



Teknillinen tiedekunta
Energia- ja ympäristötekniikan osasto
En2010200 Energiatekniikan kandidaatin työ ja seminaari

TURBOAHDETUN POLTTOMOOTTORIN MITTAAMINEN

Lappeenrannassa 19.4.2007
Janne Turunen 0261725 Ente 3

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	4
2 YLEISTÄ.....	4
2.1 Ottomoottorin toiminnan peruseriaatteet.....	4
2.1.1 Mekaaninen kierto	5
2.1.2 Termodynaaminen kierto.....	5
2.1.3 Polttoaineen palaminen.....	6
2.2 Turboahtamisen peruseriaatteet	7
2.2.1 Turboahtimen rakenne ja toiminta.....	7
2.2.2 Ottomoottorin turboahtaminen.....	8
3 MITTAUSTEN SUORITTAMINEN TÄLLÄ HETKELLÄ	9
3.1 Mitattava kohde	9
3.2 Mittauslaitteisto.....	10
3.3 Mittaukset	13
3.4 Mittaustulosten käsittely.....	14
4 PÄÄSTÖMITTAUSTEN UUDISTAMINEN.....	19
4.1 Uudistuskohteet.....	19
4.2 Savukaasuanalysointilaitteiden vertailua	21
4.3 Muutokset mittaustulosten käsittelyssä.....	26
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	28

LÄHDELUETTELO

Liitteet Liite 1: Saab-ottomoottorin tekniset tiedot

SYMBOLILUETTELO

ROOMALAISET

A	atomipaino	[-]
a	kerroin	[-]
b	ominaiskulutus	[g/kWh]
c_p	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa	[J/kgK]
F	voima	[N]
h	entalpia	[J/kg]
K	korjauskerroin	[-]
M	moolimassa	[g/mol]
n	pyörimisnopeus, ainemäärä	[1/s, mol]
P	teho	[W]
p	paine	[Pa]
q_i	alempi lämpöarvo	[MJ/kg]
q_m	massavirta	[kg/s, kg/h]
q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s]
R	ilman kaasuvakio	287 J/kgK
r	pituus	[m]
T	lämpötila	[K]
V_i	iskutilavuus	[m ³]
V_m	moolitilavuus	[l/mol]
w	massaosuus	[-]
x	tilavuusosuus	[-]
z	tahtitekijä	[-]

KREIKKALAISET

α	kerroin	[-]
β	kerroin	[-]
γ	kerroin	[-]
δ	kerroin	[-]
η	hyötysuhde	[-]

λ	ilmakerroin	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
Φ	lämpövirta	[W]

ALAINDEKSIT

aks	akseli
e	tehollinen
i	ilma
j	jäähdytysneste
jääh	jäähdytys
k	kompressori
m	mekaaninen
p	polytrooppinen
pa	polttoaine
s	isentrooppinen
sk	savukaasu
st	stökiömetrinen
t	turbiini
tot	kokonais-
v	vesi

LYHENTEET

AFR	seossuhde
CLD	kemiluminesenssi-ilmaisain
HFID	lämmitetty liekki-ionisaatio
HCLD	lämmitetty kemiluminesenssi-ilmaisain
NDIR	ei-dispersioiva infrapuna
vol	tilavuus

1 JOHDANTO

Polttomoottoreilla on tärkeä osa nykyaikaisessa yhteiskunnassa erityisesti liikenteen voimanlähteinä. Polttomoottoreille asetetut vaatimukset kasvavat jatkuvasti, mikä lisää paineita myös niiden mittaustekniikan kehittämiseksi.

Tässä työssä tarkoitukseni on perehtyä turboahdetun bensiinikäyttöisen polttomoottorin mittauksiin. Työ keskittyy Lappeenrannan teknillisen yliopiston energia- ja ympäristötekniikan osaston virtaustekniikan laboratoriossa sijaitsevaan Saab-moottoriin ja siihen liittyviin mittauslaitteisiin ja -käytäntöihin sekä niiden kehittämiseen. Tavoitteena on uudistaa mittaukset vastaamaan nykyaikaisia vaatimuksia.

Aluksi käyn lyhyesti läpi nelitahtisen ottomoottorin toiminnan ja turboahtamisen termodynaamiset perusperiaatteet. Tämän jälkeen esittelen, kuinka laboratoriossa sijaitsevan moottorin toiminta-arvoja mitataan tällä hetkellä osana virtaustekniikan laboratorion järjestämää virtaus- ja lämpökoneet -opintojaksoa. Käyn läpi mitattavat suureet ja mittapisteet, käytettävät mittalaitteet sekä mittaustulosten perusteella suoritettavat laskut. Seuraavassa osiossa pyrin selvittämään, kuinka laboratorion mittauslaitteistot ja mittauskäytännöt voitaisiin saattaa ajan tasalle. Uudistuksia mietittäessä keskityn ainoastaan päästömittauksiin. Dieselmoottorit ja niihin liittyvät mittaukset jätän käsittelemättä tämän työn puitteissa, koska dieselmoottorien päästömittaukset eroavat merkittävästi ottomoottorin päästömittauksista.

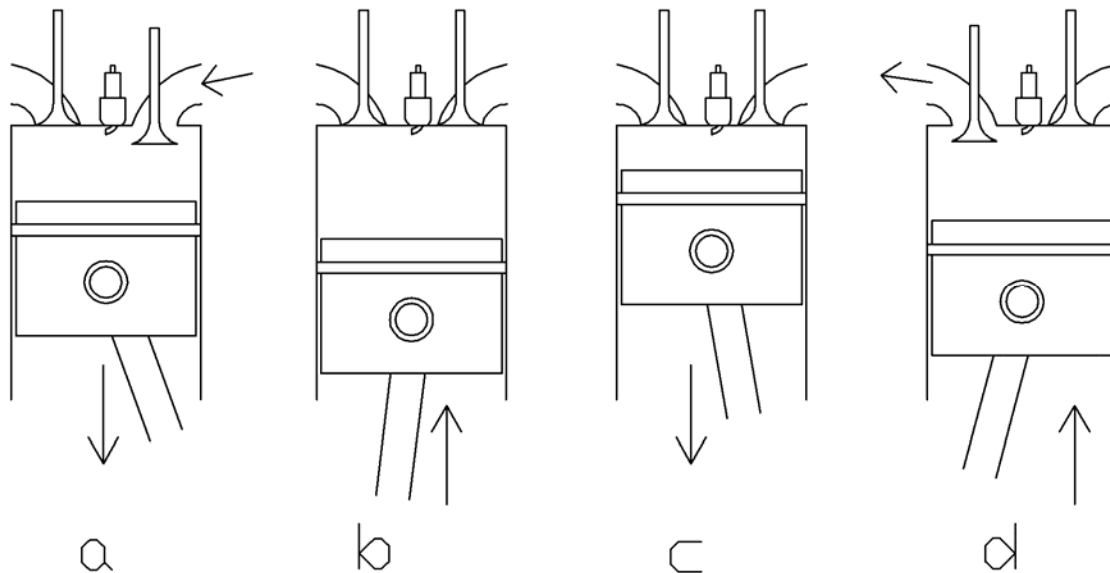
2 YLEISTÄ

2.1 Ottomoottorin toiminnan perusperiaatteet

Ottomoottori on kone, joka muuttaa polttoaineen kemiallista energiaa mekaaniseksi työksi. Polttoaineena käytetään bensiiniä ja seos sytytetään kipinällä. Ottomoottori voi olla joko kaksi- tai nelitahtinen. Kaksitahtista ottomoottoria käytetään nykyään liikennevälinetekniikassa melko vähän, joten seuraavassa käsitellään ainoastaan nelitahtista ottomoottoria.

2.1.1 Mekaaninen kierto

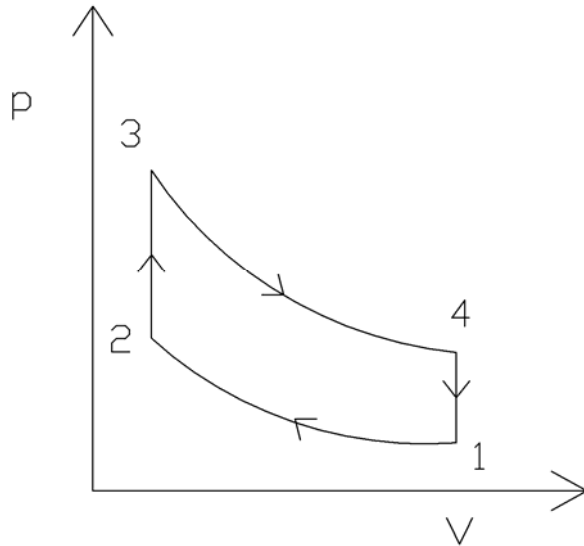
Nelitahtisen ottomoottorin mekaaninen kierto koostuu imu-, puristus-, työ- ja poistotahtista. Imutahdin aikana imuventtiili on auki ja mäntä liikkuu alaspäin imien ilman ja polttoaineen seosta sylinteriin (kuva 1a). Imutahdin päätyttyä imuventtiili sulkeutuu ja puristustahti alkaa. Mäntä liikkuu ylöspäin puristaen polttoaine-ilmaseosta (kuva 1b). Hieman ennen kuin mäntä saavuttaa korkeimman asemansa, eli yläkuolokohdan, seos sytytetään kipinällä. Työtahdin aikana seoksen palamisesta aiheutuva lämpötilan ja paineen nousu pakottavat männän liikkumaan alaspäin (kuva 1c). Männän saavutettua alimman asemansa pakoventtiili avautuu ja poistotahti alkaa, jonka aikana mäntä työntää suurimman osan palamisesta syntyneistä savukaasuista pois sylinteristä (kuva 1d). Tämän jälkeen kierto alkaa jälleen alusta. [1, s. 17 - 18]



Kuva 1. 4-tahtisen ottomoottorin tahdit

2.1.2 Termodynaaminen kierto

Todellisen ottomoottorin vertailuprosessina käytetään yleensä ideaalista ottoprosessia. Kuvassa 2 on esitetty ideaalisen ottoprosessin kierto koordinaatistossa, jossa pystyakselilla on paine ja vaaka-akselilla tilavuus.



Kuva 2. Ideaalinen ottoprosessi

Kierto koostuu neljästä eri osaprosessista, jotka ovat:

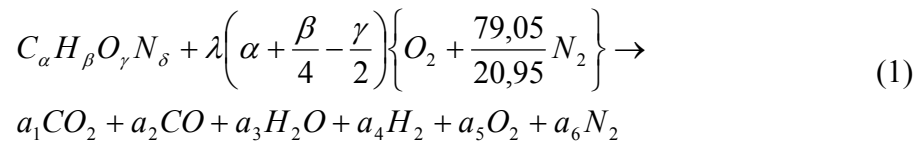
- 1→2: Adiabaattinen (lämpöeristetty) ja reversiibeli (palautuva) puristus
- 2→3: Lämmön tuonti vakiotilavuudessa
- 3→4: Adiabaattinen ja reversiibeli paisunta
- 4→1: Lämmön poisto vakiotilavuudessa

Todelliselle kiertoprosessille piirrettyssä kuvaajassa eri osaprosesseja ei voida eritellä yhtä selvästi, vaan kuvaajan kulmat ovat pyöristyneet. Lisäksi nelitahtisen ottomoottorin kuvaajaan täytyy ottaa huomioon myös poistotahti ja imutahti. [1, s. 21]

2.1.3 Polttoaineen palaminen

Ottomoottorissa palamisilman ja polttoaineen seos muodostetaan yleensä ennen sylinteriin saapumista. Seossuhteen tulee olla melko lähellä stökiometristä seossuhdetta, eli seossuhdetta, joka on kemiallisesti juuri oikea mahdollistaakseen täydellisen palamisen. Useimmille hiilivetypolttoaineille massaosuuksilla laskettu stökiometrinen seossuhde on noin $AFR_{st} = 14,5$. Käytännössä ottomoottorin seossuhde voi olla $10 < AFR < 20$. Palaminen tapahtuu sytytystulpan kipinän alkuun panemana liekkirintamana läpi palamattoman seoksen. [1, s. 32 - 33]

Ottomoottorissa käytetyn polttoaineen voidaan ajatella koostuvan hiilestä (C), vedystä (H), hapesta (O) ja typestä (N). Palamistuotteina voidaan yksinkertaistetusti olettaa syntyvän hiilidioksidia (CO₂), hiilimonoksidia (CO), vesihöyryä (H₂O), vetyä (H₂), happea (O₂) ja vetyä (N₂). Palamisilman koostumukseksi arvioidaan 79,05 mooliprosenttia typpeä ja loput happea. Näillä tiedoilla voidaan kirjoittaa yksinkertaistettu palamisen reaktioyhtälö [1, s. 37]:



λ on ilmakerroin ja se määritellään toteutuneen seossuhteen ja stökiometrisen seossuhteen suhteena [1, s. 30]:

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{st}} \quad (2)$$

Todellisessa palamisessa syntyy edellä mainittujen palamistuotteiden lisäksi typen oksideja (NO ja NO₂, joista yleensä käytetään merkitään NO_x) ja palamattomia hiilivetyjä (HC). Palamattomia hiilivetyjä syntyy mm. seoksen virtauksesta suoraan pakokanavaan overlapin (pakoventtiili ja imuventtiili samanaikaisesti auki imutahdin alussa) aikana, epätäydellisestä palamisesta, sytytyksen epäonnistumisesta heterogeenisestä seoksesta. [1, s. 41] Typpioksidit tarvitsee muodostuakseen korkean lämpötilan ja happea. Ilmakerroimen arvolla $\lambda \approx 1,1$ typpioksidia muodostuu kaikkein eniten. [1, s. 44 - 45]

2.2 Turboahtamisen peruseriaatteen

2.2.1 Turboahtimen rakenne ja toiminta

Turboahdin koostuu samalle akselille sijoitetuista kompressorista ja turbiinista. Ajoneuvotekniikassa turboahtimen on oltava pienikokoinen, sen on pystyttävä toimimaan suurilla massavirroilla ja laajalla toiminta-alueella, sen on kestävä korkeita lämpötiloja ja

oltava luotettava. Näiden vaatimusten perusteella nykyään vakiintunut kokoonpano on yksivaiheinen radiaalikompressorin ja yksivaiheinen radiaaliturbiini. [2, s. 19]

Radiaaliturbiini koostuu spiraalista, staattorista ja roottorista. Moottorista poistuvat savukaasut ohjataan spiraaliin, josta ne kulkeutuvat staattorin kautta roottoriin. Staattori voidaan tehdä siivelliseksi jotta virtausta saataisiin kiihdytettyä edelleen ennen roottoria, mutta yleensä siivet jätetään kustannussyistä pois, jolloin staattori on pelkkä tyhjä tila spiraalin ja roottorin välissä. Savukaasut paisuvat ja jäähtyvät roottorissa, ja osa niiden sisältämästä energiasta muuttuu roottorin kineettiseksi energiaksi. Turbiiniin saapuva virtaus on radiaalista ja poistuva virtaus on aksiaalista. [2, s. 147 - 149]

Radiaalikompressorin pääosat ovat roottori, staattori ja spiraali. Turbiinin tuottama teho pyörittää roottoria, joka imee ilmaa sisään aksiaalisesti. Roottorissa virtaus kääntyy radiaaliseksi, sen nopeus kiihtyy ja paine kasvaa keskipakoisvoiman vaikutuksesta. Roottorin jälkeen virtaus saapuu staattoriin, joka ajoneuvokäytössä useimmiten tehdään siivettömäksi. Staattorissa virtaus hidastuu, jolloin sen paine kasvaa. Spiraali kerää virtauksen yhteen eri puolilta staattorin kehää ja johtaa sen poistokanavaan, josta ylipaineinen ilma ohjataan moottorin sylintereihin palamisilmaksi. [2, s. 74 - 76]

2.2.2 Ottomoottorin turboahtaminen

Turboahdetussa ottomoottorissa osa puristustyöstä tehdään turboahtimessa ennen kuin ilma viedään sylinteriin. Puristustyöhön tarvittava teho saadaan kuumista savukaasuista, joiden energia muuten menisi hukkaan. Korkeapaineinen ilma on myös tiheämpää kuin ilmakehän paineessa oleva ilma, joten ahdetussa moottorissa sylinteriin saadaan suurempi määrä ilmaa kuin saman iskutilavuuden omaavassa vapaastihengittävässä moottorissa, jolloin polttoainetta voidaan polttaa enemmän. [2, s. 2 - 5] Ottomoottorissa turboahtaminen siis lisää ensisijaisesti tehoa, mutta ei juuri vähennä polttoaineen ominaiskulutusta. [1, s. 170]

Turbohtaminen voi olla joko vakiopaineahtamista tai pulssiahtamista. Monisylinterisessä nelitahtisessa moottorissa savukaasujen virtaus pakosarjassa ei ole tasaista, koska savukaasut poistuvat sykäyksittäin kustakin sylinteristä vuorotellen. Vakiopaineahtamisessa savukaasut ohjataan ensin kammioon, jossa virtaus tasaantuu. Kammiosta savukaasut johdetaan turbiiniin. Kammiosta poistuvan virtauksen paine on suurin piirtein vakio, jolloin turbiini saadaan toimimaan paremmalla hyötysuhteella. Pulssiahtamisessa savukaasut johdetaan suoraan turbiiniin, jolloin niiden sisältämä energiamäärä on suurempi. Pulssiahtaminen on nykyään yleisempi tapa kuin vakiopaineahtaminen. [2, s. 6 - 9]

3 MITTAUSTEN SUORITTAMINEN TÄLLÄ HETKELLÄ

Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa mitataan ottomoottorin toiminta-arvoja osana energia- ja ympäristötekniikan osaston opintojaksoa En2120401 virtaus- ja lämpökoneiden työkurssi. Seuraavassa selvitetään mittausten suorittaminen tällä hetkellä.

3.1 Mitattava kohde

Moottori, jolle mittaukset suoritetaan on Saab 900 -henkilöautosta peräisin oleva 4-tahtinen ja 4-sylinterinen turboahdettu ottomoottori (kuva 3). Moottorin tarkemmat tekniset tiedot on esitetty liitteessä 1.

Ahdin on Garrett AiResearchin valmistama turboahdin (kuva 4), jonka maksimi ahtopaine on rajoitettu 0,70 bariin. [3, s. 1] Ahtimelta moottoriin menevää ilmaa jäähdytetään vesi-ilma-tyyppisellä välijäähdyttimellä (näkyvä kuvassa 3 oikeassa yläkulmassa). Moottorin jäähdytysnestettä jäähdytetään vedellä levylämmönsiirtimessä.



Kuva 3. Saabin turboahdettu ottomoottori

3.2 Mittauslaitteisto

Moottorin vauhtipyörä on yhdistetty Schenck-pyörrevirtajarruun, jolla voidaan mitata moottorin vääntömomenttia (kuva 5). Jarru mittaa myös moottorin pyörimisnopeutta. Kuvassa 6 ylempi laite on jarrun ohjausyksikkö, jossa näkyy myös pyörimisnopeuden osoitin.



Kuva 4. Moottorin turboahdin



Kuva 5. Schenck-pyörrevirtajarru

Savukaasujen happipitoisuutta mitataan turbiinin jälkeen Kent Magnetic Oxygen Meter 6800 –analyssaattorilla (kuva 7). Analyssaattorin toiminta perustuu happimolekyylien paramagneettiseen luonteeseen. Laitteen anturi koostuu kahdesta eri syvennykseen sijoitusta lasilla päällystetystä platinalangasta, joista toinen on magneettikentässä ja toinen



Kuva 6. Schenck-ohjausyksikkö ja Strömberg-lämpömittari



Kuva 7. Happianalyssaattori

tämän magneettikentän ulkopuolella. Molempia lankoja jäähdytetään tasaisesti. Magneettikenttä vetää happimolekyyliä puoleensa, jotka lämpiävät ja korvautuvat viileämmillä happimolekyyliellä, koska paramagneettisuus laskee lämpötilan noustessa. Niinpä magneettikentässä olevasta langasta siirtyvä lämpövirta on suurempi kuin toisessa langassa, jos happimolekyyliä on läsnä. Hehkulangat on kytketty Wheatstonen siltaan, jolloin siltan erojännitteestä saadaan selville kaasun happipitoisuus. [3, s. 3]

Hiilimonoksidipitoisuutta mitataan Anarad AR400 series -analyssaattorilla (kuva 8). Laite on NDIR-tyyppinen infrapuna-analyssaattori. Kaasumolekyylin absorboituvan infrapunasäteilyn spektri on eri kaasuilla hieman erilainen. Kun tiedetään tietyn kaasun spektri, saadaan määritettyä kyseisen kaasun pitoisuus mittaamalla absorboitumatonta säteilyä. [4, s. 2]



Kuva 8. Hiilimonoksidianalysaattori

Savukaasua johdetaan analysaattoreihin kuivausaineen (silikageeli) ja mekaanisen suodattimen kautta, jotta se ei sisältäisi kosteutta eikä kiintoainetta.

Lämpötilaa mitataan termoelementeillä yhteensä 11 pisteessä. Anturit on kytketty Gultan Tasto Therm B702 (kuva 9) ja Strömberg Saco (kuva 6, alempi laite) -mittareihin, joista lämpötilat luetaan. Jäähdytysnesteen tilavuusvirtaa, öljynjäähdyttimen jäähdytysveden tilavuusvirtaa ja välijäähdyttimen tilavuusvirtaa mitataan rotametreillä. Polttoaineen massa saadaan selville Sartorius-vaa'an avulla (kuva 10). Lisäksi mitataan ympäristön painet



Kuva 9. Lämpötilan mittaus



Kuva 10. Polttoainemäärän mittaus

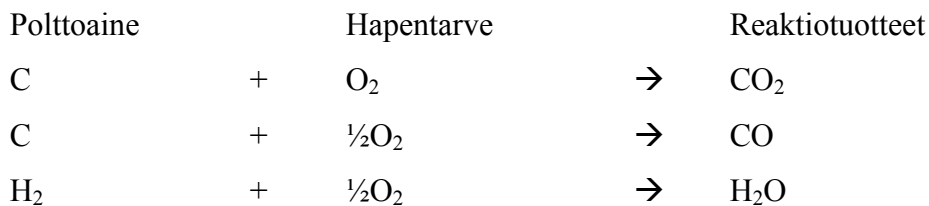
jälkeen ja mittaamalla jaksoon kulunutta aikaa. Mittaukset toistetaan neljässä eri toimintapisteessä.

3.4 Mittaustulosten käsittely

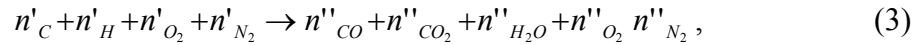
Työohjeen mukaanmittauksissa saatujen tulosten perusteella lasketaan jokaisessa toimintapisteessä [5, s. 3]

- polttoaineen, palamisilman ja savukaasun massavirrat
- ilmakerroin
- polttoaineteho
- moottorin akseliteho
- moottorin momentti
- moottorin kokonaishyötysuhde
- polttoaineen ominaiskulutus
- tehollinen keskipaine
- jäähdytykseen menevä lämpövirta
- ahtimen tehontarve
- puristuksen polytrooppihyötysuhde
- puristuksen isentrooppihyötysuhde
- turbiinin teho

Polttoaineen, palamisilma ja savukaasun massavirrat saadaan ratkaistua savukaasulas-kuista. Palamisen laskentaan käytetään seuraavia reaktioita [5, s. 3]



Polttoaineen ominaisuuksien perusteella tunnetaan sen sisältämän vedyn ja hiilen määrät. Mittausten perusteella tunnetaan hiilimonoksidin ja hapen osuudet kuivissa savukaasuissa. Palamisen reaktioyhtälöksi voidaan kirjoittaa [5, s. 3]



missä n on ainemäärä [mol],

' viittaa lähtöaineeseen ja

'' viittaa reaktiotuotteisiin.

Typen voidaan olettaa kulkevan reaktion läpi reagoimatta mitenkään, jolloin typen määrä pysyy muuttumattomana. Tehdään taseet hiilelle, vedylle ja hapelle [5, s. 3]

$$n'_C = n''_{CO} + n''_{CO_2} \quad (4)$$

$$n'_H = 2n''_{H_2O} \quad (5)$$

$$n'_{O_2} = 0,5n''_{CO} + n''_{CO_2} + 0,5n''_{H_2O} + n''_{O_2}. \quad (6)$$

Hiilimonoksidin ja hapen pitoisuudet kuivissa savukaasuissa [5, s. 4]

$$x_{CO} = \frac{n''_{CO}}{n''_{CO} + n''_{CO_2} + n''_{N_2} + n''_{O_2}} \quad (7)$$

$$x_{O_2} = \frac{n''_{O_2}}{n''_{CO} + n''_{CO_2} + n''_{N_2} + n''_{O_2}}. \quad (8)$$

Palamisilman typen ja hapen suhteen voidaan olettaa olevan [5, s. 4]

$$\frac{n'_{N_2}}{n'_{O_2}} = \frac{79,05}{20,95} = 3,773. \quad (9)$$

Reaktioyhtälössä (3) on kuusi tuntematonta ainemäärää, jotka voidaan selvittää muodostamalla yhtälöistä (4)-(9) yhtälöryhmä ja ratkaisemalla se. Kun ainemäärät on saatu selville, voidaan ratkaista palamisilman ja savukaasujen massat yhtä polttoainekilogrammaa kohti. Tämän suhteen avulla saadaan palamisilman ja savukaasujen massavirrat, kun polttoaineen massavirta tunnetaan.

Ilmakerroin lasketaan palamisilman ainemäärän ja stökiometrisen ilmantarpeen avulla [5, s. 4]

$$\lambda = \frac{n_i}{n_{i,st}}, \quad (10)$$

missä teoreettinen ilmantarve on

$$n_{i,st} = 4,773(n_C + 0,25n_H). \quad (11)$$

Ahtimen tehontarve P_k lasketaan yhtälöstä [5, s. 5]

$$P_k = q_{mi}c_p(T_{11} - T_3), \quad (12)$$

missä q_{mi} on ilman massavirta [kg/s] ja

c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kgK].

Turbiinin teho P_t kuluu ahtimen pyörittämiseen ja mekaanisiin häviöihin, joten se voidaan laskea ahtimen tehon ja mekaanisen hyötysuhteen avulla

$$P_t = \frac{P_k}{\eta_m}. \quad (13)$$

Olettamalla ilma ideaalikaasuksi ja ominaislämpökapasiteetti vakioksi, ahtimen isentrooppiselle hyötysuhteelle voidaan kirjoittaa yhtälö [2, s. 25]

$$\eta_{k,s} = \frac{T_{11s} - T_3}{T_{11} - T_3}. \quad (14)$$

Isentrooppisen puristuksen loppulämpötila T_{11s} saadaan yhtälöstä [2, s. 26]

$$T_{11s} = T_3 \left(\frac{p_4}{p_0} \right)^{\frac{R}{c_p}}, \quad (15)$$

missä R on ilman kaasuvakio 287 J/kgK.

Ahtimen polytrooppihyötysuhde lasketaan yhtälöstä [2, s. 28]

$$\eta_{k,p} = \frac{\ln(p_4/p_0)^{\frac{c_p}{R}}}{\ln(T_{11}/T_3)}. \quad (16)$$

Palamisilman mukana moottoriin menevä entalpiavirta on [5, s. 5]

$$h_{i3} = c_{p,i} (T_4 - T_{ref}) \quad (17)$$

ja savukaasun mukana moottorista tuleva entalpiavirta [5, s.5]

$$h_{sk5} = c_{p,sk} (T_5 - T_{ref}). \quad (18)$$

Jäähdytyksen lämpövirta muodostuu öljynjäähdyttimen jäähdytysveteen ja moottorin jäähdytysnesteeseen siirtyneistä lämpövirroista, eli

$$\phi_{jäh} = \phi_j + \phi_{ol}. \quad (19)$$

Öljynjäähdyttimen jäähdytysvedeen siirtynyt lämpövirta on [5, s. 5]

$$\phi_{öl} = \rho_v q_{v,9} c_{p,v} (T_9 - T_{10}), \quad (20)$$

missä ρ_v on veden tiheys [kg/m^3] ja

$q_{v,9}$ on jäähdytysveden tilavuusvirta [m^3/s]

Moottorin jäähdytysnesteeseen siirtynyt lämpövirta on [5, s. 5]

$$\phi_j = \rho_j q_{v,7} c_{p,j} (T_7 - T_8). \quad (21)$$

Moottorin akseliteholle voidaan kirjoittaa yhtälö [5, s. 5]

$$P_{aks} = Fr2\pi n, \quad (22)$$

missä F on voima [N],

r on voiman varsi [m] ja

n on pyörimisnopeus [1/s].

Tehollinen keskipaine saadaan yhtälöstä [5, s. 5]

$$p_e = \frac{P_{aks}}{nzV_i}, \quad (23)$$

missä z on tahtitekijä [-] ja

V_i on iskutilavuus [m^3].

Polttoainetehon yhtälö on [5, s. 5]

$$\phi_{pa} = q_{m,pa} q_i, \quad (24)$$

missä q_{mpa} on polttoaineen massavirta [kg/s] ja
 q_i on polttoaineen alempi lämpöarvo [MJ/kg].

Moottorin kokonaishyötysuhde saadaan nyt ratkaistua akselitehon ja polttoainetehon avulla

$$\eta_{tot} = \frac{P_{aks}}{\phi_{pa}}. \quad (25)$$

Ominaiskulutus voidaan ratkaista yhtälöstä

$$b = \frac{q_{m,pa}}{P_{aks}}. \quad (26)$$

4 PÄÄSTÖMITTAUSTEN UUDISTAMINEN

Osa mittalaitteista alkaa olla jo melko vanhaa, joten uudistukset olisivat tarpeen. Seuraavassa käsitellään mahdollisia uudistuskohteita käyttäen vertailukohteina standardeja ja katsastusasemien käyttämiä menetelmiä ja laitteistoja.

4.1 Uudistuskohteet

Nykyiset päästömittaukset vastaavat periaatteeltaan melko hyvin polttomoottorien päästömittauksia koskevan standardin SFS-EN ISO 8178-1 suosituksia. Yksi järjestelmän kokoonpanoa koskeva ero on savukaasujen kuivauksessa. Standardin mukaan kuivaukseen ei tule käyttää kemiallisia kuivaimia, jollaisia silikageeli -pullotkin ovat. [6, s. 14]

Toinen kokoonpanoon liittyvä puute on savukaasuista mitattavien aineiden määrä. Nykyisessä järjestelmässä pystytään mittaamaan pelkästään hiilimonoksidin ja hapen pitoisuudet sekä näistä laskemalla hiilidioksidin pitoisuus savukaasuista. Euroopan Unionin

säättämät päästönormit EURO 3 -normista alkaen rajoittavat uusien henkilöautojen typpioksidipäästöjä ja palamattomien hiilivetyjen määrää. Hiilivetyjen määrää on Ajoneuvohallintokeskuksen ohjeistuksen mukaan mitattava määräaikaikatsastuksessa kaikista 1.1.1978 jälkeen rekisteröidyistä henkilöautoista. [7, s. 23] Niinpä typen oksidien ja palamattomien hiilivetyjen mittaus kuuluu oleellisena osana nykyaikaisiin päästömittauksiin.

Palamattomien hiilivetyjen mittaukseen tulee standardin mukaan käyttää lämmitettyyn liekki-ionisaatioon perustuvaa analysaattoria (HFID). Näytteenottolinjan seinämän lämpötila on pidettävä vähintään 180 °C:ssa, ja analysaattorille saapuvan savukaasun lämpötilan on oltava 190 °C ± 10 °C. [6, s 43 - 44]

Liekki-ionisaatioilmaisimessa poltetaan vetyä, jonka joukkoon näytekaasua johdetaan. Polttimen ja sen yläpuolella sijaitsevan elektrodin välille on kytketty tasajännite. Jos näytekaasu sisältää hiilivetyjä, liekissä syntyy ioneja, jolloin liekin läpi kulkeva sähkövirta kasvaa. [8, s. 144]

Typen oksidien mittaukseen standardi ohjeistaa käyttämään kemiluminesenssi-ilmaisinta (CLD) tai lämmitettyä kemiluminesenssi-ilmaisinta (HCLD). Mikäli käytettävä polttoaine sisältää rikkiä, näytteenottolinjan seinämän lämpötila tulee pitää 55 °C - 200 °C:ssa, jotta laitteistoon ei kondensoidu rikkihappoa. [6, s. 44 - 45]

Kemiluminesenssi-ilmiössä kemiallisen reaktion seurauksena syntyy valoa. Typpimonoksidin reagoidessa otsoni kanssa syntyy happimolekyylä ja virittynyt typpidioksidimolekyylä, joka palautuu välittömästi perustilaansa lähettämällä valokvantin. Syntyvän valon intensiteetin perusteella voidaan määritellä kaasun NO-pitoisuus. Reaktioon tarvittava otsoni tuotetaan mittalaitteen otsonigeneraattorissa. Mikäli halutaan mitata kaasun NO_x-pitoisuutta, typpidioksidi on ensin muutettava analysaattorin NO_x-konvertterissa typpioksidiksi. [8, s. 141]

Kahden kokoonpanoa koskevien muutosten lisäksi nykyaikaistamista kaipaavat myös hapen ja hiilimonoksidin osuutta mittaavat analysaattorit. Niinpä hankittavaksi tulisi yhteensä neljä eri laitetta, mikäli jokaiselle aineelle hankitaan oma laite. Markkinoilla on kuitenkin myös analysaattoreita, jotka pystyvät mittaamaan useiden kaasujen pitoisuuksia. Tällainen voisi olla useita yksittäisiä laitteita parempi vaihtoehto niin käytettävyyden kuin tilankäytönkin kannalta.

4.2 Savukaasuanalysointilaitteiden vertailua

Vertailtavaksi on valittu viiden eri valmistajan savukaasuanalysointilaitteet. Kaikki ovat tyyppiltään ns. monikaasuanalysointilaitteita, jotka pystyvät mittaamaan useiden eri komponenttien pitoisuuksia savukaasuista. Kustakin laitteesta on pyritty esittelemään tärkeimpiä ominaisuuksia valmistajien tai maahantuojien tuote-esitteiden perusteella.

AVL DiGas 4000 (kuva 12) on neli-/viisikaasuanalysointilaitte, joka perusversiona mittaa CO-, CO₂-, HC- ja O₂-pitoisuuksia. NO_x-pitoisuuden mittaukseen siihen saa optiona. Kaasupitoisuuksien lisäksi se mittaa moottorin pyörimisnopeutta ja öljyn lämpötilaa sekä laskee ilmakertoimen. Laitteessa on sisäänrakennettu tulostin sekä RS232- ja PCMCIA-liitäntä tiedonsiirtoa varten. [9, s. 6]



AVL DiGas 4000

Kuva 12. AVL DiGas 4000 –savukaasuanalysointilaitte [9, s. 3]

Bosch BEA 250 (kuva 13) on nelikaasuanalysointilaitteisto, joka mittaa CO-, CO₂-, HC- ja O₂-pitoisuuksia ja johon saa optiona NO-pitoisuuden mittauksen. Tämän lisäksi se mittaa moottorin pyörimisnopeutta ja laskee ilmakertoimen. Siinä on myös sisäänrakennettu tulostin ja AWN-yhteys tiedonsiirtoon. [10, s. 1 - 2]



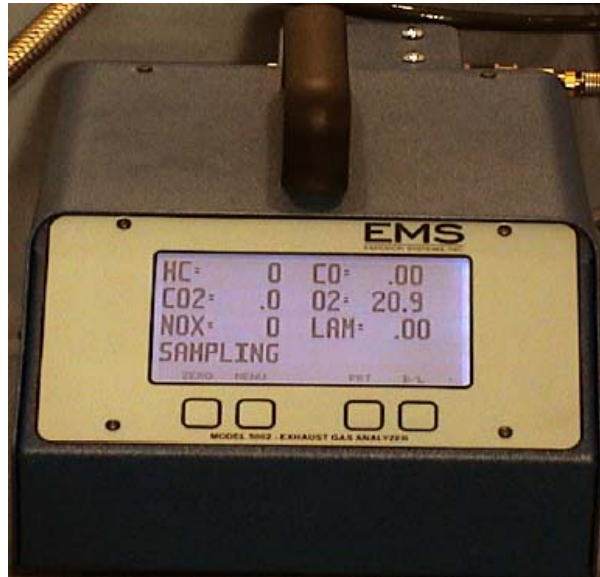
Kuva 13. Bosch BEA 250 –savukaasuanalysointilaitteisto [10, s. 1]

Dynesystems XM-1000 on viisikaasuanalysointilaitteisto, joka mittaa CO-, CO₂-, HC-, O₂- ja NO_x-pitoisuuksia. Sen ominaisuuksiin kuuluvat lämmitetty näytteenottolinja, kaksivaiheinen kosteudenpoistin ja liitäntä tietokoneeseen kytkentää varten. [11]

EMS 5002 (kuva 15) on neli-/viisikaasuanalysointilaitteisto, joka mittaa CO-, CO₂-, HC- ja O₂-pitoisuuksia. NO_x-pitoisuuden mittauksen saa siihen optiona. Lisäksi se laskee joko seossuhteen tai ilmakertoimen. Siinä on RS232-liitäntä tiedonsiirtoa varten ja liitäntä ulkoiselle tulostimelle. Sen kytkentä jännite on 10 - 16 V, mutta lisävarusteena saatavalla invertterillä se toimii myös sähköverkon jännitteellä. [12, s. 1 - 2]



Kuva 14. Dynesystems XM-1000 –savukaasuanalysaattori [11]



Kuva 15. EMS 5002 –savukaasuanalysaattori [12, s. 1]

Opus 40-D (kuva 16) on viisikaasuanalysaattori, joka mittaa CO-, CO₂-, HC-, O₂- ja NO_x-pitoisuuksia. Lisäksi se laskee ilmakertoimen. Siinä on RS232-liitäntä tiedonsiirtoa varten, sisäänrakennettu tulostin ja vedenerotusjärjestelmä. [13, s. 1 - 2]



Kuva 16. Opus 40-D –savukaasuanalysaattori [13, s. 1]

Taulukossa 1 on tiivistettynä esitetty näiden viiden esitellyn laitteen tekniset tiedot. Laitteiden vertailu teknisten tietojen perusteella on melko hankalaa, kuten taulukosta voidaan

huomata, koska arvot eivät poikkea toisistaan merkittävästi. Kaikki valmistajat eivät myöskään ilmoita tuote-esitteissään samoja tietoja, joten taulukko on joidenkin ominaisuuksien osalta puutteellinen.

Taulukko 1. Vertailtavien analysaattoreiden teknisiä tietoja

	AVL 4000 DiGas [9, s. 2, 3, 6]	Opus 40 D [13, s.2]	Bosch BEA 250 [10, s.1, 2]	EMS Model 5002 [12, s. 1, 2]	Dynesystems XM-1000 [11]
Mittausalue CO	0-10% vol	0-10% vol	0-10% vol	0-10% vol	0-15% vol
Resoluutio CO	0,01% vol	0,01% vol	0,001% vol	0,01% vol	
Tarkkuus CO		0,02% vol		0,06% vol	0,02% vol ¹
Mittausalue CO ₂	0-20% vol	0-20% vol	0-18% vol	0-20% vol	0-20% vol
Resoluutio CO ₂	0,1%vol	0,1% vol	0,01% vol	0,1% vol	
Tarkkuus CO ₂		0,3% vol		0,3% vol	0,3% vol ²
Mittausalue NO _x	0-5000 ppm vol	0-5000 ppm vol	0-5000 ppm vol ³	0-5000 ppm vol	0-5000 ppm vol
Resoluutio NO _x	1 ppm vol	1 ppm vol	1 ppm vol ³	1 ppm vol	
Tarkkuus NO _x		25 ppm vol		25 ppm vol	25 ppm ⁴
Mittausalue O ₂	0-25% vol	0-25% vol	0-22% vol	0-25% vol	0-25% vol
Resoluutio O ₂	0,01% vol	0,01% vol	0,01% vol	0,01% vol	
Tarkkuus O ₂		0,1% vol		0,1% vol	0,1% vol
Mittausalue HC	0-20000 ppm vol	0-20000 ppm vol	0-9999 ppm vol	0-2000 ppm vol	0-30000 ppm vol
Resoluutio HC	1 ppm vol	1 ppm vol	1 ppm vol	1 ppm vol	
Tarkkuus HC		4 ppm vol		4 ppm vol	3% näyt- tämästä ⁵
Kuivaus		on		on	on
OIML R99 ⁶	on ⁷	luokka 1	luokka 0	luokka 0	
Lämpene- misaika		<5 min		<10 min	
Reagoimisaika		<5 s		5 s	< 10 s
Tulostin	on	on	on	ei	
Nollapisteen ja herkkyyden kalibrointi		autom.		autom.	on
Kalibrointiväli	1 vuosi	1 vuosi	1 vuosi		
¹	Välillä 0-10% vol				
²	Välillä 0-16% vol				
³	Mittaa ainoastaan NO-pitoisuutta				
⁴	Välillä 0-4000 ppm vol				
⁵	Välillä 0-2000 ppm vol				
⁶	International Organization of Legal Metrology -järjestön määrittelemä standardi koskien savukaasuanalysaattoreita. Paras luokka on 0.				
⁷	Luokkaa ei ilmoitettu				

Yleisesti ottaen kaikki laitteet vaikuttavat käyttötarkoitukseen soveltuvilta. Boschin laite kuitenkin sillä varauksella, että se mittaa pelkästään typpioksidin määrää savukaasuista. Savukaasujen kuivaus on ainakin kolmessa laitteessa integroitu analysaattoriin, joten siitäkään ei tarvitse erikseen huolehtia. Valmistajista ainoastaan Dynesystems ilmoittaa laitteessaan olevan lämmitetyn näytteenottolinjan. Ilmeisesti muut valmistajat luottavat siihen, että savukaasut pysyvät ilman erillistä lämmitystä riittävän kuumina ($>180\text{ °C}$) analysaattorille saakka tai eivät ole katsoneet tarpeelliseksi erikseen mainita tällaisesta ominaisuudesta tuote-esitteissään.

Eroista analysaattoreiden käytettävyydessä on vaikea sanoa mitään ilman jokaisen laitteen koekäyttöä. Kuvien perusteella Opuksen ja EMS:n käyttöliittymät vaikuttavat kaikkein selkeimmiltä. Opuksessa on myös mitattujen arvojen näyttö ratkaistu muita laitteita selkeämmin. Kokonsa puolesta EMS, Opus ja AVL ovat Boschia ja Dynesystemsia näppärämpiä.

Vertailun vuoksi tarkastellaan vielä Lappeenrannan A-katsastuksen henkilöautojen määräaikaiskatsastusten päästömittauksissa käyttämiä laitteita. Laitteet ovat Boschin ETT 008.36 nelikaasuanalysointilaitteita (kuva 17), jotka mittaavat CO-, CO₂-, HC- ja O₂-pitoisuuksia. Tarkemmat tekniset tiedot ovat taulukossa 2. Yksittäiset katsastusasemat saavat valita käyttämänsä pakokaasuanalysointilaitteen itse, eli Ajoneuvohallintokeskus ei ohjeista käyttämään jotain tiettyä valmistajaa. Niinpä Suomen katsastusasemilla on käytössä myös monen muun valmistajan laitteita. [14]



Kuva 17. Bosch ETT 008.36 -savukaasuanalysointilaitteita

Taulukko 2. Bosch ETT008.36 –savukaasuanalysointilaitteen tekniset tiedot [15, s. 7-8]

Mittausalue CO	Mittausalue CO ₂	Mittausalue HC	Mittausalue O ₂
0-10% vol	0-18% vol	0-9990 ppm vol	0-21% vol
Kuivaus	Nollapisteen ja herkkyden kalibrointi	Lämpenemisaika	
on	automaattinen	3 min	

4.3 Muutokset mittaustulosten käsittelyssä

Siirtyminen nykyisistä savukaasuanalysointilaitteista monikaasuanalysointilaitteeseen muuttaa mittaustulosten käsittelyä jonkun verran. Yhtälön (3) kaltaista yksinkertaistettua palamisen reaktioyhtälöä on laajennettava kattamaan myös reaktiotuotteina syntyvät palamattomat hiilivedyt ja typen oksidit.

Standardi SFS-EN ISO 8178-1 esittää savukaasun massavirran laskemisen happitaseen avulla yhtälöllä [6, s. 77]

$$q_{m,sk} = q_{m,pa} \left(\frac{\frac{C_1}{1000\rho_{sk}} + 10C_2 - 10w_{O_2,pa}}{10w_{O_2,i} - \frac{C_1}{1000\rho_{sk}}} \right), \quad (27)$$

missä $q_{m,pa}$ on polttoaineen massavirta [kg/h],

$w_{O_2,pa}$ on hapen massaosuus polttoaineesta [-] ja

$w_{O_2,i}$ on hapen massaosuus ilmasta [-].

Tekijä C_1 ratkaistaan yhtälöstä [6, s. 78]

$$C_1 = 10^4 \frac{M_{O_2}x_{O_2}}{V_{m,O_2}} - \frac{A_O}{V_{m,CO}}x_{CO} + \frac{A_O}{V_{m,NO}}x_{NO} + \frac{2A_O}{V_{m,NO_2}}x_{NO_2} - \frac{3A_O}{V_{m,HC}}x_{HC}, \quad (28)$$

missä M on moolimassa [g/mol],

x on tilavuusosuus [-],

V_m on moolitilavuus [l/mol] ja

A on atomipaino [-].

Huomioitavaa on, että niissä käytetyt osakaasujen pitoisuudet ovat kosteista savukaasuisista mitattuja. Analysaattorit kuitenkin mittaavat pitoisuuksia kuivista savukaasuista, joten yhtälössä on käytettävä korjauskerrointa. Korjauskertoimen yhtälö on [6, s. 81]

$$K = \frac{100}{\frac{5,995w_{H,pa}x_{CO_2}}{w_{C,pa}} + 1,608\phi + 100}, \quad (29)$$

missä ϕ on ilman suhteellinen kosteus [-].

Yhtälössä (29) hiilidioksidipitoisuus on nyt kuivista savukaasuista mitattu pitoisuus. Tekijän C_1 yhtälö muuttuu muotoon

$$C_1 = K \left(10^4 \frac{M_{O_2}x_{O_2}}{V_{m,O_2}} - \frac{A_O}{V_{m,CO}} x_{CO} + \frac{A_O}{V_{m,NO}} x_{NO} + \frac{2A_O}{V_{m,NO_2}} x_{NO_2} - \frac{3A_O}{V_{m,HC}} x_{HC} \right) \quad (30)$$

Tekijä C_2 ratkaistaan yhtälöstä [6, s. 78]

$$C_2 = w_{H_2,pa} \frac{A_O}{2A_H} + w_{C,pa} \frac{2A_O}{A_C} \quad (31)$$

Yhtälöissä (28) - (31) on oletettu, että savukaasut eivät sisällä nokea ja polttoaine ei sisällä rikkiä.

Huomattava on myös, että yhtälössä (28) on erikseen typpioksidin pitoisuus ja typpidioksidin pitoisuus. Analysaattorit eivät kuitenkaan erottele näitä toisistaan, vaan mittaavat ainoastaan NO_x -pitoisuutta. Niinpä typpioksidin ja typpidioksidin pitoisuuksien suhteen on tehtävä joitain yksinkertaistuksia tai oletuksia.

Toinen vaihtoehto savukaasujen massavirran laskemiseksi, jonka standardikin mainitsee, on mitata moottoriin menevän palamisilman tilavuusvirtaa tai massavirtaa tarkoitukseen sopivalla mittarilla. Savukaasun massavirta voidaan tällöin laskea yhtälöstä [6, s. 12]

$$q_{m,sk} = q_{m,pa} + q_{m,i} \quad (32)$$

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ottomoottoria mittaamalla saadaan melko hyvin selville keskeiset toiminta-arvot, joiden avulla moottorin toimintaa voidaan tarkastella. Päästömittaukset saadaan muutettua vastaamaan nykyaikaisia käytäntöjä laajentamalla ne koskemaan myös palamattomia hiiliveytyjä ja typen oksideja. Tällöin mitattavat päästöt kattaisivat kaikki savukaasun komponentit, jotka tällä hetkellä ovat sääntelyn alaisia.

Savukaasuanalysointilaitteiden välisistä eroista on melko vaikea saada selkeää kuvaa pelkästään suppeiden ja osittain myös puutteellisesti ilmoitettujen teknisten tietojen avulla. Kaikki esitellyt laitteet vaikuttavat kuitenkin asiallisilta ja käyttötarkoitukseen soveltuvilta. Yksi analysointilaitteen valintaan olennaisesti vaikuttava seikka on hinta. Tässä vertailussa laitteiden hintaa ei kuitenkaan ole otettu mitenkään huomioon.

Bosch on tietenkin suurena valmistajana melko varma valinta. Myös se seikka puhuu Boschin puolesta, että sen valmistamia laitteita on katsastusasemilla, joissa tulosten tarkkuus ja luotettavuus ovat tärkeitä ominaisuuksia. Täytyy kuitenkin muistaa, että katsastusasemilla on käytössä myös muiden valmistajien analysointilaitteita. Tämän työn puitteissa ei kuitenkaan ollut mahdollista selvittää kaikkia muita käytössä olevia merkkejä. Joka tapauksessa analysointilaitteen valintaa tärkeämpi tekijä mittaustulosten tarkkuuden kannalta on laitteiden asianmukainen kalibrointi määräajoin ja oikeanlainen käyttö.

Savukaasulaskuissa joudutaan edelleen tekemään tiettyjä yksinkertaistuksia. Standardissa esitetyt yhtälöt ei ole johdettu mitenkään ja niissä tehtyjä oletuksia ei ole selvitetty,

joten niiden tarkkuudesta on vaikea sanoa mitään. Savukaasun pitoisuudet saadaan kuitenkin määritettyä monikaasuanalysaattorilla tarkemmin kuin pelkästään hiilimonoksidia ja happea mittaavilla analysaattoreilla. Tällä perusteella savukaasulaskujen tarkkuuden voisikin siis olettaa parantuvan.

LÄHDELUETTELO

- [1] Stone Richard, Ball Jeffrey K. Automotive Engineering Fundamentals. Society of Automotive Engineering (SAE), 2004. 594 s. ISBN 0-7680-0987-1.
- [2] Watson N., Janota M.S. Turbocharging the Internal Combustion Engine. London: The MacMillan Press Ltd, 1982. 608 s. ISBN 0-333-24290-4.
- [3] Kent Industrial Measurements. Magnetic Oxygen Analyser Model 6800 Operating Instructions. 49 s.
- [4] Anarad. Operations Manual Model AR-411. 44 s.
- [5] Ottomoottorin toiminta-arvot, En2120400 Virtaus- ja lämpövoimakoneiden laboratorio- ja harjoitustyökurssi, työohje, kevät 2007.
- [6] Suomen standardoimisliitto SFS. SFS-EN ISO 8178-1:en. Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions. 1996. 97s.
- [7] Ajoneuvohallintokeskus (AKE). Katsastuksen arvosteluperusteet versio 2.0. Dnro 345/208/2002. 38 s.
- [8] Härkönen, Sakari et. al. Teollisuuden mittaustekniikka – analyysimittaukset. VAPK-kustannus. Helsinki. 1992. 162 s. ISBN 951-37-0874-8.
- [9] Finntest Oy. AVL-pakokaasuanalysointorit, 4000-sarja, pakokaasuanalysointorit bensiini- ja dieselmootoreille. [www-tuotedokumentti]. 6 s. 2007. [Viitattu 14.4.2007]. Saatavissa:
<http://www.finntest.fi/images/esitteet/AVL%20yleisesite.pdf>

- [10] Robert Bosch Ltd 2006. BEA Emission Analyzers, for a clean environment. [www-tuotedokumentti]. 2 s. [Viitattu 14.4.2007]. Saatavissa: <http://www.boschautoparts.co.uk/pdf/BEA350%20BEA250%20BEA150.pdf>
- [11] Dynesystems Co. XM-1000 Exhaust Gas Analyzer. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 14.4.2007]. Saatavissa: <http://www.dynesystems.com/Products/XM1000.htm>
- [12] Emissions System Inc. 4/5 Gas Exhaust Analyzer. [www-tuotedokumentti]. 2 s. [Viitattu 14.4.2007]. Saatavissa: <http://www.emsgas.com/spanishflyersdec06/4-5-5002-rev3-flyer.pdf>
- [13] Opus Prodox Ab. Opus 40-D. [www-tuotedokumentti]. 2 s. [Viitattu 14.4.2007]. Saatavissa: http://www.opus.se/download/40_d_e.pdf
- [14] Kosonen Tapio. Insinööri, Lappeenrannan katsastusaseman päällikkö, A-katsastus. Lappeenranta 17.4.2007.
- [15] Robert Bosch Oy. Bosch-pakokaasuanalyssaattorit. 1990. 10 s.

Liite 1. Saab-ottomoottorin tekniset tiedot [5, s. 1]

Moottorityyppi	4-tahtinen, 4-sylinterinen ottomoottori, yläpuolinen nokka-akseli
Teho	107 kW / 5000 rpm, DIN
Vääntömomentti	235 Nm / 3000 rpm, DIN
Puristussuhde	7,2:1
Sylinterihalkaisija	90 mm
Iskunpituus	78 mm
Sytytysjärjestys	1-3-4-2
Polttoaine	Bensiini
Oktaaniluku	RON 96
Ulkomitat	900 x 700 x 550 mm
Paino	140 kg
Polttoainejärjestelmä	K-jetronic-ruiskutusjärjestelmä
Jäähdytysjärjestelmä	Suljettu ylipainetyyppinen nestejäähdytys
Voitelujärjestelmä	Painekierto-voitelu
Ahdin	Pakokaasu, ahtopaine 0,70 + 0,05 bar, valmistaja Garrett Ai-Research