

KUOPION YLIOPISTO
YMPÄRISTÖTIETEIDEN LAITOS
Pienhiukkas- ja aerosolitekniiikan laboratorio
PL 1627
70211 Kuopio



UNIVERSITY OF KUOPIO

PUUN POLTON PIENHIUKKASPÄÄSTÖT



2/2005

KUOPION YLIOPISTON YMPÄRISTÖTIETEIDEN LAITOSTEN MONISTESARJA

UNIVERSITY OF KUOPIO
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCES
P.O.B. 1627, FIN-70211 KUOPIO, FINLAND

ISSN 0786-4728

FINE
PIENHIUKKASET –teknologia, ympäristö ja terveys

-teknologiaohjelman projektin
PUUN POLTON PIENHIUKKASPÄÄSTÖT

Loppuraportti
(PIPO)

Jarkko Tissari, Taisto Raunemaa, Jorma Jokiniemi, Olli Sippula, Kati Hytönen
Kuopion yliopisto, ympäristötieteiden laitos, Kuopio

Veli Linna, Heikki Oravainen, Raili Vesterinen, Raili Taipale,
Aimo Kolsi, Ilpo Nuutinen
VTT Prosessit, Energian tuotanto, Jyväskylä

Jorma Jokiniemi, Jouni Pyykönen
VTT Prosessit, Energia ja ympäristö, Espoo

Seppo Tuomi, Jyrki Kouki, Kari Vuorio
Työtehoseura ry, metsäosasto, Rajamäki

Fortum Oil and Gas Oy, Kivia Oy, Nunnanlahden uuni Oy, Puulämpö Suomi Oy,
Säätötuli Oy, Tulikivi Oyj, Turun Uunisevät Oy, Veljekset Ala-Talkkari Oy, Wärtsilä
Finland Oyj

Kuopion yliopisto, pienhiukkas- ja aerosolitekniiikan laboratorio

Elokuu 2005

Julkaisija:

**Kuopion yliopisto, pienhiukkas- ja aerosoli-
tekniikan laboratorio
PL 1627, 70211 KUOPIO**

Julkaisun sarjan nimi ja tunnus

**Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja
2/2005**

Julkaisuaika **ELOKUU 2005**

<p>Tekijät</p> <p>Jarkko Tissari (Toim.), Taisto Raunemaa, Jorma Jokiniemi, Olli Sippula, Kati Hytönen, Veli Linna, Heikki Oravainen, Jouni Pyykönen, Seppo Tuomi, Raili Vesterinen, Raili Taipale, Aimo Kolsi, Ilpo Nuutinen, Jyrki Kouki, Kari Vuorio</p>	<p>Tutkimuksen nimi</p> <p>PUUN POLTON PIENHIUKKASPÄÄSTÖT</p> <p>Rahoittaja</p> <p>Tekes, VTT Prosessit, Kuopion yliopisto, Fortum Oil and Gas Oy, Kivia Oy, Nunnanlahden Uuni Oy, Puulämpö Suomi Oy, Säättötuuli Oy, Tulikivi Oyj, Turun Uunisevät Oy, Veljekset Ala-Talkkari Oy, Wärtsilä Finland Oy</p>
<p>Julkaisun nimeke</p> <p>Puun polton pienhiukaspäästöt. Loppuraportti 31.8.2005.</p>	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Puun pienpolton päästötieto suomalaisista laitteista on ollut vähäistä erityisesti pienhiukaspäästöjen osalta. Päästöarvioita on jouduttu tekemään ulkomaisten tutkimusten perusteella. Samanaikaisesti uusia ulkoilman pienhiukkasten terveysvaikutuksia käsitteleviä tutkimustuloksia julkaistaan vuosittain. Luotettavan tutkimustiedon saamiseksi vuonna 2002 käynnistettiin tutkimushanke ”Puun polton pienhiukaspäästöt”, joka tehtiin yhteistyössä Kuopion yliopiston, VTT prosessien, Työtehosteuran ja yhdeksän yrityksen kanssa pääosin Tekesin rahoittamana. Tutkimushanke jakaantui kolmeen päätutkimusalueeseen: (1) pienhiukkasmallinnukseen, (2) näytteenottoon ja mittaustekniikkaan sekä (3) päästökertoimien määrittämiseen.</p> <p>Mallinnus. Osiossa kehitettiin puun pienpoltoon soveltuvaa pienhiukkasmallinnusta. Pääpaino mallinnuksessa oli puun tuhkan käyttäytymisen mallintamisessa. Polttotekniikan kannalta oleellisin tulos oli, että alkali- muodostamaan hiukkasfraktioon voidaan vaikuttaa lähinnä vain vaikuttamalla alkali- vapautumiseen. Vapautuvaan ainemäärään vaikuttavia tekijöitä ovat palamislämpötila, palamiskaasujen jäähtymisnopeus ja tuhkan koostumus. Mallinkehitystyöhön liittyen projektissa rakennetulla virtausreaktorilla tutkittiin polttoaineen ja palamisolosuhteiden merkitystä päästöihin.</p> <p>Mittaustekniikka. Osiossa selvitettiin näytteenoton ja mittalaitteiden merkitystä tulokseen. Laimennusmenetelminä käytettiin ejektorilaimentimia, laimennustunnelia sekä huuvalaimennusta. Mittalaitteiden välisiä eroja tutkittiin mittaamalla erilaisista puun polttolaitteiden päästöstä yhtäaikaaisesti kahdella tai useammalla erilaisella mittalaitteella.</p> <p>Päästöt. Jatkuvassa poltossa polttoprosessi on huomattavasti paremmin hallittavissa ja päästöt pienempiä ja tasaisempia kuin panospoltossa. Vaihtelua esiintyy erityisesti polton häiriö-, puhdistus- ja katkokäyntitilanteissa sekä hyvin pienellä teholla poltettaessa. Suurissa laitoksissa päästöihin vaikuttavat merkittävimmin käytetyt puhdistusmenetelmät. Päästökomponenttien pitoisuudet vaihtelivat merkittävästi erilaisissa palamistilanteissa. Päästöt olivat tyypillisesti korkeita epätäydellisen palamisen tilanteissa erityisesti, kun palamiseen tarvittavan hapen määrä oli liian vähäinen. Keskimääräiset häkäpäästöt vaihtelivat 20 – 3000 mg/MJ, hiilivetyypäästöt 1 – 600 mg/MJ ja pienhiukaspäästöt 3 – 150 mg/MJ välillä. Puun pienpoltossa keskimääräiset lukumääräpäästöt olivat riippumatta laitteesta samaa tasoa 10^{13} – 10^{14} kpl/MJ. Keskimääräinen hiukkaskoko puun pienpoltossa on 80 – 150 nm, hiillosvaiheessa 50 – 100 nm sekä syttymisvaiheessa ja kitupoltossa suurimmillaan 500 – 600 nm.</p>	
<p>Avainsanat</p> <p>Pienpoltto, pienhiukkaset, mallinnus, näytteenotto</p>	<p>Luokitus ja/tai indeksointi</p>
<p>ISSN ja avainnimeke</p>	<p>ISBN</p>
<p>Kokonaissivumäärä</p> <p>125 + 3 liites.</p>	<p>Kieli</p> <p>Suomi</p> <p>Hinta</p> <p>Luottamuksellisuus</p> <p>Julkinen</p>
<p>Jakaja (nimi ja osoite)</p> <p>Marja-Leena Patronen, Kuopion yliopisto, ympäristötieteiden laitos p. 017 – 163 156</p>	<p>Lisätietoja</p> <p>Jarkko Tissari, Kuopion yliopisto p.017 – 163 285</p>

Publisher:
University of Kuopio, Fine Particle and Aerosol
Technology laboratory
POB 1627, 70211 KUOPIO

Publication series and number of publication
Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja
2/2005
 Date **AUGUST 2005**

<p>Authors</p> <p>Jarkko Tissari (Edit.), Taisto Raunemaa, Jorma Jokiniemi, Olli Sippula, Kati Hytönen, Veli Linna, Heikki Oravainen, Jouni Pyykönen, Seppo Tuomi, Raili Vesterinen, Raili Taipale, Aimo Kolsi, Ilpo Nuutinen, Jyrki Kouki, Kari Vuorio</p>	<p>Name of project</p> <p>FINE PARTICLE EMISSIONS IN SMALL SCALE WOOD COMBUSTION</p> <p>Financed by</p> <p>TEKES, VTT Processes, University of Kuopio, Fortum Oil and Gas Ltd, Kivia Ltd, Nunnanlahden Uuni Ltd, Puulämpö Suomi Ltd, Säätötuli Ltd, Tulikivi Ltd, Turun Uunisevät Ltd, Veljekset Ala-Talkkari Ltd, Wärtsilä Finland Ltd</p>
<p>Title</p> <p>Fine particle concentrations in small scale wood combustion. Final report 31.8.2005.</p>	
<p>Abstract</p> <p>There has been a minor knowledge of the emissions from small scale wood combustion appliances in Finland, especially for fine particles. The emission estimation had to be based on the foreign studies. At the same time new studies on fine particle health effects are published annually. In 2002, the present study "Fine particle emissions in small scale wood combustion" in co-operation with the University of Kuopio, VTT Processes, TTS Institute and nine companies was funded mainly by National Technology Agency of Finland (TEKES). This study can be divided into three main areas: (1) fine particle modelling, (2) measuring techniques and (3) defining of emission coefficients.</p> <p>Modelling. In this part a fine particle model suited for small scale wood combustion was developed. The behavior of wood ash in the exhaust gas was the main item in this area. In addition, the significance of fuel composition and combustion conditions in flow reactor tests were experimentally studied. One major result was that the release of the alkali based particle fraction could only be controlled by the release of alkali itself. The factors, which affect the release of an alkali mole fraction, were combustion temperature, cooling temperature of exhaust gas and composition of ash.</p> <p>Measuring techniques. In this research area the effect of sampling and measuring devices as the results was found out. As dilution techniques ejector diluters, dilution tunnel and hood dilution were used. The differences of measuring devices were studied by measuring simultaneously with several devices and actually in various periods with different combustion appliances.</p> <p>Emissions. During continuous burning the combustion process can be better controlled and emissions are lower than during batch burning. The emission varies especially in the interference-, cleaning, on-off using and low load situations. The reduction technologies are the main factors which affects on the emissions in large-scale combustion. The emissions varied remarkably in the different combustion situations. The emissions were high during the incomplete combustion, especially during oxygen-deficit situations. The average carbon monoxide emission varied between 20 to 3000 mg/MJ, total hydrocarbon 1 to 600 mg/MJ and fine particle mass emission between 3 to 150 mg/MJ. In small scale wood combustion the number emissions were regardless of the appliances between $10^{13} - 10^{14}$ #/MJ. The average particle size was between 80 to 150 nm and in the burn out phases 50 to 100 nm. The biggest particle size was about 500 to 600 nm in the firing phases and in the cases of smouldering.</p>	
<p>Keywords</p> <p>Small scale, combustion, fine particles, modelling, sampling</p>	<p>Classification and/or index</p>
<p>ISSN and keyissue 0786 - 4728</p>	<p>ISBN</p>
<p>Pages</p> <p>125 + 3 p.</p> <p>Language</p> <p>Finnish</p>	<p>Price</p> <p>Confidentiality public</p>
<p>Distributor (name and adress)</p> <p>Marja-Leena Patronen, University of Kuopio, Department of Environmental Sciences phone 017 – 163 156, fax 017 – 163 191</p>	<p>Additional information</p> <p>Jarkko Tissari, University of Kuopio, phone 017 – 163 285</p>

ESIPUHE

Tämä raportti on tehty osana ”Puun polton pienhiukkaspäästöt” – tutkimushanketta. Kappaleet 1 ja 2 käsittelevät hanketta yleisesti, 3 – 5 pienpolton luonnetta ja päästöjä yleisesti sekä 6 – 9 hankkeessa saatuja tuloksia päätutkimusalueiden ”Mallinnus”, ”Mittaustekniikka” ja ”Laitemittaukset” mukaisesti jaoteltuna.

Hanke liitettiin Tekesin ”PIENHIUKKASET – teknologia, ympäristö ja terveys” (FINE) –teknologiaohjelmaan, mutta raportoi myös ”Puupolttoaineiden pientuotanto ja –käyttö” panostusalueeseen. Hankkeen tutkimuslaitososapuolina olivat Kuopion yliopisto, VTT Prosessit ja Työtehoseura ry ja yritysosapuolina Fortum Oil and Gas Oy, Kivia Oy, Nunnanlahden Uuni Oy, Puulämpö Suomi Oy, Säättötuli Oy, Tulikivi Oyj, Turun Uunisevät Oy, Veljekset Ala-Talkkari Oy ja Wärtsilä Finland Oyj. Hankkeen vastuullisena johtajana toimivat professorit Taisto Raunemaa (1.1.2002 – 31.12.2004) ja Jorma Jokiniemi (1.1.2005 – 31.8.2005) Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitokselta.

Hankkeen johtoryhmässä olivat seuraavat henkilöt: Taisto Raunemaa (Kuopion yliopisto), Timo Ålander (Kuopion yliopisto), Veli Linna (VTT Prosessit), Heikki Oravainen (VTT Prosessit), Jorma Jokiniemi (VTT Prosessit ja Kuopion yliopisto), Seppo Tuomi (Työtehoseura), Pasi Heiskanen (Tekes), Marjatta Aarniala (Tekes), Pekka Järvinen (FINE ohjelmapäällikkö), Jorma Virkki (Fortum Oil and Gas Oy), Ismo Mäkeläinen (Kivia Oy), Johannes Uusitalo (Nunnanlahden Uuni Oy), Keijo Rapeli (Puulämpö Suomi Oy), Reijo Santala ja Petri Piipari (Säättötuli Oy), Pekka Horttanainen (Tulikivi Oyj), Petri Harjuniemi (Turun Uunisevät Oy), Antti Ala-Talkkari (Veljekset Ala-Talkkari Oy) sekä Kai Helkilinna (Wärtsilä Finland Oy). Johtoryhmän sihteerinä ja tutkimuksen vastuullisena tutkijana toimi Jarkko Tissari Kuopion yliopistosta.

Hankkeen toteutukseen ovat edellisten lisäksi osallistuneet Kati Hytönen, Anita Kajander, Jussi Kärtevä, Teemu Lehikoinen, Janne Nuutinen, Olli Sippula, Valtteri Suonmaa, Timo Turrek ja Pasi Yli-Pirilä (Kuopion yliopisto), Aimo Kolsi, Ilpo Nuutinen, Jouni Pyykönen, Marko Räsänen, Raili Taipale ja Raili Vesterinen (VTT Prosessit), Jyrki Kouki ja Kari Vuorio (Työtehoseura), Maunu Viitanen (Fortum Oil and Gas Oy), Martti Palviainen ja Markku Turunen (Kivia Oy), Tapani Keronen (Nunnanlahden Uuni Oy), Heikki Olenius (Tulikivi Oyj), Atso Raittio (Turun Uunisevät Oy) ja Juha Huotari (Wärtsilä Finland Oy).

Sisällysluettelo

ESIPUHE	5
1 TIIVISTELMÄ	8
2 TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHTA	12
2.1 TAUSTA	12
2.2 TAVOITTEET JA TEHTÄVÄT	13
3 POLTTOPUUN PIENKÄYTTÖ SUOMESSA	14
3.1 POLTTOPUUN KÄYTÖN TILASTOINTI	15
3.2 POLTTOPUUN KOKONAISKÄYTTÖ	15
3.3 POLTTOPUUN KÄYTTÖ PÄÄLÄMMITYSTAVAN MUKAAN	16
3.4 POLTTOPUUN HANKINTATAPA	17
3.5 POLTTOPUUN PIENKÄYTÖN LISÄÄMISTAVOITTEET	18
4 POLTTOLAITTEET PUUN PIENPOLTOSSA	20
4.1 OMAKOTILUOKAN PILKEKATTILAT	21
4.2 HAKKEENPOLTTOLAITTEISTOT	24
4.3 LÄMPÖKESKUKSET	25
4.3.1 <i>Suomalaiset lämpökeskusten hakepolttolaitteet</i>	25
4.3.2 <i>Keskieurooppalaiset kiinteistöjen hakepolttolaitteet</i>	26
4.4 PUUPELLETTIEN POLTTOLAITTEET	27
4.4.1 <i>Omakotitalot</i>	27
4.4.1.1 <i>Suomalaiset omakotitalojen pellettipolttolaitteet</i>	27
4.4.1.2 <i>Keskieurooppalaiset omakotitalojen pellettipolttolaitteet</i>	29
4.4.2 <i>Lämpökeskukset</i>	30
4.4.2.1 <i>Suomalaiset lämpökeskusten pellettipolttolaitteet</i>	30
4.4.2.2 <i>Keskieurooppalaiset kiinteistöjen pellettipolttolaitteet</i>	31
4.5 VARAAVAT TULISIJAT	31
5 PUUN PALAMINEN JA PÄÄSTÖT	33
5.1 PUUN PALAMISEN VAIHEET	34
5.1.1 <i>Yleistä palamisvaiheista</i>	34
5.1.2 <i>Kosteuden haihtuminen</i>	35
5.1.3 <i>Puun pyrolysoituminen</i>	36
5.1.4 <i>Syttyminen</i>	37
5.1.5 <i>Jäännöshiilen palaminen</i>	37
5.2 PUUN PIENPOLTON PÄÄSTÖT	38
5.2.1 <i>Puun palamisaerosoli</i>	38
5.2.2 <i>Puun polton kaasumaiset päästöt</i>	38
5.2.3 <i>Hiilivetyypäästöjen muodostuminen</i>	39
5.2.4 <i>Tuhkahiukkaset ja niiden muodostuminen</i>	40
5.2.5 <i>Noki ja sen muodostuminen</i>	42
6 MITTAUSTEKNIIKAN KEHITTÄMINEN	44
6.1 KATSAUS ERI MAIDEN HIUKKASMITTAUSMENETELMIIN	45
6.1.1 <i>Tulisijat</i>	46
6.1.2 <i>Pienkattilat ja polttimet</i>	49
6.2 PIENHIUKKASTEN MITTAUSMENETELMIÄ JA -TULOKSIA	50
6.2.1 <i>Sveitsiläisiä mittaus tuloksia</i>	50
6.2.2 <i>Mittauksia aluelämpökattilasta</i>	51
6.2.3 <i>Sveitsiläisen EMPA-laboratorion tuloksia</i>	52
6.2.4 <i>Puupellettien poltossa syntyvät pienhiukkaset</i>	53

6.3	LAIMENNUS	54
6.4	PROJEKTISSA KÄYTETYT MENETELMÄT JA LAITTEISTOT	55
6.5	TULOKSET MITTAUSLAITEVERTAILUISTA.....	57
6.5.1	ELPI hiukkasanalysointilaitteiden laitetyyppien vertailu	57
6.5.1.1	Vertailumittaus pellettitakalla	57
6.5.1.2	ELPI:n vertailu yhteismittausjaksoilla.....	60
6.5.2	ELPI:n ja SMPS:n hiukkaskokojakaumaerot	66
6.6	LAIMENNUSMENETELMIEN VERTAILU.....	70
6.6.1	Pitoisuuksien vertailu.....	70
6.6.2	Kokojakaumien vertailu.....	73
6.7	YHTEENVETO TULOISTA.....	75
7	LAITEMITTAUKSET	77
7.1	KOEPAIKKOJEN KUVAUKSET	78
7.1.1	Kuopion yliopisto	78
7.1.2	VTT Prosessit	79
7.1.3	Työtehoseura	81
7.1.4	Fortum Oil and Gas	82
7.2	TILASTOTIETOA MITTAUKSISTA JA MITATUISTA POLTTOLAITTEISTA JA -AINEISTA.....	83
7.3	PALAMISOLOSUHTEET PIENPOLTOSSE.....	84
7.3.1	Happipitoisuudet.....	84
7.3.2	Savukaasun lämpötilat	85
7.3.3	Veto-olosuhteet ja hyötysuhteet	86
7.4	PÄÄSTÖT PUUN PIENPOLTOSSE.....	86
7.4.1	Yleistä	86
7.4.2	Häkä-, hiilivety- ja typenoksidipäästöt.....	87
7.4.3	Hiukkaspäästöt.....	91
8	MALLINNUSTYÖ	99
8.1	MALLINNUS	100
8.1.1	Tausta mallinnustyölle.....	100
8.1.2	Mallin kuvaus	101
8.1.3	Mallitarkastelut törmäilyrajoitteisella mallilla.....	102
8.1.4	Mallitarkastelut ydintymisrajoitteisella mallilla.....	102
8.1.5	Yhteenveto	105
8.2	VIRTAUSREAKTORIMITTAUKSET	106
8.2.1	Koejärjestely	106
8.2.2	Mittaukset	107
8.2.2.1	Hiukkaskokojakauma- ja lukumäärämittaukset	107
8.2.2.2	Hiukkasmassapitoisuuden ja hiukkasmassan koostumuksen määrittäminen.....	109
8.2.2.3	Elektronimikroskooppianalyysit	112
8.2.2.4	Yhteenveto tuloksista.....	114
8.2.3	Tulosten tarkastelu.....	115
9	TUTKIMUSTULOSTEN ARVIOINTI JA YHTEENVETO.....	116
10	KIRJALLISUUS.....	121

LIITE 1. SUOSITUKSIA PUUN PIENPOLTON HIUKKASNÄYTTEENOTTOON

1 TIIVISTELMÄ

Tutkimushanke ”Puun polton pienhiukkaspäästöt” tehtiin yhteistyössä Kuopion yliopiston, VTT prosessien, Työtehoseuran ja yhdeksän yrityksen yhteistyönä. Päärahoittajana oli Tekes.

Puun pienpolton päästötieto suomalaisista laitteista on tähän asti ollut suhteellisen vähäistä erityisesti pienhiukkaspäästöjen osalta. Päästöarvioita on jouduttu tekemään ulkomaisten tutkimusten perusteella. Samanaikaisesti uusia ulkoilman pienhiukkasten terveysvaikutuksia käsitteleviä tutkimustuloksia julkaistaan useita vuosittain. Tutkimushanke jakaantui kolmeen päätutkimusalueeseen **pienhiukkasmallinnukseen, näytteenottoon ja mittaustekniikkaan sekä päästökertoimien määrittämiseen.**

Mallinnus

Mallinnusosiossa kehitettiin pienhiukkasmallinnusta puun pienpoltoon soveltuvaksi. Pääpaino mallinnuksessa oli puun tuhkan käyttäytymisen mallintamisessa. Kehitetty malli yhdistää kemiallisen tiedon ja muodostuneen aerosolin kokojakauman muuntumatiedon yhdeksi mallirakenteeksi. Tutkimuksen alkuvaiheessa prosessin pienhiukkasdynamiikka oletettiin törmäilykasvun rajoittamaksi. Mitatuissa hiukkaspiteisyyksissä havaittu vaihtelutaso antoi viitteitä, että oletus hiukkasten törmäilykasvun hallitsevuudesta ei päde. Tämän vuoksi mallia täydennettiin myöhemmin hiukkasten nukleoitumisen ja tiivistymiskasvun kuvauksella. Polttotekniikan kannalta oleellisin tulos oli, että alkalien muodostamaan hiukkasfraktioon voidaan vaikuttaa lähinnä vain vaikuttamalla alkalien vapautumiseen. Tärkein vapautuvaan ainemäärään vaikuttava tekijä on palamislämpötila. Muita merkittäviä tekijöitä ovat palamiskaasujen jäähtymisnopeus ja tuhkan (K, S, Cl, Ca) koostumus. Keskimääräinen hiukkaskoko ei mallilaskelmien mukaan vaihtele paljon vapautuvan ainemäärän mukaan etenäkään, jos jäähtymisnopeus on suuri.

Mallinkehitystyöhön liittyen Kuopion yliopistoon suunniteltiin ja rakennettiin virtausreaktori, jonka avulla tuotettiin tietoa palamisolosuhteiden vaikutuksesta hiukkaspestöihin. Alussa työ keskittyi virtausreaktorin suunnitteluun, mitoittamiseen, tarvittavien laitteiden hankintoihin ja rakentamiseen sekä laitteiston testaamiseen ja menetelmien kehitykseen. Puupölyn syöttöä tutkittiin neljällä eri laitteella, joista soveltuvin kehitettiin virtausreaktorin vaatimukset täyttäväksi. Rakennetussa koelaitteistossa jauhattua puuta syötettiin ilmapvirran mukana pystysuuntaiseen kuumennettuun putkiuuniin ja näytteenotto tapahtui putken yläosassa olevista näytteenottoyhteistä. Reaktorilaitteisto mahdollisti puun polttamisen dimensioiltaan yksinkertaisessa tilassa ja säädellyissä olosuhteissa. Polttokokeissa mitattiin reaktorilla tuotetun savukaasun ominaisuuksia eri tilavuusvirtauksilla, polttoaineen syöttömäärillä, ilmakertoimilla ja eri lämpötiloissa. Kokeissa käytettiin kahta eri reaktoriputkea ja kolmea eri polttoainetta. Projektin loppuvaiheessa virtausreaktorimittauksilla selvitetiin myös, miten polttoaineen kemiallinen koostumus vaikuttaa pienhiukkaspäästöihin.

Perusasetuksilla palaminen virtausreaktorissa oli varsin puhdasta, hiukkasmassapitoisuus alhainen ja hiukkasten koostumus pääosin tuhkaa. Ilmakerroin vaikutti merkittävästi pienhiukkaspitoisuuksiin. Alennettaessa ilmakerrointa palaminen reaktorissa muuttui epätäydellisemmäksi. Tällöin savukaasut sisälsivät runsaasti hiilivetyjä ja nokea, jolloin pienhiukkasten massa- ja lukumääräpitoisuus sekä hiukkaskoko kasvoivat merkittävästi.

Mittaustekniikka

Mittaustekniikkaosiossa selvitettiin näytteenoton ja mittalaitteiden merkitystä tulokseen. Laimennusmenetelminä käytettiin ejektorilaimentimia, laimennustunnelia sekä huuvalaimennusta. Mittalaitteiden välisiä eroja tutkittiin mittaamalla erilaisista puun polttolaitteiden päästöstä yhtäaikaaisesti

kahdella tai useammalla erilaisella mittalaitteella. Mittaustekniikkaan liittyen Kuopion yliopistoon rakennettiin pienpolton polttolaitteiden testiympäristö joka sisälsi polttolaitteeva’an, savukanavat, tiedonkeruujärjestelmän, laimennustunnelin sekä mittalaitteita mm. laimennussuhteiden ja virtausolosuhteiden määrittämistä varten. ISO 8178-standardin mukaista laimennustunnelia käytetään peruslaimennusmenetelmänä myös jatkossa Kuopion yliopistossa tehtävissä pienpolton mittauksissa.

ELPIen vertailumittauksissa lukumääräpitoisuudet seurasivat ajallisesti kaikilla laitteilla hyvin toisiaan. Eri laitteiden välillä oli selviä tasoeroja pitoisuuksissa, ja erot eivät olleet ajallisesti vakioita. Myös kokojakaumat vaihtelivat eri laitteissa. Suurin vaikutus hiukkaspitoisuuksiin ja kokojakaumiin ELPI vertailuissa oli impaktioalustoilla. Lukumääräpitoisuus oli alumiinifolioalustoja käytettäessä noin 25 % pienempi ja hiukkaskoko systemaattisesti noin 30 % suurempi kuin sintratuilla alustoilla. Tietyissä tilanteissa alumiinifolioalustat yliarvioivat voimakkaasti ultrapienien hiukkasten osuuden. ELPI:n tilavuusvirralla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta hiukkaspäästöihin. Punnitusimpaktorilta määritetty PM_{0.9} oli lähes sama kuin suodattimelta (PM_{1.3}) määritetty massapitoisuus. Hiukkaskoko oli SMPS:llä keskimäärin 30 % pienempi kuin ELPI:llä alumiinifolioalustoilla, mikä selittyi ainakin osaksi laitteiden erilaisesta hiukkaskoon määrittelystä. Sintrattuja alustoja ELPI:ssä käytettäessä selvää eroa hiukkaskoossa SMPS:n verrattuna ei havaittu.

Hiukkaskokojakauma oli eri laimennusmenetelmillä varsin yhdenmukainen. Puun pienpolton mittauksissa joudutaan yleensä käyttämään hyvin suuria laimennuskertoimia. Ejektorilaimentimilta saatiin noin 30 % alhaisempia lukumäärä- ja massapitoisuuksia. Ejektorilaimentimessa häviöt ovat laimentimen rakenteesta johtuen suuremmat kuin muilla menetelmillä. Huuvamenetelmää ja laimennustunnelia verrattaessa erot hiukkaspäästöissä vaihtelivat. Hiukkasmassamittauksissa suodattimilta selvää eroa menetelmien välillä ei havaittu. Kun huuvan lisäksi käytettiin ejektorilaimentimia, pitoisuudet olivat satunnaisesti suurempia tai pienempiä kuin tunnelissa. Kun huomioidaan ejektorilaimentimien häviöt, huuvamenetelmällä saadaan mahdollisesti hieman suurempia lukumääräpitoisuuksia kuin laimennustunnelilla.

Mittaukset

Varsinaisia mittauspäiviä projektissa tehtiin kaiken kaikkiaan noin 170, joista yrityksille raportoituja laitemittauksia oli noin 35 %. Mittauksia tehtiin Kuopion yliopistossa, VTT Prosesseilla, Työtehoseurassa, Fortumilla sekä suuremmista laitoksista kenttämittauksia eri puolilla Suomea. Mittaustekniikan kehittämiseen, laimennusmenetelmien vertailumittauksiin ja polttoaineen laadun ja mallinnuksen vaatimien laitemittausten osuus oli noin 45 % ja mallinnusta tukevien virtausreaktorimittausten noin 20 % kaikista mittauksista. Mitattu polttolaitteivalikoima painottui suorien varaavien takkojen mittauksiin, joiden osuus kaikista laitemittauksista oli noin 40 %. Stokeri- ja pellettipolttimien mittauksia tehtiin noin 20 % ja pellettitakkamittauksia yhdellä pellettitakalla noin 20 % kaikista mittauksista. Pellettitakkamittaukset keskittyivät pienhiukkaspäästöjen karakterisointiin erilaisilla pellettilaaduilla. Lisäksi laimennusmenetelmien vertailumittauksia tehtiin pellettitakan savukaasuista. Mittaukset jäivät erityisen puutteellisiksi erilaisista pilkekäyttöisistä pienkattiloista. Alaja käänteispalokattiloita ei mitattu ollenkaan. Myös suurkiinteistökokoluokan kattiloiden mittaukset jäivät vähäisiksi.

Pääasiallisena polttotapana mittauksissa käytettiin laitevalmistajan ohjetta. Pääpolttoaineena panospolttomittauksissa käytettiin kuivaa (n. 10 % kosteus) koivupilkettä. Jatkuvassa poltossa pääpolttoaineita olivat puupelletti sekä hake. Pellettien kosteus oli noin 7 % ja hakepolttoaineen 25-30 %. Öljykattilamittauksissa käytettiin useita eri poltinvaihtoehtoja sekä uutta ja vanhaa laitekantaa. Polttoaineina olivat kevyt polttoöljy (Tempera 5), koepolttoaine sekä ForesterTM – hakepolttoneste yhdessä mittauksessa.

Mittaustulokset

Puun pienpoltto tutkimusaiheena on erittäin laaja ja monitahoinen ja päästöihin vaikuttavia tekijöitä on paljon. Päästöt vaihtelevat eri tilanteissa ja päästötietojen soveltamisessa ja erilaisten päästöarvioiden tekemisessä on käytettävä perusteellista harkintaa. Jotkut päästökomponentit käyttäytyvät yhdenmukaisella tavalla vain tietyissä tilanteissa, mutta eivät kaikessa poltossa, joten yleisiä eri päästöjen välisiä riippuvuuksia puun pienpoltossa on vaikea esittää.

Panospoltossa kuten kiukaissa ja tulisijoissa ominaispäästöt ovat huomattavan suuret ja vaihtelevat jo yhden pesällisen aikana. Jatkuvassa poltossa kuten pienkattiloissa polttoprosessi on paremmin hallittavissa ja päästöt pienempiä ja tasaisempia. Vaihtelua esiintyy kuitenkin häiriö-, puhdistus- ja katkokäyntitilanteissa sekä hyvin pienellä teholla poltettaessa. Tällöin myös polttimen ominaisuuksilla on erityinen merkitys. Suurissa laitoksissa päästöihin ulkoilmaan vaikuttaa merkittävimmin käytetty puhdistusmenetelmä. Kiinteistökokoluokan laitteissa käytetään eniten sykklonia, joka kerää suuria hiukkasia, ja suuremmissa laitoksissa multisyklonia, savukaasupesuria, sähkösuodatinta tai näiden yhdistelmiä.

Kaasumaisten päästökomponenttien pitoisuudet vaihtelevat merkittävästi erilaisissa palamistilanteissa. Häkäpäästöt ovat tyypillisesti korkeita niissä epätäydellisen palamisen tilanteissa, joissa palamiseen tarvittavan hapen määrä on liian pieni. Pienimmät häkäpäästökertoimet (20 mg/MJ) mitattiin aluelämpökattiloilla. Jatkuvassa poltossa häkäpäästöt olivat 4–10 –kertaisia ja panospoltossa kymmen-, jopa satakertaisia verrattuna aluelämpölaitoksiin. Suurimmat keskimääräiset häkäpäästökertoimet 3060 mg/MJ mitattiin kiukailla, kun muilla panospolttolaitteilla häkäpäästö oli keskimäärin 1200 mg/MJ.

Savukaasussa esiintyvät hiilivedyt syntyvät puun pyrolyysin aikana ja vapautuvat savukaasuun, mikäli palaminen on epätäydellistä. Puuaineessa kaasuuntuvien aineiden osuus on noin 80 %, joten pyrolyysituotteiden vapautuminen syttymisvaiheessa on nopeaa ja kaasuuntumista on vaikea hallita. Perinteisillä rakoarinoilla, erityisesti kiukailla, joissa veto tyypillisesti pidetään hyvänä riittävän tehon saamiseksi ja ilman syöttöä tulipesään ei juurikaan rajoiteta, hiilivetypäästöt voivat olla erittäin korkeita. Varaaviin tulisijoihin on kehitetty uusia arinaratkaisuja, joissa periaatteena on rajoittaa kaasuuntumista oikealla ilmamäärällä ja polttotavalla ohjaamalla palamisilma pääosin toisioilmana tulipesään. Uusilla ratkaisuilla saadaan erityisesti hiilivetypäästöjä huomattavasti pienennettyä. Jatkuvasyöttöisissä laitteissa palaminen on hallittua ja polton hiilivetypäästöt pienet. Keskimääräiset ominaispäästöt jatkuvasyöttöisillä laitteilla olivat yhdestä mg/MJ noin 20 mg/MJ:een. Tehokkaassa panospoltossa keskimääräiset hiilivetypäästöt voivat olla muutamia kymmeniä mg/MJ. Kiukailla hiilivetypäästö oli korkein, keskimäärin 590 mg/MJ ja muilla panospolttolaitteilla niitä alhaisempi, keskimäärin 130 mg/MJ.

Savukaasussa esiintyvät hiukkaset ovat epätäydellisen palamisen tuotteina syntyneitä hiilihiukkasia (nokea tai orgaanista) tai polttoaineen tuhkaista peräisin olevia tuhka hiukkasia. Puhdas polttopuu sisältää tyypillisesti noin 0,5 % mineraaliaineita kuivamassasta, mikä on vähän verrattuna moniin muihin biomassoihin. Puupolttoaineen tuhka on sitoutunut suoraan hiilivetyketjuihin ja vapautuu helposti polttoprosessissa joko pienhiukkasiksi tai jää pohjatuhkaan. Selvästi tärkein helposti höyrystyvä mineraali puussa on kalium. Muita helposti höyrystyviä ovat natrium, rikki, kloori ja sinkki. Näiden lisäksi lentotuhka sisältää myös heikommin höyrystyviä alkuaineita, joita ovat mm. kalsium, rauta, magnesium ja mangaani.

Tuhka hiukkaspitoisuus savukaasussa on suoraan verrannollinen poltossa vapautuvan tuhkan määrään. Palamislämpötila vaikuttaa tuhkan vapautumiseen ja siten myös hiukkaspitoisuuksiin. Nokihiukkasia syntyy liekissä suoraan haihtuvista komponenteista tai suoraan pyrolyysikaasuista, kun

palamisessa on paikallisesti liian vähän happea. Tilanteissa, joissa hiilivetyypäästöt ovat korkeita, myös hiukkaspäästöt ovat keskimääräistä suurempia. Hiilivedyt tiivistyvät helposti ja pääasiassa tuhka- ja nokihiukkasten pinnoille. Hiilivetyperäisiä hiukkaspäästöjä voidaan tehokkaasti pienentää oikean polttotavan ja ilman ohjauksen avulla.

Hiukkasmassapäästöt puun pienpoltossa ovat alimmillaan muutamia mg/MJ, kun hetkelliset pitoisuudet voivat olla useita satoja, jopa 1000 mg/MJ. Jatkuvässä poltossa keskimääräiset massapäästöt olivat 9 – 40 mg/MJ, tehokkaassa panospoltossa luokkaa 50 mg/MJ ja panospoltossa keskimäärin noin 150 mg/MJ. Kiukaille massapäästöt olivat 150 - 200 mg/MJ. Hiilivetyjen osuus massasta kasvoi voimakkaasti, kun päästö oli yli 100 mg/MJ. Tehokkaassa poltossa suurin osa päästöstä on tuhkaa. Pienöljykattiloilla pienhiukkaspäästöt eivät juurikaan ylittäneet arvoa 2 mg/MJ.

Hiukkasten lukumääräpäästöt puun pienpoltossa olivat 10^{13} – 10^{14} kpl/MJ, aluelämpökattiloilla puhdistimien jälkeen 10^{11} - 10^{12} kpl/MJ ja pienöljykattiloilla 10^{11} - 10^{12} kpl/MJ. Puun pienpoltossa lukumääräpäästöt vaihtelivat suhteellisen vähän, mutta olivat pellettipoltossa hakepolttoa alhaisemmat. Ero lukumääräpäästössä verrattuna öljypolttoon johtuu polttoaineiden tuhkapitoisuuseroitasta. Lukumääräpitoisuus ei korreloinut suoraan palamisen hyvyuden eikä muiden päästöjen kanssa.

Keskimääräinen hiukkaskoko oli lähes sama eri pienpolttolaitteissa. Vakio hiukkaskoko on seurausta noki- ja tuhka-agglomeraattien keskikoosta ja jakauman muutokset johtuvat hiilivetyjen kondensoitumista hiukkasten pinnoille. Panospoltossa hiukkaskokojakauma vaihtelee palamistilanteiden mukaisesti. Syttymisvaiheessa jakauma muuttuu nopeasti ja hiukkaskoko on keskimääräistä suurempi. Palamisvaiheessa jakauma pysyy suhteellisen tasaisena ja keskikoko on lähellä koko polton keskimääräistä arvoa. Hiillosvaiheessa hiukkaskoko on pienimmillään. Jatkuvässä poltossa jakauma on tasainen polton aikana ja hiukkaskoko yleensä hieman pienempi kuin panospoltossa. Keskimääräinen hiukkaskoko puun pienpoltossa oli lähellä 100 nm. Hiillosvaiheessa koko oli 50 – 100 nm ja syttymisvaiheessa ja kitupoltossa suurimmillaan 500 – 600 nm.

Tyypillisesti puun pienpolton pienhiukkaset ovat primääripalloista koostuvia agglomeraatteja. Primäärihiukkasten koko on noin 20 – 60 nm. Tilanteissa, joissa hiilivetyjen määrä savukaasussa on suuri (kitupoltto), agglomeraatit voivat olla ”romahtaneita” eli ketjut ovat painuneet osittain kasaan. Tällöin hiilivedyt ovat kondensoituneet kiinteän tuhka-noki-agglomeraattiytimen päälle kerrokseksi. Hiukkasten koostumus vaihtelee merkittävästi eri tilanteissa. Hyvässä palamisolosuhteissa, kuten hyvin toteutetussa stokeripoltossa, hiukkaspäästö koostuu lähes kokonaan lentotuhkahiukkasista. Sen sijaan huonoissa palamisolosuhteissa, kuten usein panospoltossa, lentotuhkan osuus on vain 5-20 % hiukkasmassasta, mikä johtuu runsaasta noen ja hiilivetyjen muodostumisesta.

2 TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHTA

2.1 TAUSTA

Pienhiukkasten havaitut terveyshaitat ovat johtaneet eri puolilla maailmaa kiristyviin ohje- ja raja-arvoihin. Tiukimmat rajat ovat USA:ssa. Myös EU on rajoittanut maksimipitoisuuksia hengitysilman ja päästöjen osalta. Puun pienpoltoa talokohtaisissa tulisijoissa ja lämmityskattiloissa pidetään merkittävänä yhdyskuntailman hiukkasten lähteenä. Eurooppalaista päästönormistoa kehitettäessä ja CAFE- (Clean Air For Europe) ohjelman johtopäätösten perusteella pienpolton hiukkaspäästöihin kiinnitetään huomiota jo lähitulevaisuudessa.

Kaikilla polttoaineilla palaminen perustuu kemialliseen reaktioon, jossa polttoaine reagoi saatavilla olevan hapen kanssa ja tuottaa lämpöenergiaa. Ideaalisessa polttoaineen hiilivetyjen palamisessa tuotetaan vain hiilidioksidia ja vettä. Poltossa syntyy kuitenkin aina myös ei-toivottuja palamistuotteita ja näin savukaasu sisältää pääkaasukomponenttien N_2 , CO_2 , H_2O ja O_2 lisäksi palamattomia kaasuja kuten häkää CO , vetyä H_2 ja osittain palaneita hiilivetyjä sekä palamistuotteita, kuten SO_2 ja NO_x ja erilaisia hiukkasia.

Tämän tutkimuksen keskeisinä kohteina olivat palamishiukkaset ja niiden päästöt. Hiukkasten haitallisuuden kannalta oleellisia ovat palamishiukkasten koko, lukumäärä, pinnan rakenne ja kemiallinen koostumus. Lukumäärä, koko ja tiheys määräävät hiukkasten massan, ja myös massapitoisuus on tärkeä haitallisuutta arvioitaessa. Hiukkaset voivat olla joko kiinteitä tai nestemäisiä ja niiden koko savukaasussa on yleensä alle 1 μm . Hiukkasten viipymäaika ilmassa on pitkä ja ne tunkeutuvat hengityselimiin alveolaarialueelle asti. Alveolaareissa ne voivat läpäistä solukalvon ja vaikuttaa elinten toimintaan.

Puun polton aerosolihiukkaset voidaan yleisesti jakaa tuhka- ja hiilihiukkasiin ja hiiltä sisältäviin hiukkasiin. Hiilihiukkaset voidaan edelleen jakaa pyrolyysituotteina syntyneisiin koksihiukkasiin ja nokihiukkasiin. Savukaasuissa hiilihiukkaset indikoivat aina epätäydellistä palamista. Epätäydellisessä palamisessa menetetty kemiallinen energia merkitsee myös huonompaa palamishyötysuhdetta ja suurempaa laitteiden likaantumista. Nokihiukkaset syntyvät polttoaineesta vapautuvista hiilivedyistä ja muodostavat yleensä 5 - 30 nm kokoisista primääripalloista koostuneita ketjuja. Koksihiukkasia syntyy, kun polttoainepartikkeli ei ehdi palaa loppuun liekissä, jolloin pyrolyysin tuloksena jää jäljelle huokoinen, runsaasti hiiltä sisältävä hiukkanen.

Liekin jälkeen palamishiukkaset joutuvat jäähtyvään savukaasuvirtaan, jolloin niiden kokojakauma ja kemiallinen koostumus muuttuvat. Hiukkasten pinnalle siirtyy kaasufaasista erilaisia yhdisteitä kondensaation ja adsorption seurauksena. Nukleaation seurauksena kaasufaasista voi syntyä myös uusia nanohiukkasia. Nämä koaguloituvat ja agglomeroituvat nopeasti.

Vapautuessaan ilmakehään savukaasu edelleen laimenee ja jäähtyy, jolloin kaasu-hiukkas-tasapaino muuttuu. Kuumissa savukaasuissa kaasu- tai höyrymäisessä muodossa olevat orgaaniset yhdisteet muuttuvat ilmakehässä hiukkasmaiseen muotoon. Kuumasta savukaasusta otettu näyte ei siten vastaa todellista ilmakehään leviävää hiukkaspäästöä. Näytteenotossa ja kokojakauman mittauksessa on välttämättä tunnettava kaasu-hiukkas-ilmiöiden luonne, jotta tuloksen perusteella voidaan arvioida oikein päästöä ilmakehään. Oikea näytteenotto on tärkeä ja siten keskeinen mitattaessa pienhiukkasia.

Pienhiukkasmittauksissa mittalaitteiden on pystyttävä luotettavasti havaitsemaan sekä ultrapieniä (<100 nm) että suurhiukkasia (>2.5 µm). Myös lukumääräpitoisuus ja massapitoisuus on mitattava oikein, jotta hiukkaspäästön haitallisuutta voidaan perustellusti arvioida. Hiukkaset esiintyvät savukaasussa kolmessa olomuodossa: ultrapieniä hiukkasia muodostavina tiivistyvinä höyryinä, nestemäisinä hiukkasina tai kiinteinä hiukkasina ja hiukkasagglomeraatteina. Korkeiden lämpötilojen ja höyry- ja hiukkaspitoisuuksien takia on mitattaessa käytettävä savukaasun laimennusta ja siten myös laimennuksen tekniikka on hallittava.

2.2 TAVOITTEET JA TEHTÄVÄT

Tutkimuksen **yleisenä** tavoitteena oli tuottaa uutta tietoa puun pienpolton päästöistä, päästössä syntyvistä pienhiukkasista ja päästön koostumuksesta eri polttolaitteissa. Kolme päätavoitetta olivat:

1. Kehittää yksinkertainen malli pienhiukkasten muodostumisen ymmärtämiseksi ja tulosten tulkittamiseksi ja soveltaa mallia pienhiukkaspäästön luonteen selvittämiseen eri polttolaitteilla ja -aineilla.
2. Selvittää näytteenottotavan merkitystä mittaustulokseen ja ohjeistaa näytteenottotapaa ja näytteen käsittelyä tulisijojen ja pienen kokoluokan kattiloiden hiukkasmittauksissa.
3. Kartoittaa puun pienpolton pienhiukkaspäästöjen nykytilanne Suomessa merkittävimpien laiteryhmiä päästökertoimien osalta tekemällä hiukkaspäästömittaukset markkinoilla olevilla yleisimmillä polttolaitteilla.

3 POLTTOPUUN PIENKÄYTTÖ SUOMESSA

Seppo Tuomi

Työteho-seura, metsäosasto, PL 13, 05201 Rajamäki

Polttopuun pienkäytön tilastointi perustuu Metsäntutkimuslaitoksen tekemiin selvityksiin noin kymmenen vuoden välein. Käyttötiedot pidetään puunkäyttötiloissa samoina seuraavaan selvitykseen saakka. Seuraavassa esitetään pientalojen polttopuun käyttötietoja lämmityskaudelta 2000/2001, joka on tuorein selvitys aiheesta. Lisäksi esitetään arvioita polttopuun käytön kehityksestä uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman tavoitteiden pohjalta.

Lämmityskaudella 2000/2001 Suomen pientaloissa käytettiin polttopuuta yhteensä 6,1 milj. m³. Määrästä raakapuuta oli 5,1 milj. m³ ja puutähdettä 1,0 milj. m³. Määräarvion keskivirhe oli 4,9 % ja 95 %:n luotettavuusrajat 6,1±0,6 milj. m³. Kokonaiskäyttömäärä oli 0,5 milj. m³ suurempi kuin lämmityskaudella 1992/1993, jolloin vastaava tutkimus tehtiin edellisen kerran.

Polttopuun käytöstä omakotitalojen osuus oli 3,1 milj. m³. Maatiloilla puuta kului 2,2 milj. m³. Vapaa-ajan asunnot käyttivät 0,7 milj. m³ ja muut pienkiinteistöt 0,1 milj. m³. Polttopuusta kului asuintilojen lämmitykseen 4,4 milj. m³. Kiinteistön saunan lämmitykseen käytettiin 1,2 milj. m³. Maatilojen talousrakennusten lämmitykseen ja muuhun toimintaan puuta kului yhteensä 0,5 milj. m³.

Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman mukaan pientalojen polttopuun käytön ilman metsähaketta tulisi lisääntyä vuodesta 2001 vuoteen 2010 noin 19 %. Kasvuvauhdin pitäisi olla noin kaksinkertainen ennen vuotta 2001 toteutuneeseen vastaavan ajan kehitykseen verrattuna.

3.1 POLTTOPUUN KÄYTÖN TILASTOINTI

Metsäntutkimuslaitos tilastoi vuosittain Suomen raakapuun käyttöä. Raakapuulla tarkoitetaan metsästä tulevaa, teollisesti käsittelemätöntä runkopuuta. Puunkäyttötilastoissa raakapuuksi luetaan metsäteollisuuden raakapuun lisäksi pientalokiinteistöjen käyttämä polttoraakapuu. Pientalojen polttopuuhun sisällytetään myös puutähde (jätepuu), joka on pääosin rakennus- ja hakkuutähdettä. Pientalojen polttopuun käyttömäärä selvitetään erillisselvityksin noin kymmenen vuoden välein. Viimeisin erillisselvitys koskee lämmityskautta 2000/2001 (Sevola *ym.*, 2003).

Metsäntutkimuslaitoksen erillisselvitysten polttopuun käyttötiedot pysyvät puunkäyttötilastoissa muuttumattomina seuraavaan tutkimukseen saakka. Tilastokeskus julkaisee kuitenkin vuosittain pientalojen laskennallisen polttopuun kokonaiskäyttömäärän. Laskennan perustana käytetään mainitun erillisselvityksen käyttötietoa, jota korjataan rakennuskannan ja astepäiväluvun muutoksilla (Metsätilastollinen vuosikirja, 2004). Laskennassa ei siten oteta huomioon polttopuun käyttötottumuksissa tapahtuneita muutoksia, jotka saattavat olla merkittäviä.

Lämmityskautta 2000/2001 koskevan Metsäntutkimuslaitoksen polttopuuinventoinnin perusjoukkona olivat noin 1,4 miljoonaa Suomen pientaloa. Aineistossa omakotitaloja oli 59 %, maatiloja 11 %, vapaa-ajan asuntoja 27 % ja muita pienkiinteistöjä 3 %. Omakotitaloihin luettiin myös paritalot. Tutkimus ei sisältänyt rivi- eikä kerrostaloja. Myös myymälä-, majoitus- ja koulurakennukset olivat tutkimuksen ulkopuolella. Kaukolämpölaitosten, metsäteollisuuden energiantuotannon sekä metsien virkistyskäytön (autiotuvat, taukopaikat, nuotiopaikat yms.) polttopuuta ei ollut myöskään aineistossa mukana.

Tutkimusaineisto oli kerätty koko maan kattavana kirjekyselynä. Otos oli poimittu Väestörekisterikeskuksen väestötietojärjestelmästä maaliskuun 2001 tilanteesta. Otokseen oli valittu systemaattisesti joka 130. kiinteistö. Otoksen koko oli 10734 pienkiinteistöä. Vastaamatta jättäneille tehdyn katoanalyysin aineisto mukaan lukien hyväksytyjä vastauksia oli aineistossa 6049 eli 56 % otoksesta.

3.2 POLTTOPUUN KOKONAISKÄYTTÖ

Lämmityskaudella 2000/2001 Suomen pientaloissa käytettiin polttopuuta yhteensä 6,1 milj. m³ (taulukko 3.1). Määrästä raakapuu oli 5,1 milj. m³ ja puutähdettä 1,0 milj. m³. Määräarvion keskivirhe oli 4,9 % ja 95 %:n luotettavuusrajat 6,1 ± 0,6 milj. m³.

Taulukko 3.1. Pientalojen polttopuun käyttömäärä lämmityskausilla 1992/1993 ja 2000/2001 kiinteistötyypin mukaan (Sevola *ym.*, 2003).

Kiinteistötyyppi	Lämmityskausi		Muutos	
	2000/2001	1992/1993	1992/1993 2000/2001	1992/1993 2000/2001
	Polttopuun käyttömäärä, milj. m ³			%
Omakotitalo	3,1	2,3	0,9	38
Maatila	2,2	2,5	-0,3	-12
Vapaa-ajan asunto	0,7	0,6	0,1	13
Kaikki	6,1	5,6	0,5	9

m³ on noin 2,1 MWh

Pientalojen käyttämän polttopuun sisältämä energiamäärä oli noin 46 PJ (13 TWh). Tilastokeskuksen energiatilastojen mukaan pientalot käyttivät vuonna 2001 lämmitysenergiaa yhteensä 114 PJ (Energiatilastot 2001). Polttopuun osuus lämmitysenergiasta oli siten 40 %.

Edellinen pientalojen polttopuun käyttötutkimus koski lämmityskautta 1992/1993. Tuolloin pientalojen polttopuun kulutus oli 5,6 milj. m³. Polttopuun käyttö oli siten vajaassa kymmenessä vuodessa lisääntynyt 0,5 milj. m³ eli 9 %. Kauden 2000/2001 tutkimuksen määräraivion 95 %:n luotettavuusväli (5,5 - 6,7 milj. m³) on osittain päällekkäinen kauden 1992/1993 luotettavuusväliin (5,1 - 6,1 milj. m³).

Omakotitalot käyttivät polttopuuta eniten eli 3,1 milj. m³. Omakotitalojen puun käyttö oli lisääntynyt lämmityskaudesta 1992/1993 noin 0,9 milj. m³. Maatiloilla polttopuuta kului 2,2 milj. m³, mikä oli 0,3 milj. m³ aiempaa selvitystä vähemmän. Maatilat olivat menettäneet asemansa eniten polttopuuta käyttävänä kiinteistötyypinä. Vapaa-ajan asunnot polttivat puuta noin 0,7 milj. m³, missä oli lisäystä 13 %. Muut pienikiinteistöt kuluttivat vajaat 0,1 milj. m³.

Aktiivisesti viljeltyjen maatalojen lukumäärän supistuminen on pääsyy polttopuun kokonaiskäytön vähenemiseen maatiloilla. Huolimatta maatalojen polttopuun kokonaiskäytön vähenemisestä, tilojen keskikulutus oli edelliseen inventointiin verrattuna hieman kasvanut. Osa omakotitalojen polttopuun käytön lisäyksestä johtunee tuotantonsa lopettaneista maatiloista. Nämä ns. ”passiivitalat” luokiteltiin tutkimuksessa omakotitaloiksi, koska tiloilla edelleen asutaan.

Polttopuusta kului asuintilojen lämmitykseen valtaosa eli 4,4 milj. m³. Kiinteistön saunan lämmitykseen käytettiin 1,2 milj. m³. Maatalojen talousrakennusten lämmitykseen ja muuhun toimintaan puuta kului yhteensä 0,5 milj. m³.

3.3 POLTTOPUUN KÄYTTÖ PÄÄLÄMMITYSTAVAN MUKAAN

Lämmityskaudella 2000/2001 polttopuuta käytti pienikiinteistöistä 82 % (Kuva 3.1). Tämä vastasi lukumäärältään runsasta miljoonaa pientaloa. Polttopuuta käyttämättömiä oli omakotitaloista 20 %, vapaa-ajan asunnoista 10 % ja maatiloista 7 %.

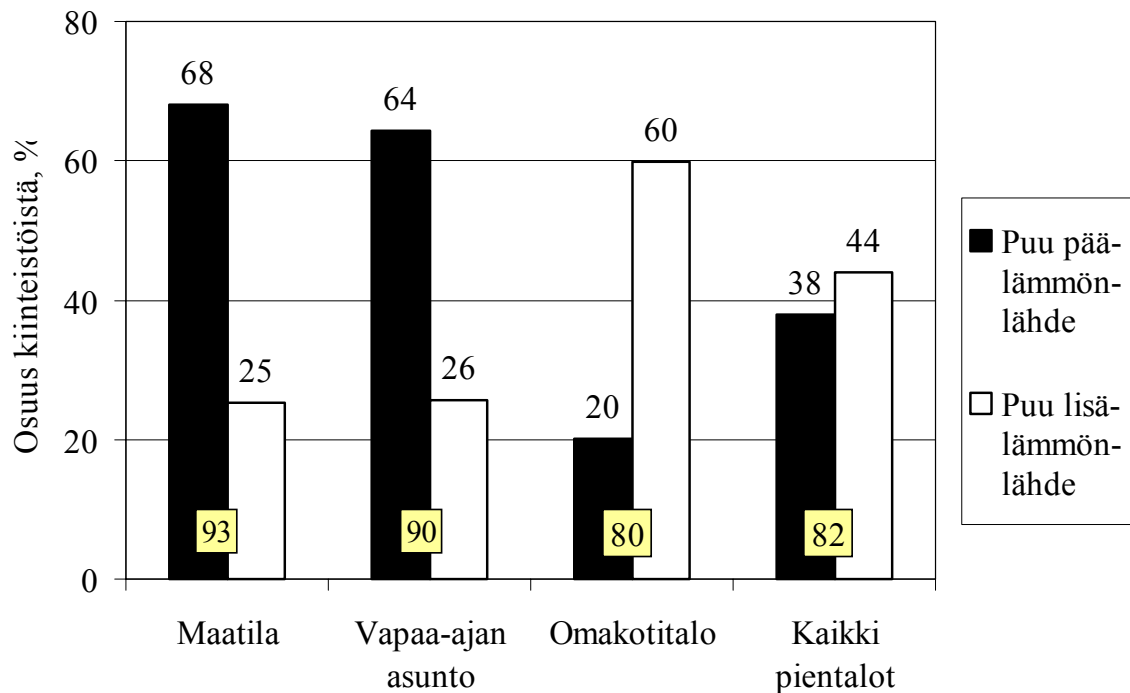
Maatiloilla ja vapaa-ajan asunnoissa puu oli pääasiallisena lämmönlähteenä kahdella kolmasosalla, omakotitaloista vain joka viidennellä. Polttopuu oli kuitenkin noin 60 %:lle omakotitaloista tärkeä lisälämmönlähde. Puuhun perustuvista pientalojen päälämmitystavoista noin 80 % oli uuni- ja 20 % keskuslämmityksiä.

Suhteellisesti eniten puuta poltettiin puukeskuslämmityksellä varustetuissa kiinteistöissä, jotka kuluttivat keskimäärin 18,4 m³ vuodessa (Taulukko 3.2). Uunilämmitteisissä taloissa puuta poltettiin selvästi keskuslämmitteisiä vähemmän eli keskimäärin 4,4 m³.

Vaikka maatalojen polttopuun kokonaiskäyttö oli vähentynyt, niiden keskikulutus oli päälämmitystavasta riippumatta suurin. Mm. omakotitaloihin verrattuna maatalojen keskikulutus oli noin nelinkertainen. Pääasiassa sähköllä ja öljyllä lämmittäneet maatilat polttivat puuta jopa enemmän kuin omakotitalot keskimäärin. Sähkölämmitteiset omakotitalot kuluttivat puuta keskimäärin öljylämmitteisiä enemmän.

Taulukko 3.2. Pientalojen polttopuun kesikäyttö pälämmitystavan ja kiinteistötyypin mukaan lämmityskaudella 2000/2001 (Sevola ym., 2003).

Pälämmitystapa	Kiinteistötyyppi			
	Omakotitalo	Maatila	Vapaa-ajan asunto	Kaikki
	Polttopuun käyttö keskimäärin, m ³			
Uunilämmitys	7,1	10,0	2,0	4,4
Keskuslämmitys				
- Puu	13,7	25,6	..	18,4
- Öljy	1,8	8,2	..	2,3
- Sähkö	2,5	7,8	..	2,8
Suora sähkölämmitys	2,9	6,5	1,6	2,7
Kauko- ja aluelämpö	1,1	1,2
Kaikki	3,8	14,4	1,8	4,4



Kuva 3.1. Pientalojen polttopuun käytön yleisyys kiinteistötyypin mukaan lämmityskaudella 2000/2001 (Tuomi & Peltola, 2003).

3.4 POLTTOPUUN HANKINTATAPA

Pientalojen polttopuusta hankittiin omasta metsästä yli puolet eli 3,3 milj. m³ (Taulukko 3.3). Muuten omatoimisesti hankittiin noin neljännes eli 1,7 milj. m³. Tähän hankintatapaan luettiin muun muassa hakkuu- ja metsänhoitokohteista ilmaiseksi saatu puutähde sekä rakennustähde. Ostetun polttopuun osuus oli vajaa viidennes eli 1,1 milj. m³. Tulevaisuudessa ostetun polttopuun osuus lisääntynee.

Taulukko 3.3. Pientalojen polttopuun hankintatapa kiinteistötyypin mukaan lämmityskaudella 2000/2001 (Sevola ym., 2003).

Kiinteistötyyppi	Polttopuun hankintatapa			
	Omasta metsästä hankittu	Ostettu	Muulla tavoin hankittu	Yhteensä
	Polttopuun määrä, milj. m ³			
Omakotitalo	1,0	0,9	1,2	3,1
Maatila	1,9	0,1	0,2	2,2
Vapaa-ajan asunto	0,4	0,1	0,2	0,7
Kaikki	3,3	1,1	1,7	6,1

Polttoon käytetty raakapuu (5,1 milj. m³) jakautui puulajeittain seuraavasti: koivu 1,8 milj. m³, muu lehtipuu 1,1 milj. m³, mänty 1,1 milj. m³ ja kuusi 1,2 milj. m³. Valtaosa puutähteestä (1,0 milj. m³) oli rakennusjätepuuta (37 %), hakkuutähdettä (31 %) tai sahateollisuuden puutähdettä (25 %).

Pientaloissa käytetystä polttopuusta valtaosa poltetaan edelleen halkoina ja pilkkeinä. Hakkeena käytetyn puun osuus oli vain noin kuusi prosenttia lämmityskaudella 2000/2001 käytetystä polttopuusta. Hake käytettiin pääosin maataloilla.

Uusina pientalopolttoaineina kaupallisille markkinoille oli tullut myös puupelletit ja –brikitit. Niiden käyttö perinteeseen polttopuuhun verrattuna oli lämmityskaudella 2000/2001 vähäistä. Erityisesti pellettien käytön arvioidaan kuitenkin lähivuosina pientaloissa lisääntyvän voimakkaasti.

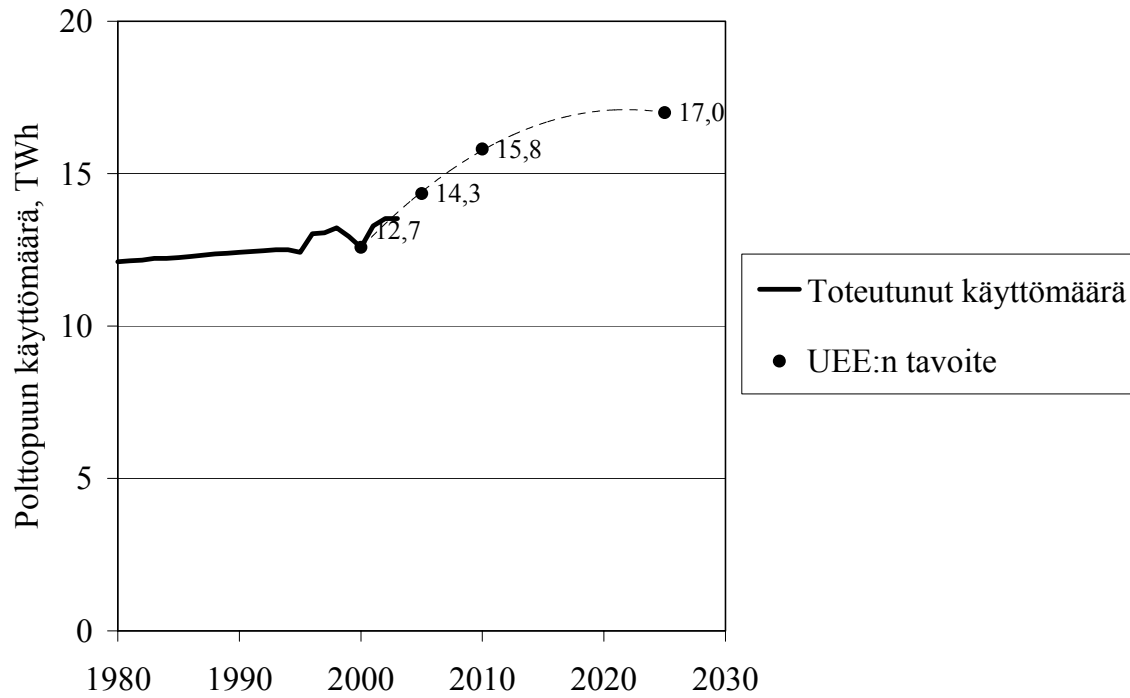
3.5 POLTTOPUUN PIENKÄYTÖN LISÄÄMISTAVOITTEET

Vuonna 1999 Suomi sai uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman, joka uudistettiin vuonna 2002. Ohjelmassa esitetään uusiutuvien energialähteiden tulevaisuuden käyttötavoitteet ja keinoja niiden saavuttamiseksi. Määrälliset käyttötavoitteet on asetettu erikseen vuosille 2005, 2010 ja 2025. Ohjelman päätavoitevuotena pidetään vuotta 2010. Ohjelmassa esitetään tavoitteet myös pientalokiinteistöjen polttopuulle.

Ohjelman kokonaistavoitteena on lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä vuodesta 2001 vuoteen 2010 noin 30 %. Puuperäisten polttoaineiden lisääminen muodostaa edistämishjelman rungon, sillä lisäyksestä puupolttoaineiden osuus on noin 70 %. Pientalojen polttopuun käytön ilman metsähaketta tulisi lisääntyä vuodesta 2001 (12,7 TWh) vuoteen 2010 (15 TWh) noin 19 % (kuva 3.2). Kasvuvauhdin pitäisi siten olla noin kaksinkertainen ennen vuotta 2001 toteutuneeseen vastaavan ajan kehitykseen verrattuna.

Mikäli pienkäytön kasvu toteutuu tavoitteen mukaisesti, merkinnee se erityisesti puupellettien käytön lisääntymistä, minkä käyttö vertailuvuonna oli vielä vähäistä. Myös kaupallisen pilkkeen käyttö toissijaisena lämmönlähteenä kasvaa erityisesti sähkölämmitystaloissa.

Pientalojen käyttämälle metsähakkeelle ei ole asetettu edistämishjelmassa omaa tavoitetta, vaan se on sisällytetty metsähakkeen kokonaiskäyttöön. Metsähakkeen kokonaiskäytölle on asetettu haastava tavoite; se on tarkoitus nelinkertaistaa vuoteen 2010 mennessä. Pientalokiinteistöjen osalta metsähaketta käytetään tällä hetkellä lähinnä maataloilla. Käyttömäärän lisääminen kokonaistavoitteen mukaisessa suhteessa ei liene pientaloissa ilman erityistoimia mahdollista. Maataloilla hakkeella korvataan usein pilkettä, jolloin hakkeen käyttö ei lisää välttämättä polttopuun kokonaiskäyttöä.



Kuva 3.2. Pientalojen polttopuun käyttö ilman metsähaketta sekä uusiutuvien energialähteiden edistämishjelmissä (UEE) asetettu käyttötavoite (Energiakatsaus, 2005; Uusituvan energian edistämishjelma, 2003).

4 POLTTOLAITTEET PUUN PIENPOLTOSSA

Heikki Oravainen, Veli Linna

VTT Prosessit, Energian tuotanto, PL 1603, 40101 Jyväskylä

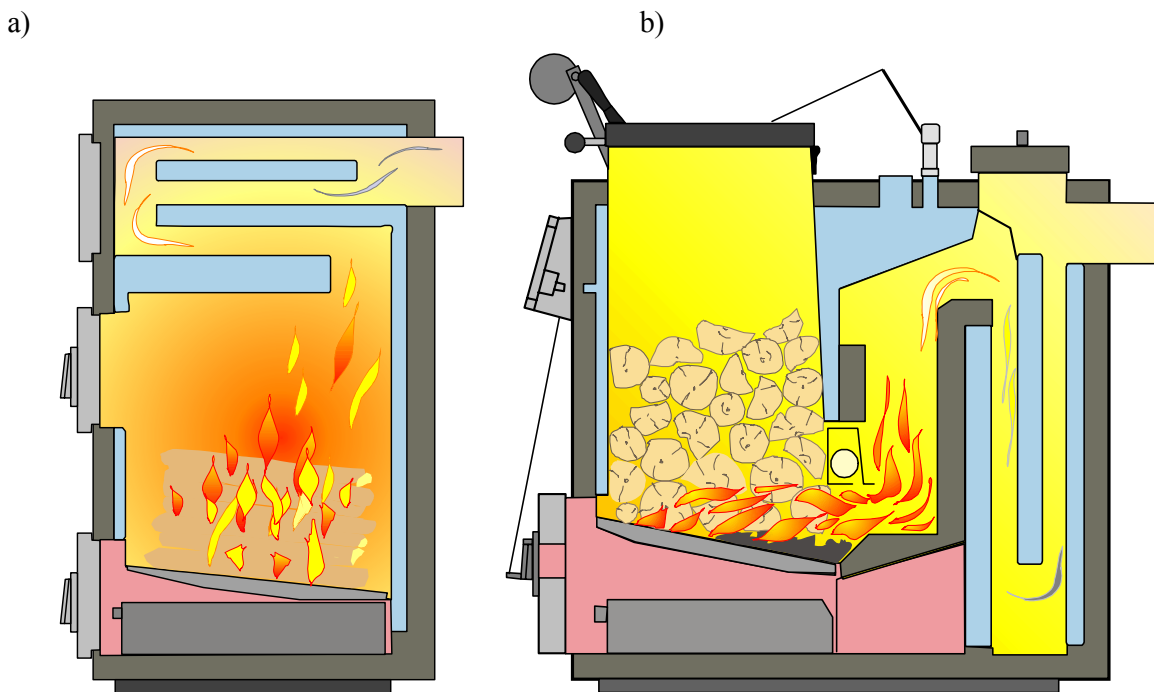
Omakotitalojen lämmityksessä yläpalokattila on Suomessa eniten käytetty kattilatyypiksi pilkkeiden polttoon. Yksinkertaisen rakenteen takia yläpalokattilan hinta on kohtuullinen. Myös kaksoispesäkattiloita käytetään paljon, mutta tavallisesti ne on tarkoitettu tilapäiseen puun polttoon. Keski-Euroopassa myytävät kattilat ovat lähes poikkeuksetta tekniikaltaan yläpalokattiloita kehittyneempiä käänteispolokattiloita. Korkeamman hinnan takia käänteispolokattiloiden myynti Suomessa on vähäistä. Suomessa hinta on määräävä tekijä hankintapäätöstä tehtäessä.

Haketta käytetään lähinnä maatalouden rakennusten ja suurempien yksittäisten kiinteistöjen lämmittämiseen haja-asutusalueella. Tavallisin maataloille toimitettava kattilateholuokka on 100 – 200 kW. Polttolaitteena on lähes poikkeuksetta stokeri. Tiukkojen päästörajoiden ja paloturvallisuusvaatimusten takia Keski-Euroopassa käytettävät tämän kokoluokan hakelaitokset ovat suomalaisia kehittyneempiä mm. polton säädön ja muun instrumentoinnin osalta.

Suomessa käytettävät pellettipolttimet ovat valtaosin alkuperältään ruotsalaisia. Omakotitalokäytössä laitteet on suunniteltu asennettaviksi kattilaan öljypolttimen tilalle. Polttimia on kolmea perustyyppiä 500 kW teholuokkaan asti. Keski-Euroopassa puupellettejä käytetään lähinnä omakotitalojen lämmitykseen. Polttotekniikka ei poikkea paljon Suomessa käytettävästä, mutta laitteet ovat pitemmälle automatisoituja.

4.1 OMAKOTILUOKAN PILKEKATTILAT

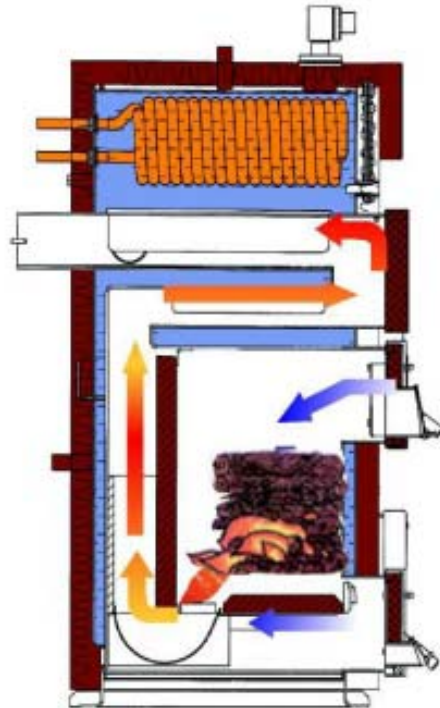
Omakotitalojen lämmittämiseen tarkoitettuja pilkekattiloita on useita eri tyyppiä. *Yläpalokattilat* on yleisimpiä pilkeen polttoon tarkoitettuja kattiloita Suomessa. Yksinkertaisesta rakenteesta johtuen kattilan hinta on kohtuullinen. Polttotapahtuma on samanlainen kuin tulisijoissa. Polttoaine lisätään isoina panoksina, ja koko polttoainepanos syttyy palamaan kerralla. Palamisilma ohjataan kattilan pohjalla olevan rakoarinnan läpi ja kattilan luukkujen kautta sekundaari-ilmaksi. Yleensä kattila liitetään varaajaan, jonka koko on 1–5 m³. Varaaja mahdollistaa sen, että kattilaa voidaan polttaa nimellisteholla, jolloin päästöt ovat yleensä alhaisimmat, palaminen tehokkainta ja kokonaislämmitys aika jää muutamaan tuntiin vuorokaudessa. Suomessa on vielä toistaiseksi mahdollista käyttää yläpalokattilaa ilman varaajaa, toisin kuin esimerkiksi Ruotsissa. Pienellä teholla polttaminen aiheuttaa suuria päästöjä. Kuvassa 4.1a esitetään yläpalokattilan periaate.



Kuva 4.1. Yläpalokattilan (a) ja alapalokattilan (b) periaate (piirros: VTT Prosessit).

Kaksoispesäkattila on myös varsin yleinen Suomessa. Kaksoispesäkattilassa on oma tulipesä öljypolttimelle ja oma, yleensä yläpaloperiaatteella toimiva tulipesä pilkkeiden polttamiseen. Vanhemmissa kattiloissa pilkepesä on tarkoitettu vain tilapäiseen käyttöön, koska se on mitoitukseltaan pieni eikä sovellu pääasialliseen puulla lämmittämiseen ilman varaajaa. Suurin naapurivalitusten kohde Suomessa on juuri vanhat kaksoispesäkattilat, joissa poltetaan jatkuvasti puuta.

Kaksoispesäkattilat ovat viime vuosina kehittyneet. Puutulipesän koko on kasvanut ja puutulipesää on saatavana myös ns. käänteispaloperiaatteella toimivana. Kuvassa 4.2 esitetään Kaukora Oy:n valmistaman Jäspi-Triplex –kattilan rakenne. Kuva on kopioitu yrityksen www-sivuilta. Valmistajan edustajan mukaan näitä kattiloita menee lähinnä vientiin ja ne on hyväksytty mm. Saksan markkinoille, jossa vaaditaan kattiloiden suoritusarvojen testaus ja päästörajojen alittaminen.

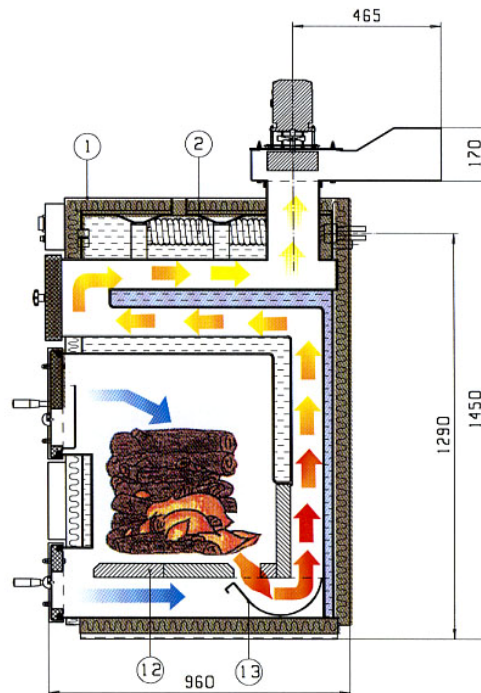


Kuva 4.2. Puupesä on tässä kattilassa käänteispaloperiaatetta muistuttava tulipesä (lähde: Kaukora Oy:n www-sivut).

Alapalokattiloissa polttoaine kaasuuntuu ja palaa osittain pienessä osassa polttoainepanosta kattilan alaosassa. Syntyvät kaasut ja liekit johdetaan erilliseen jälkipalo-osaan loppuun palamista varten. Tuhka valuu arinan läpi tuhkatilaan. Alapalokattiloissa käytetään polttoaineena klapeja, haketta ja palaturvetta. Alapalokattilat toimivat joko luonnonvedolla tai palamisilma ohjataan palavaan kerrokseen puhaltimen avulla. Alapalokattiloissa palamistapahtuma on lähempänä jatkuvaa polttoa kuin yläpalokattiloissa. Palaminen on puhtaampaa ja tehokkaampaa, eikä varaaja ole aina välttämätön, joskin suositeltava. Alapalokattilat ovat kalliimpia kuin yläpalokattilat. Kuvassa 4.1b esitetään alapalokattilan periaate.

Uusin pienkattilatyyppejä on *käänteispalokattila*. Siinä palamiskaasut pakotetaan kulkemaan kattilan polttoainekerroksen alaosassa olevan, pienen arinan läpi usein keraamiseen jälkipalotilaan, jossa kaasu palaa korkeassa lämpötilassa. Käänteispalokattila on käytännössä parannettu muunnos alapalokattilasta, jossa kaasujen jälkipolttu hallitaan paremmin. Korkeasta lämpötilasta johtuen kattilan rakennusmateriaalit ovat kovassa rasituksessa.

Käänteispalokattila toimii parhaiten, jos siinä on integroituna savukaasujen poistoimuri. Luonnonvedolla palamista on vaikeampi hallita eikä lopputulos ole niin hyvä. Suomessa käänteispalokattilat eivät ole yleisiä. Kuluttajat ostavat mahdollisimman halpoja polttolaitteita, joita on helppo käyttää. Kuluttajien vaatimukset ohjaavat myös laitevalmistajia. Suomalaisen Kaukora Oy:n valmistaman käänteispalokattilan periaate selviää kuvasta 4.3, joka on kopio yrityksen esitteestä. Vastaavantehoiseen yläpalokattilaan verrattuna käänteispalokattilan ohjehinta on 73 % korkeampi.



Kuva 4.3. Jäspi Ecopuu 45 –kattilan periaatekuva (lähde: yrityksen esite).

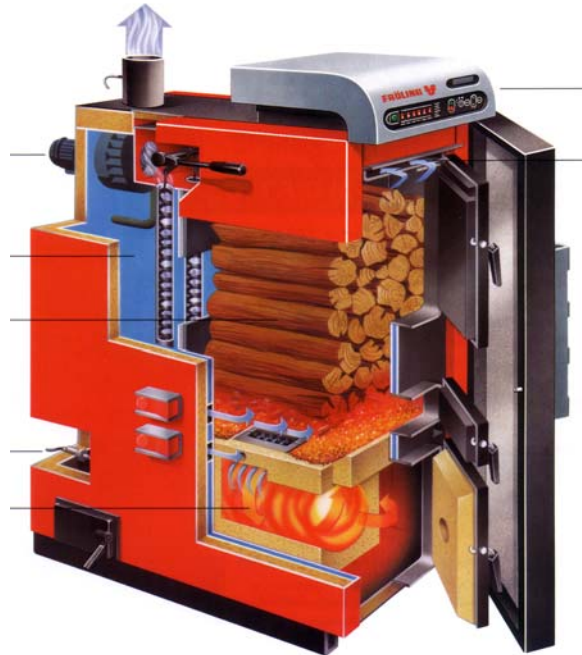
Tilanne Keski-Euroopassa

Keski-Euroopassa, varsinkin Itävallassa ja Saksassa myytävät kattilat ovat poikkeuksetta ns. käänteispololttoon perustuvia kattiloita. Kuvassa 4.4 esitetään leikkauskuva tyypillisestä pilkekattilasta. Suomalaisiin kattiloihin verrattuna näissä on mm. seuraavia eroja:

- Puusta vapautuvien kaasujen palamista varten on tulenkestävillä muurauksilla vuorattu jälkipalotila.
- Kaksinkertaiset luukut. Tällä pystytään pienentämään lämpöhäviöitä, joilla on suuri merkitys pienkattiloiden vuosihyötysuhteeseen.
- Kattilarakenteeseen integroitu savukaasuumuri, jolla pidetään kattilan sisällä sopiva alipaine.
- Putkikonvektio, jossa on myös manuaalinen hiukkasten ja noen poistosysteemi vipua liikuttamalla.
- Käytetty teollista muotoilua, joka suomalaisissa puukattiloissa on usein prioriteetissa takalalla.
- Etupaneeli, jossa on säätöjärjestelmän ohjaukset sekä näyttöjä kattilan toiminta-arvoista.
- Lambda-sondin mittaukseen perustuva jatkuva säätö, jonka ansiosta päästöt ovat alhaiset.

Kattilat ovat hyvin kehittyneitä. Niiden hyötysuhde on korkea ja päästöt alhaiset. Luonnollisesti tällaiset kattilat ovat hinnaltaan aivan eri luokkaa kuin Suomessa myytävät kattilat. Hinta suomalaisen peruskattilaan verrattuna on noin viisinkertainen. Päästömääräysten takia Keski-Euroopassa ei ole kuitenkaan mahdollista ottaa käyttöä vanhaan teknologiaan perustuvia kattiloita. Aikaisemmin todettiin, että myös suomalaisilla laitevalmistajilla on tuotevalikoimassa käänteispolokattiloita. Ne

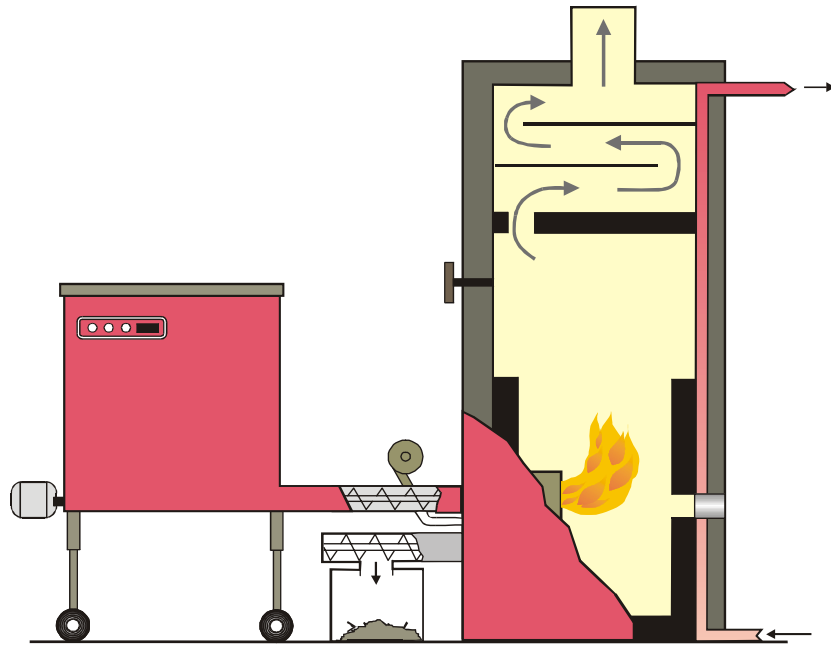
eivät kuitenkaan ole kaikilta osin yhtä kehittyneitä kuin edellä esitelty kattila. Suomalaisissa kattiloissa ei ole sovellettu kehittyntä, savukaasun jäännöshappipitoisuuteen perustuvaa säätötekniikkaa. Näin ollen palamistulos riippuu enemmän käyttäjästä. Muotoiluun ja lämpöhäviöiden minimointiin ei myöskään kiinnitetty samanlaista huomiota.



Kuva 4.4. Keskieurooppalaisen pilkekattilan leikkauskuva (Lähde: itävaltalaisen Fröhling GmbH:n esite).

4.2 HAKKEENPOLTTOlaitteistot

Suomessa haketta käytetään lähinnä maatalouskiinteistöjen ja isompien yksittäisten rakennusten, kuten haja-asutusalueen koulujen lämmittämiseen. Niissä ns. lämpöyrittäjätoiminta on yleistynyt eli kunta on ulkoistanut lämmön tuotannon ulkopuoliselle yrittäjälle. Maatilojen koko on Suomessa kasvanut ja sen takia myös hakelaitteiden tehontarve on kasvanut. Yleisimmin mautiloille toimitetaan nykyisin 100 – 200 kW:n laitteita. Myös konttirakenteet ovat aivan viime vuosina yleistyneet. 20 – 40 kW hakelaitteiden myynti on nykyisin vähäistä vaikka se oli yleisin teholuokka vielä 10 - 20 vuotta sitten. Hakkeenpolttolaitteet ovat pienemmässä teholuokassa lähes poikkeuksetta ns. stokeripolttolaitteita. Periaatteena on että polttoaine palaa pienen poltinpään arinalla. Poltin on joko kokonaan kattilan tulipesän sisällä tai osittain ulkopuolella, jolloin ainoastaan kuumat savukaasut johdetaan kattilaan. Kuvassa 4.5 esitetään ns. stokeripolttimen periaate. Keski-Euroopassa pienkiinteistöissä ei juurikaan käytetä haketta. Sen sijaan pelletti on omakotitalojen polttoaine.



Kuva 4.5. Suomalaisen stokeripolttimen periaatekuva.

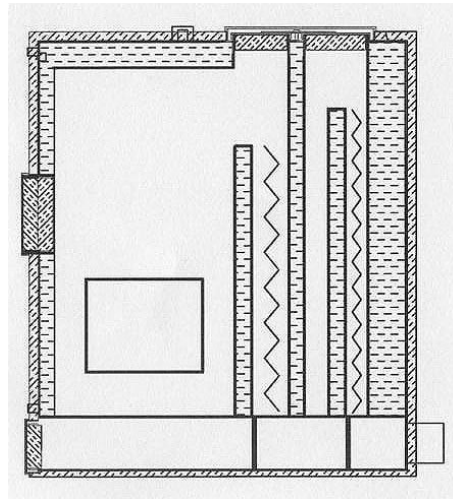
4.3 LÄMPÖKESKUKSET

4.3.1 Suomalaiset lämpökeskusten hakepolttolaitteet

Kuvassa 4.6 esitetään 200 kW:n stokeripoltin, jossa on vesijähdytteinen poltinosa. Koko laitteisto on asennettu siirrettävään konttiin. Kaikki suomalaiset suurkiinteistöjen hakepolttimet ovat lähes vastaavalla periaatteella toimivia. Valmistajia on muutamia. Yleensä poltinten säätöjärjestelmä perustuu on-off -periaatteeseen ja syöttönopeuden ja palamisilman määrän manuaaliseen säätöön. Suomalaisilla laitevalmistajilla on nykyään saatavilla myös kehittyneempiä säätöjärjestelmiä, jotka perustuvat savukaasujen jäännöshapen mittaukseen ja polttoaineen- ja palamissyötön ohjaamiseen niiden perusteella.



Kuva 4.6. 200 kW:n vesijähdytteinen stokeripoltin. Koko järjestelmä on rakennettu siirrettävään konttiin.

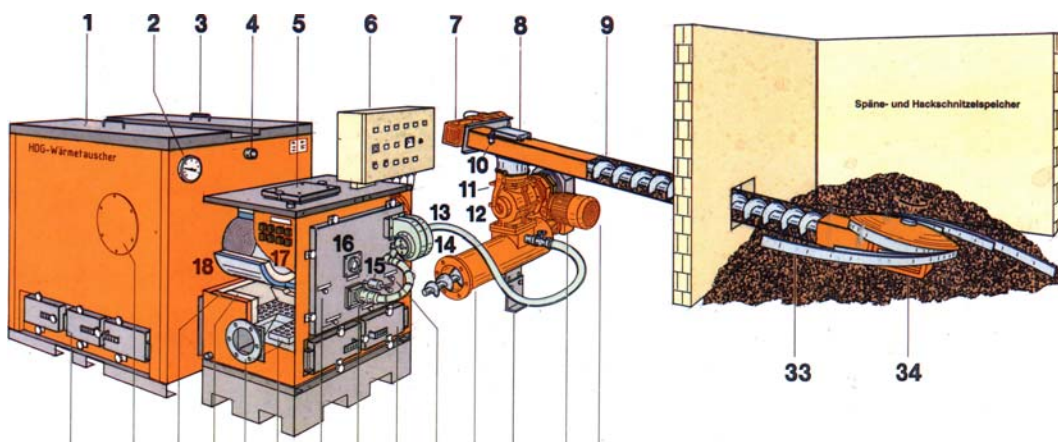


Kuva 4.7. Teräslevystä hitsatun kattilan periaatekuva (lähde: Veljekset Alatalkkari Oy).

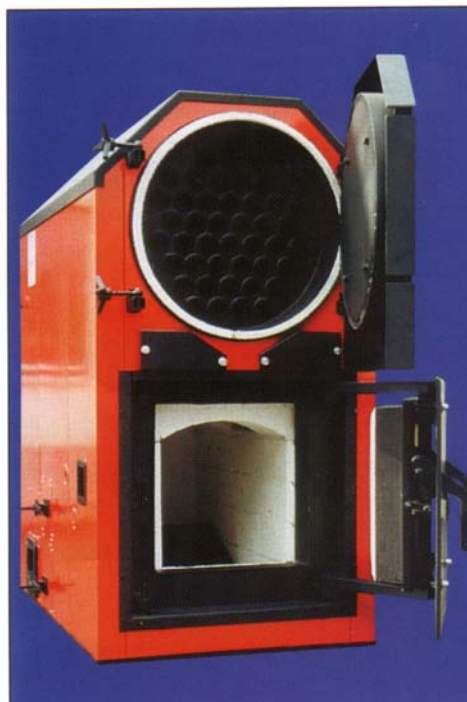
Lämmön talteenottoon käytettävät kattilat ovat Suomessa yleensä teräslevystä hitsattuja laatikkokattiloita, joissa on tulipesä ja pystysuuntainen konvektio-osa. Kuvassa 4.7 esitetään tällaisen kattilan periaatekuva. Tulipesissä käytetään yleensä vähän muurauksia. Kattilat poikkeavat aika lailla keskieuropalaisista kattiloista ja ovat yksinkertaisempia rakenteeltaan.

4.3.2 Keskieuropalaiset kiinteistöjen hakepolttolaitteet

Hakkeen poltossa suositaan etupesäratkaisuja tai kattiloita, joissa on muurattu pesä ennen lämmön talteenottoa. Ne ovat sisältä muurattuja rakenteita eikä lämpöä siirretä veteen tässä vaiheessa. Näin palamislämpötila saadaan korkeaksi, joka mahdollistaa myös kosteamman polttoaineen tehokkaan palamisen. Tyypillistä on myös useat turvajärjestelmät ns. takapalon estämiseksi. Tästä suomalaisissa ratkaisuissa monesti säästetään, koska täällä ei ole selviä määräyksiä olemassa. Kuten kuvasta näkyy, hakelaitteetkin ovat yleensä monimutkaisempia kuin suomalaiset laitteet. Myös pienemmissä hakkeenpolttolaitteissa on yleensä jäännöshapen mittaukseen perustuva palamisen säätö vakiovarusteena. Varsinkin isompitehoiset kattilat ovat rakenteeltaan erilaisia kuin suomalaiset kattilat. Kuvassa 4.8 esitetään tyypillisen keskieuropalaisen hakepolttolaitteen periaatekuva.



Kuva 4.8. Saksalainen HDG Bavaria GmbH:n hakepolttolaitteisto (lähde: yrityksen esite).



Kuva 4.9. Ison keskieurooppalaisen kiinteistökattilan rakenne.

Kuvassa 4.9 esitetään ison keskieurooppalaisen kiinteistökattilan rakenne. Kattilan ala-osa on täysin muurattua rakennetta. Palokaasuille saadaan korkea lämpötila ja pitkä viipymäaika. Lämpö siirretään veteen kattilan yläosassa olevassa konvektio-osassa, joka on putkirakenteinen. Rakenne on siis täysin erilainen kuin suomalaisissa kiinteistökattiloissa ja edullinen palamisen kannalta. Sen sijaan lentotuhkaa voi kertyä vaakatasossa oleviin konvektioputkiin. Tosin puhdistaminen on helpompaa vaakasuunnassa kuin pystysuunnassa. Kattilassa on paljon muurattua rakennetta, joka nostaa hintaa.

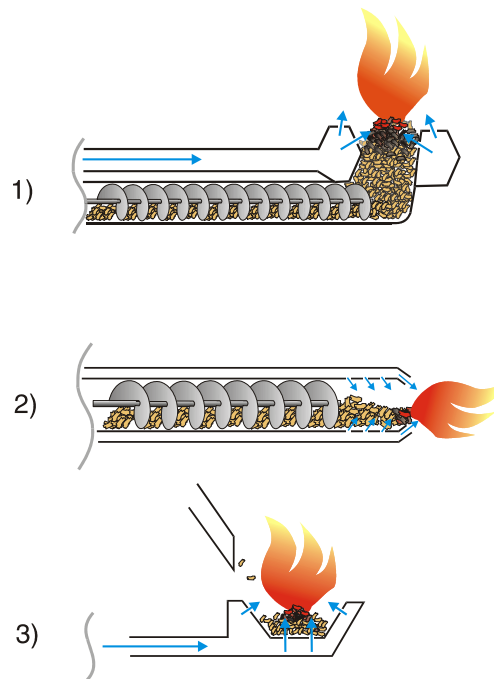
4.4 PUUPELLETTIEN POLTTOLAITTEET

4.4.1 Omakotitalot

4.4.1.1 Suomalaiset omakotitalojen pellettipolttolaitteet

Suomessa noudatetaan puupellettien käytössä ns. Ruotsin mallia. Olemassa olevan öljykattilan öljypoltin korvataan pellettipolttimella ja rakennetaan kattilahuoneen viereen pellettivarasto, josta pelletit siirretään ruuvisyöttimillä polttimelle. Yleensä Suomessa käytettävät pellettipolttimet ovatkin ruotsalaisia. Toimintaperiaatteeltaan polttimia on kolmenlaisia. Toimintaperiaatteet esitetään kuvassa 4.10.

Kun öljykattilaan asennetaan pellettipoltin, yhdistelmä ei ole toiminnaltaan paras mahdollinen. Kattilasta saatava teho alenee n. 80 %:iin öljyllä saatavasta tehosta. Se ei kuitenkaan ole yleensä ongelma, koska omakotitalojen kattilat ovat ylitehoisia tarpeeseen nähden. Tämä johtuu käytännön syistä. Nykyaikaisissakin omakotien paineöljypolttimissa ei voi käyttää alle 0,5 galloniaa per tunti suutinta, joka johtaa n. 20 kW:n tehoon. Pienemmät suuttimet voivat tukkeutua. Ehkä suurempi haitta on siitä, että pellettipolttimen puhdistaminen ja tuhkan poisto ovat hankalia toteuttaa öljykattilasta, jossa tällaista tarvetta ei ole huomioitu. Ylipaineessa toimivaan öljykattilaan pellettipoltinta ei voi asentaa lainkaan.



Kuva 4.10. Pellettipoltinten toimintaperiaatteet (piirros Claes Tullin/SP Ruotsi).

Kuvassa 4.11 esitetään ruotsalainen pellettipoltin asennettuna lämmityskattilaan. Kattila on suomalaista valmistetta. Tässä tapauksessa kattila on kiinteän polttoaineen yläpaloinen kattila ja siinä on huomioitu myös tuhkan poisto öljykattilaa paremmin. Puupelletit on varastoitu kattilahuoneen seinän takana olevaan varastoon, jonne pelletit puhalletaan erityisestä pellettien kuljettamiseen suunnitellusta, pneumaattisesti purettavasta kuorma-autosta. Pelletit siirretään polttimelle kuvassa näkyvän ruuvikuljettimen avulla (valkoinen vinossa oleva).



Kuva 4.11. Ruotsalainen PellX-pellettipoltin asennettuna lämmityskattilaan.

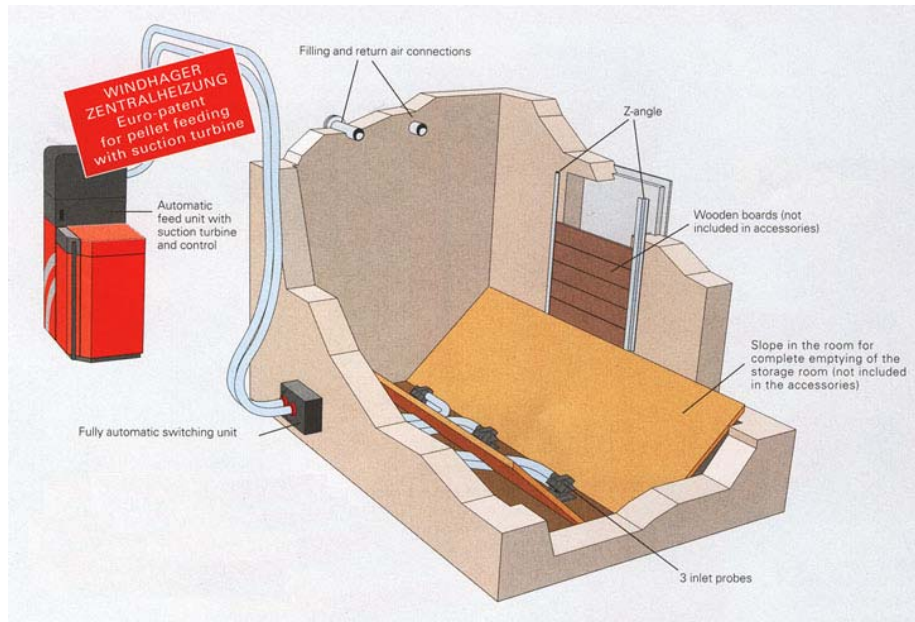
Puupellettejä voidaan hyvin polttaa myös edellä esitellyillä hakepolttimilla. Ne soveltuvatkin paremmin hieman huonolaatuisen pelletin polttoon.

4.4.1.2 Keskieurooppalaiset omakotitalojen pellettipolttolaitteet

Kuvassa 4.12 esitetään tyypillisen itävaltalaisen pellettilaitteiston periaate. Pääasiallinen ero on, että polttolaitteisto ja kattila on integroitu yhdeksi kokonaisuudeksi. Sen lisäksi erona on, että laitteistot on varustettu pitkälle viedyllä automatiikalla, joka säätelee palamista, lämmöntuottoa, puhdistaa kattilaa ja poistaa tuhkan. Yleensä koko talon lämmönjaon säätö on myös yhdistetty lämmöntuotannon säätöön. Myös polttoaineen siirtoon varastosta polttolaitteelle on kehittyneitä järjestelmiä, esim. pneumaattinen siirtojärjestelmä, jonka periaate esitetään kuvassa 4.13. Kuvassa 4.14 esitetään erään toisen itävaltalaisen laitevalmistajan pellettilaitteiston rakenne.



Kuva 4.12. Itävaltalaisen Windhagerin valmistama pellettilaitteisto, jonka teho on 5 – 26 kW (lähde: yrityksen esite).



Kuva 4.13. Automaattisesti toimiva, pneumaattinen pellettien siirtojärjestelmä varastosta (lähde: Windhagerin esite)



Kuva 4.14. Itävaltalainen pellettipolttolaitteisto (lähde: Frölingin esite).

4.4.2 Lämpökeskukset

4.4.2.1 Suomalaiset lämpökeskusten pellettipolttolaitteet

Omakotiluokan pellettipoltinten tyypisiä laitteita on myös suuremmille tehoille. Kuvassa 4.15 esitetään ruotsalainen Iwabo-poltin, jota on saatavilla 450 kW:n tehoon saakka. Toinen poltintyyppi on ns. alasyöttöinen poltin, joita on asennettu myös Suomessa isompiin kiinteistökattiloihin. Periaate esitetään kuvassa 4.16.



Kuva 4.15. Ruotsalaisen Iwabo-polttimen 3D-kuva (Lähde: Naturenergi Ab: Animaatio CD:llä).



Kuva 4.16. Ecotec-poltin. Teho 300 kW (Lähde: <http://www.ecotec.net/>).

4.4.2.2 Keskieurooppalaiset kiinteistöjen pellettipolttolaitteet

Keski-Euroopassa pellettejä käytetään enemmän omakotitaloissa. Joillakin laitevalmistajilla on kylä pellettien polttoon soveltuvia laitteita myös aina 500 kW:n tehoon asti. Ne ovat monesti yhdistelmälaitteita, joilla voi pellettien lisäksi polttaa myös haketta. Tämä on vastaava tilanne kuin Suomessaakin. Isommilla tehoilla polttoaineen energianhinta on enemmän määräävä tekijä kokonaistaloudellisuuden kannalta.

4.5 VARAAVAT TULISIJAT

Varaavat tulisijat ovat Suomessa yleisimpiä puun pienpolttolaitteita. Niissä puu poltetaan lyhyessä ajassa suurella teholla ja energia varastoituu tulipesään ympäröivään varaavaan massaun. Varaavat tulisijat ovat yhä useammin tehdasvalmisteisia. Niitä valmistetaan vuolukivestä ja erilaisista tulenkestävistä materiaaleista, jotka voidaan pinnoittaa rappaamalla tai erilaisilla kaakeleilla. Myös perinteisistä tiiliuuneista on nykyisin saatavana valmispaketteja. Kuvassa 4.17 esitetään varaavan tulisijan toimintaperiaate.



Kuva 4.17. Varaavan tulisijan toimintaperiaate. (Tulikivi Oy:n kuva-arkisto)

5 PUUN PALAMINEN JA PÄÄSTÖT

Olli Sippula, Kati Hytönen

Kuopion yliopisto, Pienhiukkas- ja aerosolitekniikan laboratorio,
PL 1627, 70211 Kuopio

Puun polton päästöjen määrä ja koostumus vaihtelevat huomattavasti riippuen polttotekniikasta, polttopuun ominaisuuksista, mahdollisista savukaasun puhdistustekniikoista ja yleisesti olosuhteista tulipesässä sekä sen jälkeisessä savukaasukanavassa. Tässä luvussa käsitellään puun palamista yleisesti sekä kuvataan puun poltossa syntyvien eri päästökomponenttien muodostumista.

Täydellisen palamisen tuloksena puupolttoaineen sisältämät hiili, vety ja happi muuntuvat hiilidioksidiksi ja vesihöyryksi. Lisäksi puu sisältää pieniä määriä typpeä, rikkiä ja eri mineraaliaineita. Mineraaliaineista osa jää pohjatuhkaan ja osa kulkee savukaasun mukana pieninä hiukkasina eli ns. lentotuhkana ulos tulipesästä. Puun palamisen yhteydessä typpi ja rikki muuntuvat pääosin typen ja rikkin oksideiksi (N_xO_y , SO_2). Epätäydellisen palamisen vuoksi pienpoltosta vapautuu yleensä huomattavia määriä häkäkaasua (CO), hiilivetyjä (C_xH_y) ja kiinteää nokea. Polton yhteydessä voi savukaasuvirran mukana kulkeutua myös pienikokoisia hiiltojäännöshiukkasia savukaasuvirran mukana tulipesästä ulkoilmaan. Hiilivedyt voivat esiintyä sekä kaasufaasissa että tiivistyneinä nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa. Tiivistyneitä hiilivetyjä kutsutaan yhteisnimityksellä tervat.

5.1 PUUN PALAMISEN VAIHEET

5.1.1 Yleistä palamisvaiheista

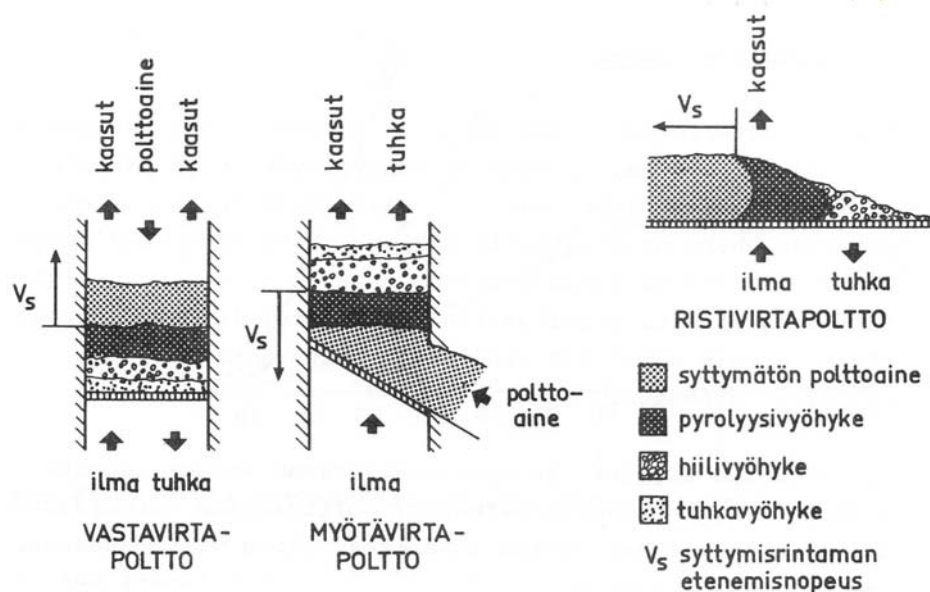
Kiinteän polttoainekappaleen palaminen riippuu sen kemiallisista (reaktiivisuus, pyrolysoitumislämpö, lämpöarvo), rakenteellisista (partikkelikoko, tiheys, huokoisuus) ja fysikaalisista ominaisuuksista (lämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus). Polttoaineen palamiseen vaikuttavat oleellisesti lämmönsiirto, aineensiirto ja kemiallinen kinetiikka. Usein jokin näistä ilmiöistä toimii poltossa palamisnopeutta rajoittavana tekijänä. Yleensä normaalin pienpolton olosuhteissa (suuri kappalekoko) palamisprosessia rajoittavat lämmön- ja aineen siirtyminen. (mm. Saastamoinen, 2002).

Puun palaminen voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin: alkulämpeneminen, kosteuden haihtuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen. Lisäksi syttymistä ja pyrolyysikaasujen palamista liekillä voidaan tarkastella erillisinä vaiheina. Palamisen vaiheista kosteuden haihtuminen, syttyminen ja pyrolyysi ovat lämpöä kuluttavia prosesseja. Pyrolyysikaasujen sekä jäännöshiilen palaminen ovat puolestaan lämpöä luovuttavia prosesseja (Koistinen *ym.*, 1986). Vaikka suurien polttoainekappaleiden palaessa eri palamisvaiheet ovat osittain päällekkäiset, voidaan palamista tarkastella näiden osatekijöiden tuloksena.

Aluksi kostea polttoainekappale saavuttaa kuivumislämpötilan, minkä jälkeen suurin osa sen sisältämästä vedestä höyrystyy pois. Kuivumisen myötä polttoaineen lämpötila kohoaa ja alkaa pyrolyysivaihe. Pyrolyysissä polttoaineen sisältämät suuret molekyylit (mm. selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini) pilkkoutuvat, jolloin muodostuu runsaasti palavia kaasuja, nestemäisiä tervoja ja myös eräitä inerttejä kaasuja (mm. Saastamoinen, 2002; Maskuniitty, 2002).

Liekillä palamisessa pyrolyysituotteet palavat ilman hapen vaikutuksesta. Puun poltossa pyrolyysituotteet palavat diffuusioliekillä, jolloin ne hapettuvat ilman ja pyrolyysikaasujen rajapinnassa. Liekin syttymisen kautta polttoaineen lämpötila kohoaa ja palaminen kiihtyy, kunnes pyrolyysituotteiden muodostuminen hidastuu. Pyrolyysin edetessä polttoaineen C/H -suhde kasvaa, jolloin muodostuu ns. jäännöshiili. Jäännöksessä, jossa on korkea hiilipitoisuus, kaasuuntuminen on vähäistä ja polttoaine hapettuu ainoastaan pinnasta tai huokosten sisältä. Tätä vaihetta kutsutaan yleensä jäännöshiilen palamiseksi ja se on palamisen vaiheista hitain.

Käytännön pienpolton olosuhteissa palaminen tapahtuu polttoainekappaleiden muodostamassa kerroksessa. Polttolaitteissa, joissa polttoainetta syötetään jatkuvasti, ovat eri palamisvaiheet erotettavissa vyöhykkeinä polttoainekerroksen sisällä. Näitä ovat syttymättömän polttoaineen vyöhyke, pyrolyysivyöhyke ja jäännöshiilen palamisvyöhyke. Lisäksi voidaan kerroksessa havaita ns. syttymisrintama, joka kulkee pyrolyysivyöhykkeeltä syttymättömän polttoainekerrosta kohti. Vyöhykkeiden sijainti ja syttymisrintaman etenemissuunta riippuvat monista tulipesän rakenteeseen liittyvistä ratkaisuista, kuten polttoaineen syötön suunnasta, ilman virtaussuunnasta ja palamiskaasujen virtaussuunnasta. Polttoainekerroksen palaminen voidaan jakaa ilman ja polttoaineen syötön suuntien suhteen kolmeen perustilanteeseen: vastavirtapoltto, myötävirtapoltto ja ristivirtapoltto (Kuva 5.1). (Koistinen, 1989).



Kuva 5.1. Polttoainekerroksen palamisen perustapaukset (Koistinen, 1989).

Panospolttolisissa laitteissa polttoainekerros poltetaan usein hiilokseksi asti, ennen kuin lisätään seuraava panos. Tällöin polttoaineen palaminen voidaan edelleen jakaa eri vaiheisiin. Ne voidaan havaita esim. takkauunissa, jossa poltetaan pilkkeitä. Sytytysvaihe koostuu polttoaineen lämpenemisestä, kuivumisesta ja pyrolyysin alkuvaiheesta. Syttymisvaiheessa puusta vapautuu suuria määriä vesihöyryä, haihtuvia hiilivetyjä ja alhaisessa lämpötilassa muodostuvia pyrolyysikaasuja. Kun pyrolyysikaasujen lämpötila ja pitoisuus kasvavat riittävän korkeaksi, ne syttyvät, mikä käytännössä havaitaan liekkiä. Palamisvaiheeseen sisältyy polttoainekappaleen lämpeneminen liekin avulla, voimakkaan palamisen vaihe ja hiipumisvaihe. Pyrolyysinopeus on korkeimmillaan palamisvaiheessa ja pyrolyysituotteiden muodostuminen hidastuu hiipumisvaiheessa. Viimeisessä nk. hiillosvaiheessa pyrolyysituotteita ei enää juuri muodostu ja polttoaine palaa hitaasti ilman liekkiä.

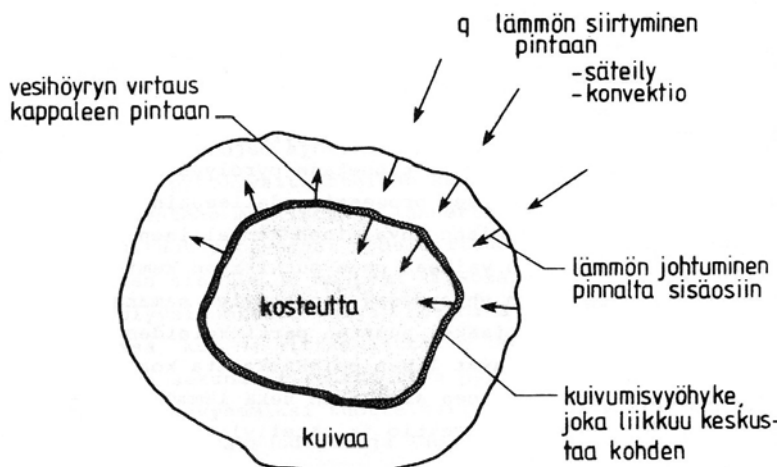
5.1.2 Kosteuden haihtuminen

Vesi on sitoutunut puuhun kolmella tavalla: kapillaarisena tai vapaana vetenä puun huokosissa ja suurissa soluonteloissa, adsorboituneena selluloosasolukon pintaan ja solujen sisään sekä kemiallisesti sitoutuneena. Puussa adsorboitunutta vettä on noin 6 % ja kemiallisesti sitoutunutta vettä noin 8 % puun kuiva-aineesta. Vapaan ja kapillaariveden määrä vaihtelee merkittävästi olosuhteista riippuen. Fysikaalisesti ja kemiallisesti sitoutuneen veden määrä puuaineesta ilmoitetaan ns. kuivun kyllästyspisteinä ja useimmilla puulajeilla se on noin 30 % kuivapainosta. (Koistinen *ym.*, 1986; Gronli *ym.*, 2000).

Kosteus voi siirtyä polttoainepartikkelin sisällä joko nestemäisessä tai kaasumaisessa muodossa. Nesteenä vesi siirtyy pääosin kapillaarivoimien vaikutuksesta. Höyrynä kosteus voi siirtyä konvektion, diffuusion tai effuusion vaikutuksesta. Diffuusiosta vesihöyryn pitoisuus tai lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan, jolloin liike tapahtuu suuremmasta pitoisuudesta tai lämpötilasta alempaan. Kun puun huokosen halkaisija on pienempi kuin vesimolekyylin vapaa keskimatkapituus, vesihöyry kulkee effuusiona, jolloin ilma- ja vesimolekyylit liikkuvat toisistaan riippumatta. (Koistinen *ym.*, 1986).

Huokoisen polttoainekappaleen kuivuminen riippuu lämmityksestä, höyrynpaine-eroista kappaleen ja ympäristön välillä sekä alkukosteudesta. Jos kappale on hyvin märkä, on kosteuden siirtyminen

kappaleen sisäosista pintaan yleensä nopeampaa kuin kosteuden poistuminen kappaleen pinnalta, jolloin pinta pysyy jatkuvasti kosteana. Tällöin kuivumisnopeus pysyy vakiona eikä kappaleen lämpötila pysty nousemaan yli 100 °C:een. Esimerkiksi tulipesässä lämmön siirtyminen polttoainekappaleen pintaan on voimakasta, jolloin kuivumisnopeus on korkeampi kuin kosteuden siirtymisnopeus. Tällöin kappaleen pintaosa kuivuu ja kosteus haihtuu kappaleen sisällä olevalla kuivumisvyöhykkeellä (Kuva 5.2). Tällaiselle kuivumismekanismissa on tyypillistä, että kuivumisvyöhyke siirtyy hitaasti kohti polttoainekappaleen keskustaa. Jos lämpötilat ovat alhaisia ja kuivuminen hidasta, voidaan erottaa vielä kolmas edellä esitetyistä eroava kuivumisprosessi. Tässä prosessissa koko kappale on kosteudeltaan hygroskooppisessa tasapainotilassa ja vesihöyry siirtyy sen sisällä höyrinpaine-erojen ajamana. (Koistinen *ym.*, 1986).



Kuva 5.2. Kuivumisvyöhykkeen eteneminen polttoainekappaleen sisällä, kun kosteuden siirtyminen rajoittaa kuivumista (Koistinen *ym.*, 1986).

5.1.3 Puun pyrolysoituminen

Pyrolyysissä polttoainekappaleen pääaineosat hajoavat kaasuihin ja tervamaiseen muotoon lämpötilan vaikutuksesta. Tyypillisesti pyrolyysituotteet palavat liekinä polttoainekappaleen ympärillä, jolloin vapautuu lisää lämpöä pyrolyysireaktioiden etenemiseen. Pyrolyysi koostuu lukuisista rinnakkaisista ja peräkkäisistä kemiallisista reaktioista, eikä prosessin kulkua ole sen vuoksi pystytty vielä täydellisesti selvittämään. Hajoamisreaktioiden lisäksi pyrolyysituotteet reagoivat keskenään, sekä voivat diffundoitua polttoainekappaleen sisälle muuttaen sen koostumusta. Edelleen pyrolyysituotteet voivat reagoida kuumien jäänöshiilien kanssa, kun ne virtaavat sen läpi kappaleen pintaan (Koistinen *ym.*, 1986).

Pyrolyysissä puun sisältämät ainesosat pilkkoutuvat toisiksi yhdisteiksi. Hemiselluloosa hajoaa noin 200–260 °C:n, selluloosa 240–350 °C:n ja vähiten reaktiivinen ligniini 280–500 °C:n lämpötilassa. (Koistinen *ym.*, 1986). Pyrolyysituotteet voidaan jakaa karkeasti keveisiin hiilivetyihin ja tervoihin (raskaat hiilivedyt) sekä palamistuotteisiin veteen ja hiilidioksiidiin ja palamattomiin kaasuihin häkään ja vetyyn. Muodostuvat pyrolyysituotteet samoin kuin pyrolyysinopeus riippuvat voimakkaasti lämpötilasta. Kun puuta lämmitetään hitaasti 800–900 °C:een, on pyrolysoituvuusosuus noin 80 % sen massasta, mikä vastaa noin 50 % puun lämpöarvosta (Saastamoinen, 2002). Hitaassa pyrolyysissä polttoaine lämpenee hitaasti (alle 10 °C/s) ja alhaiseen lämpötilaan (alle 500 °C), jolloin muodostuu runsaasti tervoa ja jäänöshiiltä. Kun lämpötilaa nostetaan nopeammin ja korkeammalle muodostuu enemmän keveitä hiilivetyjä ja vähemmän jäänöshiiltä. (Arpiainen *ym.*, 1986; Kovács, 2001).

5.1.4 Syttyminen

Syttymispiste voidaan määritellä hetkeksi, jolloin reaktioiden lämmönkehitys alkaa olla suurempi kuin lämmön häviäminen ympäristöön. Polttoaineen palakoolta ja kosteudella on merkittävä vaikutus syttymisaikaan. Kosteus hidastaa syttymistä, sillä veden höyrystäminen vie energiaa ja kappaleen sisältä purkautuva vesihöyry jäädyttää sen pintaa. Suuremmilla polttoainekappaleilla syttyminen kestää kauemmin, sillä niissä lämmön siirtyminen ja kosteuden poistuminen kestää kauemmin. (Koistinen *ym.*, 1986).

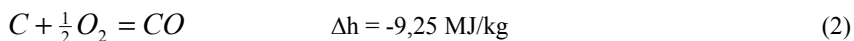
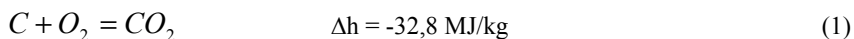
Kiinteä polttoaine voi syttyä homogeenisesti tai heterogeenisesti. Heterogeenisessa syttymisessä aluksi kiinteä aine syttyy palamaan, mikä saa pyrolyysin voimistumaan. Tämän jälkeen liekki irta-aa hiukkasen pinnasta ja pyrolyysituotteet palavat hiukkasen ulkopuolella. Homogeenisessa syttymisessä palaminen alkaa vasta, kun polttoainekappaleesta poistuneet pyrolyysituotteet sytyvät sen ulkopuolella. Suuret polttoainekappaleet sytyvät yleensä homogeenisesti. (Saastamoinen, 2002). Homogeeninen syttyminen voi tapahtua apuenergian avulla, jolloin pyrolyysikaasut sytytetään ulkoisen lämmön lähteen kuten kipinän tai liekin avulla, tai spontaanisti, jolloin pyrolyysikaasujen lämpötila nousee ilman ulkopuolista energian lähdettä syttymisrajalle saakka.

5.1.5 Jäännöshiilen palaminen

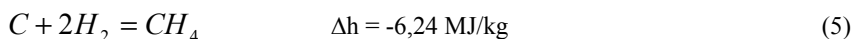
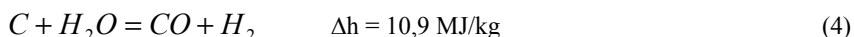
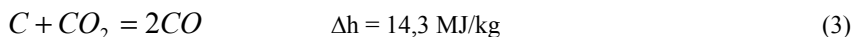
Jäännöshiilen palaminen on liekitön palamisen vaihe, jossa palaminen eli polttoaineen hapettuminen tapahtuu polttoainekappaleen pintakerroksessa. Vaikka biomassapolttoaineilla jäännöshiilen osuus on yleensä vain noin 10–30 % kuiva-aineesta, sen palamisesta saatava energia on 25–50 % kokonaisenergiankehityksestä (Koistinen *ym.*, 1986). Jäännöshiilen palaminen on palamisen vaiheista pitkäkestoisin ja se voi alkaa osin jo pyrolyysin aikana. Hyvin pienille polttoainepartikkeleille hiilen palamista rajoittaa kemiallinen kinetiikka eli molekyylien törmäystodennäköisyydet. Suurilla polttoainekappaleilla puolestaan hapen diffuusio kappaleen pintaan tai sen läheisyydessä olevalle reaktiovyöhykkeelle rajoittaa palamisnopeutta. Palamista tapahtuu myös kappaleen huokosten sisällä, jolloin polttoaineen huokoisuudella on merkittävä vaikutus sen palamisaikaan. Palaessaan jäännöshiili voi hajota useampaan osaan, jolloin sen palaminen nopeutuu. (Saastamoinen, 2002; Flagan *ym.*, 1988).

Jäännöshiilen palaminen koostuu hapetus- ja kaasuntumisreaktioista, joista osa on kaasufaasin reaktioita ja osa heterogeenisia eli kaasufaasin ja kiinteän pinnan välisiä reaktioita (mm. Kilpinen, 2002). Näistä tärkeimmät heterogeeniset reaktiot esitetään yhtälöissä 1–5. Reaktioentalpiat (Δh) annetaan hiilen massaa kohden 25 °C lämpötilassa ja 1 bar paineessa (Saastamoinen, 2002).

Palamisreaktiot:



Kaasutusreaktiot:



5.2 PUUN PIENPOLTON PÄÄSTÖT

Puun polton päästöjen määrä ja koostumus vaihtelevat riippuen polttotekniikasta, polttopuun ominaisuuksista, mahdollisista savukaasun puhdistustekniikoista ja yleisesti olosuhteista tulipesässä sekä sen jälkeisessä savukaasukanavassa. Puun pienpoltossa polttoaineen laatu ja polttotavat vaihtelevat ja käytössä on hyvin erilaisia polttolaitteita, joten päästömäärät vaihtelevat huomattavasti tulisijasta toiseen. Polttoaineen laadussa merkittäviä tekijöitä ovat mm. sen kosteus ja eri mineraaliainneiden pitoisuudet. Polttotavalla voi olla huomattavaa merkitystä päästömääriin, sillä mm. ilman tuonnin säätäminen tulipesään sekä puiden asettelu tulipesässä vaikuttavat epätäydellisen palamisen tuotteiden muodostumiseen. Samoin tulisijan rakenteella ja tekniikalla on vaikutusta päästömääriin. Mm. Johansson *ym.* (2004) havaitsivat, että vanhanaikaisella panospolttoisella puukattilalla hiukkaspäästöt olivat jopa 180 -kertaiset verrattuna uuteen puupellettejä käyttävään kattilaan. Huonoissa laitteissa korostuvat epätäydellisen palamisen tuotteet noki, terva, kaasumaiset hiilivedyt ja häkä. Paremmissa laitteissa hiukkaspäästö koostuu suurimmaksi osaksi puun sisältämistä mineraaliainneista ja hiilivety- ja häkäpäästöt ovat yleensä alhaisemmat.

5.2.1 Puun palamisaerosoli

Aerosoli koostuu kiinteän tai nestefaasin tai näiden molempien muodostamista hiukkasista sekä näitä ympäröivästä kaasusta. Puun poltossa muodostuvia kiinteitä pienhiukkasia ovat tuhka- ja hiukkaset, kuten alkalisulfaatit ja -kloridit, kalsiumoksidit sekä metallioksidit ja nokihiukkaset (mm. Oser *ym.*, 2001). Suurhiukkaset voivat koostua tuhkasta, polttoainehiukkasten hiiltojäännöksistä tai pienhiukkasista muodostuneista agglomeraateista. Tämän lisäksi puun polton aerosoli voi sisältää nestemäisiä ja tervamaisia osia, jotka koostuvat pääosin keskiraskaista ja raskaista hiilivedyistä. Ne voivat sisältää satoja erilaisia hiilivetyjä.

Jäähtyvässä savukaasuvirrassa kiinteiden hiukkasten pinnalle siirtyy höyryjä kondensaation ja adsorption kautta, minkä seurauksena kiinteän hiukkasen ympärille syntyy nestemäinen kerros. Lisäksi kylläisen höyryn syntyessä voi palamisaerosolissa nukleoitua nestepisaroita, jotka kasvavat edelleen kondensaation kautta. Näin muodostuneita hiukkasia voi syntyä esim. hiilivety- tai rikkihappohöyryistä.

5.2.2 Puun polton kaasumaiset päästöt

Puun sisältämän hiilen palaessa täydellisesti syntyy hiilidioksidia, CO₂. Kun puu palaa epätäydellisesti, sen sisältämää hiiltä vapautuu ilmakehään myös häkäkaasuna (hiilimonoksidi, CO) ja hiilivetyinä (C_xH_y). Palamisen täydellisyyteen vaikuttavat mm. kaasujen viipymäaika, sekoittuminen ja lämpötila tulipesässä (Maskuniitty, 2002). Häkä indikoi joko kesken jäänyttä palamista tai kaasujen reagointia hehkuvan hiilen kanssa. Hiilivetyjen läsnäolo merkitsee lähes aina keskeneräistä palamista. Hiilivedyt jaotellaan kiehumislämpötilansa mukaan erittäin haihtuviin, haihtuviin, puolihaihtuviin ja hiukkasfaasin orgaanisiin yhdisteisiin (VVOC; VOC; SVOC ja POM) (Tucker, 2001). Hiilivedyt voidaan jaotella myös molekyyliarakenteen funktionaalisten ryhmien mukaan eri yhdisteryhmiin. Näitä ovat mm. alkaanit, alkeenit, aldehydit, aromaattiset yhdisteet jne. Hiilivetyjä on savukaasussa myös neste- ja kiinteässä faasissa. Puun poltossa muodostuvista hiilivedyistä osa on terveydelle haitallisia karsinogeenisia ja ärsyttäviä yhdisteitä. Lisäksi hiilivedyt osallistuvat ilmakaasussa mm. savusumun muodostumiseen.

Hiilidioksidi on tärkein kasvihuoneilmiön voimistumiseen vaikuttava tekijä. Puun poltossa syntyvä hiilidioksidi käytetään uudelleen puun kasvussa, joten nettovaikutus ilmakehän hiilidioksiditaseseen on nolla. Kuitenkin metaani, jota syntyy puun epätäydellisessä palamisessa, on merkittävä kasvihuonekaasu. Eri kasvihuonekaasujen vaarallisuutta voidaan verrata lämmityspotentiaalain avulla.

la. Se ilmaisee kaasun aiheuttaman ilmakehän lämmitysvaikutuksen massayksikköä kohti tietyn ajanjakson aikana verrattuna hiilidioksidiin. Metaanin lämmityspotentiaali 20 vuoden aikajänteellä on noin 62, eli lämmitysvaikutus on 62-kertainen hiilidioksidiin verrattuna. Kaiken biomassan polton metaanipäästöt maailmassa ovat vuosittain noin 40 Mt, joka on 11 % ihmisen toiminnan aiheuttamista metaanipäästöistä (Seinfeld ja Pandis, 1998).

Schauer *ym.* mittasivat metaanin päästökertoimeksi 4 g/kg (49 % määritettyjen orgaanisten C1-C10 yhdisteiden kokonaispäästökertoimesta). Tutkimuksessa oli polttolaitteena takka ja polttopuuna mänty (Schauer *ym.*, 2001). Yhdysvaltain ympäristöviraston U.S.EPA:n päästökeroinkoosteessa perinteisten uunien metaanipäästökero on 15 g/kg (36 % kaikkien orgaanisten yhdisteiden päästökertoimesta) ja ei-katalyyttisten uunien 8 g/kg (57 % kaikkien orgaanisten yhdisteiden päästökertoimesta). Perinteisellä uunilla tarkoitetaan laitetta, jossa ei ole päästöjä vähentävää tekniikkaa, ei-katalyyttisellä taas uunia, jossa ei ole katalyyttiä, mutta päästöjä pyritään vähentämään teknisillä ratkaisuilla esimerkiksi jälkipolttilalla.

Savukaasun typpioksidit (NO_x) syntyvät puun palamisessa lähinnä puun sisältämästä timestä. Korkeissa lämpötiloissa (yli 1400 °C) niitä syntyy lisäksi palamisilman molekyylylitypeistä. NO_x -päästöt edistävät happaman laskeuman, savusumun ja alailmakehän otsonin muodostumista. Puun sisältämä rikki hapettuu rikin oksideiksi (SO_x). Puun rikkipitoisuus on pieni (yleensä alle 0,05 %), joten puun polton rikkipäästöt ovat pienet. Rikinoksidit sitoutuvat myös lentotuhkaa tuottaviin aineisiin tai muuntuvat rikkihapoksi (H_2SO_4). (Iisa *ym.*, 2002). Rikkiyhdisteille on ominaista voimakas pisanmuodostuskyky, joten ne ottavat osaa hiukkasmuodostukseen jo pienillä pitoisuuksilla.

Vesihöyry, H_2O , syntyy poltossa puun sisältämän kosteuden höyrystyessä sekä puun vedyn hapettua. Näiden lisäksi osa savukaasun sisältämästä kosteudesta on peräisin palamisilmasta.

5.2.3 Hiilivetyypäästöjen muodostuminen

Puun poltossa orgaanisia päästöjä muodostuu puun sisältämien hiilivetyjen haihtuessa sekä puun aineosien pyrolysoituessa. Orgaanisia päästöjä voi syntyä 10–100 g poltettua puukiloa kohti (mukaan ei ole laskettu metaania). Nämä päästöt sisältävät alifaattisia ja olefiinisia aldehydejä, ketoneja, karbonyylejä, alkaaneja ja alkeeneja, karboksyylihappeja, alkyynejä, diolefiineja, sykliisiä alkaaneja ja alkeeneja, aromaattisia hiilivetyjä, polyaromaattisia hiilivetyjä, erilaisia fenoleja, hartsihappeja, anhydridisokereita ja muita yhdisteitä (Rogge, 2003).

PAH-yhdisteet ('polyaromatic hydrocarbon') ovat merkittävä palamisessa syntyvä hiilivetyryhmä, sillä useat niistä ovat karsinogeenia tai mutageeneja. Niitä syntyy liekissä ali-ilmaisissa olosuhteissa, jolloin hiilivedyt polymeroituvat hapettumisen sijasta (Flagan ja Seinfeld, 1988). Puun poltossa syntyvät PAH-yhdisteet voivat olla palamatta jääneitä primääri- tai sekundääripyrolyysin tuotteita. PAH-yhdisteet voivat myös muodostua palamisen yhteydessä vapautuneista kevyistä hiilivedyistä. Kaasufaasissa muodostuvien PAH-yhdisteiden arvellaan syntyvän asetyleenin C_2H_2 ja radikaalin $\text{C}_2\text{H}\cdot$ myötävaikutuksella aromaattisista radikaaleista (Huotari ja Vesterinen, 2002). Puussa tapahtuvat muutokset palamisen edetessä esitetään taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Lämpötilan nousun vaikutukset puun sisältämiin biopolymeereihin palamisen edetessä (Rogge, 2003, suomennettu).

Lämpötila	Prosessi	Päätuotteet
100–200 °C	Puu alkaa kuivua, uuteaineita höyrystyy	H ₂ O, CO ₂ , muita
200–300 °C	Hemiselluloosien hajoaminen	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ , metaanihappo, etikkahappo, furfuraali, muita palavia kaasuja, *kondensoituvia haihtuneita aineita → tervahiukkasia, hiiltä
225–300 °C	Selluloosan hiiltyminen alkaa	Hiili
300–450 °C	Selluloosan merkittävää hajoamista (pyrolyysi, glykosi-disten sidosten hajoaminen, dehydraatio, sokერიyksiköjen irtoaminen)	Syttyvimmat höyryt, tervaiset anhydridisokerit, levoglukosaani, *kondensoituvia aineita → hiukkasia, hiiltä
300–450 °C	Ligniinin hajoaminen	Metoksifenolit: guajasyyli- ja syringyylijohdannaiset, *tiivistyviä höyryjä → hiukkasia, hiiltä
>450 °C	Yllä olevien tapahtumien yhdistelmä	*Yllä olevien tuotteiden yhdistelmä
Ei liekkiä	Hiiltyminen, hehkuminen	CO, CO ₂ , H ₂ O, *tiivistyviä höyryjä → hiukkasia

5.2.4 Tuhkahiukkaset ja niiden muodostuminen

Kiinteissä polttoaineissa tuhkan mineraaliaineet voivat olla polttoaineen sisällä erillisinä mineraalisulkeumina, orgaanisesti sitoutuneina tai kiinnittyneinä polttoaineen ulkopuolelle. Puussa pääosa mineraaliaineista on sitoutunut orgaanisesti puun rakenteeseen. Iältään vanhoissa polttoaineissa kuten kivihielessä tuhka on sen sijaan sitoutunut enimmäkseen erillisinä mineraalisulkeumina polttoaineeseen. Puun tuhkan koostumus eroaa huomattavasti muiden kiinteiden polttoaineiden tuhkasista. Puun tuhkaa muodostavat aineet ovat enimmäkseen maa-alkali- ja alkalimetalleja (K, Ca, Na, Mg), kun taas kivihieften, turpeiden ja nopeakasvuisten biomassojen tuhkassa myös pii, alumiini ja rauta voivat olla keskeisiä aineita (mm. Zevenhoven, 2001; Skrifvars *ym*, 2002).

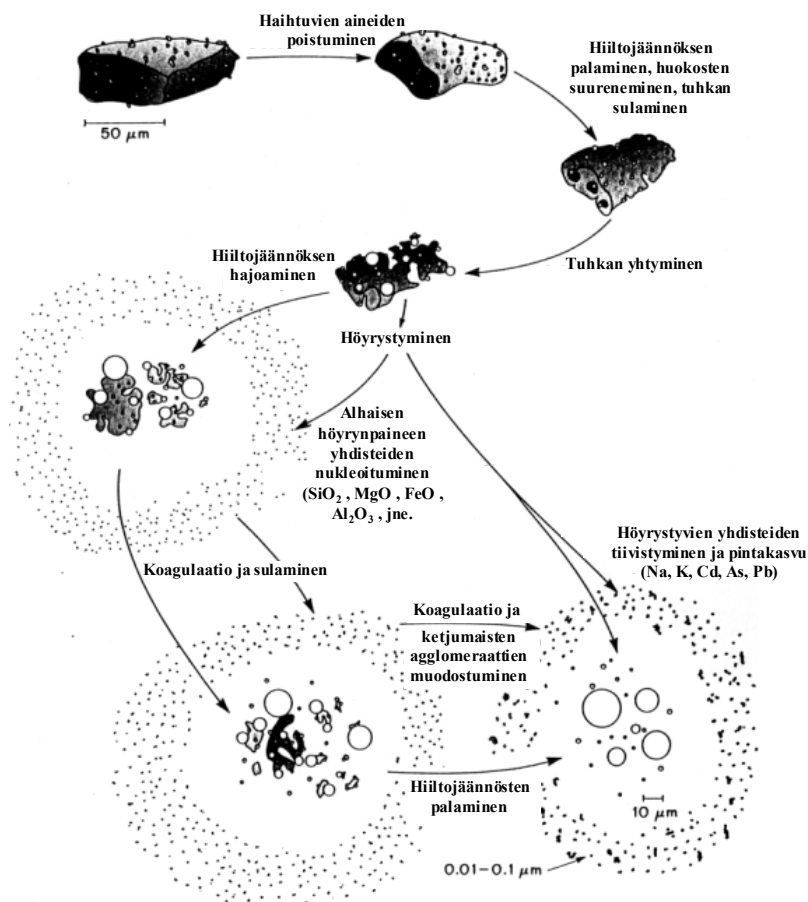
Tuhkahiukkasten muodostumismekanismeja on tutkittu paljon kivihieften pölypoltossa. Tutkimusten perusteella on havaittu tuhkahiukkasten muodostuvan periaatteessa kahdella tavalla. Muodostumisen tapahtuessa höyrystymisen kautta mineraaliaineet ensin höyrystyvät, jonka jälkeen höyryn paineen laskiessa niistä muodostuu hyvin pieniä hiukkasia homogeenisen ytimen muodostuksen ja tiivistymisen kautta. Nämä hiukkaset voivat kasvaa kooltaan edelleen höyryjen tiivistyessä niiden pintaan sekä agglomeroitumalla, mutta pääosin hiukkaset jäävät submikroniselle ($d_p < 1 \mu\text{m}$) alueelle. Muodostumisen tapahtuessa törmäyskiinnittymisen avulla kokonaiset mineraalisulkeumat kiinnittyvät toisiinsa muodostaen suurikokoisia hiukkasia. Jos lämpötila on alhainen, takertuvat mineraalihiukkaset pinnoistaan kiinni muodostaen laajoja agglomeraatteja. Jos lämpötila sen sijaan on riittävän korkea sulattamaan tuhkan, yhtyvät mineraalisulkeumat muodostaen suurikokoisia säännöllisen muotoisia tuhkapisaroihin. Kaasun tuotto sulan tuhkan sisällä voi johtaa suurien onttojen hiukkasten muodostumiseen, ns. kenosfääreihin (cenospheres), joista osa voi koostua suuresta määrästä pienempiä tuhkapalloja. (Flagan *ym*, 1988). Kuvassa 5.3 on Flaganin *ym*. (1988) hahmottama kaaviokuva tuhkahiukkasten syntymekanismeista.

Polttoaineen sisältämien mineraaliaineiden höyrystyminen tulipesässä ja myöhemmin höyryjen jäähtyminen johtaa hyvin pienikokoisten lentotuhkahiukkasten muodostumiseen. Biomassan sisältämistä tuhkaa muodostavista aineista kloorin, rikin ja alkalimetallien kuten kaliumin ja natriumin

on todettu höyrystyvän helposti palamisen yhteydessä. Tämän lisäksi liekin pelkistävät olosuhteet voivat höyrystää myös tuhka yhdisteitä, joilla on alempi höyrönpaine, kuten maa-alkalimetalleja, piitä ja eri metalleja (mm. Zevenhoven, 2001; Skrifvars *ym.*, 2002).

Kun puupolttoaineet sisältävät runsaasti alkalimetalleja (K, Na), muodostuu puun poltossa runsaasti näitä metalleja, varsinkin kaliumia sisältäviä pienhiukkasia. Kaliumhöyrö on havaittu tiivistyvän savukaasussa ensisijaisesti sulfaattina tai kloridina, jonka jälkeen tiivistyminen tapahtuu karbonaattina tai mahdollisesti hydroksidina (mm. Valmari *ym.*, 1998). Mm. Jokiniemi *ym.* (2001) havaitsivat biomassan leijupetipoltossa ultrapienien hiukkasten muodostuvan pääosin alkalikloridien ja -sulfaattien nukleoitusesta sekä kondensoitumisesta tiivistymisytiminä toimivien metallioksiidihiukkasten ympärille.

Obernberger *ym.* (2001) ovat hahmottaneet puuhakkeen, puun kuoren ja jätepuun polttoa kiinteässä polttoainekerroksessa. Kyseisissä tutkimuksissa poltettaessa puuhaketta pienhiukkasia muodostui pääosin kaliumin ja natriumin sulfaateista ja klorideista. Puun kuorta poltettaessa pienhiukkasia muodostui myös kalsiumoksiidihiukkasista, joiden ympärille tiivistyi alkalisulfaatteja ja -klorideja. Kolmannessa tapauksessa polttoaineena oli jätepuu, joka sisälsi edellisiä huomattavasti enemmän raskaita metalleja kuten sinkkiä (Zn) ja lyijyä (Pb). Näistä sinkki on herkästi höyrystyvä, joten savukaasuissa muodostui runsaasti pieniä sinkkioksiidihiukkasia, jotka toimivat tiivistymisytiminä alkalihöyröille. (Obernberger *ym.*, 2001).



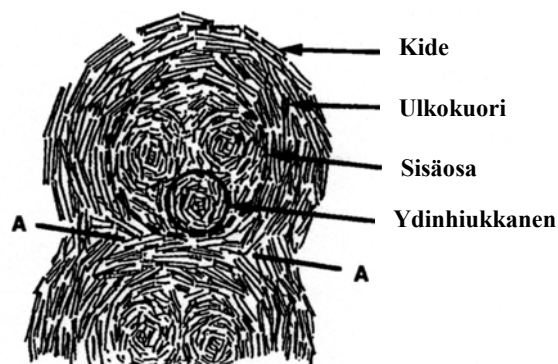
Kuva 5.3. Kaavio tuhka hiukkasten muodostumisesta kivihiilen pölypoltossa (Flagan *ym.*, 1988, suomennettu).

5.2.5 Noki ja sen muodostuminen

Nokea syntyy kiinteän polttoaineen palamisessa hiilivetyjen höyrystyessä ja palaessa liekillä. Noen muodostuminen on tulosta epätäydellisestä palamisesta ja suurin osa siitä muodostuu liekin sisällä, sen vähähappisessa osassa. Vaikka palaminen olisi kokonaisuudessaan yli-ilmainen, on palamiskaasujen ja ilman sekoittuminen aina käytännössä riittämätöntä, jolloin pyrolyysikaasujen palamisvyöhykkeeseen jää polttoainerikkaita alueita. Koska kiinteät polttoaineet kuten puu palavat diffuusioliekillä, sisältää liekki aina hapettoman vyöhykkeen, jossa muodostuu runsaasti nokea.

Vaikka noen muodostumista on tutkittu paljon, ei kaikkia siihen liittyviä reaktiomekanismeja tunnetta vielä kovinkaan hyvin. Kirjallisuudessa esiintyy myös toisistaan osittain eroavaa tietoa noen rakenteesta ja muodostumisesta. Tämä johtunee osin siitä, että tutkimukset on suoritettu hyvin erilaisilla polttolaitteilla sekä vaihtelevin tavoittein.

Tyypilliset nokihiukkaset ovat muodoltaan ketjumaisia agglomeraatteja, jotka koostuvat lähes säännöllisistä, pallon muotoisista, halkaisijaltaan noin 30–40 nm primäärihiukkasista. Primäärihiukkasen on havaittu koostuvan lamellimaisista kiteistä, joiden rakenne muistuttaa grafiitin rakennetta. Hiukkasen ulkopinnan läheisyydessä kiderakenne seuraa hiukkasen pinnan muotoa, mutta hiukkasen sisällä kiteet ovat sen sijaan järjestäytyneet satunnaisesti (Kuva 5.4). Primäärihiukkasen sisäosan on havaittu koostuvan pääosin PAH-yhdisteistä, jotka hapettuvat helposti. Pinta on puolestaan hyvin stabiilia alkuainehiiltä. (Ishiguro *ym.*, 1997).

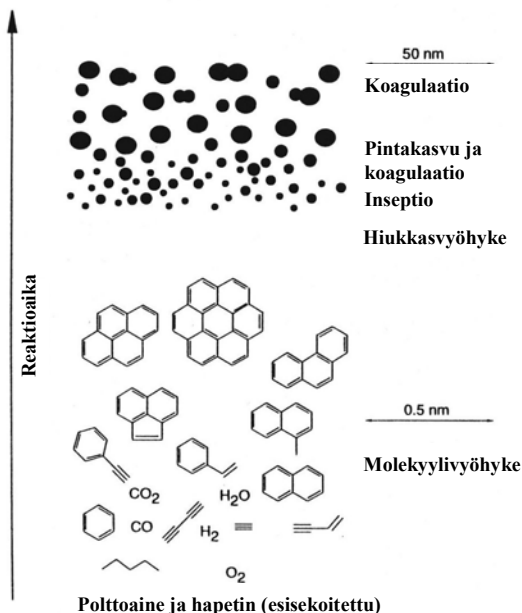


Kuva 5.4. Periaatekuva diesel –moottorissa muodostuneen noen primäärihiukkasen rakenteesta (Ishiguro *ym.*, 1997, suomennettu). Kirjaimella A osoitettu taso viittaa kuvassa huomioon, että ulkokuoren kiteet ovat tasoon nähden kohtisuorassa, mistä voidaan päätellä, että ulkokuoren muodostuminen ja agglomeroituminen tapahtuvat osin samanaikaisesti.

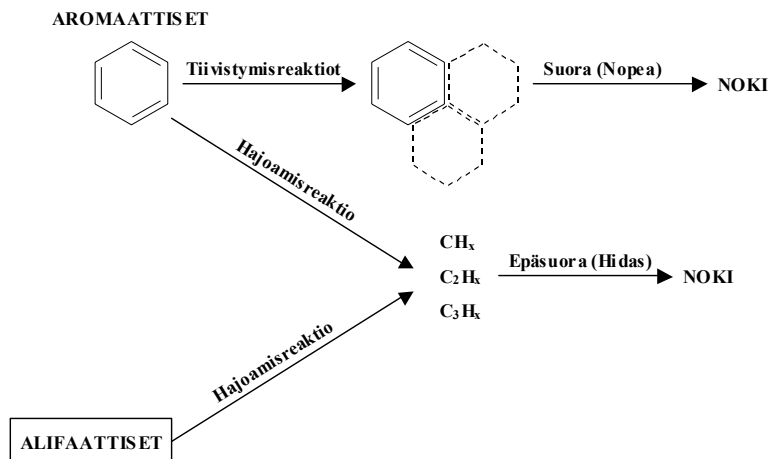
Kaavio noen muodostumisen eri vaiheista esitetään kuvassa 5.5. (Bockhorn, 1994). Ensimmäinen askel noen muodostumisessa on rengasmaisten polyaromaattisten hiilivetyjen (PAH) polymerisointuminen. Seuraavaksi ns. inseptiksi kutsutussa prosessissa PAH-yhdisteet kasvavat yhtymällä tasomaisesti toisiinsa, minkä seurauksena nukleoituu tyypillisesti noin 1,5 nm nokiytimiä. Tämän jälkeen hiukkasytimet kasvavat pintareaktioiden ja koagulaation kautta muodostaen noin 10 nm keskusytimiä (Kuva 15). Keskusytimien ympärille kerääntyy lisää hiiliyhdisteitä pääosin pintareaktioiden kautta, jolloin noen primääripartikkeli saavuttaa lopullisen noin 30–50 nm koon. (mm. Bockhorn, 1994; D’Anna *ym.*, 1994; Ishiguro *ym.*, 1997).

Noen muodostukseen vaikuttavat oleellisesti palamisolosuhteet sekä palamisen kaasumaiset reaktiotuotteet. Erityisesti asetyleenin C_2H_2 , bentseenin ja polyaromaattisten hiilivetyjen on todettu lisäävän noen muodostumista ja kasvua (Bartok *ym.*, 1991). Amann *ym.* (1982) ovat esittäneet noen muodostumiselle kaksi pääasiallista reaktiotietä (Kuva 5.6). Suora noen muodostuminen tapahtuu

suhteellisen alhaisissa lämpötiloissa aromaattisista yhdisteistä ja heikosti haihtuvista raskaista hiilivedyistä tiivistymällä, minkä jälkeen primäärihiukkasten kasvu tapahtuu yllä kuvatulla tavalla. Jos lämpötila on yli 1800 K, nokea muodostuu epäsuoran reitin kautta (Amann *ym.*, 1982). Tällöin aromaattisia ja alifaattisia hiilivety-yhdisteitä ensin pilkkoutuu korkeassa lämpötilassa ja muodostuu noen edeltäjiä (prekursoreita), kuten asetyleenia C_2H_2 ja erilaisia hiilivetyradikaaleja. Ne muodostavat monimutkaisten reaktioiden kautta PAH-yhdisteitä ja edelleen nokiymitiä. (Bockhorn, 1994).



Kuva 5.5. Noen muodostumisen päävaiheet (Bockhorn, 1994, suomennettu).



Kuva 5.6. Noen muodostumismekanismit aromaattisista ja alifaattisista hiilivedyistä (Amann, *ym.*, 1982, uudelleen piirretty).

Tavallisesti pääosa liekissä muodostuneesta noesta myös hapettuu eli palaa pois liekissä. Näin hapettumisen tehokkuus hyvin pitkälle määrittää liekistä vapautuvan noen määrän sekä nokihiukkasten koon. Noen hapettimia ovat molekyylihapen (O_2) lisäksi radikaalit kuten $O\cdot$ ja $OH\cdot$ sekä kaasutusreaktioiden kautta CO_2 ja H_2O . Rikkaalla seoksella palavassa tai huonosti palamisilman kanssa sekoittuvassa liekissä hydroksyyli-radikaali ($OH\cdot$) voi olla molekyylihapetta tärkeämpi noen hapetin. Diffuusioliekin pyrolyysivyöhykkeellä, jossa ei normaalisti ole läsnä happea, on hapen havaittu jopa lisäävän noen muodostusta, sillä se katalysoi pyrolyysireaktioita. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi poltettaessa happipitoista polttoainetta. (Flagan *ym.*, 1988).

6 MITTAUSTEKNIIKAN KEHITTÄMINEN

Jarkko Tissari¹, Taisto Raunemaa¹, Heikki Oravainen²

¹Kuopion yliopisto, Pienhiukkas- ja aerosolitekniikan laboratorio, PL 1627, 70211 Kuopio

²VTT Prosessit, Energian tuotanto, PL 1603, 40101 Jyväskylä

²Kappaleet 6.1 ja 6.2

Useissa maissa on määräyksiä kiinteää polttoainetta käyttävien laitteiden päästöille. Mitattavia suureita ovat yleensä hiilimonoksidin, kokonaishiilivetyjen, typen oksidien, rikkidioksidin ja hiukkasten pitoisuus savukaasuissa. Mittausmenetelmät ja päästörajat vaihtelevat eri maissa ja jopa saman maan eri osissa. Kun kaasujen mittaamiseen on standardimenetelmiä, ei hiukkaspitoisuuden mittaukseen ole yhtenäisiä, kaikille laitetyypeille soveltuvia standardimenetelmiä lainkaan. Seuraavassa tarkastellaan hiukkaspitoisuuden mittaamista ja hiukkaspitoisuudelle tai hiukkaspäästölle annettuja enimmäisrajoja pienpolttolaitteiden osalta.

Pienhiukkasten mittaamisen tekniikat vaihtelevat jo pelkän hiukkasmassankin osalta eri maissa laimennustunnelin avulla tehtävistä mittauksista suoraan savukaasusta tehtäviin. Varsinaisen ongelman mittausten kannalta muodostaa panospolttu. Panospoltossa hiukkaspitoisuudet ja kokojakauma vaihtelevat panoksen palamisen eri vaiheissa ja usein myös eri polttojen kesken. Aineensiirron ongelmien takia käytetään savukaasun laimentamista, jolloin lämpötila alenee, kondensoituminen vähenee tai pysähtyy ja näytteenotto helpottuu. Tässä tutkimuksessa savukaasun laimennukseen käytettiin kolmea erilaista laimennustapaa: ejektorilaimennusta, laimennustunnelia ja huuvalaimennusta. Laimennustapoja vertailtiin keskenään ja erilaisia mittalaitteita käyttäen useissa mittausjaksoissa. Lisäksi mittauksia tehtiin standardin mukaisesti suoraan savukaasusta.

6.1 KATSAUS ERI MAIDEN HIUKKASMITTAUSMENETELMIIN

Katsauksessa esitetään yhteenveto puun pienpolttolaitteiden hiukkaspäästöjen standardisoiduista mittausten menetelmistä eri maissa ja pienhiukkaspäästöjen mittaustuloksia.

Hiukkaspitoisuutta on yleensä mitattu joko suoraan polttolaitteen savukaasusta tai ns. laimennustunnelista, jolloin savukaasuun sekoitetaan runsaasti ilmaa ennen mittausta. Tällöin savukaasu jäähtyy lähelle sekoitusilman lämpötilaa ja tilanne on lähellä ulkoilmassa esiintyvää laimennusta. Jos palaminen on epätäydellistä, savukaasussa on palamatta jääneitä hiilivetyjä. Laimennustunnelista mitattuna osa näistä hiilivedyistä kondensoituu ja kerääntyy hiukkasmittauksissa käytettävälle suodattimelle. Suoraan kuumasta savukaasusta mitattaessa kondensoitumista ei yleensä tapahdu. Erityisesti puun panospoltossa näiden kondensoituneiden hiilivetyjen osuus kokonaismassasta on merkittävä. Laimennustunnelia on käytetty hiukkasten mittaamiseen erityisesti puukamiinoista.

Standardimenetelmissä, joita on USA:ssa, Kanadassa, Australiassa, Uudessa-Seelannissa ja Norjassa, puu poltetaan erittäin pienellä teholla. Eurooppalainen standardisoiemisjärjestö (CEN) on valmisteellut uudet standardit mm. kamiinoiden ja varaavien tulisijojen testaamista varten. Näissä ei kuitenkaan ole vaatimusta hiukkasten enimmäispitoisuuksille. Palamisen hyvyyttä indikoidaan hiilimonoksidipäästön (CO) perusteella. Standardeja ollaan parasta aikaa muuntamassa harmonisoiduiksi standardeiksi ja myös hiukkasmittausmenetelmästä käydään komiteoissa keskustelua. Yhtenäiseen käsitykseen ei ole vielä vuoteen 2005 mennessä päästy.

Taulukko 6.1. Yleisimpien puun pienpolton standardien päästöraja-arvoja (panospolto, kattiloilla käsisyötö). Tulisijoja koskevat standardit esitetään merkinnällä # ja kattiloita merkinnällä □.

	Yksikkö	CO	OGC	NO _x	Hiukkaset	Redusointi (% O ₂)
SFS-EN 13240*	# %	0.3	-	-	-	13
SFS-EN 303-5	□ mg/m ³	5000	150	-	150	10
SFS-EN 303-5 / Itävalta	□ mg/MJ	1100	80	150	60	-
SFS-EN 303-5 / Tanska	□ %	0.5				10
SP 1419 / Ruotsi**	□ mgC/m ³		150			10
EN 13240 / Ruotsi***	# mgC/m ³		250			13
DIN 4702 / Saksa	□ mg/m ³	4000			150	13
Sveitsi (oma laki)	□	4000				13

* Vaatimukset samat myös standardeissa SFS-EN 13229 ja 12815.

** Mittaus esilämmitetystä laitteesta.

*** Taajaan asutuilla alueilla.

Taulukossa esiintyvät yleiset standardit:

- SFS-EN 13240 (Kamiinat) – Room heaters fired by solid fuel.
- SFS-EN 13229 (Takkasydämet) – Inset appliances including open fires fired by solid fuels.
- SFS-EN 12815 – Residential cookers fired by solid fuel.
- SFS-EN 303-5 – Heating boilers for solid fuels, hand and automatically stoked, nominal heat output of up to 300 kW.

6.1.1 Tulisijat

Suomi

Suomessa on takkasydämille voimassa standardi “SFS-EN 13229 - Inset appliances including open fires fired by solid fuels. Requirements and test methods” ja kamiinoille “SFS-EN 13240 - Room heaters fired by solid fuel. Requirements and test methods”. Lisäksi teknillisessä komiteassa CEN TC 295 on valmisteilla varaaville uuneille oma harmonisoitu standardi, josta on valmiina luonnos prEN15250. Luonnos on tulossa lausuntokierrokselle ja standardi tulee voimaan vuonna 2007, mikäli se hyväksytään lopullisessa äänestyksessä vuoden 2006 alkupuolella. Pellettitakoille tehdään myös omaa standardia ja muutamille muille laitteille, joita käytetään pääasiassa vain eräissä Keski-Euroopan maissa.

Kaikista komitean jo valmiiksi saamista standardeista on tehty myös ns. harmonisoidut standardit, jotka ottavat huomioon EU:n rakennustuotedirektiivin olennaiset vaatimukset. hEN-standardien voimaantulon jälkeen laitteille on mahdollista saada CE-merkintä.

hEN-standardeihin tulee liitteeksi myös menetelmät muiden kuin CO-päästöjen mittaamisesta. Kokonaishiilivetyjen (OGC) ja typenoksidien (NOx) menetelmistä on jo periaatteessa sovittu. Hiukkaspäästöjen mittaamenetelmä sen sijaan tuottaa vielä paljon työtä, koska nykyisin eri maissa on käytössä vielä monia toisistaan poikkeavia menetelmiä. On myös otettava huomioon, että eri menetelmät mittaavat eri asioita. Menetelmiä selitetään jäljempänä. CEN TC 295:n työryhmä WG 5 jatkaa edelleen työtään ja yrittää saada myös yhtenäisen hiukkasmittaamenetelmän.

Suomessa ei ole mitään vaatimuksia tulisijojen päästöille eikä täällä vaadita laitteiden testausta. Ympäristöministeriö valmistelee päästörajoja tulisijoille ja pienkattiloille, mutta aikataulusta ei ole edelleenkaan tarkkaa tietoa.

Ruotsi

Ruotsissa ei ole enimmäisrajaa tulisijojen hiukkaspäästöille. Siellä on vaatimuksena, että taa- jaanasutuilla alueilla käyttöön otettavien laitteiden kokonaishiilivetyjen eli OGC-pitoisuus pitää olla pienempi kuin 250 mg/m³ savukaasua. Testaustilanteessa tulisijaa poltetaan siirtymävaiheessa joko entisen SP-menetelmän tai EN 13240 standardin mukaisesti.

Norja

Norjassa on standardi NS 3038 puuta käyttäville kamiinoille (NS 3038, 1994) (Kuva 6.1). Standardi on julkaistu kesäkuussa 1994. Nykyisin Norjassa on rakennuslaissa määräys, että puukamiinaa ei saa käyttää, jos laite ei ole testattu ja läpäissyt NS 3059:ssä määritellyjä enimmäispitoisuuksia hiukkasille.

Testausmenetelmä perustuu amerikkalaiseen EPA-standardiin. Savukaasujen hiukkaspitoisuus mitataan huuvan avulla laimennetusta savukaasusta (savukaasun ja ilman seoksesta). Norjalainen standardi vaatii hiukkaset mitattavaksi neljällä eri teholla. Hiukkaspäästö lasketaan näiden tulosten perusteella painottaen eri tehoilla saatuja tuloksia. Kamiinat luokitellaan joko luokkaan 1 tai luokkaan 2 riippuen siitä, kuinka pienellä teholla ne pystyvät toimimaan. Vaatimukset esitetään taulukossa 6.2.

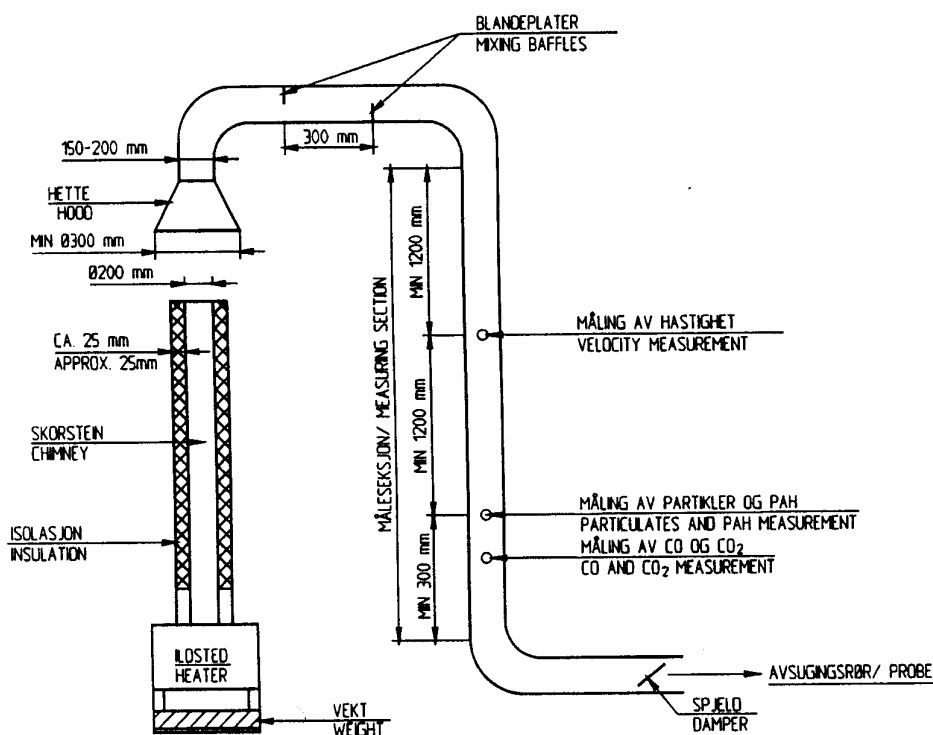
Taulukko 6.2. Norjalaisen puukamiinastandardin testauksessa vaadittavat polttoainetehot.

Kamiinan luokka	polttoaineteho kg/h	polttoaineteho kg/h	polttoaineteho kg/h	polttoaineteho kg/h
luokka 1	< 0.8	0.80 – 1.25	1.26 – 1.90	> 1.90
luokka 2	< 1.25	1.25 – 1.90	1.91 – 2.80	> 2.80

Suurimmat sallitut hiukkaspäästöt esitetään taulukossa 6.3. Norjalaisessa standardissa on erikoista se, että kamiinaa lämmitetään testaustilanteessa hyvin pienillä tehoilla. Standardin laatijat ovat läheneet kuitenkin siitä, että testausmenetelmä mukailee mahdollisimman paljon todellista kamiinoiden käyttöä Norjassa.

Taulukko 6.3. Suurimmat sallitut hiukkaspäästöt norjalaisen standardin mukaan.

	Suurin sallittu hiukkaspäästö yhden testin aikana. g/kg kuivaa puuta	Suurin sallittu hiukkaspäästö laskettuna neljän eri teholla tehdyn kokeen painotettuna arvona. g/kg kuivaa puuta
katalysaattorilla varustettu kamiina	10	5
kamiina, jossa ei ole katalysaattoria	20	10



Kuva 6.1. Periaatekuva kamiinan testauksesta norjalaisen standardin NS 3058 - 2 mukaisesti (NS 3038, 1994).

Koko testattava laite on vaa'an päällä. Sen avulla seurataan polttoainepanoksen palamisnopeutta. Syntyvä savukaasu sekoitetaan suureen määrään huoneilmaa nk. laimennustunnelissa. Tunneliin saadaan nopea ilman ja savukaasuseoksen virtaus, josta isokineettinen näytteenotto on paljon tarkempaa kuin suoraan savukaasukanavasta. Savukaasun ja ilman seoksesta mitataan hiukkasten pitoisuus tavanomaisella suodatinmenetelmällä. Laimennustunnelista mitataan kaasuseoksen nopeus ja lasketaan sen perusteella kaasun tilavuusvirtaus. Näiden perusteella saadaan laskettu hiukkas-

päästö g/h. Vaa'an lukemien perusteella voidaan yksikkö g/h muuntaa yksiköiksi mg/MJ tai g/kg poltettua polttoainetta. Laimennustunnelimenetelmä mahdollistaa tarkan mittauksen myös panospolttolaitteista, joissa isokineettinen näytteenotto hiukkasten mittaamiseksi suoraan savukanavasta on hankalaa, koska savukaasun virtausnopeus on pieni ja ajan suhteen vaihteleva.

Oleellisin ero näissä menetelmissä on kuitenkin se, että puun panospolttolaitteista ne mittaavat eri asioita. Laimennustunnelissa savukaasun ja ilman seos jäähtyy lähelle huoneen lämpötilaa. Jos puun palaminen on epätäydellistä, savukaasussa on paljon tervamaisia yhdisteitä (hiilivetyjä), jotka kondensoituvat pieniksi hiukkasiksi. Nämä kiinnittyvät savukaasussa olevien tuhka- ja hiilihiukkasten pintaan tai muodostavat itsenäisesti pieniä hiukkasia. Näin ollen laimennustunnelimenetelmällä mitatut hiukkaset ovat fyysikaalisesti erilaisia ja hiukkasmäärä on erilainen kuin suoraan savukanavasta mitattu.

Selkeää korrelaatiota eri menetelmien välille ei ole voitu osoittaa. Tämän takia mm. tulisijojen standardisointia tekevässä komiteassa, CEN TC 295 – Residential solid fuel burning appliances, kiistellään vieläkin mikä menetelmä otetaan hiukkasmittausmenetelmäksi tuleviin harmonisoiituihin standardeihin.

USA

Vuonna 1993 USA:ssa oli käytössä n. 8,9 miljoonaa puukamiinaa ja 25,7 miljoonaa avotakkaa. Vuonna 1997 kotien lämmitysenergiasta oli 9 % peräisin puusta[2]. USA:ssa päästörajat puukamiinoille tulivat voimaan vuonna 1988 (phase I). 1991 tulivat voimaan uudet, entistä tiukemmat päästörajat (phase II)(taulukko 6.4).

Taulukko 6.4. Puukamiinoiden hiukkaspäästörajat USA:ssa.

	Puukamiinatyyppi	
	Katalysaattorilla varustettu	Ei katalysaattoria
Phase I päästöraja (g/h)	5,5	8,5
Phase II päästöraja (g/h)	4,1	7,5

Testaus tehdään neljällä eri palamisnopeudella: < 1 kg/h, 1 – 1,25 kg/h, 1,26 – 1,5 kg/h ja maksimiteholla. Polttoaineena käytetään kuusipuusta (Douglas Fir) tehtyjä 2 x 2 tuuman puukappaleita, jotka ladotaan tulipesään ristikkomaisesti. USA:ssa voidaan käyttää hiukkasten mittaamiseen kahta eri menetelmää. U.S. EPA 5G menetelmässä käytetään laimennustunnelia ja menetelmässä U.S. EPA 5H savukaasunäyte otetaan suoraan laitteen savukanavasta. Päästö ilmaistaan yksikössä grammaa hiukkasia poltettua puukiloa kohti. Norjalainen testausmenetelmä on kopio menetelmästä U.S. EPA 5G.

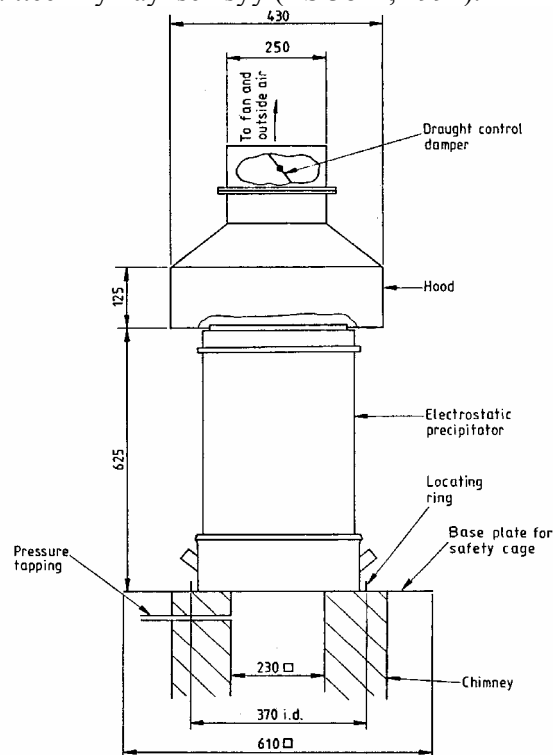
USA:ssa käytetään hiukkaspäästöistä nimitystä PM10, joka tarkoittaa alle 10 µm hiukkasten massapitoisuutta. Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa on todettu, että PM10 hiukkasten osuus kokonaisuudesta on 96 % , alle 2,5 µm hiukkasten 93 % ja alle 1 µm hiukkasten 92 %. Hiukkasista 90 % on peräisin orgaanisista yhdisteistä, 10 % hiilipartikkeleista ja vähemmän kuin 1 % epäorgaanisesta aineesta (Houck *ym*).

Iso Britannia

Isossa Britanniassa säädettiin 1956 ympäristön ilmanlaatua säätelevä laki (UK Clean Air Act). Laisa säädettiin erityisiä alueita, joissa saa polttaa vain ns. savuttomia polttoaineita. Polttoaineiden tes-

taamiseksi kehitettiin standardi BS 3841. Polttoainetta poltetaan vakioidulla tavalla testiuunissa ja muodostuneen savun määrä mitataan erityisellä sähkösuodattimella, joka kerää kaikki partikkelit siinä lämpötilassa kun savukaasut joutuvat kosketuksiin ulkoilman kanssa. Päästö ilmaistaan yksikkönä g/h. Laitteiden testaamiseksi on käytössä standardi PD 6334, jossa käytetään myös sähkösuodatinta savukaasun hiukkasten keräämiseen. Tämä testaustandardi kehitettiin pääasiassa laitteille, joissa käytetään bitumista hiiltä ja joissa on pyritty alentamaan hiukkaspäästöjä. Tätä testausmenetelmää voidaan käyttää myös laitteille, jotka on suunniteltu polttamaan ”savullisia” polttoaineita. Mikäli päästöt ovat riittävän alhaiset, hyväksytään laite käytettäväksi myös alueilla, jotka on säädely laissa alueiksi, joilla voi polttaa vain ”savuttomia” polttoaineita.

Isossa-Britanniassa käytössä olevasta hiukkasmittausmenetelmästä esitetään periaate kuvassa 6.2. Ylimmäisenä kuvassa on sähkösuodatin. Sen alapuolella olevalla laitteella tarkkaillaan jatkuvasti savukaasun opasiteettia. Jos opasiteetti kasvaa esimerkiksi polttoaineen lisäyksen jälkeen liian suureksi, myös tämä voi olla laitteen hylkäyksen syy (BS 3841, 1994).



Kuva 6.2. Iso-Britanniassa käytettävän hiukkasmittausmenetelmän periaate (BS 3841, 1994).

Tilanne muissa maissa

Australiassa ja Uudessa-Seelannissa on puukamiinoille yhteinen standardi. Hiukkasten mittaaminen perustuu laimennustunnelimenetelmään samalla tavalla kuin norjalaisessa ja USA:n standardissa. Hiukkaspäästö ilmaistaan yksikkönä g/h. Itävallassa hiukkaset mitataan suoraan savukaasukanavasta. Laissa on asetettu enimmäispitoisuus kokonaishiukkasten määrälle (60 mg/MJ), mutta erikoista on, että ei ole määritelty millä tavalla mittaus pitää tehdä.

6.1.2 Pienkattilat ja polttimet

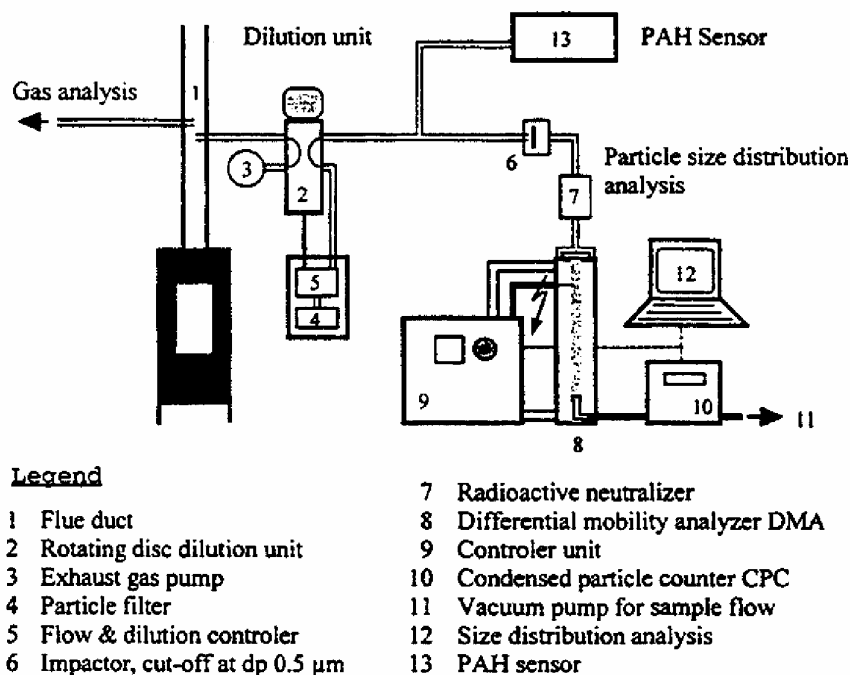
Pienkattiloiden ja polttimien hiukkaspäästöt mitataan gravimetrisellä suodatinmenetelmällä suoraan savukaasusta. Savukaasusta imetään osanäyte isokineettisesti (näytevirtaus samalla nopeudella kuin

savukaasu virtaa) suodattimen läpi. Samalla mitataan suodattimen läpi imetyn savukaasun määrä ja savukaasussa olevan veden määrä. Suodatin punnitaan ennen ja jälkeen mittauksen. Näiden perusteella voidaan laskea hiukaspitoisuus savukaasun tilavuusyksikköä kohden ja edelleen esim. energiayksikköä (MJ) kohden.

6.2 PIENHIUKKASTEN MITTAUSMENETELMIÄ JA -TULOKSIA

6.2.1 Sveitsiläisiä mittaustuloksia

Sveitsiläinen tutkimuslaitos Ökozentrum on tehnyt kenttämittauksia ja tutkinut erilaisten puunpolttolaitteiden kokonaishiukaspäästöjä (TSP = total suspended particles) ja pienhiukkasten päästöä yhtäaikaistulla mittauksilla. Pienhiukkaset mitattiin skannaavalla liikkuvuusanalysointilaitteella SMPS 0,01 - 0,600 μm alueella (Gaegauf *ym.*, 2001). Mittausjärjestely esitetään kuvassa 6.3. Mittauksessa käytetään osavirtausnäytteenottoa sekä TSP:n (suodatin; 4) että hiukkasjakauman (DMA +CPC; 8-12) mittaamiseksi.



Kuva 6.3. Sveitsiläisten käyttämä pienhiukkasten mittaussysteemi (Gaegauf *ym.*, 2001).

Panospolttolaitteita mitattiin usean panoksen palamisen ajalta. Mittaaminen lopetettiin kun viimeinen panos oli palanut samaan pisteeseen kuin vaa'an osoittama paino oli ennen ensimmäistä panosta. Varaavilla uuneilla mittaus aloitettiin polttoaineen sytytyksestä ja se päättyi kun viimeisen panoksen jälkeen CO_2 -pitoisuus oli laskenut 2,5 %:iin. Pilkekattiloiden polttokokeissa näytteenottajakson pituus oli useita tunteja. Jatkuvatoimisilla laitteilla tehtiin kokeita useilla kuormituksilla ja polttoaineilla. Menettely on melko tarkalleen sama kuin mitä raportoitavassa PIPO-hankkeessa noudatetaan.

Panoksen syttymisvaiheessa jakauma on isompien hiukkasten (0,2 µm) puolella. Kun voimakkaan pyrolyysin vaihe on ohitettu ja puut palavat tasaisemmin, hiukkasten määrä ja hiukkaskoko pienenee hieman. Hiillosvaiheessa hiukkasten määrä uudelleen lisääntyy ja koko pienenee ollen luokkaa 0,03 µm. Mittaustulosten yhteenveto esitetään taulukossa 6.5.

Taulukko 6.5. Sveitsiläisen Ökozentrum tutkimuslaitoksen mittausten yhteenveto.

Laite	Hiukkaspäästö	Pienhiukkasten lukumäärä (x 10 ¹³)
	mg/MJ	kpl/MJ
Puukamiinat	45 – 95	3,9 - 6,9
Varaavat uunit	123 – 211	9,4 – 21,4
Pilkekattilat	17 – 39	4,3 – 7,7
Pellettikattilat	18,8 – 21,2	2,5 – 2,9
Pellettikamiinat	51 – 57	6,4 – 10,8
Hakekattilat		
- kuiva polttoaine	81 – 107	8,3 – 10,1
- märkä polttoaine	42 – 54	4,4 – 5,4
- metsätähdehake	57 – 71	7,5 – 8,9

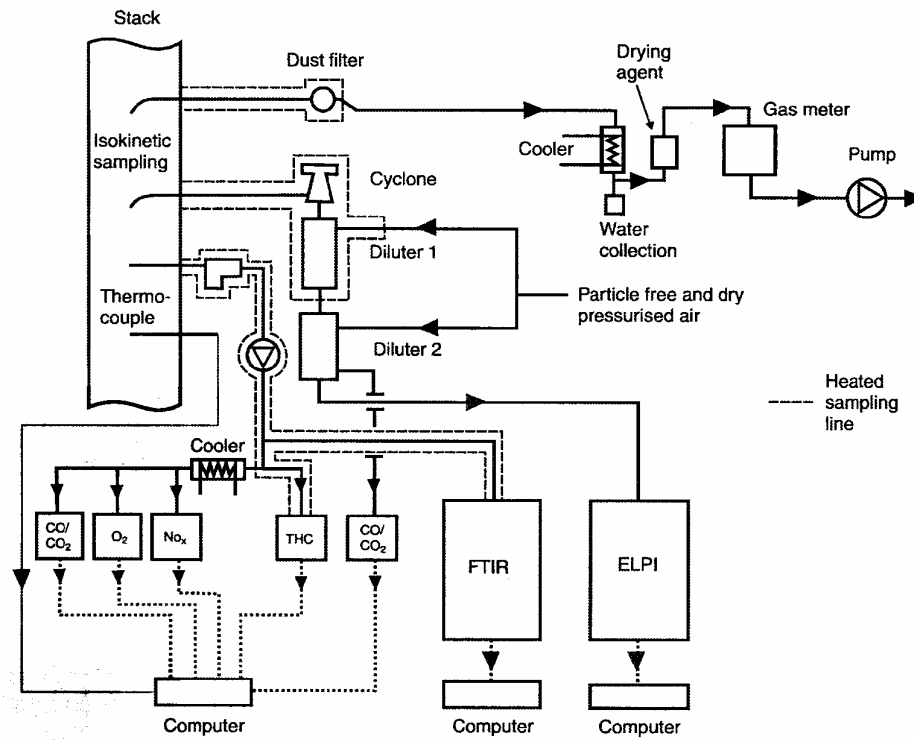
Lähteen mukaan tutkimuksen tärkeimmät tulokset ovat seuraavat:

- yli 95 % pienhiukkasista on kooltaan pienempiä kuin 0,4 µm
- panospolttolaitteiden pienhiukkasten koko on 0,03 - 0,20 µm ja vaihtelee panoksen palamisen vaiheesta riippuen
- jatkuvakäyttöisten laitteiden pienhiukkasten koko on 0,07 - 0,09 µm
- mikäli palaminen on suhteellisen täydellistä, kokonaishiukkasmäärän ja pienhiukkasten lukumäärän välillä on suhteellisen hyvä korrelaatio
- SMPS-menetelmä on kenttäkelpoinen pienhiukkasten mittausmenetelmä

6.2.2 Mittauksia aluelämpökattilasta

Ruotsissa on tehty hiukkasmittauksia 1,75 MW:n ja 2,5 MW:n kattilalla (Johansson *ym.*, 2001). Molemmat olivat tyypiltään samanlaisia, liikkuvalla arinalla varustettuja kattiloita. Pienemmässä kattilassa poltettiin puupellettejä ja isommassa puubrikettejä. Mittaukset tehtiin multisyklonipuhdistimen jälkeen. Mittausjärjestely esitetään kuvassa 6.4.

Hiukkasten kokonaispäästö vaihteli välillä 20 – 50 mg/MJ kattiloiden ajotilanteesta riippuen. Pienhiukkasten lukumääräpitoisuus laskettuna savukaasun normaalitilassa (0 °C, 100 kPa) redusoituna happipitoisuuteen 13 % oli (3,1-3,2) 10⁷ (kpl/cm³) ja lukumäärä ilmaistuna polttoaineen energiaa (MJ) kohden välillä (1,5-2,9) 10¹¹. Mittaukset tehtiin sähköisellä alipaineimpaktorilla ELPI kokoalueella 0,03 - 10 µm. Pienhiukkasten lukumäärä oli suurimmillaan kokoluokassa 0,1 - 0,3 µm. Sveitsiläisten ja ruotsalaisten mittaustulosten vertailun perusteella suurempien kattiloiden pienhiukkaspäästöt ovat kertaluokkaa alhaisemmat kuin pienempien kattiloiden päästöt.

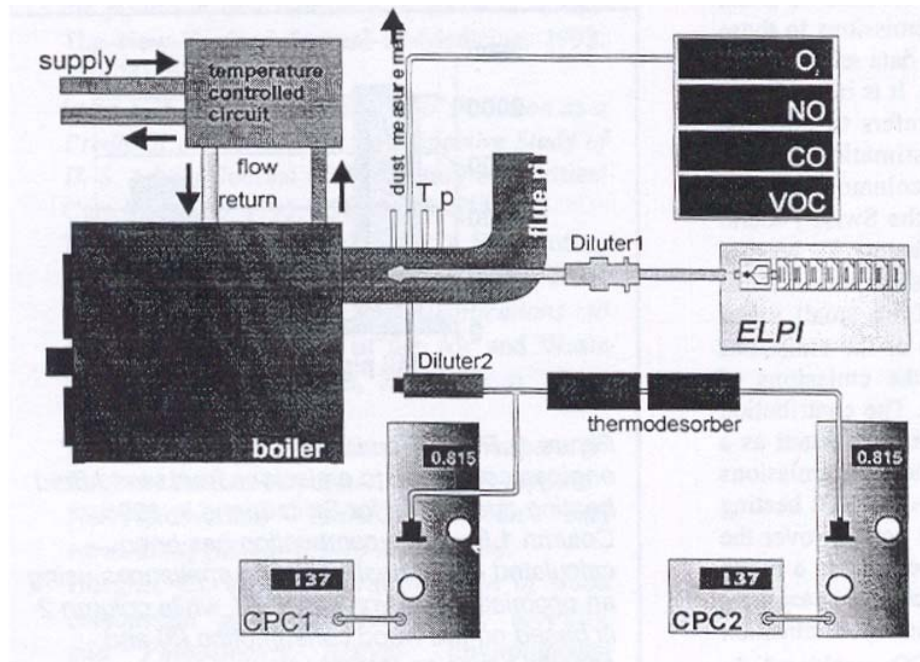


Kuva 6.4. Ruotsalaisissa mittauksissa käytetty mittausjärjestely (Johansson ym., 2001).

6.2.3 Sveitsiläisen EMPA-laboratorion tuloksia

Sveitsiläinen EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research) on tehnyt hiukkasmittauksia kahdesta pilkekattilasta, pellettikattilasta sekä avotakasta (Schmatlock ja Brenn, 2001). Pienhiukkasia mitattiin ELPI:llä mittausalueella $0,05 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$. Näytekaasu imettiin savukaasusta isokineettisesti ja laimennukseen käytettiin ejektorilaimenninta.

Toisessa pienhiukkasten mittauslinjassa käytettiin rotary disk –laimenninta, jolla näytekaasu pystytään laimentamaan suhteella 30 - 3000. Laimennettu näytekaasu jaettiin kahteen mittaussyksikköön, jotka koostuivat DMA ja CPC –laitteista. Mittausalue oli $0,01 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$. Ennen toista mittauslaitteistoa linjassa oli thermodesorberi, jolla pystyttiin määrittämään haihtuvien partikkelien tai kiinto-partikkelien pinnalle absorboituneiden haihtuvien aineiden osuus. Mittausjärjestely esitetään kuvassa 6.5.



Kuva 6.5. EMPA -testaus- ja tutkimuslaitoksen mittausjärjestely (Schmatlock ja Brenn, 2001).

Tärkeimmät tulokset mittauksista olivat

- hiukkaspäästöt vaihtelevat paljon puupanoksen palamisen eri vaiheissa
- öljyyn verrattuna puun poltossa syntyy isompikokoisia hiukkasia ja lukumääräisesti enemmän
- lukumäärältään suurimmat pitoisuudet ovat kokoluokassa 0,08 - 0,18 µm
- hiilimonoksidipitoisuus on aika hyvä indikaattori kuvaamaan palamisen puhtautta

6.2.4 Puupellettien poltossa syntyvät pienhiukkaset

Vuonna 2002 valmistuneessa lisensiaattityössä esitetään mittaustuloksia puupellettien ja puubrikettien polttokokeista pienpolttolaitteissa ja aluelämpökattiloissa (Johansson, 2002; Taulukko 6.6). Pienten laitteiden polttokokeet tehtiin laboratorio-olosuhteissa ja aluelämpökattiloiden kokeet todellisilla laitoksilla. Hiukkasten mittausjärjestely on kuvassa 6.4.

Hiukkasten kokonaismäärä mitattiin perinteistä suodatinmenetelmää käyttäen. Pienhiukkasten näytteenottolinjassa on ensimmäisenä 180 °C:n lämpötilassa sykloni, jolla erotetaan 10 µm:ia suuremmat hiukkaset. Sen jälkeen on ensimmäinen laimennin, joka on myös 180 °C:n lämpötilassa. Toinen laimennus tehdään huoneenlämpöisellä ilmalla. Kokonaislaimennus on luokkaa 1 : 50. Kontrollin vuoksi järjestelmässä mitataan CO- ja CO₂ -pitoisuudet myös laimennuksen jälkeen. Laimentimet ovat ejektorilaimentimia (Dekati Oy).

Hiukkasten lukumääräjakaumat mitattiin työssä sähköisellä alipaineimpaktorilla (ELPI) ja massajakaumat punnitusimpaktorilla (DLPI) (Dekati Oy). Laitteiden mittausalue oli 0,03 µm - 10 µm.

Taulukko 6.6. Pellettien polttokokeiden tuloksia (Johansson, 2002).

Polttolaite		Teho	O ₂ %	N 1/cm ³	PM mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	OGC mg/Nm ³
Pellettipoltin; ylöspäin	liekki	100 %	11,1	2,6 x 10 ⁷	47	76	6
		6 kW	14,6	3,1 x 10 ⁷	12	733	115
		3 kW	16,9	13,4 x 10 ⁷	132	1951	370
Pellettipoltin; vaakasuorassa	liekki	100 %	7,4	1,4 x 10 ⁷	34	245	5
		6 kW	11,3	2,8 x 10 ⁷	137	2053	87
		3 kW	11,9	1,4 x 10 ⁷	33	244	14
Pellettikamiina		100 %	13,8	4,5 x 10 ⁷	ei mitattu	710	12
		100 %	13,0	6,6 x 10 ⁷	ei mitattu	540	12
		100 %	12,9	5,9 x 10 ⁷	ei mitattu	530	< 1
		100 %	13,5	3,7 x 10 ⁷	65	710	< 1
		100 %	12,8	3,4 x 10 ⁷	ei mitattu	490	10
		75 %	14,1	2,5 x 10 ⁷	ei mitattu	500	9
		50 %	15,5	3,7 x 10 ⁷	ei mitattu	280	6
		min	19,4	12,1 x 10 ⁷	ei mitattu	4290	230

6.3 LAIMENNUS

Puun pienpoltossa joudutaan muissa menetelmissä kuin päästömittaustandardin mukaisessa suorassa savukaasumittauksessa käyttämään savukaasun laimennusta. Puun poltossa palamisaerosoli voi olla hyvinkin kuumaa (yli 500 °C), hiukkaspitoisuus korkea ja savukaasu sisältää kondensoituvia yhdisteitä. Laimennuksen avulla lämpötila alenee, kondensoituminen vähenee tai pysähtyy ja näytteenotto tulee mahdolliseksi.

Savukaasu voidaan laimentaa joko kokonaan, jolloin käytetään yleensä kylmää ja kosteaa laimennusilmaa tai savukaasusta otetaan osavirtaus, joka laimennetaan. Tällöin voidaan käyttää kylmää ja kosteaa puhdistettua laimennusilmaa (tunneli), kylmää kuivattua laimennusilmaa (paineilma) tai lämmitettyä kuivaa paineilmaa tai toimia vaihteittain siten, että esilaimennus tapahtuu kuumalla ja kuivalla laimennusilmalla ja toisiolaimennus kylmällä ja kuivalla laimennusilmalla (esimerkiksi ejektorilaimentimet peräkkäin).

Laimentimissa tapahtuvia ilmiöitä ovat esimerkiksi nukleaatio, agglomeraatio, kondensaatio ja seinämähäviöt. Eri laimennustekniikat vaikuttavat eri tavalla palamisaerosolin muuntumiseen näiden ilmiöiden seurauksena. Erityisesti laimennusilman laatu vaikuttaa lopputulokseen. Kylmää laimennusilmaa käytettäessä nopeassa jäähtymisessä palamisaerosolin haihtuvien komponenttien höyrinpaine laskee nopeasti ja aiheuttaa sopivissa olosuhteissa nukleaatiota eli uusien pienten hiukkasten muodostumista. Kuumaa laimennusilmaa käytettäessä pitoisuus alenee ilman nukleaatiota. Menetelmässä, jossa esilaimennus tehdään kuumalla laimennusilmalla ja toisiolaimennus kylmällä laimennusilmalla, laimennus tapahtuu ilman tiivistymistä ja nukleaatiota. Laimennusilman kosteus (ts. vesi) reagoi tiivistyvien ainesosien kanssa ja voi helpottaa näiden nukleoitumista. Myös laimennusilman ja savukaasun sekoittuminen laimentimessa vaikuttaa nukleaatioprosessiin (Turrek, 2004). Nopea sekoittuminen helpottaa nukleaatioprosessia (Lyyränen *ym.*, 2004). Hiukkashäviöihin vaikuttaa erityisesti laimentimen muoto, mutta myös savukaasun viipymäaika laimentimessa.

Ejektorilaimennuksessa savukaasuosanäyte otetaan vakioilavuusvirralla kanavasta, jolloin myös laimennussuhde on tasaisissa olosuhteissa vakio. Laimennus suoritetaan kuivalla paineilamalla, joka voidaan lämmittää. Myös itse laimennin voidaan tarvittaessa lämmittää. Laimentimia voidaan kyt-

keä sarjaan, jolloin laimennussuhde kasvaa portaittain. Yleisesti yhtä laimenninta käytetään tapauksissa, joissa mukana on jokin muu laimennusmenetelmä. Ejektoriperiaatteella toimivissa laimentimissa erityisesti häviöt ja laimentimien tukkeentuminen aiheuttavat ongelmia.

Laimennustunneleita on yleisesti käytetty moottorimittauksissa ja autojen pakokaasujen mittauksiin käytetäänkin standardoituja menetelmiä. Laimennusilma on yleensä puhdistettua huoneilmaa.

Puun pienpolton mittauksissa on käytetty mm. huuvalaimennusmenetelmää, jota USA:ssa kutsutaan sekoittavasti myös myös laimennustunneliksi (EPA 5 G standardi). Huuvalaimennuksessa laimennusilma on puhdistamatonta huoneilmaa ja kyseessä on kokonaisvirtauslaimennus. Huuvalaimennuksen huonoja puolia on se, että laimennusprosessi ei ole hallittavissa ja likainen huoneilma laimennusilmana voi vaikuttaa tulokseen.

6.4 PROJEKTISSA KÄYTETYT MENETELMÄT JA LAITTEISTOT

Näytteenotto on tärkein osa pienhiukkasmittausta hiukkasten olosuhderiippuvuuden takia. Mittalaitteiden on pystyttävä vaihtelevissa olosuhteissa luotettavasti havaitsemaan sekä ultrapieniä (<100 nm) että suurhiukkasia ja määrittämään sekä lukumäärä- että massapitoisuuksia. Mikäli pyritään päästön syntymisen ymmärtämiseen, myös hiukkasten koostumuksesta pitää saada mahdollisimman paljon tietoa. Tässä hankkeessa kiinnostus kohdistui hiukkashiilen koostumukseen ja palamisaerosolin rakenteeseen. Seuraavassa esitellään tutkimuksessa käytetyt menetelmät ja mittalaitteet.

ELPI

Hiukkasten kokojakauman ja pitoisuuksien reaaliaikaiseen mittaukseen käytettiin sähköistä alipaineimpaktoria ELPI (Electrical Low Pressure Impactor, Dekati Oy). ELPI:n toiminta perustuu hiukkasten inertiaan ja varautumiseen ja sillä saadaan mitattua lähes reaaliaikaisesti kokojakauma 30 nm – 10 µm (ilman suodatinastetta) tai 7 nm – 6.3 µm (suodatinasteen kanssa) kokoalueella.

ELPI koostuu varaajajyksiköstä, alipaineimpaktorista, pumpusta sekä laskentaohjelmasta. Näyteaerosoli imetään pumpun avulla koronavaraajaan, jossa korkeajännite (5 kV) varaa hiukkaset. Varaajasta hiukkaset johdetaan impaktoriin, jossa on 13 astetta. Jokainen aste on eristetty toisista ja asteisiin on liitetty herkät elektrometrit. Kun varatut hiukkaset törmäävät impaktioasteelle, ne luovuttavat samalla saamansa varauksen. Varausmuutosten aiheuttama sähkövirta mitataan elektrometrien avulla. Hiukkasten kokoerotelu perustuu impaktoriasteiden eroon ja detektointi sähkövarausten määrään. Hiukkasten lukumääräjakauma ja -pitoisuus määritetään suoraan virta-arvojen perusteella. Massajakauma perustuu laskennalliseen arvoon olettamalla hiukkasille joku tiheysarvo. Perusoletuksena käytetään 1 g/m³. ELPI:n (ja yleensä impaktorin) ongelmina ovat hiukkasten irtoaminen impaktiotasoilta, erilaiset häviöt (diffuusio, sähköiset) ja niiden vaikutus näyttämään sekä tiheyden vaikutus massajakaumaan ja -pitoisuuteen. On myös osoittautunut, että impaktioalustojen pinnan laatu (sileä foili tai sintrattu pinta) saattaa vaikuttaa hiukkasten käyttäytymiseen alustalla.

SMPS

Hiukkasten kokojakaumamittaukseen käytettiin lisäksi (Kuopion yliopisto) skannaavaa liikkuvuus-kokoanalysaattoria SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). Laite soveltuu parhaiten tasaisen päästön mittaamiseen ja etuna ELPI:in on suurempi hiukkasten jakovälien määrä ja kyky pienempien hiukkaskokojen havaitsemiseen. SMPS koostuu sähköiseen liikkuvuuteen perustuvasta hiukkaskokoluokittelijasta (DMA, Differential Mobility Analyzer, TSI Model 3071) sekä hiukkaslaskurista (CPC, Condensation Particle Counter, TSI Model 3022) ja sillä voidaan mitata kokojakaumia väliltä 7 nm – 1000 nm lähes reaaliaikaisesti.

DMA luokittelee hiukkaset kokoluokkiin sen mukaan millainen sähköinen liikkuvuus hiukkasilla on. Liikkuvuus riippuu hiukkasen koosta ja varauksesta. DMA:ssa näyteaerosoli kulkee ensin laitteen varaajajyksikön (Kr-85 Kuopion yliopiston laitteessa) läpi, jossa hiukkaset varataan. Kokoluokittelu tapahtuu laminaarivirtauksessa kahden sisäkkäisen putken välissä, joista sisempi toimii keskuselektronina. Virtaus saadaan aikaan puhtaan kantokaasun avulla. Nostamalla keskuselektronin jännitettä portaittain välillä 0 – 10 000 V putkien välisen tilan sähkökenttä kuljettaa näyteaerosolin hiukkaset kokoluokittain hiukkaslaskuriin (CPC), missä niiden lukumäärä rekisteröidään. Laskurissa hiukkaset kasvatetaan samaan kokoon käyttämällä hyväksi ylikylläistä butanolihöyryä, jolloin ne voidaan havaita optisesti.

Mittaustiedosta saadaan määritettyä hiukkasten lukumääräjakauma laskentaohjelman avulla, joka yhdistää DMA:n ja CPC:n tiedot. Yhden jakauman määrittäminen kestää noin kaksi minuuttia. Mittausaluetta saadaan muutettua kaasuvirtauksia muuttamalla.

Hiukkasmassa ja hiilianalyysi

Hiukkasmassan mittaukseen käytettiin päästömittaustandardin SFS 3866 mukaista suodatinkeräysmenetelmää. Hiukkasmäärittämiä tehtiin paitsi suoraan savukanavasta myös laimennetusta savukaasusta. Mittauksissa Kuopion yliopistossa kerättiin laimennetusta savukaasusta otetut näytteet 47 mm pohjasuodattimelle (Gelman Sciences TefloTM). Hiukkassuodattimet punnittiin ennen ja jälkeen keräyksen täysmikrova'alla (Mettler Toledo MT5), jonka tarkkuus on 1 µg. Ennen punnitusta suodattimet vakioitiin puhdistilassa (vakio-olosuhteet RH 50 %, lämpötila 20 °C). Punnitustuloksiin tehtiin nostekorjaus. Punnituksessa sähkövoimien vaikutukset eliminoitiin varauksen poistajalla (Staticmaster Po-210).

Hiukkasten orgaanisen hiilen OC ja alkuainehiilen EC osuukien suhdetta kuvaava OC/EC määritettiin kvartsisuodattimelle kerätystä näytteestä Kuopion yliopistossa rakennetulla termisoptisella hiilianalyysaattorilla (Ålander *ym.*, 1998). Määrittämissä eri lämpötiloissa vapautuvan hiilen määrää mitataan FID-detektorilla. Saadusta termogrammista lasketaan näytteen orgaanisen ja epäorgaanisen hiilen pitoisuus käyttäen erityistä ohjelmaa.

Hiilianalyysia varten otettiin hiukkasnäytteitä mittaustilteistolla, johon kuuluvat impaktori, näytteenkeräyssondi sekä keräysilman säätöä ja määrää mittaavat laitteet. Näyteaerosoli imettiin keräyssondiin esierottimena toimivan impaktorin (PM1) läpi, jossa impaktiotasojen alustoina käytettiin rasvattuja (Apiezon-L) alumiinifolioita. Esierotin päästää lävitse alle 1 µm hiukkaset, joten keräyssondin suodattimille saadaan keräytyä pienihiukkasmassa PM1.

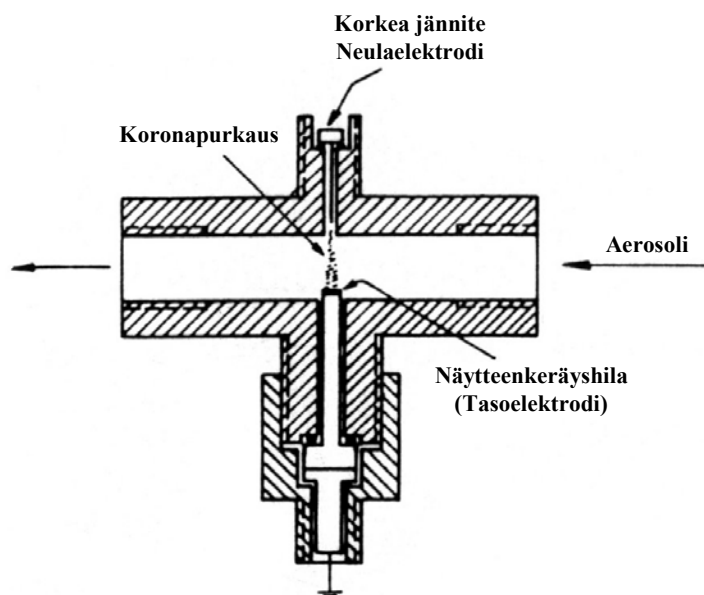
Analysoitavat näytteet kerättiin läpimitaltaan 47 mm kvartsikuitusuodattimille (Gelman Pallflex Tissuequartz 2500QAT-UP) sekä 47 mm zefluorsuodattimille (Gelman Zefluor 1µm P5PL047). Suodattimet on sijoitettu haponkestävästä teräksestä valmistettuihin suodattimenpitimiin (Gelman 2220). Koska huokoinen kvartsikuitu adsorboi kaasufaasista orgaanisia yhdisteitä ja typen oksideja (positiivinen artefakta) (Turpin *ym.*, 1994, Medow ja Huntzicker, 1990), suodattimelle voi keräytyä myös kaasufaasissa olevia yhdisteitä. Suodatinkeräyksessä käytettiin tämän korjaamiseksi rinnakkaisnäytteenottoa, jossa näyteaerosolivirta jaetaan keräimessä kahteen osaan, toisessa on kaksi peräkkäistä kvartsisuodatinta ja toisessa zefluorsuodatin ja kvartsisuodatin. Suodattimille kertynyt massa määritettiin punnitsemalla (ks. ed.) ja osa analysoitiin termisoptisesti. Hiilianalyysit tehtiin kvartsisuodattimista. Ennen alkupunnitusta puhtaita kvartsisuodattimia kuumennettiin uunissa 800 °C:n lämpötilassa 4 tunnin ajan, jotta suodattimissa olevat hiiliyhdisteet saatiin poistetuksi. Suodattimia säilytettiin petrimaljoissa, jotka happopestiin ja poltettiin uunissa 400 °C:n (2 tuntia) lämpötilassa ennen käyttöä.

SEM,TEM

Hiukkasten koon, muodon ja rakenteen tutkimiseksi kerättiin näytteitä myös pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM, XL30 ESEM TMP) ja läpäisyelektronimikroskoopilla (TEM, JEM-1200EX) tehtäviä tarkasteluja varten. Näytteiden käsittelyt tehtiin Kuopion yliopiston Elektronimikroskopian laitoksella. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla voitiin havaita noin yli 1 μm hiukkasten muoto ja pinnan rakenne sekä määrittää näytteen alkuainekoostumus energiadiispersiivisellä röntgenspektrometrillä (EDS). TEM-tekniikka teki mahdolliseksi pienten primääripartikkelien sekä niistä muodostuneiden agglomeraattien kuvaamisen.

SEM-näytteitä kerättiin sähköisellä keräimellä hiiliteippialustoille sekä tavanomaisena suodatinke-räyksenä Nuclepore-suodattimille (Nuclepore Corp. Pleasanton 1 μm). Tarkasteltaessa näytteitä hyvin alhaisessa paineessa eli ns. High Vacuum -työnä, päällystettiin näytteet ohuella kultakerrok-sella ionisputterointilaitteella (Polaron Sputter Coater II -E5100), mikä ehkäisee näytteen varautu-mista ja parantaa kuvan muodostusta.

TEM-näytteet kerättiin sähköisellä keräimellä kuparihiloille, joiden keräyspinta oli päällystetty ohuella hiilikerroksella. Sähköisessä keräimessä hiukkasnäyte ohjataan poikittaisen koronalangalla muodostetun sähkökentän läpi, jolloin hiukkasia siirtyy sähkökentän suuntaisesti näytteenke-räysalustalle. Kuvassa 6.6 on esitetty sähköisen keräimen toimintaperiaate Yehin (1993) mukaan.



Kuva 6.6. Elektronimikroskooppinäytteiden keräys sähköisellä keräimellä (Yeh, 1993).

6.5 TULOKSET MITTAUSLAITEVERTAILUISTA

6.5.1 ELPI hiukkasanalysaattoreiden laitetyyppien vertailu

6.5.1.1 Vertailumittaus pellettitakalla

ELPIN impaktioalustat ja tilavuusvirrat voivat poiketa toisistaan eri laiteversioissa ja vaikuttaa saatavaan hiukkasjakoukumaan ja pitoisuuteen. Vaikutusta tutkittiin helmikuussa 2004 käyttämällä päästölähteenä pellettitakkaa, joka on alkulämmitysvaiheen jälkeen varsin stabiili puun pienpolton päästölähde. Laitetta käytettiin nimellisteholla 8 kW. Hiukkasmittaus tehtiin laimennustunnelista 22 – 26 °C:n lämpötilassa. Mittausta käsitellään tässä yhteydessä tarkemmin, koska mittauksen kaikki

tulokset tulevat esille myöhemmin vertailumittausten yhteydessä. Vertailtavat laitteistokokoonpanot olivat:

1. 10 Lpm impaktoriputki, alumiinifolioalustat 1 (lämmitysvaihe)
2. 30 Lpm impaktoriputki, alumiinifolioalustat
3. 10 Lpm impaktoriputki, sintratut alustat
4. 30 Lpm impaktoriputki, sintratut alustat
5. 10 Lpm impaktoriputki, alumiinifolioalustat 2

Mittaus 1 oli lämmitysvaiheen mittaus ennen tulipesän kuumenemista. Alumiinifoliot oli rasvattu Apiezon-tyhjiörasvalla ja sintratut alustat öljytty käyttöohjeen mukaisesti. Mittauksen olosuhdeparametrit esitetään jaksoittain taulukossa 6.7. Päästöissä esiintyy tunnin välein voimakas päästöpiikki, mikä johtuu laitteen automaattisesta puhdistustoiminnosta. Taulukkoarvot on laskettu ilman näitä puhdistusjaksoja.

Taulukko 6.7. Pellettitakan mittauksen olosuhdeparametrit. Tulipesän lämpötila on mitattu välittömästi tulipesän jälkeen. Savukaasun lämpötila on mitattu savukanavasta kaksi metriä laitteen poistoputkesta. Ulospuhalluslämpötilalla tarkoitetaan pellettitakan vaipan yläosasta huoneilmaan tulevan ilman lämpötilaa.

Mittausjakso	Lämpötilat					Massavirta g/s	Veto Pa
	Tulipesä °C	Savukaasu °C	Ulospuhallus °C	Tunneli °C	Laboratorio °C		
ELPI 10 Lpm, AL-foliot (1)	374	105	67	22	21	0.21	-5.3
ELPI 30 Lpm, AL-foliot	406	152	83	24	22	0.24	-5.8
ELPI 10 Lpm, Sintratut	418	159	86	25	23	0.24	-5.8
ELPI 30 Lpm, Sintratut	423	163	89	26	23	0.26	-5.9
ELPI 10 Lpm, AL-foliot (2)	414	159	87	26	24	0.25	-5.8

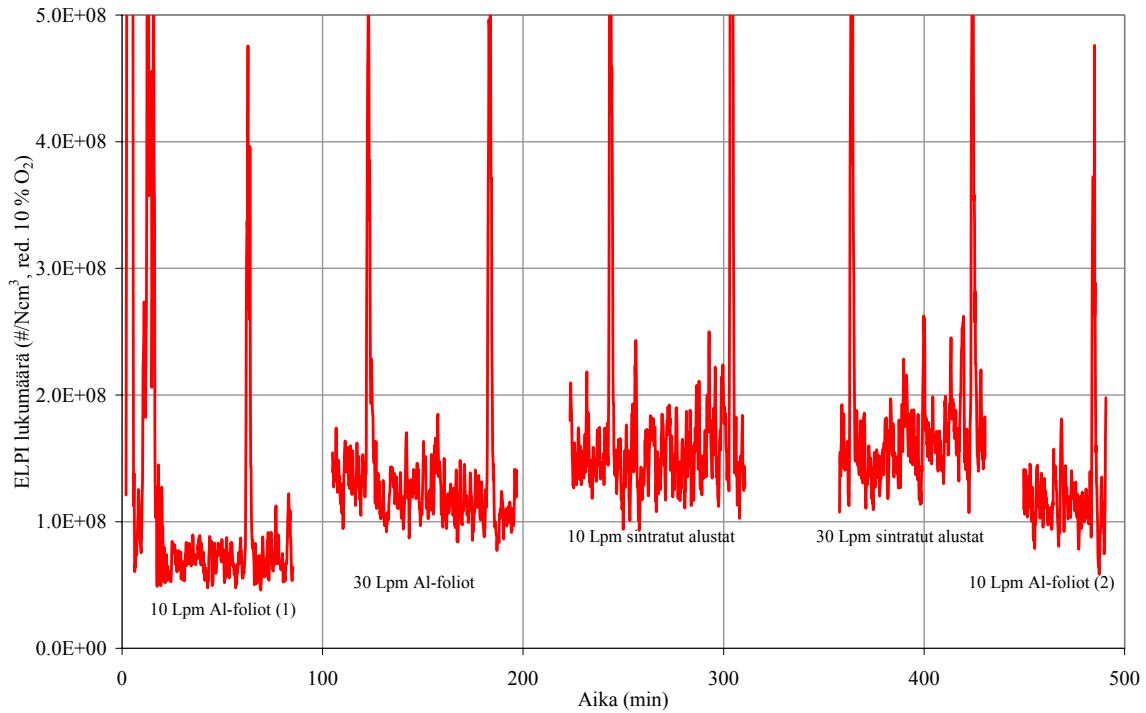
(1) Lämmitysvaihe.

Keskimääräinen CO₂-pitoisuus jaksojen aikana oli 9.7 – 9.8 %, CO-pitoisuus 220 – 350 mg/Nm³ ja NO-pitoisuus 132 – 142 mg/Nm³. Prosessin jäännöshappipitoisuuden maksimivaihtelu oli ± 10 % ja häkäpitoisuuden ± 34 – 42 %. Hiukkaspitoisuus vaihteli jaksojen aikana kokonaislukumäärän osalta ± 15 – 18 % ja PM1 massan osalta ± 18 – 21 % keskiarvon suhteen.

Laitekoonpanojen tulokset erosivat toisistaan merkittävästi (Taulukot 6.9 ja 6.10). Alumiinifolioalustoja käytettäessä lukumääräpitoisuus oli 25 % pienempi ja aritmeettinen hiukkaskoko vähintään 15 % suurempi (jaksojen 4 ja 5 ero) kuin sintratuilla alustoilla. ELPI PM1 massan osalta tulokset vaihtelivat eikä selvää eroa kokoonpanojen välille saatu. 10 litran ja 30 litran ELPIen tulokset olivat mittaustarkkuuden rajoissa yhteneviä lukumäärän ja hiukkaskoon osalta (10 litran ELPIllä lukumäärät olivat 4 – 6 % ja koot 8 - 16 % pienemmät kuin 30 litran ELPIllä). Kuvassa 6.8 esitetään kokonaislukumääräpitoisuus vertailumittauksessa ja kuvassa 6.9 keskimääräiset hiukkaskokojakaumat mittaussarjoilla 2 – 5.

Taulukko 6.8. Savukaasukomponenttien, hiukkaslukumäärän ja PM1 hiukkasmassan (ELPI) keskimääräiset mittaussarvot eri jaksoilta sekä arvojen keskihajonta pellettitakan vertailumittauksessa.

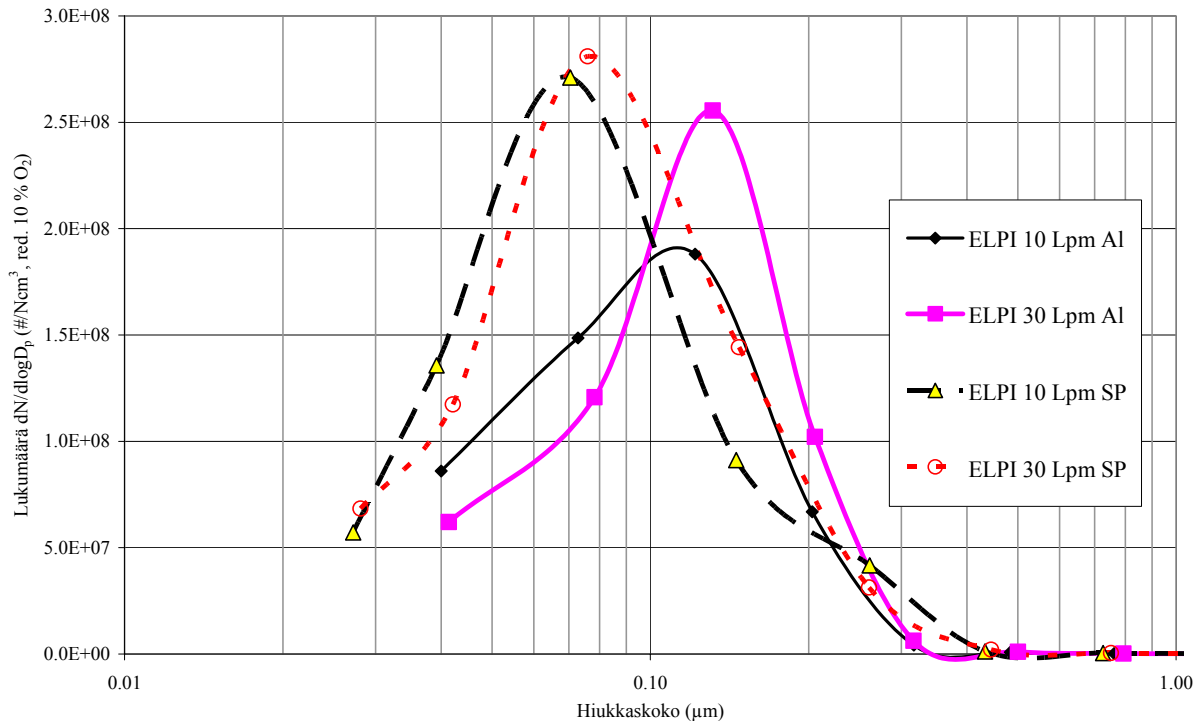
Mittausjakso	NO	CO	CO ₂	N	PM1	AM
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	%	#/Nm ³	mg/Nm ³	nm
ELPI 10 Lpm, AL-foliot (1)	132 ± 7	250 ± 100	9.8 ± 0.3	7.03E+07 ± 1.23E+07	210 ± 50	140 ± 6
ELPI 30 Lpm, AL-foliot	139 ± 6	220 ± 80	9.7 ± 0.3	1.21E+08 ± 1.76E+07	59 ± 12	127 ± 5
ELPI 10 Lpm, Sintratut	140 ± 5	240 ± 100	9.8 ± 0.3	1.53E+08 ± 2.58E+07	42 ± 9	86 ± 4
ELPI 30 Lpm, Sintratut	142 ± 6	350 ± 120	9.8 ± 0.3	1.64E+08 ± 2.95E+07	46 ± 8	93 ± 5
ELPI 10 Lpm, AL-foliot (2)	142 ± 5	250 ± 90	9.8 ± 0.3	1.16E+08 ± 1.78E+07	38 ± 8	107 ± 4



Kuva 6.8. ELPI kokonaislukumääräpitoisuus (kp/Ncm^3 , redusoituna 10 % happipitoisuuteen) pellettitakan vertailumittauksessa. Ensimmäisellä jaksolla (10 Al) olosuhteet merkittävästi erilaiset muihin jaksoihin verrattuna (kylmä tulipesä).

Taulukko 6.9. ELPI:n eri laitekoonpanojen väliset suhdeluvut hiukkaslukumäärän, PM1 hiukkasmassan ja keskikoon (AM) osalta.

	Alustan vaikutus, Al/S		Tilavuusvirran vaikutus, 10 / 30 Lpm	
	10 lpm	30 Lpm	Al-alustat	Sintratut alustat
Lukumäärä	0.76	0.74	0.96	0.94
PM1	0.90	1.29	0.64	0.92
AM	1.24	1.37	0.84	0.92



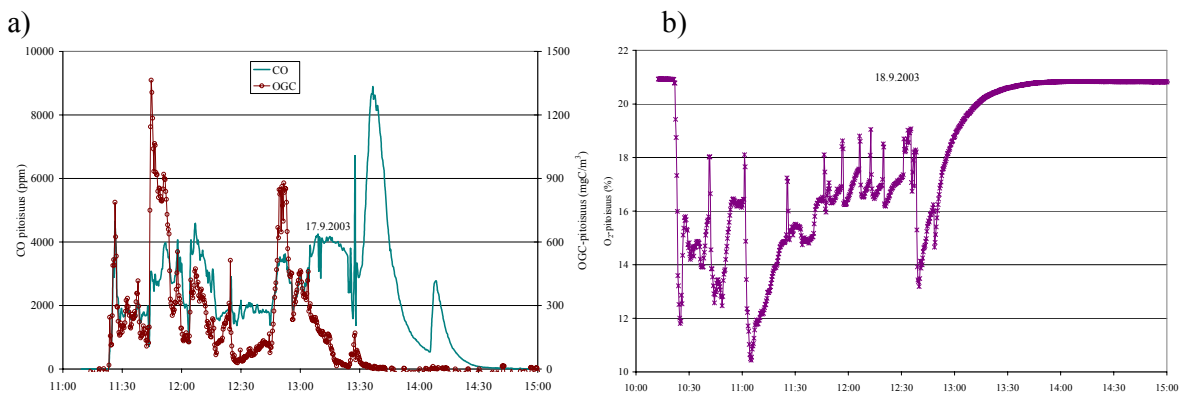
Kuva 6.9. ELPI:n keskimääräiset hiukkaskokojakaumat tilavuusvirroilla 10 ja 30 litraa/min sekä sintratuilla (SP) ja alumiinifolioalustoilla (Al) vertailumittauksessa pellettitakalla.

6.5.1.2 ELPI:n vertailu yhteismittausjaksoilla

ELPI-mittalaitteiden toimintaerojen selvittämiseksi tehtiin kaksi yhteismittausjaksoa Kuopion yliopistossa sekä yksi mittausjakso Fortum Oil and Gas Oy:n polttolaboratoriossa käyttäen päästölähteinä erilaisia pienpolttolaitteita. Jaksojen yksityiskohtia ei tässä yhteydessä käydä lävitse. Osoitetaan, että tulokset ovat hyvin yhteneviä pellettitakalla saatujen tulosten kanssa.

Ensimmäisellä mittausjaksolla päästölähteenä oli panospolttainen leivinuuni. Mittaukset tehtiin kolmella ELPI:llä ja yhdellä DLPI:llä yhtäaikaisesti huoneenlämpöisestä laimennustunnelista samasta näytelinjasta. Mittauksia tehtiin kolme. Polttoaineena käytettiin kuorellista kuivaa koivupilkkettä. Kokeissa ei pyritty optimaaliseen vähäpäästöiseen polttoon, vaan tavoitteena oli selvittää vaihtelevien päästöjen (Kuva 6.10) merkitys ELPI:n tuloksiin sekä vertailla laitteita keskenään. Koska olosuhteet laitteille olivat samanlaiset, laimennustunnelista mitattuja päästötuloksia ei ole olosuhdekorjattu. Laitteista käytetään seuraavassa merkintöjä **KYE** = Kuopion yliopiston 30 Lpm ELPI alumiinifolioalustoilla, **VTTE** = VTT:n 10 Lpm ELPI alumiinifolio- tai sintratuilla alustoilla, **FOE** = Fortumin 10 Lpm ELPI sintratuilla alustoilla ja **DLPI** = VTT:n 10 Lpm punnitusimpaktori alumiinifolioalustoilla.

Toisella yhteismittausjaksolla polttolaitteena oli pellettitakka, jota käytettiin nimellisteholla 8 kW. Vertailumittaukset tehtiin yhtäaikaisesti eri laitekoonpanoilla samasta näytelinjasta laimennustunnelista. Vertailussa oli mukana myös suodatinmääritys. Pitoisuuseroja ja hiukkaskokoja selvitetään seuraavassa etupäässä kuvien avulla.



Kuva 6.10. Vaihteleva prosessi leivinuunimittauksissa. Häkä- ja kokonaishiilivetyypitoisuus 17.9.2003 (a) ja jäännöshappipitoisuus 18.9.2003 (b).

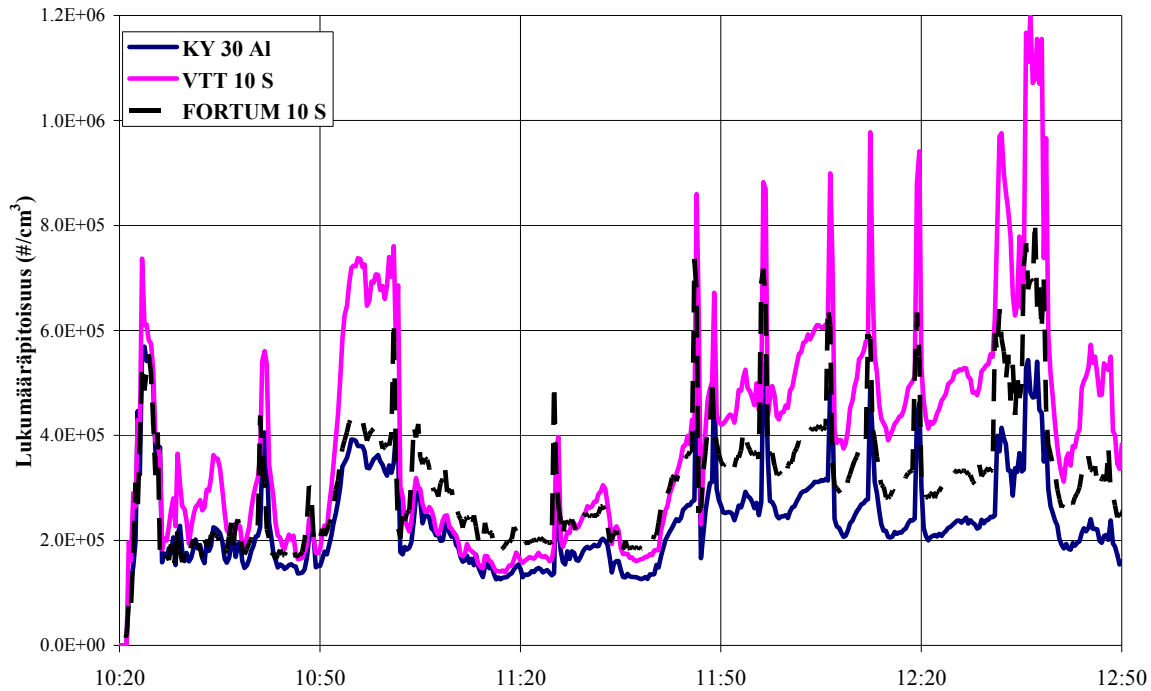
6.5.1.2.1 Pitoisuusvertailu

Ensimmäisessä yhteismittauksessa laitteiden välillä todettiin selviä pitoisuuseroja (Kuva 6.11). VTTE:n rekisteröimä kokonaislukumäärä ($3.9 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$) oli keskimäärin 1.7 –kertainen sekä sintratuilla että alumiinifolioalustoilla KYE:n näyttämään nähden ($2.3 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$). Tulos poikkesi tältä osin pellettitakkamittauksesta, missä pitoisuus oli sama kun molemmissa laitteissa oli alumiinifoliot ja suhde Al/S oli 1.26 kun laitteissa oli eri alustat. Aiheutuuko eroavuus vaihtelevasta prosessista vai onko siihen muuta syytä, ei ole tiedossa. Leivinuunin tuottamat hiukkaset ovat keskikooltaan suurempia kuin pellettitakan, mikä saattaa lisätä eroa eri impaktioalustojen välillä.

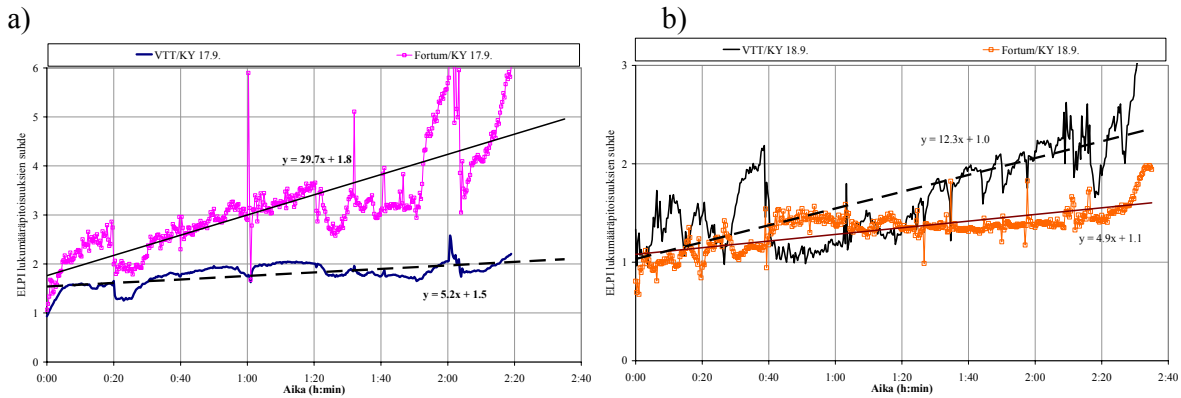
Laitteiden kokonaislukumääräpitoisuuksien ero ei ollut vakio (Kuva 6.12). Pitoisuusero vaihteli mittauksen aikana ja lisääntyi polton loppua kohden. VTTE:n osalta muutos KYE:hen verrattuna pysyi vakiona riippumatta alustoista ja pitoisuuksien suhde muuttui yhdestä kahteen 2,6 tunnin kuluessa. KYE:ssä ei suodatinnäyte ollut käytössä, mutta ei selitä eroa kokonaan, sillä pitoisuudet ELPIen alimmilla kanavilla olivat vain $10^2 - 10^3 \text{ \#/cm}^3$.

Kokonaislukumäärien väliset korrelaatiokertoimet eri laitteiden välillä olivat (Kuvassa 6.13): $R^2 = 0.75$ KYE:n ja VTTE:n (molemmissa Al-foliot) välillä ja $R^2 = 0.73$ KYE:n ja FOE:n (sintratut alustat) välillä. Yksittäisten kokovälien pitoisuuksille (tässä valittu kaksi aluetta, jotka ELPEissä ovat hyvin lähelle samat) kokoluokassa 42 nm KYE:n ja VTTE:n välinen korrelaatio oli (Kuva 6.14) $R^2 = 0.98$. Erilaisia alustoja käytettäessä korrelaatio oli alhainen (Kuva 6.15, $R^2 = 0.70$) ja pitoisuusero oli suurempi. Kokoluokassa 205 nm (lähellä jakauman mediaania) alumiinifolioilla korrelaatio oli erittäin hyvä, $R^2 = 0.98$.

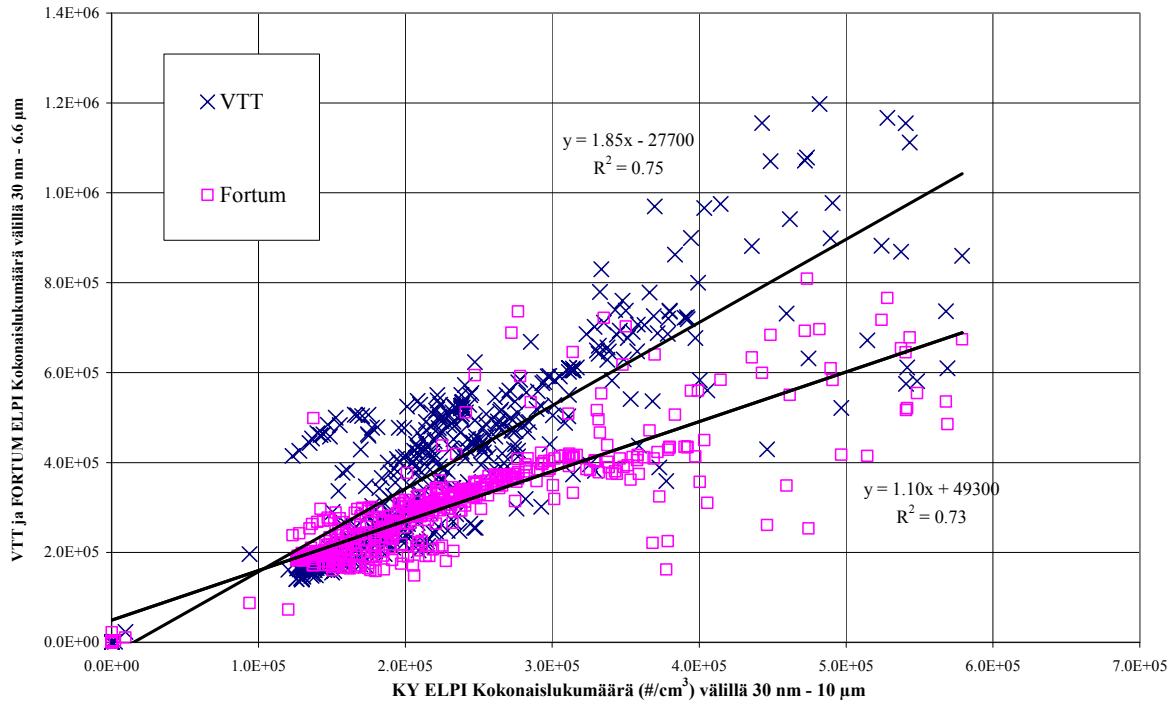
Toisessa yhteismittauksessa ELPEissä käytettiin sintrattuja alustoja. Pitoisuusero lukumäärän osalta laimennustunnelista mitattuna oli 20 – 30 % lukumäärän osalta (KYE näytti vähemmän). PM0.9-pitoisuuksille KYE:n näyttämä oli kaksinkertainen VTTE:hen verrattuna ja ELPIen PM0.9 pitoisuudet 2–3 –kertaisia suodatinnäytteestä määritettyyn kokonaispölypitoisuuteen nähden. Punnetusimpaktorilta määritetty PM0.9 oli 2 % pienempi kuin suodattimelta (PM1.3) määritetty massapitoisuus.



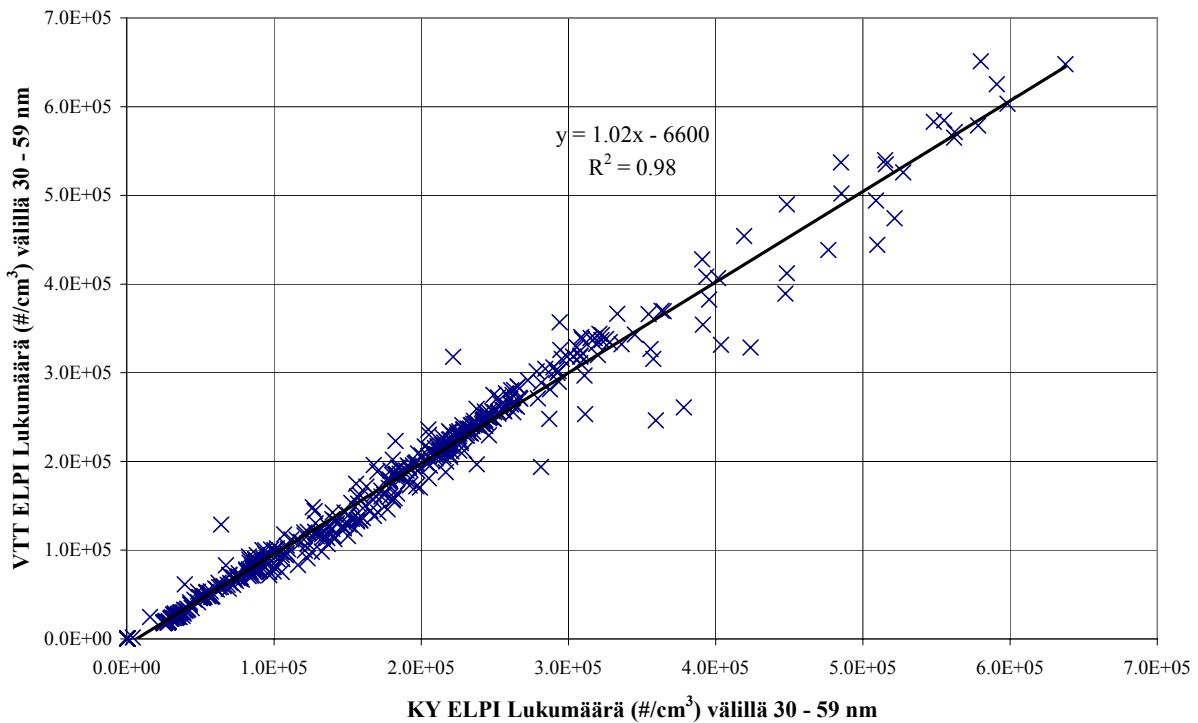
Kuva 6.11. Kokonaislukumääräpitoisuudet ajan funktiona 18.9.2003. KY, VTT alumiinifoliot, Fortum sintratut alustat. Mittaukset leivinuunilla.



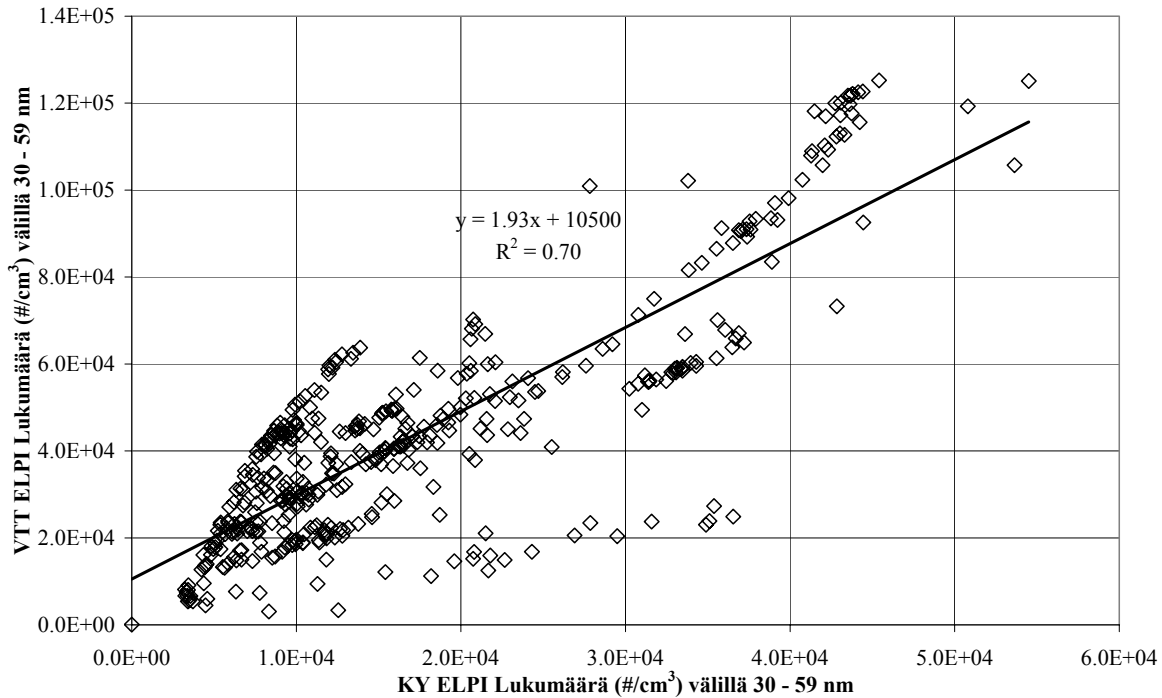
Kuva 6.12. ELPIen lukumääräpitoisuuksien suhde laimennustunnelista mitattuna. 17.9.2003 (a) KY alumiinifoliot, VTT ja Fortum sintratut alustat ja 18.9.2003 (b) KY ja VTT alumiinifoliot, Fortum sintratut alustat. Mittaukset leivinuunilla.



Kuva 6.13. ELPIen välisten kokonaislukumäärien välinen regressio 18.9.2003. KY ja VTT alumiinifoliot, Fortum sintratut alustat. Mittaukset leivinuunilla.



Kuva 6.14. Kuopion yliopiston ja VTT:n ELPIen välinen regressio kokoluokassa 42 nm 18.9.2003, kun molemmissa laitteissa käytettiin alumiinifolioita. Mittaukset leivinuunilla.



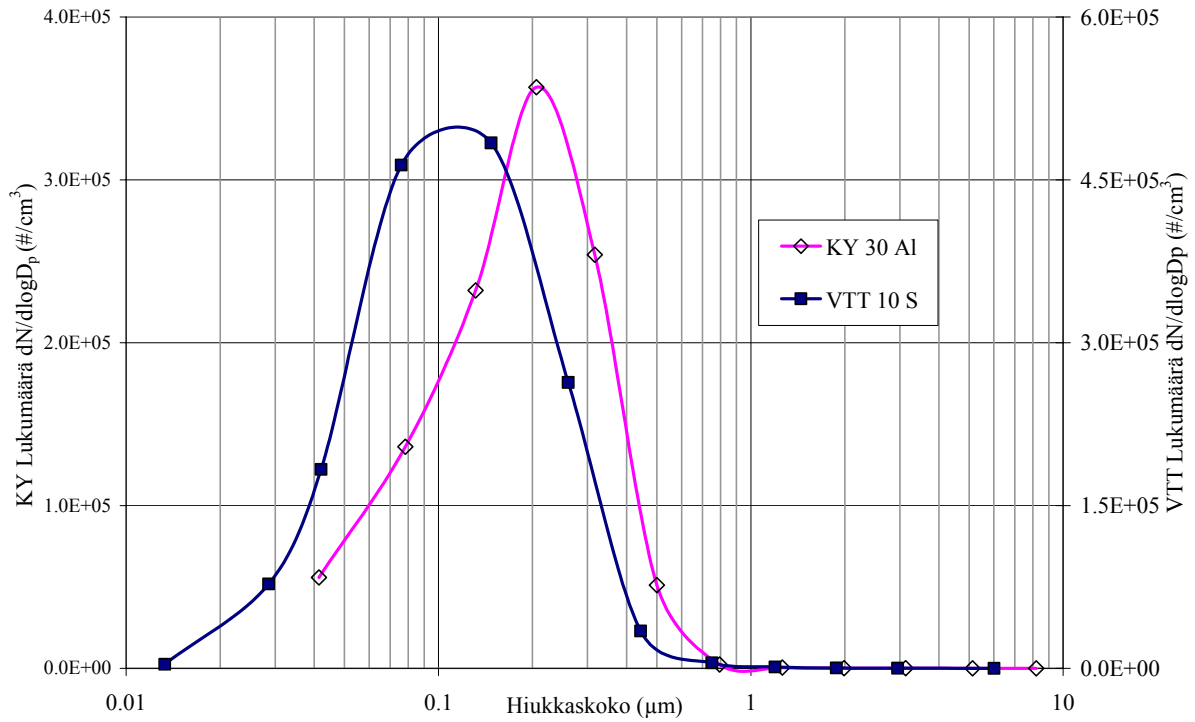
Kuva 6.15. Kuopion yliopiston ja VTT:n ELPIen välinen korrelaatio kokoluokassa 42 nm 17.9.2003. KY alumiinifolio, VTT sintratut alustat. Mittaukset leivinuunilla.

6.5.1.2.2 Lukumääräjakaumavertailu

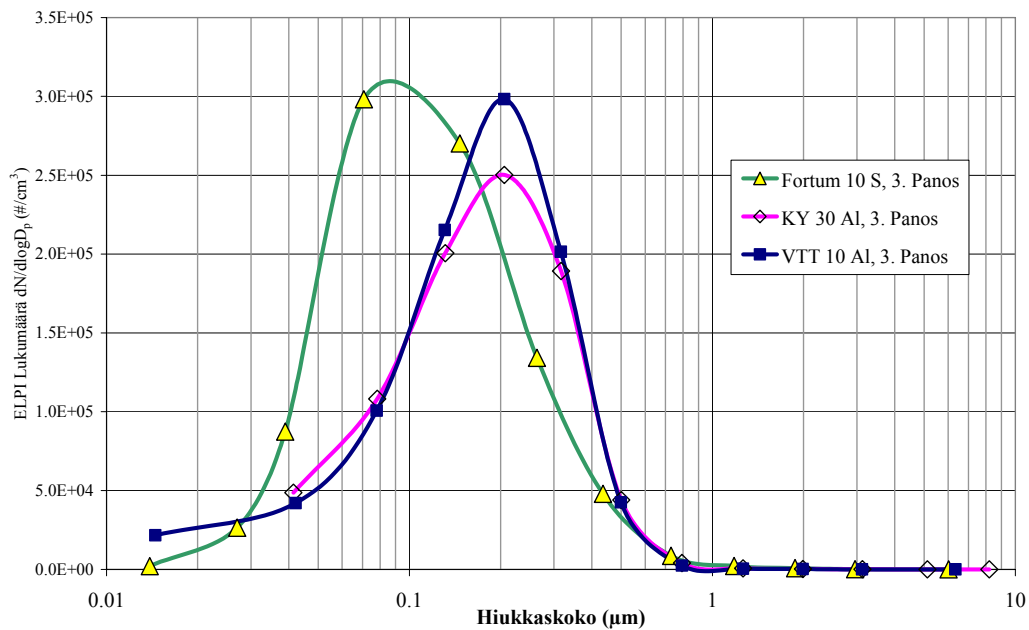
Ensimmäisellä yhteismittausjaksolla (leivinuuni) laitteiden lukumääräjakaumat poikkesivat toisistaan selvästi. Sintrattuja impaktioalustoja käytettäessä hiukkaskokojakauman keskikoko oli pienempi kuin alumiinifolioalustoja käytettäessä. Kuvassa 6.16 on VTTE:n sintratuilla alustoilla ja KYE:n alumiinifolioilla 17.9.2003 mitatut kokojakaumat. Kuvassa 6.17 on FOE:n sintratuilla alustoilla ja KYE:n sekä VTTE:n alumiinifolioilla mitatut jakaumat 18.9.2003. Suhdeluvut Al/S alumiinifolioiden ja sintrattujen alustojen tulosten välillä olivat 1.7 (17.9.) ja 2.3 (18.9.) eli suuremmat kuin havaittiin pellettitakkamittauksissa (ks. Taulukko 6.9).

Impaktioalustan vaikutus tuli esille varsinkin ultrapienillä hiukkasilla. Ultrapienien hiukkasten osuus oli suurempi alumiinifolioita käytettäessä. Ilmiö korostui sitä enemmän mitä pienempiä hiukkaset keskimäärin olivat ja ilmeni erityisesti loppuhiilloksen palamisessa (Kuva 6.18) sekä leivinuunilla myös syttymisvaiheessa. Sintrattuja alustoja käytettäessä saatiin lisäksi leveämpi jakauma.

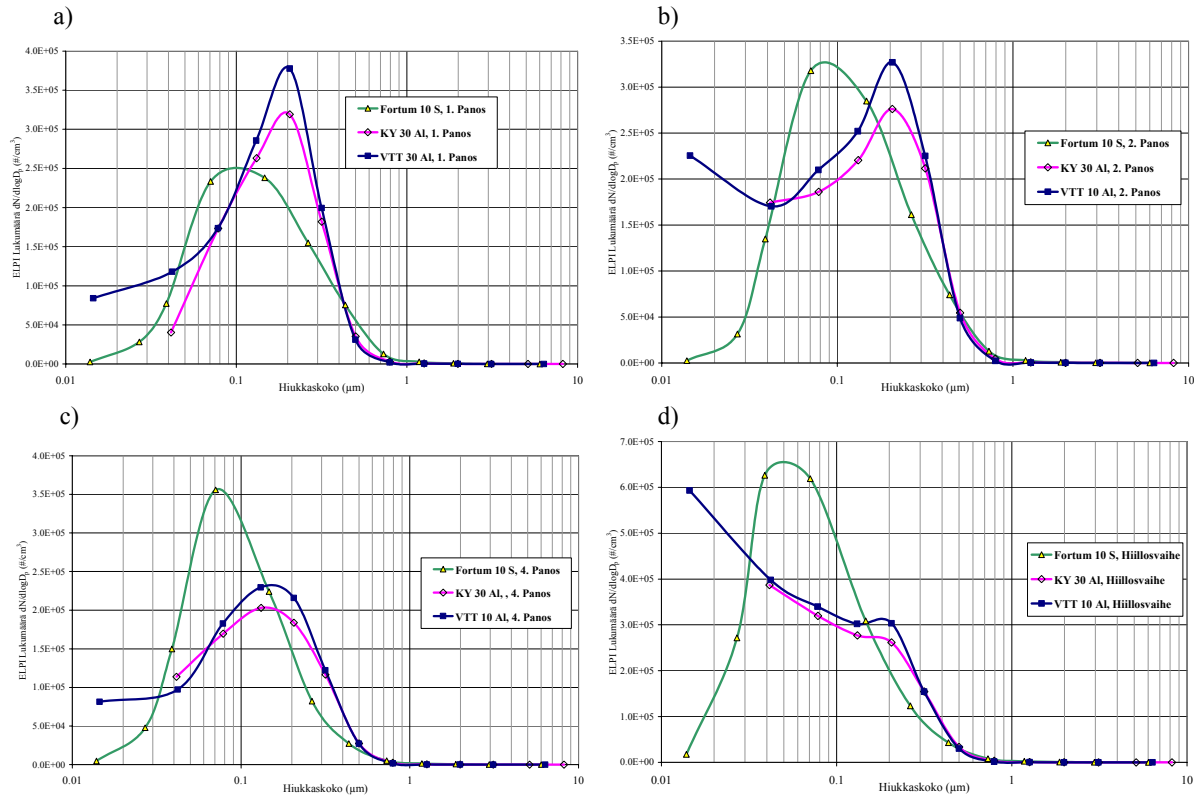
Toisella yhteismittausjaksolla (pellettitakka) tulokset kokojakaumien osalta olivat eri ELPIen välillä yhtenevät, koska molemmissa laitteissa käytettiin sintrattuja alustoja.



Kuva 6.16. Keskimääräiset koko polton hiukkaslukumääräjakaumat 17.9.2003. KY alumiinifoliot, VTT sint-ratut alustat. Päästölähteenä leivinuuni.



Kuva 6.17. Keskimääräiset kolmannen panoksen hiukkaslukumääräjakaumat 18.9.2003. KY ja VTT alumiinifoliot, Fortum sintratut alustat. Mittaukset leivinuunilla.



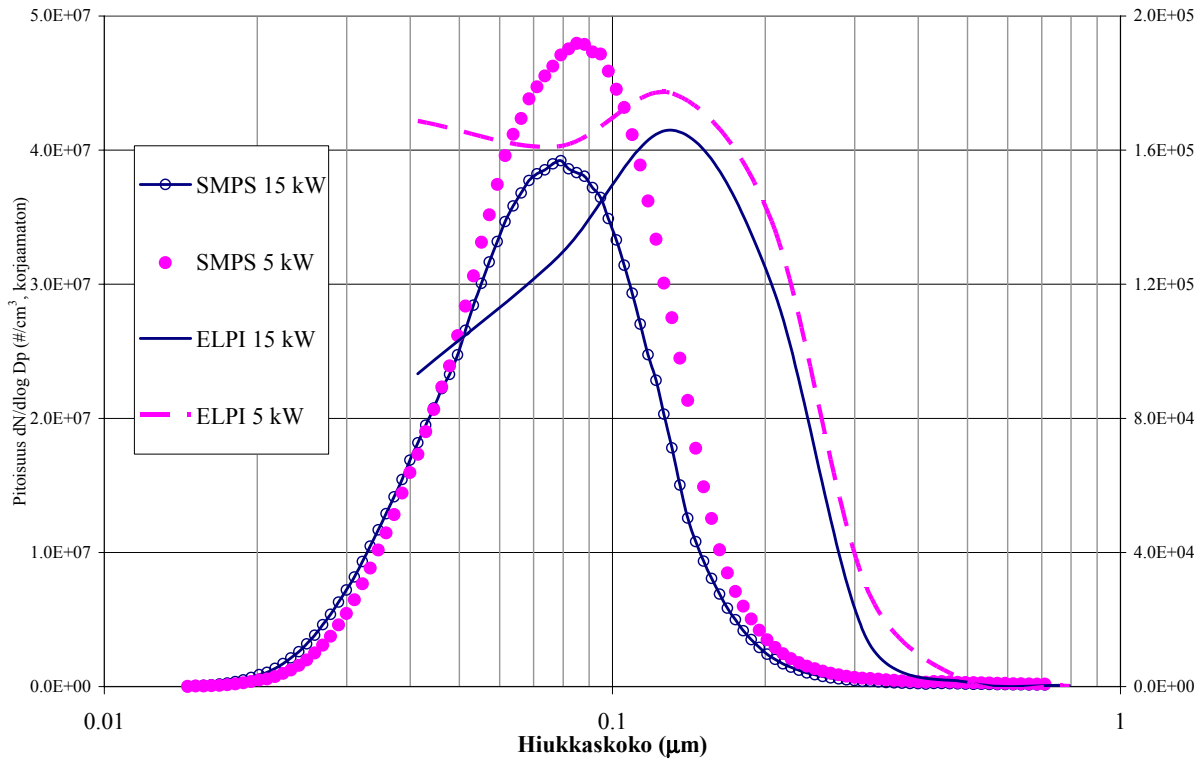
Kuva 6.18. Keskimääräiset hiukkaskokojakaumat polttoainepanosittain 18.9.2003 yhteismittauksessa. Jakaumissa havaitaan erityisesti erot ultrapienissä hiukkasissa. a) Panos 1, b) Panos 2, c) Panos 4 ja d) Hiillos. KY ja VTT alumiinifoliot, Fortum sintratut alustat. Mittaukset leivinuunilla.

6.5.2 ELPI:n ja SMPS:n hiukkaskokojakaumaerot

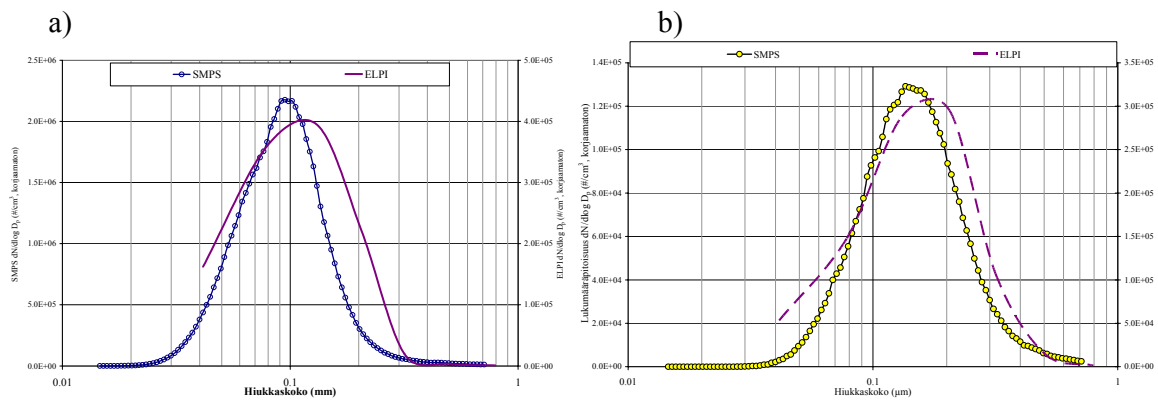
Kappaleessa käsitellään pääasiassa kuvien avulla ELPI:n ja SMPS:n kokojakaumien eroja erilaisissa mittaustilanteissa puun polton aerosolista.

Alumiinifolioalustoja käytettäessä ELPI:n ja SMPS:n kokojakaumat poikkesivat selvästi toisistaan. SMPS:llä havaittu hiukkaskoko oli jokaisessa mittauksessa pienempi kuin ELPI:llä, keskimäärin ero oli 30 %. Tämä selittyy ainakin osaksi erilaisesta hiukkaskoon määrittämisperusteesta ELPI:n määrittäessä aerodynaamisen hiukkaskoon, SMPS:n liikkuvuuskoon (Maricq ja Xu, 2004). Alumiinifolioalustoilla mitattuja vertailutuloksia on kuvissa 6.19, 6.20, 6.22 ja 6.23.

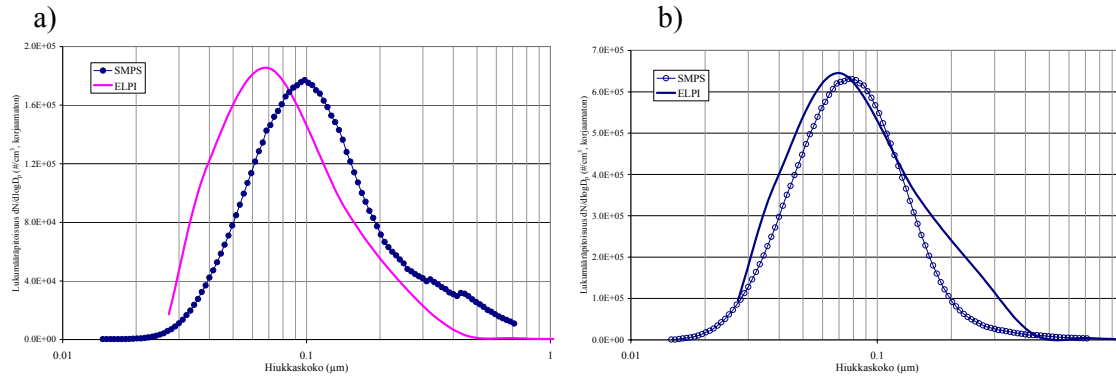
Sintrattuja alustoja ELPI:ssä käytettäessä ei selvää eroa hiukkaskoossa SMPS:n ja ELPI:n välillä havaittu, vaan ELPI:n hiukkaskoko oli välillä pienempi välillä suurempi (hiukkasten tiheys erilainen eri tilanteissa). Sintratuilla alustoilla mitattuja vertailutuloksia on kuvissa 6.21 ja 6.23 – 6.25.



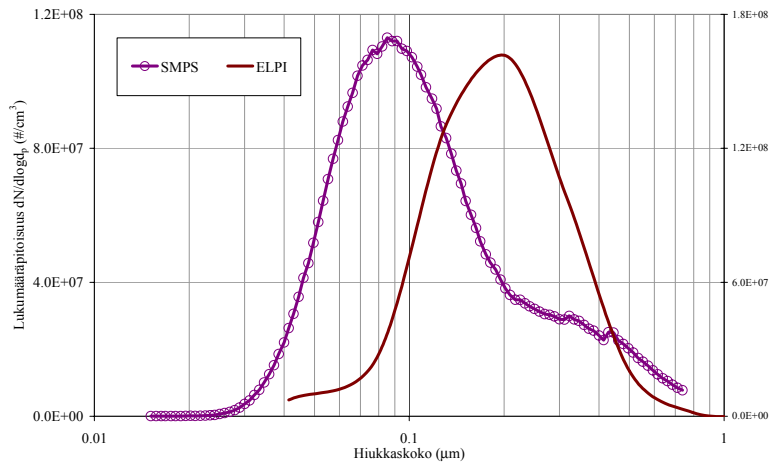
Kuva 6.19. Keskimääräiset hiukkaskokojakaumat puupelletinpoltossa pellettipolttimella nimellisteholla ja 30 % osateholla jatkuvan käynnin aikana ejektorilaimentimien avulla mitattuna. SMPS kokoalue 15 - 710 nm, ELPI kokoalue 30 nm – 10 µm (alumiinifolioalustat, 30 Lpm).



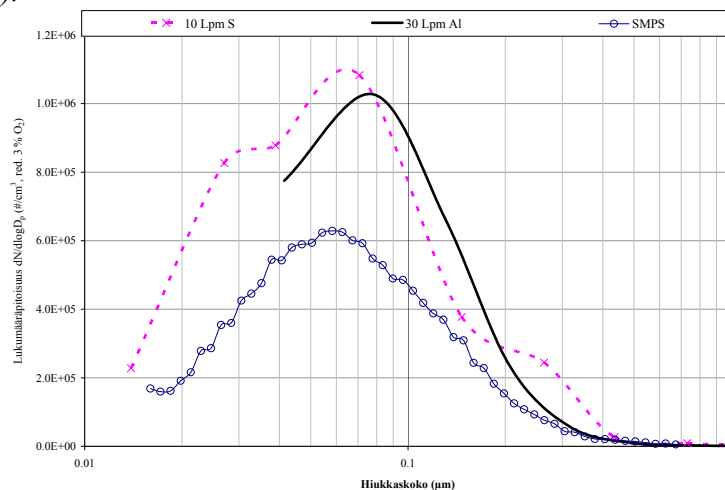
Kuva 6.20. Keskimääräiset hiukkaskokojakaumat puupelletinpoltossa (a, 30 kW) ja hakkeenpoltossa (b, 25 kW) stokeripolttimella jatkuvan käynnin aikana ejektorilaimentimien avulla mitattuna. SMPS kokoalue 15 - 710 nm, ELPI kokoalue 30 nm – 10 µm (alumiinifolioalustat, 30 Lpm).



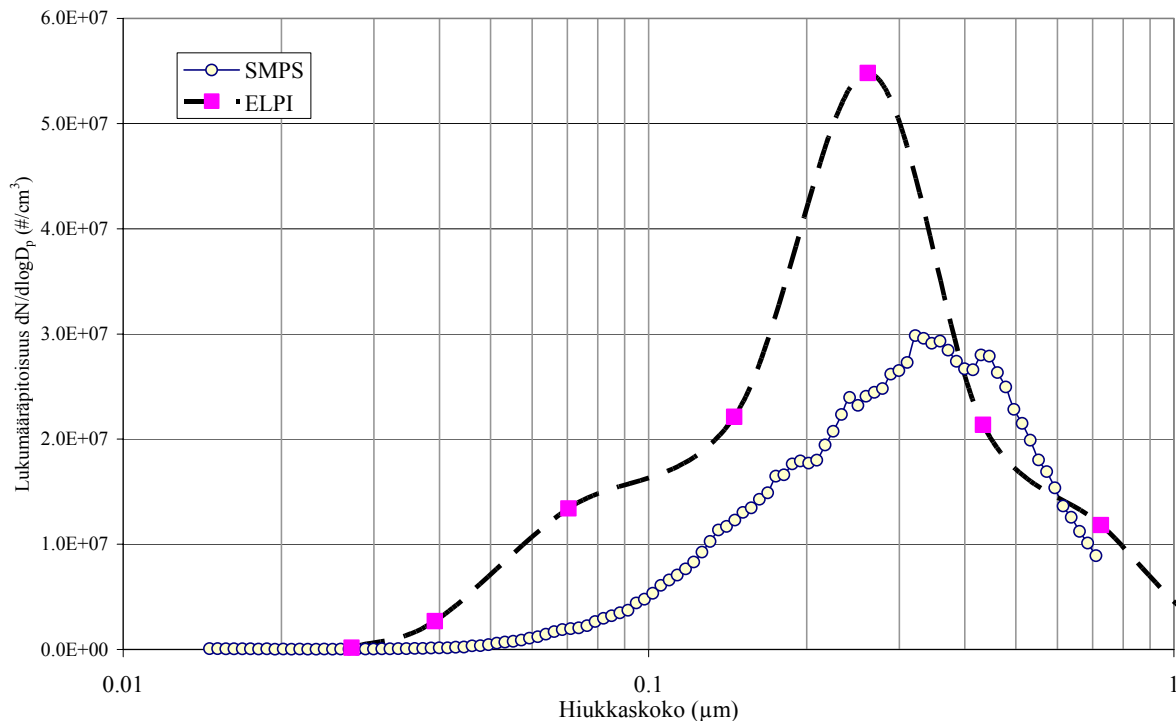
Kuva 6.21. Keskimääräiset hiukkaskokojakaumat puupelletinpoltossa pellettipolttimella nimellisteholla 20 kW (a) ja 50 % osateholla (b) jatkuvan käynnin aikana ejektorilaimentimien avulla mitattuna. SMPS kokoalue 15 - 710 nm, ELPI kokoalue 30 nm – 10 μm (sintratut alustat, 10 Lpm).



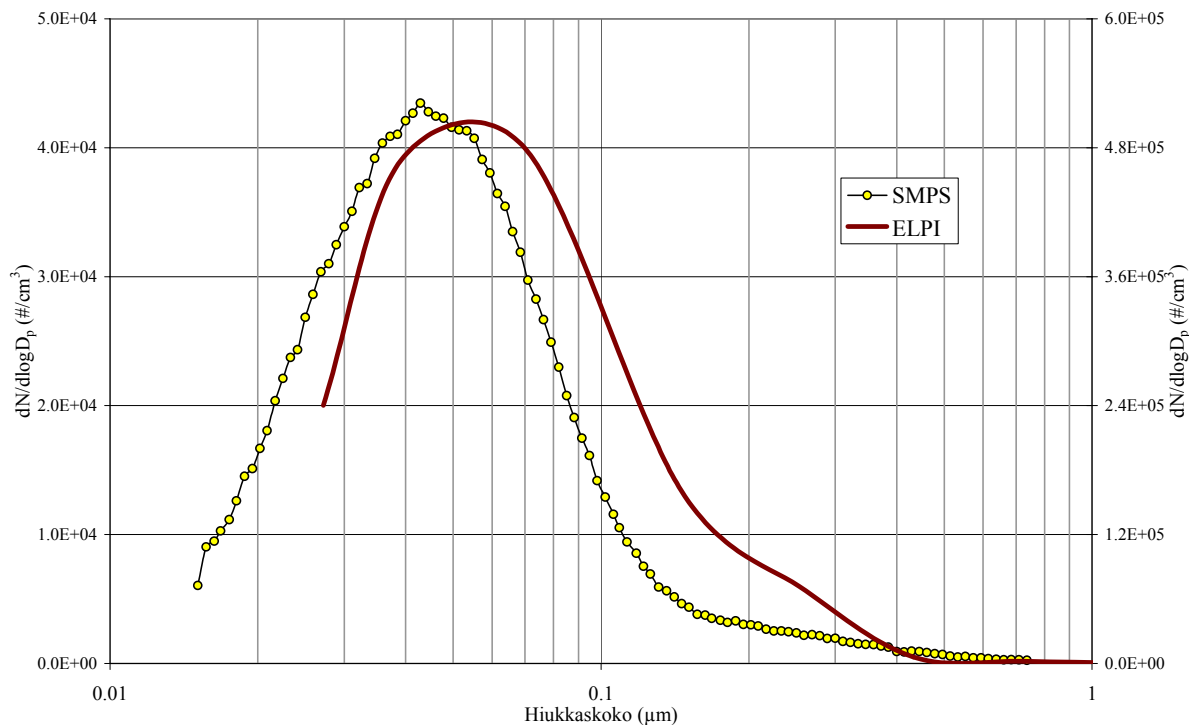
Kuva 6.22. Keskimääräiset hiukkaskokojakaumat pellettitakalla nimellisteholla (8 kW) kuusen kuoripelletillä laimennustunnelin avulla mitattuna. SMPS kokoalue 15 - 750 nm, ELPI kokoalue 30 nm – 10 μm (alumiinifolioalustat, 30 Lpm).



Kuva 6.23. Keskimääräiset hiukkaskokojakaumat kevyellä polttoöljylläöljypolttimelle ilmakertoimilla 1.2 - 1.4 ejektorilaimentimien avulla mitattuna. SMPS kokoalue 15 - 750 nm, ELPI kokoalue 8 nm – 10 μm (alumiinifolioalustat/30 Lpm ja sintratut alustat / 10 Lpm).



Kuva 6.24. Keskimääräiset hiukkaskokojakaumat kitupoltossa yläpalokattilalla koivupilkkeellä ejektorilaimentimien avulla mitattuna. SMPS kokoalue 15 - 710 nm, ELPI kokoalue 30 nm – 10 μm (sintratut alustat, 10 Lpm).



Kuva 6.25. Keskimääräiset hiukkaskokojakaumat hiillosvaiheessa kiukaalla koivupilkkeellä laimennustunne-
lin avulla mitattuna. SMPS kokoalue 15 - 710 nm, ELPI kokoalue 30 nm – 10 μm (sintratut alustat, 10 Lpm).

6.6 LAIMENNUSMENETELMIEN VERTAILU

Puun poltossa hetkelliset korkeat pitoisuudet ja laajalti vaihtelevat olosuhteet sekä kosteus savukaasussa asettavat erityisvaatimuksia mittaustekniikalle. Laimennuksen toteuttamistavan on aikaisemmin todettu vaikuttavan saatavaan hiukkaspitoisuuteen ja hiukkaskokoon. Mittauksia laimennuksen merkityksen selvittämiseksi tehtiin ejektorilaimentimien (ED, Dekati Oy) avulla sekä laimentamattomasta että huoneilmalla laimennetusta savukaasusta (Huuvalaimennusmenetelmä), laimennustunnelista (ISO 8178-standardi) ja myös ilman laimentimia suoraan savukaasusta. Pääasialliset laimennusmenetelmät tutkimuksen eri vaiheissa on lueteltu taulukossa 6.10 ja laimennusmenetelmien eroja käsittelevät mittausjaksot taulukossa 6.11.

Taulukko 6.10. Laimennustekniikat tutkimuksen eri vaiheissa ja vertailumittauksissa.

Mittauspaikka	Esilaimennus	Laimennus	VUOSI			Vertailumittauksissa
			2002	2003	2004	
YTL	-	2 - 3 x ED	x			x
YTL	-	Tunneli		x	x	x
YTL	Huuva	2 x ED				x
IFK	Tunneli	2 x ED	x			
IFK	-	2 x ED			x	
VTT	Huuva	2 x ED	x	x	x	
Kenttämittaukset	-	2 - 3 x ED	x	x	x	

-YTL = Ympäristötekniikan laboratorio, IFK = ilmafysiikan- ja kemian laboratorio, VTT = VTT Prosessit, Jyväskylä

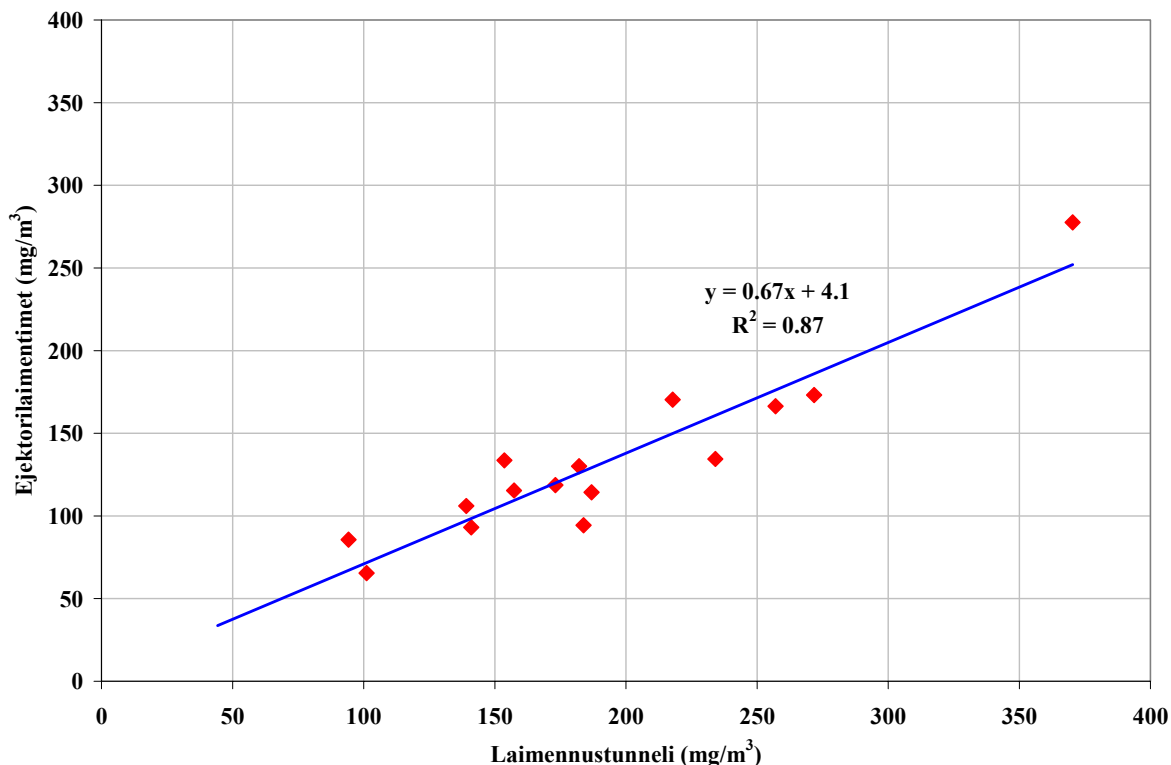
ED = Ejektorilaimennin (Dekati)

Taulukko 6.11. Laimennustekniikoiden eroja käsittelevät mittausjaksot Kuopion yliopistossa, jaksoilla käytetyt laimennustekniikat sekä polttolaitteet ja vertailtavat suureet.

Jakso	Laimennustekniikat	Polttolaitte	Vertailtavat suureet
1	Tunneli - Ejektorilaimentimet	Varaava takka	TSP, lukumäärä, kokojakauma
2	Tunneli-Ejektorilaimentimet-Huuva	Leivinuuni	TSP, lukumäärä, kokojakauma, massajakauma
3	Tunneli-Huuva	Varaava takka, pellettitakka	TSP, PM1, lukumäärä, kokojakauma
4	Tunneli-Huuva	Pellettitakka	TSP, PM1, lukumäärä, kokojakauma

6.6.1 Pitoisuuksien vertailu

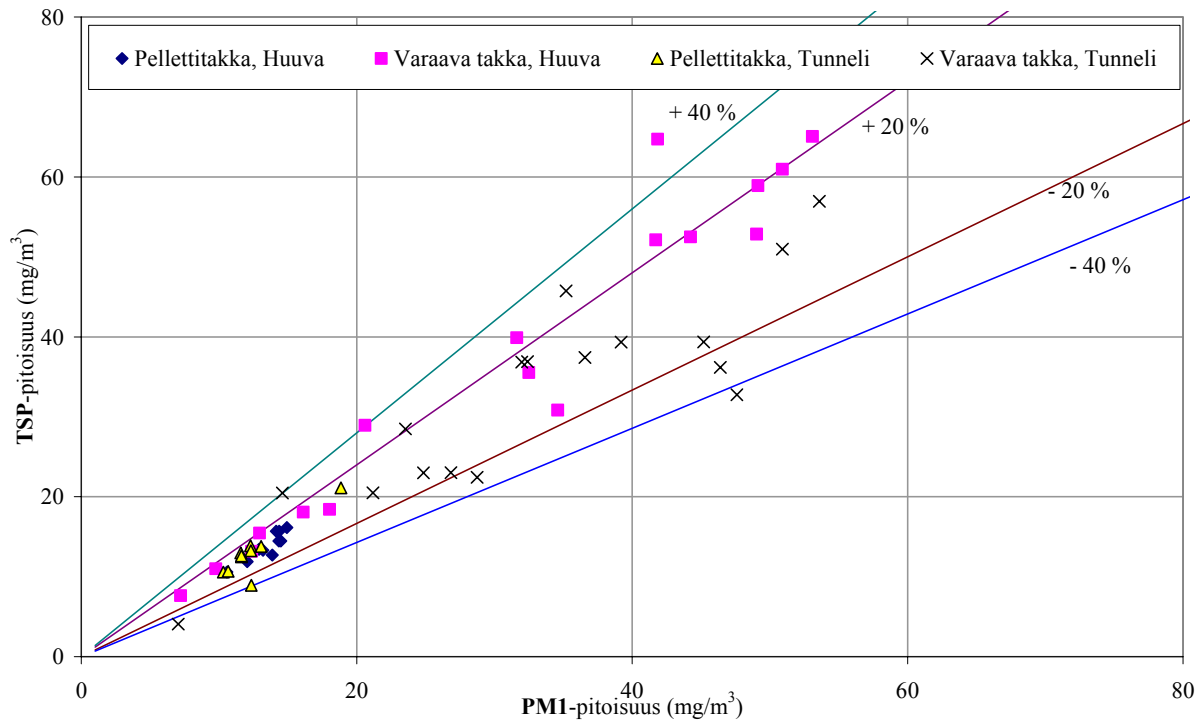
Laimennustunnelista ja ejektorilaimentimilta mitattujen päästöjen korrelaatio oli hyvä ($R^2=0,87$) varaavan takan mittauksessa (Kuva 6.26, Jakso 1). Ejektorilaimentimilla mitattaessa saatiin kuitenkin noin 30 % pienempiä pitoisuuksia kuin tunnelista. Ensimmäisellä yhteismittausjaksolla leivinuunin mittauksissa (Jakso 2 Taulukossa 6.11) lukumääräpitoisuudet olivat huuvilaimennuksella ja kahdella ED-laimentimella (VTTE:n tulos) 2,5- kertaiset ja kahdella ED-laimentimella (FOE:n tulos) 1,4- kertaiset laimennustunneliarvoihin (KYE:n tulos) verraten. Kun laitteiden väliset erot otetaan huomioon, huuvilaimennuksella saatiin noin 40 % korkeampia lukumääräpitoisuuksia kuin laimennustunnelista.



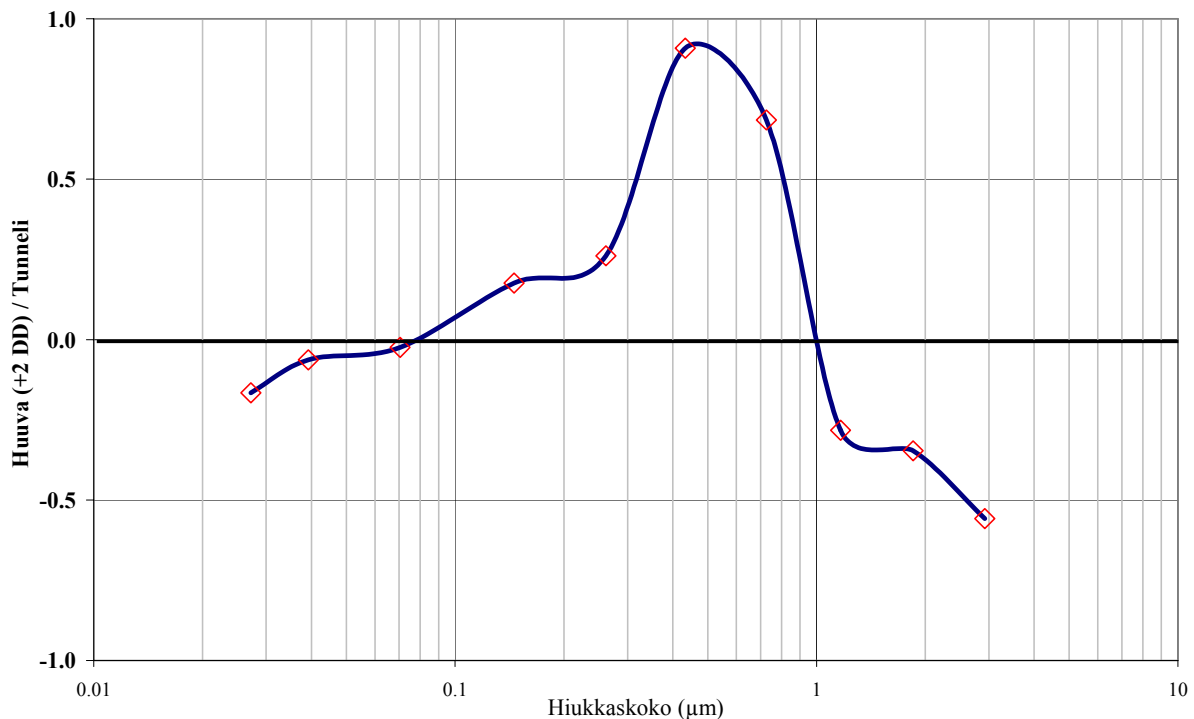
Kuva 6.26. Laimennustunnelista ja ejektorilaimentimilta yhtäaikaisesti suodatinkeräyksellä mitattu TSP-pitoisuus (neljä panospolttua varaavalla tulisijalla, yksi suodatinnäyte / panos, 4 - 5 panosta).

Jaksolla kolme vertailtiin suodattimilla mitattuja massapitoisuuksia käytettäessä joko huuvalaimennusta tai laimennustunnelia (Kuva 6.27). Tunnelimittauksissa PM1/TSP suhde oli keskimäärin 0.96 ja huuvamittauksissa 0.75. Molemmilla menetelmillä yksittäisten mittauspisteiden PM1/TSP-suhteet vaihtelivat runsaasti varsinkin korkeilla hiukkaspitoisuuksilla.

Jaksolla neljä tunnelin ja huuvan (+ ejektorilaimentimen ED) välillä ei havaittu merkittävää eroa kokonaislukumääräpitoisuuksissa. ELPIn mittausdatasta laskennallisesti määritetty PM0.9 pitoisuus oli huuvasa (+ ED) 20 % korkeampi kuin tunnelissa. Kun huuvalaimennuksessa oli lisälaimentimena kaksi ejektorilaimenninta (2 x ED), lukumääräpitoisuus oli huuvasa 10 % pienempi kuin tunnelissa ja PM0.9 30 % suurempi kuin tunnelissa. Kokonaispölypitoisuudet TSP olivat huuvalaimennuksessa ja tunnelilaimennuksessa kuitenkin virherajojen puitteissa samat. Pitoisuuksien suhde (Kuva 6.28) tunnelin ja huuvan (+2 x ED) välillä ei ollut vakio kokoluokittain. Huuvasta saatiin alhaisempia pitoisuuksia alle 80 nm ja yli 1 µm kokoluokissa. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä, sillä hiukkasten lukumääräpitoisuus yli 200 nm kokoluokissa on hyvin pieni.



Kuva 6.27. Varaavasta takasta ja pellettitakasta huuva- ja laimennustunnelimenetelmällä suodattimilta määritetyt PM1 ja TSP-pitoisuudet sekä vertailusuorat $\pm 20\%$ ja $\pm 40\%$.

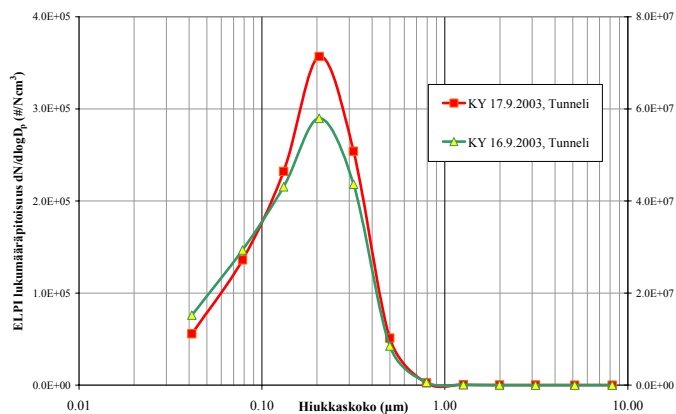


Kuva 6.28. Huuvan (+2xED) ja laimennustunnelin pienhiukkaskokumäärien ero kokoluokittain 3.11.2004 yhteismittauksessa. Mittalaitteina käytettyjen ELPIen (10 Lpm, sintratut alustat) erot on otettu huomioon.

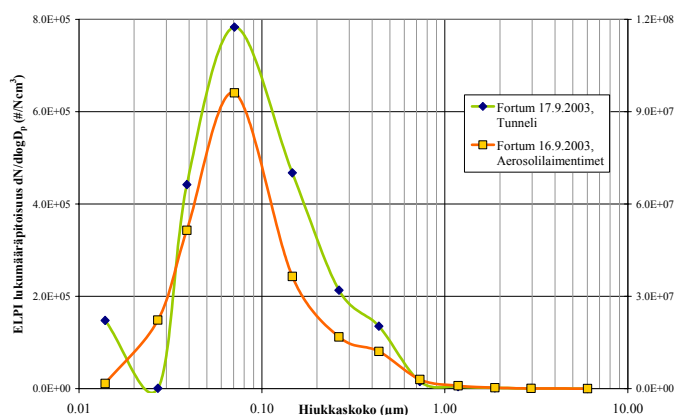
6.6.2 Kokojakaumien vertailu

Mitattaessa eri laimennusmenetelmillä havaittiin jo aikaisemmin todettu alustojen vaikutus kokojakaumaan. Aritmeettinen keskikoko sintratuilla alustoilla aerosolilaimentimilla ja huuvan jälkeen oli pienempi kuin tunnelista alumiinifolioalustoilla mitattu keskikoko. Samalla laitteella ja kokoonpanolla eri laimennusmenetelmillä mitattaessa ei kokojakaumissa kuitenkaan havaittu merkittäviä eroja (Kuva 6.29).

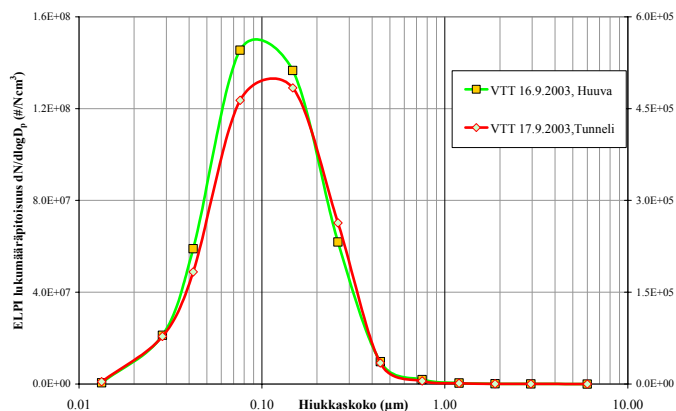
a)



b)

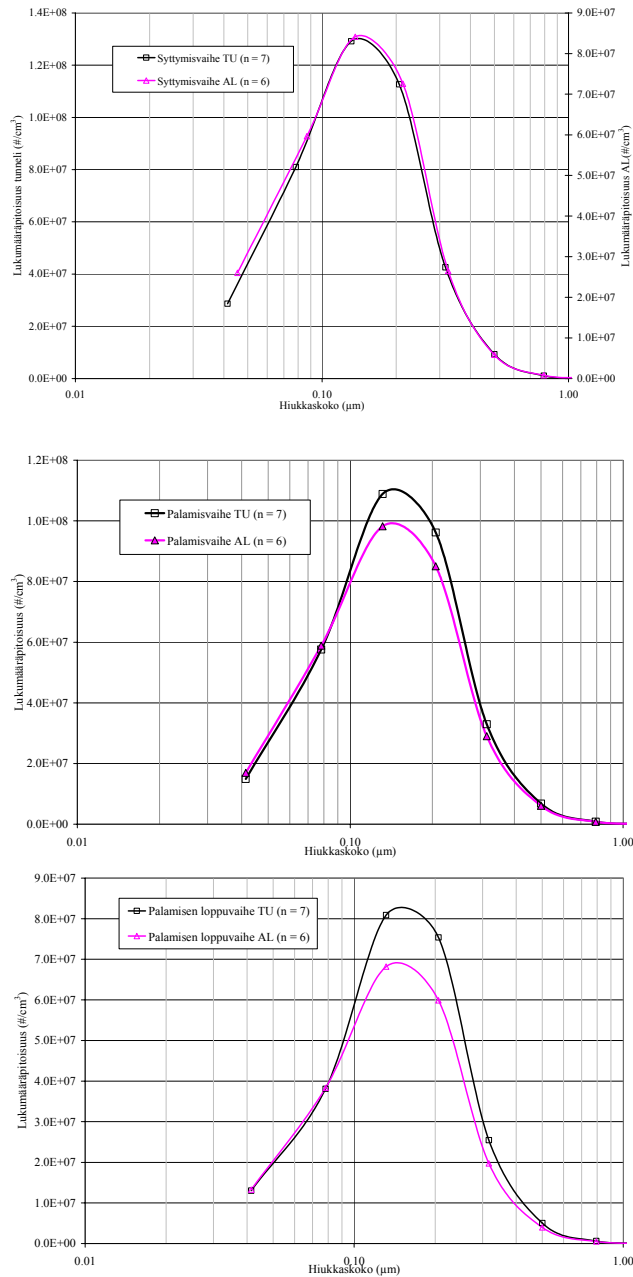


c)



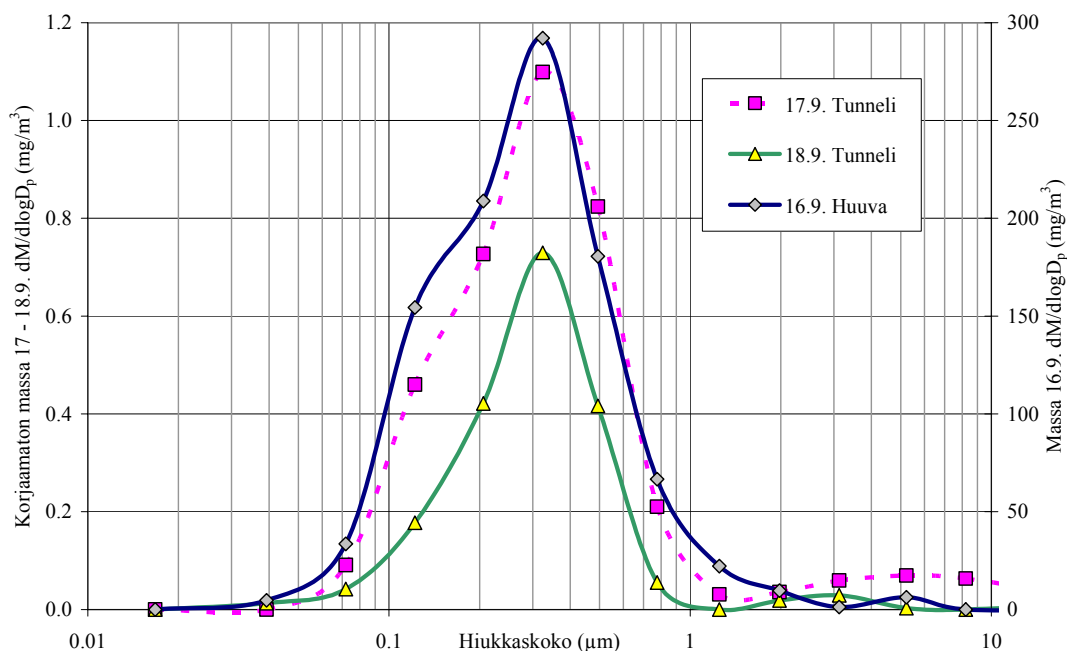
Kuva 6.29. Keskimääräiset ELPI hiukkaslukumääräjakaumat 16 - 17.9.2003 KYE:llä (a), FOE:llä (b) ja VTTE:llä (c) (KY Al,tunneli; VTT huuva+ 2ED sintratu ja Fortum 2 x ED suoraan savukaasusta, sintratu).

Laimennustunnelia ja ejektorilaimentimia keskenään panospoltossa verratessa jakaumat olivat varsin yhteneviä (Kuva 6.30). Jakauman huipun ero oli enimmillään 10 nm (suurempi tunnelista mitattuna), vaikka päästölähde oli vaihteleva ja vertailupoltot oli tehty eri päivinä.



Kuva 6.30. Keskimääräiset hiukkaslukumääräjakaumat 30 Lpm ELPillä panospoltossa varaavalla takalla syttymis-, palamis- ja hiillosvaiheessa. Tunnelista esitetyt jakaumat ovat seitsemän panoksen keskiarvoja ja laimentimien kuuden panoksen keskiarvoja (alumiinifoliaalustat, 30 Lpm ELPI).

Punnitusimpaktorilla DLPI määritetyt korjaamattomat massajakaumat jaksolla 2 laimennustunnelista ja huuvasta on kuvassa 6.31. Huuvamittauksessa (16.9.) pienten hiukkasten osuus oli selvästi suurempi kuin laimennustunnelimittauksissa. Määritykset tehtiin eri päivinä ja havaittu ero voi aiheutua myös päästölähteen vaihtelusta



Kuva 6.31. Keskimääräiset hiukkasmassajakaumat 16 – 18.9.2003 punnitusimpaktorilla määritettynä. Mittaus 16.9. on tehty huuvan avulla laimennetusta savukaasusta, mittaukset 17–18.9. laimennustunnelista.

6.7 YHTEENVETO TULOKSISTA

Mittalaitteiden vertailu

ELPIen vertailumittauksissa lukumääräpitoisuuksien korrelaatiot olivat hyvät, välillä 0.7 – 0.98. Laitteiden pitoisuustasot kuitenkin poikkesivat, eivätkä erot pitoisuusarvoissa olleet ajallisesti vakioita. Myös laitteiden antamat kokojakaumat poikkesivat toisistaan jonkin verran.

Suurin vaikutus hiukkaspitoisuuksiin ja kokojakaumiin oli impaktioalustoilla. Lukumääräpitoisuus oli alumiinifolioalustoja käytettäessä noin 25 % pienempi ja hiukkaskoko noin 30 % suurempi kuin sintratuilla alustoilla. Tietyissä tilanteissa alumiinifolioalustat yliarvioivat ultrapienien hiukkasten osuuden.

ELPI:n tilavuusvirtauksella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta mittaukseen. Kokonaislukumääräpitoisuudet olivat 10 Lpm ELPIllä noin 5 % pienemmät ja hiukkaskoko keskimäärin 12 % pienempi kuin 30 Lpm ELPIllä.

ELPIen antamat laskennalliset PM_{0.9} pitoisuudet olivat 2–3 –kertaiset verrattuna suodatinnäytteestä määritettyyn kokonaispölypitoisuuteen TSP. Laskennallisesti saatu ELPI:n massapitoisuusarvo ei siten kovin hyvin vastaa suodatinkeräyksellä saatua massapitoisuutta. Punnitusimpaktorilla määritetty PM_{0.9} oli lähes sama (2 % pienempi) kuin suodatinnäytteestä määritetty PM_{1.3} pitoisuus.

ELPI:n ja SMPS:n välillä todettiin ero kokojakaumissa käytettäessä alumiinifolioalustoja. SMPS:n antama hiukkaskoko oli keskimäärin 30 % pienempi kuin ELPI:n. Ero selittyy osaksi laitteiden erilaisesta hiukkaskoon mittausperiaatteesta. Sintrattuja alustoja ELPI:ssä käytettäessä laitteet antoivat saman tuloksen.

Laimennusmenetelmien vertailu

Eri laimennusmenetelmillä tulokset vaihtelivat 40 %:n maksimipoikkeaman sisällä eri suureiden osalta (Taulukko 6.12). Hiukkaskokojakauma vaihteli laimennusmenetelmien kesken vähiten, alle 10 %, ja suhteellisesti suurin vaihtelu todettiin lukumääräpitoisuuksissa. Puun pienpoltossa hiukkastuotto on puun tuhkapitoisuudesta ja epätäydellisestä palamisesta johtuen kaikilla polttolaitteilla varsin suuri, jolloin hiukkaskoko kasvaa varsin yhtäläiseksi ja koon vaihtelu jää vähäiseksi.

Ejektorilaimentimilla saatiin muita tekniikoita alhaisemmat pitoisuudet. Sekä lukumäärä että massamittauksissa ejektorilaimentimilla määritettiin noin 30 % pienempiä pitoisuuksia. Laimentimen häviöt ovat rakenteesta johtuen helposti suuremmat kuin muilla menetelmillä. Ejektorilaimennin on kuitenkin liikuteltavuutensa takia käyttökelpoisiin kenttämittauksiin kalibroituna muiden laimennusmenetelmien avulla.

Huuvamenetelmää ja laimennustunnelia verrattaessa tulokset vaihtelivat satunnaisesti. Kun vertailu perustui molemmissa hiukkasmassamittauksiin suodattimilta, ei menetelmien välillä havaittu eroa. Kun huuvamenetelmässä käytettiin lisäksi ejektorilaimentimia korkean pitoisuuden alentamiseksi, huuvamenetelmällä saatiin hieman suurempia lukumääräpitoisuuksia kuin laimennustunnelilla.

Laimennustunnelia suositellaan käytettävän perusmäärittäyksiin ja muiden tekniikoiden vertailuun laajan laimennusalueen ja monikäyttöisyyden takia. Huuvamenetelmä on käyttökelpoinen ja soveltuu standardioloihin, mutta on vaikeammin sovellettavissa kun vaadittava laimennussuhde kasvaa suureksi.

Taulukko 6.12. Yhteenveto laimennusmenetelmien vertailumittauksista. Laimennustunnelista mitatut pitoisuudet on normeerattu 1:ksi poislukien PM1/TSP-suhteet.

	Tunneli	2 - 3 ED	Huuva	Huuva + 1 ED	Huuva + 2 ED
Kokonaislukumäärä	1	0.7	-	1	0.9, 1.4
Hiukkaskoko	1	0.9 - 1	-	1	0.9, 1
PM0.9 (Elpi)	1	-	-	1.2	1.3
TSP (suodatin)	1	0.7	1	-	-
PM1/TSP (suodatin)	0.96 (0.6 - 1.4)	-	0.75 (0.5 - 1.15)	-	-

7 LAITEMITTAUKSET

Taisto Raunemaa¹, Jarkko Tissari¹, Veli Linna², Olli Sippula¹, Kati Hytönen¹, Heikki Oravainen², Seppo Tuomi³, Jorma Jokiniemi^{1,4}, Jorma Virkki⁵

¹Kuopion yliopisto, Pienhiukkas- ja aerosolitekniiikan laboratorio, PL 1627, 70211 Kuopio

²VTT Prosessit, Energian tuotanto, PL 1603, 40101 Jyväskylä

³Työtehoseura, metsäosasto, PL 13, 05201 Rajamäki

⁴VTT Prosessit, Energia ja ympäristö, PL 1401, 02044 VTT

⁵Fortum Oil Oy, PL 310, 06101 Porvoo

²Kappale 7.1.2

³Kappale 7.1.3

⁵Kappale 7.1.4, 7.3.1

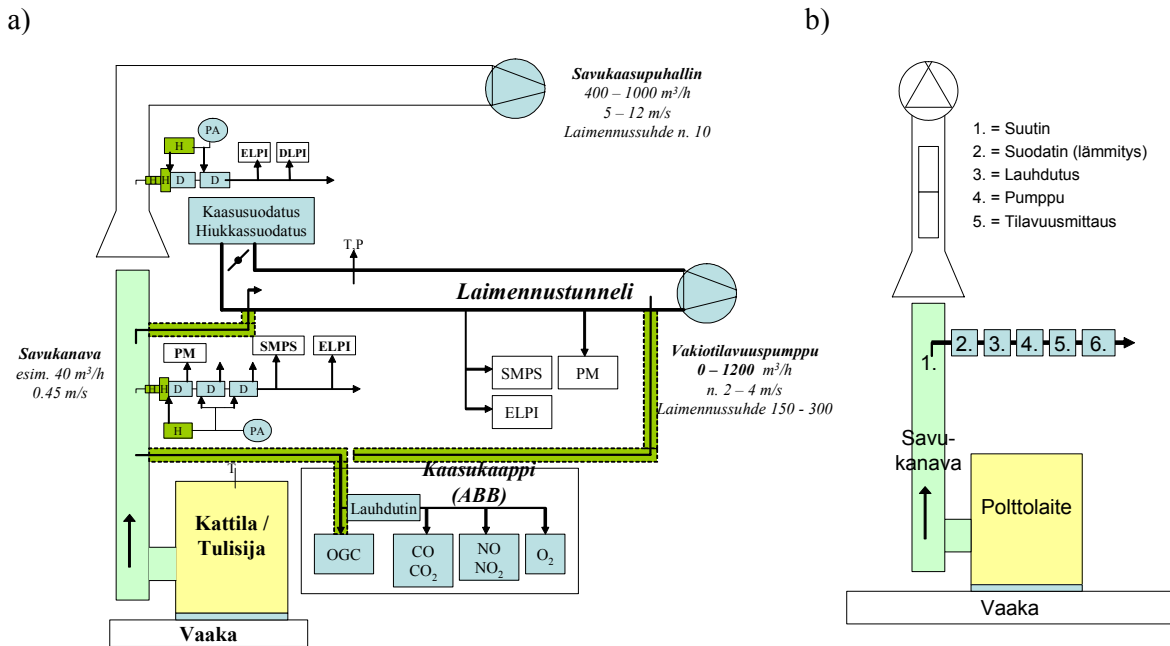
Kappaleessa esitetään päästömittaustulosten lisäksi tietoja mittauspaikoista, polttoaineista sekä olosuhdeparametreista ja tilastotiedot mittauksista. Laitemittauspäiviä tutkimushankkeessa kertyi noin 170, joista yrityksille raportoituja laitemittauksia oli 35 %. Mittaustekniikan kehittämiseen, laimennusmenetelmien vertailuun ja polttoaineen laadun ja mallinnuksen vaatimiin laitemittauksiin käytettiin noin 45 % ja mallinnusta tukeviin virtausreaktorimittauksiin noin 20 % kaikista mittauksista.

7.1 KOEPAIKKOJEN KUVAUKSET

7.1.1 Kuopion yliopisto

Kuopion yliopistossa mittaukset tehtiin pienhiukkas- ja aerosoliteknikan laboratoriossa, Microtekniikan ja Snellmanian tutkimustiloissa. Microtekniikan laboratoriossa (Kuva 7.1) tehtiin pääasiassa pannespolttolaitteiden mittauksia. Polttolaite on mittausten aikana vaakalla polttoaineen massavirran määrittämiseksi. Polttolaitteeseen kiinnitetään eristetty savuhormi, joka on muunneltavissa. Mm. mittaussyhteiden ja savupeltien paikkaa voi vaihtaa. Osa poltossa syntyvästä savukaasusta johdetaan laimennustunneliin savuhormin ja tunnelin välillä olevan näytelinjan kautta laimennustunneliin alipaineen avulla. Näytteenottolinjan yhde on noin kahden metrin korkeudella polttolaitteen hormilii-toksesta. Laimennusilma ja savukaasu sekoittuvat laimennustunnelin alkupäässä. Näytteenottoyh-teet mitalaitteita varten sijaitsevat 3, 5 ja 7 metrin etäisyydellä tunnelin päästä, jonne savukaasu tuodaan näytelinjaa myöten.

Laimennustunnelin laimennussuhde riippuu savukaasunäytteen ja laimennusilman määrien suhteesta. Tunnelin kokonaistilavuusvirtaa voidaan säätää välillä 0-1200 m³/h vakiotilavuuspumpun taa-juusmuuntajan avulla. Savukaasun tilavuusvirtaa voidaan muuttaa vaihtamalla hormin ja tunnelin väliin halkaisijaltaan erikokoinen näytelinja sekä säätämällä laimennustunnelin peltiä, joka muuttaa tunnelin alipainetta. Laimennusilmasta suodatetaan hiukkaset, typenoksidit ja hiilivedyt erikois-suodattimella. Laimennustunneli on ISO 8178-standardin mukainen saumaton, hiottu, hapon kestävästä teräksestä valmistettu putki, jonka halkaisija on 300 mm, pituus noin 8,5 m ja sisäpintakarkeus 0,4 µm.



Kuva 7.1. Pienhiukasten mittaaminen aerosolilaimentimien avulla suoraan savukanavast, huuvasta tai laimennustunnelista (a) sekä kokonaispölyn määrittäminen standardin SFS 3866 mukaisesti (b).

Polttolaitteessa kiinni oleva savuhormi on noin kolme metriä korkea. Hormin pään yläpuolella on kartion muotoinen huuva. Huuva on kiinni vaakasuorassa savukaasukanavassa, jonka kautta savu-

kaasut johdetaan ulos. Vaakasوران kanavan päässä on savukaasupuhallin, jonka tilavuusvirtaa voi säätää taajuusmuuntajalla. Huuvan korkeutta ja puhaltimen kierrosnopeutta muuntamalla voidaan vaikuttaa savukanavan veto-olosuhteisiin. Huuvaa voi käyttää myös laimennusmenetelmänä, jolloin em. keinoilla voi muuttaa laimennussuhdetta. Vaakakanavassa on näytteenottoyhteitä mittalaitteita varten.

Kuumasta savukaasusta mitataan kaasupitoisuudet lämmitetyn näytteenottosondin ja savukaasuanalysointilaitteiden (ABB Hartmann & Braun) avulla. Analysointilaitteilla määritetään savukaasun happi-, hiilidioksidi-, häkä-, typpimonoksidi- ja – dioksidi- sekä kokonaishiilivetyypitoisuus. Happipitoisuuden mittausta perustuu paramagneettisuuteen, häkä ja hiilidioksidi mitataan IR-spektrometrillä, typenoksidit UV-spektrometrillä ja kokonaishiilivedyt liekki-ionisaatiodektektorilla (FID).

Savukaasun staattinen paine ja lämpötila voidaan mitata, samoin muita lämpötiloja esimerkiksi polttolaitteen pinnalta. Käytössä on ohjausjärjestelmä laimennustunnelille ja tiedonkeruujärjestelmä, jolla saadaan keskitetyksi tiedot kaasukomponenttien pitoisuuksista, lämpötiloista, paineista ja polttoaineen massavirrasta. Tiedonkeruujärjestelmän ohjaus ja erillisten mittalaitteiden tietokoneiden käyttö on erillisessä ohjaushuoneessa.

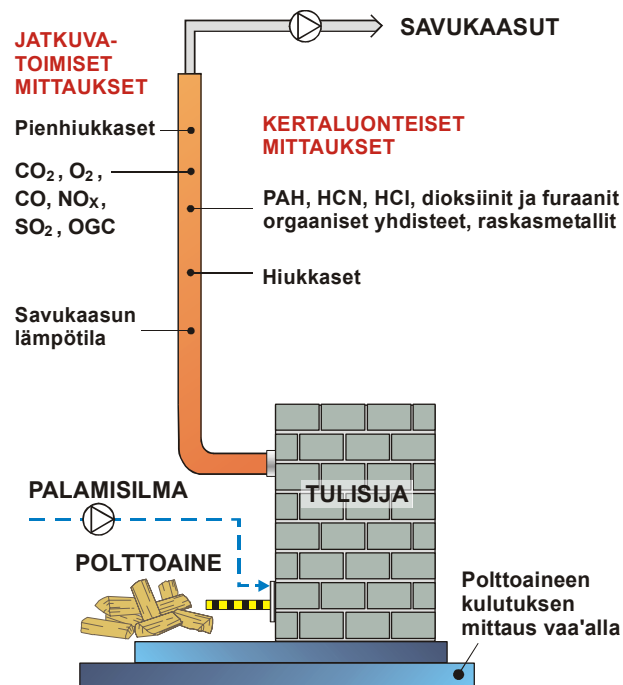
Snellmanian kattilahuoneessa tehdään mittauksia omakotitalo- tai kiinteistökatiloiden päästöistä. Kattilasta lähtevässä savukaasulinjassa on mittausyhteitä mm. hapen ja palamattomien kaasujen pitoisuuksien mittausta varten (Panametrics Flue Gas Meter Series 300) sekä lämpötila-antureille.

Mittaukset tehdään joko suoraan savukaasusta esim. ejektorilaimentimien avulla tai ottamalla savukaasusta osavirtanäyte ejektorityyppiseen laimennustunneliin, jossa on yhteet mittauslaitteita varten. Laimennusilmassa tunnelissa on paineilma- ja paineilma. Laimennustunnelin pituus on noin 8 m ja halkaisija 160 mm.

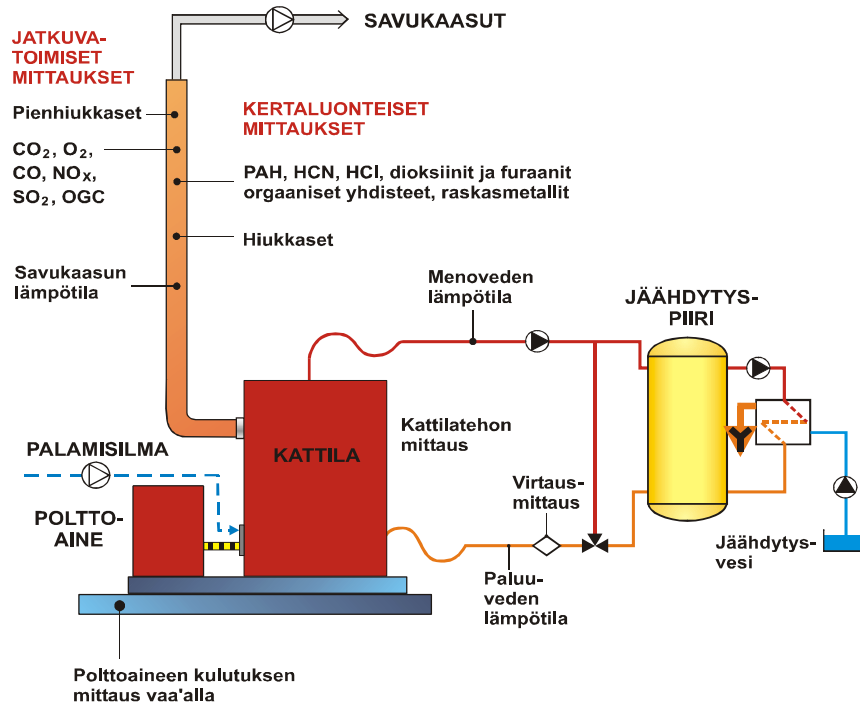
7.1.2 VTT Prosessit

Kuvissa 7.2 ja 7.3 esitetään VTT Prosessit yksikön tulisijojen ja kattiloiden mittausjärjestelmät. Kattiloille on kaksi koelinjaa tehoalueen mukaan, 0 – 70 kW ja 70 – 300 kW ja ne ovat kokoonpanoltaan lähes identtiset. Pienhiukkasmittauksissa savukanavaan asennetaan huuva, jonka avulla säädetään savukaasujen laimennus ennen pienhiukkasten näytteenottoa. Laimennussuhde määritetään huoneilmalla laimennetun ja laimentamattoman savukaasun hiilidioksidipitoisuuksien perusteella. Muut savukaasuarvot mitataan ennen laimennusta. Tulipesän alipaine asetetaan säätämällä savukaasupuhaltimen kierrosnopeutta ja huuvan etäisyyttä savukanavan päästä.

Kuuma savukaasu johdetaan lämmitetyssä näytelinjassa kuivaimen kautta jatkuvatoimisille analysointilaitteille. Happipitoisuus määritetään paramagneettisuuteen ja CO- sekä CO₂-pitoisuudet IR-säteiden absorptioon perustuvalla analysointilaitteella. Typen oksidien (NO_x = NO + NO₂) pitoisuuden määrittämiseksi savukaasu johdetaan NO_x konvertterin kautta UV-säteiden absorptioon perustuvalla analysointilaitteelle. Hiilivetyypitoisuus mitataan kosteista savukaasuista FID ilmaisimella. Savukaasujen kokonaishiukkaspitoisuus määritetään gravimetrisellä menetelmällä keräämällä näyte isokineettisesti tasosuodattimelle.

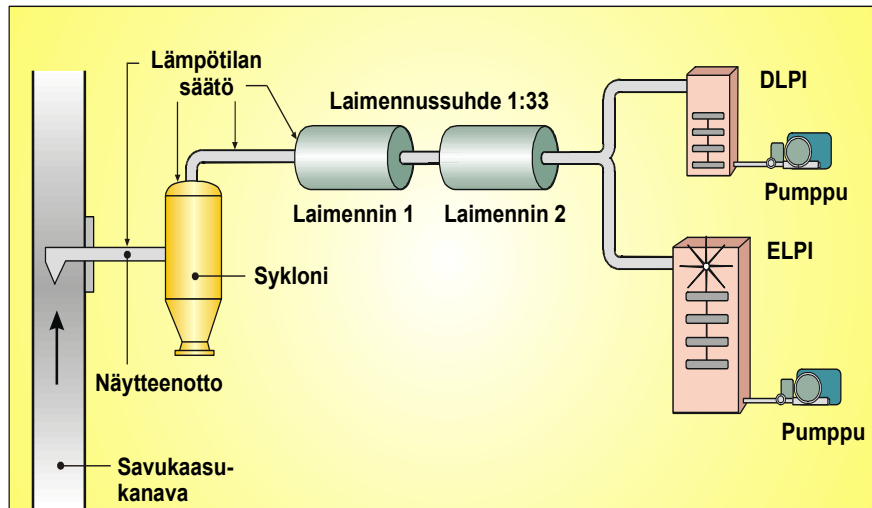


Kuva 7.2. Tulisijojen tutkimuslaitteisto.



Kuva 7.3. Kattiloiden tutkimuslaitteisto.

Pienhiukkasten mittauslaitteisto sisältää punnitusimpaktorin (DLPI) ja sähköisen alipaineimpaktorin (ELPI), kuva 7.4, joille huurossa kertaalleen laimentunut savukaasu johdetaan vielä kahden laimentimen kautta. Pienpolton kokeissa kokonaislaimennus on tavallisesti suuruusluokaltaan 1:100. Tarvittaessa toinen laimentin voidaan ohittaa riittävän näytemäärän keräämiseksi punnitusimpaktorille.



Kuva 7.4. Pienhiukkasten mittauslaitteisto.

7.1.3 Työtehoseura

Mittaukset tehtiin yhteistyössä Kuopion yliopiston kanssa Työtehoseuran lämmityslaboratoriossa Nurmijärven Rajamäellä. Päästömittauksia tehtiin takkauunilla, yläpalokattila-, stokeri- ja pellettipolttimilla. Panospolttokokeet takkauunilla tehtiin erilaatuisilla pilkkeillä ja kokeet yläpaloisella keskuslämmityskattilalla pilkkeillä eri lämmitystavoilla. Stokeripolttimia tutkittiin eri kuormituksilla hake- ja pellettipolttoaineilla. Pellettipolttimilla kokeet tehtiin puupelleteillä eri kuormituksilla.

Työtehoseuran lämmityslaboratoriossa on neljä mittauspaikkaa. Mittauspaikoista kolme on varustettu 6 metriä korkeilla eristetyillä savuhormeilla. Hormien sisähalkaisija on 175 mm. Hormit toimivat luonnonvedolla. Hormien veto-oloja on mahdollista muuttaa säätöpellillä.

Yksi mittauspaikoista on varustettu noin 3 metriä korkealla eristetyllä savuhormilla. Hormin sisähalkaisija on 150 mm. Hormin veto-oloja on mahdollista muuttaa säätöpellillä. Näytteenottoyhteillä varustettu hormi asennetaan tutkittavaan lämmityslaitteeseen. Hormin pään yläpuolella on kartion muotoinen huuva (kuten kuvassa 7.1). Huuva on yhdistetty pystysuoraan hormiin. Pystyhormissa on savukaasupuhallin, jonka tilavuusvirtaa on mahdollista säätää taajuusmuuttajalla ja säätöpellillä. Huuvan korkeutta, puhaltimen kierrosnopeutta ja säätöpellin asentoa muuttamalla voidaan vaikuttaa savuhormin veto-oloihin. Huuvaa on mahdollista käyttää myös savukaasun laimennukseen.

Takkauunikokeet tehtiin huuvalla varustetussa mittauspaikassa. Yläpalokattila-, stokeri- ja pellettipoltinkokeet tehtiin luonnonvetohormilla varustetussa mittauspaikassa. Pienhiukkasmittauksissa näytteet otettiin suoraan savukaasuista ja laimennettiin paineilmalla ejektorilaimentimilla.

Polttoaineen sisältämä energiamäärä määritettiin polttoaineen kuiva-aineen lämpöarvon ja kosteuden perusteella. Polttoaineen kulutus mitattiin punnitsemalla kokeen aikana kulunut polttoainemäärä.

Yläpalokattila-, stokeri- ja pellettipoltinkokeissa kattila oli kytketty 9000 litran lämminvesivaraajaan. Kattilan kuormitus säädettiin eri kokeisiin mittauskytkennän säätö- ja sekoitusventtiileillä. Hyödyksi saatu lämpömäärä mitattiin kahdella sarjaan kytketyllä lämpömäärälaskurilla (AB Svensk Värmemätning, SVM 62 ja Enermet, 9EVL). Toisessa lämpömäärälaskurissa virtausmäärän mittaus perustui magneetti- ja toisessa turbiinianturiin.

Savukaasunäyte otettiin savukanavasta lämmitetyn näytteenottosondin avulla. Savukaasuista mitattiin jatkuvatoimisesti happi-, hiilidioksidi- ja hiilimonoksidi-pitoisuudet (ABB Hartman&Braun – savukaasuanalysointorit). Happipitoisuuden mittaus perustui paramagneettisuuteen, hiilidioksidi- ja hiilimonoksidipitoisuuksien mittaus IR-spektrometriaan. Savukaasun ja kattilan vesipiirin lämpötilat mitattiin J-, K- ja N –tyypin termoelementeillä sekä Pt100-vastusantureilla. Kokeissa mitattiin myös palamisilman lämpötila ja kosteus (Vaisala, Humitter 50U), ilmanpaine (Vaisala PTB101C) sekä hormin alipaine (Huba Control, alipainemittari). Mittaustiedot tallennettiin sekunnin välein (DasyLab 4.0- tiedonkeruuhjelma ja Gantner Electronics, ISM 110-dataloggeri).

7.1.4 Fortum Oil and Gas

Mittaukset kevyellä polttoöljyllä

Kevyen polttoöljyn hiukkaspäästömittaus toteutettiin Fortumin Öljytutkimuksen Polttolaboratoriossa. Tutkimuksissa selvitettiin kesälaatuksen lämmitysöljyn (Tempera 5) hiukkaspäästöt vanhalla ja uudemmalla laitekannalla. Vanhempaa ja perinteistä laitteistoa edusti kaksoistulipesällinen Jämä Miniter kattila, vm. 1975. Kattilassa tutkittiin esilämmittämätöntä vanhaa Oilon Junior A -poltinta ja nykyaikaista esilämmitettyä Oilon Junior Pro -poltinta. Uudempaa kattilalaitteistoa edusti Högfors 2000 Moduli -kattila, jossa on valurautainen pyöreälinjainen tulipesä. Polttimena käytettiin esilämmitettyä Oilon Junior Pro-poltinta. Hiukkasten mittauksessa laimennusmenetelmänä käytettiin Kuvan 7.4 –mukaista menetelmää. Pienhiukkasmassanäytteet otettiin laimennetusta savukaasusta kappaleen 6.4 mukaisilla menetelmillä.

Mittaukset hakepolttonesteellä

Forestera-kokeet tehtiin Fortumin Öljytutkimuksen Polttolaboratoriossa. Kattilana oli 500 kW:n Arimax E500-kattila, jossa oli hakepolttonesteen polttamista varten modifioitu Oilon KP 38H-poltin. Polttoaineen syöttö oli 60 l/h, mikä vastaa noin 300 kW:n tehoa.

7.2 TILASTOTIETOA MITTAUKSISTA JA MITATUISTA POLTTOLAITTEISTA JA -AINEISTA

Mittauspäiviä projektissa kertyi noin 170, joista yrityksille raportoituja laitemittauksia oli 35 %. Mittaustekniikan kehittämiseen, laimennusmenetelmien vertailumittauksiin ja polttoaineen laadun ja mallinnuksen vaatimiin laitemittauksiin käytettiin 45 % ja mallinnusta tukeviin virtausreaktorimittauksiin noin 20 % kaikista mittauksista. Mittaukset jakaantuivat melko tasaisesti eri vuosille. (Taulukko 7.1).

Taulukko 7.1. Mittausten jakaantuminen eri vuosille ja projektin eri osioihin.

Vuosi	Laitemittaukset	Mittaustekniikka ja	Virtausreaktori-	Yhteensä	
	[pv]	päästöjen karakterisointi	mittaukset	[pv]	[%]
2002	20	11	8	39	23
2003	16	31	18	65	38
2004	23	31	13	67	39
2005	2			2	1
Yhteensä	61	73	39	173	100

Polttolaitemittaukset painottuivat varaavien takkojen, takkasydämien sekä erilaisten keskikokoluokan pellettipolttimien ja stokerikattiloiden mittauksiin. (Taulukko 7.2). Varaavien takkojen osuus kaikista laitemittauksista oli noin 40 %. Stokeri- ja pellettipolttimien mittauksia tehtiin noin 20 % ja pellettitakkamittauksia noin 20 % mittauksista. Pellettitakkamittaukset kohdistuivat pienhiukkaspäästöjen karakterisointiin ja pellettitakkaa käytettiin myös päästölähteenä kahdella laimennusmenetelmien vertailujaksolla. Suurkiinteistökokoluokan kattiloiden mittaukset tehtiin käyttöpaikoilla. Mittaukset erilaisista pilkekäyttöisistä pienkattiloista jäivät vähäisiksi eikä ala- ja käänteispalokattiloita mitattu lainkaan. Kaikkiaan erilaisia täydellisiä mittauksia voitiin rekisteröidä lähes sata. Yleisimpien Suomessa käytettävien laitteiden päästöistä saatiin varsin hyvä kokonaiskuva, ja tutkimus laajuudessaan on siten suurin yhtenäinen ja samoilla laitteilla tehty päästöselvitys viime vuosina.

Pääasiallinen polttotapa mittauksissa oli laitevalmistajan ohjeistus ja tulisijoja mitattaessa myös ns. PIPO polttotapa. Pilkkeiden pituus tulisijoilla määräytyi tulipesän mittojen mukaan ja vaihteli 23 – 33 cm:n välillä. Pääpolttoaineena panospolttomittauksissa käytettiin kuivaa (n. 10 % kosteus) koivupilkettä ja useissa mittauksissa myös sahattua 2” x 2” kuusirimaa. Panospoltossa tutkittiin myös mänty- ja pyökkipuun aineksen polton päästöjä.

Jatkuvassa poltossa pääpolttoaineita olivat puupelletti (kaupallinen laatu) sekä hake (useimmiten koivu). Lisäksi suuremmissa kattilalaitoksissa polttoaineena oli kuori ja, puru sekä yhdellä mittausjaksolla kalusteteollisuuden levyjäte hakkeen lisänä. Virtausreaktorimittausten polttoaineena oli seulottu kuusi-koivu puujauhe.

Öljykattilamittauksissa käytettiin useita eri poltinvaihtoehtoja sekä uutta ja vanhaa laitekantaa. Polttoaineina olivat kevyt polttoöljy (Tempera 5), koepolttoaine sekä ForesterTM – hakepolttoneste yhdessä mittauksessa.

Taulukko 7.2. Mitattu laitejakauma (N = eri laitteiden lukumäärä), mittauspäivät sekä polttoaineet.

Laite	N	Mittauspäiviä ¹	Polttoaineet
Kiuas	4	11	Koivupilke
Pieni takka	2	20	Koivupilke, kuusirima (2"x2")
Keskikokoinen takka	4	39	Koivu-, kuusi-, mänty- ja pyökkipilkkeet, kuusirima (2"x2")
Takkasydän	2	5	Koivupilke, kuusirima (2"x2")
Leivinuuni	1	9	Koivupilke
Stokeri, alle 30 kW	2	6	Puupelletti ² , puupelletti (sis. 20 % purua), hake
Stokeri, alle 100 kW	2	7	Puupelletti ² , koivuhake
Stokeri 500 kW	1	2	Mäntyhake (sis. levyjätettä)
Pellettipoltin, alle 20 kW	2	4	Puupelletti ²
Yläpalopienkattila	2	4	Koivupilke, mäntypilke
Öljykattila, esilämmitetty poltin	5	7	POK, koepolttoaine, hakepolttoneste
Öljykattila, esilämmittämätön poltin	2	1	POK
Pellettitakka 8 kW	1	31	Puupelletti ² , koivu-, kuusi-, mänty-, leppä- ja pajupelletit sekä näiden kuoripelletit
Wärtsilä, arina 10 - 12 MW	2	4	Kuori, puru, hake
Virtausreaktori	1	39	Seulottu koivu-kuusijauhe

¹ Lämmitykset ym. testaukset mukana

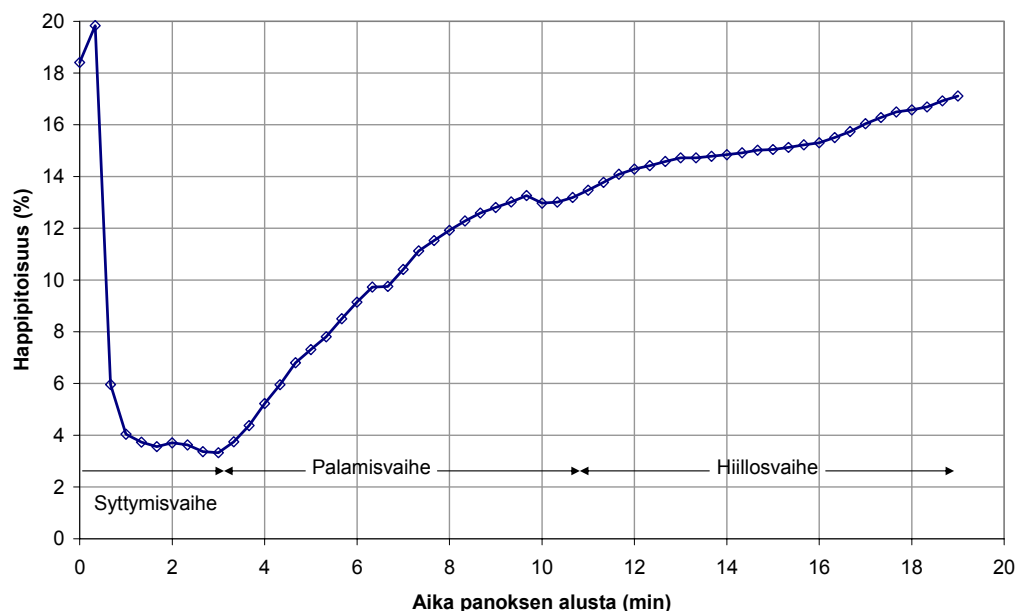
² Kaupallinen laatu

7.3 PALAMISOLOSUHTEET PIENPOLTOSSA

7.3.1 Happipitoisuudet

Puun pienpolton keskimääräinen jäännöshappipitoisuus vaihtelee merkittävästi laitetyypeittäin ja siten myös pitoisuudet normeerataan eri laitteissa eri pitoisuuksiin. Panospoltossa happipitoisuus vaihtelee voimakkaasti palamisvaiheittain (Kuva 7.5) ja palamisvaiheet voidaan jakaa happipitoisuusarvon mukaisesti. Syttymisvaiheen aikana jäännöshappipitoisuus pienenee kaasuuntuvien aineiden määrän lisääntyessä ja palamisen tehostuessa. Syttymis- ja palamisvaiheen rajalla saavutetaan happipitoisuuden minimiarvo, jolla on merkitys päästöjen kokonaismäärään. Tyypillisesti puun poltossa tarvitaan paljon yli-ilmaa huonosta palamisilman ja savukaasujen sekoituksesta ja nopeasta

pyrolyysista johtuen. Tällöin happipitoisuus ei alita esimerkiksi 6 % pitoisuutta. Palamisvaiheessa palamiskaasujen määrä vähenee, jolloin happipitoisuusarvot kasvavat. Hiillosvaiheessa happipitoisuudet ovat korkeita ja loppuhiilloksen palamisen aikana lähenevät normaalin huoneilman pitoisuutta 20,9 %. Keskimäärin happipitoisuus panospoltossa on 13 – 14 %. Yleisesti käytetäänkin normeerauspitoisuutena 13 %:n jäännöshappipitoisuutta.



Kuva 7.5. Polttoainepanoksen palamisen vaiheet jaoteltuna happipitoisuuden mukaisesti.

Jatkuvassa poltossa keskimääräiset jäännöshappipitoisuudet ovat yleensä alempia tehokkaammasta palamisesta johtuen. Poikkeuksena poltto pellettitakalla on yli-ilmaista keskimääräisen happipitoisuuden ollessa 16 – 17 %. Osateholla poltettaessa myös muissa jatkuvan polton laitteissa jäännöshappipitoisuudet ovat täyden tehon arvoja korkeampia. Polttolaitteen teho vaikuttaa happipitoisuuteen siten, että suuremmissa laitoksissa käytetään yleensä alhaisempia happipitoisuuksia. Pienkattiloilla happipitoisuudet olivat 6 - 10 %, suurkiinteistökokoluokan ja aluelämpökattiloilla 5 – 8 %. Pienkattiloiden normeerauspitoisuutena mm. EN 303-5 –standardissa käytetään 10 %:n pitoisuutta. Öljyn poltossa pienkattiloilla happipitoisuudet ovat huomattavasti pienemmät. Suosituspitoisuuksina pidetään 4 – 5 %:n happipitoisuutta, joskin polttimet toimivat suhteellisen hyvin vielä 3 %:n happipitoisuudella. (Öljy- ja kaasulämmitysyhdistys ry, 2001; 2003).

7.3.2 Savukaasun lämpötilat

Savukaasun keskimääräiset lämpötilat vaihtelivat polttolaitteittain. Kattilamittauksissa keskimääräiset lämpötilat olivat 120 – 190 °C, varaavilla tulisijoilla keskimäärin 210 °C ja kiukailla 350 °C. Osateholla kattiloilla lämpötilat olivat alhaisempia. Varaavilla tulisijoilla suurin merkitys savukaasun lämpötilaan oli varaavan materiaalin määrällä ja savusolien pituudella laitteessa. Hetkellisesti lämpötilat vaihtelevat merkittävästi varsinkin panospoltossa. Syttymisvaiheessa kylmällä laitteella lämpötilat ovat yleisesti alle 100 °C, kun esimerkiksi kiukaalla useamman panoksen palamisen jälkeen lämpötilat savukanavassa voivat nousta jopa 900 °C:een.

7.3.3 Veto-olosuhteet ja hyötysuhteet

Vedon säädöllä voidaan hallita polton nopeutta ja ilman saantia. Keskimääräinen savuhormin alipaine oli kattiloilla välillä 18 - 45 Pa ja takoilla 12 Pa. Hyötysuhteita ei määritetty kaikissa tapauksissa, mutta pien- ja keskikoon kattiloilla arvot olivat 80 - 85 %, tulisijoilla keskimäärin 77 % ja kiukailla 63 %.

7.4 PÄÄSTÖT PUUN PIENPOLTOSSE

7.4.1 Yleistä

Puun pienpoltto on erittäin laaja ja monitahoinen prosessi ja päästöihin vaikuttavia tekijöitä on paljon. Yleisiä riippuvuuksia eri päästöjen välille on puun pienpoltossa erittäin vaikea esittää. Seuraavissa kappaleissa päästöjen vaihtelua on päästökertoimien lisäksi havainnollistettu kolmella esimerkillä: varaavan tulisijan, pienkattilan kitupolton ja pellettipolttimen päästömittaustuloksilla. Yleisiä päästöihin vaikuttavia tekijöitä esitetään taulukossa 7.3.

Taulukko 7.3. Päästöihin vaikuttavia tekijöitä puun pienpoltossa.

Tekijä	Päästöihin vaikuttavat ominaisuudet	Vaikutus
Polttoaine	Kosteus	Alentaa palamislämpötilaa.
	Tuhkapitoisuus	Lisää hiukkaspäästöä.
	Paljon kaasuntuvia aineita	Vaikeuttaa pyrolysoitumisen hallintaa, liekki vaatii paljon palotilaa.
	Palakoko	Jatkuvassa poltossa vaikuttaa palamisen tasaisuuteen.
Polttolaitte	Tulipesän koko, muotoilu, materiaalit	Panospoltossa vaikuttaa syttymiseen ja kaasuntumisnopeuteen.
	Savusolien koko	Vaikeuttaa veto-olosuhteisiin ja palamislämpötilaan.
	Ilman ohjaus	Vaikeuttaa veto-olosuhteisiin.
Piippu	Piipun korkeus, koko ja muoto	Vaikeuttaa palamisilman määrään ja sekoittumiseen.
Palamisolosuhteet	Luonnonveto	Vaikeuttaa veto-olosuhteisiin.
	Savukaasun viipymäaika	Vaikeuttaa palamisen hallintaa
	Palamislämpötila	Vaikeuttaa päästöjen loppuunpalamiseen.
	Ilman syöttö ja sekoitus	Vaikeuttaa päästöjen loppuunpalamiseen.
Savukaasun jälkikäsitteily	Jälkikäsitteilylaitteet	Vaikeuttaa savukaasujen ja ilman sekoittumiseen.
	Toimintaolosuhteet	Vaikeuttaa päästön määrään, laitteen toimintaan ja käyttöön
Polttolaitteen käyttäjä	Palamisnopeus	Vaikeuttaa kaasuntumisnopeuteen ja palamiskaasujen määrään.
	Polttoaineen syöttötiheys	Vaikeuttaa palamisnopeuteen, hetkelliseen tehoon.
	Säätölaitteet	Vaikeuttaa polttoaineen, ilman ja laitteen tehon säädettävyyteen.
Päästökorkeus	Polttotapa, roskien poltto	Vaikeuttaa useisiin palamiseen vaikuttaviin tekijöihin
	Matalat piiput, polttoja tiheään asutulla alueella	Terveys- ja viihtyvyyshaitat paikallisia.

Polttoaineen laadulla sekä poltto- ja sytytystavalla on eniten merkitystä ensimmäisen panoksen päästöihin. Yleensä sytytys tapahtuu kylmässä tulipesässä, jolloin yksi palamisen edellytyksistä, riittävän korkea lämpötila, puuttuu. Päästöjä voidaan vähentää sytyttämällä ensimmäinen panos päältä, mikäli se tulisijassa on mahdollista. Tällöin polttoainepanoksesta sen lämmitessä vapautuvat kaasut joutuvat siirtymään liekkirintaman läpi, jossa ne ainakin osittain palavat. Päältä sytytettäessä sytyminen panoksen sisällä on myös jonkin verran rauhallisempaa ja palokaasujen viipymä tulipesässä pidempi. Alta sytytettäessä panoksesta vapautuvat kaasut joutuvat suoraan kylmiin savusoliin ja hormiin, jossa ne todennäköisesti jäävät palamatta. Ensimmäinen panos palaa myös hitaammin kuin seuraavat panokset, joten palokaasuilla on enemmän aikaa palaa. Siten ensimmäisen panoksen päästöt eivät välttämättä ole suurempia kuin seuraavien panosten. Sopivissa käyttöolosuhteissa ensimmäisen panoksen päästöt voivat olla jopa alhaisempia kuin seuraavien. Tulipesä lämpe-

nee polton edetessä ja nopeuttaa pyrolysoitumista. Mikäli pyrolyysikaasuja ei ehditä polttaa loppuun, päästöt kasvavat panos panokselta.

Polttoainepanoksen palamisen voi jakaa kolmeen vaiheeseen: syttymis-, palamis- ja hiillosvaiheeseen (Kuva 7.5). Vaiheiden kesto vaihtelee panoksittain. Ensimmäisessä panoksessa syttymisvaihe on muita pidempi, muissa syttymisvaihe on kestoiltaan muutamia minutteja. Palamisvaihe on polton pitkäkestoisin osuus.

Jatkuvassa poltossa polttoprosessi on huomattavasti paremmin hallittavissa ja päästöt pienempiä ja tasaisempia. Vaihtelua esiintyy erityisesti polton häiriö-, puhdistus- ja katkokäyntitilanteissa sekä hyvin pienellä teholla poltettaessa. Tällöin myös polttimen ominaisuuksilla on erityinen merkitys. Suurissa laitoksissa päästöihin vaikuttaa merkittävimmin käytetty puhdistusmenetelmä. Kiinteistökokoluokan laitteissa käytetään hiukkaspuhdistimena eniten sykklonia, joka kerää suuria hiukkasia. Suuremmissa laitoksissa puhdistimena käytetään multisyklonia, savukaasupesuria, sähkösuodatinta tai näiden yhdistelmiä.

7.4.2 Häkä-, hiilivety- ja typenoksidipäästöt

Häkä (CO)

Kaasumaisten päästökomenttien pitoisuudet vaihtelevat merkittävästi erilaisissa palamistilanteissa. Häkäpäästöt ovat tyypillisesti suuret epätäydellisen palamisen aikana ja erityisesti, kun palamiseen tarvittavan hapen määrä on liian pieni. Panospoltossa häkäpäästöjä syntyy keskimääräistä enemmän sekä syttymisvaiheessa että hiillosvaiheessa. Hiillosvaiheessa häkäpäästöt ovat suuret, koska hapen diffuusio kiinteään hiileen on hidasta. Häkäpäästöt voivat olla erittäin suuret, mikäli hiillospatja tulipesässä on paksu (esim. leivinuuni). Pienimmät häkäpäästökertoimet 20-40 mg/MJ mitattiin aluelämpökattiloilla ja öljypolttimilla. Pienkattiloissa häkäpäästöt olivat 4 – 10 -kertaisia ja panospoltossa kymmen-, jopa satakertaisia verrattuna aluelämpölaitokseen. Suurimmat keskimääräiset häkäpäästöt noin 3000 mg/MJ mitattiin kiukailla, kun muilla panospolttolaitteilla häkäpäästö oli keskimäärin 1200 mg/MJ. Keskimääräiset päästökertoimet kaasukomenttien osalta esitetään taulukossa 7.4.

Hiilivedyt (OGC, THC, C_xH_y)

Savukaasussa esiintyvät hiilivedyt syntyvät puun pyrolyysin aikana ja vapautuvat savukaasuun, mikäli palaminen on epätäydellistä. Hiilivety-päästöjä esiintyy siis lähes pelkästään silloin, kun polttoaineen kaasuuntumisvaihe on menossa eli syttymisvaiheessa ja palamisvaiheen alkupuolella. Hiillosvaiheessa hiilivety-päästöt ovat pieniä. Puuaineessa kaasuuntuvien aineiden osuus on noin 80 %, joten pyrolyysituotteiden vapautuminen syttymisvaiheessa on nopeaa ja kaasuuntumista on vaikea hallita. Perinteisillä rakoarinoilla, varsinkin kiukailla, joissa veto pidetään hyvänä riittävän hetkellisen tehon saamiseksi ja ilman syöttöä tulipesään ei välttämättä rajoiteta, hiilivety-päästöt voivat olla erittäin korkeita. Varaaviin tulisijoihin on kehitetty uusia arinaratkaisuja, joissa periaatteena on rajoittaa kaasuuntumista ohjaamalla palamisilma pääosin toisioilmana tulipesään. Uusilla arinaratkaisuille hiilivety-päästöjä saadaankin huomattavasti pienennettyä. Jatkuvassa poltossa palaminen on hallittua ja hiilivety-päästöt pienet. Keskimääräiset ominaispäästöt jatkuvasyöttöisillä laitteilla olivat yhdestä mg/MJ noin 20 mg/MJ:een. Tehokkaassa panospoltossa hiilivety-päästöt voivat olla keskimäärin muutamia kymmeniä mg/MJ. Kiukailla hiilivety-päästö oli keskimäärin 600 mg/MJ ja muilla panospolttolaitteilla 130 mg/MJ.

Osana hanketta tehtiin lopputyö ”Puulajin vaikutus pienpolton VOC-päästöihin” (Hytönen, 2004). Lopputyössä havaittiin, että NMVOC-päästön koostumus vaihtelee palamisvaiheittain. Aromaattisten yhdisteiden osuus kaikissa palamisvaiheissa oli yli 40 % ja enimmillään hiillosvaiheessa 70 – 80

% Alkeeneja esiintyi vain sytytysvaiheessa, jolloin niiden osuus oli 10 – 20 %. Alkaaneja esiintyi erityisesti loppuhiillon palamisessa, jolloin niiden osuus oli keskimäärin 16 %. Aldehydien, ketonien, furanien ja karboksyylihappojen osuus oli enimmillään muutamia prosentteja. Kaikkien tunnistettujen yhdisteiden osuus oli keskimäärin 70 – 80 %. Yleisimpiä yhdisteitä olivat bentseeni, jonka osuus koko NMVOC päästöstä oli 20 % sekä naftaleeni ja tolueeni, joiden osuudet olivat noin 10 %. Suurin VOC-ominaispäästö mitattiin koivupilkkeiden sytytysvaiheesta. Muissa palamisvaiheissa suurimmat päästöt verrattaessa neljää eri puulajia saatiin kuusen poltosta.

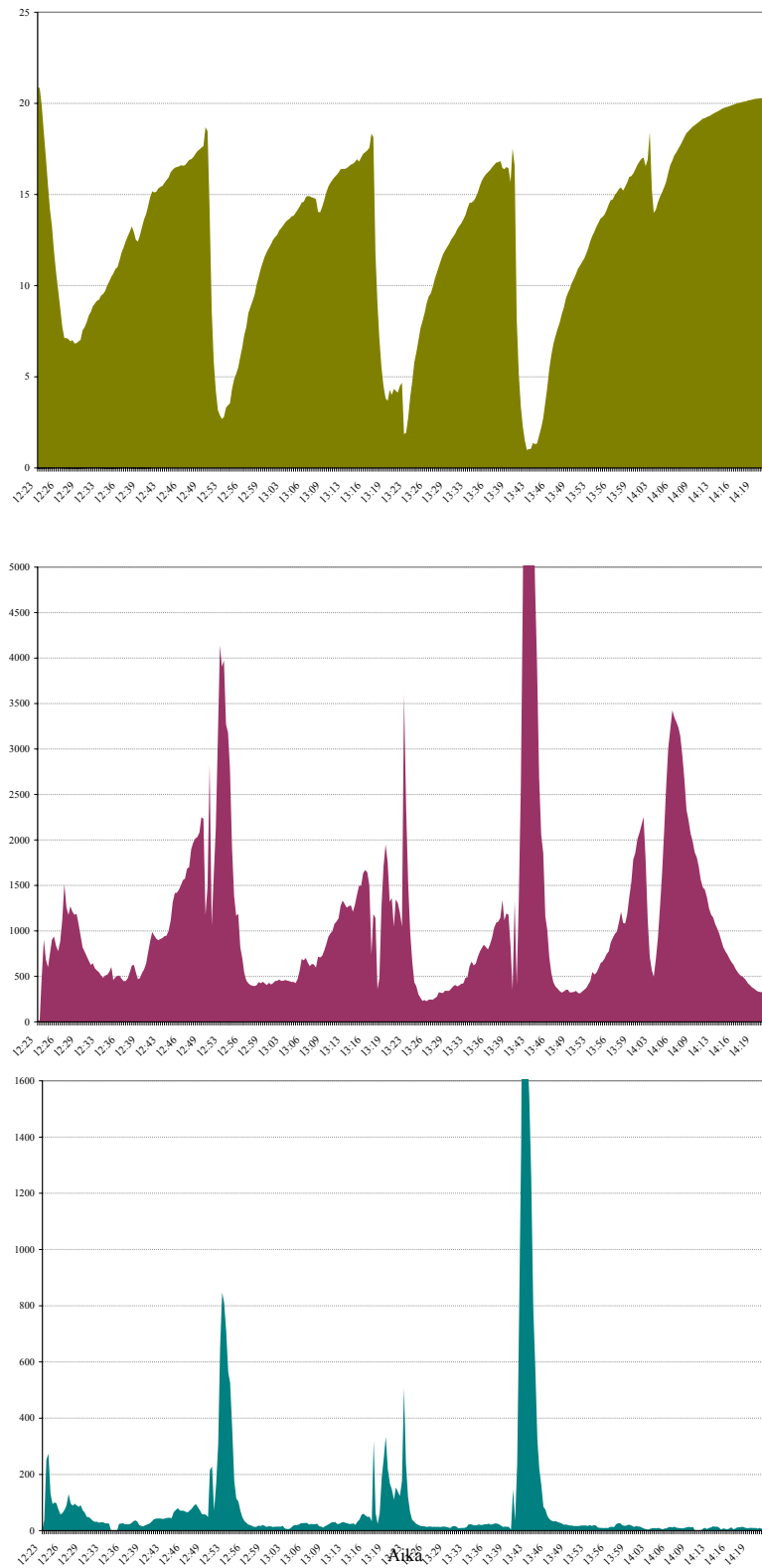
NO_x

Typen oksidien päästöt muodostuvat puun poltossa kokonaan polttoaineesta peräisin olevan typen palamisesta. Päästö koostuu lähes kokonaan typpimonoksidista NO. NO₂-päästön osuus on muutama prosentti luokkaa. Keskimäärin puun pienpoltossa NO_x-ominaispäästö oli noin 80 mg/MJ.

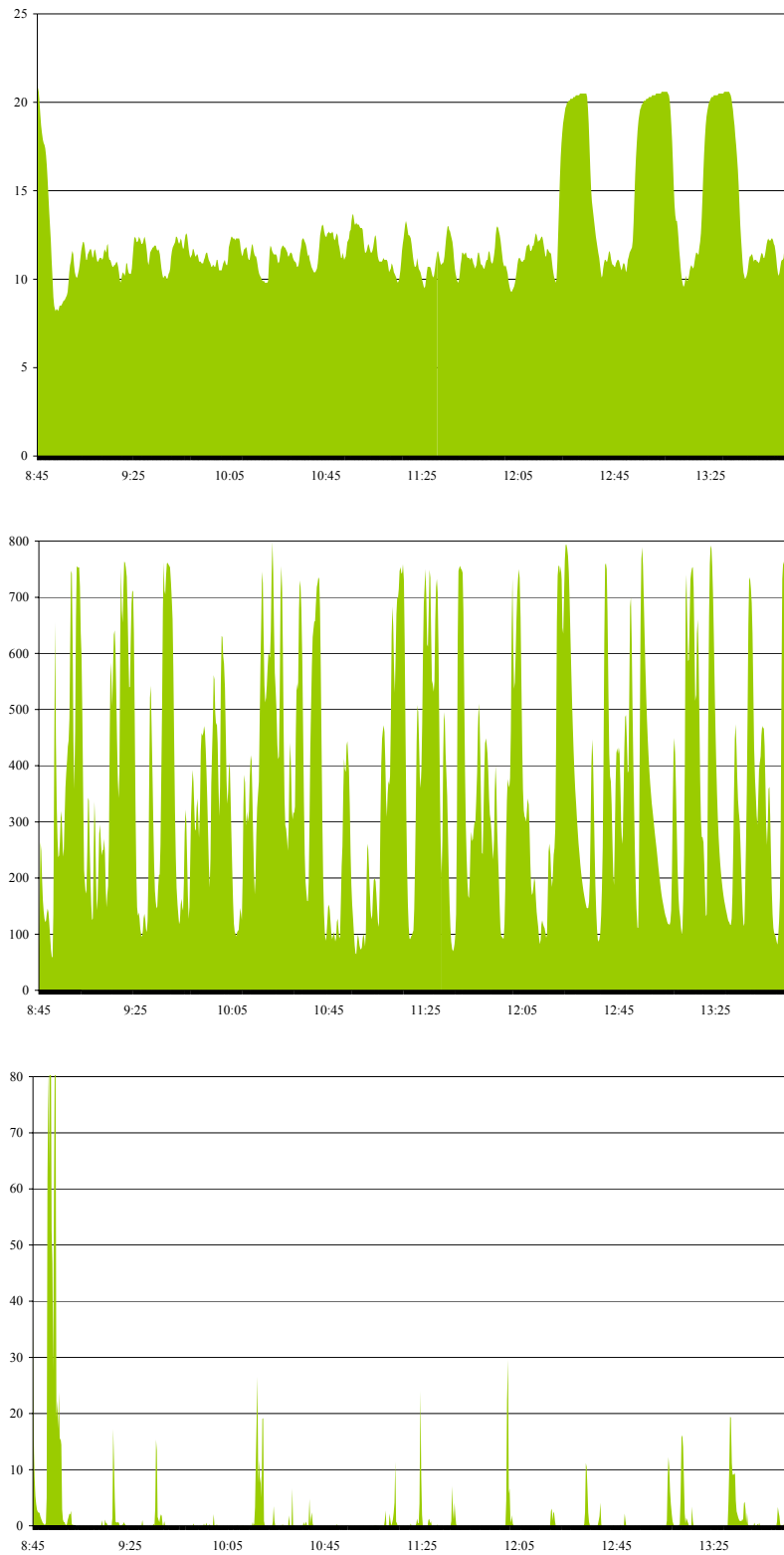
Taulukko 7.4. Keskimääräiset kaasumaisten päästökomponenttien ominaispäästökertoimet eri polttolaitteilla.

	CO mg/MJ	OGC mg/MJ	NO _x mg/MJ
Kiukaat	3100	590	120
Varaavat takat, takkasydämet	1200	130	55
Pellettitakka	170	10	40
Pellettipoltin, alle 30 kW	190	5	
Stokeripoltin, alle 50 kW, pelletti	250	5	55
Stokeripoltin, alle 50 kW, hake	500	35	110
Stokeripoltin, 50-500 kW, pelletti	85	1	65
Stokeripoltin, 50-500 kW, hake	620	5	145
Aluelämpökattila, 10 MW	20		70
Öljypoltin	35		40

Kuvissa 7.6–7.7 esitetään kaasupäästöjen vaihtelu kahdessa eri polttotilanteessa, kuvassa 7.6 on hyvän perinteisen panospolton päästötulos ja kuvassa 7.7 pelletinpolttimen päästötulos nimellisteholla ja osateholla.



Kuva 7.6. Varaavan takan kaasumaisten päästöjen vaihtelu panoksittain. Ylin kuva happipitoisuus (%), keskimääräinen häkäpäästö (mg/MJ) ja alin kuva hiilivetypäästö (mg/MJ). Häkäpäästöä havaitaan syttymis- ja hiillosvaiheissa. Hiilivetypäästöt esiintyvät yksinomaan syttymisvaiheessa.



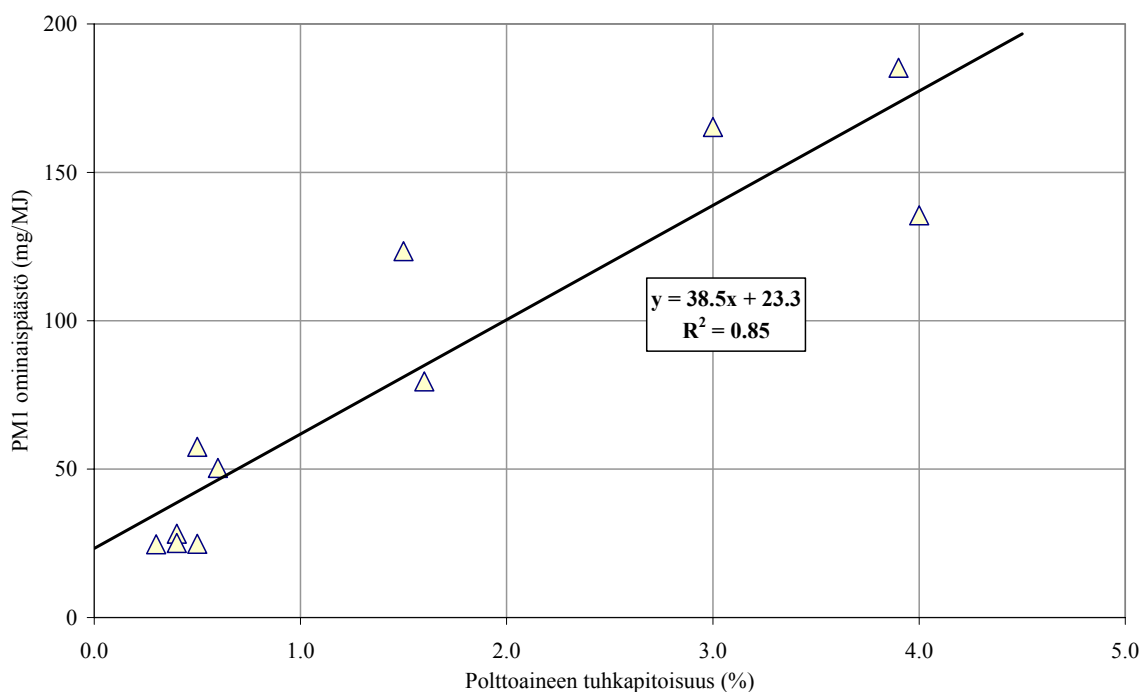
Kuva 7.7. Pellettipolttimen kaasumaisten päästöjen vaihtelu nimellisteholla (n. klo 12 saakka) ja osateholla (klo 12 jälkeen). Ylin kuva happipitoisuus (%), keskimäinen kuva häkäpäästö (mg/MJ) ja alin kuva hiilivetyypäästö (mg/MJ). Häkäpäästöissä havaitaan vaihtelua happipitoisuuden vaihdella. Hiilivetyypäästöt ovat erittäin pienet, suurin pitoisuus havaitaan poltinta käynnistettäessä.

7.4.3 Hiukkaspäästöt

Savukaasussa esiintyvät hiukkaset ovat epätäydellisen palamisen tuotteina syntyneitä hiilihiukkasia (nokea tai orgaanista) tai polttoaineen tuhkasta peräisin olevia tuhka- ja nokihiukkasia. Nokihiukkasia syntyy liekissä suoraan haihtuvista komponenteista tai suoraan pyrolyysikaasuista, kun palamisolosuhteet ovat paikallisesti ali-ilmaisia. Hiilivedyt tiivistyvät tuhka- ja nokihiukkasten pinnoille savukaasun jäähtyessä. Hiilivetyperäisiä hiukkaspäästöjä voidaan tehokkaasti pienentää oikean polttotavan ja ilman ohjauksen avulla

Puhdas polttopuu sisältää tyypillisesti noin 0,5 % mineraaliaineita kuivamassasta, mikä on varsin vähän verrattuna muihin biomassoihin. Puupolttoaineen tuhka on sitoutunut suoraan hiilivetyketjuihin ja vapautuu helposti polttoprosessissa joko pienhiukkasiksi tai jää pohjatuhkaan. Tärkeimpiä helposti höyrystyviä mineraaleja puussa ovat kalium, natrium, rikki, kloori ja sinkki. Näiden lisäksi lentotuhka sisältää yleensä myös heikommin höyrystyviä alkuaineita, joita ovat mm. kalsium, rauta, magnesium ja mangaani.

Tuhka- ja nokihiukkaspitoisuus on suoraan verrannollinen vapautuvan tuhkan määrään. Kuvassa 7.8 esitetään polttoaineen tuhkapitoisuuden vaikutus pienhiukkasmassapitoisuuteen.



Kuva 7.8. Polttoaineen tuhkapitoisuuden vaikutus häkä- ja PM1.0 hiukkaspäästöön. Kukin piste vastaa yhtä pellettipolttainetta. Mittaus tehty pellettitakalla.

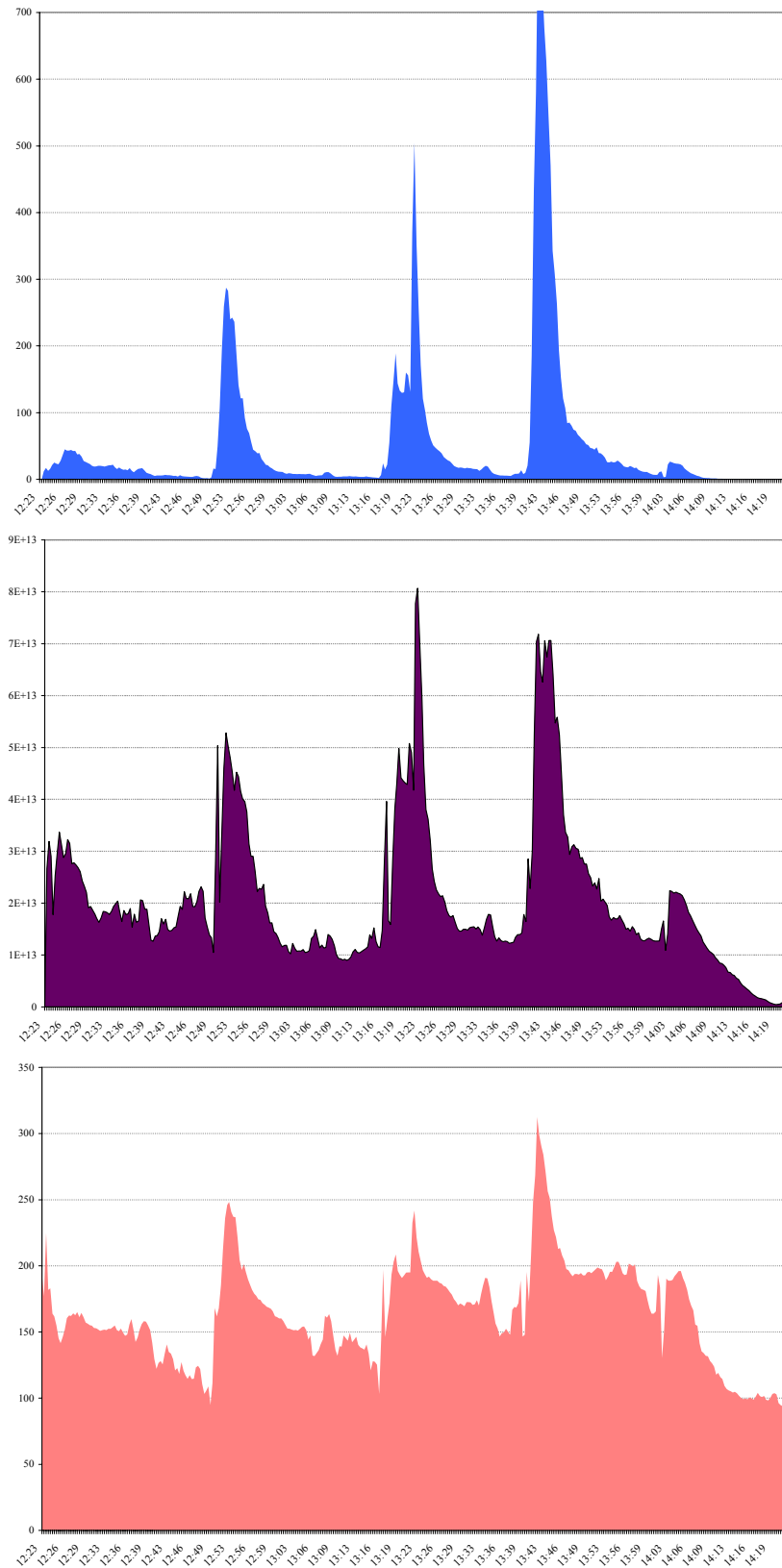
Taulukossa 7.5 esitetään hiukkaspäästökertoimet puun pienpoltossa, aluelämpölaitoksissa ja pienöljykattiloissa. Jatkuvalpoltoisia laitteita ja mm. hakkeen ja pelletin tuloksia verrataan enemmän taulukossa 9.1 raportin viimeisessä osiossa.

Taulukko 7.5. Hiukkaspäästökerroimet ja keskimääräiset hiukkaskoot.

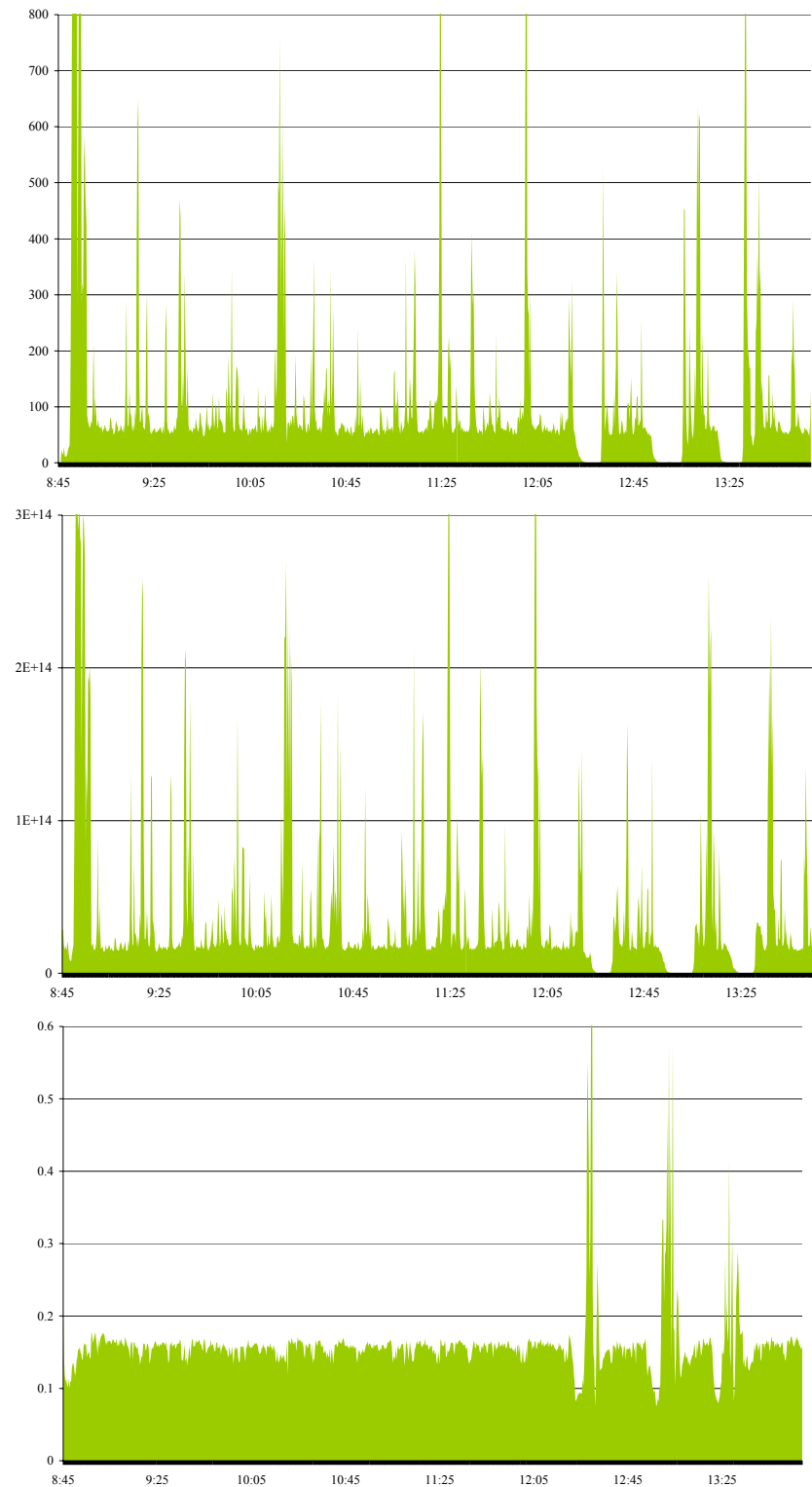
	TSP mg/MJ	PM1 mg/MJ	N #/MJ	KOKO nm
Kiukaat	150	145	6,5E+13	110
Varaavat takat, takkasydämet	100	85	4,0E+13	130
Pellettitakka		65	3,2E+13	155
Pellettipoltin, alle 30 kW	35	25	1,2E+13	145
Pienkattilat, alle 50 kW, pelletti	13	8	6,9E+12	105
Pienkattilat, alle 50 kW, hake	20	11	8,1E+12	105
Keskikattilat, 50-500 kW, pelletti	18	10	1,7E+13	80
Keskikattilat, 50-500 kW, hake	55	30	2,3E+13	105
Aluelämpökattila, 10 MW*	11	3	4,3E+11	230
Öljypoltin	2	2	1,1E+11	50

*) Multisykloni ja sähkösuodatin.

Kuvissa 7.9–7.10 esitetään hiukkaspäästöjen vaihtelu kahdessa eri polttotilanteessa samoista tilanteista kuin kuvissa 7.6 – 7.7. Kuvassa 7.9 on hyvän perinteisen panospolton päästötulos, kuvassa 7.10 pelletinpoltin päästötulos nimellisteholla ja osateholla.



Kuva 7.9. Varaavan takan hiukaspäästöjen vaihtelu panoksittain ELPillä mitattuna. Ylin kuva PM1-päästö (mg/MJ), keskimäinen kuva lukumääräpäästö (kpl/MJ) ja alin kuva aritmeettinen hiukkaskoko (nm). Päästöt ja hiukkaskoko ovat suurimmillaan syttymisvaiheissa.



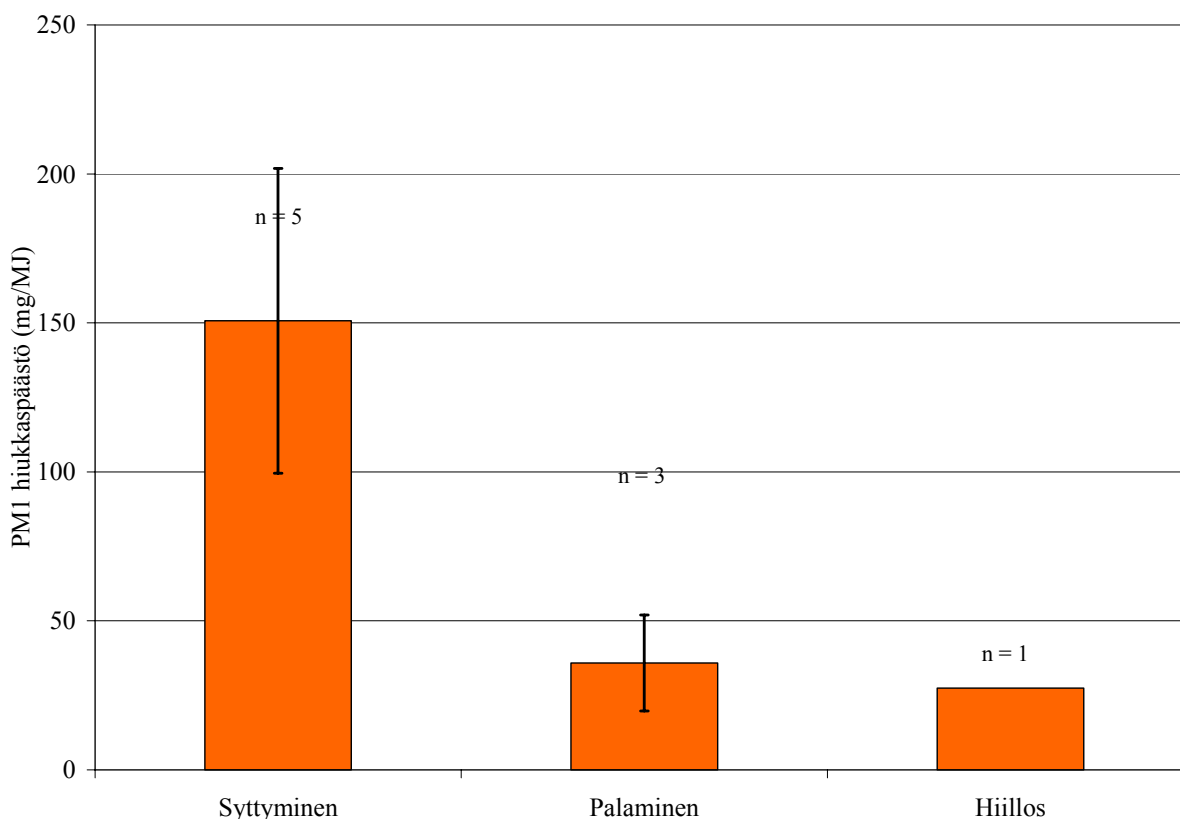
Kuva 7.10. Pellettipolttimen hiukkaspäästöjen vaihtelu nimellisteholla (n. klo 12 saakka) ja osateholla (klo 12 jälkeen). Ylin kuva PM1-päästö (mg/MJ), keskimäinen kuva lukumääräpäästö (kpl/MJ) ja alin kuva aritmeettinen hiukkaskoko (μm). Koko pysyy vakiona tasaisessa palamisessa ja vaihtelee voimakkaasti osateholla. PM1 massa ja lukumäärä korreloivat erittäin hyvin tasaisessa palamisessa (R^2 yli 0.9).

Hiukkasiin liittyvät parametrit massa, lukumäärä, koko, muoto ja koostumus kytkeytyvät toisiinsa ja hiukkaspäästöä tarkasteltaessa täytyisi aina tuntea tulos kaikkien osalta. Seuraavassa käsitellään kutakin parametreistä tarkemmin erikseen puun pienpoltton tulosten valossa.

Hiukkasmassa

Kokonaispölypäästön tulokset vaihtelevat merkittävästi savukanavassa olevien yksittäisten suurten hiukkasten satunnaisuuden (päätyvät suodattimelle / ohittavat suodattimen) ja panospoltossa hankalasti saavutettavan isokineettisyyden takia. Yksittäiset, jopa millimetrikokoluokan hiukkaset, vaikuttavat merkittävästi massaa lisäävästi joutuessaan suodattimelle. Hiukkasmassapäästöt puun pienpoltossa ovat pienimmillään muutamia mg/MJ, kun hetkellisesti pitoisuudet voivat olla useita satoja, jopa 1000 mg/MJ. Korkeat hiukkasmassapitoisuudet liittyvät yleensä aina huonoihin palamisoloihin.

Jatkuvassa poltossa keskimääräiset massapäästöt olivat 10–50 mg/MJ, tehokkaassa panospoltossa luokkaa 50 mg/MJ ja keskimäärin panospoltossa noin 100 mg/MJ. Kiukaille massapäästö oli 150 - 200 mg/MJ. Hiilivetyjen osuus massassa kasvoi voimakkaasti, kun päästö oli yli 100 mg/MJ. Tehokkaassa poltossa suurin osa hiukkaspäästöstä on tuhkaa. Esimerkki suodattimille kerätystä PM1 päästöstä eri palamisvaiheissa esitetään kuvassa 7.11.



Kuva 7.11. Esimerkki pienhiukkasmassapäästöjen vaihtelusta palamisvaiheittain panospoltossa. Päästöjen keskiarvot, vaihteluvälit sekä näytteiden lukumäärä (n).

Hiukkaslukumäärä

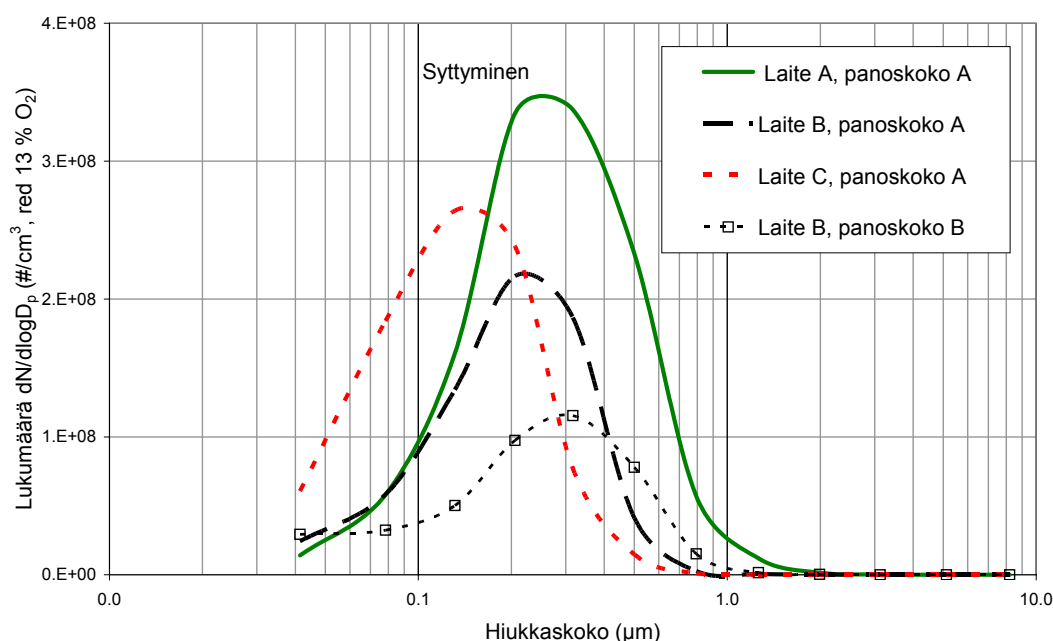
Lukumääräpäästöt puun pienpoltossa olivat $10^{12} - 10^{14}$ kpl/MJ, aluelämpökattiloilla puhdistimien jälkeen $10^{11} - 10^{12}$ kpl/MJ ja pienöljykattiloilla samoin $10^{11} - 10^{12}$ kpl/MJ. Ero lukumääräpäästössä

pienpolton ja öljypolton välillä johtuu polttoaineiden tuhkapitoisuuseroista. Lukumääräpitoisuus ei kuitenkaan korreloinut suoraan palamisen hyvyuden eikä muiden päästöjen kanssa.

Hiukkaskoko

Pienpolttolaitteiden hiukkaspäästön keskimääräinen hiukkaskoko oli lähes sama polttolaitteesta riippumatta. Lähes vakio hiukkaskoko on seurausta noki- ja tuhka-agglomeraattien keskikoosta ja jakauman muutokset johtuvat hiilivetyjen kondensoitumista hiukkasten pinnoille. Mitä tehokkaampaa palaminen yleisesti on, sen pienempiä hiukkasia päästössä esiintyy. Panospoltossa hiukkaskokojakauma vaihtelee selkeimmin palamistilanteiden mukaisesti. Syttymisvaiheessa hiukkasjakauma muuttuu nopeasti ja hiukkaskoko on keskimääräistä suurempi. Palamisvaiheessa hiukkaskokojakauma pysyy suhteellisen tasaisena ja keskikoko on lähellä koko polton keskimääräistä arvoa. Hiillosvaiheessa hiukkaskoko on pienimmillään.

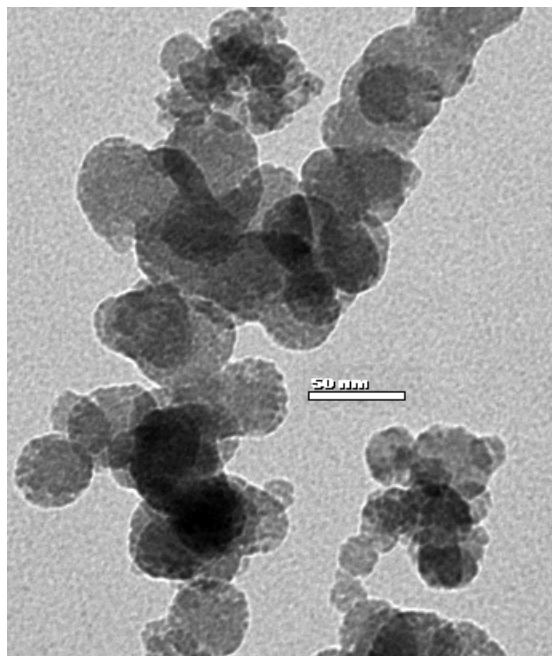
Jatkuvassa poltossa jakauma on koko polton ajan tasainen ja hiukkaskoko yleensä hieman pienempi kuin panospoltossa. Keskimääräinen hiukkaskoko puun pienpoltossa on 80 – 160 nm. Hiillosvaiheessa koko on 50 – 100 nm ja syttymisvaiheessa ja kitupoltossa suurimmillaan 500 – 600 nm. Alhaisin hiukkaskoko havaittiin keskitehokattiloilla pellettipoltossa. Esimerkkinä kokojakaumista on kuvassa 7.12 panospolton syttymisvaiheen keskimääräiset hiukkaskokojakaumat kolmella eri laitteella ja kahdella panoskoolla. Hiukkaskokojakaumia eri tilanteista esitettiin enemmän kappaleessa 6.



Kuva 7.12. Esimerkki keskimääräisistä hiukkaskokojakaumista syttymisvaiheessa kolmella eri tulisijalla, kahdella polttoainepanoskoolla. ELPI-mittaus (Al-alustat).

Hiukkasten muoto ja koostumus

Tyypillisesti puun pienpolton pienhiukkaset ovat primääripalloista koostuvia agglomeraatteja (Kuva 7.13). Primäärihiukkasten koko on noin 20 – 60 nm. Tilanteissa, joissa hiilivetyjen määrä savukaa- sussa on suuri (kitupoltto), agglomeraatit voivat olla ”romahtaneita” eli ketjut ovat painuneet ositain kasaan. Tällöin hiilivedyt ovat kondensoituneet kiinteän tuhka-noki agglomeraattiytimen päälle kerrokseksi.



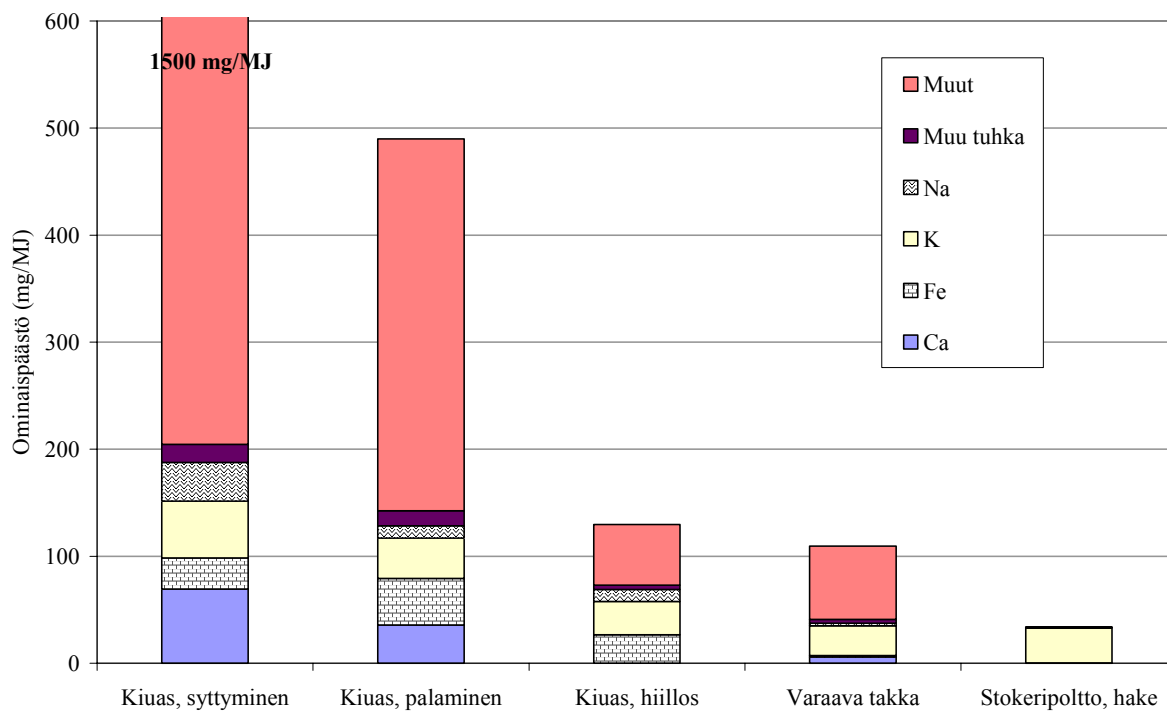
Kuva 7.13. TEM-kuva panospolton palamisvaiheen hiukkasesta (jana 50 nm).

Hyvissä palamisolosuhteissa esimerkiksi hyvin toteutetussa stokeripoltossa hiukkaspäästö koostui lähes ainoastaan lentotuhkasta. Sen sijaan huonoissa palamisolosuhteissa, kuten usein panospoltossa lentotuhkan osuus on vain 5-20 % hiukkasmassasta, mikä johtuu runsaasta noen ja hiilivetyjen muodostumisesta. Esimerkiksi pellettitanon sytytyksessä, kun pellettipanosta lämmitetään vastuksella, mutta liekkiä ei ole vielä ilmaantunut, hiukkaset ovat lähes puhtaita, nestemäisessä muodossa olevia hiilivetypisaroita. Toisaalta yli mikrometrin kokoiset suurhiukkaset voivat olla tuhkaa tai osittain palamatta jäänyttä polttoainetta.

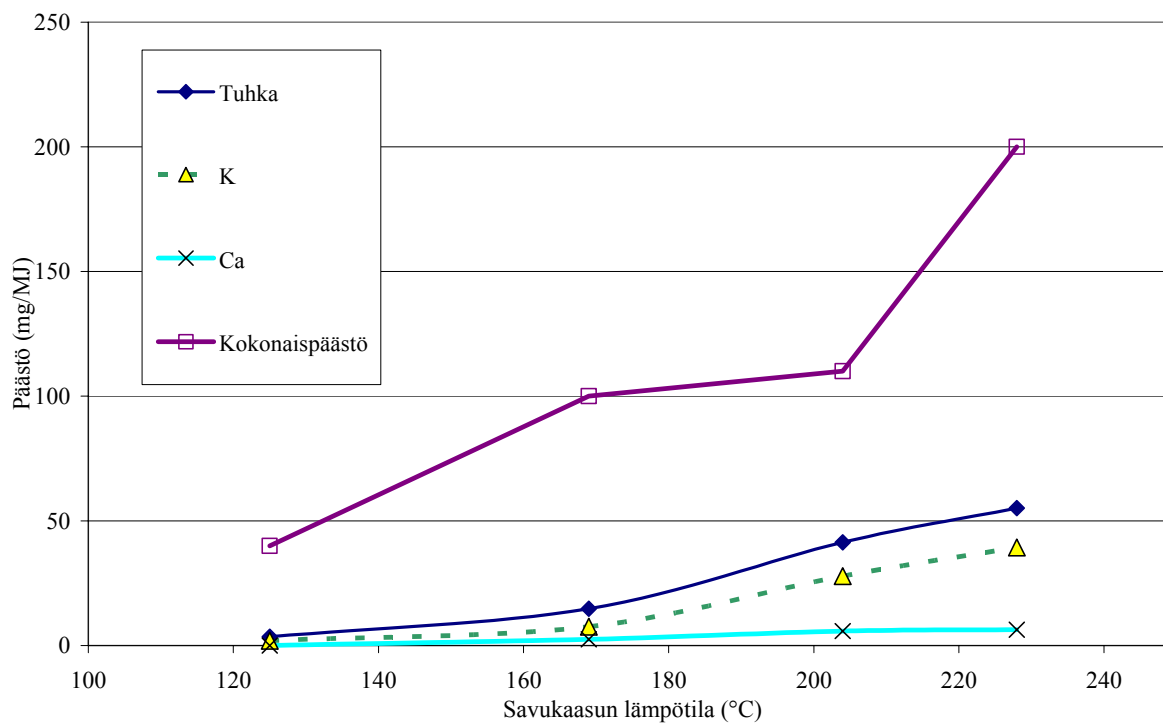
Merkittävin yksittäinen tuhkakomponentti on kalium, joka projektin tuhkamäärityksissä vastasi karbonaateiksi laskettuna 50 - 90 % lentotuhkasta. Lentotuhka sisälsi merkittäviä määriä myös kalsiumia, natriumia, sinkkiä, magnesiumia ja mangaania. Kiukaan lentotuhkanäytteissä havaittiin korkeita pitoisuuksia rautaa, mikä johtuu todennäköisesti kiukaan seinämien hilseilystä.

Kuvassa 7.14 esitetään kiukaan kolmesta palamisvaiheesta, varaavan tulisijan palamisvaiheesta sekä stokeripolton päästöistä yksittäisistä näytteistä määritetty hiukkaspäästön koostumus. Normaalien palamisen aikana kaliumin ominaispäästöissä eri tulisijoilla ei ollut suuria eroja, mikä viittaa siihen, että kalium höyrystyy lähes täydellisesti poltossa. Sen sijaan esim. kalsiumin määrä vaihtelee huomattavasti, mikä johtuu siitä, että sen höyrystyminen riippuu tulisijan lämpötilasta.

Kuvassa 7.15 esitetään erään panospolttoisen varaavan tulisijan pienhiukkaspäästöt kalsiumin, kaliumin, kokonaistuhkan sekä kokonaispäästön osalta eri savukaasun näytteenottolämpötiloilla. Näytteenottolämpötila on verrannollinen tulisijan lämpötilaan. Kyseisellä laitetypillä hiukkaspäästön kasvu johtuu sekä tuhkan lisääntyneestä höyrystymisestä että palamattomien määrän lisääntymisestä panoksittain lämpötilan kasvaessa.



Kuva 7.14. Kationien ominaispäästöt karbonaateiksi laskettuna kiukaalla kolmessa eri palamisvaiheessa, varaavalla tulisijalla palamisvaiheessa ja stokeripoltossa yksittäisistä näytteistä määritettynä.



Kuva 7.15. Ominaispäästöt eri savukaasun lämpötiloissa perinteisellä varaavalla tulisijalla.

8 MALLINNUSTYÖ

Jouni Pyykönen¹, Jorma Jokiniemi^{1,2} ja Olli Sippula²

¹VTT Prosessit, Energia ja ympäristö, PL 1401, 02044 VTT

²Kuopion yliopisto, Pienhiukkas- ja aerosolitekniiikan laboratorio, PL 1627, 70211 Kuopio

¹Kappale 8.1

²Kappale 8.2

Mallinnustyön tarkoituksena oli selvittää fysikaaliseen tietämykseen pohjautuvilla tarkasteluilla, miten pienhiukkaset muodostuvat puun pienpolton polttoprosesseissa. Palamisprosessissa muodostuvien tervojen ja muiden tiivistyvien orgaanisen yhdisteitten sekä noen tarkastelu jätettiin pääosin tämän mallinnustyön ulkopuolelle, koska näille on jo aiemmin tehty mallitarkasteluja TEKESin TULISIJA-ohjelmassa. Hyvässä polttoprosessissa noki ja tiivistyvät orgaaniset yhdisteet voidaan minimoida hyvällä sekoittumisella ja palamisella. Niiden muodostumismekanismit ovat suhteellisen hyvin tunnettuja. Hyvin toteutetussa palamisprosessissa pienhiukkaspäästöistä valtaosan muodostavat puussa epäpuhtauksina olevat epäorgaaniset tuhkakomponentit. Tässä projektissa tutkittiin, mitkä tekijät määräävät hyvässä palamisessa muodostuvan pienhiukkasten kojakautuman.

Virtausreaktorissa puun palaminen tapahtuu dimensioiltaan yksinkertaisessa palotilassa säädeltävissä olosuhteissa, jolloin voidaan tutkia eri olosuhdeparametrien vaikutusta muodostuviin päästöihin tavanomaisia polttolaitteita helpommin. Reaktorilla tehdyillä kokeilla pyrittiin arvioimaan eri hiukkaspäästöön vaikuttavien tekijöiden merkitystä sekä tuottamaan kokeellista tietoa hankkeessa kehitettävän palamisaerosolimallin testaamista varten.

8.1 MALLINNUS

8.1.1 Tausta mallinnustyölle

Mallinnustyön tarkoituksena oli selvittää fysikaaliseen tietämykseen pohjautuvilla tarkasteluilla, miten pienhiukkaset muodostuvat puun pienpolton polttoprosesseissa. Palamisprosessissa muodostuvien tervojen ja muiden tiivistyvien orgaanisen yhdisteitten sekä noen tarkastelu jätettiin pääosin tämän mallinnustyön ulkopuolelle, koska näille on jo aiemmin tehty mallitarkasteluja TEKESin TULISIJA-ohjelmassa. Hyvässä polttoprosessissa noki ja tiivistyvät orgaaniset yhdisteet voidaan minimoida hyvällä sekoittumisella ja palamisella. Niiden muodostumismekanismit ovat suhteellisen hyvin tunnettuja. Hyvin toteutetussa palamisprosessissa pienhiukkaspäästöistä valtaosan muodostavat puussa epäpuhtauksina olevat epäorgaaniset tuhkakomponentit. Tässä projektissa tutkittiin, mitkä tekijät määräävät hyvässä palamisessa muodostuvan pienhiukkasten kokojakautuman. Periaatteessa tunnettuna on yleistrendi, jonka mukaan palamisen lämpötila määrää vapautuvan epäorgaanisen aineen määrään ja tällä on puolestaan vaikutus hiukkaskokoon siten, että suurempi vapautuneiden aineiden määrä johtaa suurempaan hiukkaskokoon. Toisaalta aivan suoraviivaisia kaikki kirjallisuudessa esitetyt tulokset eivät tässä suhteessa ole (Johansson, 2002). Epäselvänä seikkana projektin alkuvaiheessa oli sen sijaan, mikä prosessi hallitsee pienhiukkasten kokojakauman muodostumista. Vapautuneen aineen määrää eli jakautumista pohja- ja lentotuhkaan ei pyritty mallintamaan ilmiöpohjaisesti, vaan tämän tiedon saa projektin mittauksista.

Lähtökohtana epäorgaanisten pienhiukkasten muodostumisprosessille palamisprosessissa on pidetty kivihiilen pölypoltosta muodostunutta käsitystä, sillä tässä yhteydessä asiaa on tutkittu paljon (Flagan ja Seinfeld, 1988). Kivihiilen pölypoltossa pienhiukkasten muodostumisprosessi lähtee liikkeelle polttoaineen metallisista epäpuhtauksista, jotka höyrystyvät polttoainehiukkasen palaessa pelkistävissä oloissa. Metallisten epäpuhtauksien kulkeutuessa polttoainehiukkasen rajakerroksessa kauemmaksi hapettavalle alueelle höyrystynyt metalli hapettuu metallioksidiksi, joilla on hyvin alhainen höyrynpaine, jolloin se tiivistyy välittömästi muodostaen siemenhiukkasia. Näitä siemenhiukkasia muodostuu lukumääräisesti hyvin suuri pitoisuus, ja muodostuttuaan ne kasvavat törmäilemällä keskenään. Näin ollen hiukkasten lukumääräpitoisuutta rajoittaa viipymäaika, ja lukumääräpitoisuuden vaihtelu eri laitosten kesken ei ole kovin voimakasta. Hiukkasten koon määrää niihin tiivistyvän aineen määrä, joka myös vaikuttaa hiukkasten koon kautta niiden törmäilykasvun nopeuteen. Nämä tulokset ovat tulleet esille lukuisissa VTT:llä tehdyistä voima- ja soodakattiloiden mallitarkasteluista, joissa tuloksia on verrattu myös mittauksiin (Jokiniemi *ym.*, 1994; 1996). Puun pienpoltossa oleellisia eroja kivihiilen pölypolttoon nähden pienhiukkasten muodostumisprosessin suhteen ovat lyhyt viipymäaika ja polttoaineen epäpuhtauksien alhainen pitoisuus. Yhteisenä piirteenä on se, että hyvässä palamisessa alkaliyhdisteet muodostavat merkittävän osan pienhiukkasiin tiivistyvistä aineesta. Oleellisimpia tarkasteltavia alkuaineita aineita ovat K, Na, S ja Cl.

VTT:llä on kehitetty aerosolimalleja eri tarkoituksiin jo useiden vuosien ajan. Malleissa yhdistetään prosessin kemiallisten reaktioiden, hiukkasdynamiikan ja virtausolojen kuvaus aina mallinnettavaan tilanteeseen nähden tarkoituksenmukaisimmalla mallilla. Puun pienpolton tapauksessa on keskitytty perusilmiöihin ja etenkin kemiallisten syntymekanismien selvittämiseen ja näin ollen on käytetty yksidimensioista tarkastelua. Kun systeemi on riittävän hyvin tunnettu, tarkasteluja voidaan myös tehdä CFD-virtauslaskentaan kytketyillä malleilla (Pyykönen ja Jokiniemi, 2000; 2002), mutta tämän projektin puitteissa ei vielä edetty tälle tasolle.

8.1.2 Mallin kuvaus

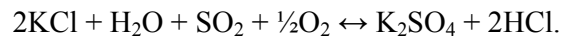
Projektissa kehitetty malli on viipymäaikapohjainen kuvaus, jossa seurataan taseyhtälöillä hiukkaskokojakautuman kehittymistä. Polttoprosessia kuvaava tieto on lämpötilagradientti ajan suhteen, jota pidetään tässä vapaana parametrina. Hiukkaskokojakautuman muutoksia kuvaavina ilmiöinä on mallinnettu ydintyminen eli nukleatio, eri yhdisteiden tiivistyminen joko suoraan tai kemiallisella reaktiolla sekä hiukkasten törmäilykasvu eli agglomeraatio tai koagulaatio. Pienhiukkasten muodon kehitystä kuvataan fraktaalimallilla, missä primäärihiukkasen keskimääräistä kokoa käsitellään lähötietona, sillä se on saatavissa elektronimikroskopia-analyyseista. Mallissa ratkaistaan taseyhtälö hiukkasten lukumääräpitoisuudelle N (NTP-oloissa) pitkin kuvitteellisia virtaviivoja:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \left(\frac{\partial N}{\partial t} \right)_{Nucl} + \left(\frac{\partial N}{\partial t} \right)_{Agg},$$

missä ensimmäinen termi viittaa hiukkasten lukumäärän kasvuun ydintymisen seurauksena ja toinen termi kuvaa hiukkasten lukumäärän vähentymistä niiden keskinäisen törmäilyn seurauksena. Lisäksi ratkaistaan taseyhtälö hiukkasten massapitoisuudelle M (NTP-oloissa):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right)_{Nucl} + \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right)_{Cond},$$

missä ydintymistä aiheuttavaa aineensiirtoa tärkeämpi on aineensiirto, joka syntyy tiivistymisestä olemassa olevien hiukkasten pinnoille. Hiukkasten keskinäisestä törmäilystä aiheutuva lähde-termi hiukkasten lukumäärälle lasketaan massa- ja lukumääräpitoisuuksien perusteella approksimoimalla hiukkaskokojakautuma lognormaaliksi. Ydintymisnopeus riippuu tiivistyvän kaasumaisen yhdisteen ylikylläisyysasteesta. Tiivistymisnopeus riippuu tämän lisäksi myös hiukkasten kokojakautumasta. Tämä riippuvuusuhde ei ole aivan suoraviivainen. Pienhiukkasten mittakaavassa eivät päde jatkumomekaniikan lait, koska ollaan kaasumolekyylin vapaan matkan suuruusluokassa. Ylikylläisyysasteen määrittämiseksi ohjelmassa lasketaan myös tiivistyvien yhdisteiden kaasufaasin kehitys. Kaasufaasin oletetaan olevan osatasapainossa, kun taas kokonaistasapainoa rajoittaa kaasufaasin ja hiukkasfaasin välinen aineensiirto. Kaasufaasin osatasapainoa varten projektissa kehitettiin ChemApp-pohjainen liittymä, joka hoitaa osatasapainon laskentarutiinin ja yhteyden FactSage-tietokantaan. Poikkeuksena kaasufaasin osatasapainoon rikin hapetustilan muutos oletetaan kineettisesti rajoitetuksi. Tämän mallinnetaan käyttämällä Christensenin arviota sulfatoitumisreaktion kineetikasta (Christensen *ym.*, 1998). Sulfatoitumisreaktio on:



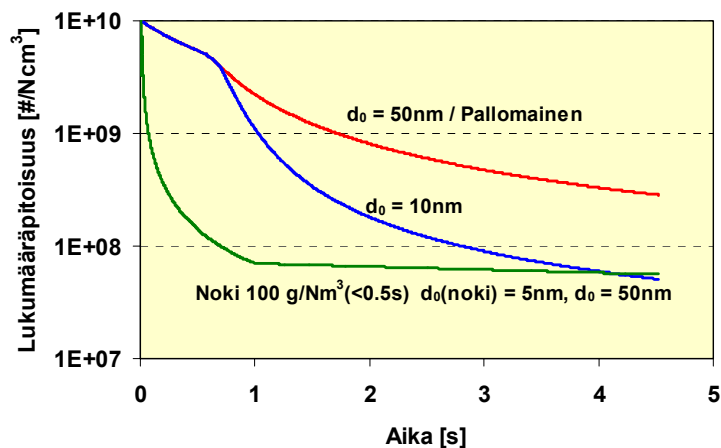
Kaasufaasin muutosta seurataan ratkaisemalla kunkin alkuaineen (i) kaasufaasipitoisuuden V_i (NTP-oloissa) taseyhtälö:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = - \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} \right)_{Nucl} - \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} \right)_{Cond},$$

missä on lähde-termi alkuaineen poistumiselle ydintymisen ja tiivistymisen seurauksena. Malli on kehitetty laskennallisesti tehokkaasti, ja näin ollen sillä ei ole ainoastaan laskettu eri tapauksia vaan lisäksi on tehty parametrisia tarkasteluja eli hahmoteltu muutoksia, kun yhtä tai useampaa parametria on vaihdeltu.

8.1.3 Mallitarkastelut törmäilyrajoitteisella mallilla

Projektissa lähdettiin liikkeelle kivihiilen pölypolton perusteella mallirakenteesta, jossa hiukkasten keskinäinen törmäily ja siitä aiheutuva hiukkaskasvu on keskeisin hiukkasten kokojakautuman muotoutumiseen vaikuttava seikka. Palavista hiukkasista kaasufaasiin vapautuneen alkalien määrä otetaan mittauksista. Jos hiukkasten törmäily olisi hiukkasten kasvua rajoittava seikka, hiukkasten lukumääräpitoisuuksien pitäisi olla varsin korkeita ja niiden vaihtelun eri tilanteiden välillä kuuluisi olla melko pientä. Pienpolttolaitteiden mittauksissa, niin tässä projektissa tehdyissä kuin kirjallisuudessaakin raportoiduissa tapauksissa, on kuitenkin joissakin mittauksissa havaittu hyvin pieniä hiukkasten lukumääräpitoisuuksia. Yleensä ottaen vaihtelu eri tilanteiden ja eri laitteiden välillä on hyvin suurta. Lisäksi mallitarkasteluilla tutkittiin voisiko prosessin välivaiheessa muodostuva noki ja/tai hiukkasten muoto voimistaa merkittävästi hiukkasten törmäilyä ja näin selittää havaittuja hiukkaspitoisuuksia, mutta tarkasteluista ei tullut uskottavia tuloksia, vaan havaittuihin mittaustuloksiin päästiin vain olettamalla epärealistisen pieni primäärihiukkaskoko tai hyvin korkea nokipitoisuus (Kuva 8.1). Näillä perusteilla päädyttiin siihen, että hallitseva pienhiukkasten muodostumismekanismi puun pienpoltossa hyvän palamisen aikana ei ole sama kuin kivihiilen pölypoltossa eli oletus hiukkasten törmäilykasvun hallitsevuudesta ei päde.

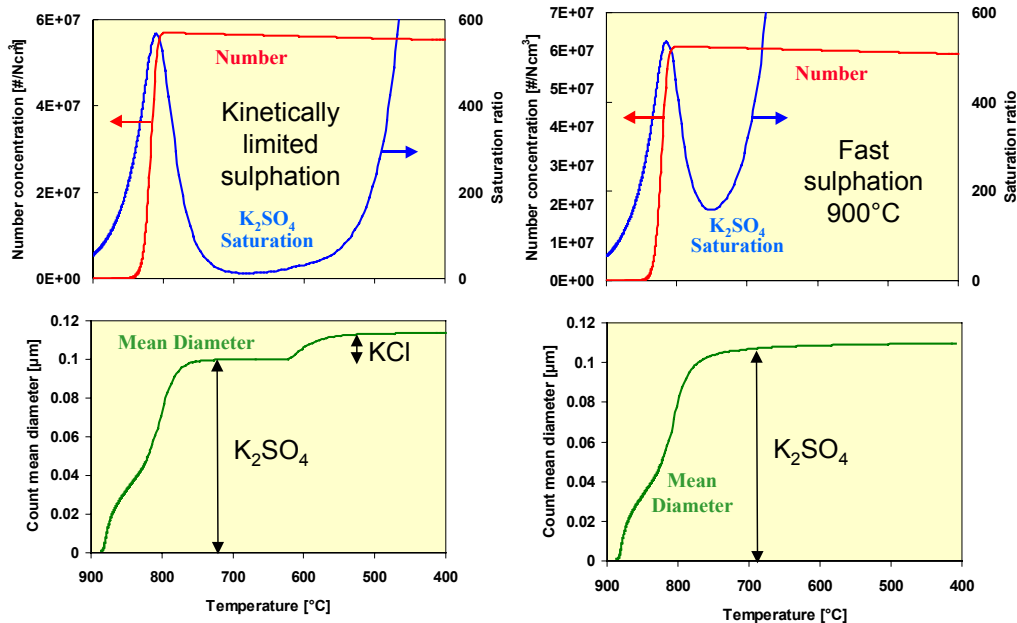


Kuva 8.1. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden muutos kirjallisuudessa esitetyn sveitsiläisen Stokeripolttimen oloissa. Mallilaskut perusmallilla sekä pallomaisilla että 50 nm primäärikoon hiukkasilla tuottavat liian korkeita lukumääräpitoisuuksia. Olettamalla (epärealistisesti) joko 10 nm primäärikoon hiukkaset tai pois palavaa nokea, jolla 5 nm primäärikoko, puolen sekunnin ajan päästään mittauksia vastaaviin tuloksiin.

8.1.4 Mallitarkastelut ydintymisrajoitteisella mallilla

Projektin puitteissa mallia täydennettiin hiukkasten ydintymisen ja tiivistymiskasvun kuvauksella. Mallissa ydintyvaksi osalajiksi on oletettu K_2SO_4 . Valitettavasti kirjallisuudesta löytyvä aineisto K_2SO_4 :n ydintymiskäyttäytymisestä ei ole yhtä runsas kuin KCl :n osalta. Vaikka mittaustuloksista ei saa tarkkoja kineettisiä parametreja, niiden perusteella tiedetään, että K_2SO_4 -hiukkasten muodostumismallit toimivat polttokattilaolosuhteissa melko hyvin ja antavat järkeviä tuloksia. Puun pienpoltton poltto-olosuhteitten kuvaus on toteutettu vapaaksi parametriksi jätetyllä lämpötilan jäähtymisnopeudella. Tarkempi turbulentin muodostumisvaiheen epähomogeenisuuden ja palavien hiukkasten rajakerroksen analysointi on jätetty jatkoprojekteihin ja toisessa projektissa (pienhiukkasten käyttäytyminen laimentavassa näyteenotossa) tehtävään mallikehitykseen. Näin ollen tässä ei ole niinkään pyritty mallintamaan yksittäisiä polttolaitteita, vaan selittämään eri riippuvuussuhteita, trendejä, ja tarkastelemaan teorioiden paikkansapitävyyttä. Laskettujen käyrästöjen avulla voi tehdä arvioita yksittäisestä prosessista.

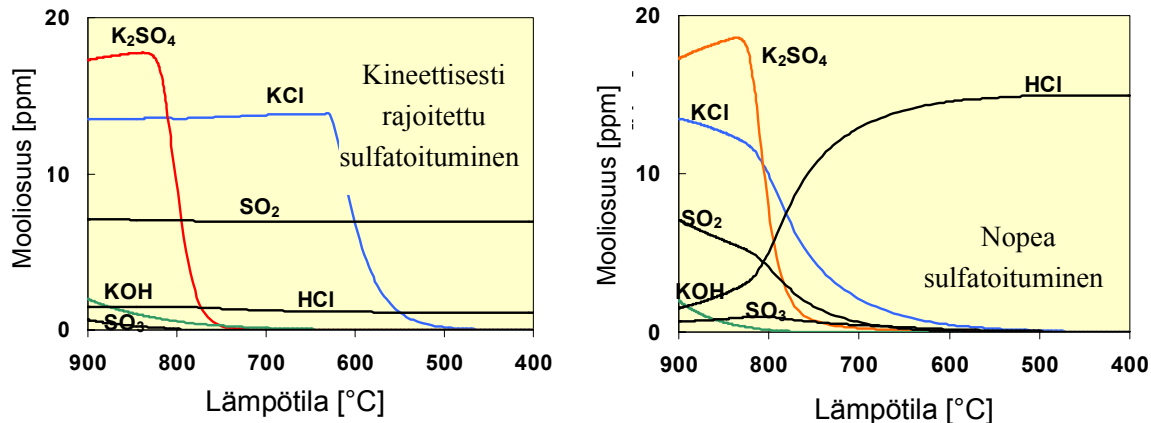
Laaditulla puun pienpolton pienhiukkasmallilla tehdyt tarkastelut osoittavat, että oletus K_2SO_4 :n ydintymisen rajoittamasta hiukkasten muodostuksesta toimii ja tuottaa mittauksia vastaavia tuloksia (Kuvat 8.2 ja 8.3). Tarkastelut on tehty palamistilanteille, missä pysyvää nokea tai tiivistyviä orgaanisia yhdisteitä ei muodostu merkittävästi hyvien palamisolojen ansiosta. Polttoaineena on puu, jonka kosteuspitoisuus on 40 %. Märissä savukaasuissa oletetaan olevan 8 % happea. Perustapauksessa kaasufaasiin oletetaan vapautuneeksi seuraavat ainemäärät: K 50 ppm; Cl 15 ppm; S 25 ppm. Perustapauksessa jäähtymisnopeus on 500 K/s. Laskenta aloitetaan 900 °C lämpötilasta palamisen jälkeisestä olotilasta.



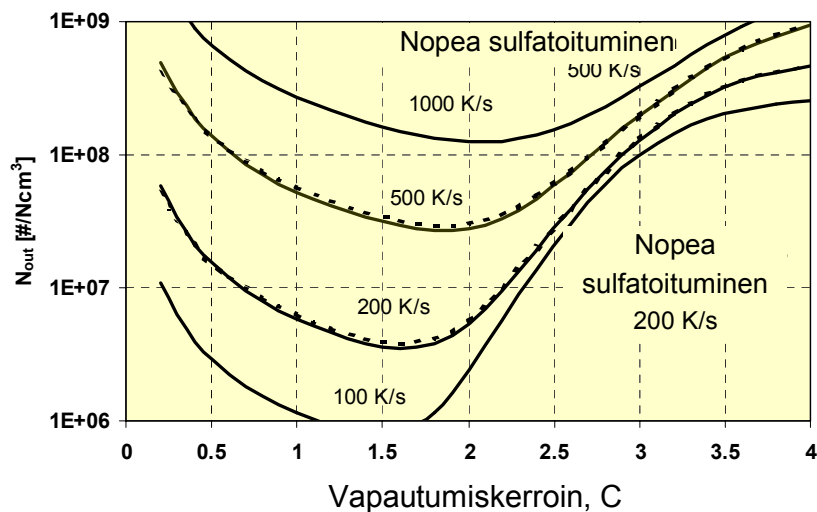
Kuva 8.2. Polttoprosessissa muodostuvien hiukkasten lukumääräpitoisuus (punainen), K_2SO_4 :n kylläisyyssuhde (sininen) ja hiukkasten lukumääräjakauman geometrinen keskihalkaisija (vihreä). Vasemman puolen kuvissa sulfatoituminen on kineettisesti rajoitettua, jolloin osa kaliumista tiivistyy klorideina. Oikean puolen kineettisesti rajoittamattomassa tapauksessa klorideja ei muodostu.

Mallit tuottavat kokeellisesti havaitun trendin, jonka mukaan hiukkasten lukumääräpitoisuus nousee vapautuvan ainemäärään mukaan (Kuva 8.4). Tosin aivan pienillä pitoisuuksilla mallin mukaan lukumääräpitoisuus myös nousisi, mutta tähän ennusteeseen on KCl:lla tehtyjen laboratoriokokeiden (Jensen *ym.*, 2000) perusteella syytä suhtautua varauksella. Toisaalta hiukkasten muodostuminen ei ole kovinkaan herkkä vapautuvien aineiden K, Cl ja S suhteellisille osuuksille. Perustapauksessa muodostuneiden pienhiukkasten ainemäärien K/Cl/S suhteet ovat suunnilleen 12/3/2. Sinänsä se, että K_2SO_4 :n ydintymiseen pohjautuva teoria toimii, ei vielä osoita, että metallisten epäpuhtauksien muodostamat siemenhiukkaset eivät voisi olla hiukkasten muodostumista määräävä tekijä. Perusteita K_2SO_4 :n ydintymisen hallitsevuudelle tarjoaa se, että lukumääräpitoisuusalue laboratorio-oloissa käytetyn suhteellisen korkean siemenhiukkasten pitoisuuden noin $1 \cdot 10^6$ #/Ncm³ (korkeampaa pitoisuutta ei testattu), jolla K_2SO_4 osoittautui silti muodostavan uusia hiukkasia (Jensen *ym.*, 2002) ja alimman polttokokeissa havaitun hiukkaspitoisuuden välillä on melko pieni. Näin ollen vaikuttaa todennäköiseltä, että K_2SO_4 muodostaa uusia hiukkasia muodostuneista metalliepäpuhtaushiukkasista huolimatta. Keskimääräinen hiukkaskoko ei puolestaan mallilaskelmien mukaan vaihtelee kovinkaan paljoa vapautuvan ainemäärän mukaan etenkin, jos jäähtymisnopeus on suuri (Kuva 8.5). Vaihtelu on vielä epälineaarista siten, että suurimmat hiukkaset muodostuvat keskisuuralla vapautumisella. Sulfatoitumisen kinetiikalla on merkittävä vaikutus alkalikloridien jakautumiselle kaas- ja hiukkasfaasin kesken (Kuva 8.6.). Tämä ei ole herkkä jäähtymisnopeuden suhteen.

Laskennan aloituslämpötilalla on merkitystä, koska siitä saadaan alkutila sulfatoitumisen kinetiikan laskennalle. Alkutilassa oletetaan kaasufaasin tasapaino. Jos tämä alkutilanteen tasapaino lasketaan 1200°C lämpötilassa 900°C sijaan, oleelliset piirteet pysyvät samoina. Joitain muutoksia on, kuten esimerkiksi se, että muodostuu myös pieni määrä karbonaatteja. Mallitarkastelut herättävät vielä tulevaisuuden tarkasteluihin kysymyksen vapautumisvaiheen ja sulfatoitumisen kinetiikan kytkennästä

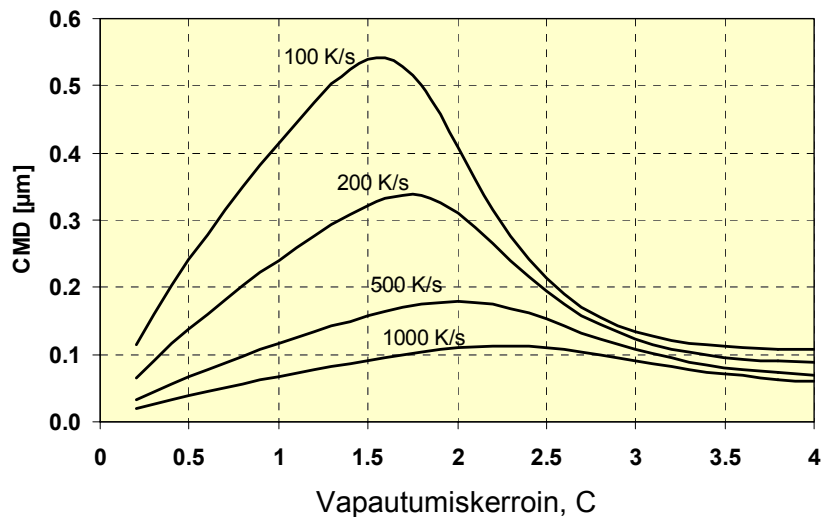


Kuva 8.3. Keskeinen osa mallia on kaasufaasin kemian ratkaisu. Kuvan mukaisesti sulfatoitumisoletuksella on merkittävä vaikutus kaasun koostumukseen palamiskaasujen jäähtyessä.



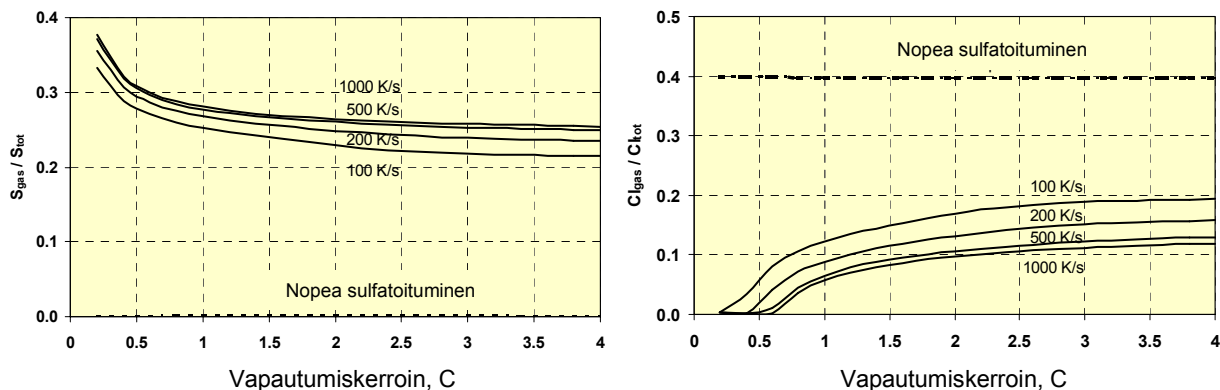
$$C \times (K \ 50 \text{ ppm}; Cl \ 15 \text{ ppm}; S \ 25 \text{ ppm})$$

Kuva 8.4. Polttoprosessissa muodostuneiden pienhiukkasten lukumääräpitoisuus, kun kaasufaasiin vapautuneiden K:n Cl:n ja S:n määrää skaalataan (kaikkia) tekijällä C. C = 1 on perustapaus.



$$C \times (K \ 50 \text{ ppm}; Cl \ 15 \text{ ppm}; S \ 25 \text{ ppm})$$

Kuva 8.5. Polttoprosessissa muodostuneiden pienhiukkasten lukumääräpitoisuuden geometrinen keskihalkaisija, kun kaasufaasiin vapautuneiden K:n Cl:n ja S:n määrä skaalataan (kaikkia) tekijällä C. C = 1 on perustapaus.



Kuva 8.6. Kaasufaasissa olevan rikin (vasemmalla) ja kloorin (oikealla) osuus kyseisen alkuaineen kokonaispäästöistä

8.1.5 Yhteenveto

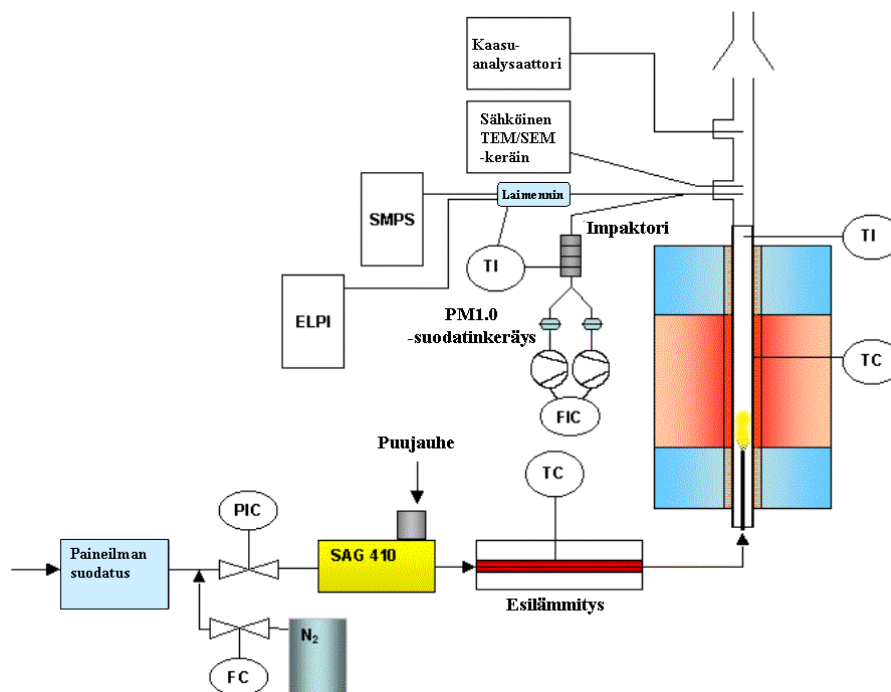
Mallitarkasteluilla päädyttiin siihen, että todennäköisin pienhiukkasten kokojakaamaa määräävä mekanismi puun pienpoltossa hyvän palamisen aikana on K_2SO_4 :n ydintyminen. Malli osoittaa, että pienhiukkasten muodostumiseen vaikuttavat moninaiset tekijät johtavat epälineaarisiin ei-suoraviivaisiin riippuvuussuhteisiin. Yleistrendinä lisääntynyt höyrystyminen kaasufaasiin tuottaa mallin mukaan korkeampia hiukkasten lukumääräpitoisuuksia. Polttotekniikan kannalta oleellisin tulos on että alkaliyhdisteiden muodostamaan hiukkasfraktioon voidaan vaikuttaa lähinnä vain vaikuttamalla vapautumiseen. Tähän voidaan puun pienpoltossa päästä pitämällä palamisen lämpötilat suhteellisen alhaisina esimerkiksi jakamalla poltto erilliseen kaasutusvaiheeseen ja sitä seuraavaan palamisvaiheeseen. Tällöin jälkimmäiseltä palamisvaiheelta vaaditaan poikkeuksellisen hyvää huolenpitoa sekoittumisesta.

8.2 VIRTAUSREAKTORIMITTAUKSET

8.2.1 Koejärjestely

Kuopion yliopiston ympäristötekniikan laboratoriossa rakennettiin virtausreaktorilaitteisto, joka mahdollistaa puun jatkuvatoimisen polton laboratoriomittakaavassa. Virtausreaktorissa puun palaminen tapahtuu dimensioiltaan yksinkertaisessa palotilassa säädeltävissä olosuhteissa, jolloin voidaan tutkia eri olosuhdeparametrien vaikutusta muodostuviin päästöihin tavanomaisia polttolaitteita helpommin. Reaktorilla tehdyillä kokeilla pyrittiin arvioimaan eri hiukkaspäästöön vaikuttavien tekijöiden merkitystä sekä tuottamaan kokeellista tietoa hankkeessa kehitettävän palamisaerosolimallin testaamista varten.

Virtausreaktorikokeissa syötettiin jauhemaista puuta ilmavirran mukana pystysuuntaiseen läpivirtausreaktoriin. Reaktoriputken päähän asetettiin näytteenottoyhteet, joiden avulla näyte voitiin kerätä virtauksen kulkusuuntaan nähden samasta kohdasta useammalle eri mittalaitteelle. Mittausjärjestelyssä oli mahdollisuus reaktoriin menevän kaasun ja polttoaineen lämmittämiseen ja palamisilman happipitoisuuden säätöön. Polttoaineen syöttö tapahtui jauhegeneraattorilla (SAG 410, Topas), jossa polttoainejauhe siirretään ejektorin avulla ohi virtaavaan ilmaan. Reaktoriputkena käytettiin sekä kvartsi- että Al_2O_3 -putkia, joiden pituus oli 80 cm. Reaktoriputken lämpötilaa pidettiin 900–1200 °C:ssa. Polttokokeissa käytettiin polttoaineena kuivattua ja seulottua ($< 63 \mu\text{m}$) puujauhetta, josta noin 80 % on koivua ja 20 % kuusta ja jonka tuhkapitoisuus on noin 0,5 % kuivamassasta. Polttoaine syötettiin reaktoriputken kuumaan osaan ohuen teräksisen syöttöputken kautta, minkä tarkoituksena oli estää polttoaineen tarttumisen putken pintaan. Kuvassa 8.7 esitetään kaaviokuva virtausreaktorista sekä siinä käytetyistä mittausjärjestelyistä.



Kuva 8.7. Virtausreaktori ja esimerkki siinä käytetyistä mittausjärjestelyistä.

8.2.2 Mittaukset

Reaktorikokeissa määritettiin pienhiukkasten massa- ja lukumääräpitoisuus, kokojakauma sekä kemiallinen koostumus. Kokeissa muutettavia olosuhdeparametreja olivat:

- reaktorin lämpötila
- virtausnopeus
- polttoaineen syöttömäärä
- palamisilman happipitoisuus

Lisäksi kokeissa käytettiin kahta eri reaktoriputkea ja eri polttoainejakeita. Kokeet koostuivat erikseen tehtävistä hiukkaskokojakaumamittauksista, suodatinnäytteiden keräyksistä sekä elektronimikroskooppinäytteiden keräyksistä.

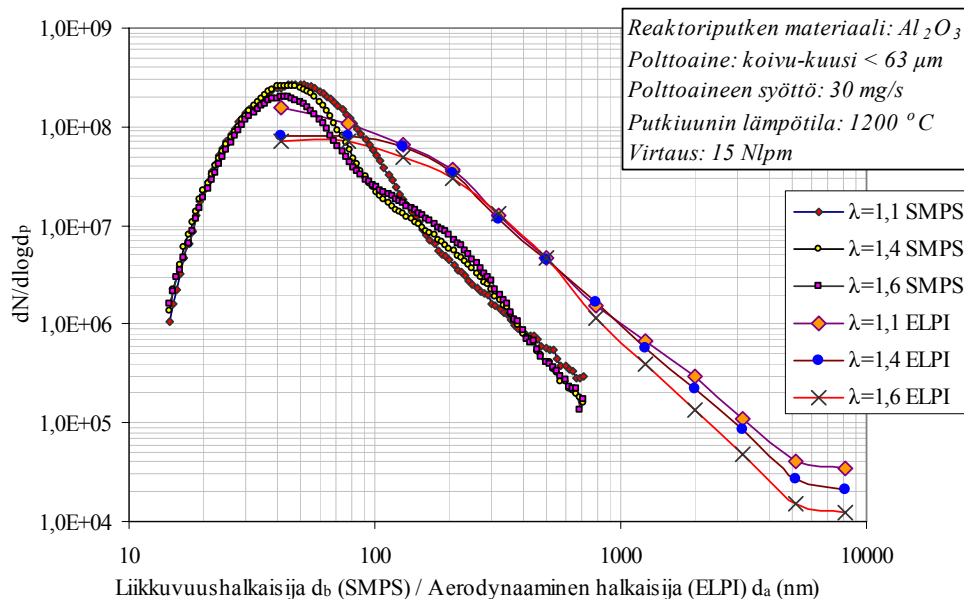
8.2.2.1 Hiukkaskokojakauma- ja lukumäärämittaukset

Hiukkaskokojakaumamittauksissa selvitettiin reaktorin lämpötilan, virtauksen, polttoainemäärän, puujauheen koon ja ilmakertoimen vaikutusta hiukkasten lukumäärään ja kokojakaumaan. Ensimmäisissä mittauksissa reaktoriputkena oli keraaminen alumiinioksidiputki. Siitä havaittiin kuitenkin irtoavan pienhiukkasia, minkä vuoksi myöhemmin otettiin käyttöön kvartsilasista valmistettu putki.

Hiukkaslukumääräpitoisuuksia mitattiin samanaikaisesti sähköisellä alipaineimpaktorilla (Electrical Low Pressure Impactor, ELPI, 30 lpm) ja skannaavalla liikkuvuusokoluokittelijalla (Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS). Näyte analysoitiin laimennettiin ejektorilaimentimella (Dekati DI-1000), jolla laimennuskaasun ja raa'an savukaasun sekoitussuhteeksi saatiin noin 9:1. Laimennuskaasuna käytettiin laboratorion paineverkosta saatavaa ilmaa, joka suodatettiin ja kuivattiin paineasemassa (TSI, Air Supply System Model 3074), sekä lämmitettiin paineilmalämmittimessä noin 85 °C:een. Näytekaasu saapui laimentimeen noin 150 °C:n lämpöisenä.

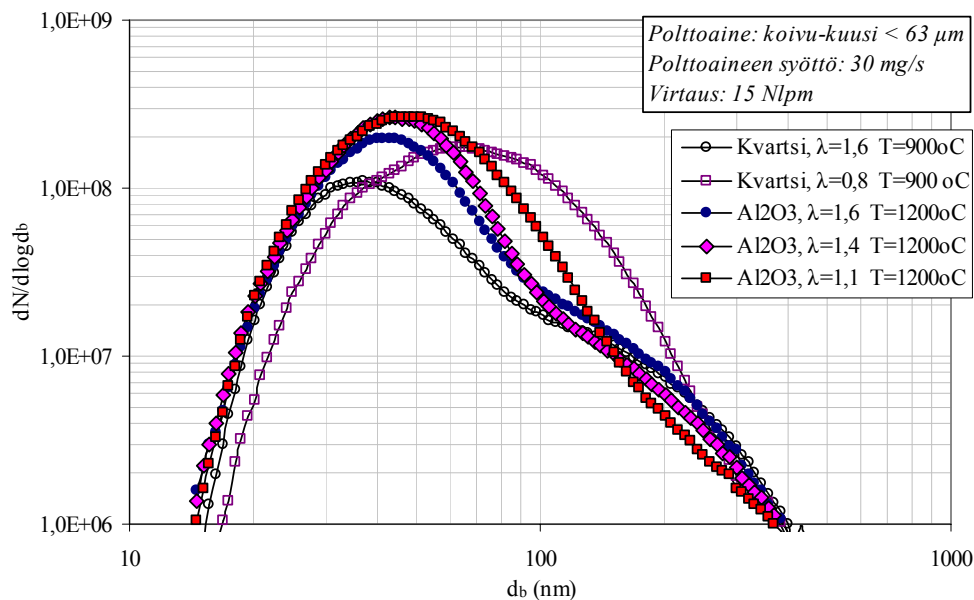
SMPS koostui sähköisestä hiukkaskokoluokittelijasta (TSI, DMA 3071) ja kondensaatiohiukkaslasurista (TSI, CPC 3025). SMPS:llä mitattiin hiukkaslukumääräpitoisuudet 109 eri kokoluokassa kokoalueella 14–723 nm sähköisenä liikkuvuushalkaisijana ilmoitettuna. ELPI:llä mitattiin hiukkasten lukumäärä 12 eri hiukkaskokokokanavan suhteen kokoalueella 0,03–10 µm aerodynaamisena halkaisijana ilmoitettuna. Impaktiotasot päällystettiin alumiinifoliolla ja rasvattiin Apiezon-tyhjiörasvan ja toluenin seoksella.

Kuvassa 8.8 esitetään molemmilla em. mittalaitteilla saadut hiukkaskokojakaumat eri palamisen ilmakertoimilla. Vakiona pidetyt palamiseen vaikuttavat tekijät on esitetty kuvien yhteydessä. Esitetyt SMPS:n tulokset ovat kolmen–neljän jakauman keskiarvoja. ELPI:n jakaumat ovat keskiarvoja 5 sekunnin välein päivittyneistä mittaustuloksista.



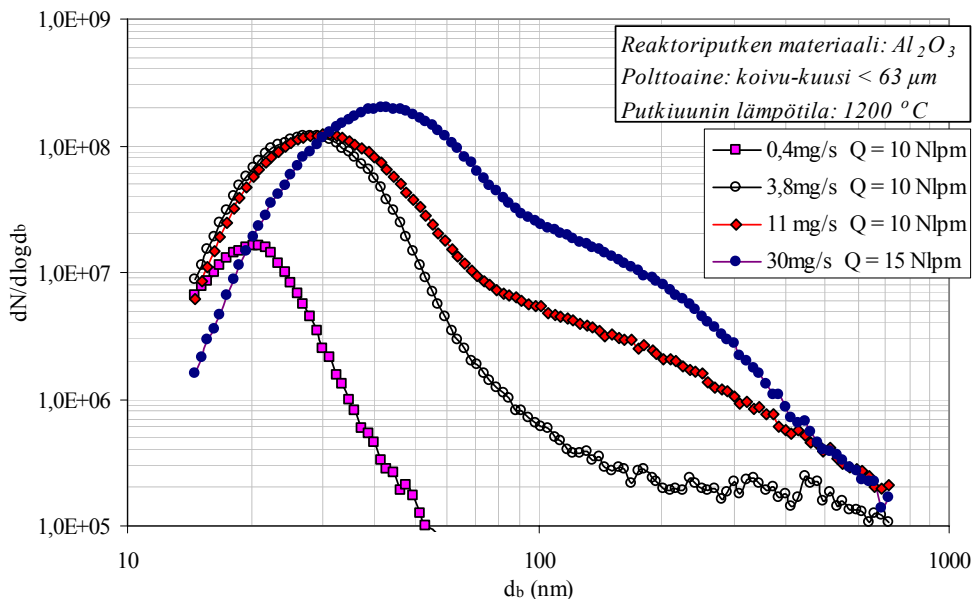
Kuva 8.8. Savukaasun hiukkaskokojakauma virtausreaktorissa eri ilmakertoimilla.

Kuvaan 8.9 on liitetty SMPS:llä mitatut hiukkaskokojakaumat kahdella eri reaktoriputkella; kvartsi-putkella ja keraamisella putkella tehdyistä polttokokeista. Kvartsi-putken lämpötilä nostettiin 900 °C:een ja keraamisen (Al_2O_3) putken lämpötilä noin 1200 °C:een.

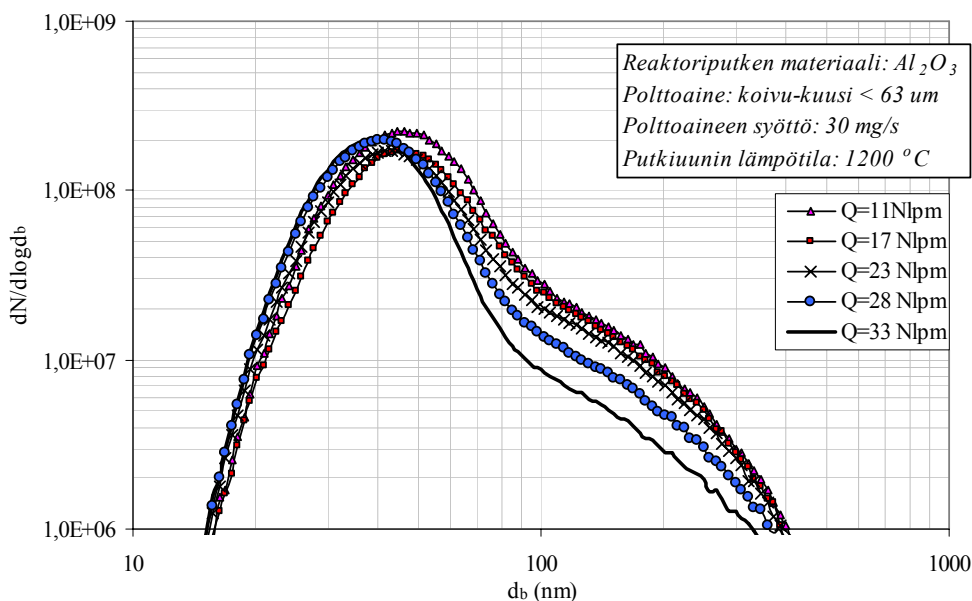


Kuva 8.9. SMPS:llä mitatut hiukkaskokojakaumat eri polttoparametreilla käytettäessä kahta eri reaktoriputkea. T on putkiuunin tavoitelämpötilä.

Kuvassa 8.10 esitetään hiukkaskokojakaumat eri polttoaineensyöttövirroilla ja kuvassa 8.11 eri tilavuusvirtauksilla. Kaikissa tapauksissa polttoilmana käytettiin puhdasta paineilmaa ($c_{O_2} = 21 \%$), joten palamisen ilmakerroin vaihtelee ilman ja polttoaineen sekoitussuhteen mukaisesti jätteenkin jokaisessa tapauksessa selkeästi yli-ilmaiseksi ($\lambda \geq 1,6$).



Kuva 8.10. Savukaasun hiukkaskokojakauma eri polttoaineensyöttövirroilla. Suurimmalla polttoainesyötöllä myös tilavuusvirtaus (Q) on suurempi.



Kuva 8.11. Tilavuusvirtauksen (Q) vaikutus hiukkaskokojakaumaan.

8.2.2.2 Hiukkasmassapitoisuuden ja hiukkasmassan koostumuksen määrittäminen

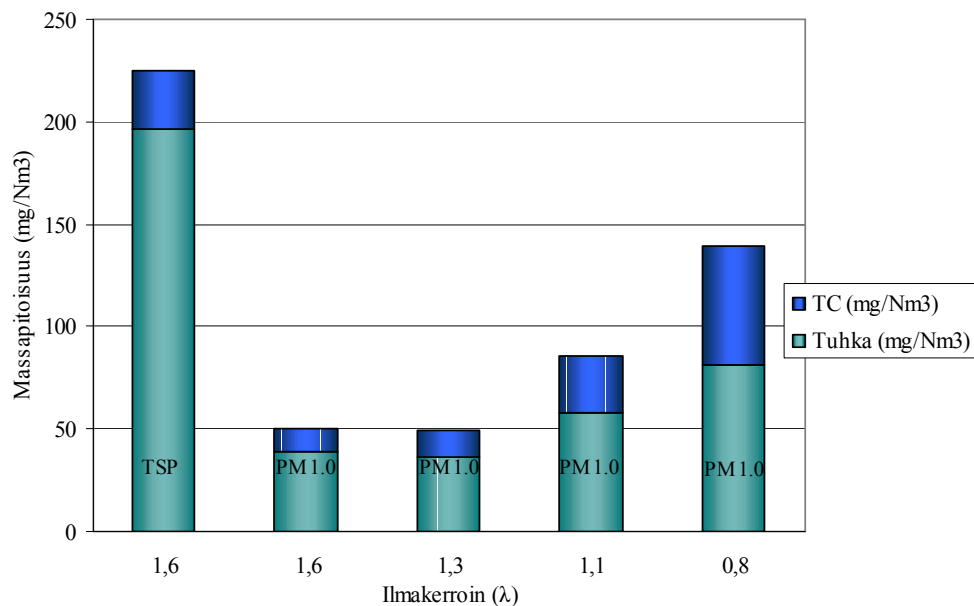
Hiukkasmassanäytteet kerättiin suodattimille Gelman-suodatinpesiä käyttäen suoraan savukaasusta sekä kaskadi-impaktorin (Dekati, PM 10, 20 lpm) jälkeen, jossa hiukkasjakaumaa leikkaavina impektioasteina olivat $d_a > 10 \mu\text{m}$ ja $d_a > 1,0 \mu\text{m}$ -tasot. Tällöin saatiin määritettyä savukaasun kokonaishiukkasmassa (TSP) sekä pienhiukkasmassa (PM1.0). PM1.0-suodatinnäytteitä kerättiin rinnakkaisina teflon- ja kvartsikuitusuodattimille. Suodatinnäytteitä kerättiin neljällä eri palamisen

ilmakertoimella, joista jokaista kohden otettiin kaksi näytettä. Jokaista ilmakerrointa kohden otettiin näyte kvartsisuodattimille kokonaistuhkanmäärittystä varten ja epäorgaanisen ja orgaanisen hiilen suhteen määrittystä varten sekä kaksi näytettä Teflon suodattimille tarkkaa gravimetristä määrittystä varten. Kerätessä suodatinnäytteitä oli virtausreaktoriin asennettuna kvartsinen reaktoriputki.

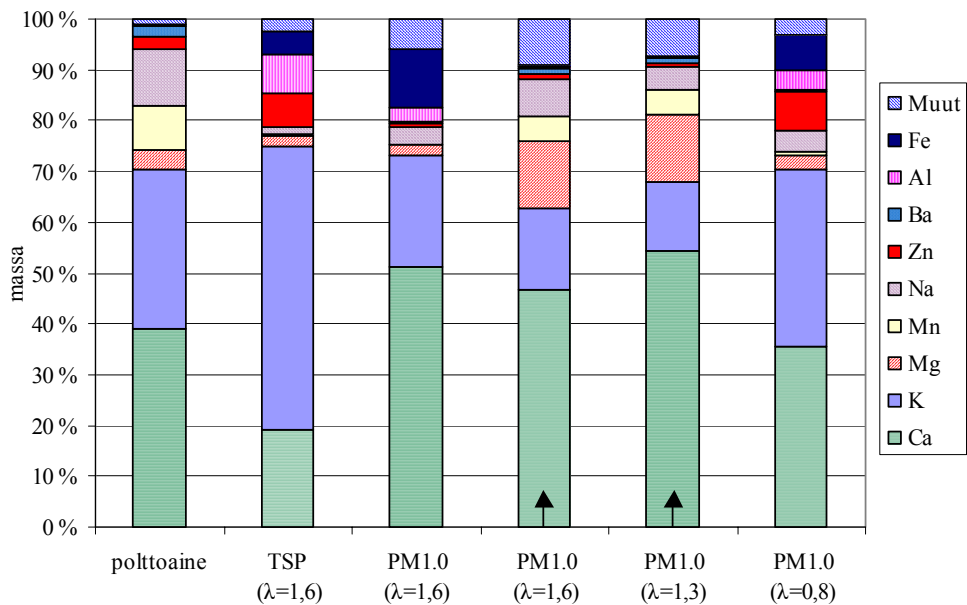
Kvartsisuodattimille kerätyn hiukkasmassan tuhkapitoisuus määritettiin kuumentamalla suodatinta laboratoriuunissa olevassa upokkaassa, jolloin orgaaninen ja alkuainehiili saatiin kaasuuntumaan suodattimesta pois. Uunin lämpötila nostettiin ensin noin tunnin aikana 550 °C:een, jonka jälkeen suodattimen annettiin olla em. lämpötilassa vielä yhden tunnin ajan. Kuumennuksen jälkeen suodatimet vakioitiin ja punnittiin. Kvartsisuodattimista tehdyt orgaanisen- ja epäorgaanisen hiilen analyysit suoritettiin Pienhiukkas- ja aerosolitekniikan laboratoriossa sijaitsevalla termisoptisella hiilianalysaattorilla.

Teflonsuodatinnäytteistä analysoitiin hiukkasmassan koostumusta ICP-MS -menetelmällä (induktiivisesti kytketty plasma -massaspektrometri), sekä ionikromatografilla (IC). ICP-MS menetelmällä saadaan selville hiukkasmassan alkuainekoostumus yleisimpien kationien osalta ja ionikromatografilla tavallisimpien anionien pitoisuudet. Analyysit teetettiin tilauspalveluna Geologisessa tutkimuskeskuksessa (GTK) Espoossa.

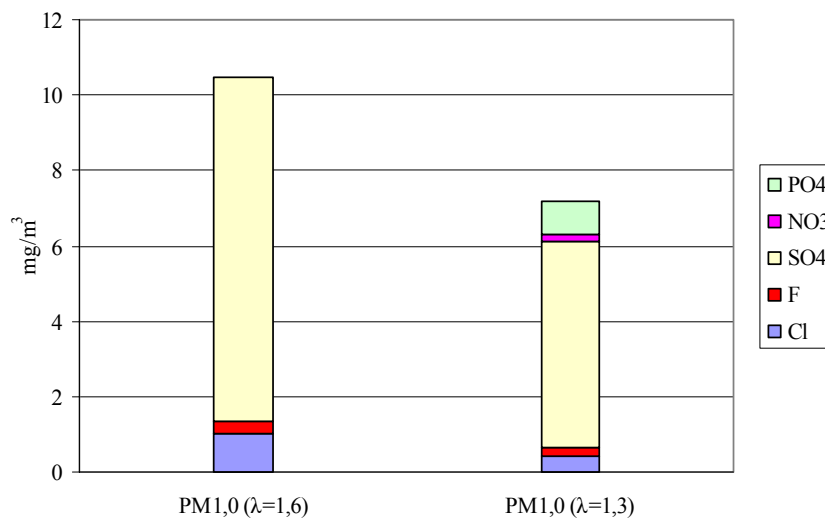
Kuvassa 8.12 esitetään PM1.0 ja TSP -näytteiden massapitoisuudet jaoteltuina tuhka- ja palaviiksi yhdisteiksi (TC) ja kuvassa 8.13 tuhkan kationien pitoisuudet suodatinnäytteissä sekä käytetyssä polttoaineessa. Koska alkuaineiden kokonaissaanto vaihteli huomattavasti eri suodatinnäytteiden välillä, on tulokset esitetty osuuksina kokonaissaannosta. Kuvassa 8.14 esitetään suodatinnäytteistä määritetyt anionien pitoisuudet savukaasussa. Termisoptisten hiilen määrittysten perusteella on kuvassa 8.15 esitetty PM1.0-hiukkasmassan koostumus jaoteltuna tuhkaan, epäorgaaniseen hiileen ja orgaaniseen hiileen. Epäorgaaniseen hiileen ei lueta tässä mineraalisessa muodossa olevaa hiiltä, kuten karbonaattia (CO_3^-), vaan sen oletetaan jäävän tuhkafraktioon.



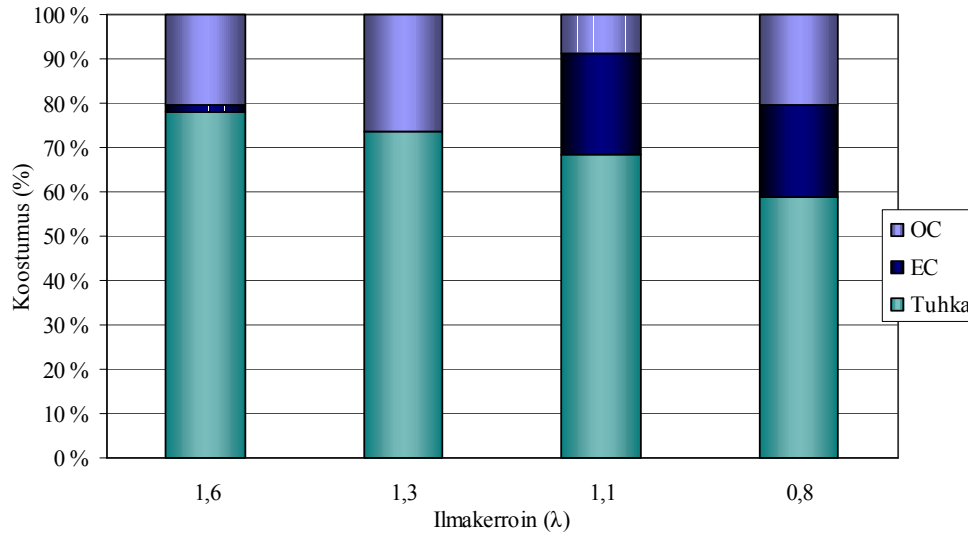
Kuva 8.12. Kvartsisuodatinnäytteiden perusteella määritetyt hiukkasmassapitoisuudet jaoteltuna tuhkaan ja palaviin yhdisteisiin (TC) eri ilmakertoimilla. Ensimmäisenä vasemmalla esitetty tulos on kokonaishiukkasmassakeräyksistä (TSP), kun taas muissa näytteissä halkaisijaltaan yli 1 μm hiukkaset on rajattu pois.



Kuva 8.13. Kationien osuudet kokonaissaannosta polttoaineena käytetylle puupölylle sekä savukaasusta kerätyille suodatinnäytteille. Määrittäminen tapahtui ICP-MS -menetelmällä.



Kuva 8.14. Ionikromatografilla määritetyt anionien pitoisuudet pienhiukkasmassassa.

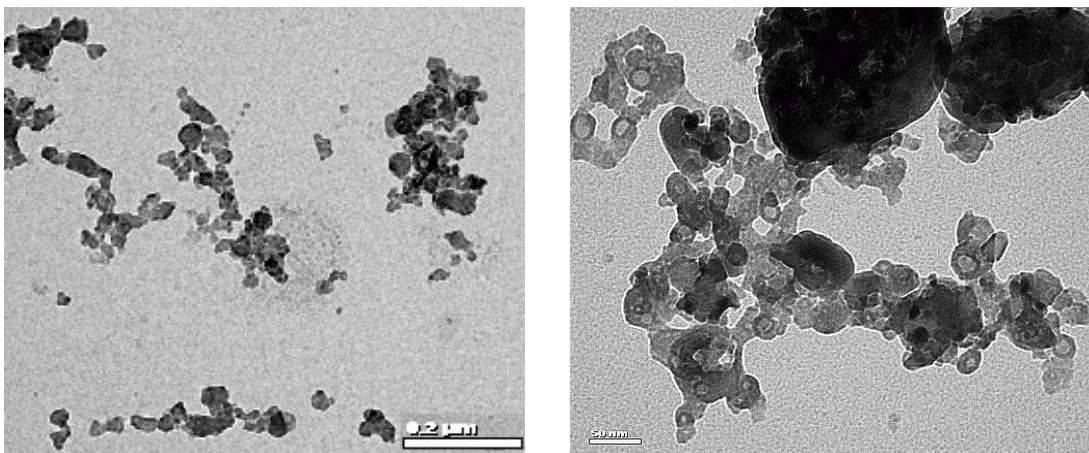


Kuva 8.15. PM1.0-hiukkasmassan suhteellinen koostumus eri palamisen ilmakertoimilla.

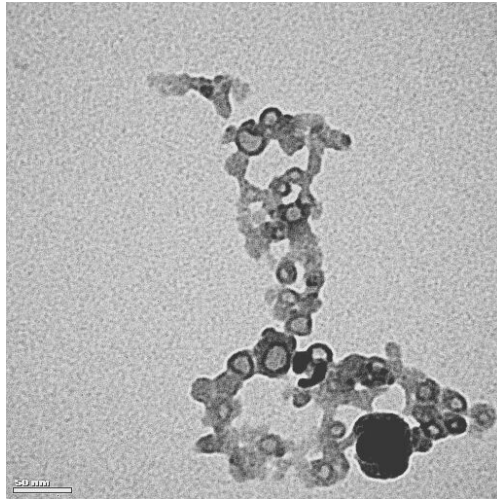
8.2.2.3 Elektronimikroskooppianalyysit

Hiukkasten koon, muodon ja rakenteen tutkimiseksi kerättiin näytteitä sekä pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM, XL30 ESEM TMP) että läpäisyelektronimikroskoopilla (TEM, JEM-1200EX) tehtäviä tarkasteluja varten kappaleessa 6.3 kuvatulla tavalla.

Kuvissa 8.16 – 8.17 nähdään virtausreaktorin savukaasunäytteistä TEM:lla havaittuja agglomeraatishiukkasia. Näytteitä kerätessä putkiuunin lämpötila oli 1000 °C, tilavuusvirtaus reaktorin läpi noin 15 Nlpm, polttoaineensyöttö noin 30 mg/s ja käytössä oli kvartsinen reaktoriputki. Pienimmät havaitut primäärihiukkaset olivat halkaisijaltaan noin 5 nm suurimpien ollessa noin kertaluokkaa kookkaampia. Agglomeraattien ympärille hiilivedyistä muodostuva vaippakerros ei yleensä ole elektronimikroskoopilla nähtävissä, mikä johtuu elektronimikroskoopissa käytettävästä voimakkaasta alipaineesta, jolloin pääosa puolihaihtuvista yhdisteistä haihtuu pois.

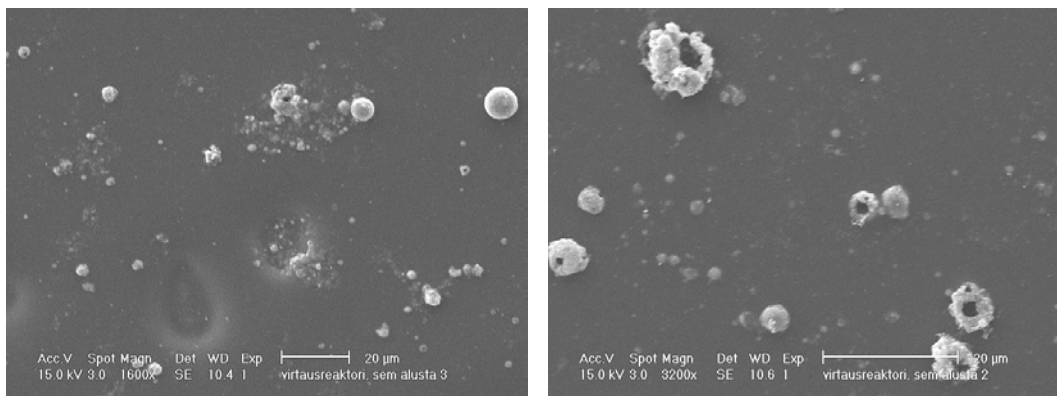


Kuva 8.16. TEM-kuva virtausreaktorilla tuotetuista agglomeraateista.

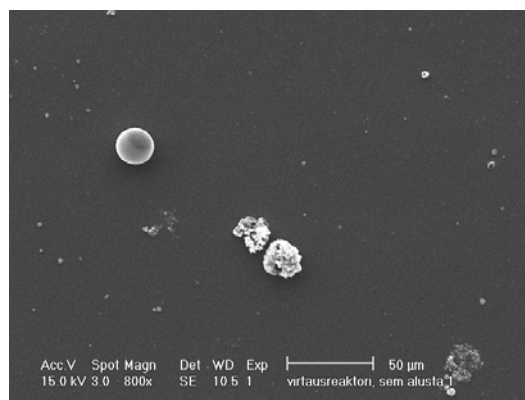


Kuva 8.17. TEM-kuva virtausreaktorilla tuotetusta agglomeraatista.

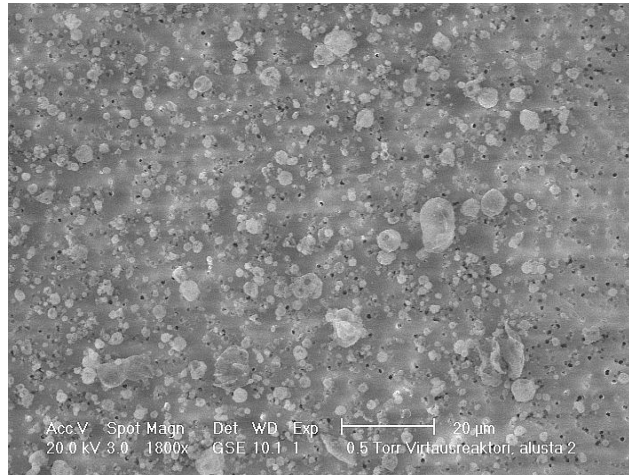
Kuvissa 8.18 – 8.20 esitetään pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvia virtausreaktorin savukaasunäytteestä havaituista suurikokoisista hiukkasista. Analyysit energiadisersiivisellä röntgenspektrometrillä (EDS) osoittivat suurikokoisten hiukkasten olevan pääosin tuhkaa ja koostuvan Ca-, Mg-, Na-, Si- ja K- oksideista ja fosfaateista.



Kuva 8.18. Sähköisellä menetelmällä hiiliteippialustalle kerätty hiukkasnäyte.



Kuva 8.19. Sähköisellä menetelmällä hiiliteippialustalle kerätty hiukkasnäyte.



Kuva 8.20. Nuclepore-suodattimelle kerätty hiukkasnäyte. Nuclepore-suodattimen reiät voidaan havaita kuvassa suodatinmateriaalin pinnassa näkyvinä mustina pisteinä.

8.2.2.4 Yhteenveto tuloksista

Merkittävimmät erot palamisen päästöihin saatiin syntymään ilmakertoimen muutoksilla. Ilmakertoimilla 1,6 ja 1,3 30 mg/s polttoaineensyöttö reaktoriin tuotti stabiilin keltaisen liekin, ja palamattomien yhdisteiden sekä häkäkaasun pitoisuudet olivat vähäiset (CO-pitoisuus välillä 100–1000 ppm). Ilmakertoimella 1,1 liekki oli epätasaisempi ja savukaasut sisälsivät enemmän palamattomia yhdisteitä. Ilmakertoimella 0,8 palaminen oli kytimestä, jolloin näkyvää liekkiä ei ollut havaittavissa ja savukaasut sisälsivät runsaasti palamattomia yhdisteitä (häkäpitoisuus ylitti 10 000 ppm määrittämissä rajat). Taulukkoon 8.1 on koottu suodatinnäytteiden ja hiukkaslukumäärämittausten keskeisimmät tulokset virtausreaktorilla tehdyistä polttokokeista. Taulukosta nähdään, että ilmakertoimen alentaminen kasvatti hiukkaskokoa sekä kokonaislukumääräpitoisuutta ja lisäsi hiilen osuutta pienhiukkasfraktiossa. Taulukossa 8.2 esitetään pienhiukkasmassan ja kokonaismassan ominaispäästöt virtausreaktoriin sisään syötettyä polttoainemäärää kohti.

Taulukko 8.1. Hiukkaskokojakaumat ja PM_{1.0}-hiukkasfraktioiden pitoisuudet eri polttoparametreilla. λ on ilmakerroin, T putkiuunin lämpötila, d_g kokojakauman geometrinen keskihalkaisija, GSD kokojakauman geometrinen standardipoikkeama, N hiukkasten lukumääräpitoisuus, EC epäorgaaninen hiili ja OC orgaaninen hiili. Polttoaineensyöttö oli noin 30 mg/s ja tilavuusvirtaus reaktorin läpi noin 15 Nlpm.

λ (-)	T (°C)	Reaktoriputki	SMPS 14–723 nm			PM _{1.0} -hiukkasmassa		
			d_g (nm)	GSD (-)	N (1/cm ³)	Tuhka (mg/Nm ³)	EC (mg/Nm ³)	OC (mg/Nm ³)
1,6	900	Kvartsi	46	1,74	4,9E+07	38,9	0,706	10,2
1,6	1200	Al ₂ O ₃	47	1,61	7,9E+07			
1,3	900	Kvartsi				36,1	0,065	12,9
1,4	1200	Al ₂ O ₃	46	1,53	1,0E+08			
1,1	900	Kvartsi				58,3	19,5	7,41
1,1	1200	Al ₂ O ₃	50	1,54	1,2E+08			
0,7-0,8	900	Kvartsi	66	1,63	9,4E+07	81,7	28,8	28,7

Taulukko 2. Virtausreaktorin hiukkaspäästöt sisään syötettyä polttoainemäärää kohti. TC on palavat hiiliyhdisteet.

Näyte	λ (-)	Kokonaismassa (g/kg)	Tuhka (g/kg)	TC (g/kg)	EC (g/kg)	OC (g/kg)
TSP	1,6	1,87	1,64	0,24		
PM1.0	1,6	0,41	0,32	0,091	0,0059	0,085
PM1.0	1,3	0,41	0,30	0,11	0,00054	0,11
PM1.0	1,1	0,71	0,49	0,22	0,16	0,06
PM1.0	0,8	1,16	0,68	0,48	0,24	0,24

8.2.3 Tulosten tarkastelu

Suhteellisen korkeilla ilmakertoimilla (1,3–1,6) palaminen virtausreaktorissa on varsin puhdasta, jolloin savukaasuissa esiintyvä hiukkasmateriaali koostuu pääosin tuhkasta. Alemmissa ilmakertoimissa (0,8–1,1) palaminen on epätäydellisempää, savukaasut sisältävät runsaasti hiilivetyjä ja noen muodostus lisääntyy. Pienennettäessä ilmakerrointa virtausreaktorissa arvosta 1,3 arvoon 0,8 kasvoi savukaasun PM1.0-pitoisuus noin 180 %. Koska suodatinnäytteet kerättiin laimentamattomina, korostuu palamattomien yhdisteiden osuudessa orgaaninen hiili (OC), sillä osa kaasumaisista hiilivedyistä tiivistyy hiukkasten pinnalle näytteen jäähtyessä näytteenottolinjassa. Hiilivetyjen määrä savukaasussa on erityisen suuri ali-ilmaisessa poltossa ($\lambda = 0,8$), jossa reaktoriin ei syttynyt liekkiä lainkaan. Ilmakertoimen ollessa 1,1 liekki oli hetkellisesti sammuva, mikä on ilmeisesti johtanut voimakkaaseen noen tuottoon. Tämä on havaittavissa pienhiukkasmassan korkeana epäorgaanisen hiilen (EC) pitoisuutena.

Suodatinnäytteistä tehtyjen alkuaineanalyysien perusteella sekä kokonaishiukkasmassan että pienhiukkasmassan tuhka koostui pääosin kalsium- ja kaliumyhdisteistä. Lisäksi tuhka sisälsi muita alkali- ja maa-alkalimetalleja kuten natriumia ja magnesiumia sekä keveitä metalleja, kuten rautaa, sinkkiä, alumiinia ja mangaania. Pienhiukkasmassan anioneista huomattava osa oli sulfaattia. Lisäksi hiukkasmassasta löytyi klooria, fosfaattia, fluoria ja nitraattia.

Kun polttoaineen syöttö oli noin 30 mg/s ja tilavuusvirtaus noin 15 Nlpm, ilmakertoimen alentaminen kasvatti sekä hiukkaskokojakauman keskihalkaisijaa että kokonaislukumääräpitoisuutta. Hiukkaskokojakaumaan ja hiukkaskoon kasvu on voinut aiheutua sekä lisääntyneestä epäorgaanisten aineiden höyrystymisestä että epätäydellisemmän palamisen johdosta lisääntyneestä noen ja hiilivetyjen muodostumisesta.

Käytettäessä korkeampaa lämpötilaa ($T = 1200$ °C) ja keraamista reaktoriputkea ilmakertoimella 1,6 oli hiukkasten kokonaislukumääräpitoisuus noin 60 % suurempi kuin vastaavassa tilanteessa käytettäessä kvartsista reaktoriputkea 900 °C:n lämpötilassa. Ero on saattanut johtua sekä lisääntyneestä tuhkan höyrystymisestä ja lämpötilan vaikutuksesta hiukkasten muuntumiseen että keraamisen putken pinnasta irtoavista alumiinihiukkasista.

Polttoaineen syöttömäärää lisättäessä hiukkasten kokonaislukumäärä odotetusti kasvoi. Hiukkaspitoisuus ei kuitenkaan kasvanut lineaarisesti polttoaineen syöttöä lisättäessä. Kun tietty lukumääräpitoisuustaso on saavutettu, polttoaineen syötön lisääminen kasvattaa lähinnä vain hiukkaskokoa, mikä voi johtua hiukkasten koaguloitumisesta ja agglomeroitumisesta. Reaktorin tilavuusvirtauksen muutoksilla ei havaittu olevan suurta vaikutusta hiukkaskokojakaumaan.

9 TUTKIMUSTULOSTEN ARVIOINTI JA YHTEENVETO

Taisto Raunemaa

Kuopion yliopisto, Pienhiukkas- ja aerosolitekniiikan laboratorio, PL 1627, 70211 Kuopio

Suomessa on puun pienpolttolaitteita noin 3,7 miljoonaa kappaletta. Huomattava osa näistä on omakotitaloissa ja loma-asunnoissa. (Rakennustutkimus, 2001). Arvioidusta polttopuun käyttömäärästä, 6,1 milj.m³ vuodessa, yli puolet poltetaan omakotitalojen laitteissa, mutta on yli puolelle taloista ainoastaan tärkeä lisälämmönlähde. Puun energiakäyttö on maataloilla edelleen merkittävä päälämmönlähde, mutta polttopuun kokonaiskäyttömäärä on vähenevässä maatalojen lukumäärän pienentyessä. Sen sijaan pientaloissa pienpuun käyttö lisälämmönlähteenä on kasvamassa uusien tulisijojen merkittävästi lisääntyessä. Myös Suomelle perinteinen mökkisauna ylläpitää pilkkeiden ja sekapuun käyttöä loma-asunnoissa. Keskitehoiset ja puuta polttavat suurkatilat ovat luontevia teollisuuden ja pientaajamien lämmöntuotantoon. Perinteisen pilkkeen ja hakkeen lisäksi useissa polttimissa voidaan yhä enenevässä määrin käyttää myös pellettipolttoainetta, jolle sekä varastointi, jakelu että polttoaineen syöttö palotilaan on helpommin ja taloudellisemmin järjestettävissä. Polttolaitteiden kehittäminen pellettikäyttöisiksi avaa ainakin periaatteessa väylän laiteviennille varsinkin Itä-Eurooppaan, missä käyttövaatimukset ja kilpailu eivät vielä ole niin tiukkoja kuin Keski-Euroopassa.

Puun pienpoltto tuottaa merkittävästi sekä häkää, hiilivetyjä että pienhiukkasia, joiden määrät riippuvat polttoaineesta, palamisen täydellisyydestä ja savukaasujen jälkikäsittelystä. Erot polttoaineen ominaisuuksissa aiheuttavat eroja päästöihin lämmönsiirron ja aineensiirron erojen takia. Selvimmin tämä ilmenee pilkkeiden ja hakkeen palamisessa verrattuna pelletteihin pienemmän kappalekoon merkitessä nopeampaa ja yhtäaikaista palamista ja pienempiä ominaispäästöjä. Panossyöttöisillä tulisijoilla ja yläpalokattiloilla palamisen eri vaiheet ovat päällekkäisiä, jolloin palamisen kontrollointi on hankalaa. Myös polttotapa aiheuttaa eroja palamisilman saantiin ja sekoittumiseen sekä palamisen täydellisyyteen. Palamisilma ja palamiskaasut joutuvat kulkeutumaan useissa laitteissa osittain palaneen polttoaineen ja tuhkan läpi, mistä aiheutuu kohonneita häkä- ja hiukkaspäästöjä. Kun korkean lämpötilan savukaasut poistuvat suoraan savukanavaan kuten kiukaissa tai lämpöä varaavien pintojen ohi samalla jäähtyen kuten tulisijoissa, ero kuljetuksen nopeudessa vaikuttaa palamisen täydellisyyteen ja näkyy suurempina hiilivety- ja hiukkaspäästöinä. Savukaasulämpötilan savukanavassa voidaan arvioida indikoivan siten myös hiukkaspäästöpotentiaalia.

Hiukkaspäästörajoja pienpolttolaitteille on useassa Euroopan maassa, näistä Itävallan raja on tiukin, 60 mg/MJ. Tulisijoille päästörajoja ei ole ollut tähän asti ja pienhiukkasilta rajoituksia ei ole minkäänlaisille polttolaitteille. Raportoituja laitepäästöjä vertailtaessa on pidettävä mielessä, että kattilatyyppit eri maissa poikkeavat toisistaan. Näin mm. suomalaisia varaavia tulisijoja ei suoraan voi verrata ulkomaisiin suoravetoisiin kamiinoin. Ulkomaiset kattilat taas ovat usein täydellisemmin varustetut sekä palamisen säätöjen että savukaasujen hallinnan suhteen kuin kotimaiset.

Puun poltto tuottaa sekä toksisia kaasupäästöjä että pienhiukkasia, jotka vaikuttavat terveyteen suoraan hengityksen kautta ja välillisesti verenkierron ja aineenvaihdunnan kautta. Tiedon puuttuessa näiden päästöjen rajoitustoimille ei ole kuitenkaan ollut tähän asti riittäviä perusteita. Käsillä olevassa yhteishankkeessa PIPO on tutkittu nimenomaan näitä puun pienpolton päästöjen ominaisuuksia Tekesin rahoittamassa tutkimuksessa vuosina 2002 - 2005. Tutkimus on tehty Kuopion yliopistossa sekä VTT:n ja Työtehoseuran laboratorioissa. Tutkimukseen on osallistunut yhdeksän tulisija- ja kattilavalmistajaa Suomesta. Selvitys kattaa käytössä olevan puun pienpolton laitekannan Suomessa ja pyrkii antamaan riittävää perustietoa myös alan tekniselle kehitystyölle.

- selvittää pienhiukkasten, häkäkaasun ja hiilivetyjen päästöt tavallisille tulisija- ja kattilatyypeille
- ymmärtää polton hiukkasmuodostuksen perusteet ja kehittää laskentamalleja kokeellisen työn tueksi
- selvittää ja ohjeistaa oikea näytteenottotapa ja standardimenetelmä päästömäärityksiin.

Hiukkasnäytteenoton ohjeistamista ja mittausstandardin perusteita varten hankkeessa on yksityiskohdaisesti tutkittu miten savukaasun laimentaminen vaikuttaa tulokseen. Myös keskeisiä mittalaitteita ja niiden käytettävyyttä on ollut pakko selvittää tavanomaista perusteellisemmin. Tutkimuksen mallinuosio laboratoriomittakaavan kokeineen edustaa jo nyt uutta lähestymistapaa suomalaisessa puun polton tutkimuksessa: huippu- ja keskiarvojen laskentatietämys ja korkeatasoinen aerosoliteknikka on yhdistetty kehittämään uutta poltinteknologiaa.

Mitattavina olleista puun polttolaitteista - kiukaat, takat, uunit ja takkasydämet, pellettitakka, pelletti- ja stokeripolttimet sekä kiinteistö- ja aluekokoluokan kattilat- esitetään tässä raportissa ensimmäiset luotettavat tulokset. Perusteellisia määrittämiä eri laitteilla on tehty toista sataa käyttäen polttoaineena koivupilkettä, haketta ja puupellettejä. Tutkitut laitteet on jaoteltavissa panospolttosiin ja jatkuvakäyttöisiin laitteisiin ja tulosten käsittely vastaa paljolti tätä jaottelua. Vertailuna puun pienpoltoille on tutkittu samoilla tekniikoilla myös pienöljykattilan päästöt.

Panospolttolaitteissa poltettiin perättäisiä 3-5 kg pesällisiä erilaisin panostustavoin. Kokonaispuumäärä kiukailla ja tulisijoilla oli 8-12 kg. Liian tiiviin panoksen todettiin merkitsevän hidasta polttoa ja kohonneita päästöarvoja, joten laitteiden sopivalla palotilan rakenteella ja hyvällä käyttöohjeistuksella voidaan pienentää päästöjä. Kylmällä tulipesällä aloitetun polton alkupanoksen päästö poikkesi säännöllisesti seuraavista ja sen päästöjen vaihtelu oli suurinta. Ykköspanoksen polton onnistuminen vaikutti merkittävästi kaikkiin ominaispäästöihin, joten myös oikea sytytystapa vaikuttaa tulokseen.

Polton alussa lämpötilan on nouseva 100 - 200 asteeseen, jotta puu kuivuu ja höyrystyminen käynnistyy. Lämpötila on siten pyrittävä nostamaan mahdollisimman nopeasti ja mieluummin panoksen päällä. Noin 200 - 300 asteessa puun hemiselluloosa hiiltuu tuottaen hetkellisesti runsaasti häkää sekä hiiltä ja tervahiukkasia. Lämpötilassa 300 - 450 astetta pyrolyysi ja puun ligniinin hajoaminen tuottaa kondensoituvia yhdisteitä kuten metoksisifenoleita ja hiukkashiiltä. Hiilloksessa liekitön hehku tuottaa panoksen lopussa uudelleen runsaasti häkää ja erittäin pieniä hiukkasia. Panospoltoissa myös hiilivetyypäästöt ovat korkeimmillaan panoksen syttyessä. Syynä panospolton päästöjen suureen vaihteluun on polton eri vaiheiden tapahtuminen yhtäaikaisesti palotilan eri osissa. Päästöt vähenevät, mikäli palotilaan voidaan syöttää happea kaikilta suunnilta. Orgaanisten yhdisteiden ja hiukkaslukumäärän ominaispäästöt vaihtelivat eniten kun verrattiin eri teholuokkien polttolaitteiden keskimääräisiä arvoja. Orgaanisille yhdisteille suurimman ja pienimmän päästön suhde oli noin 1200 ja hiukkaslukumäärälle 600. (Kuva 9.1).

Panospolton keskimääräinen hiukkaskoko 120 nm poikkesi vain vähän jatkuvakäyttöisillä laitteilla mitatusta keskikoosta 100 nm. Mitatut panospoltoisten laitteiden hyötysuhteet olivat välillä 63 - 77 %.

Jatkuvakäyttöisten pienlaitteiden, alle 30 kW pellettipolttimien ja 30 - 50 kW hakekattiloiden ominaispäästöt ja päästöjen vaihtelu olivat nimellisteholla selkeästi pienemmät kuin samantehoisten tulisijojen ja kiukaiden. Osateholla päästöt kuitenkin kasvoivat katkojen ja paloilmän säätelyn seurauksena. Parempaan palamisen säädön ansiosta jatkuvakäyttöisissä laitteissa voidaan käyttää isompaa alipainetta ja saavutetaan parempi hyötysuhde kuin tulisijoilla. Kokoluokan 30 - 50 kW pienkattiloiden mitatut hyötysuhteet olivatkin selkeästi korkeammat, 81 - 85 %.

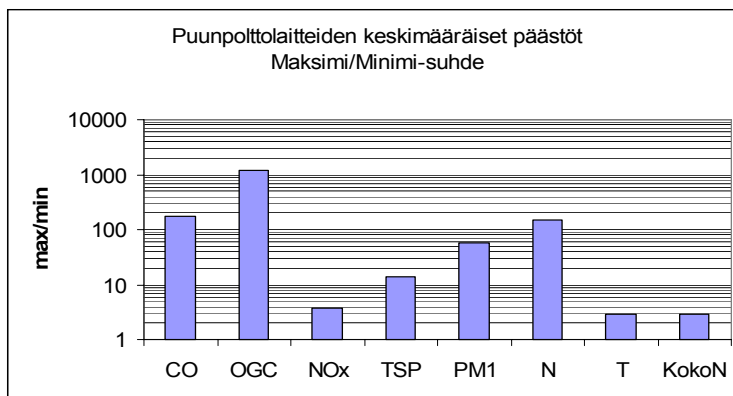
Jatkuvakäyttöisten 50 - 500 kW laitteiden määrityksiä voitiin tehdä rajoitetusti, mutta huomattavana etuna on, että samoilla laitteilla voitiin polttaa sekä haketta että pellettejä. Pienten ja keskikokoisten polttimien ominaispäästöissä ei ollut eroa, tehokkaammassa polttimissa voitiin käyttää kuitenkin suurempaa vetoa savukanavassa. Tehokkaammasta palamisesta johtuen mitattu hiukkaskeskikoko oli pienkattiloita alhaisempi tässä kokoluokassa.

Laitostehojen yläpäättä edustivat 10 - 12 MW pyöröarinakattilat, joissa oli tehokkaat savukaasun hiukkaspuhdistimet. Mitattujen laitosten ominaispäästöt olivat alhaiset ja johtuen hiukkaserottimista päästön keskimääräinen hiukkaskoko 230 nm poikkesi selvästi muista laitteista. Tulisijoja kahta kertaluokkaa pienempi hiukkaspäästöpuhtaus, 10^{11} hiukkasta/MJ, liittyi suureen hiukkaskokoon.

Kiukaat ja tulisijat tuottivat eniten hiukkasia (100 - 200 mg/MJ) ja häkää (1200 - 3000 mg/MJ). Panospolton hiukkaspäästöt olivatkin keskimäärin viisinkertaiset jatkuvasyöttöisiin puulämmityskattiloihin ja 15 - 50 kertaiset 10 MW hakekattilaan nähden (PM1 keskipäästö 3 mg/MJ). Mielenkiintoisen vertailukohdan antaa pellettien käyttö hakkeen sijaan. Pellettipolttoaine vähensi kaikkia ominaispäästöjä selkeästi lähes laitteen teholuokasta riippumatta. Hiukkaspäästöissä alenema oli 20 - 30 %, kaasupäästöissä yli 50 %. Myös hyötysuhde osoittautui pellettejä poltettaessa haketta korkeammaksi. (Taulukko 9.1).

Taulukko 9.1: Panos- ja jatkuvalpoltoisten laitteiden päästöjen vertailua.

Polttolaite	Teho kW	Polttoaine	T °C	CO mg/MJ	PM1 mg/MJ	N #/MJ	KokoN nm
Kiukaat	<15	pilke	350	3100	145	6,5E+13	110
Takat, takkasydämet	<30	pilke	210	1200	85	3,8E+13	130
Pellettitakat	8	pelletti	135	165	65	3,2E+13	155
Pienkattilat	<30	pelletti	120	190	25	1,2E+13	145
Pienkattilat	30-50	hake	180	500	11	8,1E+12	105
Pienkattilat		pelletti	190	250	8	6,9E+12	105
Keskitehokattilat	50-500	hake	190	620	30	2,3E+13	105
Keskitehokattilat		pelletti	180	85	10	1,7E+13	80
Suurtehokattilat	10000	pyöröarina	145	20	3	4,3E+11	230
Öljykattila	20	öljy	165	35	2	1,1E+11	50



CO	Häkä
OGC	Hiilivedyt
NOx	Typen oksidit
TSP	Kokonaispöly
PM1	PM1 massa
N	Lukumäärä
T	Lämpötila
KokoN	Hiukkaskoko

Kuva 9.1: Panos- ja jatkuvalpoltoisten puunpolttolaitteiden maksimipäästöjen ja minimipäästöjen suhde.

Tutkimuksen yksi lähtökohdista oli tehdä vertailumäärittelyksiä pienen kokoluokan öljykattiloilla, joiden käyttö Suomessa on laajaa ja polttotekniikka hallittua. Mittauksia tehtiin 20 kW:n öljypolttimilla, jotka vastaavat pientalon lämmitykseen käytettyä poltinta. Puun pienpolttolaitteiden ja tavallisen öljypolttimen päästöjen vertailu paljastaa huomattavia eroja ominaispäästöissä. Omakotitalon öljykattilan hiukkas- ja häkäpäästöt olivat samaa tasoa MW-luokan hakelaitosten kanssa. Öljypoltinta teholtaan vastaavien pellettipolttimien hiukaspäästöt olivat öljykattilaan nähden keskimäärin kymmenkertaiset ja häkäpäästö viisinkertainen.

Öljypoltossa merkittävän ongelman muodostaa kuitenkin hiukkasten pieni koko. Öljypolttimien päästössä hiukkaset ovat huomattavasti pienempiä, keskikooltaan 50 nm, kuin puun polttolaitteiden tuottamat. Myös hiukkasten muodostuminen poikkeaa puun palamiserosolin muodostumisesta ja hiukkasten koostumus on erilainen niiden sisältäessä mm. rikkiä, joka on keuhkoja ärsyttävä alkuaine. Ultrafinien hiukkasten hengitettävyyden keuhkojen alveolaareihin on suuri. Toisaalta öljypolton hiukkasten lukumäärä on lähes kaksi kertaluokkaa alhaisempi kuin puunpolton ja massapitoisuus pieni ominaispäästön ollessa keskimäärin 2 mg/MJ.

Alle 1 mikrometrin pienhiukkasten (PM1) osuus kokonaispölystä oli kaikissa tutkituissa laitteissa suuri, tulisijoilla ja pellettipolttimilla 75 - 95 % ja pien- ja keskitehokattiloilla 50 - 70 % hiukkasista kului hengittyvään hiukkasfraktioon. Kaikkien polttolaitteiden hiukkaslukumääräpäästöön perustuva

hiukkasmaaaniikoko oli melko tarkoin 100 nm, jota voidaan siten pitää puun polton hiukkasten tyyppillisenä keskikokona.

Aikaisemmassa yhteydessä todettiin, että sekä palamislämpötila että puun tuhka-aineet vaikuttavat keskeisesti hiukkaspäästön määrään ja koostumukseen. Mittauksissa sekä puulajin että puun ainesosien todettiin vaikuttavan päästömääriin. Runkopuuta poltettaessa leppä ja paju tuottivat kaksinkertaisen PM1 päästön muihin kotimaisiin puulajeihin verrattuna. Poltettaessa vain kuoresta tehtyjä pellettejä kaikki viisi tutkittua puulajia aiheuttivat keskimäärin nelinkertaisen PM1 ominaispäästön runkopuuhun verraten. Myös häkä- ja hiilivetypäästöt olivat suuremmat kuoripellettejä poltettaessa. Puun tuhka-aineista erityisesti kaliumin, mutta myös kalsiumin, natriumin, rikin ja kloorin osuus on tärkeä. Polttoaineen koostumuksella ja laadulla voidaan siten vaikuttaa myös laitteiden ominaispäästöjen vähentämiseen.

Lämpötilan merkitys palamistuotteiden määrään kytkeytyy veden haihtumiseen polttoainepartikkelista. Jos palotilassa on korkea lämpötila, polttoaine kuivuu pinnalta, jossa olevien aineiden haihtuvuus jyrkästi nousee tuloksena tuhkapartikkelien suuri määrä. Lämpötilan ollessa alhainen, polttoainepartikkeli syttyy hitaasti pinnan pysyessä pitkään kosteana alentaen haihtuvuutta ja pienentäen tuhkapäästöä. Kostean polttoaineen hyväksikäyttöä ei tutkimuksessa selvitetty, mutta menetelmän käyttö hiukkasmuodostuksen vähentämiseksi edellyttää palotilan rakennemuutoksia.

10 KIRJALLISUUS

Arpiainen, V., Kyllönen, H., Nissilä, M. (1986) Turpeen, puun, kuoren ja ligniinin flash-pyrolyysi, Osa 1. Tutkimuksen nykytila ja arvio teollisista sovellusmahdollisuuksista. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tutkimuksia 455, Espoo 1986.

Amann, C.A., Sieglä, D.C. (1982) Diesel Particulates – What they are and why. *Aerosol Science Technology* **1**, 73-101.

Bartok, W., Sarofilm, A.F. (1991) Fossil Fuel Combustion. John Wiley & Sons, Inc.

Bockhorn, H. (1994) Soot Formation in Combustion, Mechanisms and Models. Kaiserslautern 1994, Springer-Verlag.

BS 3841: Part 2: 1994. Determination of smoke emission from manufactured solid fuels for domestic use. Part 2. Methods for measuring the smoke emission rate. Lontoo: British Standards Institution (BSI), 1994. 22 p.

Christensen, K., Stenholm, M. & Livbjerg, H. (1998) The formation of submicron aerosol particles, HCl and SO₂ in straw-fired boilers. *J. Aerosol Sci.* **29**, 421-444.

D'Anna, A., D'Alessio, A., Minutolo, P. (1994) Spectroscopic and Chemical Characterization of Soot Inception Processes in Premixed Laminar Flames at Atmospheric Pressure. Teoksessa: Bockhorn, H. (toim.), Soot Formation in Combustion, Mechanisms and Models, Kaiserslautern 1994, Springer-Verlag, 83-103.

Energiatilastot 2001. 2002. Tilastokeskus. Energia 2002:2. 151 s.

Flagan, R.C., Seinfeld, J.O. (1988). Fundamentals of Air Pollution Engineering, California Institute of Technology, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Gaegauf, C.K., Wieser, U. & Macquat, Y. Field investigation of nanoparticle emissions from various biomass combustion systems. Teoksessa: Nussbaumer, T. (toim.). Aerosols from Biomass Combustion. Zürich, Switzerland, 27 June, 2001. Zürich: Verenum, 2001. S. 81 – 85. ISBN 3-908705-00-2.

Gronli, M.G., Melaaen, M.C. (2000) Mathematical Model for Wood Pyrolysis – Comparison of Experimental Measurements with Model Predictions. *Energy & Fuels* 2000, 14, 791-800.

Houck, James E. et al., The PM_{2.5} Reduction Potential of New Technology Home Heating Appliances and Fuels. In proceedings of U.S. Environmental Protection Agency, Air Waste Management Association and U.S. Department of Energy Conference: PM_{2.5}: A Fine Particle Standard, volume 2, pp. 1032-1043. Saatavissa <http://www.omni-test.com/>.

Huotari, J., Vesterinen, R. (2002) Muut polton päästöt. Teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. ja Hupa, M. (toim.). Poltto ja Palaminen. Teknillisten Tieteiden Akatemia, Jyväskylä, 371-395.

Hytönen, K. (2004) Puulajin vaikutus pienpolton VOC-päästöihin. Pro Gradu tutkielma. Kuopion yliopisto, ympäristötieteiden laitos.

Iisa, K., Yrjas, P., Kilpinen, P. (2002) Rikin oksidien muodostuminen ja poistaminen. Teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. ja Hupa, M. (toim.). Poltto ja Palaminen. Teknillisten Tieteiden Akatemia, Jyväskylä, 343-370.

Ishiguro, T., Takatori, Y., Akihama, K. (1997) Microstructure of Diesel Soot Particles Probed by Electron Microscopy: First Observation of Inner Core and Outer Shell. *Combustion and Flame* **108**, 231-234.

Jensen J., Nielsen L., Schultz-Møller, C., Wedel, S. & Livbjerg, H. (2000) The nucleation of aerosols in flue gases with a high content of alkali – a laboratory study. *Aerosol Sci. Tech.* **33**, 490-509.

Johansson, L., Characterisation of Particle Emissions from Small-Scale Biomass Combustion, (Thesis for the degree of licentiate of engineering). Göteborg: Chalmers University of Technology, 2002. 51 s.

Johansson, L., Tullin, C. & Leckner, B., Particulate Emissions from Small-scale Biomass Combustion. Teoksessa: Nussbaumer, T. (toim.). Aerosols from Biomass Combustion. Zürich, Switzerland, 27 June, 2001. Zürich: Verenum, 2001. S. 87 – 92.

Johansson, L.S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., Potter, A. (2004) Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment* **38**, 4183-4195.

Jokiniemi, J., Lazaridis, M., Lehtinen, M. & Kauppinen E. (1994) Numerical simulation of vapour-aerosol dynamics in combustion processes. *J. Aerosol Sci.* **25**, 429-446.

Jokiniemi, J.K., Lind, T., Hokkinen, J., Kurkela, J., Kauppinen, E.I. (2001) Modelling and Experimental Results on Aerosol Formation, Deposition and Emissions in Fluidized Bed Combustion of Biomass. Teoksessa: Aerosols from Biomass Combustion, Thomas Nussbaumer (toim.), Int. Seminar at 27 June 2001 in Zurich by IEA, Bioenergy Task 32 and Swiss Federal Office of Energy.

Jokiniemi, J., Pyykönen, J., Mikkanen, P. & Kauppinen E. (1996) Modeling fume formation and deposition in kraft recovery boilers. *Tappi J.* **79**, 171-181.

Kauppa- ja teollisuusministeriö. 2005. Energiakatsaus 1/2005. Energiaosasto. 44 s.

Kilpinen, P. (2002) Palamisen kemiaa. Teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. ja Hupa, M. (toim.). Poltto ja Palaminen. Teknillisten Tieteiden Akatemia, Jyväskylä, 60-78.

Koistinen, R., Saastamoinen, J., Aho, M. (1986) Yksittäisen polttoainepartikkelin palamisen mekaniikka. Kirjallisuustutkimus, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tiedotteita 555, Espoo 1986.

Koistinen, R. (1989) Polttoainekerroksen palamisen perusteet arinapoltoissa, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tutkimuksia 622, Espoo 1989.

Kotilainen, R. (2000) Chemical changes in wood during heating at 150–260 °C. Department of chemistry, University of Jyväskylä research report no. 80. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto.

- Kovács, J. (2001) What is Biomass Pyrolysis? International Flame Research Foundation (IFRF), Combustion handbook [www-dokumentti]. <http://www.handbook.ifrf.net/handbook/cf.html?id=102>
- Maricq, M., Xu, N. (2004) The effective density and fractal dimension of soot particles from pre-mixed flames and motor vehicle exhaust. *J. Aer. Sci.* **35**, 1251 – 1274.
- Maskuniitty, H. (2002) Arinapoltto. Teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. ja Hupa, M. (toim.). Poltto ja Palaminen. Teknillisten Tieteiden Akatemia, Jyväskylä, 466-489.
- Mcdow, S.R. and Huntzicker, J.J. (1990) Vapour Adsorption Artifact in the Sampling of Organic Aerosol: Face Velocity Effects. *Atmospheric Environment* **24A**, 2563-2571.
- Metsätilastollinen vuosikirja 2004. 2004. Metsätutkimuslaitos. SVT Maa-, metsä- ja kalatalous 2004:45. 416 s.
- NS 3038 – 2. Lukkede vedfyrtte ildsteder. Røykutslipp. Del 2: Bestemmelse av partikulæutslipp. Oslo: Norges Standardiseringsforbund (NSF), 1994. 12 s.
- Obernberger, I., Brunner T and Jöller M. (2001). Characterization and Formation of Aerosols and Fly-Ashes from Fixed-Bed Biomass Combustion. Teoksessa: Aerosols from Biomass Combustion, Thomas Nussbaumer (toim.), Int. Seminar at 27 June 2001 in Zurich by IEA, Bioenergy Task 32 and Swiss Federal Office of Energy.
- Oser, M., Nussbaumer, T., Schweizer, B., Mohr, M., Figi, R. (2001). Influences on Aerosol Formation in an Automatic Wood Furnace. Teoksessa: Aerosols from Biomass Combustion, Thomas Nussbaumer (toim.), Int. Seminar at 27 June 2001 in Zurich by IEA, Bioenergy Task 32 and Swiss Federal Office of Energy.
- Oravainen, H. (2003) Pienpolton hiukkasmittausmenetelmiä ja mittaustuloksia. Projektiraportti, VTT Jyväskylä, 21 s.
- Peltola, A. & Tuomi, S. 1996. Polttopuun käyttö pientaloissa. Työteho-seura. Metsätiedote 554. 4 s.
- Pyykönen J. & Jokiniemi J. (2000) Computational fluid dynamics based sectional aerosol modelling schemes. *J. Aerosol Sci.* **31**, 531-550.
- Pyykönen J. & Jokiniemi J. (2003) Modeling alkali chloride superheater deposition and its implications. *Fuel Process. Technol.* **80**, 225-262.
- Rakennustutkimus Oy (2001) Tulisijamarkkinat – Markkinatilanneraportti, Helsinki.
- Rogge, W. (2003) Luentomateriaalit Incomplete Combustion-symposiumissa 9.-11.11.2003, Kuopio.
- Saastamoinen, J. (2002) Kiinteän polttoaineen palaminen ja kaasutus. Teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. ja Hupa, M. (toim.). Poltto ja Palaminen. Teknillisten Tieteiden Akatemia, Jyväskylä, 186-232.
- Salakari, M. & Peltola, A. 1995. Pientalojen polttopuun käyttö lämmityskaudella 1992/93. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 566. 36 s.

Schauer, J., Kleeman, M., Cass, G. ja Simoneit, B. (2001) Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C₁-C₂₉ organic compounds from fireplace combustion of wood. *Environmental Science & Technology* **35**, 1716-1728.

Schmatloch, V. & Brenn, J., Fine Particle Emissions from Combustion in Small Wood Fired Furnaces. Teoksessa: Nussbaumer, T. (toim.). *Aerosols from Biomass Combustion*. Zürich, Switzerland, 27 June, 2001. Zürich: Verenum, 2001. S. 93 – 96. ISBN 3-908705-00-2.

Sevola, Y. & Peltola, A. & Moilanen, J. 2003. Polttopuun käyttö pientaloissa lämmityskaudella 2000/2001. Metsäntutkimuslaitos. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 894. 30 s.

Skrifvars, B-J., Hupa, M. (2002) Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio. Teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. ja Hupa, M. (toim.). *Poltto ja Palaminen*. Teknillisten Tieteiden Akatemia, Jyväskylä, 269-299.

Solmio, H. & Valkonen, J. 2002. Hakkeen käyttö ja haketekniikan kehitystarpeet maataloilla. Työtehosteuran raportteja ja oppaita 3. 73 s.

Tucker, W. G. 2001. Volatile Organic Compounds. Teoksessa Spengler, J. D., Samet, J. M. ja McCarthy, J. F. (toim.). *Indoor air quality handbook*. Kappale 31: s. 31.1-31.20. New York: McGraw-Hill.

Tuomi, S. & Mattila, K. 1996. Ostopolttopuun käyttö pientaloissa. Työtehosteuran julkaisuja 351. 54 s.

Tuomi, S. & Peltola, A. 2002. Polttopuun käytön nykytila pientaloissa. Työtehosteura. Metsätiedote 658. 4 s.

Turpin, B.J., Huntzicker, J.J. and Hering, S.V. (1994) Investigation of Organic Aerosol Sampling Artifacts in the Los Angeles Basin. *Atmospheric Environment* **28A**, 3061-3071.

Turrek, T. (2004) Dilution techniques for combustion aerosol sampling. Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja 6/2004.

U.S.EPA (1995) *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources*. AP 42 5. painos, <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42>

Uusituvan energian edistämishjelma 2003-2006. 2003. Työryhmän ehdotus. Kauppa- ja teollisuusministeriön työryhmä- ja toimikuntaraportteja 5/2003. 56 s.

Valmari, T., Kauppinen, E.I., Kurkela, J., Jokiniemi, J.K, Sfiris, G., Revitzer, H. (1998) Fly Ash Formation and Deposition During Fluidized Bed Combustion of Willow. *Journal of Aerosol Sciences*, **29**, 445-459.

van Loo S. & Koppejan J. (eds.) 2002. *Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Enchede, Twenty University Press 348 p.

Vnp 157/1987 (1987) Valtioneuvoston päätös yleisistä ohjeista voimalaitosten ja kattilalaitosten hiukkaspäästöjen rajoittamiseksi.

Wieser, U., Gaegauf, C.K. (2000) Nanoparticle Emissions of Wood Combustion Processes. 1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, June 2000 Sevilla.

Zevenhoven-Onderwater, M.F.J. (2001) Ash Forming Matter in Biomass Fuels, Academic Dissertation, Report 01-03, Åbo Akademi, Faculty of Chemical Engineering, Process Chemistry Group, Turku.

Ålander, T., Leskinen, A., Ruotsalainen, I., Raunemaa, T., Rantanen, L. ja Mikkonen, S. (1998) Polttomoottorissa syntyvien palamisaerosolien rakenne ja kemiallinen koostumus. Loppuraportti. Teknologian kehittämiskeskus, Liikenteen energiankäytön ja ympäristövaikutusten tutkimusohjelma, Mobile 230T-2.

Öljy- ja kaasulämmitysyhdistys ry (2001) Pientalon öljylämmityslaitteiston perusparannus. Tekninen suositus TS-5/2001.

Öljy- ja kaasulämmitysyhdistys ry (2003) Pientalon öljylämmityslaitteiston rakentaminen. Tekninen suositus TS-1/2003.

LIITE 1. SUOSITUKSIA PUUN PIENPOLTON HIUKKASNÄYTTEENOTTOON

1 Mittaaminen suoraan kuumasta savukaasusta

Mittaaminen kuumasta savukaasusta on vaikeaa erityisesti panospoltossa. Savukaasusta voidaan suoraan mitata ainoastaan hiukkasmassapitoisuuksia. Mittaukset kannattaa tehdä standardien, esimerkiksi päästömittaustandardin SFS 3866, mukaisesti. Pienpoltossa savukanavat ovat yleensä pieniä kooltaan ja näytteenkeräys tehdään yhdestä pisteestä keskeltä kanavaa. Panospoltossa savukaasuvirta vaihtelee, joten tarkalleen isokineettistä näytteenottoa ei voida toteuttaa. Näytteenottovirta lasketaan keskimääräisen savukaasuvirran mukaisesti.

Näytteiden keräyksessä käytetään ns. kuppisuodattimia. Kerättävän massan määrä täytyy olla riittävä, joten jatkuvassa poltossa keräysajan täytyy olla riittävän pitkä. Mittaustulos kuumasta savukaasusta mitattaessa on epätarkka, koska isokineettisyyden lisäksi punnitusvirhe kuppisuodattimia käytettäessä on suuri. Kosteus savukaasussa ja kaasumaiset hiilivedyt aiheuttavat artefaktia suodattimelle. Toisaalta näytteen käsittelyn aikana massahäviöt ovat myös mahdollisia ja todennäköisiä.

2 Mittaaminen laimennetusta savukaasusta

Puun pienpoltossa joudutaan muissa kuin päästömittaustandardin mukaisessa suorassa savukaasumittauksessa käyttämään periaatteessa aina savukaasun laimennusta. Mitattava palamisaerosoli voi olla hyvinkin kuumaa (yli 500 °C), hiukkaspitoisuudet korkeita ja savukaasussa on kondensoituvia yhdisteitä. Laimennuksen avulla lämpötila alenee, kondensoituminen vähenee tai pysähtyy ja näytteenotto tulee mahdolliseksi. Tässä ohjeessa on käsitelty ainoastaan PIPO-tutkimusprojektissa käytettyjä menetelmiä:

- 1) Ejektorilaimennuksessa savukaasuosanäyte otetaan vakio-tilavuusvirralla kanavasta, jolloin myös laimennussuhde on tasaisissa olosuhteissa vakio. Laimennus suoritetaan kuivalla paineilmalla, jota voidaan lämmittää. Myös itse laimennin voidaan lämmittää savukaasun lämpötilaan tai lähelle sitä. Laimentimet voidaan kytkeä peräkkäin, jolloin laimennussuhde kasvaa portaittain. Ejektorilaimentimissa erityisesti häviöt ja laimentimien tukkeentuminen aiheuttavat ongelmia.
- 2) Laimennustunnelia käytetään yleisesti standardimenetelmänä autojen ja moottorien testauksissa ja päästömittauksissa, joten tunnelilaimennustekniikka on yksityiskohdittain koestettua ja dokumentoitua. Laimennusilma on yleensä puhdistettua huoneilmaa. Laimennustunneleita voidaan käyttää joko osavirtauslaimentimina tai kokonaisvirtauslaimentimina, joten tekniikka on sovellettavissa laajalti tarpeiden mukaan.
- 3) Standardoituna menetelmänä on ulkomailla käytetty huuvalaimennusmenetelmää, jota USA:ssa kutsutaan sekoittavasti myös laimennustunneliksi (EPA 5G standardi). Huuvalaimennuksessa laimennusilma on puhdistamatonta huoneilmaa (laboratorioilmaa) ja kyseessä on kokonaisvirtauslaimennus. Huuvalaimennuksen haittapuolena on, että laimennusprosessi ei ole hallittavissa ja likainen huoneilma laimennusilmana voi vaikuttaa tulokseen.

Ejektorilaimentimien käyttö

Ejektorilaimennus on yleisesti käytetty menetelmä pienhiukkasmittauksissa ja laimentimia on kaupallisesti saatavilla. Vaatimuksena ejektorilaimentimien käytölle on mahdollisimman puhdas paineilma, jota käytetään laimentimissa laimennusilmana. Ejektorilaimentimissa ovat erityisesti suurhiukkasten häviöt suuria, joten laimennustekniikka ei sovellu yli mikrometrin kokoluokan massapitoisuuden määrittämiseen laimennetusta kaasusta. Kun näyte otetaan suoraan kuumasta savukaasusta, isokineettinen näytteenotto panospoltossa ei myöskään onnistu. Kuumaa savukaasua laimennettaessa ensimmäinen ejektorilaimennin ja laimentimelle tuleva laimennusilma lämmitetään savukaasun lämpötilaan. Toinen laimennin ja laimennusilma pidetään kylmänä. Tarvittaessa käytetään vielä kolmatta laimenninta (kylmänä).

Kuumasta kaasusta mitattaessa laimentimet tukkeentuvat erittäin helposti. Suositeltavaa olisikin käyttää esierotinta (esim. sykloni) ennen laimentimia ja ensimmäisen laimentimen laimennuskerroimen täytyisi olla pieni (esim. 3 – 5), jolloin laimentimen suuttimien dimensiot olisivat riittävän suuria. Suositeltavin tapa on käyttää ejektorilaimentimia toisiolaimentimina. Tällöin esilaimennusmenetelmänä voi olla esimerkiksi huuva menetelmä. Laimentimia käytettäessä erittäin tärkeä on määrittää oikea laimennussuhde esimerkiksi tarkalla CO₂-mittauksella tai tasaisessa prosessissa kalibrointikaasulla.

Laimennustunnelin käyttö

Standardien mukaiset laimennustunnelit soveltuvat parhaiten tutkimuskäyttöön. Tunnelleita on kaupallisesti saatavilla, mutta ne ovat kalliita. Laimennustunneli voidaan rakentaa toimimaan myös ejektoriperiaatteella. Puun pienpolton mittauksissa joudutaan käyttämään osavirtauslaimennustunnelleita, koska savukaasumäärät ovat suuria ja kokonaisvirtaustunneli vaikuttaisi tutkittavan polttolaitteen olosuhteisiin. Laimennustunnelilla mittaaminen on vaivatonta. Pitoisuustasoja voidaan säätää useimmille mittalaitteille sopiviksi, näytelämpötilat ovat alhaisia, kosteuden kanssa ei juuri tule ongelmia eikä laimennin tukkeudu. Näytetilavuus on myös suuri, joten tunneliin voidaan kytkeä yhtäaikaaisesti mittalaitteita niin paljon kuin tarvitaan ottaen huomioon tunnelin mahdolliset omat hiukkashäviöt. Laimennusilmana käytetään puhdistettua huoneilmaa. Osavirtauslaimennuksessa on sama ongelma kuin ejektorilaimennuksessa: näytettä ei saada otettua täysin isokineettisesti panospoltossa.

Huuvailaimennuksen käyttö

Huuvailaimennusta käytetään yleisesti laimennusmenetelmänä hiukkasmassan mittaamiseen mm. USA:ssa, Norjassa ja Uudessa-Seelannissa. Huuvamenetelmän etuna on, että näyte voidaan ottaa täysin isokineettisesti myös panospoltossa. Menetelmä myös parhaiten jäljittelee ulkoilmaan tapahtuvaa laimennusta. Menetelmän heikkous on, että laimennusilmana käytetään puhdistamatonta huoneilmaa. Lisäksi laimennusilman ja savukaasun sekoittuminen on hallitsematonta. Huuvamittauksissa olisikin varmistettava hyvä sekoitus ennen näytteenottoa. Huuvamenetelmä soveltuu hyvin hiukkasmassamittauksiin, mutta pienhiukkasten lukumäärän tai koon mittauksissa joudutaan useimmiten käyttämään lisälaimennusta esimerkiksi ejektoreilla, jolloin huuvamenetelmä on esilaimennusmenetelmänä. Tällöin yhtäaikaaisesti usealla eri laitteella mitattaessa täytyisi laimennus määrittää kaikilta käytössä olevilta laitteilta erikseen esimerkiksi erillisillä CO₂-mittareilla. Myös huuvamenetelmässä on otettava huomioon huuvan omat hiukkashäviöt.

3 Yhteenveto

Kuumasta savukaasusta suoraan mittaaminen on hankalaa ja hyvä tulos saadaan ainoastaan mitattaessa massapitoisuuksia tasaisesta palamisesta päästömittaustandardien mukaisesti. Puun pienpoltossa pienhiukkasmittauksissa joudutaan käyttämään savukaasun laimennusta. Laimennetusta savukaasusta kokojakauman ja lukumäärän mittauksissa eri menetelmillä saadaan mittaustarkkuuden rajoissa samanlaisia tuloksia, joten kaikki menetelmät ovat yhtä käyttökelpoisia. Eri mittauksissa kannattaa aina käyttää tarkalleen samoja menetelmiä, jolloin tulokset ovat parhaiten vertailtavissa. Ejektorilaimentimia ei suositella käytettäväksi suoraan savukaasusta mitattaessa. Isokineettinen näytteenotto on parhaiten toteutettavissa huuvamenetelmällä. Kaikissa laimennusmenetelmissä on tarkkailtava mahdollisia hiukkashäviöitä laimentimessa, kriittisin on ejektorilaimennin.

Laimennetusta savukaasusta mitattaessa laimennussuhteen määrittäminen on tärkeää. Käyttökelpoisiin määritysmenetelmiä on CO₂-mittaus. Paras tulos saadaan määrittämällä CO₂ jokaisen laitteen näytekäasusta erikseen erityisesti huuvamittauksissa. Hiukkasmassaa mitattaessa sopiva laimennussuhde on 10 – 30. Pienillä laimennussuhteilla tarvitaan suodatinpesien ja linjojen lämmitystä. Mittalaitteena sähköinen alipaineimpaktori (ELPI) soveltuu hyvin puun pienpoltton hiukkaslukumäärien ja kokojakaumien seurantaan. Laitteen vaatima laimennussuhde puun pienpoltossa on tyypillisesti 40 – 100. SMPS laitteisto on tutkimuskäyttöön tarkoitettu eikä sovellu kovin hyvin puun pienpoltton mittauksiin. SMPS laitteistolla saadaan kuitenkin tarkimmin mitattua hiukkasten jakauma ja keskikoko. Yhteenveto mittausten menetelmistä ja niiden soveltuvuudesta puun pienpoltton mittauksiin esitetään alla olevassa taulukossa.

Taulukko. Mittausmenetelmät ja niiden soveltuvuus pienpoltton mittauksiin.

Menetelmä	Soveltuvuus	Hyvät puolet
Raaka savukaasu	TSP, PM	Standardin mukainen menetelmä
Ejektorilaimentimet	PM, lukumäärä ja koko	Kenttäkäyttöinen
Laimennustunneli	PM, lukumäärä ja koko	Helppokäyttöinen
Huuvamenetelmä	TSP, PM	Isokineettinen näytteenotto
Huuvamenetelmä + ejektorit	Lukumäärä ja koko, PM	

Menetelmä	Epäkohdat
Raaka savukaasu	Isokineettisyys panospoltossa, punnitustarkkuus huono
Ejektorilaimentimet	Isokin., pienhiukkashäviöt, tukkeutuminen raakakaasusta mitattaessa
Laimennustunneli	Isokineettisyys
Huuvamenetelmä	Laimennusilman sekoittuminen, likainen laimennusilma
Huuvamenetelmä + ejektorit	Häviöt ejektoreissa, laimennussuhteen määrittäminen

Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja

2000

1	Ympäristömikrobiologian laboriokurssi 2000	Heinonen-Tanski H.	
2	1999-2000 sisäkammiokeet hiilivedyillä: hiilivedyt, typenoksidit, otsoni ja hiukkasmuodostus	Lehtonen M.	
3	Altistumisriski pölylle ja homeelle hakkeen ja hakeraaka- aineen käsittelyssä	Tissari J.	Ei julkinen
4	Maaperä I. Kirjallisuustyöt kurssilta 16.2.-4.5.2000	Toim. Pertti Martikainen ja Jarmo Holopainen	
5	Muuntelujen ja muiden vieraiden mikrobien hyödyt ja mahdolliset ympäristölliset haitat	Toim. Heinonen-Tanski, H	
6	Hallitsemattoman kosteuden torjuntatoimenpiteet tuloilmajärjestelmässä	Halonen R., Keskikuru T., Pasanen T., Kokotti H.	
7	Kvalitatiivisen riskinarviomenetelmän kehittäminen turvallisuusselvitykseksi laboratoriotyössä. Loppuraportti	Pasanen T., Halonen R., Kokotti H.	
8	Effects of the 900 Mhz radiofrequency radiation on the development of cancer in mice	Heikkinen P.	Julkinen; ei myytävänä
10	Pienhiukkaskeräinten tutkimus 143 m ³ ulkokammiossa	Tiitta P., Tissari J., Leskinen A., Yli-Tuomi T., Raunemaa T.	
11	Henkilöstön oirekyselyiden ja ilmanvaihtojärjestelmän mikrobiologisten olosuhteiden yhteys liikekiinteistössä	Hakkarainen H.	5,1 €
12	Jalasjärven lääkäritalo A:n rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen tutkimus.	Peltola R.	ei myytävänä
13	Perustusten ulkopuolinen vesieristäminen Suomessa eri aikoina.	Hoffren A.	ei myytävänä
14	Kuivaus kosteusvahingon korjausmenetelmänä.	Härmä J.	3,4 €
15	Liikekiinteistön sisäilmastoseelvitys. Tapaustutkimus	Karjalainen S.	ei julkinen ei myytävä
16	Luento- ja seminaarisalien ilmanlaatu yliopistorakennuksessa	Keskikuru T.	8,5 €
17	Asuinkerrostalon saneerausratkaisut esimerkkikohteessa.	Kokkonen T.	ei julkinen ei myytävä
18	Katsaus rakennusteknisen koulutuksen saaneiden henkilöiden sisäilmakoulutukseen. Merkitys, heikkoudet ja vahvuudet.	Kokotti H.	3,4 €
19	Työntekijöiden kokemat ja tunnistamat meluongelmat Kemira Chemicals Oy:n Siilinjärven tehtailla.	Kuosmanen A. Myynti tutkijalta suoraan puh. 050 – 523 4052	8,5 €
20	Koulukiinteistöjen peruskorjaustarpeen kiireellisyyden ja laajuuden arviointi, ennakointi ja yhteistyö eri tahojen kanssa. Tapaustutkimus: Timolan ala-asteen rakennukset, Leppävirta.	Lajunen R.	6,8 €
21	Sisäilmaongelmien ratkaisussa käytettyjen menetelmien logiikka ja tulokset.	Lönblad P.	5,1 €
22	Maanvaraisen sandwich-elementin mikrobikontaminaation merkitys sisäilman laadulle. Tapaustutkimus	Parikka K.	3,4 €
23	Ilmavirtausten visualisointimenetelmien hyödyntäminen turvallisen vetokaappityöskentelyn koulutuksessa.	Pasanen T.	3,4 €
24	Sisäilmaongelman asiantuntija koulutuksen seminaarijulkaisut 15.12.2000	toim. Kokotti H.	11,8 €
25	Kosteus- ja homevaurioiden korjaus sekä ilmanvaihdon parantaminen vähentävät asukkaiden oireilua.	Varto K.	3,4 €

- 26 Ilmanvaihdon ja hallitsemattomien ilmavirtauksien aiheuttamat hygieniariskit kolmessa maitoalan tuotantolaitoksessa. Keskikuru T.
- 27 Haketuksen sekä biopoltoaineiden lastaamisen ja purkamisen pölypäästöt Tissari J., Raunemaa T., Yli-Tuomi T., Willman P., Nuutinen J.
- 28 Pelkistyneiden rikkiyhdisteiden fysikaalis-kemiallinen esikäsittely biosuodatusta varten – Esiselvitys Ruokojärvi A., Junninen H., Hartikainen T., Penttilä H., Nummela J., Nyrönen T., Tuppurainen K., Tarhanen J., Martikainen P., Ruuskanen J.
- 29 Nuorten musiikkiharrastukset ja kuulovaurioriski Myyryläinen P., Björk E.

2001

1	Turvepölyn leviäminen tuotantoalueilta. Hakumenetelmän tutkiminen kesällä 2000 Pyhännän Konnunsuolla	Tissari Jarkko	Ei myynnissä
2	Ympäristömikrobiologian laboriokurssi 2001	Heinonen-Tanski H.	
3	Integroidun kasvinsuojelun kurssin kirjallisuustyöt syksyllä 2000	Holopainen J.	
4	Ympäristömikrobiologian luennot 2001	Heinonen-Tanski H.	6,8 €
5	Aerosol photoemission (APE): Literature review	Scotto di Marco G, Leskinen A, Raunemaa T	
6	Ilmahygienia 1. 2000		
7	Kasvit kaupunki ilman indikaattorina	Anttila S	
8	Sisäilman laatu ja pintapölyn määrä Jyväskylän kouluissa	Pasanen Tiina	5,1 €
9	Maaekosysteemien kaasudynamiikka ja hiilitaseet	Martikainen P, Sihvola J	8,5 €
10	Ilmanvaihtosuodattimien ominaisuudet korkeissa kosteuksissa	Halonen Raimo	
11	Ilmavälitteisen hygieniariskin vähentäminen Valio Oy Joensuu tuotantolaitoksissa	Keskikuru T	ei myydä
12	Ilmavälitteisen hygieniariskin vähentäminen Valio Oy Toholammin tuotantolaitoksessa	Keskikuru T	ei myydä
13	Kosteusvaurioituneen kohteen jälkisiivouksen tehokkuus	Halonen R	
14	Uimahallien ilman aerosolipitoisuudet ja koostumus ilmanjako sekä uimahallin käyttäjien hengitysaltistuminen	Kokotti H	

2002

1	Ympäristömikrobiologian laboratorioskurssi	Heinonen-Tanski Helvi	4 €
2	Työperäinen altistuminen ja herkistyminen punkeille sikaloissa, kanaloissa ja talleissa	Pippuri Mirka	
3	Ilmahygienia 1 2001: Kirjallisuusreferaatti	Raunemaa T, Yli-Pirilä P	6 €
4	Maaperäekologia I: Kirjallisuustyöt	Martikainen PJ, Holopainen J	6 €
5	Loppuraportti: Ilmavälitteinen hygieniariski maitoalan tuotantolaitoksissa eri vuodenaikoina	Keskiku T, Hyvönen P, von Wright A, Pasanen P	10€
6	Jätevedenpuhdistamo- ja viemäryöntekijöiden altistuminen suolistomikroobeille	Koivunen J, Seuri M, Granfors K, Heinonen-Tanski H	
7	Puhdistetun jäteveden infektiivisten mikrobien vähentäminen UV-säteilyllä hiekkasuodatuksen jälkeen	Rajala R, Niemelä A, Heinonen-Tanski H	5,5 €
8	Jätteenkäsittelyn mikrobiologisten keinojen vahvuudet ja heikkoudet. Ympäristömikrobiologian ja bioteknologian syventävän opetuksen seminaariesitykset 2002		5 €
9	Suojakaappien toiminnan sekä työskentelyn laadun ja turvallisuuden tehostaminen	Halonen R.	
10	Homesieniuutteen valmistusmenetelmän kehittäminen ja stachybotrys chartarumille tunnusomaisen komponentin tunnistaminen	Raunio P.	
11	Influence of Physico-Chemical Parameters on de Novo Formation of PCDD/Fs in Waste Incineration	Yli-Keturi N, Hänninen K, Mikkelson P, Penttilä H, Asikainen A, Ruokojärvi A, Tuppurainen K, Vesterinen R, Paakkinen K, Halonen I, Ruuskanen J	2 €
12	Sisäilman laadun kartoitus taideteollisessa korkeakoulussa	Yli-Pirilä P, Asikainen V, Halonen R, Keskikuru T, Kokotti H, Nuutinen J, Reiman M, Kujanpää L, Raunemaa T	6 €
13	Tuloilmansuodattimen olosuhteiden vaikutus tuloilmajärjestelmän mikrobipitoisuuksiin	Halonen R.	
14	Saunan lämmityksen hiukkaspäästöt: mittaukset kesällä 2002	Hytönen K, Nuutinen J, Raunemaa T	5 €
15	Yläpohjan kosteustekninen toiminta	Halonen R	
16	Pienhiukkaset leipomossa	Tissari J, Nuutinen J, Raunemaa T	

2003

1	Lisensiaattityö	Lettojärvi H	
2	Lisensiaattityö	Hyttinen M	
3	Ympäristömikrobiologian luennot 2003	Heinonen-Tanski H	5 €
4	Ympäristömikrobiologian laboratorioskurssi 2003	Heinonen-Tanski H	2,5 €
5	Elintarvikehygienian luentomoniste 2003	Heinonen-Tanski H	2,5 €
6	Lähdeprofiilianalyysin käyttö liuottimien sisälähteiden vaikutuksen arvioitiin Pk-yrityksissä: TSR loppuraportti	Kalliokoski P, Hautamäki M, Pasanen P, Hyttinen M, Laitinen J, Kangas J	ei myynnissä
7	Mikrobit ja toksiset kemikaalit uhkaavat yhä ruokaturvalisuuttamme	Heinonen-Tanski H	5 €
8	Tehostetun siivouksen merkitys sisäilmaan liittyvän oireilun vähentämisessä	Halonen R.	
9	Biogeokemia I, kirjallisuustyöt Biogeokemia I-kurssilla 22.1.-4.4.2003	Martikainen P, Sihvola J	
10	Lifa puhdistuskonsepti: Ilmanvaihtojärjestelmän epäpuhtauksien määrityksessä käytettävien todentamismenetelmien kehittäminen ja arviointi	Asikainen V	
11	Lifa puhdistuskonsepti: Rasvanpistokanavien rasvajäämät ja rasvanpuhdistusmenetelmien kehittäminen ja testaus	Asikainen V	
12	Pyroteknisten suojasavujen hengitystieärsyttävyys	Turunen M.	ei myynnissä
13	Uimahallien ilman aerosolipitoisuudet ja koostumus, ilmanjako, vedenkäsittely sekä uimahallin käyttäjien hengitystiealtistuminen	Yli-Pirilä P, Hirvonen A, Halonen R, Jauhiainen T, Päivinen M, Kujala U, Raunemaa T, Korpi A, Nuutinen J, Kokotti H,	
14	Biogeokemia II, kurssi	Martikainen P	
15		Hyttinen M	

2004

- | | | |
|---|--|---|
| 1 | Menetelmien vertailu ilman faagipitoisuuden mittaamiseksi meijereissä | Kilpeläinen T. |
| 2 | Maaperäekologia 1, kirjallisuustyöt | |
| 3 | Advanced Water Chemistry and Treatment, kirjallisuustyöt kevät 2004 | Hirvonen A., Laatikainen T. |
| 4 | Ilmanvaihtolaitosten epäpuhtaudet ja niille altistuminen puhdistustyössä | S. Kolari, M. Jumpponen, M. Hyvärinen, M. Luoma, R. Merikoski, P. Pasanen |

Julkaisujen myynti ja lainaus: Kuopion yliopisto/ympäristötieteiden laitos, osastosihteeri Marja-Leena Patronen, PL 1627, 70211 Kuopio, puh. 017-163 156, telefax 017-163 191