

VAKOLAn tiedote

66/94



Esa Elonen

Pako- ja savukaasujen analysointi

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS
Agricultural Research Centre of Finland

VAKOLA

Maatalousteknologian tutkimuslaitos

Osoite
Vakolantie 55
03400 VIHTI

Puhelin
(90) 224 6211
Telefax
(90) 224 6210

Institute of Agricultural Engineering

Address
Vakolantie 55
FIN-03400 VIHTI
FINLAND

Telephone int. +
358-0-224 6211
Telefax int. +
358-0-224 6210

SISÄLLYSLUETTELO

ESIPUHE	3
1. JOHDANTO	3
2. PAKOKAASUJEN KOMPONENTIT JA NIIDEN MÄÄRITTÄMINEN	4
2.1 Palaminen	4
2.2 Hiilimonoksidi (CO) ja hiilidioksidi (CO ₂)	5
2.3 Palamattomat hiilivedyt (HC)	6
2.4 Typen oksidit (NO _x)	7
2.5 Hiukkaset (PT)	8
2.6 Happi (O ₂)	9
2.7 Näytteenotto ja -käsittely	10
3. PÄÄSTÖJEN MUODOSTUMINEN JA MÄÄRÄT	12
3.1 Dieselmoottori	12
3.2 Bensiinimoottori	13
3.3 Lämmityskattila	14
4. PÄÄSTÖMITTAUSSTANDARDIT JA -MÄÄRÄYKSET	15
4.1 Standardit ja määräykset	15
4.2 Standardit	15
4.2.1 ISO (International Organization for Standardization)	15
4.2.2 SAE (Society of Automotive Engineers)	17
4.2.3 SFS (Suomen Standardisoimisliitto)	18
4.3 Määräykset	18
4.3.1 Pohjoismaat	18
4.3.2 CARB (Californian Air Resources Board)	19
4.3.3 ECE (Economic Commission for Europe)	20
4.3.3.1 ECE:n sopimukset	20
4.3.3.2 Savutuksen mittaus (ECE R 24)	21
4.3.3.3 Kaasumaisten päästöjen mittaus (ECE R 49)	21
4.3.4 EEC (European Economic Community)	22
4.3.5 EUROMOT (Association of European Manufacturers of internal Combustion Engines)	23
5. VAKOLAAN HANKITTU LAITTEISTO	23
6. LÄHDELUETTELO	26

ESIPUHE

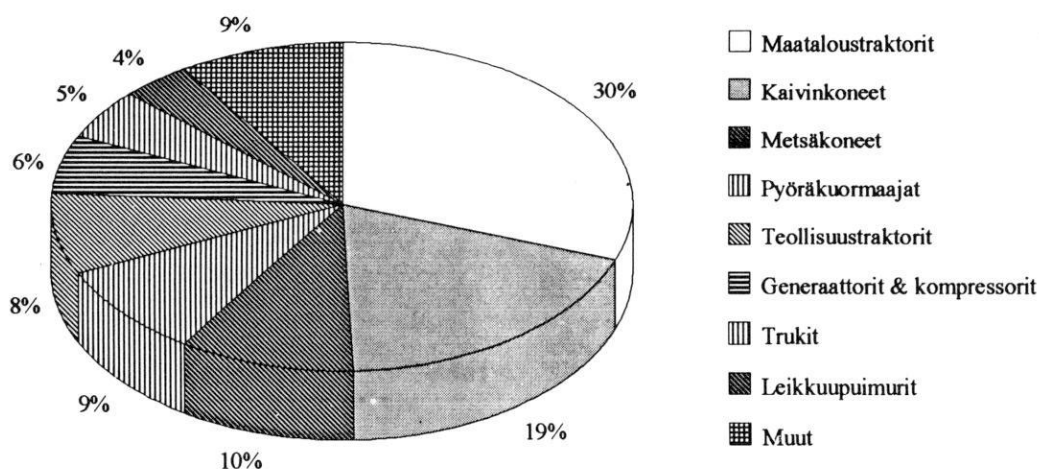
VAKOLAan hankittiin pako- ja savukaasujen analysointilaitteisto vuonna 1994. Laitteistolla on tarkoitus mitata erityisesti työ- ja pienkoneiden sekä pienten lämmitys-kattiloiden päästöjä.

Laitteiston hankintaa edelsi työ, jossa selvitettiin tarvittavat mittaustandardit, laitteet ja -menetelmät. Selvityksen teki suurelta osin tekn. yo. Esa Elonen. Tämä tiedote pohjautuu hänen Teknilliseen korkeakouluun tekemään suunnitteluharjoitus-työhön "Pakokaasupäästömittalaitteilta vaadittavien ominaisuuksien selvittäminen ja laitteiston hankinta VAKOLAan". Tässä tiedotteessa keskitytään pääosin työ- ja pienkoneiden sekä kattiloiden päästöjen mittaamisen tekniikkaan.

1. JOHDANTO

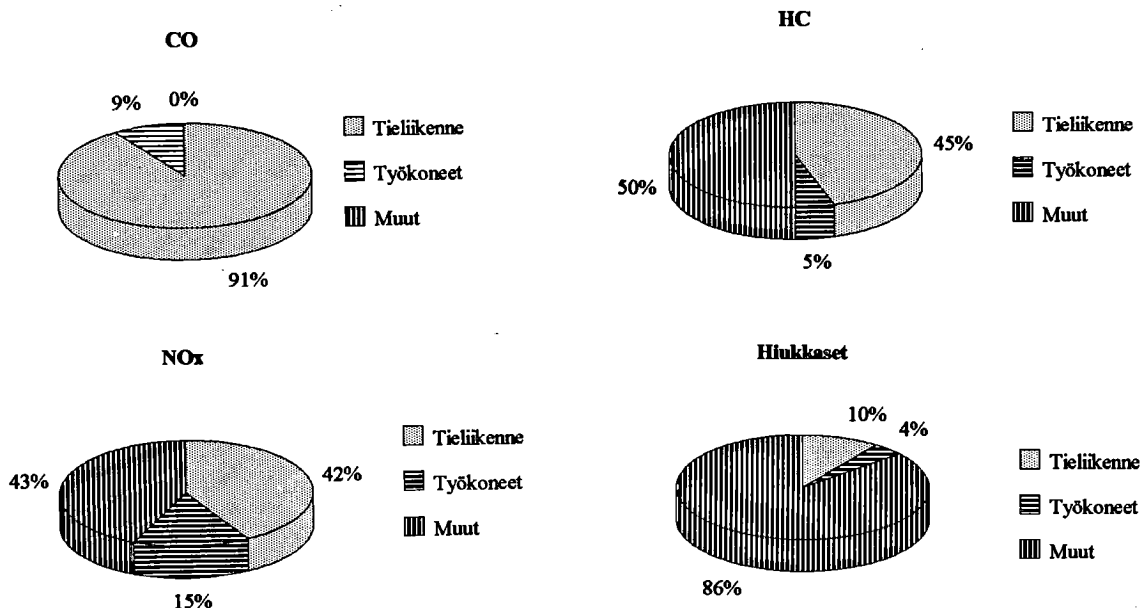
Työkoneiden pakokaasupäästöt ovat merkittäviä niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. Niiden päästöjä ei ainakaan vielä rajoiteta yhtä aktiivisesti kuin muun liikenteen. Koska muun liikenteen päästörajoituksilla saadaan päästöjen määrää vähennettyä, työkoneiden osuus kokonaispäästöistä lisääntyy. Työkoneiden käyttöikä on usein pitkä, jolloin kaluston uusiutuminen on hitaampaa kuin esimerkiksi autojen. Tämän vuoksi mm. uusin moottoritekniikka vaikuttaa työkoneiden pakokaasupäästöjen vähentämiseen hitaammin.

Vuonna 1990 tehtiin tutkimus, jossa selvitettiin työkoneiden lukumäärä, kokoluokat, käyttötavat ja -ajat sekä arvioitiin niiden aiheuttamia ympäristöpäästöjä Suomessa. Työkoneiksi luettiin polttomoottorikäyttöiset ajettavat ja liikuteltavat sekä siirrettävät työkoneet. Kuorma- ja erikoisautoja ei luettu työkoneiksi, sillä ne ovat rekisterissä ja niiden päästöjä on jo aiemmin selvitetty. Tutkimuksen mukaan noin 30 % kaikesta liikenteen kuluttamasta kevyestä poltto- ja dieselöljystä kului työkoneissa, mutta bensiinimoottorikäyttöisten työkoneiden osuus liikenteen kokonaiskulutuksesta oli vain noin 3 %. Kuvasta 1 selviää dieselkäyttöisten työkoneiden polttoaineenkulutus koneryhmittäin.



Kuva 1. Dieseltyökoneiden polttoaineen kulutus Suomessa 1990.

Kuvassa 2 on esitetty työkoneiden pakokaasupäästöjen osuus kokonaispäästöistä. Työkoneet tuottavat suhteellisesti eniten typen oksideja (NO_x). Tämä johtuu siitä, että työkoneissa on yleisesti dieselmoottori, joka tuottaa suhteellisesti enemmän typen oksideja kuin bensiinimoottori.



Kuva 2. Työkoneiden pakokaasupäästöjen osuus kokonaispäästöistä.

2. PAKOKAASUJEN KOMPONENTIT JA NIIDEN MÄÄRITÄMINEN

2.1 Palaminen

Aineen kemiallista yhtymistä ilman happeen, palamista, käytetään hyväksi muutettaessa jonkin polttoaineen kemiallinen energia toiseen olomuotoon.

Polttomoottorissa muutetaan polttoaineen kemiallista energiaa mekaaniseksi energiaksi. Ideaalisen, hiilivety-polttoainetta käyttävän polttomoottorin pakokaasut koostuisivat vain vedestä (H_2O) ja hiilidioksidista (CO_2). Kuitenkin pakokaasut todellisuudessa sisältävät osittain tai kokonaan palamattomia polttoainekomponentteja sekä palamisen sivutuotteita. Palamisessa syntyvät haitalliset päästöt ovat siis eräitä polttomoottoreiden huonoja ominaisuuksia.

Epätäydellisen palamisen pääasiallisia tuotteita ovat hiilimonoksidi (CO), aldehydit ($\text{C}_n\text{H}_m\text{-CHO}$), ketonit ($\text{C}_n\text{H}_m\text{-CO}$) sekä erilaiset hapot ($\text{C}_n\text{H}_m\text{-COOH}$). Palamattomia komponentteja pakokaasuissa ovat parafiinit, olefiinit ja aromaattit. Lisäksi polttoaineen epäpuhtauksista ja lisäaineista voi pakokaasuihin syntyä myös lyijy-yhdisteitä ja mm. rikkidioksidia (SO_2).

Moottorin käyttämä ilma sisältää typpeä noin 78 % ja happea noin 21 %. Loppu koostuu jalokaasuista. Suurin osa palamisen sivutuotteista syntyy ilman sisältämän typen hapettuessa palotilan korkeissa lämpötiloissa typen oksideiksi (NO , NO_2 , N_2O).

Pääosa pakokaasupäästöistä koostuu kaasumaisista aineista. Pakokaasut sisältävät myös hiukkasmaisia aineita, jotka voivat olla kiinteitä partikkeleja tai nestemäisiä aerosoleja. Hiukkasmaiset aineet tekevät pakokaasut näkyviksi, mikä ilmenee esimerkiksi dieselmoottoreiden savutuksena.

Lainsäädännössä päästöt jaetaan säänneltyihin ja sääntelemättömiin päästöihin. Säännellyillä päästöillä tarkoitetaan päästöjä, joiden määrä on lainsäädännöllä rajoitettu. Sääntelemättömät päästöt ovat pakokaasujen ainesosia, joiden muodostumismäärää ei ole rajoitettu. Nykyisin tieliikennekäytössä olevien ajoneuvojen säänneltyjä päästöjä ovat hiilimonoksidi (CO), kokonaishiilivedyt (HC), typen oksidit (NO_x) sekä dieselmoottoreiden hiukkaset.

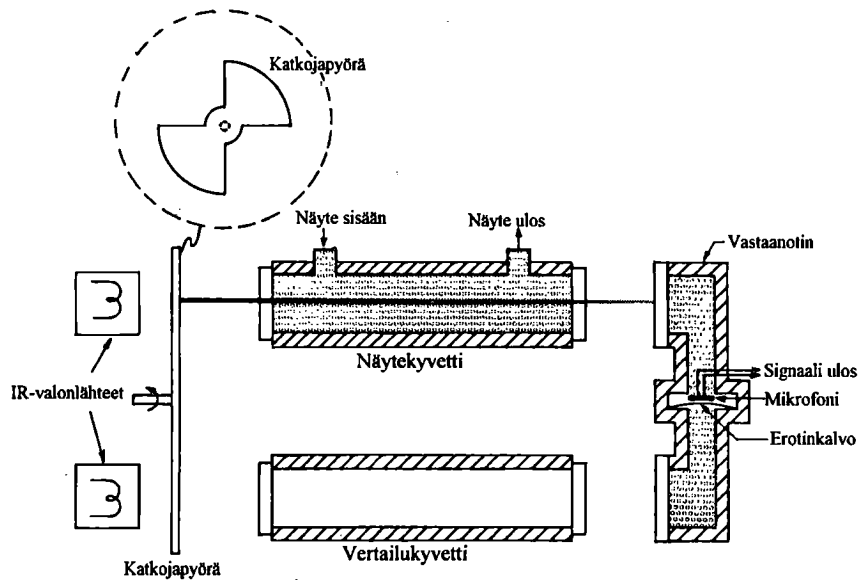
2.2 Hiilimonoksidi (CO) ja hiilidioksidi (CO₂)

Hiilimonoksidia eli häkää syntyy epätäydellisessä palamisessa. Hiilivety polttoaineen palaessa muodostuu ensin häkää, minkä jälkeen palamisen loppuvaiheessa syntyy hiilidioksidia. Jälkimmäinen reaktio on huomattavasti hitaampi kuin edellinen, jolloin palaminen voi jäädä epätäydelliseksi. Hiilimonoksidin määrää lisää alhainen palotilan happipitoisuus ja lämpötila.

Häkä on melko tunnettu, nopeavaikutteinen ja hajuton myrkkyykaasu. Se sitoutuu vereen ja syrjäyttää siitä hapen. Sen vaarallisuus riippuu pitoisuudesta ja altistumisajasta. Jo 0,06 %:n eli 600 ppm:n pitoisuus hengitysilmassa aiheuttaa kuoleman muutaman tunnin kuluessa. Häkä muuttuu ilmassa varsin nopeasti hiilidioksidiksi.

Hiilimonoksidin määrää voidaan mitata mm. kuormalankamittarilla, joka on yksinkertaisin häkämittari, sekä infrapuna-analysointilaitteilla, joista nykyään yleisimpiä ovat NDIR-tyyppiset laitteet. Tulevaisuudessa käytetään kenties FTIR-tyyppisiä Fourier-muunnokseen perustuvia laitteita. Myös kaasukromatografilla ja sähkökemiallisilla antureilla pystytään määrittämään häkäpitoisuuksia. Hiilidioksidimääriä voidaan mitata mm. infrapuna-analysointilaitteilla, kaasukromatografilla ja kaasun lämmönjohtavuuteen perustuvilla mittareilla.

NDIR (Non-Dispersive InfraRed) -tyyppisillä infrapuna-analysointilaitteilla verrataan näytekaasuun sekä vertailukaasuun absorboituneen infrapunasäteilyn määrää. Analysointilaitteissa on kaksi kaasukyvettiä, joista toinen sisältää vertailukaasua. Toisen kyvetin, näytekyvetin, läpi johdetaan tutkittavaa kaasua. Vastaanotinosassa on kaksi analysoitavaa kaasua (CO tai CO/N₂ -seos) sisältävää kaasutilaa, jotka on erotettu kalvolla. Jos näytekyvetti sisältää tutkittavaa kaasua, osa infrapunasäteilyä absorboituu näytteeseen ja infrapunasäteily lämmittää enemmän vertailukaasukyvetin puoleista vastaanottokaasutilaa. Tällöin erotinkalvo pullistuu vastakkaiseen suuntaan. Infrapunasäteily jaksotetaan katkojapyörällä, jolloin erotinkalvonkin liike on jaksottaista. Kalvon yhteydessä on anturi, esimerkiksi mikrofoni, joka antaa näytekaasun pitoisuuden verrannollisen signaalin. Kuvassa 3 on esitettyä NDIR-analysointilaitteita.



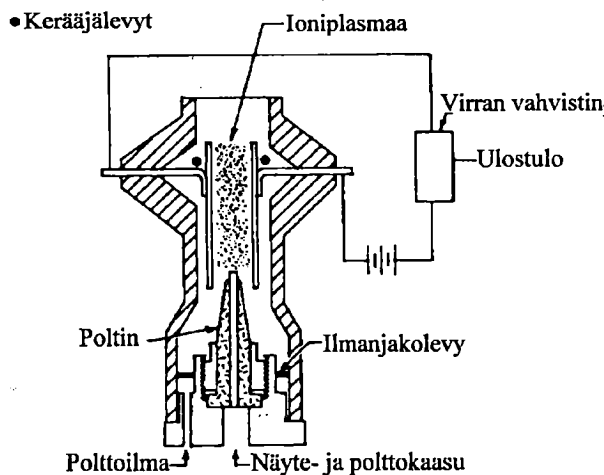
Kuva 3. NDIR-analysoittorin rakennepiirite.

2.3 Palamattomat hiilivedyt (HC)

Pakokaasuissa olevia palamattomia hiilivetyjä merkitään yhteisesti HC:llä. Niitä muodostuu joko paikallisen hapenpuutteen tai liian alhaisen palamislämpötilan vaikutuksesta. Polttomoottorissa polttoaine palaa useiden välivaiheiden kautta. Polttoaineen pitkät hiilivetyketjut katkeavat (krakkautuvat) ja osa syntyneistä lyhyemmistä hiilivety-yhdisteistä voi jälleen yhdistyä (polymerisaatio) pitemmiksi ketjuiksi. Jos nämä reaktiot keskeytyvät, pakokaasuihin jää palamattomia hiilivetyjä.

Palamattomien hiilivetyjen määrää voidaan mitata mm. infrapuna-analysoittoreilla (NDIR sekä FTIR), kaasukromatografilla ja liekki-ionisaatiotekniikkaan perustuvilla laitteilla. NDIR-analysoittorit eivät ole parhaita mahdollisia laitteita kokonaishiilivetyjen mittaamiseen, koska ne eivät reagoi kaikentyypisiin hiilivetyihin.

Liekki-ionisaatioanalysoittorin (FID - Flame Ionization Detector) sydän on poltinoso,



Kuva 4. Liekki-ionisaattorin poltinoso.

jossa palaa ilma-vetyliekki, joka ei johda sähköä. Hiilivety-yhdisteiden hiili muodostaa liekissä ioniplasmaa, jolloin liekki muuttuu sähköä johtavaksi. Muut hiiliyhdisteet, kuten CO ja CO₂, eivät vaikuta tähän prosessiin. Kun elektrodien välille johdetaan vakiojännite, ionisaatio aiheuttaa näytteen hiilipitoisuuden verrannollisen sähkövirran. Kuvassa 4 näkyy liekki-ionisaatioanalysoittorin poltinosan rakennepiirite.

2.4 Typen oksidit (NO_x)

Typen oksideja muodostuu korkeissa lämpötiloissa ilmaylimäärän ollessa suuri. Oksidit muodostuvat siten, että ilman happimolekyylit hajoavat atomeiksi korkeissa lämpötiloissa (O₂→2O) ja nämä reagoivat edelleen ilman typpimolekyylien (N₂) kanssa.

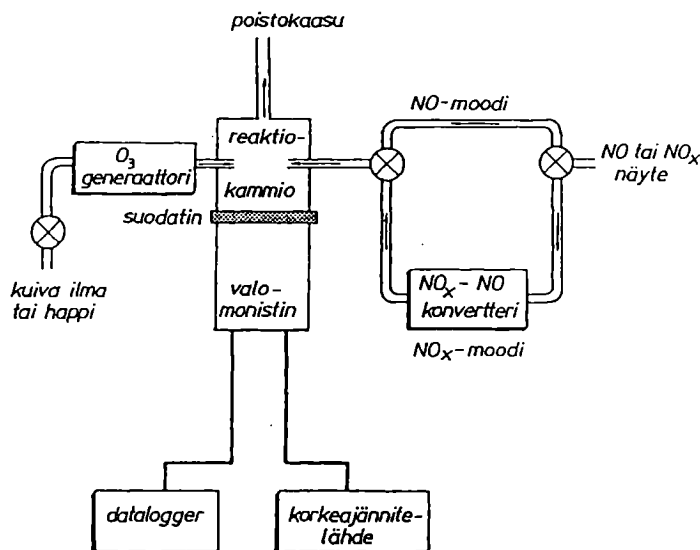
Typpimonoksidi (NO) hapettuu ilmassa nopeasti väriltään punaruskeaksi, vesiliukoiseksi typpidioksidiksi (NO₂), joka on nopeavaikutteinen myrkkö. Se ärsyttää hengityselimiä ja saattaa yli 500 - 1000 ppm:n pitoisuuksina vaurioittaa keuhkokudosta niin pahasti, että seurauksena on kuolema. Dityppioksidia (N₂O) eli ilokaasua on pakokaasupäästöissä melko vähän. Se on pitkäikäinen kaasu, joka on osallisena kasvihuoneilmiössä. Typen oksidit aiheuttavat yhdessä hiilivetyjen kanssa savusumua. Lisäksi ne ovat happosateita ja maaperän happamoitumista aiheuttavia yhdisteitä.

Typen oksideja voidaan mitata mm. infrapuna-analysoitsaattoreilla, NDUV (Non-Dispersive UltraViolet) -tekniikalla, kaasukromatografilla ja kemiluminesenssimenetelmällä (CLA - ChemiLuminescent Analyser). NDUV-analysoitsattorin toiminta perustuu näytteenkaasuun absorboituneen ultraviolettisäteilyn määrän mittaamiseen.

Kemiluminesenssimenetelmässä typen oksidien määrittäminen perustuu typpioksidin (NO) ja otsonin (O₃) väliseen reaktioon.



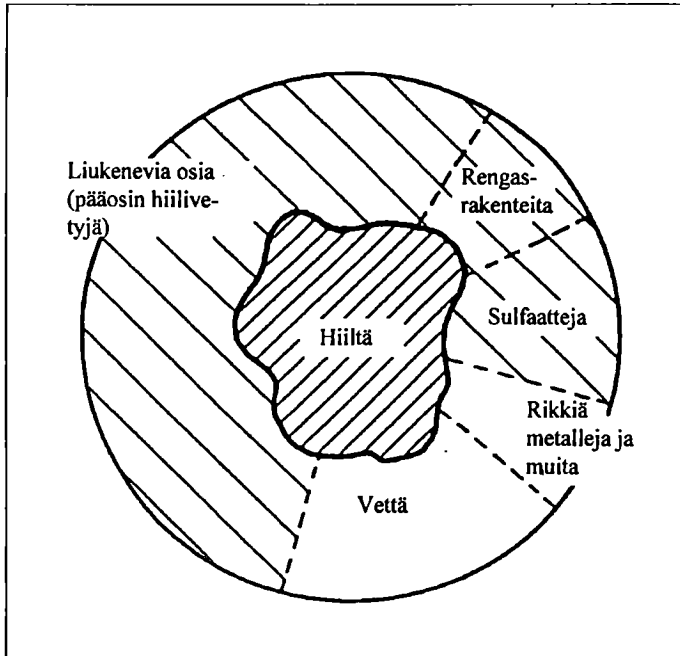
Reaktiossa typpioksidista ja otsonista syntyy sähköisesti virittyneitä NO₂-molekyylejä, jotka perustilaan palatessaan emittoivat fotoneja eli valoa (hv). Syntyvän valon voimakkuus on verrannollinen näytteen typpioksidipitoisuuteen. Analysoitsattori koostuu otsonigeneraattorista, reaktiokammioista, valomonistin, NO_x-NO-kuuntimesta sekä haluttaessa NO_x-NO-kuuntimesta. Otsonigeneraattorissa tehdään korkealla sähköjännitteellä kaksiatomisesta happikaasusta otsonia. Koska valoa emittoiva reaktio tapahtuu vain typpioksidin (NO) kanssa, pitää pakokaasujen sisältämä typpidioksidi (NO₂) pelkistää typpioksidiksi, jotta saataisiin määritettyä näiden kokonaismäärä (NO_x). Pelkistäminen tehdään NO_x-NO-kuuntimesta noin 650 °C:n lämpötilassa. Muunnin pystytään myös ohittamaan eli voidaan mitata joko NO_x tai NO. Typpidioksidin määrä saadaan vähentämällä NO_x-pitoisuudesta NO-pitoisuus. Kuvassa 5 esitetään kemiluminesenssianalysoitsattorin toimintaperiaate.



Kuva 5. Kemiluminesenssianalysoitsattorin toimintaperiaate.

2.5 Hiukkaset (PT)

Moottoreiden päästöt ovat enimmäkseen kaasuja, mutta varsinkin dieselmoottoreiden pakokaasuissa on myös hiukkasmaisia aineita. Hiukkaset sisältävät epäorgaanisia ja orgaanisia aineita mm. hiilivetyjä. Aineet voivat olla kiinteitä tai nestemäisiä. Ne ovat peräisin polttoaineen epätäydellisestä palamisesta ja polttoaineen epäpuhtauksista.



Kuva 6. Tyypillinen dieselmoottorin hiukkasen rakenne.

Lisäksi voiteluaineen joutuminen palotilaan ja moottorin kulumisen aiheuttavat hiukkaspäästöjä.

Dieselpakokaasujen hiukkaset muodostuvat yleensä nokiytimiin. Kooltaan ne ovat pieniä, halkaisijaltaan luokkaa $10\ \mu\text{m}$. Hiukkanen koostuu kiinteästä, liukenevasta, orgaanisesta ja epäorgaanisesta komponentista. Kuvassa 6 on dieselmoottorin pakokaasuhiukkasen rakenne. Bensiinimoottorin pakokaasuissa hiukkasen ytimenä voi olla myös lyijy-yhdiste. Lyijy on peräisin polttoaineesta, joten

lyijyttömän bensiinin käyttöön siirtyminen vähentää myös hiukkaspäästöjä. Bensiinimoottoristen autojen hiukkaspäästöt ovatkin nykyisin niin vähäisiä, ettei niille ole asetettu rajoja, joten hiukkaspäästörajoitukset koskevat ainoastaan dieselmoottoreita.

Hiukkasten aiheuttamia haittoja ympäristölle ei vielä tunneta kovinkaan tarkasti. Niiden todelliset vaikutukset esimerkiksi ihmisten terveydelle riippuvat niin monesta tekijästä, ettei voida varmuudella sanoa mitä vaikutuksia hiukkaspäästöillä todella on. Eläinkokeiden perusteella niiden sanotaan aiheuttavan mm. syöpää. Varmaa on kuitenkin ainoastaan se, että terveydelle hyödyllisiä ne eivät ole. Lienee kuitenkin hyvä muistaa ainakin tupakoinnin aiheuttavan monituhatkertaisia hiukkaspitoisuuksia verrattuna ruuhka-ajan kaupunkiolosuhteisiin.

Hiukkaspäästöt ovat suurelta osin näkyviä ja ne ilmenevät moottorin savutuksena. Savutukseen perustuvaa hiukkasten mittausta käytettiin pitkään dieselien hiukkaspäästöjä määrittäessä ja rajoitettaessa. Sen etuja ovat helppo mittaus ja edullinen mittausrakenteisto.

Savutus määritetään käyttäen apuna joko absorboitunutta tai heijastunutta valoa. Valon absorptioon perustuvassa savutuksen määrittämisessä savua sisältävän kammion läpi lähetetään valoa (kuva 7). Lähetettävän valon ja vastaanotetun valon voimakkuuksien erotuksena saadaan savuun absorboitunut valomäärä, ja siten savun määrä, sel-

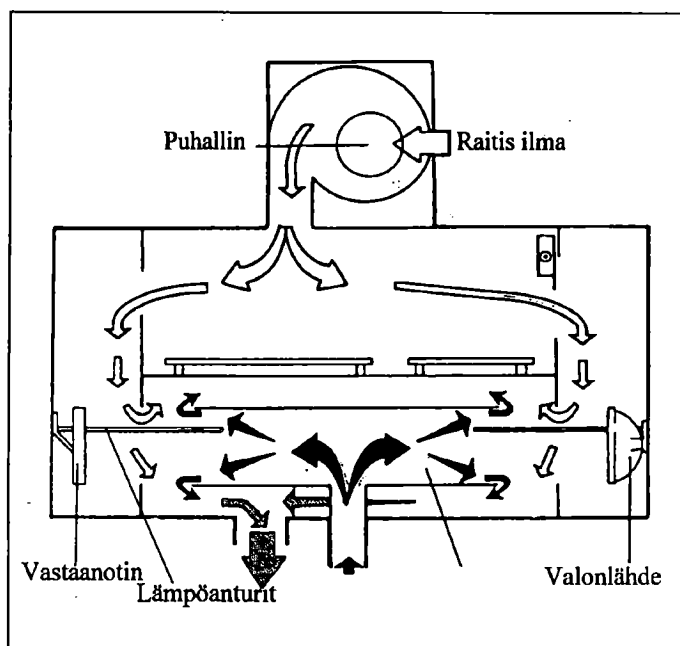
ville. Mittaus on jatkuva, sillä savua johdetaan näytekammion läpi koko mittauksen ajan. Valon heijastumiseen perustuvassa mittauksessa, mm. BOSCH-menetelmässä, pakokaasunäyte johdetaan suodattimen läpi, joka kiintoaineen vaikutuksesta tummuu. Suodatinpaperin tummumista mitataan joko silmämääräisesti tai valon heijastumisen avulla (kuva 8). Tällöin ei sinisen eikä valkoisen savun määrää saada selville.

Savutus ei kuitenkaan ilmaise kaikkia moottorin hiukaspäästöjä, joten yhä useammat päästönormit vaativatkin mittauksen tapahtuvan hiukkasten määrän (massan) perusteella. Massaan perustuvat hiukaspäästöt määritetään aina puhtaalla ilmalla laimennetusta pakokaasusta. Laimennetusta pakokaasusta otetaan suodattimille näyte. Näyte johdetaan teflonpäällysteisen lasikuitusuodattimen läpi. Hiukaspäästöiksi määritellään kaikki suodattimeen jäänyt aines lukuunottamatta vettä.

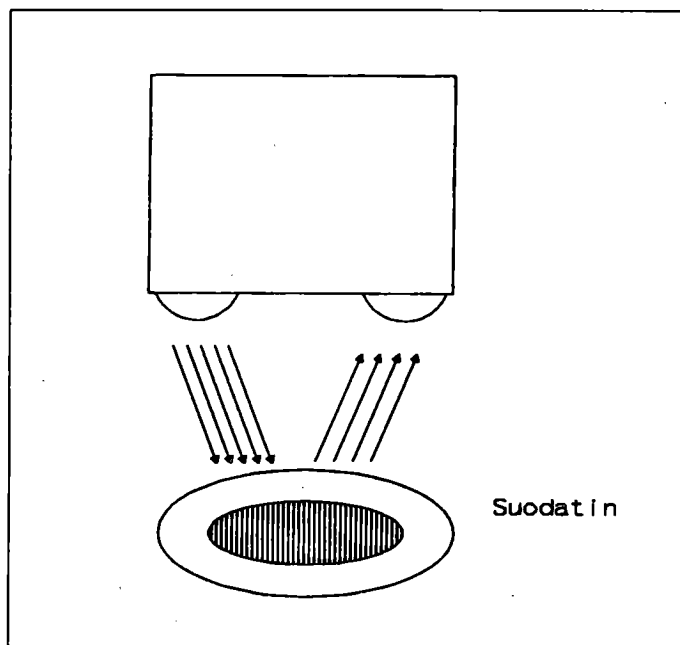
Suodattimien läpäisykyky määritellään mittausstandardeissa. Suodattimiin kertyneiden hiukkasten määrä mitataan punnitsemalla. Koska määritettävät massat ovat erittäin pieniä, yksiköiltään mikrogrammoja, ovat punnituksen tarkkuusvaatimukset suuria. Jopa suodattimien pienet kosteusvaihtelut vaikuttavat tuloksiin.

2.6 Happi (O₂)

Happi on mitattavista pakokaasukomponenteista ainoa, joka ei ole ympäristölle haitallinen. Happea mitataan yleensä vain muiden mittaustulosten tarkkailemiseksi. Happea ei voi pakokaasuissa olla enempää kuin ympäröivässä ilmassa sekä polttoai-



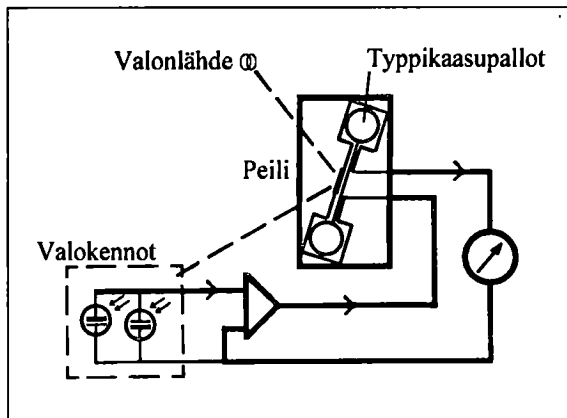
Kuva 7. Opasimetrimin rakenneperiaate.



Kuva 8. BOSCH-menetelmä hiukkasten määrän mittaamiseksi.

neessa yhteensä eli noin 21 %. Hapetta voidaan mitata mm. paramagneettisella analysaattorilla (PMD), zirkoniumdioksidianalysaattorilla (ZRDO), elektrokemiallisilla antureilla (ECS) ja kaasukromatografilla.

Paramagneettiset laitteet havaitsevat hapen sen paramagneettisten ominaisuuksien avulla. Mittakennon magneettikentässä on keskeltä nivelöity vipuvarsi, jonka päissä on tyypikaasua sisältävät pallot (kuva 9).



Kuva 9. PMD-happianalysaattori

Kun mittakennoon tulee hapetta, pyrkii varsi kiertymään. Varren keskiosassa on peili, jonka kautta valonsäde kulkee valokennoille. Tämän valonsäteen avulla havainnoidaan varren kiertyminen sekä ohjataan sähkövirtaa, joka pyrkii pitämään varren paikoillaan. Sähkövirta taas on verrannollinen mittakennon olevan hapen määrään.

2.7 Näytteenotto ja -käsittely

Pakokaasunäytteen otossa on kaksi eri periaatetta. Näyte voidaan ottaa joko suoraan pakoputkesta, jossa kulkee ns. raaka pakokaasu, tai pakokaasu laimennetaan ilmalla ja näyte otetaan laimennetusta seoksesta.

Näytteenotto laimennetusta pakokaasusta on yleistymässä, sillä esimerkiksi hiukkaspäästöjä mitataan ainoastaan laimentamalla pakokaasu. Raaka pakokaasusta tehtävän näytteenoton pahin ongelma lienee hitaus. Näytteen kulku näytteenottosondista analysaattoreille sekä analysaattoreiden toiminta kestää yhteensä jopa muutamia kymmeniä sekunteja, jolloin nopeiden kuormitusvaihteluiden aiheuttamat muutokset pakokaasujen koostumuksessa eivät tule esiin. Myöskään päästöjen kokonaismäärää testiä kohden ei saada selville. Niinpä kaikki nykyiset henkilöautoja koskevat määräykset edellyttävät pakokaasujen laimentamisen näytteenottoa varten, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

Raaka pakokaasusta tehtävä päästömittaus säilynee vaihtoehtoisena käytäntönä ainakin joidenkin moottoreiden mittauksessa. Tällaisia kohteita voivat olla maastokäyttöön tarkoitettavat ajoneuvot, kuten maa- ja metsätaloustraktorit, pienmoottorit sekä lämmityskattilat. Näiden mittaukseen ei tällä hetkellä sisälly nopeita kuormituksen vaihteluja. Tässä tiedotteessa kuvataan ainoastaan raaka pakokaasusta otetun näytteen käsittely näytteenottopään ja analysaattoreiden välillä.

Jotta mittauks tulokset olisivat luotettavia, mitattavasta kaasusta pitää saada edustava näyte ja se pitää käsitellä sopivalla tavalla ennen analysaattoreita. Näytteenottopään eli sondin rakenne on periaatteeltaan mittauskohteesta riippumaton. Sonni on toisesta päästään suljettu putki, jonka kyljissä on reikiä, joista pakokaasunäyte imetään. Se

valmistetaan näytekaasun kanssa reagoimattomasta aineesta, esimerkiksi haponkestävästä teräksestä. Sondin sisähalkaisija on varsinaista näytteesiirtoputkea pienempi, jotta virtaus näytteenottokohteesta sondiin sekä sondista siirtoputkeen olisi mahdollisimman tasaista.

Sondin jälkeen näytteesiirtolinjassa on esisuodatin, joka pääasiassa suojaa näytteesiirtoputken sisäpintaa palamattomalta poltto- tai voiteluaineelta. Mikäli näytteesiirtolinjaan jää poltto- tai voiteluainetta, analysaattorit voivat myöhemmissä mittauksissa reagoida sellaiseenkin kaasuun, jossa ei ole mitattavaa komponenttia. Ennen analysaattoreita ovat vielä hienosuodattimet, jotka poistavat näytteestä loputkin analysaattoreille haitallisista poltto- ja voiteluaineista.

Pakokaasu sisältää myös vettä, joka aiheuttaa ongelmia analysaattoreissa. Analysaattoreiden suojaamiseksi näyte on joko kuivattava tai pidettävä niin kuumana, ettei vesi tiivisty. Kokonaishiilivetyjen mittausta varten näyte pidetään kuumana, koska muutoin varsinkin dieselmootoreiden pakokaasujen raskaat, pitkät hiilivety-yhdisteet kondensoituvat siirtoputken seinämille. Näyte pidetään kuumana lämmittämällä näytteesiirtolinja sondilta hiilivetyanalysaattorille noin 190 °C:n lämpötilaan.

Typen oksidit voidaan määrittää joko kuumasta tai kuivatusta, kylmästä näytteestä. Pakokaasunäyte kuivataan jäädyttämällä sen lämpötila alle veden kastepisteen, jolloin siinä oleva vesi kondensoituu.

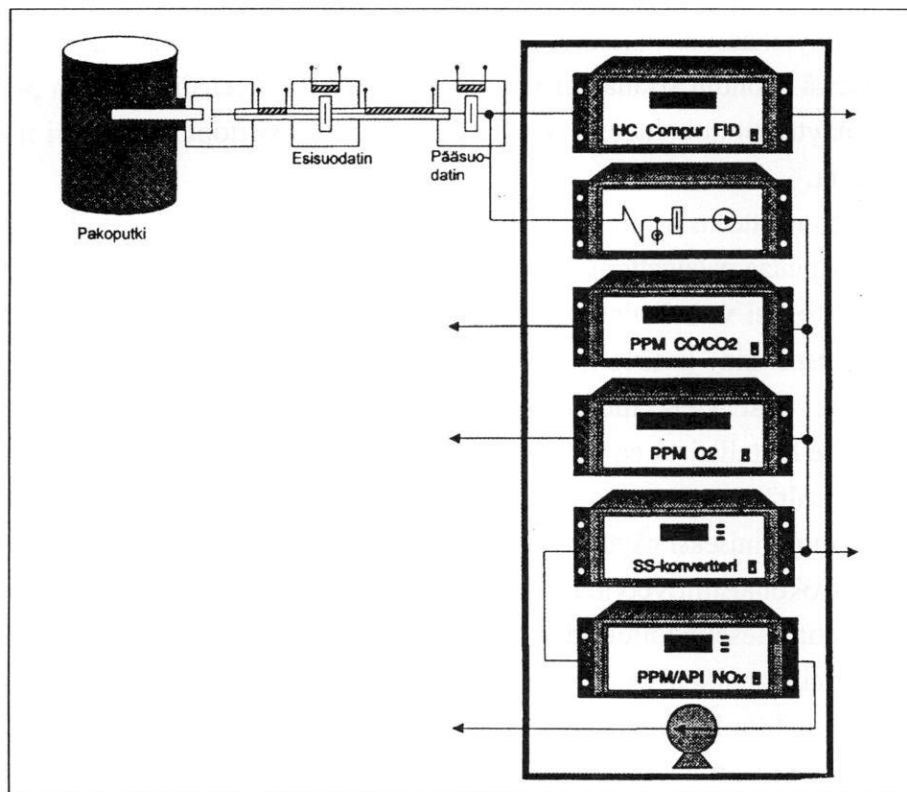
Häkä, hiilidioksidi ja happi mitataan kylmästä näytekaasusta. Kylmästä näytekaasusta mittaavat analysaattorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia, minkä vuoksi ne ovat myös edullisempia.

Joka analysaattoreissa on oma näytteenottopumppu. Näytteesiirtolinjassa on päävirtaus, josta analysaattorit ottavat tarvitsemansa osan lopun poistuessa siirtolinjan ohivirtausventtiilistä. Näin nopeutetaan mittausta eli pienennetään koko mittauslaitteiston reagointiaikaa. Reagointiaikaan vaikuttavat myös näytelinjan pituus sekä suodattimien tilavuudet.

Näytteenotto ja -käsittely sisältävät ainakin seuraavat osat:

1. Näytteenotto (sondi)
2. Näytteen pito lämpimänä
3. Esisuodatus
4. Näytteesiirto (pumppu)
5. Hienosuodatus
6. Kylmänä mitattavan näytteen kuivaus.

Kuvassa 10 on kaavamaisesti koko pakokaasuanalysointilaitteisto.



Kuva 10. Pakokaasujen analysointilaitteisto.

3. PÄÄSTÖJEN MUODOSTUMINEN JA MÄÄRÄT

3.1 Dieselmoottori

Periaatteiltaan päästöjen syntymekanismit ovat aina samantyyppisiä. Päästölähteen ominaispiirteet kuitenkin ratkaisevat muodostuvien päästöjen koostumuksen ja varsinkin muodostusmäärät. Päästömääriä tarkasteltaessa pitää muistaa, että moottorista tuleva päästö määrä on pakokaasumäärän ja pakokaasun sisältämän päästön pitoisuuden tulo eli pelkkä pitoisuus ei kerro kaikkea.

Dieselmoottori toimii huomattavalla ilmaylimäärällä teoreettisesti optimiin ilma-polttoaine-suhteeseen verrattuna. Toinen dieselmoottorin ominaispiirre on muita polttomoottoreita parempi hyötysuhde. Koska palotapahtumassa on paljon happea, epätäydellisesti palaneita komponentteja (hiilivedyt, häkä) syntyy suhteellisen vähän. Hyvä hyötysuhde taas pienentää välillisesti muodostuvan hiilidioksidin määrää. Mitä parempi on hyötysuhde, sitä pienempi on polttoaineen kulutus ja sitä vähemmän vapautuu hiilidioksidia.

Dieselmoottoreiden ongelmia ovat typpioksidi- ja hiukkaspäästöt. Typen oksideja syntyy, koska moottori toimii ilmaylimäärällä. Hapen läsnäolo ei vaikuta hiukkaspäästöihin, vaan niihin vaikuttavat polttoaineen koostumus ja ominaisuudet sekä polttoaineen ruiskutukseen liittyvät tekijät. Kylmäkäynnistys ja kylmä yleensä eivät lisää dieselmoottorin kokonaispäästöjä läheskään yhtä paljon kuin bensiinimoottorin päästöjä. Taulukossa 1 dieselmoottorin pakokaasujen koostumus muutamien komponenttien osalta.

Taulukko 1. Dieselmoottorin pakokaasukomponenttien pitoisuuksia.

Komponentti	Joutokäynti [ppm]	Suurin teho [ppm]
CO	100 - 450	350 - 2 000
CO ₂	0 - 35 000	0 - 120 000
NO _x	50 - 250	600 - 1 500
HC	50 - 600	200 - 600
O ₂	0 - 160 000	0 - 100 000

3.2 Bensiinimoottori

Bensiinimoottorin ilma-polttoaine-suhde pyritään pitämään lähellä teoreettisesti oikeaa seossuhdetta, josta käytetään merkintää $\lambda = 1$. Kylmäkäynnistyksessä sekä kuormitettavissa moottoria raskaasti käytetään bensiinimoottoreissa yleensä ilma-alimäärää ($\lambda < 1$, rikas seos). Tällöin happea on palotapahtumassa suhteellisen vähän. Osakuormilla voidaan käyttää ilmaylimäärää ($\lambda > 1$, laiha seos), jolloin happea on palotapahtumassa runsaammin. Nykyisin polttoainetalouden vaikuttaessa autojen (moottoreiden) hankintaan yhä enemmän, mielenkiinto ilmaylimäärällä toimivia bensiinimoottoreita kohtaan on lisääntynyt. Tällainen moottori toimii päästöjen kannalta tarkasteltuna yhä enemmän dieselmoottorin tavoin. Lyijyn jäätyä bensiinistä kokonaan pois ovat bensiinimoottorin hiukkaspäästöt erittäin pienet. Taulukossa 2 on bensiinimoottorin pakokaasukomponenttien pitoisuuksia.

Taulukko 2. Bensiinimoottorin pakokaasukomponenttipitoisuuksia.

Komponentti	Joutokäynti [ppm]	Täysi teho [ppm]
CO	20 000 - 45 000	20 000 - 50 000
CO ₂	100 000 - 130 000	110 000 - 130 000
NO _x	50 - 300	1 500 - 4 500
HC	100 - 500	100 - 300
O ₂	10 000 - 15 000	3 000 - 5 000

Kaksitahtisissa bensiinimoottoreissa polttoaineessa oleva voiteluöljy lisää hiilivetyjen, hiilimonoksidin ja hiukkasten määrää pakokaasuissa. Moottorisahoista on mitattu jopa yli 30 000 ppm:n hiilivety- ja yli 80 000 ppm:n häkäpitoisuuksia puunkaatoa jäljittelevässä mittauksessa. Moottorisahojen hiilivety-päästöt saattavat joskus (kylmäkäynnistys, liian suuri voiteluaineen määrä polttoaineessa ja väärin säädetty kaasutin) nousta yli 100 000 ppm:n. Nykyisissä kaksitahtimoottoreissa käyttäjä voi

säätää moottorin seossuhdetta kaasuttimesta. Seossuhde saattaa kuitenkin jäädä säätämättä parhaaseen arvoonsa tai se säädetään väärin moottorin silti toimiessa. Tällöin päästöt voivat kasvaa hyvinkin suuriksi.

3.3 Lämmityskattila

Poltettaessa lämmityskattilassa öljyä päästöt hallitaan melko hyvin, koska palaminen on tasaista syttymistä ja sammumista lukuunottamatta. Niiden osuus palotapahtumasta on kuitenkin pieni. Puun polton päästöjen hallinta on vaikeampaa. Puu palaa puhtaasti silloin, kun palaminen on tasaista ja tehokasta. Sytyttämisvaiheessa, pesää kohennettaessa sekä kituvassa palamisessa päästöjen määrä lisääntyy huomattavasti.

Puun palamisessa voidaan erottaa kolme päävaihetta:

1. Kosteuden poistuminen. Kosteus haihtuu ensin puun pinnasta, minkä jälkeen puun sisällä oleva kosteus diffundoituu höyrynä läpi ulomman materiaalin.
2. Pyrolyysi. Puun pyrolyysi alkaa lämpötilan noustessa yli 100 °C:n ja se on aluksi lämpöä sitova. Kun lämpötila nousee yli 280 °C:n, pyrolyysi muuttuu lämpöä luovuttavaksi. Pyrolyysissä syntyy kaasuja, joiden syttymislämpötila on ilman kanssa sekoituttuaan n. 600 °C. Pyrolyysikaasut palavat liekissä hyvin mikäli happea on läsnä tarpeeksi. Jos happea on läsnä liian vähän tai kaasut pysyvät liian vähän aikaa liekin vaikutuspiirissä, osa kaasuista poistuu epätäydellisesti palaneina tai kokonaan palamattomina. Tällöin syntyy haitallisia päästöjä.
3. Pinnan hiiltymispalaminen. Kun puu on kokonaan pyrolysoitunut, jäljelle jää hiiltynyt puuaines. Hiili palaa pinnaltaan, kun lämpötila on riittävä ja happea on tarpeeksi läsnä. Hiilen palaminen on kokonaan liekitön vaihe. Samalla kuitenkin syntyy hieman hiilivetyjä ja häkää. Suuren puukappaleen palaessa sen ulkopintaan syntyy paksu hiilikerros ja palaminen hidastuu, koska hiilen lämmönsiirtokyky on puuta pienempi.

Taulukko 3. Lämmityskattiloiden savukaasujen komponenttien pitoisuuksia.

Komponentti	Alapalo	Yläpalo
CO [%]	0 - 2	0 - 2
CO ₂ [%]	2 - 16	6 - 15
NO _x [ppm]	25 - 150	25 - 150
HC [ppm]	0 - 10 000	0 - 7 000
O ₂ [%]	6 - 16	5 - 15

4. PÄÄSTÖMITTAUSSTANDARDIT JA -MÄÄRÄYKSET

4.1. Standardit ja määräykset

Standardeissa kuvataan yksityiskohtaisesti, miten pakokaasupäästöt pitää määrittää. Mittauslaitteiston ja mittauksen pitää täyttää tietyt vaatimukset, jotta tulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia. Standardeissa on esimerkiksi ohjeet mitattavan moottorin kunnosta, kuormittamisesta ja käytettävistä polttoaineista sekä voiteluöljyistä. Mittausympäristö, kuten ilmanpaine ja lämpötila, on myös määrätty.

Standardeissa määritetään myös se, mikä painoarvo kokonaispäästömäärän määrittämisessä on moottorin eri kuormituksilla ja millä moottorin kierrosluvuilla päästönäyte otetaan. Standardeissa ja säännöksissä on tarvittavat laskukaavat päästöjen muuttamiseksi halutuiksi yksiköiksi, esimerkiksi ppm:t g/kWh:ksi. Standardeissa ei ole määräyksiä siitä, miten suuria päästöt voivat ja saavat olla.

Maailmassa on nykyisin monia eri standardeja, mikä aiheuttaa omat hankaluutensa. On tapauksia, joissa tarkoituksenmukainen kokonaisuus saataisiin ainoastaan yhdistämällä osia eri standardeista. Tällaiset tapaukset ovat tietenkin ristiriidassa standardien alkuperäisen yhdenmukaistamiseen tähtäävän tarkoituksen kanssa.

Päästömääräykset pohjautuvat eri maiden lainsäädäntöön, ja niissä on enimmäismäärät pakokaasupäästöille. Päästörajat voivat olla maan omia tai ne voivat perustua muiden maiden tai yhteisöjen antamiin rajoihin tai suosituksiin. Nykyiset päästörajat koskevat pääasiassa tieliikennettä, mutta tulevaisuudessa varmasti rajoitetaan yhä enemmän myös muiden päästölähteiden päästöjä.

Päästörajoituksia varten moottorin päästöt mitataan jonkin mittausstandardin mukaan, mutta määräyksissä voi olla myös omia vaatimuksia mittauksen toteuttamisesta. Mittausstandardivaatimuksen lisäksi säännöksissä voi olla vaatimuksia moottorivalmistuksen laadun tasaisuudesta sekä moottoriperheiden sertifioinnista.

Seuraavissa kappaleissa käsitellään pääasiassa pakokaasupäästöstandardeja ja rajoituksia, jotka koskevat työ- ja pienkoneiden päästöjä tai joita voidaan soveltaa niihin. Yleisiä tieliikenteen päästömääräyksiä ei esitellä.

4.2. Standardit

4.2.1 ISO (International Organization for Standardization)

ISO-standardit, samoin kuin muutkin standardit, antavat tarkat ohjeet vain mittauslaitteistolle ja -tapahtumalle. Niissä ei ole edes suositusarvoja päästörajoiksi. Taulukossa 4 on esitetty ISO:n pakokaasupäästöstandardeja.

ISO 8178 on uusimpia päästöstandardeja, sillä se on vasta viimeisessä äänestysvaiheessa. Se käsittelee muiden kuin tieliikenteeseen tarkoitettujen moottoreiden päästöjä. Tällaisia ovat mm. maa- ja metsätaloustraktorit, veturit, laivat ja puutarhatyökoneet. Standardissa esitellään mittausmenetelmät diesel- ja bensiinimoottoreiden kaasumaisille ja hiukkasmaisille päästöille sekä näkyvän savutuksen mittaamiseksi. Moottorit voivat

olla kiinni joko testipenkissä tai sovellutuskohteessa, vaikka moottori suositellaan asennettavaksi testipenkkiin.

Standardin mukaan savutus voidaan mitata joko valon absorptioon perustuvalla tai suodatukseen perustuvalla menetelmällä. Standardi esittelee kymmenen erilaisen laimennustunnelin periaatteen.

Taulukko 4. ISO:n pakokaasupäästöstandardeja.

Standardin numero	Standardin nimi
ISO 789-4	Agricultural tractors - Test procedures. Part 4: Measurement of exhaust smoke
ISO 3173	Road vehicles - Apparatus for measurement of the opacity of exhaust gas from diesel engines operating under steady-state conditions
ISO 8178-1	Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 1: Test bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions
ISO 8178-2	Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 2: Measurement of gaseous and particulate emissions at site
ISO 8178-3	Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 3: Definitions and measurement of exhaust gas smoke under steady-state conditions
ISO 8178-4	Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 4: Test cycles for different engine applications.
ISO 8178-5	Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 5: Specifications of test fuels
ISO 8178-6	Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 6: Report on measurement results and test report
ISO 8178-7	Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 7: Family concept
ISO 10054	Internal combustion engines - Apparatus for measurement of smoke from diesel engines operating under steady-state conditions - Filter-type smokemeter

Pakokaasunäyte voidaan ottaa joko raa'asta tai laimennetusta pakokaasusta. Standardin ISO 8178 perusteella käytettävät kaasuanalysaattorit ovat samantyyppisiä kuin muissa standardeissa ja säännöksissä. Standardi määrittelee analysaattorit myös mm. rikkidioksidille (SO₂), ammoniakille (NH₃), dityppioksidille (N₂O) ja formaldehydille (HCHO). Tavallisimmille komponenteille vaaditut analysaattorityypit ovat: (Lyhenteet on selvitetty luvussa 2).

Määritettävä komponentti	Analysaattori
CO & CO ₂	NDIR
HC	H FID
NO _x	CLA tai H CLA
O ₂	PMD, ZRDO tai ECS

Moottoreiden kuormituspisteet ovat ISO-standardissa tyhjäkäynnin, välipyörimisnopeuden ja nimellisyörimisnopeuden kohdalla. Välipyörimisnopeus on moottorin suurimman vääntömomentin pyörimisnopeus. Esimerkkinä on taulukossa 5 esitetty standardissa käytetyt traktoreiden ja moottorisahojen kuormituspisteet.

Taulukko 5. Standardin ISO 8178 mukaiset traktoreiden ja moottorisahojen kuormituspisteet.

	Nimellisyörintänopeus				Välipyörintänopeus			Tyhjäkäynti
Traktori C1								
Kuormituspiste	1	2	3	4	5	6	7	8
Kuormitus [%]	100	75	50	10	100	75	50	0
Painokerroin	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15
Moottorisaha G3								
Kuormituspiste	1							2
Kuormitus [%]	100							0
Painokerroin	0,9							0,1

4.2.2 SAE (Society of Automotive Engineers)

SAE on yhdysvaltalainen autoalan yhteisö, joka mm. tekee alaan liittyviä standardeja. SAE on julkaissut myös pakokaasupäästöstandardeja. Dieselmoottoreiden päästöjä koskevat useat eri standardit. Pienmoottoreiden päästöjen mittauksessa standardi SAE J1088 on ollut edelläkävijä. Se lienee ensimmäinen varsinaisten pienmoottoreiden pakokaasupäästöjen mittaukseen hyväksytty standardi. Hyväksymisvuosi oli 1974.

SAE:n standardi on mittalaitteistovaatimukseltaan samantyyppinen kuin muutkin päästöstandardit ja -säännökset. Eri komponenttien analysaattorit ovat seuraavassa asetelmassa.

Komponentti	Analysaattori
HC	H FID
CO & CO ₂	NDIR
NO _x	CLA, H CLA tai NDIR
O ₂	PMD

Näyte otetaan raa'asta pakokaasusta. Pakokaasu johdetaan ensin sekoituskammioon, jonka jälkeen näyte otetaan. Sekoituskammion tarkoituksena on saada pakokaasu sekoittumaan tasalaatuisiksi, jotta näyte olisi mahdollisimman edustava. Kammion kooksi suositellaan vähintään kymmenen kertaa moottorin iskutilavuus. Moottorisahojen ja ruohonleikkureiden kuormituspistesuosituksukset ovat taulukossa 6.

Taulukko 6. Moottorisahojen ja ruohonleikkureiden standardin SAE J1088 mukaiset kuormituspisteet.

	Tyhjä- käynti	Nimellis- nopeus	Rajoitettu pyörintänopeus tai 85 % nimellisopeudesta					Max. väännön nopeus tai 65 % nimellisopeudesta
			2	3	4	5	6	
Ruohonleikkuri Kuormituspiste Kuormitus [%]	1 0		2 100	3 85	4 75	5 50	6 25	
Moottorisaha Kuormituspiste Kuormitus [%]	1 0	2 100						3 100

4.2.3 SFS (Suomen Standardisoimisliitto)

SFS ei ole tehnyt suoranaisesti ajoneuvojen tai moottoreiden päästöjä koskevia standardeja. SFS:n standardit koskevat lähinnä yleistä ilmansuojelua ja ne soveltuvat paremminkin polttolaitosten päästöjen määrittämiseen. Ilmansuojelua koskevia SFS-standardeja on taulukossa 7.

Standardi SFS 4800 on ohje kiinteällä polttoaineella lämpiävien pienkattiloiden testauksesta (SFS 4800), jossa mitataan myös kattilan savukaasujen CO₂- tai O₂- ja CO(+H₂)-pitoisuudet. Analysaattoreita ei kuitenkaan ole tarkemmin määritelty.

Taulukko 7. Ilmansuojelua koskevia SFS-standardeja.

SFS 3866	Ilmansuojelu. Päästöt. Kiintoaineen määrittäminen manuaalisella menetelmällä.
SFS 3869	Ilmansuojelu. Kaasumaisten päästöjen määrittäminen.
SFS 5293	Ilmansuojelu. Päästöt. Rikkivedyn massakonsentraation määrittäminen jodometrisellä titrausmenetelmällä.
SFS 5412	Ilmansuojelu. Päästöt. Palamiskelpoiset savukaasut. Hiilimonoksidin määrittäminen ei-dispersiivisellä infrapuna-absorptiomenetelmällä. (Sisältää asiaa myös liekki-ionisaatiomenetelmästä, sähkökemiallisesta määrittämisestä ja katalyyttisestä poltosta.)
SFS 5425	Ilmansuojelu. Ilman laatu. Typen oksidien määrittäminen kemiluminesenssi-menetelmällä.
SFS 5624	Ilmansuojelu. Päästöt. Savukaasun tilan määrittäminen.
SFS 5625	Ilmansuojelu. Päästöt. Mittausyhteiden asentaminen kanavaan.

4.3 Määräykset

4.3.1 Pohjoismaat

Suomessa vaaditaan, että traktorin dieselmoottorin pitää täyttää EY:n neuvoston vuonna 1977 antama direktiivi. Tämä pyörillä varustettujen maatalous- ja metsätraktoreiden dieselmoottoreiden päästöjen vähentämistä koskeva direktiivi (77/537/ETY) määrittelee moottorin suurimmat sallitut näkyvät päästöt eli savutuksen.

Muille työkoneille ja lämmityskattiloille Suomessa ei ole määrätty päästörajaja. Ruotsissa on pienkattiloille määritelty taajamissa tervapäästöille rajaksi 30 mg/MJ tai

A-sykli on laitteille, joita ei kannateta käsin ja jotka toimivat pääasiassa muulla kuin nimellispyörimisnopeudella.

B-sykli on laitteille, joita ei kannateta käsin ja joita käytetään nimellispyörimisnopeudella.

C-sykli on kannettaville laitteille.

Päästörajojen yksikkönä CARB:n säännöksessä on grammaa hevosvoimatuntia kohden (g/hvh) ja rajat sekä niiden voimaantuloajat ovat taulukossa 9.

Taulukko 9. CARB:n määräysten päästörajat ja niiden voimaantuloaikataulu.

Vuosi	Moottori-luokka	Hiilivedyt+ typen oksidit	Hiilivedyt	Hiilimonoksidi	Typen oksidit	Hiukkaset
1995 -	1	12.0	-	300	-	0.9 (1)
1998	2	10.0	-	300	-	0.9 (1)
	3	-	220	600	4.0	-
	4	-	180	600	4.0	-
	5	-	120	300	4.0	-
1999 -	1, 2	3.2	-	100	-	0.25 (2)
	3, 4, 5	-	50	130	4.0	

Moottoriluokka 1. Moottorit, joiden iskutilavuus on alle 225 cm³.

Luokka 2. Moottorit, joiden iskutilavuus on yhtäsuuri tai suurempi kuin 225 cm³.

Luokka 3. Kannettavat moottorisovellutukset, joiden iskutilavuus on alle 20 cm³.

Luokka 4. Moottorit, joiden iskutilavuus on 20 - 50 cm³.

Luokka 5. Iskutilavuudeltaan yli 50 cm³ moottorit.

(1) Kaikille dieselmootoreille.

(2) Kaikille diesel- sekä kaksitahtisille bensiinimoottoreille.

4.3.3 ECE (Economic Commission for Europe)

4.3.3.1 ECE:n sopimukset

YK:n Euroopan talouskomissio tekee sopimuksia, joilla yhdenmukaistaan eri maiden ajoneuvomääräyksiä. Yhdessä sopimusmaassa tehty tuotteen hyväksyntä merkitään E-merkkillä ja tällöin hyväksyntä pätee myös muissa sopimusmaissa.

ECE on määritellyt kaksi pakokaasupäästöjä koskevaa säännöstä, jotka koskevat tieliikenteeseen tarkoitettuja dieselmootoreita. ECE R 24 käsittelee näkyviä päästöjä (savutusta) ja ECE R 49 kaasumaisia päästöjä. ECE valmistelee tällä hetkellä (1994) myös maatalous- ja metsätraktoreille tarkoitettua päästösäännöstä.

4.3.3.2. Savutuksen mittaus (ECE R 24)

ECE R 24 -säännös koskee tieliikenneajoneuvoja, mutta sitä käytetään myös traktori-dieseileille. Säännöksestä on ainakin kolme versiota, joista tässä esitellään versio kaksi.

R 24 sisältää kolme eri pääaluetta:

- Osa I** Tieliikenneajoneuvoihin tarkoitettujen dieselmootoreiden näkyvät pakokaasupäästöt.

- Osa II** Osan I mukaisesti tyyppihyväksytyjen moottoreiden asentaminen tieliikenneajoneuvoihin.

- Osa III** Sellaisen ajoneuvon, jonka moottori ei ole erikseen tyyppihyväksyty osan I mukaan, näkyvät päästöt.

Säännöksen mukainen savutuksen mittaus perustuu valon absorboitumiseen pakokaasuun. Mittaus on kaksiosainen. Ensimmäisessä mittauksessa moottori käy vakio-kuormalla ja -pyörimisnopeudella ja toisessa mittauksessa moottorin pyörimisnopeutta kiihdytetään.

Vakiokuormakokeessa moottoria käytetään täydellä kuormalla. Mittapisteitä valitaan säännöksen mukaan riittävästi pienimmän ja suurimman pyörimisnopeuden väliseltä alueelta. Säännös määrittelee neljä pistettä. Pyörimisnopeusalueen päätepisteiden (tyhjäkäynti ja suurin pyörimisnopeus) lisäksi savutus mitataan ainakin moottorin suurimman vääntömomentin ja tehon pyörimisnopeuksien kohdalta.

Kiihdytyskokeessa kuormittamattoman moottorin pyörimisnopeutta lisätään ja vähennetään. Moottorin käydessä tyhjäkäynnillä kaasu painetaan nopeasti, ei kuitenkaan väkivaltaisesti, pohjaan. Pyörimisnopeuden saavutettua suurimman arvonsa kaasu vapautetaan ja moottorin annetaan palautua tyhjäkäynnille sekä odotetaan kunnes opasimetrin näyttö tasaantuu. Tämä toistetaan vähintään kuusi kertaa kunnes savutusarvot tasaantuvat. Savutusraja määritellään säännöksessä moottorin nimellisen ilmapirtauksen mukaan. Nimelliseen virtaukseen vaikuttavat ainoastaan moottorin iskutilavuus ja pyörimisnopeus.

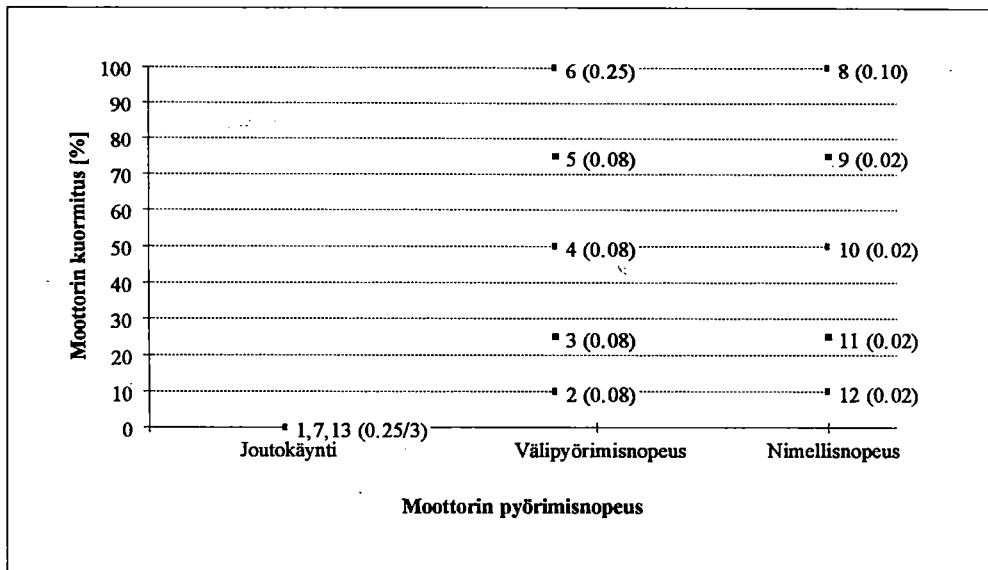
4.3.3.3 Kaasumaisten päästöjen mittaus (ECE R 49)

Myös ECE R 49 on tarkoitettu tieliikenteen raskaille dieselmootoreille. Tästä säännöksestä on olemassa ainakin kolme versiota, joista tässä esitellään vanhinta ja uusinta vuodelta 1994.

Säännöksen mittausjärjestely sopii kaikille dieseileille, mutta kuormitusykladit eivät kuvaa hyvin traktoreiden moottoreiden kuormittumista. Siten myöskään annetut päästörajat eivät liene sopivia traktoreille.

Mitattavia päästökomponeentteja ovat hiilimonoksidi, hiilivedyt ja typen oksidit. Uusimmassa R 49/02 -versiossa mitataan myös hiukkasten määrä. Tarvittaessa mitataan hiilidioksidin määrä laimennussuhteen laskemista varten. Tulokset ilmaistaan yksiköissä g/kWh.

Moottorin kuormituspisteet, kuva 11, ovat eri R 49:n versioissa samanlaisia.



Kuva 11. ECE R 49 -säännöksen mukaiset moottorin kuormituspisteet. Suluissa on eri kohtien painotuskertoimet. Välipyörimisnopeudella tarkoitetaan moottorin suurimman väännön pyörimisnopeutta.

Säännöksen mukaiset päästöraajat ovat taulukossa 10.

Taulukko 10. Määräyksen ECE R 49 mukaiset suurimmat päästöt.

Versio	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NOx [g/kWh]	PT [g/kWh]
R 49	14,0	3,5	18,0	-
R 49/02				
A 1.7.1992	4,5	1,1	8,0	0,36
R 49/02				
B 1.10.1995	4,0	1,1	7,0	0,15

4.3.4 EEC (European Economic Community)

Myös Euroopan unioni on tehnyt omat jäsenmaitaan koskevat pakokaasupäästödirektiivit. Päästödirektiivejä on henkilöautoille, raskaalle kalustolle sekä traktoridirektiivin yhtenä osana myös traktoreille. Traktoridirektiivin mukainen päästösäännös on hyvin samanlainen kuin ECE R24 -säännös eli se koskee moottorin savutusta.

Raskaalle dieselmoottoreille Euroopan unioni on antanut mm. säännöksen 88/77/EEC, joka vastaa vaatimuksiltaan ECE R49/01:tä, ja 91/542/EEC, joka vastaa ECE R49/02:ta. Mittalaitteet, moottorin kuormituspisteet ja hyväksymisrajat ovat käytännössä kummassakin säännöksessä samoja.

91/542/EEC-säännös on voimassa myös Suomessa tieliikenteeseen tarkoitetuille raskaalle dieselmoottoreille.

4.3.5 EUROMOT (Association of European Manufacturers of Internal Combustion Engines).

EUROMOT on yleiseurooppalainen moottoreiden valmistajien liitto. Se on tehnyt pakokaasupäästöistä rajoitusehdotuksen, joka koskee yli 3 kW:n moottoreita. Ehdotus koskee liikkuviin tai liikuteltaviin kohteisiin asennettuja moottoreita. Ehdotus lienee pohjana tulevalle EU:n direktiiville, joka koskee työkoneiden päästöjä. Direktiivin ulkopuolelle jäänevät tieliikenteen ajoneuvot, kaupallisten alusten moottorit, rautatiekohteiden moottorit sekä lentokonemoottorit.

EUROMOTin mittaus perustuu standardiin ISO 8178. Syinä tähän ovat mm. se, että ISO on maailmanlaajuisesti hyväksytty standardi ja että 8178 vastaa laitteistovaatimuksiltaan esim. ECE R49:ää ja 91/542/EEC:tä.

Päästökomponentteja, joita ehdotus koskee, ovat häkä, typen oksidit, hiilivedyt sekä hiukkaset. Päästörajaehdotukset riippuvat moottorin tehosta. Yksikköinä on grammaa kilowattituntia kohti, g/kWh. Kuvissa 12 ja 13 on esitetty EUROMOTin ehdotuksen mukaisia päästörajoja. Rajat on määritetty standardin ISO 8178-4 koesyklin C1 mukaisesti.

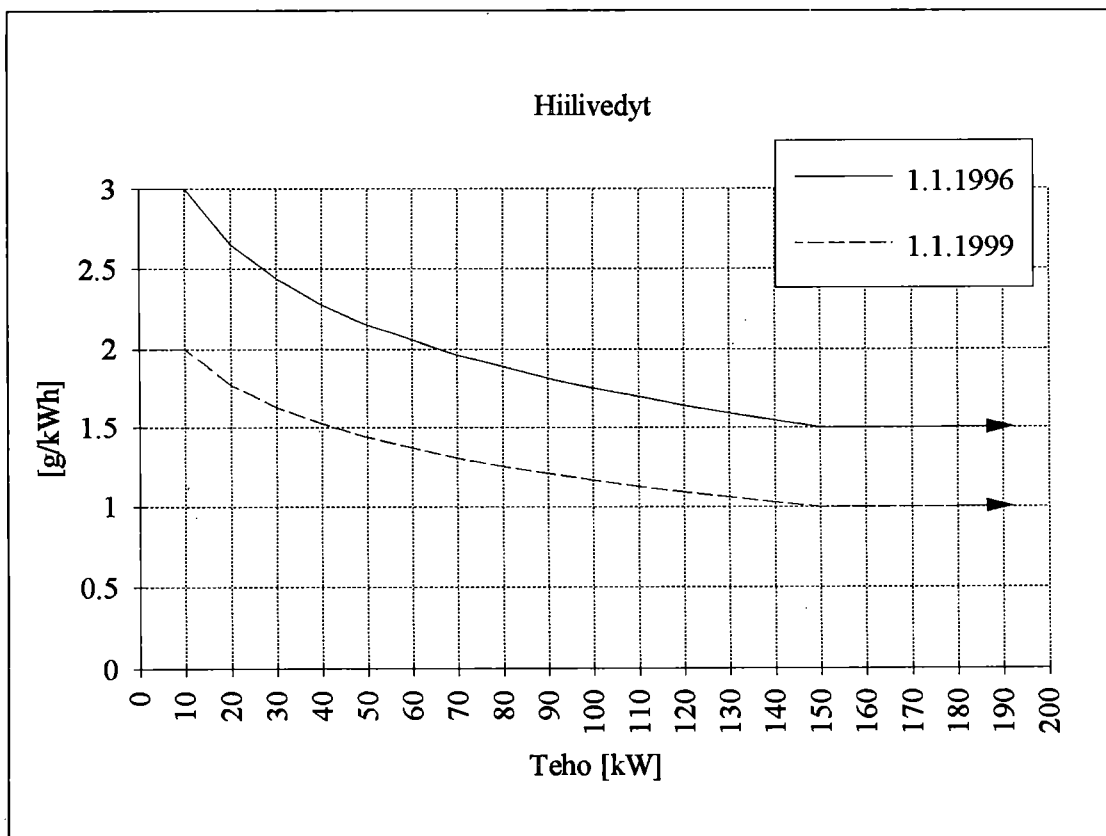
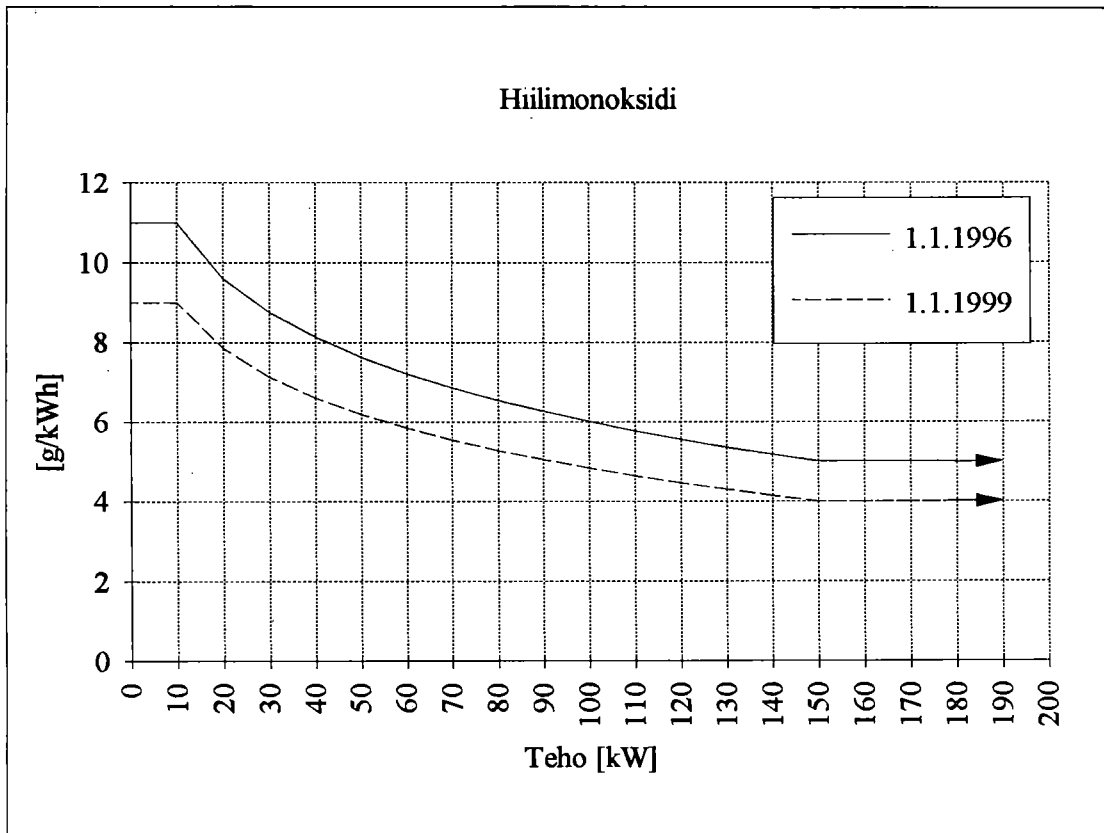
5. VAKOLAAN HANKITTU LAITTEISTO

Päästömittauslaitteistoa VAKOLAan hankittaessa vaatimuksena oli, että sillä voidaan mitata diesel- ja pienmoottoreiden sekä lämmityskattiloiden pakokaasupäästöjä. Lisäksi lähdettiin siitä, että laitteisto täyttää tärkeimpien standardien ja säännösten vaatimukset. Eri standardit ja säännökset antavat hieman liikkumavaraa laitteiston kokoonpanolle. Tärkeintä on, että tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia ja tulosten yhteydessä ilmoitetaan, minkälaisella laitteistolla tulokset on saatu.

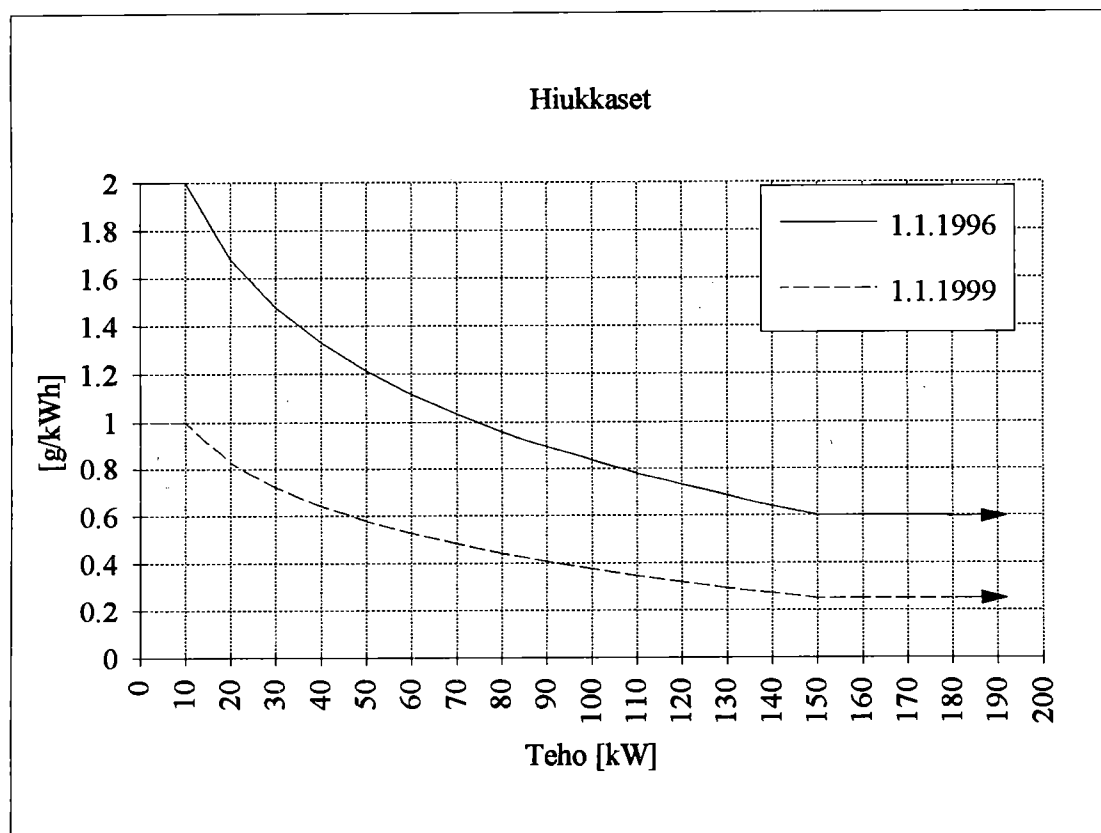
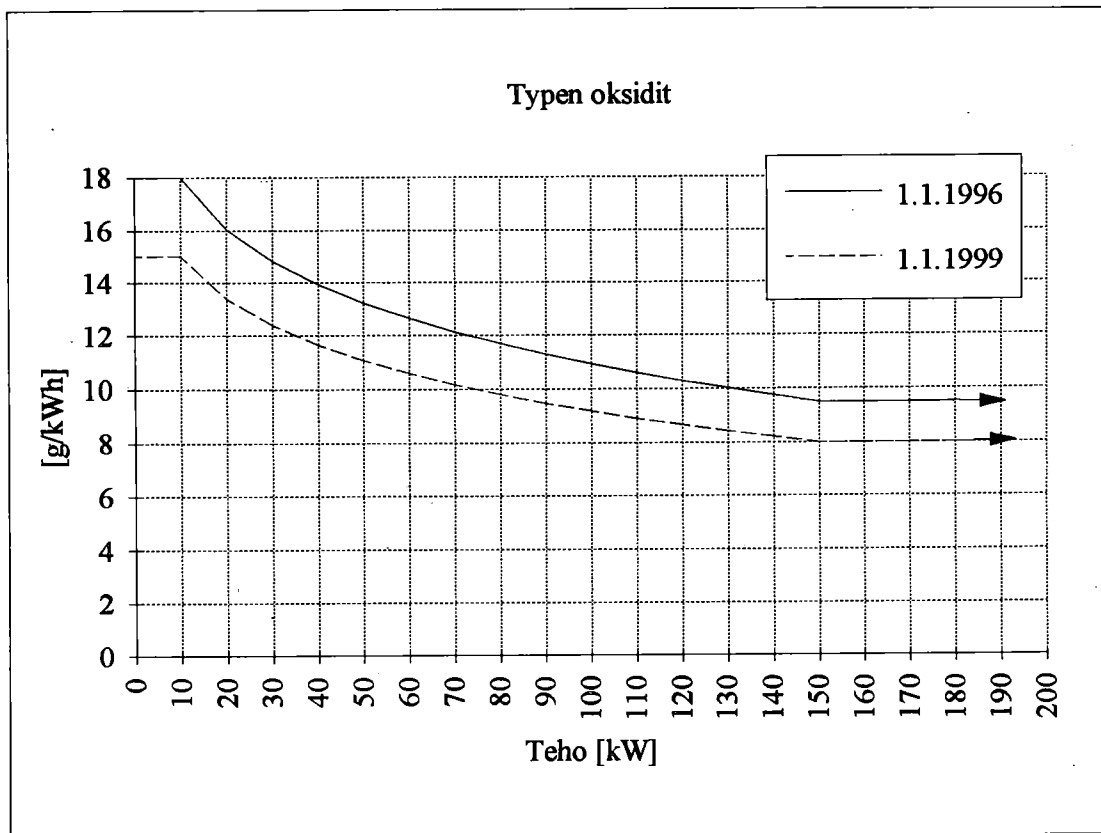
VAKOLAan valittiin suomalaisen PPM-Systemsin toimittama laitteisto. Yritys tekee yhteistyötä amerikkalaisen Advanced Pollution Instrumentation -nimisen yrityksen kanssa. Hiukkasmittauslaitteistoa ei hankittu tässä yhteydessä, koska käytettävissä olleet varat eivät olisi siihen riittäneet. Laitteiston periaatekuva on kuvassa 10.

Hankittu laitteisto sisältää hiilimonoksidin (CO), hiilidioksidin (CO₂), typen oksidien (NO_x), kokonaiishiilivetyjen (HC) ja hapen (O₂) mittauslaitteet. Laitteiston kokonaisvasteaika lienee noin 30 sekuntia. Jäähdytin rajoittaa näytteen virtausnopeudeksi 6 l/min näytteen kosteuden ollessa 50 %. Laitteistoon kuuluvat myös näytteenotto-sondit, jotka PPM-Systems on valmistanut itse. Analysaattoreiden merkit ja mallit ovat:

- H FID (hiilivedyt): Compur Monitor FID
- CLA (typen oksidit): API 200 Model A
- NDIR (hiilimonoksidi ja hiilidioksidi): PPM IPA
- PMA (happi): PPM Paramox
- Näytteenkäsittely (kuivain ja pumppu): United Analyzers 3050
- Esisuodatin: J.U.M 1128
- Pääsuodatin: Balston Filter 95-S-6
- Näytelinja: Technical Heaters, sisähalkaisija 6 mm.



Kuva 12. EUROMOTin ehdotus hiilimonoksidin ja hiilivedytjen päästörajoiksi.



Kuva 13. EUROMOTin ehdotus typen oksidien ja hiukkasten päästörajoiksi

6. LÄHDELUETTELO

AHOKAS, J. 1992. Traktoreiden ja työkoneiden pakokaasupäästöt ja niiden mittaaminen. 26 s. Ei julkaisua. Saatavana VAKOLAsta.

Association of European manufacturers of internal combustion engines (EUROMOT). 1992. Exhaust emission standards for R.I.C. engines used in mobile and transportable applications. 50 s.

Californian Air Resources Board. California regulations for 1994 and later, utility and lawn and garden equipment engines. CARB:n lähettämät tiedotteet.

E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505, Addendum 23: Regulation No. 24, Revision 2. Economic Commission for Europe, 1986, 63 s.

E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505, Addendum 48: Regulation No. 49. Economic Commission for Europe, 1982, 28 s.

E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505, Addendum 48: Regulation No. 49. Revision 2. Economic Commission for Europe, 1992, 61 s.

77/537/ETY. Neuvoston direktiivi pyörillä varustettujen maatalous- ja metsätraktoreiden dieselmootoreiden päästöjen vähentämiseksi toteutettavia toimenpiteitä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, Nro L 220/38, 1977, 22 s.

88/77/ETY. Neuvoston direktiivi ajoneuvojen dieselmootoreiden ilman pilaantumista aiheuttavien kaasupäästöjen vähentämistä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, Nro L 36/36, 1988, 50 s.

91/542/ETY. Neuvoston direktiivi ajoneuvoissa käytettäväksi tarkoitettujen dieselmootoreiden kaasumaisten epäpuhtauspäästöjen vähentämiseen liittyvän jäsenvaltioiden lainsäädännön yhtenäistämistä annetun direktiivin 88/77/ETY muuttamisesta. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, 1991, 50 s.

HAHKALA, M., JORMANAINEN, P., PUUSTINEN, H. & POHJALA, V. 1986. Pienkattiloiden päästöselvitys. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tutkimuksia 454. 166 s.

ISO/DIS 8178. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 1: Test bed measurement of gaseous and particulate emissions. International Organization for Standardization, 1993, 99 s.

ISO/DIS 8178. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 2: Measurement of gaseous and particulate emissions at site. International Organization for Standardization, 1993, 35 s.

ISO/DIS 8178. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 3: Definitions and methods of measurement of exhaust gas smoke under steady-state conditions. International Organization for Standardization, 1993, 7 s.

ISO/DIS 8178. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement. Part 4: Test cycles for different engine applications. International Organization for Standardization, 1993, 23 s.

Kehittyvä dieselteknikka. 1993. Autoalan koulutuskeskus Oy. Helsinki.

LAURIKKO, J. 1987. Dieselmootoriautojen pakokaasupäästöt. Mittaaminen, rajoitukset ja puhdistustekniikka. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiedotteita 712. 85 s.

LAURIKKO, J. 1992. Dieselmootorien pakokaasupäästöt. Käynnistys- ja käyttölämpötilan sekä polttoaineen vaikutukset. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Julkaisuja 761. 44 s.

LAURIKKO, J. 1992. Henkilöautojen pakokaasupäästöt ja niiden vähentämisen tekniikka. Teknillinen korkeakoulu. Auto- ja työkonetekniikan tutkimusraportti 1992/1. 91 s.

Lucas Applied Technology. Lucas Hartridge smokemeter-4 operating manual. Buckingham. 92 s.

NYLUND, N-O., KYTÖ, M., KOPONEN, P. & LEPPÄMÄKI, E. 1985. Bensiiniautojen pakokaasupäästöjen määrät, puhdistus, mittaaminen ja päästörajat. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiedotteita 463. 53 s.

PATTERSON, D.I. & HENIEN, N.A. 1972. Emissions from combustion engines and their control. Ann Arbor Science Publishers, Detroit. 355 s.

Pienpolton tekniikka ja päästöt -seminaari. 25.05.1994. Jyväskylä. Seminaariaineisto.

PURANEN, A. 1992. Polttomoottorikäyttöisten työkoneiden ympäristöpäästöt. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Turvallisuustekniikka. Raportti 63. 72 s.

REHNBERG, O. & SUNDGREN, A. 1983. Rening av motorsågsavgaser. Högskolan i Luleå. Forskningsrapport 15. 27 s.

SPRINGER, G.S. & PATTERSON, D.I. 1973. Engine emissions. Pollutant formation and measurement. Plenum Press, New York. 371 s.

Suomen säädöskokoelma n:o 1256/92. Asetus ajoneuvojen rakenteesta ja varusteista.

SAE J1088 JUN83. Test procedure for the measurement of exhaust emissions from small utility engines. Society of Automotive Engineers, 1974, 6 s.

SFS-luettelo. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki 1994. 280 s.

TUOMI, S. 1993. Puun pienpolton päästöjä voidaan vähentää. TEHO 1/1993.

VESTERINEN, R. 1992. Jatkuvatoimisten päästömittauslaitteiden toimivuus ja kenttäkelpoisuus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiedotteita 1341. 47 s.

VAKOLAn tutkimuseloituksia

48. PUUMALA, M., KARHUNEN, J., LOUHELAINEN, K. & VILHUNEN, P. 1987. Jauhatuksen tilantarve ja pölyhaittojen vähentäminen
49. SCHÄFER, W. & AHOKAS, J. 1988. Maatalouskoneiden tietokanta
50. KARHUNEN, J., AARNIO, K. & MYKKÄNEN, U. 1988. Lannapoistolaitteiden toiminta ja kestävyys
51. KAPUINEN, P. & KARHUNEN, J. 1988. Pienten pihatoiden ilmanvaihdon erityisvaatimukset
52. PUUMALA, M., MANNI, J. & SARIN, H. 1988. Tuotantorakennusten suunnittelu ja rakentaminen käytännössä
53. MATTILA, T. & VIROLAINEN, V. 1989. Hellävarainen perunankorjuu
54. MIKKOLA, H. 1989. Syyskylvöä korvaavien muokkausmenetelmien vaikutus kevätvehnän satoon 1975-1988
PITKÄNEN, J. 1989. Pitkäaikaisen aurattoman viljelyn vaikutukset hiesusaven rakenteeseen ja viljavuuteen
55. Ei julkaisua
56. KAPUINEN, P. & KARHUNEN, J. 1989. Kosteiden pintojen kosteudentuotanto navetoissa
57. SARIOLA, J., TUUNANEN, L., PAAVOLA, J. & AHOKAS, J. 1990. Kylmäilmakuivurien mitoitus ja käyttö
58. MÄKELÄ, J. & LAUROLA, H. 1990. Leikkupuimurin kulkukyky vaikeissa olosuhteissa
59. KAPUINEN, P. & KARHUNEN, J. 1990. Lietelantajärjestelmien toimivuus
60. SUOKANNAS, A. 1991. Heinän varastokuivaus
61. SARIOLA, J., TUUNANEN, L., ESKELINEN, T., LOUHELAINEN, K. & RIPATTI, T. 1992. Viljan kuivauksen pölyhaitat
62. SUOKANNAS, A. 1991. Säilörehun siirto ja käsittely talvella
63. KAPUINEN, P. 1992. Naudanlihan tuotantomenetelmät ja -rakennukset
64. KERVINEN, J. & SUOKANNAS, A. 1993. Kiedotun pyöröpaalisäilörehun valmistustekniikka ja laatu
65. SARIOLA, J. & LEPPÄLÄ, J. 1993. Hellävarainen perunan kauppakunnostus
66. KAPUINEN, P. 1993. Naudanlihan tuotantomenetelmät ja -rakennukset II
67. PUUMALA, M. & LEHTINIEMI, T. 1993. Betonit ja muovit navetan lattia-ateriaaleina
68. KAPUINEN, P. 1994. Lannankäsittelyn taloudellisuuden ja lannan ravinteiden hyväksikäytön parantaminen

VAKOLAn tiedotteita

- 43/88 MANNI, J. 1988. Käytännön ohjeita konevaraston hankintaa suunnittelevalle.
- 44/89 1989. Pohjoismaiset lypsykone- ja laiteohjeet
- 45/89 1989. Säilörehun korjuu pyöröpaalaimella
- 45 S/89 NYSAND, M. 1989. Rundbalsensilering
- 46/90 MANNI, J. & KAPUINEN, P. 1990. Kevytsora lietesäiliön katteena
- 47/90 KARHUNEN, J. 1990. Lietelannan kompostointi
- 48/90 LEPPÄNEN, K. & NYSAND, M. 1990. Turvallinen ja nopea työkoneiden kytkentä
- 49/91 LEHTINIEMI, T. & PUUMALA, M. 1991. Betonit ja muovit navetan lattia-ateriaaleina
- 50/91 MANNI, J. 1991. Pölyn ja roskien talteenotto lämminilmakuivaamossa
- 51/92 VIROLAINEN, V. 1992. Viherkesannon perustaminen ja hoito
- 52/92 KARHUNEN, J. 1992. Kaasut ja pöly eläinsuojien ilmanvaihdossa
- 53/93 MIKKOLA, H. 1993. Lannoitteenlevittimien levitystasaisuus
- 54/93 JANTUNEN, J. 1993. Maaseudun koerakentamisen ohjelmointi
- 55/93 SUOKANNAS, A. 1993. Pyöröpaalisäilörehun korjuu, varastointi ja laatu
- 56/93 JANTUNEN, J. 1993. Maaseuturakentamisen ideakilpailu
- 57/93 VIROLAINEN, V. 1993. Syyskylvöjen varmentaminen
- 58/93 KAJA, J. & KOSKIAHO, J. 1993. Maatilan ja maatilamatkailun jätehuolto
- 59/93 HUOTELIN, R. 1993. Maatilamyymälätoiminta vanhassa maatilan asuinrakennuksessa
- 60/93 SALMINEN, K. & ALAKOMI, T. 1993. Tyhjien maatilarakennusten uusi käyttö
- 61/94 MIKKOLA, H. 1994. Lietelannan varastointi ja levitys
- 62/94 PUUMALA, M. 1994. Tuotantorakennusten alapohjia ja piha-alueiden päällysrakenteita
- 63/94 SARIOLA, J., PIETILÄ, J. & MÄKELÄ, O. 1994. Turvallinen puunpilkkonta
- 64/94 KARHUNEN, J. 1994. Itkupinta-tuloilmalaitteen vaikutus eläinsuojassa
- 65/94 LÖTJÖNEN, T. MÄKELÄ, O. & PIETILÄ, J. 1994. Oksainen hake pienpolttimissa.
- 66/94 ELONEN, E. 1994. Pako- ja savukaasujen analysointi

