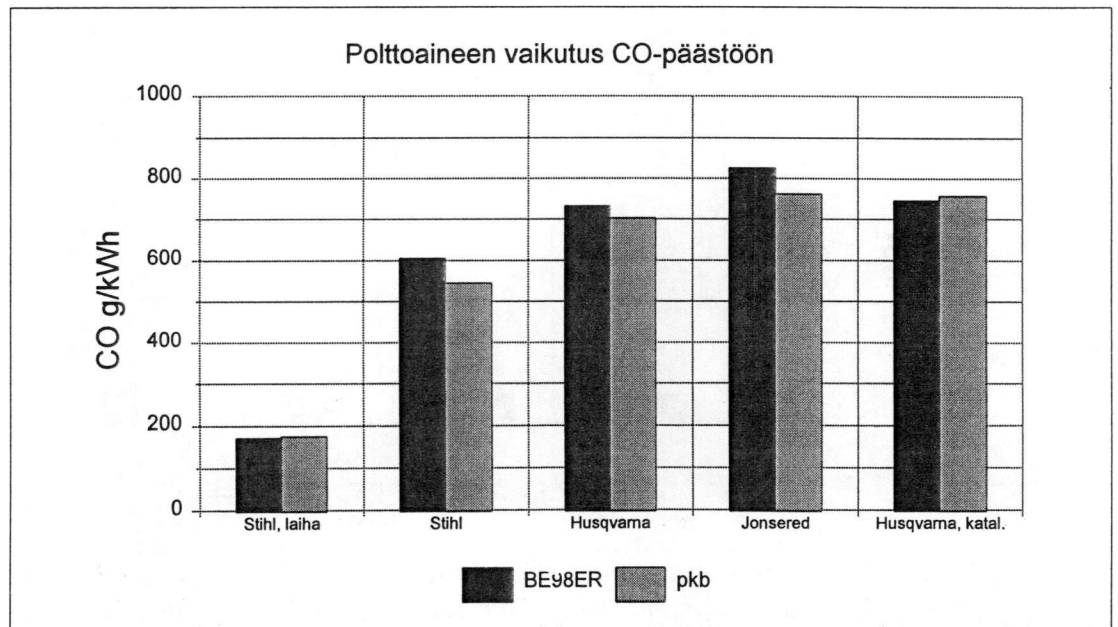
Niin kauan kuin tällaisten pienmoottoreiden seossuhteiden säätömahdollisuudet pysyvät laajoina päästömäärät voivat vaihdella suuresti. Rajoittamalla seossuhteen säätöaluetta, kuten Jonsered- ja Husqvarna-moottoreissa oli tehty, voidaan täysin väärät säädöt välttää.

Kaksitahtisissa pienmoottoreissa käytetyt katalysaattorit eivät vaadi tarkkaa seossuhdetta kuten esim. henkilöautojen kolmitiekatalysaattorit vaativat. Kun katalysaattori on käytössä, saha voidaan säätää lähes samalla lailla kuin ilmankin katalysaattoria. Katalysaattorin tyyppistä riippuen hyvin laihoja tai rikkaita seoksia ei voida kuitenkaan käyttää.

Kuvissa 14 - 16 on myös esitetty seossuhteen vaikutus katalysaattorilla varustettuun moottoriin kun seos on ollut normaali tai laiha.

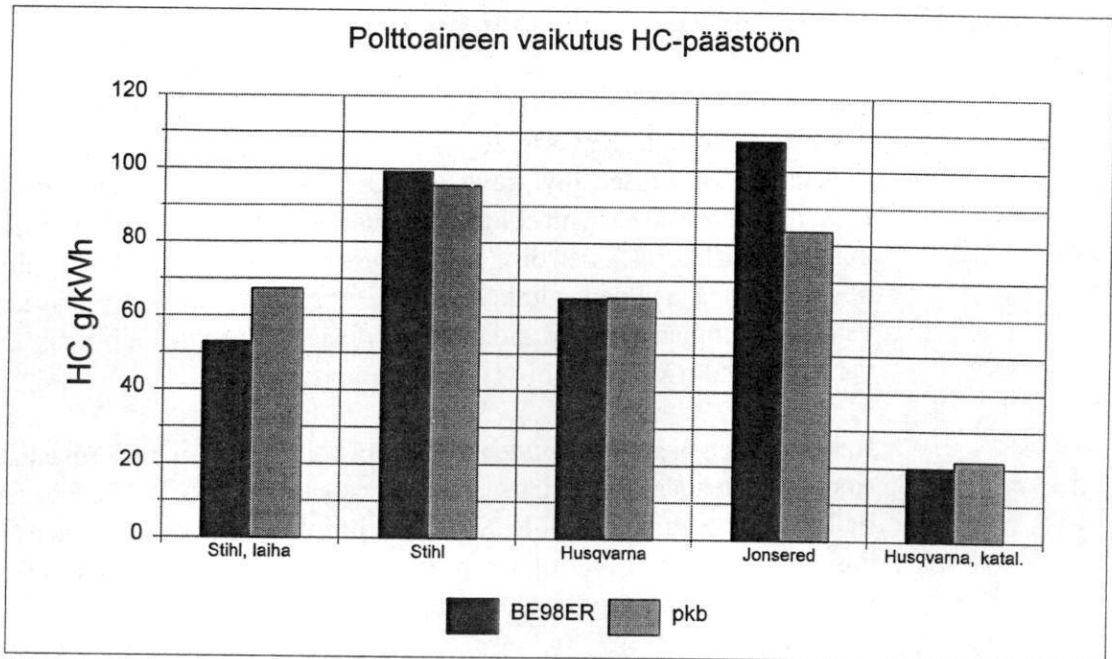
4.2 Polttoaineen vaikutus

Polttoaineiden vaikutukset päästöihin on esitetty kuvissa 17 - 19. Perusbensiininä käytetty BE98ER on jo tyypiltään vähäpäästöinen bensiini. Tähän verrattuna pienmoottoribensiiniä (pkb) käytettäessä päästöt ovat olleet hieman pienempiä. Tutkimuksessa on verrattu kahta pidemmälle jalostettua bensiinilaatua toisiinsa. Jos vertailubensiininä olisi ollut normaali bensiinilaatu, päästöerot olisivat olleet suurempia.



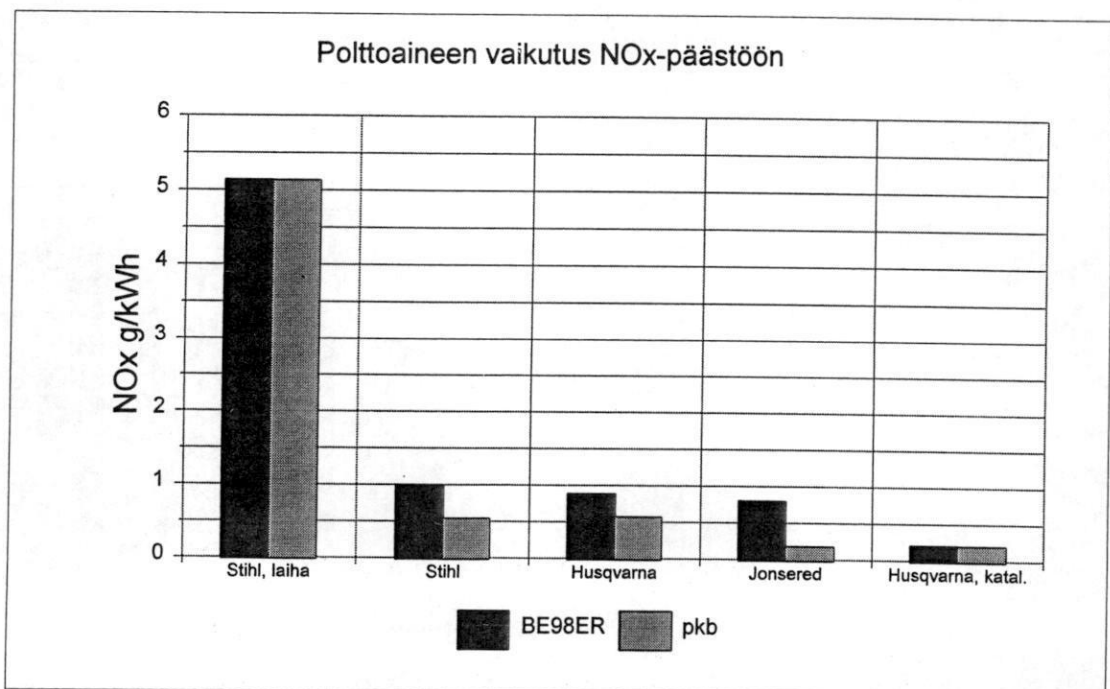
Kuva 17. Polttoaineen vaikutus moottoreiden CO-päästöihin. Voiteluöljyinä käytettiin synteettisiä öljyjä ja 2 % seoksia.

Figure 17. Effect of fuel on engine CO emissions. The lubricating oil was synthetic with 2 % mixture, laiha=lean, fuels: see table 2.



Kuva 18. Polttoaineen vaikutus moottoreiden HC-päästöihin. Voiteluöljyinä käytettiin synteettisiä öljyjä ja 2 % seoksia.

Figure 18. Effect of fuel on engine HC emissions. The lubricating oil was synthetic with 2% mixture, laiha=lean, fuels: see table 2.



Kuva 19. Polttoaineen vaikutus moottoreiden NO_x-päästöihin. Voiteluöljyinä käytettiin synteettisiä öljyjä ja 2 % seoksia.

Figure 19. Effect of fuel on engine NO_x emissions. The lubricating oil was synthetic with 2% mixture, laiha=lean, fuels: see table 2.

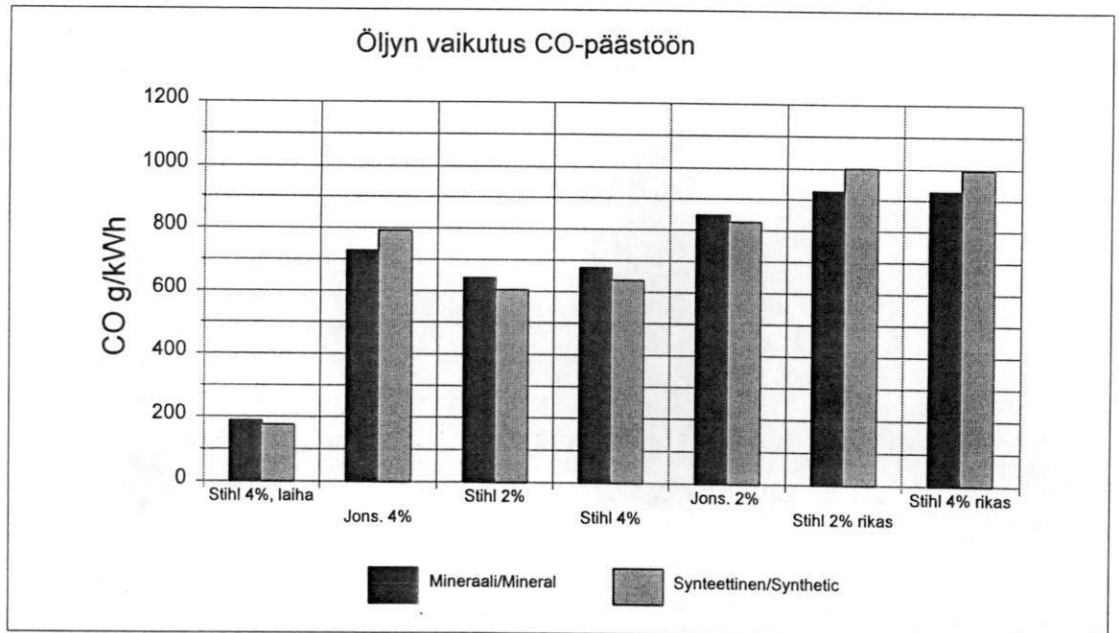
4.3 Öljyn vaikutus päästöihin

Kaksitahtisten moottoreiden voiteluöljyt voivat olla mineraaliöljyperusteisia tai synteettisesti valmistettuja. Kuvissa 20 - 22 on esitetty öljyjen vaikutusta päästöihin. Kuvien mukaisesti synteettisen öljyn käyttö on tässä kokeessa aiheuttanut hieman etenkin HC-päästöjen lisääntymistä eli synteettinen voiteluöljy ei ole palanut polttoaineen kanssa niin hyvin kuin mineraaliperustainen öljy. Mittauksissa käytettiin vain yhden valmistajan mineraalipohjaista öljyä ja yhden valmistajan synteettistä öljyä. Öljytyypin tarkempi selvittäminen vaatisi useampien öljymerkkien ja -tyyppien samanaikaista mittaamista, jotta voitaisiin varmistaa onko kyseessä öljytyypin ominaisuus.

Kaksitahtisten pienmoottoreiden öljymäärä polttoaineessa on normaalisti 2 - 4 %. Voiteluaineseokset tehdään monasti itse. Mittauksissa käytettiin 2 ja 4 % seoksia sekä mineraaliöljyille että synteettisille öljyille. Näillä tutkittiin öljymäärän vaikutusta päästöihin. Käytännössä öljymäärät voivat olla runsaampiakin, koska mittatarkkuudet ovat heikkoja ja vaurioiden pelossa öljyä käytetään enemmän.

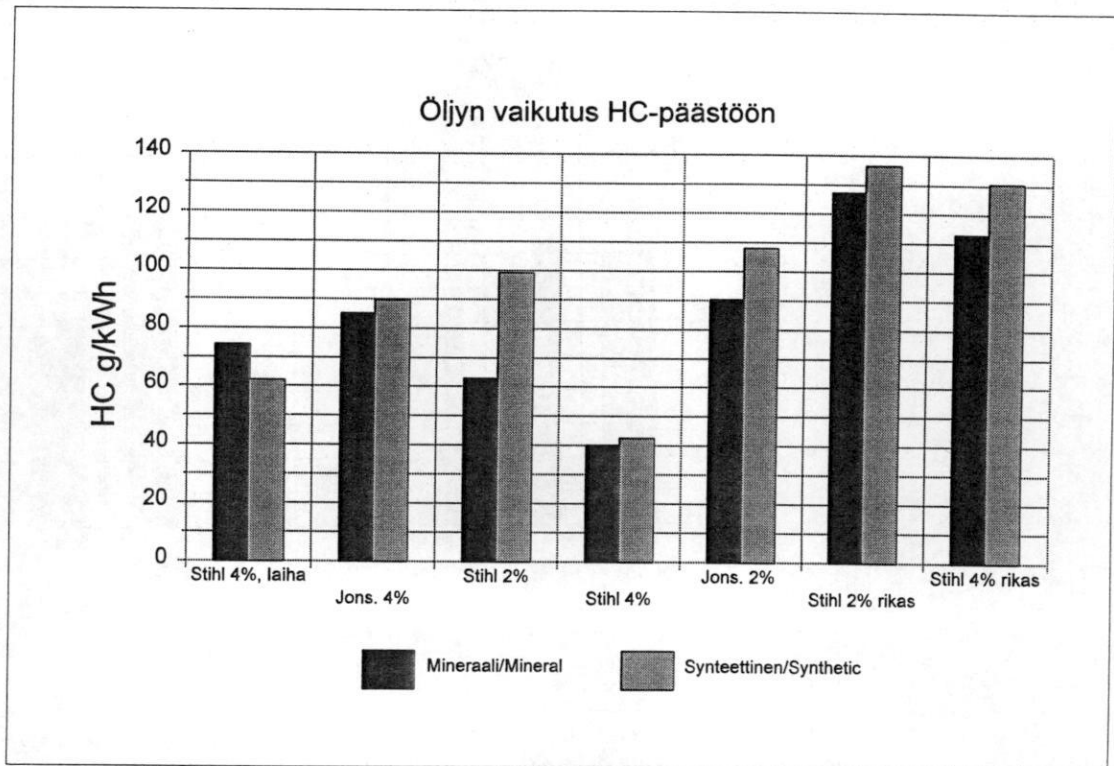
Kuvissa 23 - 25 on esitetty öljyseoksen vaikutus päästöihin. Tulosten mukaan päästöt ovat olleet suuruusluokaltaan samanlaisia. Öljymäärän lisääminen on hieman vähentänyt HC- ja CO-päästöjä. NO_x-päästöissä on nähtävissä hieman lisääntymistä. Erot voivat kuitenkin johtua mittausten normaalista hajonnasta. Periaatteessa öljymäärän lisäämisen pitäisi johtaa suurentuneisiin HC-päästöihin, näin ei kuitenkaan ole tässä koesarjassa käynyt. Ilmeisesti tämä tapahtuisi vasta hieman suuremmalla öljymäärällä.

Runsas öljymäärä aiheuttaa pitkäaikaisessa käytössä moottorin karstoittumista. Lyhyissä oesarjoissa näin ei käy, mutta seurattaessa moottorin päästöjen muutoksia pitempiä aikaisissa kokeissa, tämä voisi näkyä.



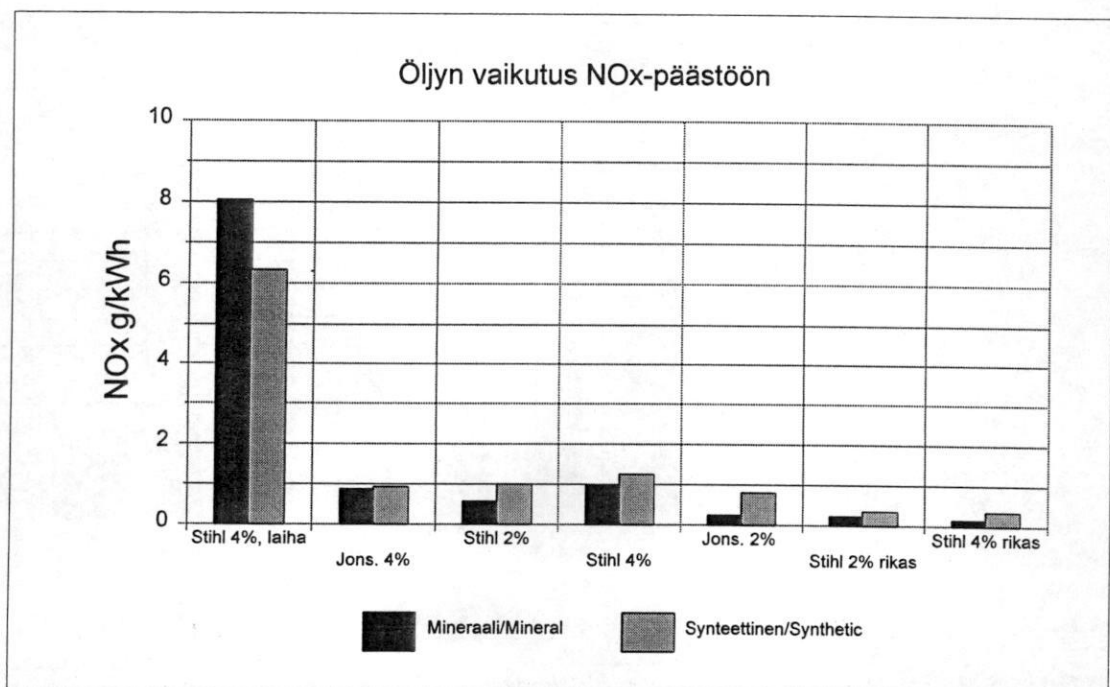
Kuva 20. Öljytyypin vaikutus CO-päästöihin käytettäessä erilaisia öljyseoksia ja erilaisia moottoreiden säätöjä.

Figure 20. Effect of oil type and mixture and air-fuel ratio on CO emissions (laiha=lean, rikas=rich).



Kuva 21. Öljytyypin vaikutus HC-päästöihin käytettäessä erilaisia öljyseoksia ja erilaisia moottoreiden säätöjä.

Figure 21. Effect of oil type and mixture and air-fuel ratio on HC emissions (laiha=lean, rikas=rich).



Kuva 22. Öljytyypin vaikutus NO_x-päästöihin käytettäessä erilaisia öljyseoksia ja erilaisia moottoreiden säätöjä.

Figure 22. Effect of oil type and mixture and air-fuel ratio on NO_x emissions (laiha=lean, rikas=rich).

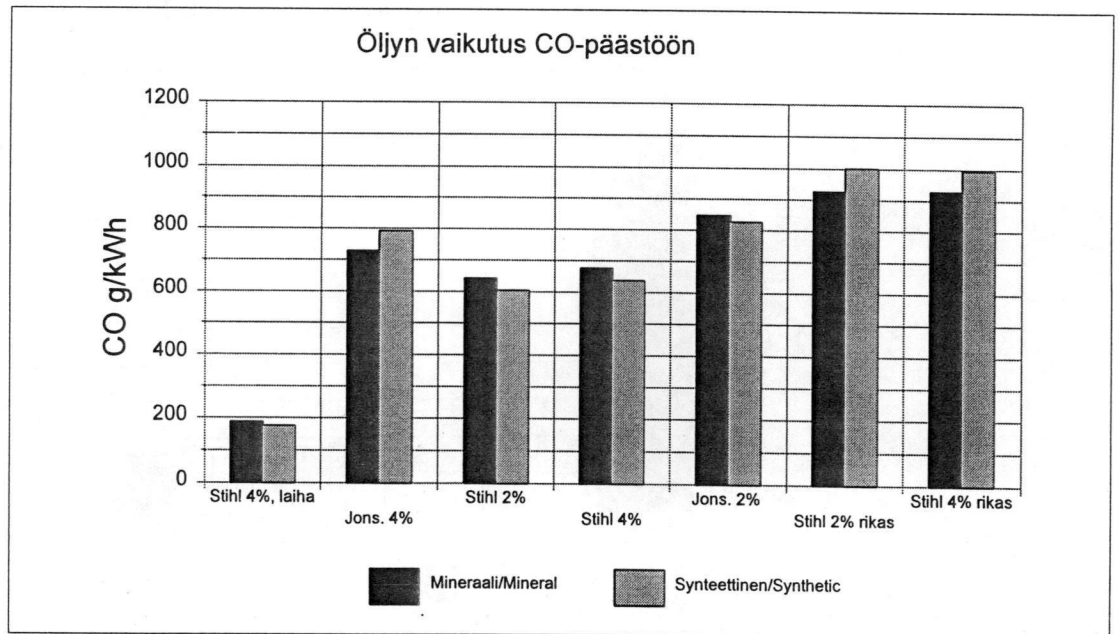
4.3 Öljyn vaikutus päästöihin

Kaksitahtisten moottoreiden voiteluöljyt voivat olla mineraaliöljyperusteisia tai synteettisesti valmistettuja. Kuvissa 20 - 22 on esitetty öljyjen vaikutusta päästöihin. Kuvien mukaisesti synteettisen öljyn käyttö on tässä kokeessa aiheuttanut hieman etenkin HC-päästöjen lisääntymistä eli synteettinen voiteluöljy ei ole palanut polttoaineen kanssa niin hyvin kuin mineraaliperustainen öljy. Mittauksissa käytettiin vain yhden valmistajan mineraalipohjaista öljyä ja yhden valmistajan synteettistä öljyä. Öljytyypin tarkempi selvittäminen vaatisi useampien öljymerkkien ja -tyyppien samanaikaista mittaamista, jotta voitaisiin varmistaa onko kyseessä öljytyypin ominaisuus.

Kaksitahtisten pienmoottoreiden öljymäärä polttoaineessa on normaalisti 2 - 4 %. Voiteluaineseokset tehdään monasti itse. Mittauksissa käytettiin 2 ja 4 % seoksia sekä mineraaliöljyille että synteettisille öljyille. Näillä tutkittiin öljymäärän vaikutusta päästöihin. Käytännössä öljymäärät voivat olla runsaampiakin, koska mittatarkkuudet ovat heikkoja ja vaurioiden pelossa öljyä käytetään enemmän.

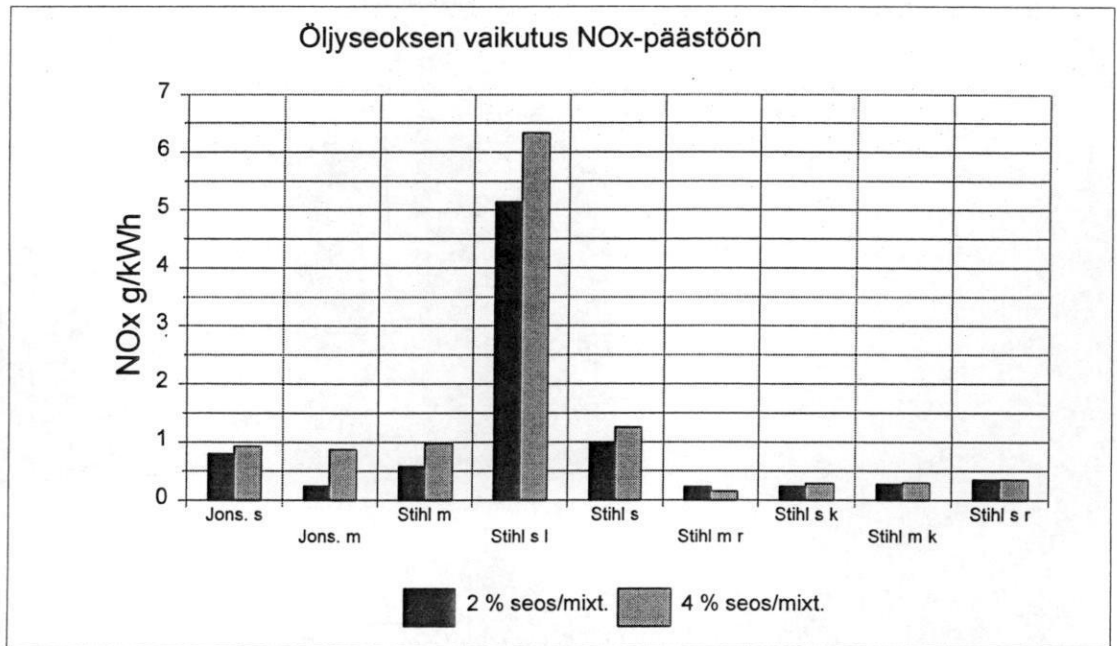
Kuvissa 23 - 25 on esitetty öljyseoksen vaikutus päästöihin. Tulosten mukaan päästöt ovat olleet suuruusluokaltaan samanlaisia. Öljymäärän lisääminen on hieman vähentänyt HC- ja CO-päästöjä. NO_x-päästöissä on nähtävissä hieman lisääntymistä. Erot voivat kuitenkin johtua mittausten normaalista hajonnasta. Periaatteessa öljymäärän lisäämisen pitäisi johtaa suurentuneisiin HC-päästöihin, näin ei kuitenkaan ole tässä koesarjassa käynyt. Ilmeisesti tämä tapahtuisi vasta hieman suuremmalla öljymäärällä.

Runsas öljymäärä aiheuttaa pitkäaikaisessa käytössä moottorin karstoittumista. Lyhyissä oesarjoissa näin ei käy, mutta seurattaessa moottorin päästöjen muutoksia pitempiaikaisissa kokeissa, tämä voisi näkyä.



Kuva 20. Öljytyypin vaikutus CO-päästöihin käytettäessä erilaisia öljyseoksia ja erilaisia moottoreiden säätöjä.

Figure 20. Effect of oil type and mixture and air-fuel ratio on CO emissions (laiha=lean, rikas=rich).



Kuva 25. Polttoaineen öljymäärän vaikutus moottorin NO_x-päästöön. (synt. = synteettinen öljy, min. = mineraaliöljy, r = rikas seos, l = laiha seos, k = katalysaattori)

Figure 25. Effect of oil percentage in the fuel on engine NO_x emissions. (synt. = synthetic oil min. = mineral oil, r = rich ratio, l = lean ratio, k = catalyst).

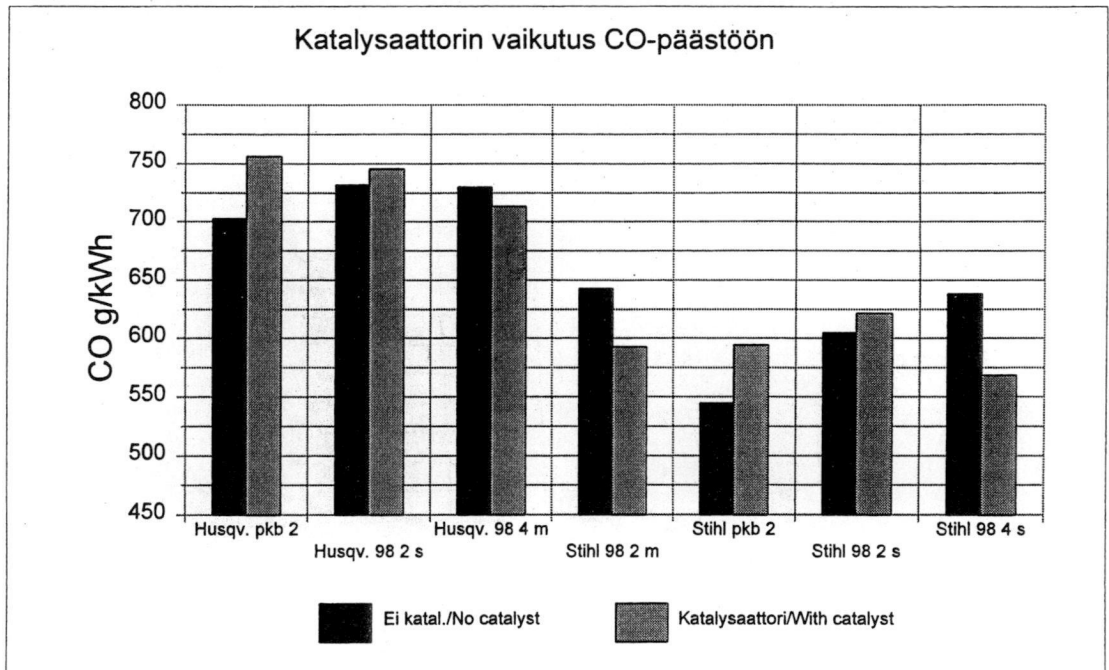
4.4 Katalysaattorin vaikutus

Katalysaattoria käytettiin sekä Husqvarna- että Stihl-moottoreissa. Käyttöohjeiden mukaan Husqvarnan katalysaattori vähentää HC, NO ja aldehydipäästöjä mutta se ei vähennä NO₂- eikä CO-päästöjä. Stihlin katalysaattori vähentää CO- ja HC-päästöjä.

Katalysaattorit asennettiin normaalien äänenvaimentimien tilalle ja moottorit säädettiin tämän jälkeen ohjeiden mukaisesti. Tämä säätö on siten erilainen kuin ilman katalysaattoria tehdyissä kokeissa ja koska polttoaine-ilma-seossuhde vaikuttaa voimakkaasti päästöihin, mittauksissa on mukana myös seossuhteiden muutoksien vaikutusta. Katalysaattori vaikuttaa kaasujen virtauksiin sylinteristä lisäten vastapainetta, jolloin moottorin toiminta myös muuttuu.

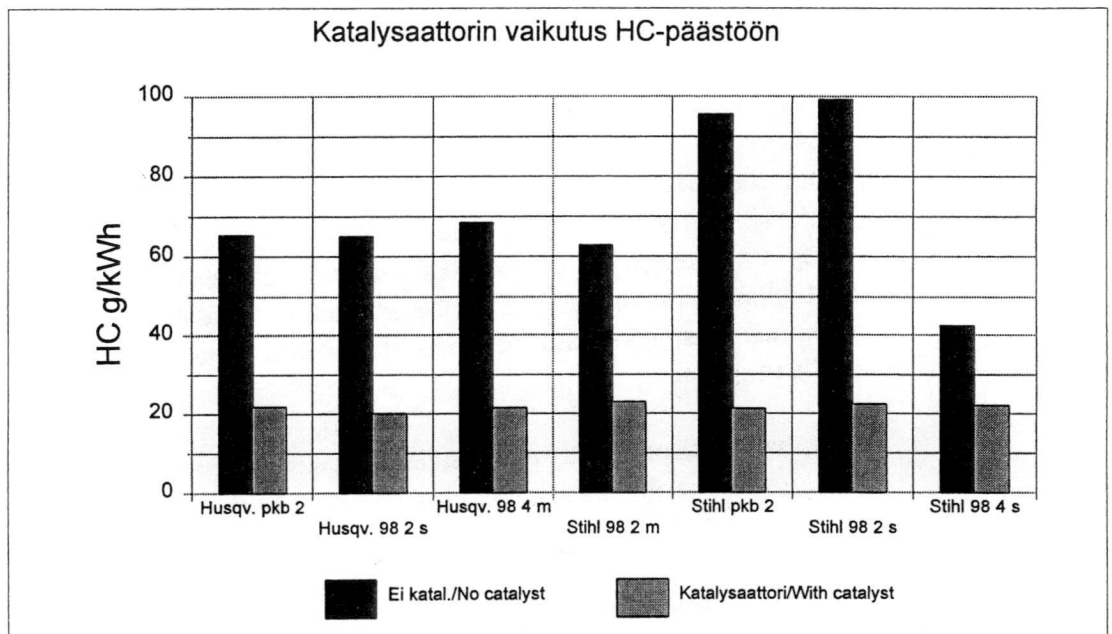
Kuvissa 26 - 28 on esitetty mittaustulokset katalysaattorin vaikutuksesta. Niiden mukaisesti katalysaattori ei ole vaikuttanut CO-päästöihin. CO-mittaustuloksissa on ilman katalysaattoria ja katalysaattorin kanssa eroja, mutta nämä erot johtunevat moottoreiden erilaisista säädöistä ja seossuhteista. Stihlin käyttöohjeen mukaan sen katalysaattorin olisi pitänyt vähentää CO-päästöjä. Näin ei ole kuitenkaan tapahtunut.

Katalysaattori on vaikuttanut hyvin selvästi HC-päästöihin, kummankin moottorin päästöt ovat alentuneet keskimäärin n. 70 %. Katalysaattori on vaikuttanut myös NO_x-päästöihin ja ne ovat alentuneet myös n. 70 %.



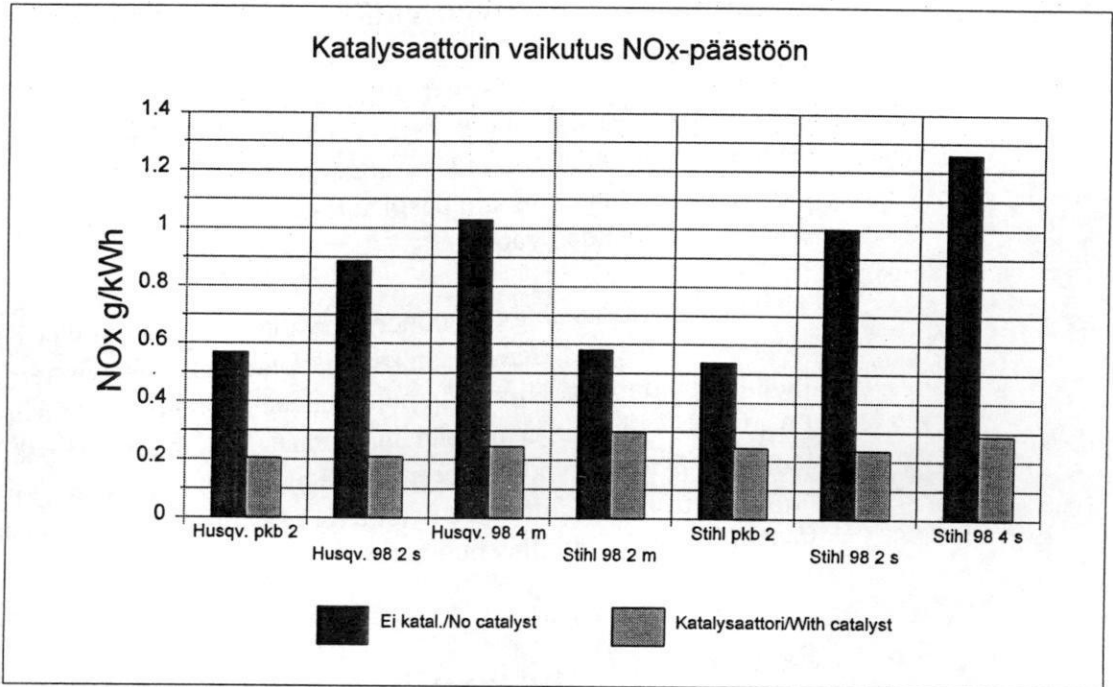
Kuva 26. Katalysaattorin vaikutus moottorin CO-päästöön (pkb 2 = pienmoottoribensiini ja 2 % synteettinen öljy, 98 2 s = BE98ER-bensiini ja 2 % synteettinen öljy, 98 4 m = BE98ER-bensiini ja 4 % mineraaliöljy, 98 2 m = BE98ER-bensiini ja 2 % mineraaliöljy, 98 4 s = BE98ER-bensiini ja 4 % synteettinen öljy)

Figure 26. Effect of catalyst on engine CO emissions. (pkb 2 = power tool gasoline with 2% synthetic oil, 98 2 s = BE98ER fuel with 2% synthetic oil, 98 4 m = BE98ER fuel with 4% mineral oil, 98 2 m = BE98ER fuel with 2% mineral oil, 98 4 s = BE98ER fuel with 4% synthetic oil).



Kuva 27. Katalysaattorin vaikutus moottorin HC-päästöön (pkb 2 = pienmoottoribensiini ja 2 % synteettinen öljy, 98 2 s = BE98ER-bensiini ja 2 % synteettinen öljy, 98 4 m = BE98ER-bensiini ja 4 % mineraaliöljy, 98 2 m = BE98ER-bensiini ja 2 % mineraaliöljy, 98 4 s = BE98ER-bensiini ja 4 % synteettinen öljy)

Figure 27. Effect of catalyst on engine HC emissions. (pkb 2 = power tool gasoline with 2% synthetic oil, 98 2 s = BE98ER fuel with 2% synthetic oil, 98 4 m = BE98ER fuel with 4% mineral oil, 98 2 m = BE98ER fuel with 2% mineral oil, 98 4 s = BE98ER fuel with 4% synthetic oil).



Kuva 28. Katalysaattorin vaikutus moottorin NO_x-päästöön (pkb 2 = pienmoottoribensiini ja 2 % synteettinen öljy, 98 2 s = BE98ER-bensiini ja 2 % synteettinen öljy, 98 4 m = BE98ER-bensiini ja 4 % mineraaliöljy, 98 2 m = BE98ER-bensiini ja 2 % mineraaliöljy, 98 4 s = BE98ER-bensiini ja 4 % synteettinen öljy)

Figure 28. Effect of catalyst on engine NO_x emissions. (pkb 2 = power tool gasoline with 2% synthetic oil, 98 2 s = BE98ER fuel with 2% synthetic oil, 98 4 m = BE98ER fuel with 4% mineral oil, 98 2 m = BE98ER fuel with 2% mineral oil, 98 4 s = BE98ER fuel with 4% synthetic oil).

Pakokaasujen lämpötilat olivat ilman katalysaattoria n 400 °C ja kun katalysaattori oli käytössä lämpötilat olivat n. 600 °C. Korkea pakokaasujen lämpötila aiheuttaa korkean äänenvaimentimen pintalämpötilan ja tätä kautta palovamman ja palovaaran mahdollisuus lisääntyy.

Franz & Landerl mukaan katalysaattorin käyttö moottorisahassa on vaikeaa. Moottorisahan katalysaattoriin saattaa kohdistua yli 1100 °C lämpötila sekä sen vaihtelu saattaa olla suurta ja tapahtua nopeasti, jolloin katalysaattori altistuu suurille muodonmuutoksille. Lisäksi katalysaattoriin saattaa kohdistua yli 100 g:n kiihtyvyyksiä. Moottorisahan tulee olla mahdollisimman pienikokoinen ja kevyt, mikä aiheuttaa hankaluuksia kaikkien kaasunvaihdon komponenttien suunnittelulle, myös katalysaattorin.

Franz & Landerl tekivät kokeita 50 cm³ katalysaattorimoottorisahalla, jossa oli elektronisesti ohjattu polttoaineen ruiskutus. He tekivät sahan muutoksia, joista tärkein oli pakosarjan uudistaminen. Pakoaukkoon asennettiin sahan rakenteeseen sopiva 420 mm pituinen pakoputki, joka päättyi katalysaattoriin muodostaen nk. Helmholtzin värähtelijän. Tämä parantaa moottorin kaasunvaihtoa sekä pienentää sylinterin tehollista keskipainetta korkeilla pyörimisnopeuksilla, jolloin voidaan välttää liiallisia pyörimisnopeuksia esim. karsinnassa. Koska nimenomaan moottorisahoille tarkoitettua päästökuormitusyhtälöä ei ollut olemassa, he kehittivät syklin, joka kuvastaa puunkaatoa ja karsintaa. Pakosarjan muutos yhdessä katalysaattorin kanssa vähensi CO-päästöjä 58 %, HC-päästöjä 15 % ja lisäsi NO_x-päästöjä 13 %.

4.5 Moottorin rakenteen vaikutus

Merkittävää parannusta kaksitahtiottomoottoreiden päästöihin toisivat lähinnä pitkälle viedyt rakenteelliset muutokset. Tällainen olisi mm. polttoaineen ruiskutus suoraan sylinteriin, jollainen on muutamalla moottorivalmistajilla rakenteilla. Tämän tyyppiset ratkaisut tullevat kuitenkin ensin auto- ja venemoottoripuolelle kuin moottorisahoihin tekniikan kalleuden vuoksi.

Kaikki pienet kaksitahtiottomoottorit on varustettu kaasuttimilla. Useimmissa moottoreissa ilma-polttoaineseos kierrätetään kampikammion kautta sylinteriin, jolloin mäntä toimii huuhtelupumpuna. Niinikään polttoaineen seassa on voiteluaine, jonka tarkoituksena on voidella sylinterin ja männän liukupinnat. Merkittävimpiä päästöjen lisääjiä ovat juuri huuhteluhäviöt sekä polttoaineen seassa oleva voiteluaine, joka palaa sylinterissä lisäten mm. HC-päästöjä. Jotta näistä johtuvia päästöjä saataisiin vähennettyä, moottoreiden rakenteita pitäisi muuttaa huomattavasti.

4.6 Päästöjen vähentäminen

Kaksitahtimoottoreiden päästöihin voidaan vaikuttaa paljolti samoin keinoin kuin nelitahtimoottoreidenkin päästöihin. Tällaisia keinoja ovat mm. seossuhteen laihentaminen sekä katalysaattorin käyttö. Käyttäjä voi säätää tällaisen moottorin seossuhteen itse. Säätö vaikuttaa päästöihin helposti useita kymmeniä prosenteja. Uusimmissa kaksitahtimoottoreissa säätöaluetta on pienennetty ja vaikutus on vähäisempi. Näiden moottoreiden käytön kannalta seossuhteen säätö on ongelmallinen. Säätöä tarvitaan kulumien, muutosten ja esimerkiksi vuoristokäytön takia. Päästöt ovat pienimmillään seoksen ollessa laihan. Seossuhteen laihentamisen rajana on moottorin lämpenemisen lisäksi voitelun heikkeneminen normaalia voiteluainemäärää käytettäessä. Voiteluaineen lisääminen taas suurentaa päästöjä, koska koko voiteluainemäärä ei pala. Seossuhteen liika laihentaminen lisää HC-päästöjä palamisen heikkenemisen vuoksi.

Katalysaattorit vähensivät kaksitahtisten pienmoottoreiden HC- ja NO_x-päästöjä n. 70 %. Mittauksissa olleiden moottoreiden katalysaattorit eivät vähentäneet CO-päästöjä. NO_x-päästöön katalysaattorin merkitys on kuitenkin vähäinen, koska se on jo muutenkin alhainen.

Pienten kaksitahtimoottoreiden käyttäjä altistuu normaalia enemmän sekä pakokaasuille että polttoainehöyryille, koska nämä ovat hengitysalueella. Polttoaineen höyryjen haitallisuutta on pyritty vähentämään pienmoottoribensiinin avulla. Kaksitahtisten moottorien osalta se vähensi hieman myös päästöjä.

5 TULOSTEN MERKITYS JA YHTEENVETO

Purasen ja Mattilan mukaan Suomessa on vuonna 1990 ollut bensiinikäyttöisiä siirrettäviä työkoneita taulukon 8 mukaisesti.

Vuodesta 1990 suurin muutos on tapahtunut ammattimetsurien määrässä. Vuonna 1990 ammattimetsureita oli noin 6000 ja vuonna 1995 määrä oli enään noin 2000. Tämä vähentää pienmoottoreiden osalta päästömääriä, mutta lisää metsätraktoreiden päästömääriä, koska kaadettu puumäärä on samaa suuruusluokkaa. Laskennassa ammattikäytön muutos vuodesta 1990 on otettu huomioon siten, että kokonaispäästöjen laskennassa ammattikäytön moottorisahojen määrä on ollut 7000. Jos oletetaan koneiden taulukon viiden ensimmäisen koneryhmän olevan neli- ja loppujen kaksitahtimoottoreita voidaan arvioida näistä syntyviä päästömääriä vuotta kohti. Kirjallisuusviitteisiin ja tämän tutkimuksen tuloksiin nojautuen koneiden ominaispäästöt ovat taulukon 9 mukaisia (kuvat 7 ja 13). Moottorisahojen kohdalla on oletettu ammattikäytössä olevien sahojen olevan paremmassa kunnossa kuin muiden sahojen (säädot ym.).

Taulukko 8. Suomen bensiinikäyttöiset siirrettävät työkoneet vuonna 1990.
Table 8. Small utility gasoline engines in Finland in 1990.

	Nimellisteho <i>Rated power</i> kW	Käyttötehon suuruus nimellistehosta <i>Portion of operating power of rated power</i>	Lukumäärä <i>Number</i> kpl	Vuotuinen käyttöaika <i>Annual operating time</i> h/a
Täryttimet <i>Vibration paltes</i>	3,5	0,6	4300	200
Ruohonleikkurit <i>Lawn mowers</i>	3	0,4	900000	20
Generaattorit <i>Generators</i>	3	0,6	42000	50
Puutarhajyrsimet <i>Rotary tillers</i>	3	0,5	70000	10
Lumilingot <i>Snow blowers</i>	4	0,3	20000	10
Moottorisahat amm. <i>Chain saws, professional</i>	2,5	0,6	11000	900
Moottorisahat muu <i>Chain saws, other</i>	1,5	0,3	300000	10
Raivaussahat <i>Brush saws</i>	2	0,4	50000	200
Yhteensä <i>Total</i>			1397300	

Taulukko 9. Tutkimustulosten mukaan arvioidut ominaispäästöt.
Table 9. Estimated specific emissions according to this study.

Laite <i>Machine</i>	HC g/kWh	CO g/kWh	NO _x g/kWh
Moottorisahat, ammattikäyttö <i>Chain saws, professional</i>	150	550	0,7
Moottorisahat, muu käyttö <i>Chain saw other</i>	200	700	1,0
Raivaussahat <i>Brush saws</i>	150	550	0,7
Nelitahtimoottorit <i>4-stroke engines</i>	20	450	3,0

Näiden perusteella saadaan kokonaispäästöiksi taulukon 10 mukaiset määrät. Laskennasta on muistettava, että pientyökoneiden osalta ei ole olemassa kattavia selvityksiä koneiden vuosittaisista käyttömääristä, käyttötehoista ja polttoaineen kulutuksista. Tässä esitetyt laskelmat perustuvat arvioihin ja niissä voi olla melko suuriakin arviointivirheitä. Luvuista havaitaan, että varsinkin hiilimonoksidin määrä on suhteellisen suuri. Palamattomien hiilivetyjen määrä ei sen sijaan ole mitenkään erityisen suuri. Typenoksideita ei tämäntyyppisistä moottoreista odotusten mukaisesti muodostu kovinkaan paljoa.

Taulukossa 11 on esitetty tieliikenteen pakokaasupäästöjä vuodelta 1995 (*Liisa 95*) ja rautatie-, laiva- ja lentoliikenteen päästöjä vuodelta 1990 (*Liikenne ja ympäristö*) yhdessä arvioitujen pienmoottoripäästöjen kanssa. Pienmoottoreiden HC- ja CO-päästöt

Taulukko 10. Bensiinikäyttöisten työkoneiden päästömäärät maassamme.

Table 10. Estimated annual emissions of small utility gasoline engines in Finland.

	HC t/a	CO t/a	NO _x t/a
Kaksitahtimoottorit 2-stroke engines			
Moottorisahat amm. <i>Chain saws, prof.</i>	1418	5198	7
Moottorisahat muu <i>Chain saws, other</i>	270	945	1
Raivaussahat <i>Brush saws</i>	1200	4400	6
Yhteensä <i>Total</i>	2888	10543	14
Nelitahtimoottorit 4-stroke engines			
Täryttimet <i>Vibration plates</i>	36	813	5
Ruohonleikkurit <i>Lawn mowers</i>	432	9720	65
Generaattorit <i>Generators</i>	76	1701	11
Puutarhajyrsimet <i>Rotary tillers</i>	21	473	3
Lumilingot <i>Snow blowers</i>	5	108	1
Yhteensä <i>Total</i>	570	12814	85
Neli- ja kaksitahtimoottorit 4- and 2 stroke engines			
Yhteensä <i>Total</i>	3458	23357	99

ovat maassamme paljon suurempia kuin lento-, laiva- ja rautatieliikenteen vastaavat päästöt yhteensä. Pientyökoneiden HC- ja CO-päästöt ovat suuruusluokaltaan yhtä suuria kuin katalysaattorilla varustettujen henkilöautojen vastaavat päästöt. Pienmoottoreiden NO_x-päästö on selvästi pieni muihin päästöihin verrattuna. Vaikka yksittäisten pienmoottoreiden päästömäärät ovat pieniä, niiden ominaispäästöt ovat korkeat ja koneiden lukumäärä on suuri mikä nostaa pienmoottoreiden kokonaispäästömäärät korkeiksi ja merkittäviksi.

Pientyökoneiden moottoreiden seossuhde vaikuttaa voimakkaasti päästömääriin. Säätämällä moottoreiden seossuhteita laihaksi tai rikkaaksi vähennetään tai lisätään HC- ja CO-päästöjä 20 - 80 %. Samalla myös NO_x-päästöt muuttuvat, mutta ne

ovat suuruusluokaltaan silti usein pieniä. Moottoreiden kehityksessä pitäisi pyrkiä laihempiin seossuhteisiin sekä suunnittelemaan moottoreiden säädöt niin, etteivät käyttäjät voi säätää moottoreitaan täysin väärin.

Pientyökoneiden päästöjä voidaan vähentää myös katalysaattoreilla, ne vaikuttavat päästöihin useita kymmeniä prosentteja.

Polttoaineen vaikutus päästöihin oli vähäinen, erot johtuivat lähinnä muuttuneesta seossuhteesta. Pientyökoneita varten kehitetty pienmoottoribensiini onkin tarkoitettu suoraan käyttäjän hengitykseen joutuvien haitallisten kaasujen vähentämiseen. Kaksitahtisten moottoreiden polttoaineiden öljyalaatu tai -pitoisuus eivät tässä tutkimuksessa vaikuttaneet päästöihin.

Taulukko 11. Maantie- (1995), lento- (1990), laiva- ja rautatieliikenteen (1990) sekä pientyökoneiden vuotuiset päästömäärät.

Table 11. Annual emissions of road (1995), air (1990), sea and railway transport (1990) and small utility engines.

	HC t/a	CO t/a	NO _x t/a
Henkilöautot yhteensä <i>Passenger cars, total</i>	43167	267665	77014
Henkilöautot, katalysaattori <i>Passenger cars with catalyst</i>	3344	28766	3922
Pakettiautot <i>Vans</i>	2606	15722	8254
Linja-autot <i>Buses</i>	12440	6198	12440
Kuorma-autot <i>Trucks</i>	5418	15265	34055
Maantieliikenne yhteensä <i>Road transport, total</i>	63631	304850	131763
Lentoliikenne <i>Air transport</i>	500	2000	1100
Laivaliikenne <i>Sea transport</i>	300	300	5900
Rautatieliikenne <i>Railway transport</i>	700	500	5000
Pientyökoneiden moottorit <i>Small utility engines</i>	3458	23357	99

Korjaus s. 49 taulukko 11. Taulukossa on HC-arvoissa virheitä. Henkilöautojen vuotuinen HC-päästö on 40 075 t/a (taulukossa 43 167) ja linja-autojen 2 618 (taulukossa 12 440).

Pienmoottoreiden päästöjä voidaan vähentää helposti useita kymmeniä prosentteja, mutta se vaatii näiden moottoreiden päästöongelman tunnistamisen, päästötutkimusten tekemistä sekä päästörajojen käyttöönottoa. Tämä pakottaa valmistajat kehittämään vähäpäästöisempiä moottoreita. Tämä johtaisi myös kalliimpaan tekniikkaan, jolloin pientyökoneiden myyntihinnat kohoaisivat. Verrattuna pienmoottoreiden käyttämään polttoainemäärään niiden päästöt ovat suuria, tällä hetkellä HC- ja CO-päästöt ovat yhtä suuria kuin katalysaattorihenkilöautojen päästöt.

Ruohonleikkuun ja maisemanhoidon osalta pitää myös harkita työn tarpeellisuutta sekä kasvin kasvatustapoja. Käyttämällä sopivaa lajiketta (lyhytkasvuista) ja pieniä lannoitemääriä hoitotarvetta voidaan vähentää. Samoin käyttötarkoitus vaikuttaa hoitotarpeeseen. Esimerkiksi niitty tarvitsee vähemmän hoitoa kuin nurmikko.

Pienmoottoreiden päästöjen mittaaminen on suurempiin moottoreihin verrattuna vaativampaa. Näitä moottoreita ei ole tehty kestävämpään jatkuvan nimellistehon käyttöä, jolloin kuormitusjaksoissa on otettava huomioon moottorin kestävyys. Tällöin ei aina saavuteta vakiintuneita mittaustuloja. Yksisylinteristen moottoreiden käynti ei myöskään ole monisylinterisiin verrattuna tasaista jolloin päästöissä syntyy normaalia enemmän vaihtelua. Nämä seikat vaikeuttavat etenkin pienien erojen tutkimista.

6 SAMMANFATTNING

Avgasutsläpp från småmotorer

Småmaskiner används yrkesmässigt i skogs- och trädgårdsarbeten samt i kommunaltekniska arbeten. Vidare förekommer de i hobbybruk och hushållsarbeten. Exempel på småmaskiner är motorsågar, röjningssågar, gräsklippare, jordfräsar, snöslungor, generatorer, vibratorer. Fastän dessas motoreffekter är små och de enskilda maskinernas bränsleförbrukning är liten, är deras antal i hela landet dock betydande och därigenom är också deras avgasutsläpp betydande. Det har uppskattats att det i Finland finns ca 1,4 miljoner mobila eller handburna bensindrivna småmaskiner. Man har uppskattat dessas bränsleförbrukning till 39 milj. l, utsläpp av kolväten till 3500 t, kolmonoxidutsläpp till 23400 t och kväveoxidutsläpp till 100 t per år. Småmaskinernas kolväte- och kolmonoxidutsläpp är i samma storleksordning som utsläppen av dessa ämnen från landets katalysatorförsedda personbilar.

Motorerna i småmaskiner förutsätts vara billiga och lätta. Därför är motorerna enkla till konstruktionen, och man har inte fäst nämnvärd uppmärksamhet vid utsläppen. Användaren kan eller måste ofta själv justera förgasarens bränsle-luftförhållande och blanda smörjoljan i tvåtaktsmotorernas bränsle.

I denna undersökning tog vi reda på småmotorers avgasutsläpp med hjälp av en litteraturrenomgång och med egna mätningar. Förgasarnas blandningsförhållanden inverkar kraftigt på avgasutsläppen. Genom att justera bränsle-luftblandningen mager eller rik minskar eller ökar man kolväteutsläppen (HC) och kolmonoxidutsläppen (CO) med 20 - 80 %. Samtidigt ändras också kväveoxidutsläppen (NO_x), men de är i vilket fall som helst oftast

små. I utvecklandet av motortekniken borde man sträva efter magrare bränsle-luftblandningar, och sådana justeringsmekanismer på motorerna som inte tillåter användarna att justera motorerna helt fel. Utsläppen kan också minskas med katalysatorer, de inverkar flera tiotals procent på utsläppen.

Bensintypens inverkan på utsläppen var liten, skillnaderna berodde mest på ändringar i blandningsförhållandet bränsle-luft. Så är också den bensintyp som utvecklats speciellt för småmaskiner (pkb), och som var med i undersökningen, mest avsedd att minska de skadliga gaser som kommer direkt i användarens andningsluft. Motoroljetypen (mineralolja/syntetisk olja) och bränsleblandningens oljehalt i tvåtaktsmotorer inverkade inte på utsläppen i denna undersökning.

Utsläppen från småmotorer kan lätt minskas betydligt, men detta fordrar kännedom om utsläppsproblemet, undersökning av utsläppen samt införande av gränser för utsläppen. Detta tvingar tillverkarna att utveckla motorer med mindre utsläpp. Det skulle också leda till dyrare teknik, och därmed till högre försäljningspriser på småmaskiner.

Beträffande gräsklippning och landskapsvård bör man också beakta arbetenas nödvändighet och växternas växtsätt. Genom att använda lämpliga sorter (lågväxta) och små gödselmängder kan man minska skötselbehovet. Vidare inverkar vegetationens användningsändamål på skötselbehovet. Till exempel en äng kräver mindre skötsel än en gräsmatta.

Mätning av avgasutsläpp är mer krävande beträffande småmotorer än större motorer. Småmotorer är inte byggda för att hålla för långvarig drift på nominell effekt, varför motors hållbarhet måste beaktas i fråga om belastningsperioderna. Därför uppnås inte alltid konstanta mätförhållanden. Encylindriga motorers gång är inte heller lika jämn som flercylindrigas, varför det uppstår större variationer i utsläppen. Dessa omständigheter försvårar speciellt mätningen av små utsläppsskillnader.

LÄHDELUETTELO

- SAE J1008, 1993. Test Procedure for the Measurement of gaseous Exhaust Emissions from Small Utility Engines. Society of Automotive Engineers, Inc.
- ISO 8178, 1996. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Parts 1- 9. International Standard Organization.
- California Exhaust Emission Standards And Test Procedures For 1994 And Subsequent Model Year Utility And Lawn And Garden Equipment Engines. State of California Air Resource Board Hearing, December 14, 1990.
- California Exhaust Emission Standards And Test Procedures For 1994 And Subsequent Model Year Utility And Lawn And Garden Equipment Engines. State of California Air Resource Board Hearing, December 14, 1990.
- Douglas, R. AFR and Emission Calculations for Two-Stroke Cycle Engines. In: New Developments in Two Stroke Engines and Their Emissions. SAE SP-835. Society of Automotive Engineers, Inc. 1990. p. 63 - 74.
- White, J.J., James N.C., Charles T.H. & Jacline G.L. Emission Factors for Small Utility Engines. SAE Paper No 910560.
- Burrahm, R.W., White, J.J. & Carroll, J.N. Small Utility Engine Emissions Reduction Using Automotive Technology. In: Two-Stroke Engines, Small Engines and Emissions Reduction. SAE SP-883. Society of Automotive Engineers, Inc. 1991 p. 1 - 16.
- Crabtree, D., Xia, Z. & Varde, K.S. An Investigation of Emission Control in a Small Spark Ignition Engine. In: Design and Emissions of Small Two- and Four-Stroke Engines. SAE SP-1112. Society of Automotive Engineers, Inc. 1995. p. 19 - 27.
- Sun, X., Brereton, G., Morrison, K. & Patterson, D. Emission Analysis of Small Utility Engines. In: Design and Emissions of Small Two- and Four-Stroke Engines. SAE SP-1112. Society of Automotive Engineers, Inc. 1995. p. 29 - 47.
- White, J.J., Carroll, J.N. & Hare, T. Emission Control Strategies for Small Utility Engines. In: Two-Stroke Engines, Small Engines and Emissions Reduction. SAE SP-883. Society of Automotive Engineers, Inc. 1991. p. 29 - 41.
- Swanson, M. An Emission Comparison Between a Carburetor and an Electronic Fuel Injection System for Utility Engines. In: Two-Stroke Engines, Small Engines and Emissions Reduction. SAE SP-883. Society of Automotive Engineers, Inc. 1991. p. 17 - 27.
- Franz, L.J. & Landerl, C.J. 50cc Two-Stroke Engines for Mopeds, Chainsaws and Motorcycles with Catalyst. In: New Developments in Two-Stroke Engines and Their Emissions. SAE SP-835. Society of Automotive Engineers, Inc. 1990. p. 41 - 61.

Puranen, A. & Mattila, M. Polttomoottorikäyttöisten työkoneiden ympäristöpäästöt, SIHTI-osaprojekti 2-9 yhteenveto 1992, TTKK/Koneosasto/Turvallisuustekniikka.

Liisa 95. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt 1995. VTT Yhdyskuntatekniikka.
<http://www.vtt.fi/yki/yki6/liisa/perustul.htm>.

Liikenne ja ympäristö. Tilastokeskus, Ympäristö 1992:2, Helsinki 1992.