

**Pro gradu-tutkielma**

**Puun pienpolton hiukkaspäästöjen vähentäminen  
sähkösuodattimella: sähkösuodattimen erotustehokkuus  
ja vaikutus hiukkasten tuhka-hiili-suhteeseen**

**Marjo Saarinen**



**Jyväskylän yliopisto**

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

29.5.2013

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta  
Bio- ja ympäristötieteiden laitos  
Ympäristötiede ja -teknologia

Saarinen Marjo: Puun pienpolton hiukkaspäästöjen vähentäminen sähkösuodattimella: sähkösuodattimen erotustehokkuus ja vaikutus hiukkasten tuhka-hiili-suhteeseen  
Pro gradu-tutkielma: 76 s., 7 liitettä (27 s.)  
Työn ohjaaja: Yliopistonlehtori, FT, DI Timo Ålander  
Tarkastajat: Yliopistonlehtori, FT Jussi Maunuksela ja yliopistonlehtori, FT, DI Timo Ålander

Toukokuu 2013

---

Hakusanat: puun pienpoltto, palamisaerosoli, hiukkaspäästö, sähkösuodatin, sähköinen liikkuvuusanalysointilaitteisto, alipaineimpaktori, CO<sub>2</sub>-analysointilaitteisto, ionikromatografi, ICP-MS

## TIIVISTELMÄ

Biomassan poltto tuottaa pienhiukkasia, joilla on todettu olevan haitallisia terveys- ja ilmastovaikutuksia. Pienpoltto, erityisesti puun panospoltto, tuottaa usein runsaasti kaasumaisia ja hiukkasmaisia epätäydellisen palamisen päästöjä matalalla emissiokorkeudella. Kasvihuonekaasujen vähentämisvelvoitteet ovat Suomessa lisänneet uusiutuvan energian käyttöä energian tuotannossa ja biomassan pienpoltoa. Samaan aikaan puun pienpolton hiukkaspäästöjä ollaan rajoittamassa lainsäädännöllisin keinoin ja kansainvälisillä sopimuksilla.

Tämä opinnäytetyö toteutettiin osana PAPU – panospoltto puhtaaksi-hanketta, jonka yhteydessä kehitettiin puun pienpolton hiukkaspäästöjen puhdistamiseen tarkoitettu sähkösuodatin. Työn tavoitteena oli selvittää, kuinka tehokkaasti hankkeen yhteydessä kehitetty sähkösuodatin vähentää pelletin pienpoltossa muodostuvia hiukkaspäästöjä ja kuinka sähkösuodatin muuttaa pelletin pienpolton palamishiukkasten tuhka-hiili-suhdetta. Hiukkasten lukumääräpitoisuudet ja kokoluokitellut massapitoisuudet mitattiin rinnakkaisella koejärjestelyllä sähköisellä liikkuvuusanalysointilaitteistolla ja alipaineimpaktorilla. Hiukkasten hiilipitoisuus analysoitiin CO<sub>2</sub>-analysointilaitteistolla, ionipitoisuus ionikromatografilla ja metallipitoisuus ICP-MS:llä. Sähkösuodattimen erotustehokkuus 15 kV:n jännitteellä ja yli 2,0 mA:n virralla 7 % savukaasun jäännöshappipitoisuudella hiukkasten lukumääräpitoisuudelle oli 0,87 ja massapitoisuudelle 0,81. 5 % savukaasun jäännöshappipitoisuudella erotustehokkuus hiukkasten lukumääräpitoisuudelle oli 0,78 ja massapitoisuudelle 0,76. Hiukkaspäästöjen tuhka-hiili-suhde 7 % savukaasun jäännöshappipitoisuudella ilman sähkösuodatusta oli 3,5:1 ja suodatuksen jälkeen 0,36:1 sekä 5 % savukaasun jäännöshappipitoisuudella ilman suodatusta 4,3:1 ja suodatuksen jälkeen 1:1.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science  
Department of Biological and Environmental Science  
Environmental Science and Technology

Saarinen Marjo: Particle Emission Reduction by an Electrostatic Precipitator  
from Small Scale Wood Combustion: Particle Removal  
Efficiency of the Electrostatic Precipitator and Effect on the  
Ash/Carbon Ratio.  
Master thesis: 76 p., 7 appendices (27 p.)  
Supervisor: University lecturer, PhD Timo Ålander  
Inspectors: University lecturer, PhD Jussi Maunuksela and university  
lecturer, PhD Timo Ålander  
May 2013

---

Key words: small scale wood combustion, combustion aerosol, particle emission, electrostatic precipitator, differential mobility analyzer, low pressure impactor, CO<sub>2</sub> analyzer, ion chromatography, ICP-MS

## **ABSTRACT**

The combustion of biomass is a significant source of fine particles, which are known to have adverse health and climate effects. Small scale combustion, especially batch combustion of wood, is an important source of particulate and gaseous emissions because of the smouldering combustion conditions with low stack heights. Obligations to reduce greenhouse gas emissions have favored renewable fuels in energy production and small scale combustion of biomass in Finland. At the same time the particulate emissions from small scale wood combustion are restricted by a legislative way and international agreements.

This study was carried out as part of PAPU research project. During the project an electrostatic precipitator (ESP) for particulate emissions from small scale wood-fired heating units was developed. The objective of this study was to find out the total particle removal efficiency of the electrostatic precipitator. In addition, the aim was to determine the effect of the electrostatic precipitator on the ash/carbon ratio of particulate emission from small scale wood combustion. The particle number emissions and size-distributed mass concentrations were measured in a parallel set-up using a differential mobility analyzer and a low pressure impactor. The carbon, ion, and metal concentrations of the particles were analyzed using a CO<sub>2</sub> analyzer, an ion chromatography, and an ICP-MS, respectively. It was found that at the flue gas oxygen concentration of 7 % the total ESP number collection efficiency was 0.87 and mass collection efficiency was 0.81 at voltage 15 kV and corona current over 2.0 mA. At the flue gas oxygen concentration of 5 % the total number collection efficiency was 0.78 and mass collection efficiency was 0.76. The ash/carbon ratio of the particulate emission was 3.5:1 without ESP and 0.36:1 after ESP at the flue gas oxygen concentration of 7 %. At the oxygen concentration of 5 % the ash/carbon ratio was 4.3:1 without ESP and 1:1 after ESP.

# Sisällysluettelo

<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Työn tausta ja tavoitteet.....	1
1.2 Puun pienpolton hiukkaspäästöt.....	4
1.2.1 Hiukkaspäästöjen ominaisuudet.....	4
1.2.2 Kaasumaiset päästöt ja orgaaniset hiukkaset.....	8
1.2.3 Noki.....	9
1.2.4 Hiiltojäännöshiukkaset.....	10
1.2.5 Tuhka.....	10
1.3 Hiukkaspäästöjen vähentäminen sähkösuodattimella.....	14
1.3.1 Hiukkasten sähköiset ominaisuudet.....	14
1.3.2 Sähkösuodattimen toimintaperiaate.....	17
1.4 Sähkösuodattimen toimintaan vaikuttavat parametrit.....	21
1.4.1 Sähkökenttä ja sähkökentän voimakkuus.....	21
1.4.2 Kenttävoimakkuuden jakauma.....	23
1.4.3 Koronan syttymisjännite ja koronan syttymiskentän voimakkuus.....	24
1.4.4 Virta-jännite-suhde.....	24
1.4.5 Sähköinen liikkuvuus.....	25
1.4.6 Dielektrisyysvakio.....	26
1.4.7 Hiukkasen varausluku ja saturaatiovaraus.....	27
1.4.8 Hiukkasten siirtymisnopeus, suodattimen erotustehokkuus ja erotusaste.....	29
<b>2 AINEISTO JA MENETELMÄT</b> .....	<b>31</b>
2.1 Koejärjestelyt.....	31
2.1.1 Mittausten tavoitteet ja näytteenkeräys.....	31
2.1.2 Pellettipoltin ja kattila.....	31
2.1.3 Sähkösuodatin.....	31
2.2 Mittaukset.....	32
2.2.1 Palamisaerosolin laimennus.....	32
2.2.2 Lukumääräkokojakaumamittaukset.....	33
2.2.3 Massakokojakaumamittaukset.....	34
2.2.4 Hiukkasten kerääminen aerosolikeräimellä.....	34
2.2.5 Kaasumittaukset.....	34
2.3 Analyysit.....	34
2.3.1 Gravimetrinen analyysi.....	34
2.3.2 Hiilianalyysi.....	35
2.3.3 Ionianalyysi.....	37
2.3.4 Metallianalyysi.....	37
2.3.5 Mikroskooppianalyysi.....	38
2.4 Yhteenveto mittauksista ja analyyseista.....	38
2.5 Sähkösuodattimen virta-jännite-suhde.....	40
2.6 Sähkösuodattimen erotustehokkuus virran ja jännitteen funktiona.....	40
2.7 Hiukkasten varausluvun laskennallinen tarkastelu.....	40
2.8 Tulosten esittäminen.....	40
<b>3 TULOKSET</b> .....	<b>43</b>
3.1 Kaasumittaukset.....	43
3.2 Sähkösuodattimen virta-jännite-suhde.....	43

3.3 Sähkösuodattimen erotustehokkuus virran ja jännitteen funktiona .....	44
3.4 Lukumääräjakauma.....	48
3.5 Massajakauma.....	50
3.6 Kemiallinen koostumus .....	52
3.7 Mikroskooppianalyysi .....	56
3.8 Hiukkasten varausluvun laskennallinen tarkastelu .....	57
<b>4 TULOSTEN TARKASTELU .....</b>	<b>59</b>
4.1 Sähkösuodattimen erotustehokkuus.....	59
4.2 Sähkösuodattimen vaikutus hiukkasten tuhka-hiili-suhteeseen.....	60
<b>5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....</b>	<b>61</b>
<b>KIITOKSET.....</b>	<b>61</b>
<b>KIRJALLISUUS.....</b>	<b>62</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>77</b>

## KÄYTETYT SYMBOLIT, LYHENTEET JA LUONNONVAKIOT

### Latinalaiset

#### Isot kirjaimet

$A_{NE}$	keräyselektrodin pinta-ala	$m^2$
$C_c$	Cunninghamin liukukorjauskerroin	–
$D$	hiukkasen diffuusiokerroin	–
$E$	sähkökentän kenttävoimakkuus	V/m
$E(R)$	kenttävoimakkuuden jakauma	–
$E_0$	koronan syttymiskentän voimakkuus	V/m
$F_E$	hiukkasen aiheuttama sähkökenttävoimakkuus	V/m
$H_u$	kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	MJ/kg
$H_w$	kosteuden haihduttamiseen kuluva lämpömäärä	MJ/kg
$I$	sähkövirta	A
$K_E$	hiukkasen ominaisuuksista riippuva vakio (Coulomb force constant)	$9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$
$N_i$	ionien konsentraatio	–, $1/\text{m}^3$
$Q$	hiukkasen varausluku	As
$Q_p^\infty$	hiukkasen saturaatiovarausluku	As
$Q_s$	savukaasumäärä normaalitilassa	$\text{m}^3/\text{MJ}$
$R$	säteen suuntainen sijainti putkimallisessa sähkösuodattimessa	cm
$S$	Southerlandin vakio	110,4 K
$T$	lämpötila	°C
$T_e(d_p)$	hiukkaskoosta riippuva erotusaste	–
$T_e$	suodattimen kokonaiskeräystehokkuus	–
$U$	jännite	kV
$U_0$	koronan syttymisjännite	kV
$V$	kaasun tilavuusvirta	$\text{m}^3/\text{s}$
$V_{TE}$	hiukkasen sähköinen loppunopeus	$\text{m}^2/\text{Vs}$
$\Delta W$	purkaus- ja keräyselektrodien välisen potentiaaliero	V
$Z$	hiukkasen sähköinen liikkuvuus	$\text{m}^2/\text{Vs}$

## Pienet kirjaimet

$b_i$	ionien liikkuvuus	0,00015 m <sup>2</sup> /Vs
$c$	valon nopeus	299 792 458 m/s
$c_{CO_2}$	CO <sub>2</sub> -pitoisuus	m <sup>3</sup> n/MJ
$\bar{c}_i$	ionin termien keskinopeus	240 m/s
$c_m$	epäpuhtauspitoisuus kuivassa kaasussa normaalitilassa	mg/m <sup>3</sup>
$c_{N_2}$	N <sub>2</sub> -pitoisuus	m <sup>3</sup> n/MJ
$c_{O_2}$	O <sub>2</sub> -pitoisuus	m <sup>3</sup> n/MJ
$c_Q$	kaasuionien pitoisuus	V/m
$c_{SO_2}$	SO <sub>2</sub> -pitoisuus	m <sup>3</sup> n/MJ
$d_g$	geometrinen keskihalkaisija	μm
$d_p$	hiukkasen halkaisija	nm, μm
$d_t$	keräyselektrodin halkaisija	m
$d_w$	purkauselektrodin halkaisija	m
$e$	alkeisvaraus	1,6 x 10 <sup>-19</sup> C
$i_{tot}$	koronavirta	mA
$j_{NE}$	virrantiheysjakauma	A/m <sup>2</sup>
$k$	Boltzmannin vakio	1,380 x 10 <sup>-23</sup> J/K
$k_{pa}$	polttoaineen kosteudesta johtuva kerroin	–
$n$	lukumäärä	
$p$	paine	bar
$q$	hiukkasen varaus	C
$q_e$	ominaispäästö sisään syötettyä energiayksikköä kohti	mg/MJ
$q_g$	geometrinen keskihajonta	μm
$r_{NE}$	keräyselektrodin keskisäde	m
$r_Q$	aikavakio	ms
$r_{SE}$	purkauselektrodin efektiivinen säde	m
$t$	aika	s
$w_{th}$	hiukkasen radiaalinen siirtymisnopeus	m/s

### Kreikkalaiset

$\delta$	kaasun suhteellinen tiheys	–
$\varepsilon$	hiukkasen dielektrisyysvakio	As/Vm
$\varepsilon_r$	hiukkasen suhteellinen permittiivisyys	–
$\varepsilon_0$	tyhjiön dielektrisyysvakio	$8,86 \times 10^{-12}$ As/Vm
$\eta$	kaasun viskositeetti	Ns/m <sup>2</sup> , kg/ms, Pas
$\lambda$	elektronin vapaa matka, ilmakerroin	m, $\mu$ m –
$\lambda_0$	molekyylin vapaa matka (ilmassa)	m, $\mu$ m
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti	–
$\omega$	hiukkasen tehollinen nopeus keräyselektrodia kohti	m/s

### Lyhenteet

CPC 3776	TSI condensation particle counter 3776
DLPI	(Dekati low pressure impactor) Dekati alipaineimpaktori
DMA 3081	TSI differential mobility analyzer 3081
EC	(elemental carbon) epäorgaaninen hiili
EC 3080	TSI electrostatic classifier 3080
ESP	(electrostatic precipitator) sähkösuodatin
OVOC	(oxygenated volatile organic compound) hapettunut haihtuva orgaaninen yhdiste
PAH	(polycyclic aromatic hydrocarbon) polyaromaattinen hiilivety
POM	(particle organic matter) hiukkasfaasiin kuuluva orgaaninen aine
RH	(relative humidity) suhteellinen kosteus
SLCF	(short-lived climate forcers) lyhytvaikutteinen ilmastonmuutosta aiheuttava yhdiste
SLCP	(short-lived climate pollutants) lyhytvaikutteinen ilmastonmuutosta aiheuttava saastuttava aine
SMPS 3936	TSI scanning mobility particle sizer 3936
SOA	(secondary organic aerosol) sekundäärinen orgaaninen aerosoli
SVOC	(semivolatile organic compound) puolihaihtuva orgaaninen yhdiste
TEM	(transmission electron microscope) läpäisyelektronimikroskooppi
VOC	(volatile organic compound) haihtuva orgaaninen yhdiste



VVOC (very volatile organic compound) erittäin haihtuva orgaaninen yhdiste

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Kasvihuonekaasujen vähentämisvelvoitteet sekä fossiilisten polttoaineiden säästämistarve ovat lisänneet uusiutuvien polttoaineiden, kuten puun, käyttöä energian tuotannossa. Uusiutuvan energian direktiivi (2009/28/EY) velvoittaa Suomea nostamaan uusiutuvan energian käytön osuuden energian loppukulutuksesta nykyisestä 28 %:sta 38 %:in vuoteen 2020 mennessä.

Suomessa arvioidaan olevan 2,2 miljoonaa tulisijaa sekä 1,5 miljoonaa saunan kiuasta (Hyttönen ym. 2008). Vuonna 2011 puupolttoaineiden kokonaiskäyttö Suomessa oli 30,1 TWh (Tilasto 2013d). Puun pienkäytön määrä oli 16,5 TWh, mikä vastasi 4,3 % energian kokonaiskulutuksesta (Tilasto 2013c) ja 54,8 % puuenergian kokonaiskulutuksesta. Asumisen energiankulutus oli 61,9 TWh, josta puupolttoaineiden osuus oli 22,7 % (14,1 TWh) (Tilasto 2013a, Tilasto 2013b). Saunojen lämmitykseen puupolttoainetta käytettiin 1,8 TWh (Tilasto 2013a), mikä vastasi 5,9 % puuenergian kokonaiskulutuksesta. Kansallisen energia- ja ilmastostrategian (2013) tavoitteiden mukaan vuonna 2030 rakennusten lämmitykseen kuluvan puupolttoaineiden määrän tulisi olla 14,7 TWh, mikä vastaa 4,1 % lisäystä vuoden 2011 puun pienpolton määrään rakennusten lämmityksessä. Vuonna 2030 puun pienpolton määrän energian kokonaiskulutuksessa tulisi olla 14 TWh ja pellettien kokonaiskäytön 1,3 TWh.

Suomessa biomassan pienpoltto, eli alle 10 MW:n polttolaitteissa tapahtuva poltto, tulee lisääntymään (Karvosenoja & Johansson 2003, IEA 2012). Ympäristöministeriön tukijärjestelmä (Avustukset lämmitystapamuutoksille uusiutuvan energian käyttöön ottamiseksi) tukee uusiutuvaa energiaa, kuten pellettiä, hyödyntävien lämmitystapojen käyttöönottoa saaneerattaessa sähkö- ja öljylämmitteisiä taloja. Tuen määrä oli vuonna 2011 yhteensä 30 miljoonaa euroa ja 2012 10 miljoonaa euroa (VNA 2006/128, Kansallinen energia- ja ilmastostrategia 2013). Ympäristöministeriön teettämän selvityksen mukaan puupohjaisten lämmityspolttoaineiden (pelletti, hake ja pilke) kulutuksen lisäys vuodesta 2012 vuoteen 2030 mennessä olisi 290 000 t/a, mikä vastaa 1,3 TWh lämmitysenergiaa ja 8,8 % vuonna 2030 rakennusten lämmitykseen kuluvasta puupolttoaineesta (Kansallinen energia- ja ilmastostrategia 2013).

Puun panospoltoon perustuva pienpoltto on osoitettu pienhiukkasten, polyaromaattisten hiilivetyjen (PAH) sekä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) emissioiden suurimmaksi lähteeksi Euroopassa (Van Dingenen ym. 2004, Glasius ym. 2006, Lanz ym. 2008, Bari ym. 2009, Caseiro ym. 2009, Szidat ym. 2009, Tissari ym. 2009). Vuonna 2000 puun pienpoltossa muodostuvien alle 2,5 µm:n kokoisten hiukkasten (PM<sub>2,5</sub>) päästöiksi Suomessa mitattiin 7 600 t, joka vastasi 25 % PM<sub>2,5</sub>-kokonaispäästöistä (Karvosenoja ym. 2008). Puupolttoaineen korkean hiilipitoisuuden (47 – 52 % kuiva-aineesta) (Jenkins ym. 1998, Lillieblad ym. 2004, Wei ym. 2005, Van Loo & Koppejan 2008) vuoksi puun pienpolton on Suomessa todettu olevan liikenteen ohella suurimpia hiilihiukkasten (noki ja hiiltojännös) päästölähteitä (Krecl 2008, Tissari ym. 2008a, Tissari ym. 2008b, Tissari ym. 2009, Kansallinen energia- ja ilmastostrategia 2013). UNEP:n ja Arktisen neuvoston Task Force:n vuoden 2011 teknisen raportin arvion mukaan nokipäästöt Suomessa laskevat vuoden 2000 tasosta (yli 7 000 t) 3 500 tonniin vuoteen 2020 mennessä. Nokipäästöjen lasku säävytetään erityisesti vähentämällä puun pienpolton hiukkaspäästöjä lisäämällä pelletin osuutta puupolttoainekulutuksessa ja asentamalla kotitalouksien savukaasukanaviin sähkösuodatin (Arctic Council 2011).

Biomassan poltto tuottaa pienhiukkasia, joilla on todettu olevan haitallisia terveysvaikutuksia (Dockery ym. 1993, Schwartz ym. 1996, Samet ym. 2000, WHO 2003, Zelikoff ym. 2003, Kappos ym. 2004, Pope & Dockery 2006, Salonen & Pennanen 2007, Gustafson 2009, Hänninen ym. 2010, Pekkanen 2010, Pekkanen ym. 2010). Erityisesti alle mikrometrin kokoisten (PM<sub>1</sub>) hiukkasten (Pope 2000, Pope ym. 2004) sekä orgaanisten yhdisteiden ja sulfaattihiukkasten (Durant ym. 1996, Lighty ym. 2000, Fernandez ym. 2001, Kennedy 2007) on todettu aiheuttavan astmaattisia oireita, hengityselinsairauksia, sydän- ja verenkiertoelimistön sairauksia sekä syöpää ja johtavan kuolemaan (Pekkanen 2010). Zelikoff ym. (2002), Jalava ym. (2005), Barregard ym. (2006) ja Jalava ym. (2010) ovat havainneet pienpoltossa tyypillisessä alhaisessa happipitoisuudessa syntyvien hiukkaspäästöjen lisäävän akuuttia solutoksisuutta, apoptoosia sekä DNA-synteesin vähenemistä. Ihmisten terveyden kannalta hiukkasten lukumääräpitoisuuden on todettu olevan tärkeämpi tekijä kuin hiukkasten massapitoisuuden (Schwartz ym. 1996, Peters ym. 1997, Maynard & Maynard 2002, Klippel & Nussbaumer 2006). Puun pienpolton haitallisuutta lisää se, että pienpoltto tuottaa päästöt matalalla emissiokorkeudella (Boman ym. 2003, Karvosenoja & Johansson 2003). Tämä korostuu erityisesti talvikuukausina, jolloin pienpolton osuus asuntojen lämmityksessä lisääntyy ja ilman sekoittuminen on heikkoa inversion vaikutuksesta.

Puun polton hiukkasilla on suoria ja epäsuoria ilmastovaikutuksia. Biomassan poltossa syntyvät hiukkaset, erityisesti niiden sisältämä alkuainehiili (ns. musta hiili eli noki) ja epätäydellisen palamisen tuotteet, vaikuttavat suoraan ilmastoon absorboimalla ja sirottamalla auringonvaloa (Reid ym. 2005a). Epäsuora ilmastovaikutus hiukkasilla on pilvien muodostumisen kautta (Yu 2000, Ramanathan ym. 2001, Andreae ym. 2004, Graf 2004, Reid ym. 2005b, Seinfeld & Pandis 2006, Moffet & Prather 2009). Arktisten alueiden ilmaston on havaittu lämpenevän nopeammin kuin globaalin ilmaston ja on arvioitu, että 20 – 50 % tästä lämpenemisestä johtuisi noesta (Arctic Council 2011, Kansallinen energia- ja ilmastostrategia 2013).

Terveys- ja ympäristövaikutustensa vuoksi puun pienpolton hiukkaspäästöjä tullaan rajoittamaan lainsäädännöllisin keinoin (Bylaw No. 1087, Direktiivi 1999/30/EC, IPCC 2007, Krzyzanowski & Cohen 2008). Pienpoltoa on useissa teollisuusmaissa ryhdytty rajoittamaan tai kokonaan kieltämään taajama-alueella. EU-alueella on astumassa voimaan tulisijoille tiukkoja kansallisia päästörajoituksia. Esimerkiksi Sveitsissä ollaan tulisijoille vuoden 2015 alusta asettamassa päästörajaksi 40 mg/Nm<sup>3</sup>. Saksassa päästörajaksi ollaan asettamassa vuoden 2015 alusta 20 mg/Nm<sup>3</sup> ja myöhemmin 12 mg/Nm<sup>3</sup>.

Osana YK:n ja Euroopan Unionin vuodelle 2020 asettamia tavoitteita kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi, uusiutuvan energiantuotannon lisäämiseksi ja energiatehokkuuden parantamiseksi Suomen on vähennettävä päästökaupan ulkopuolella olevien toimintojen päästöjä 16 % (myöhemmin 23 %) vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä (VNS 2008, Kansallinen energia- ja ilmastostrategia 2013). Vuonna 2009 valtioneuvosto on selonteossaan asettanut Suomen tavoitteeksi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 80 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä (VNS 2009). Lisäksi Suomi on sitoutunut lyhytvaikutteisten ilmastonmuutosta aiheuttavien yhdisteiden (short-lived climate pollutants, SLCP / short-lived climate forcers, SLCF) päästövähennyksiin (Arctic Council 2011). Tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi alailmakehän otsoni, metaani ja musta hiili (noki), jota pidetään polttoperaisten pienhiukkasten pitoisuuden mittana. Kaukokulkeutumisopimuksen moniaine-monivaikutus-pöytäkirjassa (Göteborgin pöytäkirja) Suomea veloitetaan pienhiukkaspäästöjen ja niissä olevan mustan hiilen vähentämiseen (SoPS 40/2005).

Suurissa polttolaitoksissa käytetään kehittynyttä polttotekniikkaa, minkä ansiosta polttoaineen palaminen on tehokasta ja stabiilin polttoprosessin aikana hiiltä sisältävien päästökomponenttien määrä alhainen. Tästä johtuen ei ole ollut erityistä tarvetta kehittää ja tutkia runsaasti hiiltä sisältävien palamishiukkasten sähkösuodatusta. Sen sijaan pienpoltto, erityisesti puun panospoltto, tuottaa usein runsaasti kaasumaisia ja hiukkasmaisia epätäydellisen palamisen hiilipäästöjä. Pienpolton savukaasujen hiukkaspuhdistusta, erityisesti hiilipäästöjen vähentämistä, koskevia julkaisuja on vähän. Euroopassa on tällä hetkellä kolme pienpolttoon kehitettyjä sähkösuodattimia kaupallisesti tarjoavaa yritystä (Ganz Baukeramik AG, OekoSolve AG ja Rüegg Chéminee AG).

Tämän tutkimuksen hypoteesina on, että poltossa muodostuvat hiilihiukkaset ovat niiden sähkönjohtavuuden ja alhaisemman dielektrisyysvakion vuoksi vaikeammin varattavia kuin tuhkahiukkaset, minkä vuoksi myös niiden erotustehokkuus sähkösuodattimessa on tuhkahiukkasia heikompi. Työn tavoitteena on selvittää, kuinka tehokkaasti tämän tutkimuksen yhteydessä kehitetty sähkösuodatin vähentää pelletin poltossa muodostuvia hiukaspäästöjä. Tarkoituksena on tutkia, kuinka tehokkaasti sähkösuodatin puhdistaa pienpolton palamishiukkasten hiili- ja tuhkakomponentteja ja kuinka sähkösuodatin muuttaa pienpolton palamishiukkasten tuhka-hiili-suhdetta.

## **1.2 Puun pienpolton hiukaspäästöt**

### **1.2.1 Hiukaspäästöjen ominaisuudet**

Palamisaerosoli on savukaasun kaasujen, höyryjen ja hiukkasten muodostama dynaaminen seos. Höyry tarkoittaa kaasumaista yhdistettä, joka voi tiivistyä ympäristön lämpötilassa (Housecroft & Constable 2006, Porteous 2008). Aerosolihiukkasten koko vaihtelee kokoalueella 1 nm – 100 µm (Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000). Hiilivetyjen täydellisen palamisen tuotteiden (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ja O<sub>2</sub>) lisäksi savukaasun sisältämiä yhdisteitä ovat CO, H<sub>2</sub>, osittain palaneet hiilivedyt, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl sekä kiinteät hiukkaset (Flagan & Seinfeld 1988, Oser ym. 2001, Boman ym. 2004). Biopolttoaineen poltossa vapautuvasta hiilestä noin 90 % hapettuu CO<sub>2</sub>:ksi tai CO:ksi ja alle 5 % vapautuu hiukaspäästöinä (Radke ym. 1991, Andreae ym. 1998).

Aerosolihiukkasten fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet riippuvat voimakkaasti hiukkaskoosta. Monodisperssin aerosolin hiukkaskoko määritetään hiukkasen halkaisijana. Po-

lydisperssin aerosolin hiukkasten halkaisijat voivat vaihdella useita kertaluokkia ja erikoisia hiukkasia on lukumääräpitoisuudeltaan vaihtelevasti. Tämän takia aerosolin kokojakaumaa kuvataan kokojakaumakuvaajilla, tavallisesti histogrammeilla (Hinds 1998, Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000, Walter 2001, Seinfeld & Pandis 2006). Normalisoidussa histogrammissa pylväiden korkeudet vastaavat hiukkasten lukumäärää kokoluokan yksikköä kohti ( $N/\mu\text{m}$ ), eri levyisten pylväiden korkeudet ovat vertailukelpoisia ja pylväiden ala on suhteessa kyseisen kokoluokan hiukkasten lukumäärään tai osuuteen. Pylvään korkeus ilmoittaa kyseiselle hiukkaskokovälille kuuluvan hiukkaskokomäärän tai osuuden lukumääräpitoisuutena tai massana hiukkaskoon funktiona. Koska aerosolien normaalijakaumafunktiot ovat tavallisesti oikealle vinoja (pitkä häntä suurissa kokoluokissa) ja suurimman ja pienimmän arvojen suhde on suurempi kuin 10, jakaumat esitetään log-normaaleina jakaumina (yhtälö 1) (Hinds 1998, Cooper 2001, Walter 2001, Seinfeld & Pandis 2006).

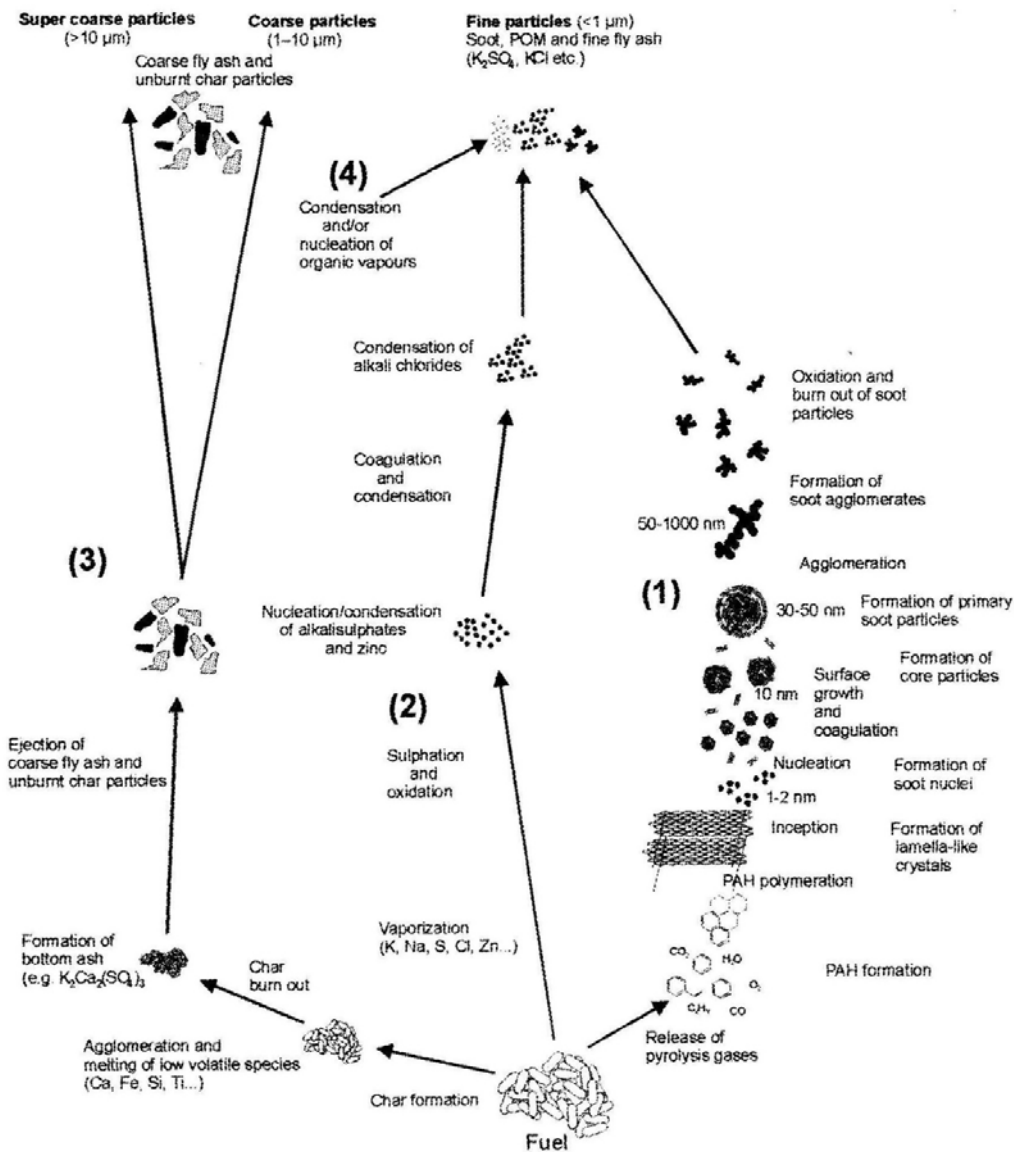
$$f(d) = \frac{1}{d \ln q_g (2\pi)^{0,5}} \exp \left[ -\frac{(\ln d - \ln d_g)^2}{2 \ln^2 q_g} \right] \quad (1)$$

jossa  $d_g$  geometrinen keskihalkaisija ( $\mu\text{m}$ ) ja  $q_g$  geometrinen keskihajonta ( $\mu\text{m}$ ) (Herdan 1980).

Aerosolihiukkasten kokoluokitus perustuu Stokesin ekvivalentin läpimitan tai aerodynaamisen halkaisijan mittaamiseen. Stokesin ekvivalentti läpimitta on läpimitta, joka antaa pallomaiselle hiukkaselle saman laskeutumisenopeuden (liikkuvuuden) kuin todelliselle hiukkaselle, jolla on sama tiheys. Aerodynaaminen läpimitta on standarditiheyden ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) omaavan pallomaisen hiukkasen läpimitta, jolla on sama gravitaatiollinen laskeutumisenopeus kuin havaitulla hiukkasella (Hinds 1998, Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000, Seinfeld & Pandis 2006).

Biopolttoaineiden savukaasun hiukkaskokojakauma on usein bimodaalinen (Lind 1999, Valmari ym. 1999, Lillieblad ym. 2004, Tissari ym. 2008b, Sippula ym. 2009a, Sippula ym. 2009b, Lamberg ym. 2011). Kiinteiden polttoaineiden polttoprosessissa karkeat hiukkaset ( $d_p > 1 \mu\text{m}$ ) muodostuvat osittain palaneesta tai palamattomasta polttoaineesta ja tuhasta (kuva 1) (Flagan & Seinfeld 1988, Wiinikka & Gebard 2004, Seinfeld & Pandis 2006). Pienhiukkasmoodi muodostuu epätäydellisessä palamisprosessissa syntyvistä nokihiukkasista (Wiinikka & Gebart 2004), orgaanisista yhdisteistä nukleoituista haihtuvista

hiukkasista sekä tuhkakomponenteista, jotka höyrystyvät polttoprosessissa ja jäähtyessään saturoituvat ja muodostavat pienhiukkasia nukleoitumalla (Hinds 1998, Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000, Seinfeld & Pandis 2006). Nukleoituneet hiukkaset kasvavat edelleen palotilassa koagulaation, agglomeraation ja pintareaktioiden kautta sekä kondensaation kautta savukaasuolosuhteissa (Christensen ym. 1998, Hinds 1998, Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000, Seinfeld & Pandis 2006). Pienhiukkasmoodi (akkumulaatiomoodi) sisältää yleensä 80 – 90 % savukaasun hiukkasten lukumääräpäästöistä (Radke ym. 1991, Liousse ym. 1995, Reid ym. 2005b).



Kuva 1. Noen (1), lentotuhkan (2), karkeiden hiukkasten (3) ja orgaanisten yhdisteiden (4) muodostuminen puun pienpoltossa (Bockhorn 1994, Ishiguro ym. 1997, Wiinikka 2005).

Palamisprosessissa muodostuneita hiukkasia kutsutaan primaarihiukkasiksi. Alkuperänsä ja muodostumismekanisminsa mukaan primaarisia pienhiukkasia ovat epäorgaaninen tuhka ja noki (alkuainehiili) (Lighty ym. 2000). Polttoprosessissa vapautuneiden kaasujen ja höyryjen myöhemmin ilmakehässä muodostamia pienhiukkasia kutsutaan sekundäärisiksi hiukkasiksi. Sekundäärihiukkaset voivat olla havaittavissa mittaustuloksissa kolmantena moodina, joka koostuu ultrahienoista ( $d_p < 100$  nm) hiukkasista (Flagan & Seinfeld 1988, Kittelson 1998, Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000, Seinfeld & Pandis 2006).



### 1.2.2 Kaasumaiset päästöt ja orgaaniset hiukkaset

Kuumennettaessa puupolttoaine hajoaa ja muodostaa höyrynpaineeltaan ja molekyyliarakenteeltaan erilaisia orgaanisia yhdisteitä, jotka osallistuvat sekundaarisen orgaanisen aerosolin (secondary organic aerosol SOA) muodostumiseen (Robinson ym. 2007, Kroll & Seinfeld 2008, Warneke ym. 2011). Orgaaniset yhdisteet jaotellaan kiehumispisteensä mukaisesti erittäin haihtuviin (very volatile organic compounds VVOC, kiehumispiste  $< 0 - 50 \dots 100$  °C), haihtuviin (volatile organic compounds VOC, kiehumispiste  $50 - 100 \dots 240 - 260$  °C) ja puolihaihtuviin (semivolatile organic compounds SVOC, kiehumispiste  $240 - 260 \dots 380 - 400$  °C) yhdisteisiin sekä hiukkasmaisiin yhdisteisiin (particle organic matter POM) (Tucker 2001). Puolihaihtuvien yhdisteiden jakaantuminen kaasua- ja hiukkasfaaseihin sekä adsorboituminen hiukkasten pinnalle riippuvat yhdisteen konsentraatiosta, yhdisteen höyrynpaineesta eli haihtuvuudesta sekä kaasussa olevien hiukkasten pinta-alapitoisuudesta (Yamasaki ym. 1982, Van Cauwenberghe 1986, Rounds & Pankow 1990, Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000, Fan ym. 2003). Yhdisteiden jakautuminen kaasufaasiin ja adsorboituminen hiukkasten pinnalle vaikuttavat yhdisteiden reaktiivisuuteen ilmakehässä ja sitä kautta ympäristö- ja terveysvaikutuksiin (Lammel ym. 2009).

Biomassan polton on todettu tuottavan satoja erilaisia orgaanisia yhdisteitä, esimerkiksi metaania (Schauer ym. 2001, Johansson ym. 2004, Tissari ym. 2007), karsinogeenisiä PAH-yhdisteitä (Flagan & Seinfeld 1988, Huotari & Vesterinen 2002, Tissari ym. 2007), erityisesti bentseeni ja bentso(a)pyreeni (Hedberg ym. 2002, Evtyugina ym. 2013), sekä hapettuneita VOC-yhdisteitä (oxygenated volatile organic compounds OVOC) (Christian ym. 2004, Warneke ym. 2011, Evtyugina ym. 2013), isoprenejä (Bajus 2010, Evtyugina ym. 2013) ja monoterpeenejä (Evtyugina ym. 2013). Hedberg ym. (2002), Tissari ym. (2007) ja Akagi ym. (2011) havaitsivat heksanaalin, aldehydien, metanolin, asetaatti- ja muurahaishapon sekä furaanin muodostavan valtaosan haihtuvista orgaanisista päästöistä.

Puunpoltossa valtaosan orgaanisista pienhiukkasista muodostavat selluloosan monosakkaridijohdannaiset ja vähäisemmässä määrin polttoaineen sisältämät biopolymeerit, kuten alifaattiset hapettuneet yhdisteet ja terpeenit (Simoneit ym. 1999). Savukaasussa orgaaniset höyryt kondensoituvat ja/tai adsorboituvat kiinteiden noki- ja tuhka hiukkasten pinnalle (Van Cauwenberghe 1986, Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000, Pyykönen ym. 2007, Tissari ym. 2008a). Korkeassa noki- ja tuhka hiukkaspitoisuudessa puolihaihtuvat yhdisteet adsorboituvat hiukkasten pinnalle. Savukaasun laimenemisesta johtuva nopea lämpötilan alene-

minen aiheuttaa haihtuvien orgaanisten höyryjen homogeenista nukleatiota (Van Cauwenberghe 1986, Shi & Harrison 1999, Lipsky & Robinson 2005, Pyykönen ym. 2007). Ilmakehässä aerosolin orgaaniset hiukkaset haihtuvat ja hapettuvat (Robinson ym. 2007).

Puupolttoaine sisältää vähän typpeä (0,07 – 0,9 % kuivapainosta) ja rikkiä (0,01 – 0,076 % kuivapainosta) sekä haihtuvia alkalimetalleja ja klooria (Wei ym. 2005, Moilanen 2006, Masiá ym. 2007, Tissari ym. 2008b, Van Loo & Koppejan 2008) aiheuttaen vähän NO<sub>x</sub>-, SO<sub>2</sub>- ja HCl- päästöjä. Polttoaineen tyyppi hapettuu polttoprosessin aikana NO<sub>x</sub>-yhdisteiksi sekä N<sub>2</sub>O:ksi (Flagan & Seinfeld 1988, Seinfeld & Pandis 2006). Rikki hapettuu SO<sub>x</sub>:ksi ja voi muodostaa edelleen rikkihappoa (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Puun poltossa rikki reagoi lisäksi polttoaineen sisältämän kaliumin ja kloorin kanssa aiheuttaen hiukkaspäästöjä.

### 1.2.3 Noki

Nokihiukkaset muodostuvat liekin sisällä polttoainerikkaissa olosuhteissa kaasumaisista hiilivedyistä, kevyistä orgaanisista yhdisteistä ja epätäydellisesti palaneista pyrolyysikaasuista, jotka muuttuvat kiinteäksi sen sijaan, että hapettuisivat CO:ksi tai CO<sub>2</sub>:ksi (Flagan & Seinfeld 1988). Alhaisessa lämpötilassa aromaattiset hiilivedyt tuottavat nokea suoraan muodostamalla grafiitin tapaisia rakenteita. Korkeammassa lämpötiloissa alifaattiset ja aromaattiset hiilivedyt fragmentoituvat ja polymerisoituvat suuremmiksi nokihiukkasiksi (Amann & Sieglä 1981, Seinfeld & Pandis 2006, Glassman & Yetter 2008).

Noen muodostumisen ensimmäisessä vaiheessa ylikylläisessä tilassa olevat PAH-yhdisteet polymerisoituvat ja muodostavat molekyyliyrppäitä, jotka tulevat stabiileiksi. Tällä tavoin nukleoitumalla muodostuneet 1 – 2 nm:n nokihiukkasytimet kasvavat edelleen pintareaktioiden kautta ja muodostavat noin 10 nm:n kokoisia primaarihiukkasia. Pintareaktiossa näiden hiukkasten pinnalle sitoutuu edelleen PAH-yhdisteitä (Flagan & Seinfeld 1988, Bockhorn 1994, D'Anna ym. 1994, Ishiguro ym. 1997, Seinfeld & Pandis 2006). Dehydrogenaatioprosessissa primaarihiukkasten C/H-suhde kasvaa ja veden poistuessa hiukkasista tulee kiinteitä. Primaarihiukkasten pinta koostuu stabiilista alkuainehiilestä (elemental carbon, EC) (Ishiguro ym. 1997, Seinfeld & Pandis 2006). Koska primaarihiukkasten lukumääräpitoisuus liekissä on korkea, nokiagglomeraatit muodostuvat nopeasti. Useimmat nokihiukkaset palavat liekin happirikkaassa vyöhykkeessä, mutta osa noin 30 – 50 nm:n kokoisista nokiagglomeraateista poistuu liekistä palamatta (Amann & Sieglä 1981, Wii-

nikka 2005). Liekistä vapautuneiden nokihiukkasten koko ja lukumäärä riippuvat noen happettumisen tehokkuudesta liekissä.

Noen muodostumiseen vaikuttavat palamisolosuhteet, polttoaine ja kaasumaisten yhdisteiden laatu (Bartok & Sarofilm 1991, Seinfeld & Pandis 2006) sekä liekin tyyppi (Amann & Siegl 1981). Erityisesti palamislämpötila, happipitoisuus sekä polttoaineen diffuusio- ja esisekoitettu palaminen vaikuttavat merkittävästi nokihiukkasten prekursorien eli esiaseteiden kemialliseen aktiivisuuteen sekä nokihiukkasen pinta-alan ja massan kasvuun (Kozinski & Saade 1998, Seinfeld & Pandis 2006). Pienpoltossa puun diffuusiopalamisessa palamiskaasujen ja ilman sekoittuminen on tavallisesti riittämätöntä ja liekkirintama sisältää polttoainerikkaita alueita. Diffuusioliekin pyrolyysivyöhykkeessä korkea happipitoisuus voi lisätä noen muodostumista, koska polttoaineen happi katalysoi pyrolyysireaktiota (Flagan & Seinfeld 1988).

#### 1.2.4 Hiiltojäännöshiukkaset

Hiiltojäännös on palamatonta, hiiltynyttä polttoainetta. Hiiltojäännöshiukkasten muodostuminen alkaa polttoainepartikkelin palamisen loppuvaiheessa. Polttoainepartikkelin lähestyessä liekkirintamaa se joutuu voimakkaaseen lämpösäteilyyn, minkä seurauksena lämpötila nousee ja polttoaine pyrolysoituu. Polttoaineen kiinteät ja nestemäiset yhdisteet muuttuvat tervamaiseen muotoon ja jäljelle jää huokoista jäännöshiiltä. Pyrolyysistä jäljelle jäänyt hiili palaa hitaasti pintareaktioiden kautta. Suurille polttoainehiukkasille säteilystä aiheutuva lämmön nousu on liian nopea tai polttoaineen ja palamisilman sekoittuminen on liian vähäistä, jolloin jäännöshiili ei ehdi palaa kokonaan. Jäännöshiili poistuu liekistä palamattomina, noin 1 – 50 µm:n kokoisina hiukkasina savukaasuvirtaan (Flagan & Seinfeld 1988, Maskuniitty 2002).

#### 1.2.5 Tuhka

Kiinteät polttoaineet sisältävät palamattomia epäorgaanisia rakenneosia, jotka muodostavat tuhkaa polttoprosessin aikana. Puupolttoaineen tuhkapitoisuus on 0,2 – 2,0 % puun kuivapainosta ja koostumus vaihteleva (Valmari 2000, Skrifvars & Hupa 2002, Saarela ym. 2005, Werkelin ym. 2005, Van Loo & Koppejan 2008). Tuhkapitoisuus ja alkuainekoostumus vaihtelevat puun eri osissa (Skrifvars & Hupa 2002, Werkelin ym. 2005). Werkelin ym. (2005) havaintojen mukaan runkopuu sisältää 0,3 – 0,4 % tuhkaa runkopuun kuivapainosta, oksapuu 0,4 – 0,6 %, runkokuori 2,4 – 4,1 %, oksakuori 3,3 – 6,1 %, risut 2,0 – 3,9

%, neulaset 2,5 – 5,2 % sekä lehdet ja versot 3,0 – 7,5 % tuhkaa kuivapainosta. Puun tuhka sisältää lähinnä alkalimetalleja (natrium 3 – 10 paino- % tuhkasta ja kalium 15 – 30 paino- % tuhkasta) ja maa-alkalimetalleja (magnesium 10 – 20 paino- % tuhkasta ja kalsium 35 – 45 paino- % tuhkasta) sekä vähäisemmässä määrin piitä, fosforia, rikkiä ja rautaa (alle 5 paino- % tuhkasta) (Hedberg ym. 2002, Skrifvars & Hupa 2002, Tissari ym. 2007, Wiinikka ym. 2007, Pedersen ym. 2010) sekä klooria, alumiinia, kuparia, lyijyä ja sinkkiä (Hedberg ym. 2002, Werkelin ym. 2005, Tissari ym. 2007, Wiinikka ym. 2007, Pedersen ym. 2010). Puun tuhka sisältää tavallisesti enemmän kationeja muodostavia alkuaineita, kuten kalium ja kalsium, kuin anioneja muodostavia alkuaineita, kuten rikki, kloori ja fosfori (Knudsen ym. 2004).

Tuhkaa muodostavat yhdisteet ovat polttoaineen hiilimatriisiin sulkeutuneita mineraaleja ja orgaanisissa molekyyileissä olevia heteroatomeja, esimerkiksi organometalleja, rikkiä, klooria sekä alkali- ja raskasmetalleja (Jenkins ym. 1998, Zevenhoven-Onderwater 2001, Lillieblad ym. 2004, Wei ym. 2005, Tissari ym. 2008b). Kaliumin on havaittu esiintyvän puun tuhkassa pääsääntöisesti vesiliukoisessa muodossa, kloorin anionina ja kalsiumin mineraaleihin tai orgaanisiin makromolekyyleihin sitoutuneena. Rikki esiintyy tuhkassa ionimuodossa sulfaattina ja alkuaineena (Bryers 1996, Van Loo & Koppejan 2008). Vesiliukoisten ja orgaanisiin yhdisteisiin sitoutuneiden tuhkaa muodostavien komponenttien on havaittu olevan reaktiivisempia polttoprosessin aikana kuin veteen liukenemattomien mineraalien (Frandsen ym. 2007, Pettersson ym. 2008). Polttoainepartikkelin palaminen jättää tuhka jäänteitä, jotka voivat agglomeroitua ja fuusioitua tai rikkoontua pienemmiksi partikkeleiksi.

Puun palamisprosessissa tuhkaa muodostuu jäännöstuhkamekanismilla sekä homogeenisella nukleaatiolla. Jäännöstuhkan muodostuminen alkaa lämmitetyn polttoainepartikkelin pyrolysoituessa ja tullessa huokoiseksi. Palamisen aikana partikkelissa olevat huokset avautuvat ja huokoisuus lisääntyy. Lopulta partikkelit hajoavat useiksi fragmenteiksi, jotka sisältävät polttoainepartikkelissa olleita mineraaleja. Jäännöstuhkahiukkasia muodostuu polttoaineen sisälle sulkeutuneista mineraaleista polttoaineen palaessa loppuun. Muodostuvan hiukkasen koko riippuu palamisprosessista: alhaisessa palamislämpötilassa sulkeutuneet mineraalit joutuvat kosketuksiin toistensa kanssa ja muodostavat suurempia tuhkaagglomeraatteja. Agglomeraatit kasvavat yhteen ja muodostavat suuria pisaroita palaneen hiilen pinnalle. Korkeassa palamislämpötilassa tuhka sulaa ja koaguloituu pintajännityk-

sen vaikutuksesta pyöreiksi hiukkasiksi. Suurimmat jäännöstuhkahiukkaset (3 – 50  $\mu\text{m}$ ) sisältävät 5 – 30 % polttoainepartikkelin tuhkasta. Jäännöstuhkafragmenttien pienin koko (1  $\mu\text{m}$ ) määräytyy hiilessä olevien mineraalien kokojakauman perusteella (Senior & Flagan 1982, Flagan & Seinfeld 1988, Jokiniemi & Kauppinen 2002).

Homogeenisessa nukleaatiossa pieni osa tuhkaa muodostavista yhdisteistä höyrystyy. Höyrystyneistä yhdisteistä muodostuu homogeenisella nukleaatiolla pieniä hiukkasia, jotka kasvavat koagulaation ja kondensaation kautta. Korkeassa lämpötilassa tuhkakomponentit pelkistyvät, minkä seurauksena niiden höyrönpaine nousee. Tuhkakomponenttien vapautuessa polttoainehiukkasista ne hapettuvat uudelleen, mikä johtaa tuhkan höyrönpaineen alenemiseen ja höyrystyneiden tuhkakomponenttien ylikyllästymiseen. Palamiskaasujen jäähtyessä alle tuhkakomponenttien sulamispisteen neste jähmettyy ja hiukkaset kasvavat yhteen. Muodostuneet kiinteät hiukkaset agglomeroituvat ketjuiksi, jotka yhdistyvät edelleen tiiviiksi palloiksi. Koagulaatiolla kasvaneiden hiukkasten koko vaihtelee 10 – 100 nm. Loppuosa höyrystyneestä tuhkasta kondensoituu heterogeenisesti hiukkasten (mukaan lukien homogeenisella nukleaatiolla muodostuneet tuhkahiukkaset ja jäännöstuhkafragmentit) pinnalle (Flagan & Seinfeld 1988, Jokiniemi & Kauppinen 2002).

Polttoprosessin aikana palavasta polttoainepartikkelista savukaasuun vapautuneet ja höyrystyneet tuhkaa muodostavat komponentit muodostavat lentotuhkafraktion. Lentotuhkan muodostuminen riippuu polttoainetuhkan ominaisuuksista (rakenne, kemiallinen muoto ja sitoutuminen tuhkaa muodostavaan materiaaliin), polttoaineen kosteudesta, polttotekniikasta ja palamisolosuhteista (Senior & Flagan 1982, Knudsen ym. 2004, Novakovic ym. 2009). Erityisesti pelkistävät olosuhteet lisäävät lentotuhkapäästöjä pelkistyneiden tuhka-yhdisteiden korkean höyrönpaineen vuoksi (Senior & Flagan 1982). Hieno lentotuhkafraktio ja kaasumaiset yhdisteet muodostuvat haihtuvista yhdisteistä. Jäännöstuhkamekanismin yhteydessä haihtumattomat tuhkaa muodostavat komponentit muodostavat suuria tuhkahiukkasia (1 – 10  $\mu\text{m}$ ), jotka jäävät tulisijan pohjalle ja muodostavat pohjatuhkafraktion tai karkean lentotuhkafraktion (Flagan & Seinfeld 1988, Zevenhoven-Onderwater 2001).

Palamislämpötilalla on merkittävä vaikutus yhdisteiden höyrystymiseen, minkä vuoksi korkeassa lämpötilassa muodostuu enemmän pieniä tuhkahiukkasia kuin matalassa lämpö-

tilassa (Flagan & Seinfeld 1988, Davidsson ym. 2002b, Knudsen ym. 2004). Puupolttoaineessa kalium, rikki, kloori ja natrium ovat hyvin höyrystyviä. Liekin pelkistävässä vyöhykkeessä myös yhdisteet, joilla on alhaisempi höyrönpaine, esimerkiksi sinkki ja kalsium, voivat höyrystyä. Erityisesti puupelletin poltossa vapautuu huomattavia määriä höyrystyneitä alkalimetalleja (Na, K), jotka kondensoituvat ja rikastuvat pienhiukkasfaasiin jäähtyvässä savukaasussa (Christensen ym. 1998, Valmari ym. 1998, Obernberger ym. 2001, Wiinikka ym. 2006, Wiinikka ym. 2007). Biopolttoaineissa suuri osa tuhkaa muodostavista materiaaleista on ionimuodossa, suoloina tai orgaanisina yhdisteinä (Zevenhoven-Onderwater 2001, Van Loo & Koppejan 2008). Puun poltossa lentotuhkan on havaittu koostuvan pääasiassa kaliumyhdisteistä, kuten kaliumkloridista (KCl) ja kaliumhydroksidista (KOH) (Boman ym. 2004). Puhtaissa palamisolosuhteissa puupolttoaineen emittoima lentotuhkafraktio koostuu alkalisulfaateista, klorideista, karbonaateista (Valmari ym. 1998, Obernberger ym. 2001) sekä alkalihydroksideista, fosfaateista ja nitraateista (Christensen ym. 1998, Valmari ym. 1998, Wiinikka ym. 2007, Bäfver ym. 2009).

Erityisesti kloori, rikki ja mineraalit vapauttavat polttoaineeseen sitoutuneita alkalimetalleja. Alkalimetallit vapautuvat polttoainepartikkeleista pääsääntöisesti klorideina (KCl, NaCl) ja hydroksidihöyryinä (KOH, NaOH), jotka muuntuvat savukaasussa reagoimalla kaasuyhdisteiden kanssa (Baxter ym. 1998, Van Lith ym. 2006). Korkea klooripitoisuus vapauttaa alkalimetalleja muodostaen niistä haihtuvia klorideja (Olsson ym. 1997, Knudsen ym. 2004). Alkaliemissioihin vaikuttavat erityisesti K/Si- ja Cl/K-moolisuhteiden osuudet (Knudsen ym. 2004). Alhainen K/Si-suhde rajoittaa kaliumin vapautumista. Korkeassa Cl/K-suhteessa kloori estää kaliumin sitoutumisen silikaattien kanssa vapauttaen alkalimetalleja (Dayton ym. 1999, Knudsen ym. 2004). Jos läsnä on silikaatteja, alumiini ja piiyhdisteet reagoivat kaliumin kanssa ja muodostavat pysyvämpiä yhdisteitä (Jensen ym. 2000, Davidsson ym. 2002b). Korkea rikkipitoisuus estää kloorin vaikutusta sitomalla alkaliklorideja vähemmän haihtuviksi sulfaateiksi (Sippula ym. 2008). Sinkki höyrystyy korkean höyrönpaineen omaavaksi alkuaineeksi ja hapettuu, jolloin höyrönpaine laskee ja sinkkioksidi nukleoituu kaasu-hiukkas-muutunnan kautta hiukkaseksi (Weidenkaff ym. 1999, Jöller ym. 2007). ZnO-hiukkaset toimivat alkalisulfaattien tiivistymisytiminä ehkäisten niiden nukleaation (Jöller ym. 2007).

Alkalimetallien kaasu-hiukkas-muutunta alkaa sulfatoitumisella savukaasun lämpötilan laskiessa alle 1000 – 1200 °C (Baxter ym. 1998). Savukaasun saturoituessa uusia hiukkasia

muodostuu nukleaatiolla ja kondensaatiolla kaasufaasissa (Iisa ym. 1999). Alkalisulfaattien nukleaatio-kondensaatio-dynamiikka määrittää pienhiukkasten muodostumisen ja muodostuneiden hiukkasten lukumäärän. Kaasu-hiukkas-muutunnan jälkeen alkalikloridit kondensoituvat. Savukaasun sisältäessä alkalimetalleja enemmän kuin rikki ja kloori voivat sitoa, alhaisemmassa noin 700 °C lämpötilassa muodostuu alkalikarbonaatteja ja alkalihydroksideja (Christensen ym. 1998).

Maa-alkalimetallit, kuten Ca ja Mg, ovat sitoutuneina puupolttoaineen hiilimatriisin happea sisältäviin funktionaalisiin ryhmiin oksideina (CaO, MgO) (Gabra ym. 2001, Jokiniemi & Kauppinen 2002, Keown ym. 2005). Pyrolyysin ja polttoaineen kaasuuntumisen aikana maa-alkalimetallit pelkistyvät ja vapautuvat alkuaineena höyrystymällä (Dayton ym. 1995, Olsson ym. 1997, Raveendran & Ganesh 1998, Dayton ym. 1999, Jensen ym. 2000, Gabra ym. 2001, Davidsson ym. 2002a, Davidsson ym. 2002b, Jokiniemi & Kauppinen 2002, Knudsen ym. 2004) ja katalysoivat haihtuvien ja tervamaisten yhdisteiden kaasuuntumista ja palamista (Raveendran & Ganesh 1998, Zolin ym. 2001, Li ym. 2004). Kaasufaasissa Ca ja Mg muuttavat olomuotoaan toistuvasti desorptoitumalla kaasufaasiin ja adsorboitumalla hiilen pinnalle (Knudsen ym. 2004, Okuno ym. 2005), mikä vähentää maa-alkalien nettovapautumista ja lisää niiden kemiallista muuntumista stabiilimmiksi ja vähemmän haihtuviksi yhdisteiksi, kuten asetaatiksi, formaatiksi (Li ym. 2000, Quyn ym. 2002, Keown ym. 2005, Okuno ym. 2005), orgaanisiksi suoloiksi (Sathe ym. 2003), glykoliksi ja oksalaatti-ioneiksi (Okuno ym. 2005). Kaasufaasissa Ca reagoi lisäksi CO<sub>2</sub>:n ja KOH:n kanssa ja muodostaa karbonaatteja (CaCO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) (Blander ym. 1995). Maa-alkalimetallien höyrystymiseen vaikuttavat polttoaineen ominaisuuksien lisäksi maa-alkalimetallin hapeetusluku sekä polttoaineen kuumentamisnopeus ja lämpötila (Keown ym. 2005).

### **1.3 Hiukkaspäästöjen vähentäminen sähkösuodattimella**

#### **1.3.1 Hiukkasten sähköiset ominaisuudet**

Palamisprosessin aikana ja savukaasun sähköisessä suodatuksessa hiukkaset varautuvat liekki-, diffuusio- ja kenttävarautumisen mekanismeilla (Flagan & Seinfeld 1988, Riehle 1997, Hinds 1998, Flagan 2001, Parker 2003). Liekkivarautumisessa hiukkaset varautuvat muodostuessaan tai kulkeutuessaan liekin läpi. Liekin korkeassa lämpötilassa kaasumolekyylien suora ionisoituminen muodostaa positiivisia ja negatiivisia ioneja sekä termisiä elektroni- ja ioniemissioita (Hinds 1998).

Diffuusiovarautuminen perustuu savukaasussa olevien ionien ja hiukkasten Brownin liikkeeseen. Unipolaaristen ionien kanssa sekoittuneet hiukkaset varautuvat törmäysten seurauksena ionin luovuttaessa varauksensa hiukkaselle. Diffuusiovarautuminen ei edellytä ulkoista sähkökenttää eikä riipu hiukkasten koostumuksesta (Flagan & Seinfeld 1988, Riehle 1997, Hinds 1998, Flagan 2001, Parker 2003). Hiukkasen saama varauksien lukumäärä  $n$  ajan  $t$  (s) kuluttua saadaan yhtälöstä 2:

$$n(t) = \frac{d_p k T}{2 K_E e^2} \ln \left[ 1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2 k T} \right] \quad (2)$$

jossa  $d_p$  on hiukkasen halkaisija ( $\mu\text{m}$ ),  $\bar{c}_i$  ionin termien keskinopeus (240 m/s),  $N_i$  ionien konsentraatio ( $1/\text{m}^3$ ),  $K_E$  hiukkasen ominaisuuksista riippuva vakio ( $9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ) ja  $k$  Boltzmannin vakio ( $1,380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ) (Hinds 1998).

Hiukkaset saavuttavat Boltzmanin tasapainovarausjakauman (Boltzmann equilibrium charge distribution) (Hinds 1998, Flagan 2001), kun neutraalit hiukkaset varautuvat törmätyksään lämpöliikkeen vaikutuksesta ioneihin ja varautuneet hiukkaset menettävät varauksensa vetäessään puoleensa vastakkaisella varauksella varautuneita ioneja. Tasapainovarausjakauma kuvaa aerosolien varausjakaumaa, jossa bipolaaristen ionien varaukset ovat tasapainossa. Tilastollisesti tasapainovarausjakaumassa varausten määrä on pieni: osa hiukkasista on varautumattomia ja osalla hiukkasista on yksi tai useampi varaus. Nopeus, jolla aerosoli saavuttaa tasapainovarausjakauman, riippuu bipolaaristen ionien konsentraatiosta (Hinds 1998).

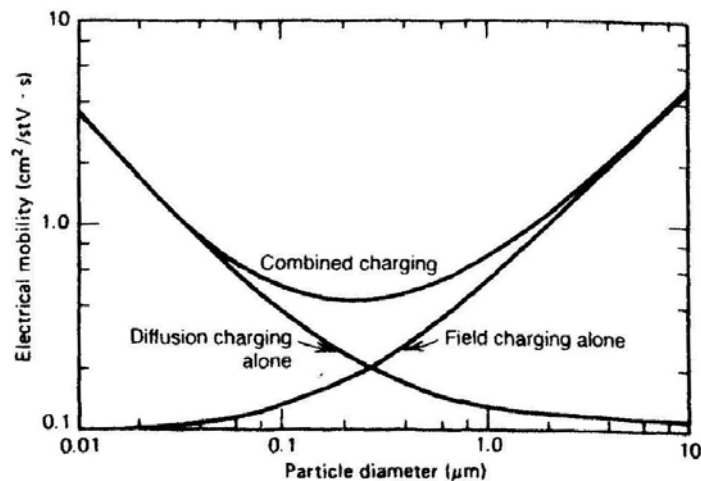
Kenttä- eli koronavarautumisessa unipolaariset ionit varaavat hiukkaset voimakkaassa sähkökentässä ionien nopean liikkeen johtaessa ionien ja hiukkasten toistuviin törmäyksiin (Flagan & Seinfeld 1988, Riehle 1997, Hinds 1998, Flagan 2001, Parker 2003). Varautumisnopeus riippuu ionien konsentraatiosta (Flagan & Seinfeld 1988, Riehle 1997, Hinds 1998, Flagan 2001, Parker 2003). Hiukkasen saama varauksien lukumäärä  $n$  ajan  $t$  kuluttua saadaan yhtälöstä 3:



$$n(t) = \left( \frac{3\varepsilon}{\varepsilon+2} \right) \left( \frac{Ed^2}{4K_E e} \right) \left( \frac{\pi K_E e b_i N_i t}{1 + \pi K_E e b_i N_i t} \right) \quad (3)$$

jossa  $E$  on sähkökentän voimakkuus (V/m),  $\varepsilon$  hiukkasen dielektrisyysvakio (As/Vm) ja  $b_i$  ionien liikkuvuus ( $0,00015 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ) (Hinds 1998).

Diffuusiovarautuminen on pääasiallinen varautumismekanismi hiukkasille, joiden halkaisija  $d_p < 0,1 \text{ }\mu\text{m}$  (kuva 2) (Hinds 1998). Kenttävarautuminen on pääasiallinen varautumismekanismi, kun kaasun ionipitoisuus ylittää  $10^{13}/\text{m}^3$  ( $10^7/\text{cm}^3$ ) sekä hiukkasille, joiden halkaisija  $d_p > 1,0 \text{ }\mu\text{m}$ .



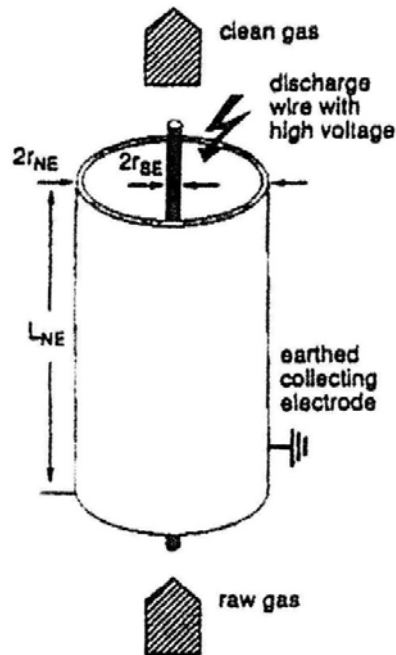
Kuva 2. Hiukkasten varautuminen diffuusio- ja kenttävarautumisella hiukaskokoalueella  $0,01 - 10 \text{ }\mu\text{m}$  (Hinds 1998).

Aerosolihukkanen voi saada vain rajallisen määrän varauksia. Voimakkaassa sähkökentässä koronapurkauksen vaikutuksesta hiukkasen menettämä varaus asettaa positiivisen varauksen ylärajan. Positiivisesti varautuneiden hiukkasten suurimman varauksen määrää emittoituneiden positiivisten ionien määrä. Negatiivisesti varautunut hiukkanen saavuttaa suurimman varauksensa, kun hiukkasen pinta on täynnä elektroneja ja niiden keskinäinen hylkiminen aiheuttaa elektroniemission hiukkasen pinnalta. Hiukkasen saama pienin varaus on nolla (Hinds 1998). Hiukkasiin tarttuvien varauksien lukumäärä riippuu kaasuionien konsentraatiosta, sähkökentän voimakkuudesta sekä hiukkasten sähkönjohtavuusominaisuuksista ja koosta.

Tutkimusten mukaan liekissä varautuneiden nokihiukkasten varausjakauma noudattaa Boltzmanin tasapainovarausjakaumaa (Kim ym. 2005, Maricq 2005, 2006a, 2006b). Nokihiukkasten varautuminen tapahtuu liekistä poistumisen jälkeen. Liekissä olevista nokihiukkasista 0,1 %:lla (Maricq 2005) on  $\pm 1$  elektronin varaus (Maricq 2004). Savukaasun hiukkasista 60 – 80 % on sähköisesti varautuneita (Maricq 2006b). Varausjakauma on bimodaalinen (Maricq 2005, 2006a) ja noudattaa log-normaalaa jakaumaa (Maricq 2005). Halkaisijaltaan alle 3 nm hiukkasten on havaittu olevan sähköisesti neutraaleja ja halkaisijaltaan yli 10 nm:n nokihiukkaset ovat varautuneita 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$  ja  $\pm 4$  elektronin varauksilla. Positiivisesti ja negatiivisesti varautuneiden hiukkasten osuudet ovat yhtä suuret. Positiivisesti varautuneiden hiukkasten osuus on 25 – 33 % ja negatiivisesti varautuneiden hiukkasten osuus 25 – 33 % savukaasun hiukkasista (Maricq 2005, 2006a, 2006b).

### 1.3.2 Sähkösuodattimen toimintaperiaate

Sähkösuodatin koostuu yleensä levymäisestä tai putkimaisesta maadoitetusta kokoojalevystä ja suurjänniteyksikköön kytketystä emissioelektrodista (kuva 3). Putkimallisessa suodattimessa eristetty emissioelektrodi sijaitsee akselinsuuntaisesti sylinterinmuotoisen kerääjäelektrodin keskilinjalla (Parker 1997, Finlayson-Pitts & Pitts Jr. 2000, Schnelle & Brown 2002, Parker 2003). Hiukkaset erotetaan savukaasuvirrasta tuottamalla hiukkasiin sähköinen varaus ja keräämällä varatut hiukkaset sähkökentän avulla suodattimen keräyspinnoille.



Kuva 3. Putkimallisen sähkösuodattimen rakenne. Suodatin koostuu suurjänniteyksikköön kytketystä emissioelektrodista ja maadoitetusta keräyselektrodista. Savukaasun virtaus-suunta on alhaalta ylös (Riehle 1997).

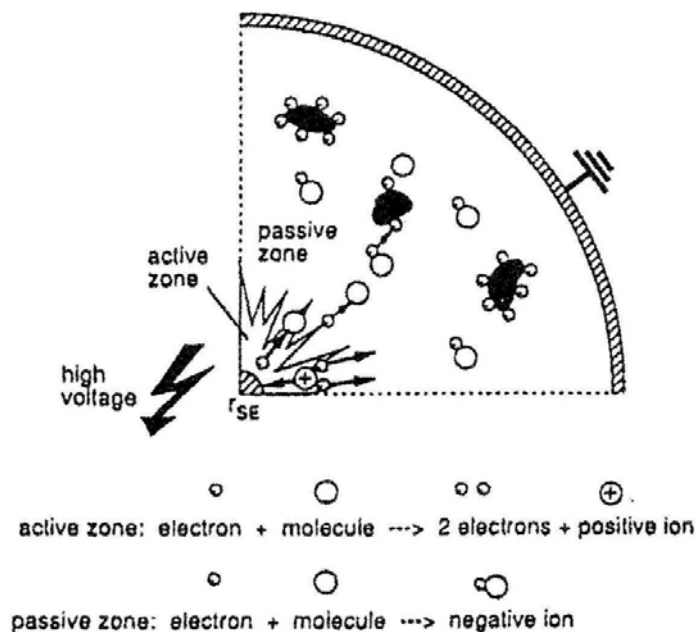
Erotusprosessi jaetaan viiteen osaan (Riehle 1997, Parker 2003):

- koronakentän ja ionien tuottaminen,
- hiukkasten varaaminen,
- varautuneiden hiukkasten kulkeutuminen sähkökentän läpi (migraatio),
- varautuneiden hiukkasten kerääntyminen keräyselektrodille (depositio) ja
- kerääntyneiden hiukkasten poisto.

Hiukkaset varataan tuottamalla koronapurkauksella elektroneja, jotka kiinnittyvät hiukkasiin. Koronapurkauksen muodostuminen edellyttää epäyhtenäisen sähkökentän purkaus- ja keräyselektrodin välille. Negatiivisessa koronassa emissioelektrodi pidetään negatiivisella jännitteellä. Jännitteen ylittäessä koronan syttymisjännitteen syntyy koronapurkaus, joka on mitattavissa purkaus- ja keräyselektrodien välillä sähkövirtana. Korkean kenttävoimakkuuden alueella savukaasussa tapahtuu sähköinen läpilyönti ja kaasu muuttuu sähköä johtavaksi. Läpilyönnin edellyttämä kenttävoimakkuus riippuu purkauselektrodin halkaisijasta ja saavuttaa riittävän voimakkuuden suodattimessa ohuessa kerroksessa purkauselektrodin pinnalla. Keräyselektrodiä kohti aleneva kenttävoimakkuus estää läpilyönnin (valokaaren muodostumisen) (Riehle 1997, Hinds 1998). Koronan muodostumiseen vaikuttavat kaasun lämpötila, paine ja koostumus (Riehle 1997, Hinds 1998), elektrodien etäisyys toisistaan,

ionien liikkuvuus (Jones ym. 1990) sekä purkauselektrodin halkaisija ja geometria (Jones ym. 1990, Kuroda ym. 2003).

Ionisaation aikana vapaan elektronin nopeus kiihtyy korona-alueella. Elektroni törmää neutraaliin kaasumolekyylisiin ja irrottaa molekyylisiä uuden elektronin muodostaen positiivisen ionin ja vapaan elektronin (kuva 4) (Riehle 1997, Hinds 1998). Korona-alueella prosessi jatkuu itseään ylläpitävänä vyörynä tuottaen purkauselektrodin ympärille tiheän elektronipilven ja positiivisia ioneja. Ionisaatiovyöhykkeellä, jossa sähkökentän voimakkuus on riittävän suuri, syntyy elektronivyöry. Elektronivyöry etenee emissioelektrodilta säteen suuntaisesti alhaisemman sähkökentän alueelle kohti positiivista keräyselectroodia. Kenttävoimakkuuden laskiessa kohti keräyselectroodia elektronien nopeus hidastuu ja ne tarttuvat elektronegatiivisiin kaasumolekyyleihin muodostaen negatiivisia ioneja. Ionit kulkeutuvat keräyselectrodille ja kiinnittyvät keräyselectrodin pintaan sähköisillä ja van der Waalsvoimilla (kuva 4) (Riehle 1997, Hinds 1998, Flagan 2001, Schnelle & Brown 2002, Parker 2003). Kerääntyneen hiukkaskerroksen paksuudesta ja sähköisestä vastuksesta riippuen hiukkaset luovuttavat varauksensa (Schnelle & Brown 2002, Dastoori ym. 2011). Muodostuvat positiiviset ionit kulkeutuvat emissioelektrodille (Riehle 1997). Purkauselektrodin ollessa positiivinen ja keräyselectrodin negatiivinen elektronit liikkuvat kohti purkauselektroodia ja positiiviset ionit kohti keräyselectroodia unipolaarina ionipuhalluksena (Riehle 1997, Hinds 1998).



Kuva 4. Aerosolihiukkasten kenttävarautuminen putkimallisessa sähkösuodattimessa: elektronien muodostuminen koronapurkauksessa, kaasumolekyylin ionisaatio ja hiukkasten varautuminen (Riehle 1997).

Sähkösuodattimen toimintaan vaikuttavia savukaasun ominaisuuksia ovat savukaasun elektropositiivisuus/-negatiivisuus, lämpötila, paine, koostumus, kaasun virtausnopeus, viskositeetti ja tiheys sekä turbulenssi (Riehle 1997, Schnelle & Brown 2002, Parker 2003, Noda & Makino 2010). Aerosolihiukkasten ominaisuuksista suodattimen toimintaan vaikuttavat hiukkasten pitoisuus savukaasussa, koostumus ja sähköinen ominaisvastus, agglomeraatio, kokojakauma, hiukkasten muoto ja pintaominaisuudet sekä koheesivoimat (Watanabe ym. 1995, Jedrusik ym. 2001, Parker 2003, Barranco ym. 2007, Noda & Makino 2010, Thonglek ym. 2011, Jaworek ym. 2013).

Sähkösuodattimen keräystehokkuutta on tutkittu mittaamalla palamis aerosolin hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuuksia ennen suodatinta ja suodattimen jälkeen (Kocik ym. 2005, Tekasakul ym. 2006, Bologna ym. 2009). Keräystehokkuus vaihtelee 60 - 99 %:n välillä. Alhaisimmat keräystehokkuudet on mitattu hiukkasten massapitoisuuksina (Strand ym. 2002, Lind ym. 2003, Bologna ym. 2009). Alhaisin keräystehokkuus on hiukkaskokoalueella 0,1 - 1,0  $\mu\text{m}$  (penetration window) (Mohr ym. 1996, Lind ym. 2003, Nóbrega ym. 2004, Kocik ym. 2005, Van Loo & Koppejan 2008, Li ym. 2009). Keräystehokkuuden alenemista aiheuttavat hiukkasten agglomeraatio suodattimessa (Strand ym. 2002), hiukkasten riittämätön varautuminen, hiukkasten sekoittuminen ja jännite-virta-suhde (Zhuang ym.

2000), savukaasun virtausnopeus (Kocik ym. 2005, Dastoori ym. 2011) sekä hiukkasten koostumus (Cereda ym. 1996, Zhuang ym. 2000, Nóbrega ym. 2004, Tekasakul ym. 2006). Sähkösuodattimen parametreista keräystehokkuuteen vaikuttavat erityisesti suodattimen muoto (Petersen 1981, Nóbrega ym. 2004, Dastoori ym. 2011), emissio- ja keräyselektrodien välinen etäisyys, emissioelektrodin säde (Kim & Lee 1999) sekä sähkökentän voimakkuus ja kenttävoimakkuuden jakauma (Kocik ym. 2005). Teoreettisesti on osoitettu, että suodattimen erotusaste on verrannollinen jännitteen neliöön, minkä mukaan suodatin toimii tehokkaimmin mahdollisimman lähellä läpilyönnin rajaa (Parker 2003). Merkittävimmin erotustehokkuutta voidaan parantaa lisäämällä purkauselektrodin jännitettä (Parker 2003, Kocik ym. 2005, Schmatloch & Rauch 2005, Bologna ym. 2009, Dastoori ym. 2011).

Suodattimen keräyselektrodille depositoituneet hiukkaset alentavat suodattimen keräystehokkuutta (Jaworek ym. 2013). Hiilihiukkaset, joilla on alhainen sähköinen resistiivisyys, luovuttavat nopeasti varauksensa ja irtoavat keräyselektrodin pinnalta (Zhuang ym. 2000, Schnelle & Brown 2002). Kim ja Leen (1999) tutkimuksen mukaan elektrodin pinnalle kerääntyvä pölykerros sitoo hiukkasia, jotka irtoavat helposti aerosolihiukkasia suurempina agglomeraatteina. Kerääntyneiden hiukkasten aiheuttaman kenttävoimakkuuden alenemisen ja keräystehokkuuden laskun sekä vastakoronan estämiseksi emissioelektrodi (Bologna ym. 2009) ja keräyselektrodi (Kim & Lee 1999, Zhuang ym. 2000, Tekasakul ym. 2006, Ruttanachot ym. 2011) vaativat säännöllistä puhdistamista.

Ensimmäinen täysimittainen sähkösuodatinkokoonpano tunnetaan vuodelta 1908 (Parker 1997). Nykyisin sähkösuodatin on yleisin suurissa voimalaitoksissa käytetty menetelmä savukaasun hiukkaspäästöjen vähentämiseksi (Parker 2003). Sen käyttöä puoltavat monikäyttöisyys erilaisissa teollisuusprosesseissa ja korkeissa savukaasun lämpötiloissa, korkea hiukkasten keräystehokkuus, alhainen painehäviö, helppokäyttöisyys, rakenteen kestävyys sekä kustannustehokkuus (Parker 2003).

## **1.4 Sähkösuodattimen toimintaan vaikuttavat parametrit**

### **1.4.1 Sähkökenttä ja sähkökentän voimakkuus**

Sähkökenttä on varautuneen hiukkasen ympärille muodostuva vektorikenttä, jossa hiukkanen liikkuu sähköstaattisen voiman vaikutuksesta (Riehle 1997, Hinds 1998). Kenttävoimakkuus  $E$  (V/m) määräytyy hiukkasessa olevien yksittäisvarauksien aiheuttamasta voimasta  $F_E$  (V/m) (yhtälöt 4 ja 5).

$$E = \frac{FE}{q} \quad (4)$$

jossa  $q$  on hiukkasen varaus (C) (Hinds 1998).

$$q = ne \quad (5)$$

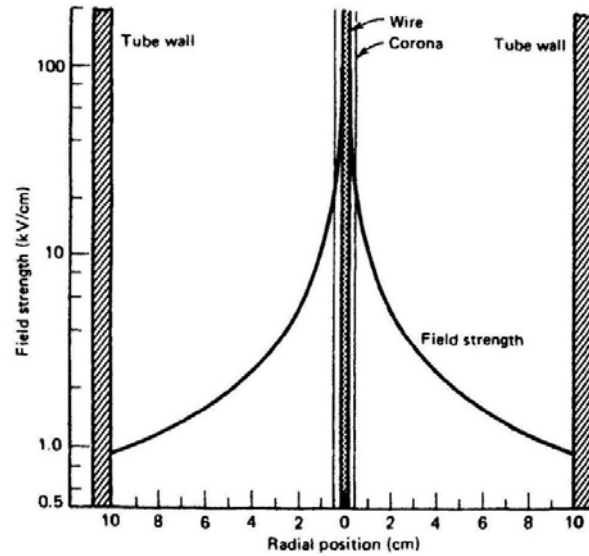
jossa  $n$  on hiukkasessa olevien varauksien lukumäärä ja  $e$  alkeisvaraus ( $1,6 \times 10^{-19}$  C) (Hinds 1998).

Putkimallisen sähkösuodattimen keskimääräinen kenttävoimakkuus (average field strenght)  $E$  saadaan yhtälöstä 6:

$$E = \frac{U}{r_{NE}} \quad (6)$$

jossa  $U$  on jännite (kV) ja  $r_{NE}$  putkimallisen sähkösuodattimen keräyselektrodin keskisäde (m) (kts. kuva 3) (Riehle 1997).

Purkaus- ja keräyselektrodien välissä oleva kaasu sisältää vapaita elektroneja, ioneja ja vauruneita hiukkasia, jotka vaikuttavat tilan varauksen tiheyteen (Flagan & Seinfeld 1988). Suurin varaus on purkauselektrodin pinnalla (kuva 5) (Hinds 1998).



Kuva 5. Kenttävoimakkuuden jakauma putkimallisessa sähkösuodattimessa. Varaus on suurin purkauselektrodin pinnalla ja alenee kohti keräyselectroodia (Hinds 1998).

Purkauselektrodin säteen pienentyessä varaus suurenee (Hinds 1998). Putkimallisen sähkösuodattimen kenttävoimakkuus saadaan yhtälöstä 7:

$$E = \frac{\Delta W}{R \ln\left(\frac{d_t}{d_w}\right)} \quad (7)$$

jossa  $\Delta W$  on purkaus- ja keräyselectrodien välisen potentiaaliero (V),  $R$  säteen suuntainen etäisyys suodatinputken keskilinjasta (cm),  $d_t$  keräyselectrodin halkaisija (m) ja  $d_w$  purkauselektrodin halkaisija (m) (Hinds 1998).

#### 1.4.2 Kenttävoimakkuuden jakauma

Kenttävoimakkuus  $E$  on suodattimen sähkökentän paikallinen funktio. Sähkökentän jakauma kuvaa keräyselectrodin virran jakaumaa sekä hiukkasten varautumista ja niiden kulkeutumista. Jakauma riippuu sähköisten varauksien jakaumasta sekä suodattimen geometriasta ja toiminnasta (Riehle 1997). Putkimallisen sähkösuodattimen kenttävoimakkuuden jakauma  $E(R)$  (–) saadaan yhtälöstä 8:



$$E(R) = \sqrt{\frac{r_{NE} \times j_{NE}}{\epsilon_0 \times b_i} + \frac{r_{SE}}{R} \left[ E_0^2 - \frac{r_{NE} \times j_{NE}}{\epsilon_0 \times b_i} \right]} = \frac{U}{R \times \ln \frac{r_{NE}}{r_{SE}}} \quad (8)$$

jossa  $r_{SE}$  on putkimallisen sähkösuodattimen purkauselektrodin efektiivinen säde (m),  $j_{NE}$  virrantiheysjakauma ( $A/m^2$ ),  $\epsilon_0$  tyhjiön dielektrisyysvakio ( $8,86 \times 10^{-12}$  As/Vm) (kts. kuva 3) (Riehle 1997).

#### 1.4.3 Koronan syttymisjännite ja koronan syttymiskentän voimakkuus

Koronan syttymisjännite  $U_0$  (kV) on jännite, jolloin kaasuun on muodostunut riittävästi elektroneja ja sähköisesti varautuneita kaasumolekyylejä varaamaan hiukkasia ja sähkövirta  $I$  (A) alkaa kulkea suodattimessa (Riehle 1997). Syttymisjännite putkimalliselle suodattimelle saadaan yhtälöstä 9:

$$U_0 = E_0 \times r_{SE} \times \ln \frac{r_{NE}}{r_{SE}} \quad (9)$$

jossa  $E_0$  on koronan syttymiskentän voimakkuus (V/m) (Riehle 1997).

Koronan syttymiskentän voimakkuus (corona initiation field strength)  $E_0$  on sähkökentän voimakkuus, joka vaaditaan tuottamaan jatkuva ionisaatioprosessi. Syttymiskentän voimakkuus riippuu läsnä olevien kaasumolekyyliden, ionien ja elektronien ionisaatioenergiosta ja hiukkasten välisestä vapaasta matkasta (mean free path) (Riehle 1997, Hinds 1998). Koronan syttymiskentän voimakkuus saadaan yhtälöstä 10:

$$E_0 = A\delta + B\sqrt{\delta/r_{SE}} \quad (10)$$

jossa  $\delta$  on kaasun suhteellinen tiheys (–) sekä  $A$  ( $3.2 \times 10^6$  V/m) ja  $B$  ( $9 \times 10^4$  V/m<sup>1/2</sup>) empiirisiä vakioita, jotka kuvaavat kaasun ja koronan polarisuutta (Riehle 1997).

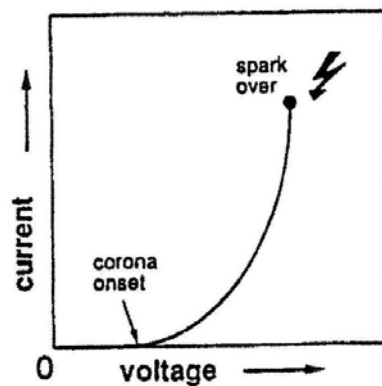
#### 1.4.4 Virta-jännite-suhde

Sähkövirran muodostavat sähkökentän läpi kulkevat kaasuionit (Riehle 1997, Hinds 1998). Kaasuionien sähköinen liikkuvuus (electrical mobility)  $b_i$  on verrannollinen sähkökentän voimakkuuteen. Ionien liikkuvuuden on todettu olevan kääntäen verrannollinen kaasun suhteelliseen tiheyteen  $\delta$  (yhtälö 11):

$$b_i(T_0, p_0) = 2 \times 10^{-4} \frac{m^2}{Vs} \quad (11)$$

jossa  $T$  on lämpötila ( $^{\circ}C$ ) ja  $p$  paine (bar) (Riehle 1997).

Virta-jännite-suhde (current-voltage relationship) on korkeajännitteen ja siitä seuraavan sähkövirran välinen suhde. Se kuvaa sähkösuodattimen toimintatiloja, kuten koronan syttymistä (corona onset) ja läpilyöntiä (spark over). Läpilyönnissä tapahtuu oikosulku, kun vastus häviää ja virta kasvaa (kuva 6) (Riehle 1997).



Kuva 6. Sähkösuodattimen toimintatiloja kuvaava virta-jännite-suhde (corona onset = koronan syttyminen ja spark over = läpilyönti) (Riehle 1997).

#### 1.4.5 Sähköinen liikkuvuus

Sähkökentässä varattu hiukkanen kulkeutuu voiman  $F_E$  pakottamana. Hiukkasen sähköinen liikkuvuus (electrical mobility)  $Z$  ( $m^2/Vs$ ) määritetään hiukkasen kykyä liikkua sähkökentässä (yhtälöt 12 ja 13) (Riehle 1997, Hinds 1998).

$$Z = \frac{V_{TE}}{E} = \frac{neC_c}{3\pi\eta d} \quad (12)$$

jossa  $V_{TE}$  on sähkökentän aiheuttama hiukkasen loppunopeus ( $m^2/Vs$ ) ja  $C_c$  Cunninghamin liukukorjauskerroin (-) (Hinds 1998).

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[ 2,514 + 0,800e^{-0,55\frac{d_p}{\lambda}} \right] \quad (13)$$

#### 1.4.6 Dielektrisyysvakio

Aineen permittiivisyys kuvaa, miten sähkökenttä vaikuttaa ja vaikuttuu aineessa, miten aine sallii sähköisen kentän läpäistä itsensä ja reagoi ulkoiseen sähkökenttään. Permittiivisyyden määrittää aineen kyky polarisoitua sähkökentässä ja kyky vähentää aineen sisäistä sähköistä kenttää. Dielektrisyysvakio  $\varepsilon$  (As/Vm) (suhteellinen permittiivisyys) kuvaa erilaisissa materiaaleissa jännitteen aikaansaamaa sähkökentän voimakkuutta suhteessa tyhjiön dielektrisyysvakioon samoissa olosuhteissa. Useimmilla materiaaleilla  $1 < \varepsilon < 10$ , tyhjiölle 1,0 ja ilmalle 1,00059 (Hinds 1998). Tyhjiön dielektrisyysvakio  $\varepsilon_0$  ( $8,86 \times 10^{-12}$  As/Vm) saadaan yhtälöstä 14 ja homogeenisen aineen dielektrisyysvakio  $\varepsilon$  yhtälöstä 15:

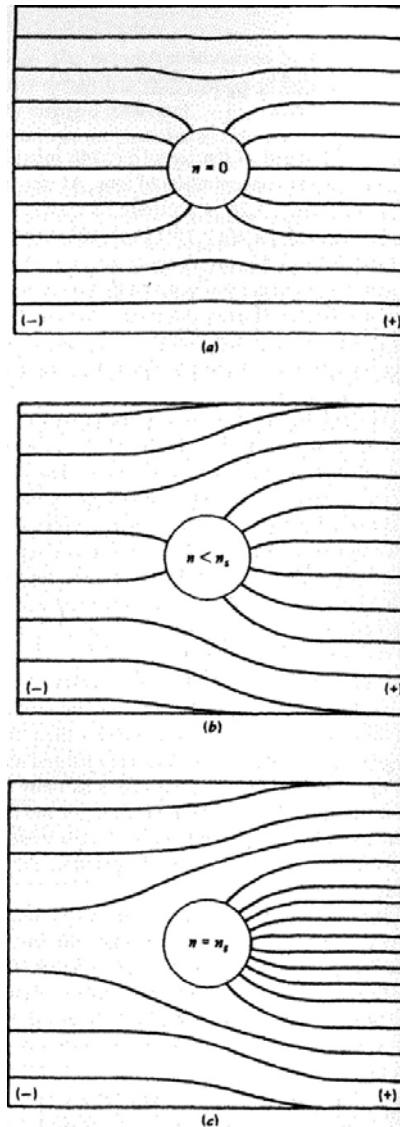
$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} \quad (14)$$

jossa  $c$  on valon nopeus (299792458 m/s) ja  $\mu_0$  tyhjiön permeabiliteetti (–).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (15)$$

jossa  $\varepsilon_r$  on hiukkasen suhteellinen permittiivisyys (–).

Koronavarautumisessa varaamaton hiukkanen häiritsee sähkökenttää ja ionien lentoratoja (kuva 7a). Sähkökentän häirinnän intensiteetti riippuu hiukkasen dielektrisyysvakioista ja hiukkasen varauksesta. Mitä suurempi varautumattoman hiukkasen dielektrisyysvakio on, sitä useampi kenttäviiva lähestyy hiukkasta. Ionit seuraavat sähkökentän viivoja ja törmäävät viivoilla oleviin hiukkasiin luovuttaen varauksensa (kuva 7b). Varautunut hiukkanen hylkii saman varauksen omaavia ioneja. Hiukkasessa olevat varaukset vähentävät kenttävoimakkuutta ja muuttavat kenttäviivojen suuntaa, jolloin hiukkasta lähestyvien ionien lukumäärä vähenee. Lopulta hiukkanen saavuttaa saturaatiovarauksen, jolloin kenttäviivat eivät kulje hiukkasen läpi eivätkä ionit saavuta sitä (kuva 7c) (Hinds 1998).



Kuva 7. Hiukkasen vaikutus sähkökentän kenttäviivoihin ja ionien lentoratoihin. Varaamaton hiukkanen häiritsee sähkökenttää ja ionien lentoratoja. Ionit törmäävät viivoilla olevaan hiukkaseen ja luovuttavat varauksensa hiukkaselle (a). Osittain varattu hiukkanen (b). Saturaatiovarauksen omaava hiukkanen. Kenttäviivat eivät kulje hiukkasen läpi eivätkä ionit saavuta hiukkasta (c) (Hinds 1998).

#### 1.4.7 Hiukkasen varausluku ja saturaatiovaraus

Kaasussa olevat hiukkaset saavat sähköisen varauksen, kun kaasussa olevat vapaat elektronit tarttuvat niihin (Riehle 1997, Hinds 1998, Flagan 2001). Hiukkasen varausluku (particle charge number)  $Q$  (As) saadaan yhtälöstä 16:

$$Q = 3\pi \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon+2} \right) \varepsilon_0 D^2 E_0 \quad (16)$$

jossa  $D$  on hiukkasen diffuusiokerroin (–) (Riehle 1997).

Hiukkasen saturaatiovarausluku (particle saturation charge in infinity)  $Q_p^\infty$  (As) on hiukkasen äärettömän pitkän ajan kuluessa saavuttama suurin mahdollinen varausluku (Riehle 1997, Hinds 1998, Parker 2003). Saturaatiovarausluku saadaan Cochetin yhtälöstä (17):

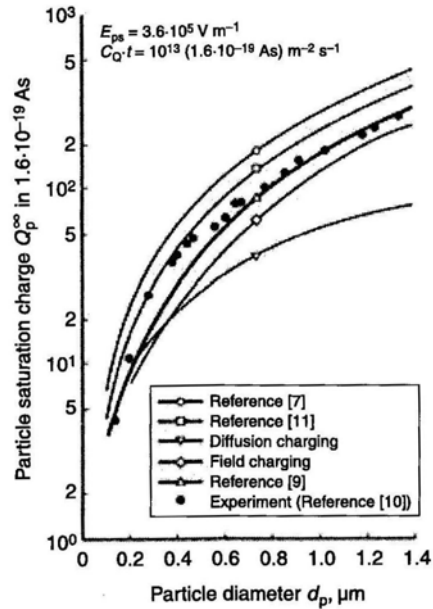
$$Q_p^\infty = \left\{ (1 + 2\lambda/d_p)^2 + \left( \frac{2}{1+2\lambda/d_p} \right) \times \left( \frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+2} \right) \pi \varepsilon_0 d_p^2 E \right\} \quad (17)$$

jossa  $\lambda$  on elektronin vapaa matka ( $\mu\text{m}$ ) (yhtälö 18) (Riehle 1997, Parker 2003).

$$\lambda = \lambda_0 \times \left( \frac{T}{296,15} \right) \left( \frac{101,3}{p} \right) \frac{\left( 1 + \frac{S}{296,15} \right)}{\left( 1 + \frac{S}{7} \right)} \quad (18)$$

jossa  $\lambda_0$  on molekyylin vapaa matka (0,0674  $\mu\text{m}$ ) ja  $S$  Southerlandin vakio (110,4 K) (Riehle 1997).

Saturaatiovaraus on verrannollinen hiukkasen halkaisijaan (kuva 8) (Parker 2003) ja pinta-alaan sekä sähkökentän voimakkuuteen (Hinds 1998).



Kuva 8. Saturaatiovarauksen ja hiukkasen halkaisijan välinen riippuvuus (Parker 2003).

Hiukkasen varausluku viipymäajan  $t$  kuluttua saadaan yhtälöistä 19 ja 20:

$$Q_p(t) = Q_p^\infty \times \frac{t}{t+r_Q} \quad (19)$$

jossa  $r_Q$  on aikavakio (ms) (Riehle 1997).

$$r_Q = \frac{4\varepsilon_0}{c_Q b} \approx \frac{4\varepsilon_0}{j_{NE}/E} \quad (20)$$

jossa  $c_Q$  on kaasuionien pitoisuus (V/m) (Riehle 1997).

#### 1.4.8 Hiukkasten siirtymisnopeus, suodattimen erotustehokkuus ja erotusaste

Hiukkasten radiaalinen siirtymisnopeus (radial migration velocity of the particles)  $w_{th}$  (m/s) keräyselektrodin säteen suunnassa saadaan yhtälöistä 21 ja 22:

$$w_{th} = \frac{Q_p E}{3\pi\eta d_p} (C_c) \quad (21)$$

jossa  $\eta$  on kaasun viskositeetti ( $\text{Ns/m}^2$ ) (Riehle 1997).

$$\eta = 0,0001708 \left( \frac{T}{273,15} \right)^{1,5} \left( \frac{393,396}{T+120,246} \right) \quad (22)$$

Hiukkaskoosta riippuva erotusaste (particle removal efficiency)  $T_e(d_p)$  (-) saadaan yhtälöstä 23 (Riehle 1997):

$$T_e(d_p) = 1 - e^{\left(-w_{th} \frac{A_{NE}}{V}\right)} \quad (23)$$

Suodattimen kokonaiskeräytehokkuus  $T_e$  (-) määritetään Deutsch-Andersonin yhtälöllä (24).

$$T_e = 1 - e^{\frac{-A_{NE}\omega}{V}} \quad (24)$$

jossa  $\omega$  on hiukkasen tehollinen nopeus keräyselektrodiä kohti (m/s),  $A_{NE}$  keräyselektrodin pinta-ala (m<sup>2</sup>) ja  $V$  kaasun tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s) (Parker 2003).

## 2 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 2.1 Koejärjestelyt

#### 2.1.1 Mittausten tavoitteet ja näytteenkeräys

Tavoitteena oli mitata pellettipolton savukaasun hiukkaspitoisuuksia sekä tutkia sähkösuodattimen toimintaa ja vaikutuksia hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuuksiin sekä tuhka-hiili-suhteeseen.

Mittaukset suoritettiin Saarijärvellä Ariterm Oy:n koelaboratoriossa 30.11.–13.12.2012. Näytteitä kerättiin kolme rinnakkaista 5 % savukaasun jäännöshappipitoisuudella ja 7 % savukaasun jäännöshappipitoisuudella. Näytteenotto suoritettiin sähkösuodattimen jälkeen savukaasukanavassa sijaitsevasta näytteenottoyhteestä sähkösuodattimen jännite pois päältä (ESP off) ja jännite päällä (ESP 15 kV). Keräysaika jännite pois päältä oli 3 tuntia ja jännite päällä 6 tuntia.

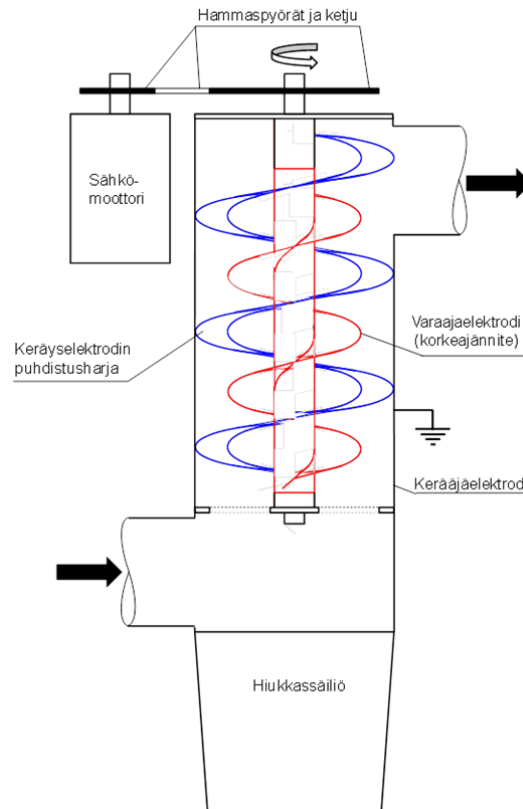
#### 2.1.2 Pellettipoltin ja kattila

Mittauksissa käytettiin Ariterm Biomatic+ -pellettikattilaa ja BeQuem - poltinta. Polttoaineena käytettiin puupellettiä (tehollinen lämpöarvo saapumistilassa 4,8 MWh/t, kosteus 7 % (SFS-EN 14774-1 2010)). Pelletin kulutus oli noin 4 kg/h.

#### 2.1.3 Sähkösuodatin

Tämän tutkimuksen yhteydessä kehitetty putkimallinen sähkösuodatin koostuu lieriönmallisesta keräyselektrodista, hiukkassäiliöstä, spiraalin mallisesta purkauselektrodista ja keräyselektrodin puhdistusharjasta (kuva 9). Savukaasun virtaussuunta suodattimessa on alhaalta ylös. Spiraalin malliseen purkauselektrodiin johdetaan negatiivinen korkeajännite. Varautuneet hiukkaset depositoituvat maadoitetulle keräyselektrodille. Sähkömoottori pyörittää keräyselektrodin puhdistusharjaa, joka irrottaa keräyselektrodille kerääntyneet hiukkaset. Hiukkaset kerääntyvät hiukkassäiliöön, joka tyhjennetään säännöllisesti.



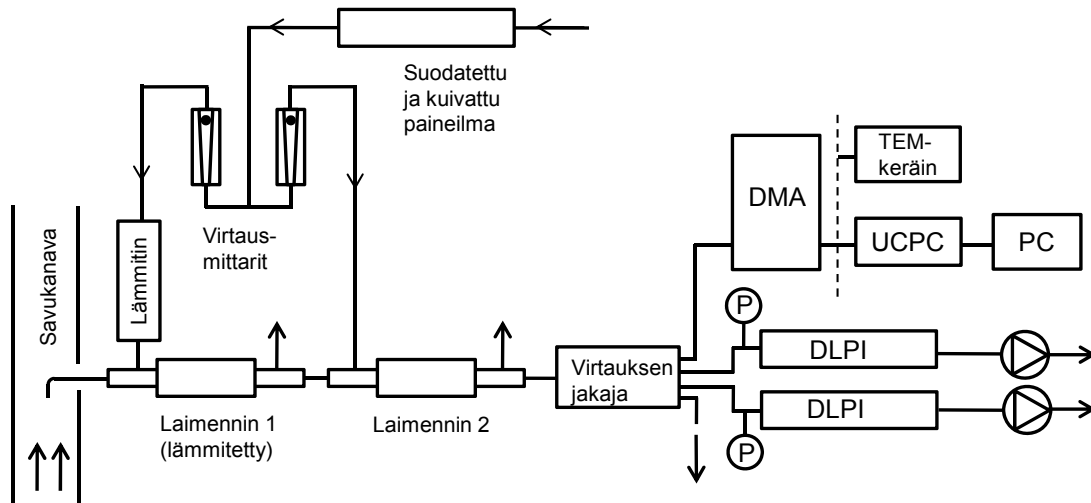


Kuva 9. Tutkimuksen yhteydessä kehitetyn putkimallisen sähkösuodattimen rakenne. Varaajaelektrodiin johdetaan negatiivinen korkeajännite. Sähkömoottori pyörittää keräys elektrodin puhdistusharjaa, joka irrottaa keräys elektrodille kerääntyneet hiukkaset. Savukaasun virtaussuunta on alhaalta ylös.

## 2.2 Mittaukset

### 2.2.1 Palamisaerosolin laimennus

Näytteenottosondi sijoitettiin savukanavaan ( $\varnothing$  100 mm) kanavan keskilinjalle (kuva 10). Näytteenottolinjan pituus minimoitiin sijoittamalla ensimmäinen laimennin lähes kiinni kanavaan. Paineistettu laimennusilma tuotettiin kompressorilla. Savukaasuvirrasta ohjattiin osavirta 8 mm teräsputken kautta laimentimille (Dekati type ejector diluter). Näytevirta laimennettiin kahdella laimentimella 1:8 laimennussuhteella. Laimennusilma johdettiin paineaseman (TSI Filtered Air Supply 3074B) kautta, minkä avulla suoritettiin laimennusilman hiukkassuodatus ja kuivaus, tasattiin painetta sekä säädettiin ilman painetta ja virtausta.



Kuva 10. Hiukkasmittausten koearkitys. P = painemittari, DLPI = alipaineimpaktori (Dekati Low Pressure Impactor), DMA = liikkuvuusanalysointilaitte (Differential Mobility Analyzer), UCPC = kondensaatioydinlaskuri (Condensation Particle Counter), PC = tietokone.

Laimennusilma lämmitettiin 150 °C:een Dekatin valmistamalla paineilman lämmittimellä (Dekati Pressurised Air Heater, DH-1723 ja Dekati Temperature controller, DR-1823) ennen laimentimia. Ilmavirtausta laimentimiin seurattiin rotometri-tyyppisillä virtausmittareilla (Kobold, KFR-4244NO, LPM AIR). Laimennusilman lämpötilaa seurattiin reaaliaikaisesti. Ensimmäinen laimennin lämmitettiin 150 °C:een lämmitysmanttelilla (Dekati Insulated Diluter Heater, DH-1523 ja Dekati Heater Temperature Controller, DR-1623) ja lämpötilaa seurattiin reaaliaikaisesti. Laimennettu näytevirta johdettiin virtauksen jakajan (TSI type flow splitter) kautta mittalaitteisiin.

### 2.2.2 Lukumääräkokojakaumamittaukset

Hiukkasten lukumääräpitoisuutta mitattiin reaaliaikaisesti SMPS-laitteistolla (TSI SMPS 3936). Virtauksen jakajalla ohjattiin osavirta 0,3 l/min virtausnopeudella TSI:n valmistamaan sähköiseen hiukkasluokittelijaan EC 3080 impaktorin (0,071 cm) kautta. Liikkuvuusanalysointilaitteena käytettiin TSI:n pitkää liikkuvuusanalysointilaitte (Long DMA 3081, mittausalue 10 – 1000 nm). Kokoluokitellun aerosolin hiukkaset detektoitiin ja laskettiin TSI:n valmistamalla kondensaatioydinlaskurilla CPC 3776. Mittaustulokset käsiteltiin TSI Aerosol Instrument Manager Software for Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) Spectrometer Version 9.0.0 -ohjelmalla (TSI 2010). Hiukkaskokojakauma luokiteltiin 64 kanaavaan/dekadi (mittausalue 15 – 700 nm).

### 2.2.3 Massakokojakaumamittaukset

Hiukkasten massakokojakaumapitoisuuksien määrittystä varten savukaasusta kerättiin näyte kahdella rinnakkaisella alipaineimpaktorilla. Ennen näytteen keräystä alipaineimpaktorit (Dekati Low Pressure Impactor DLPI) pestiin ultraäänihauteessa (VWR Ultrasonic Cleaner) Deconex-pesuaineella (30 min) ja heksaani-propanoli-liuoksella (30 min). Impaktoreihin johdettiin virtauksen jakajalla osavirta 30 l/min virtausnopeudella. 100 mbar:n alipaine tuotettiin alipainepumpulla (SOGEVAC, LEYBOLD SA).

### 2.2.4 Hiukkasten kerääminen aerosolikeräimellä

Mikroskooppianalyysiä varten savukaasuvirtauksesta johdettiin osavirta DMA:n jälkeen aerosolikeräimeen (TSI Nanometer Aerosol Sampler Model 3089) 0,3 l/min virtausnopeudella. Hiukkasia (15 – 700 nm) kerättiin hiilikalvopäällysteisille kuparihiloille (Dixkens & Fissan 1999, Krinke 2001).

### 2.2.5 Kaasumittaukset

Mittausten aikana seurattiin reaaliaikaisesti savukaasun O<sub>2</sub> (%), CO (ppm) ja C<sub>x</sub>H<sub>x</sub> (ppm) pitoisuuksia savukaasuanalysaattoreilla (Combustion Analyzer Testo 330-2 LL, Flue Gas Analyzer Testo 350 XL). Polttoprosessin ja savukaasun lämpötiloja seurattiin K-tyypin termoparilla.

## 2.3 Analyysit

### 2.3.1 Gravimetrinen analyysi

Impaktioalustoja säilytettiin ennen ja jälkeen näytteenoton borosilikaattisissa petrimaljoissa. Maljat ja impaktioalustat valmisteltiin näytteenottoon ennen mittauksia. Petrimaljat pestiin ionivaihdetulla vedellä ja kuivattiin lämpökaapissa (Memmert, Tamro Finland) (150 °C, 2 h) sekä happopestiin (24 h) typpihappoliuoksessa (1 M). Happopesun jälkeen maljat pestiin ionivaihdetulla vedellä ja kuivattiin lämpökaapissa (150 °C, 2 h). Maljat lämpökäsiteltiin muhveliuunissa (Nabertherm, Germany) neljän tunnin ajan 450 °C:ssa.

Alustoina käytettiin polykarbonaattialustoja (Whatman Nuclepore Track-Etch Membrane 800203, Ø 25 mm) ja alumiinifolioalustoja (LABOR, 0,015 mm). Alumiinifolioalustat (Ø 25 mm) leikattiin stanssilla alumiinifoliosta ja lämpökäsiteltiin muhveliuunissa (450 °C, 4 h) hiilen poistamiseksi alustoista. Impaktioalustoja vakioitiin vakioiduissa olosuhteissa (RH 40 %, T 20 °C) yhden vuorokauden ajan ja punnittiin analyysivaa'alla (Mettler Toledo AT 21 Comparator) 1 mikrogramman tarkkuudella vakioiduissa olosuhteissa (RH 40 %, T

20 °C). Alustat punnittiin kolme kertaa ja painoista laskettiin keskiarvot. Mittauksen jälkeen alustoja vakioitiin yhden vuorokauden ajan ja punnittiin kolme kertaa analyysivaa'alla. Alipaineimpaktorit luokittelivat hiukkaset 13 impaktioasteeseen kokoalueella 0,03 – 10 µm (taulukko 1).

Taulukko 1. Dekati-alipaineimpaktorin leikkausraajat ( $D_{50}$ ) ja geometriset keskihalkaisijat ( $g(D_p)$ ) eri impaktioasteilla.

Impaktioaste	$D_{50}$ (µm)	$g(D_p)$ (µm)
13	10	8,3
12	6,8	5,47
11	4,4	3,32
10	2,5	2,0
9	1,6	1,26
8	1,0	0,81
7	0,65	0,51
6	0,40	0,32
5	0,26	0,21
4	0,17	0,14
3	0,108	0,08
2	0,06	0,04
1	0,03	

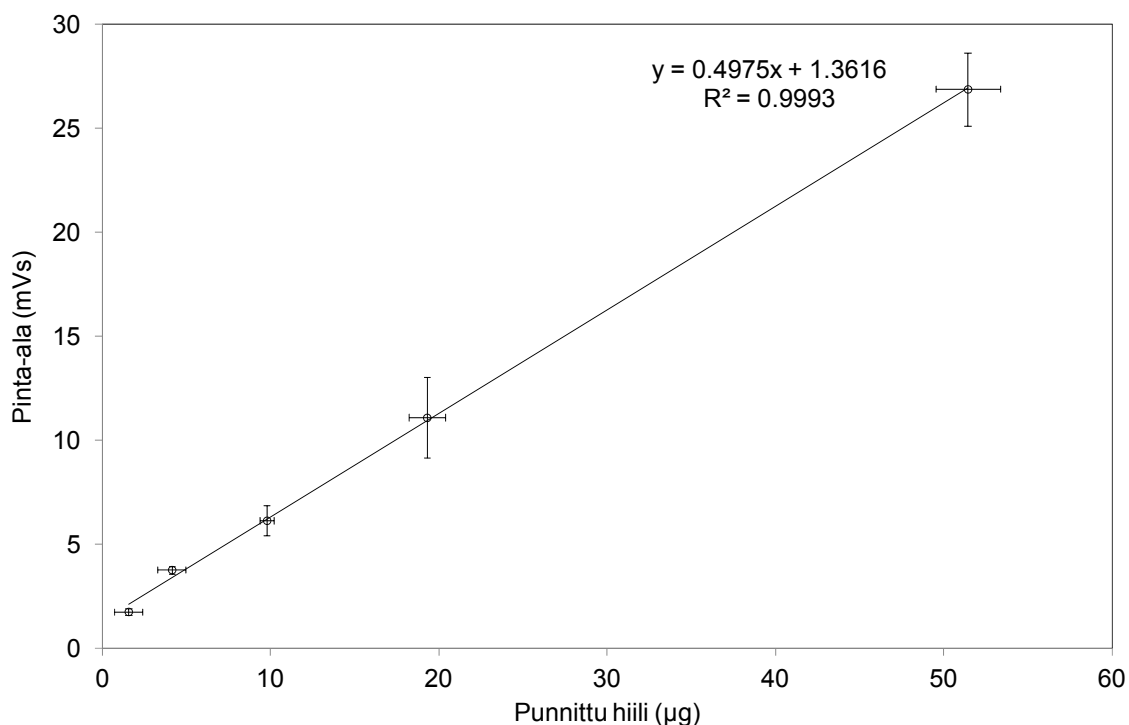
### 2.3.2 Hiilianalyysi

Hiilianalyysi tehtiin Calanus Uniquant CO<sub>2</sub>-analyssaattorilla (Uniquant, Suomi) Jyväskylän yliopiston ympäristötieteen ja -teknologian osaston maaperälaboratoriossa. Analyssaattorin kalibrointia varten valmistettiin standardiliuokset glukoosista (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), joka edusti 40,0 % hiiltä sisältävää näytettä. Kantaliuos valmistettiin liuottamalla 25,0 g glukoosia (10,0 g C) 1000 ml:an tislattua vettä. Vesi-glukoosi-liuoksesta valmistettiin laimennossarja (taulukko 2).

Taulukko 2. Standardiliuoksen hiilipitoisuus ja standardiliuoksen valmistamiseen käytetyn kantaliuoksen ja tislattun veden määrät.

Standardiliuos C (µg)	Kantaliuos (ml)	Tislattu vesi (ml)
2	2	98
5	5	95
10	10	90
20	20	80
50	50	50
100	100	0

Vesi-glukoosi-liuosta annosteltiin lämpökäsitellyille ja punnituille alumiinifolioalustoille 10 µl:a mikrolitraruiskulla. Alustat punnittiin ja hiilipitoisuus määritettiin gravimetrisesti analyysivaa'alla 1 mikrogramman tarkkuudella. Standardiliuosta sisältävät alustat taiteltiin palloiksi (Ø 2 mm) ja analysoitiin Uniquant CO<sub>2</sub>-analyssaattorilla. Analyssaattori kalibroitettiin pitoisuuksille 2 – 50 µg C ja standardisuora laskettiin kolmesta rinnakkaisesta määrittäyksestä (kuva 11).



Kuva 11. Hiilianalyysin standardisuora.

Hiilipitoisuudet määritettiin alumiinifolioalustoista hiukkaspäästöjen gravimetrisen määrittäytksen jälkeen. Alumiinifolioalustat taiteltiin palloiksi (Ø 2 mm) ja poltettiin CO<sub>2</sub>-

analysaattorin uunissa (900 °C) happiatmosfäärissä. Analysaattori määrittä sekä orgaanisen että epäorgaanisen hiilipitoisuuden poltossa muodostuneen hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Mittaustulokset käsiteltiin CA 2.0 – ohjelmalla, joka muutti analysaattorin jännitteinä (mV) detektoimat vasteet hiilipitoisuudeksi 0,1 µg:n havaitsemisrajalla.

### 2.3.3 Ionianalyysi

Ionipitoisuudet määritettiin alumiinifolioalustoista hiukkaspäästöjen gravimetrisen määrittämisen jälkeen. Koeputket (5 ml) ja korkit pestiin ultraäänihauteessa etanolissa (15 min) ja ionivaihdetussa vedessä (15 min). Korkit kuivattiin lämpökaapissa 30 °C:ssa (30 min) ja koeputket 150 °C:ssa (2 h). Alumiinifolioalustat käärittiin löyhälle rullalle koeputkiin. Vesiliukoiset ionit uutettiin alustoista koeputkessa 2 ml:an ionivaihdettua vettä ultraäänihauhteessa (20 min).

Ionianalyysit tehtiin Jyväskylän yliopiston ympäristöntutkimuskeskuksen Ambioticalaboratoriossa standardin SFS-EN ISO 10304-1:en (2009) mukaisesti. Hiukkasista määritettiin kloridi-, nitraatti-, nitriitti- ja sulfaattipitoisuudet ionikromatografilla (Dionex ICS-1100). Ionit erotettiin nestekromatografisesti esikolonin (AG22, 4 mm) ja erotuskolonin (AS22, 4 mm) avulla käyttäen sähköistä supressointia ja johtokykydetektointia. Standardeina käytettiin sertifioituja, kaupallisia perusliuoksia.

### 2.3.4 Metallianalyysi

Metallianalyysit tehtiin Jyväskylän yliopiston ympäristöntutkimuskeskuksen Ambioticalaboratoriossa. Metallipitoisuudet määritettiin polykarbonaattialustoista hiukkaspäästöjen gravimetrisen määrittämisen jälkeen standardien SFS-EN ISO 17294-2 (2005), SFS-EN ISO 17294-1 (2006), EPA 3051A (2007) ja SFS-EN ISO 11885 (2009) mukaisesti ICP-MS-laitteella (induktiivisesti kytketty plasmamassaspektrometri) (Agilent 7500ce). Hiukkasista määritettiin seuraavat alkuaineet: Al, As, Ba, B, Cd, K, Ca, Co, S, Cr, Cu, Pb, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Si, Fe, Se, Zn, Sr, Ti ja V. Määrittäminen ns. suoralla määrittämällä typpihapolla (HNO<sub>3</sub>) kestäväidystä näytteistä. ICP-MS-analyysissä nestemäinen näyte sumutetaan aerosolina plasmaan, jossa näytteen sisältämä liuos haihtuu ja yhdisteet hajoavat atomeiksi. Massaspektrometri erottaa ionit ja tunnistaa alkuaineet massa-varaus-suhteen (m/z) avulla. Alkuaineen pitoisuus on suoraan verrannollinen ionien määrään.

### 2.3.5 Mikroskooppianalyysi

Aerosolikeräimellä kerätyt näytteet analysoitiin Jyväskylän yliopiston biologian osaston mikroskooppilaboratoriossa elektronimikroskoopilla (JEM-1400 TEM, Germany GmbH) käyttäen volfram-hehkulankaa ja 80 kV:n kiihdytysjännitettä.

## **2.4 Yhteenveto mittauksista ja analyyseista**

Taulukossa 3 on esitetty yhteenveto hiukkaspäästömittauksista ja suoritetuista analyyseista.

Taulukko 3. Yhteenveto hiukkaspäästömittauksista ja suoritetuista analyyseistä.

Tutkimus	Menetelmä	Näytteenotto / laite	Laitteen merkki ja malli	Analyysi / tulos
Hiukkaspitoisuus	Sähköinen liikkuvuus	SMPS, DMA, CPC	TSI SMPS 3936 TSI DMA 3081 TSI CPC 3776	Hiukkasten sähköinen liikkuvuus- koko ja lukumääräpitoisuus (1/cm <sup>3</sup> )
Hiukkaspitoisuus	Inertiaan perustuva impaktio, massapunnitus	DLPI Alumiinifolioalustat Polykarbonaattialustat	Dekati alipaineimpaktori 30 l/min	Hiukkasten aerodynaaminen koko ja massapitoisuus (mg/m <sup>3</sup> )
Hiilipitoisuus	IR-spektrometria	DLPI Alumiinifolioalustat	Calanus Uniquant CO <sub>2</sub> - analysointilaite	Hiilipitoisuus (mg/m <sup>3</sup> )
Hiukkasten ioni- koostumus	Ionikromatografi	DLPI Alumiinifolioalustat	Dionex ICS-1100	Ionikromatografinen analyysi (mg/m <sup>3</sup> )
Hiukkasten metalli- koostumus	ICP – MS	DLPI Polykarbonaattialustat	Agilent 7500ce	Induktiivisesti kytketty plasma- massaspektrometri (mg/m <sup>3</sup> )
Lämpötila	K-tyypin termopari	Flue Gas Analyzer	Testo 350 XL	Lämpötila T (°C)
Happi	Elektrokemiallinen kenno	Combustion Analyzer Flue Gas Analyzer	Testo330-2 LL Testo350 XL	Happipitoisuus O <sub>2</sub> (%)
Hiilimonoksidi	Elektrokemiallinen kenno	Combustion Analyzer Flue Gas Analyzer	Testo330-2 LL Testo350 XL	Hiilimonoksidipitoisuus CO (ppm)
Hiilivedyt	Elektrokemiallinen kenno	Combustion Analyzer Flue Gas Analyzer	Testo330-2 LL Testo350 XL	Hiilivetyjen pitoisuus C <sub>x</sub> H <sub>x</sub> (ppm)



## 2.5 Sähkösuodattimen virta-jännite-suhde

Sähkösuodattimen virta-jännite-suhde mitattiin vähentämällä jännitettä portaittain (17 – 6 kV 1 kV:n välein) ja seuraamalla virran muutosta (mA) kolmen minuutin välein. Virta-jännite-suhde mitattiin jäännöshappipitoisuuksilla 5 % ja 7 %. Suodattimen purkauselektrodi, keräyselektrodi ja harja puhdistettiin ennen mittausta.

## 2.6 Sähkösuodattimen erotustehokkuus virran ja jännitteen funktiona

Sähkösuodattimen erotustehokkuus virran ja jännitteen funktiona mitattiin virta-jännite-suhteen mittauksen yhteydessä SMPS-laitteistolla. Erotustehokkuus mitattiin jäännöshappipitoisuuksilla 5 % ja 7 %.

## 2.7 Hiukkasten varausluvun laskennallinen tarkastelu

Hiukkasen saama osuus teoreettisesta saturaatiovarauksesta laskettiin yhtälöllä 18. Aikavakio  $r_Q$  laskettiin yhtälön 19 likiarvolausekkeesta (viipymäaika  $t = 0,92$  s). Virrantiheys  $j_{NE}$  laskettiin käyttäen mitattuja virtoja (kuva 11) ja sähkösuodattimen keräyselektrodin pinta-alaa (yhtälö 25).

$$j_{NE} = \frac{i_{tot}}{A_{NE\ tot}} \quad (25)$$

jossa  $i_{tot}$  on koronavirta (mA) ja  $A_{NE\ tot}$  sähkösuodattimen keräyselektrodin pinta-ala (0,287 m<sup>2</sup>) (Riehle 1997).

Sähkökentän voimakkuus  $E$  laskettiin yhtälön 7 mukaisesti. Hiukkasten varausluku laskettiin Cochetin yhtälön (16) mukaisesti ja jaettiin alkeisvarauksella käyttäen arvoja  $T = 250$  °C ja elektronin vapaa matka  $\lambda = 140$  nm.

## 2.8 Tulosten esittäminen

Mittaustulosten raakadata käsiteltiin Microsoft Office Excel 2007-ohjelmalla. TSI Aerosol Instrument Manager Software for Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) Spectrometers Version 9.0.0 – ohjelma luokitteli SMPS-laitteistolla mitatut hiukkaspitoisuudet peräkkäisiin hiukkaskokokanaviin. Pitoisuudet korjattiin usean varauksen- ja diffuusiokorjauksilla. Hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuudet normalisoitiin jakamalla jokaisessa kanavassa olevien hiukkasten lukumäärä kyseisen kanavan logaritmisella leveydellä. Tulokset muutettiin yksiköihin 1/MJ ja mg/MJ (yhtälöt 26, 27 ja 28).

$$q_e = c_m \times \lambda \times k_{pa} \times Q_s \quad (26)$$

jossa  $q_e$  on ominaispäästö sisään syötettyä energiayksikköä kohti (mg/MJ),  $c_m$  mitattu epäpuhtauspitoisuus kuivassa kaasussa normaalitilassa (mg/m<sup>3</sup>),  $\lambda$  ilmakerroin (-),  $k_{pa}$  polttoaineen kosteudesta johtuva kerroin (-) ja  $Q_s$  kuivan polttoaineen palamisessa syntyvä kuiva savukaasumäärä energiayksikköä kohti normaalitilassa (m<sup>3</sup>/MJ) (SFS 5624 1990).

$$k = \frac{H_u}{H_u - H_w} \quad (27)$$

jossa  $H_u$  on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) ja  $H_w$  kosteuden haihduttamiseen kuluva lämpömäärä (MJ/kg) (SFS 5624 1990).

$$Q_s = c_{CO_2} + c_{N_2} + c_{SO_2} + c_{O_2} \quad (28)$$

jossa  $c_{CO_2}$  on CO<sub>2</sub>-pitoisuus kuivassa savukaasussa (m<sup>3</sup>n/MJ),  $c_{N_2}$  N<sub>2</sub>-pitoisuus kuivassa savukaasussa (m<sup>3</sup>n/MJ),  $c_{SO_2}$  SO<sub>2</sub>-pitoisuus kuivassa savukaasussa (m<sup>3</sup>n/MJ) ja  $c_{O_2}$  O<sub>2</sub>-pitoisuus kuivassa savukaasussa (m<sup>3</sup>n/MJ) (SFS 5624 1990).

Mittausjakson hiukkasten lukumääräpitoisuus esitettiin kokonaispitoisuutena  $N$  ( $N(d_p)$ ) mittausjakson keskiarvona sekä lukumäärä- ja massajakaumat kanavien keskiarvoisina pitoisuuksina  $N(dN/d\log(d_p))$  hiukkasen läpimitan funktiona. Tulokset redusoitiin 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen (SFS-EN 303-5:en 2012). Lukumääräpitoisuudet esitettiin vaikiintuneen tavan mukaisesti yksikössä 1/cm<sup>3</sup> ja massapitoisuudet yksikössä mg/m<sup>3</sup>. Liitteessä 6 on esitetty lukumääräpitoisuusjakaumat yksikössä 1/MJ ja liitteessä 7 on esitetty massapitoisuusjakaumat yksikössä mg/MJ. Laskelmissa käytetyt arvot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Laskelmissa käytetyt arvot.

Selite	Arvo	Yksikkö
polttoaineen kulutus	0,0011	kg/s
polttoaineteho	0,019	MW
polttoaineen koostumus		
hiili (C)	46,872	%
vety (H <sub>2</sub> )	5,766	%
happi (O <sub>2</sub> )	39,525	%
typpi (N <sub>2</sub> )	0,465	%
rikki (S)	0,0093	%
vesi (H <sub>2</sub> O)	7,0	%
tuhka	0,3672	%
ilmakerroin ( $\lambda$ )		
jäännöshappi 5 %	1,32	
jäännöshappi 7 %	1,51	
T, savukaasu	95	°C
T, ympäristö	25	°C
savukaasukanavan ylipaine (p)	0	kPa
kosteutta ilmasta	4,0	g/kg palamisilmaa
	31,68	g/kg polttoainetta
kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo H <sub>u</sub>	19	MJ/kg
kosteuden haihduttamiseen kuluva lämpömäärä H <sub>w</sub>	0,27	MJ/kg
kuivan savukaasun tuotto (Q <sub>s</sub> )		
jäännöshappi 5 %	0,329	m <sup>3</sup> n/MJ
jäännöshappi 7 %	0,377	m <sup>3</sup> n/MJ

### 3 TULOKSET

#### 3.1 Kaasumittaukset

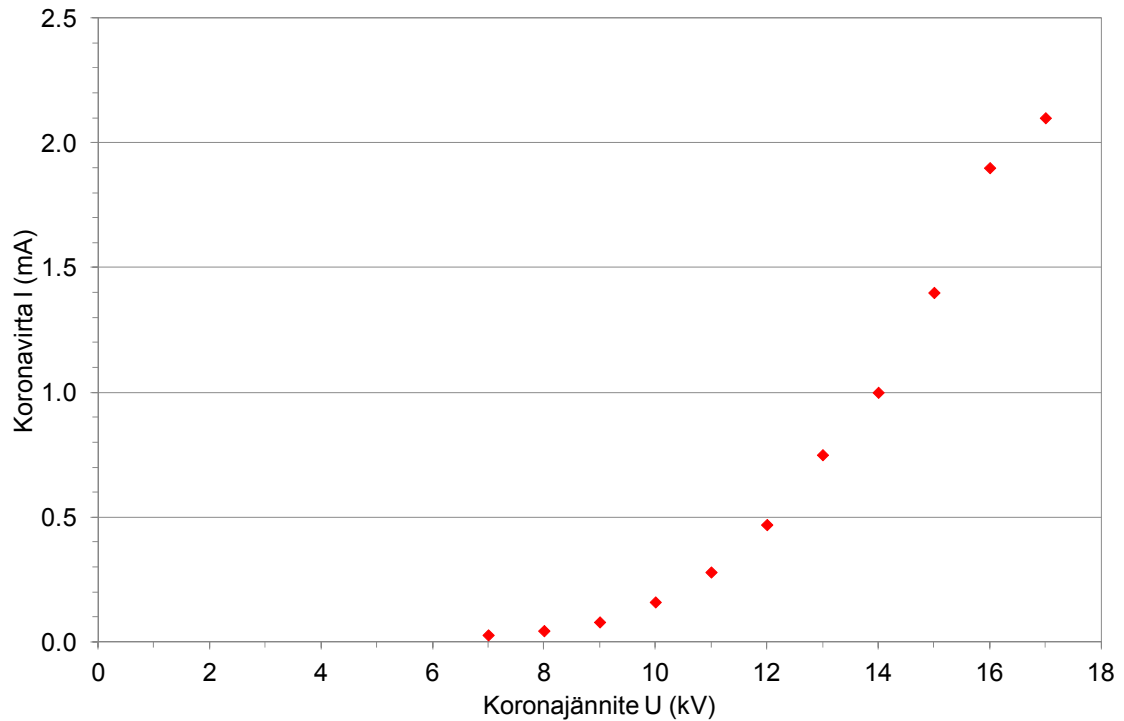
Mittausten aikana savukaasun hiilimonoksidipitoisuus oli 7 %:n jäännöshappipitoisuudella 52,3 ppm ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 138 ppm (taulukko 5). Hiilimonoksidipitoisuus oli 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 160 % korkeampi kuin 7 %:n jäännöshappipitoisuudella. Hiilivetyjen pitoisuus oli molemmilla jäännöshappipitoisuuksilla 0 ppm. Savukaasun lämpötila oli noin 95 °C. Koelaboratorion ilman lämpötila oli noin 25 °C.

Taulukko 5. Savukaasun hiilimonoksidin ja hiilivetyjen pitoisuudet sekä lämpötila mittauksen aikana 7 % ja 5 % jäännöshappipitoisuuksilla.

Mitattava suure	Jäännöshappipitoisuus 7 %	Jäännöshappipitoisuus 5 %
CO (ppm)	52,3	138
C <sub>x</sub> H <sub>x</sub> (ppm)	0	0
°C	95	95

#### 3.2 Sähkösuodattimen virta-jännite-suhde

Korona syttyi ja sähkövirta alkoi kulkea suodattimessa, kun jännite nostettiin 6 – 7 kV:in (kuva 12). Yli 15 kV:n jännitteellä elektrodien välillä kulki yli 2 mA:n virta ja suodatin toimi lähellä läpilyönnin rajaa. Jännitettä ei saatu nostettua yli 18 kV tehon loputtua jännitelähteestä. Jännitteen nostaminen yli 15 kV ei johtanut virran kasvuun ja läpilyöntiin, mikä on havaittavissa kuvassa 12 virta-jännite-käyrän taitumisena 15 kV jännitteen jälkeen. Ideaalisessa tapauksessa koronavirta kasvaa eksponentiaalisesti läpilyöntiin asti jännitettä lisättäessä (vrt. kuva 6). Koronavirran kasvun taituminen saattoi johtua vuotovirrasta suodattimen runkorakenteeseen purkauselektrodin ja runkorakenteen välisiä tefloneristeitä pitkin.



Kuva 12. Sähkösuodattimen virta-jännite-suhde. Sähkövirta alkaa kulkea 6 – 7 kV:n jännitteellä. Suodatin toimii läpilyönnin rajalla yli 15 kV:n jännitteellä ja yli 2,0 mA:n virralla.

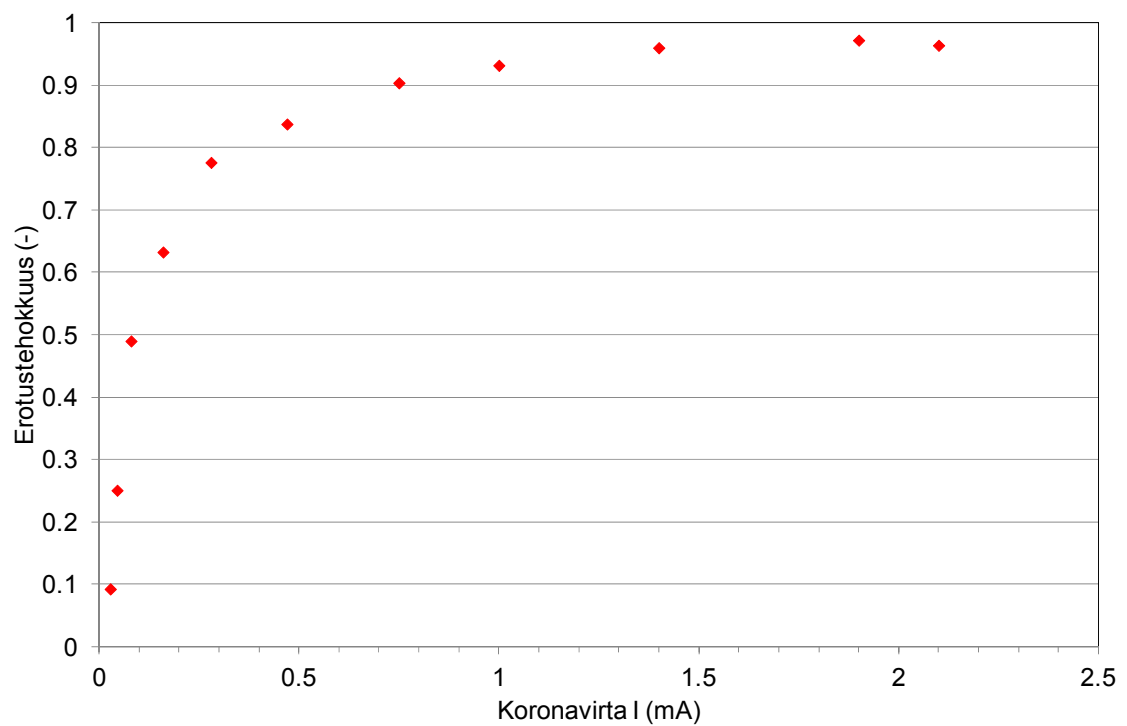
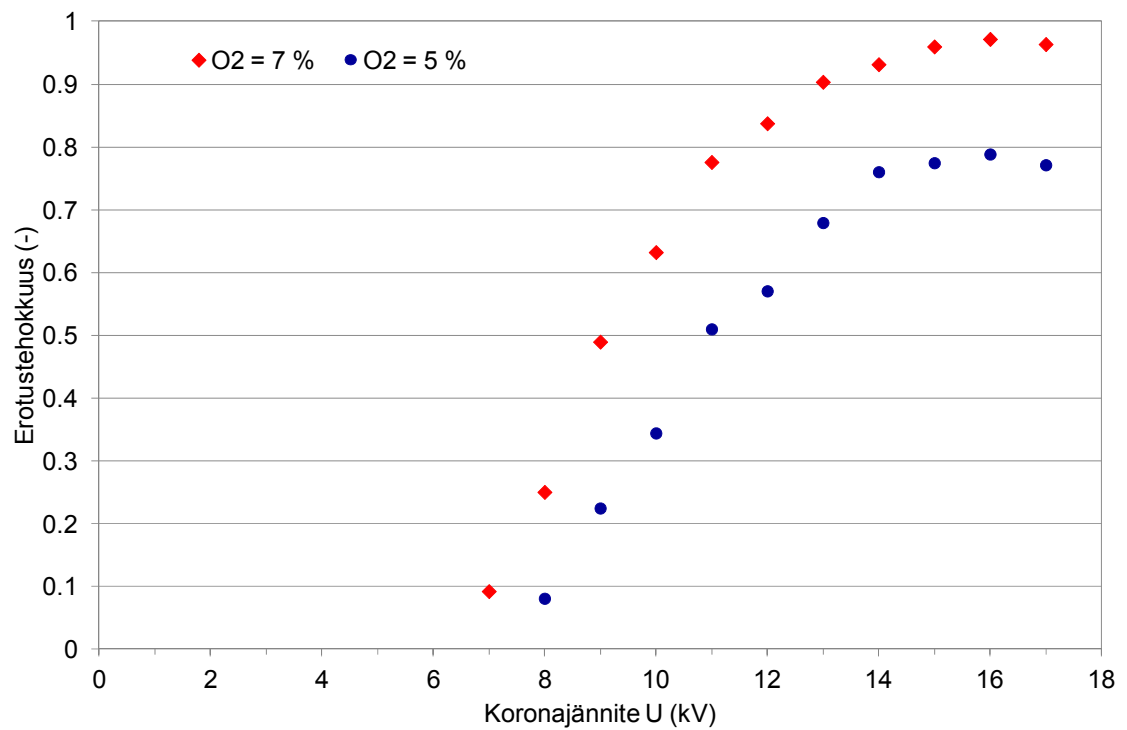
### 3.3 Sähkösuodattimen erotustehokkuus virran ja jännitteen funktiona

Sähkösuodattimen erotuskyky osoittautui tehokkaammaksi 7 %:n jäännöshappipitoisuudella kuin 5 %:n jäännöshappipitoisuudella (kuva 13). Lukumääräpitoisuuden perusteella laskettu erotustehokkuus oli 7 %:n jäännöshappipitoisuudella yli 13 kV:n jännitteellä yli 0,95 ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella yli 13 kV:n jännitteellä 0,75 – 0,8. Alhaisemmalla jäännöshappipitoisuudella tuotettujen hiukkasten pitoisuuden ja koostumuksen muutos heikensi erotustehokkuutta lähes 20 prosenttiyksikköä. Hiukkaset alkoivat erottua 7 %:n jäännöshappipitoisuudella noin 7 kV:n ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella alle 8 kV:n koronajännitteellä. Suurin erotustehokkuus saavutettiin 15 – 16 kV:n jännitteellä, minkä jälkeen erotustehokkuus hieman laski. Syynä tähän saattoi olla se, että yli 15 – 16 kV:n jännitteillä osa virrasta saattoi mennä eristeiden yli, jolloin todellinen koronavirta hieman heikkeni.

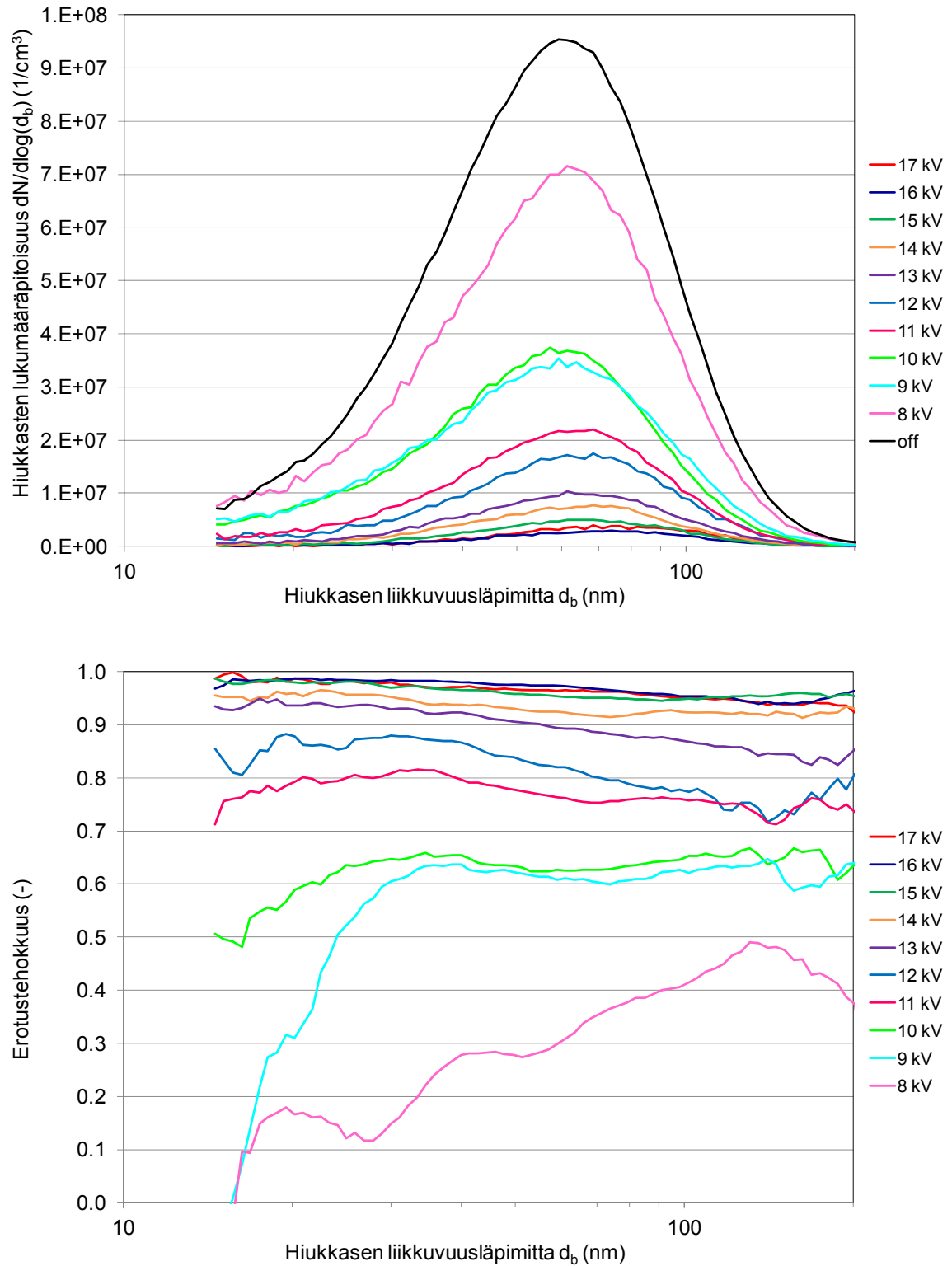
Purkaus- ja keräyselektrodin välisen ilman ionisoituessa suodattimen erotustehokkuus parani nopeasti (kuva 13). Erotustehokkuus koronavirran funktiona nousi lähes 1,0:an koronavirran noustessa yli 1,0 mA. Virran kasvattaminen yli 1,0 mA ei lisännyt hiukkasten

varautumista eikä parantanut erotustehokkuutta. Syynä tähän oli todennäköisesti virran meneminen eristeiden yli.

Koronajännitteen kasvaessa 8 kV:sta 17 kV:in hiukkasten lukumääräjakauman huipun sijainti siirtyi noin 60 nm:sta noin 75 nm:in (kuva 14). Erotustehokkuus heikkeni voimakkaasti alle 30 nm kokoluokan hiukkasilla koronajännitteen laskiessa alle 12 kV. Erotustehokkuus oli korkein noin 30 nm:n hiukkaskokoalueella ja laski noin 300 nm:n hiukkaskokoalueella.



Kuva 13. Sähkösuodattimen erotustehokkuus jännitteen funktiona jäännöshappipitoisuuksille 5 % ja 7 % sekä erotustehokkuus virran funktiona lukumääräpitoisuudesta laskettuna.



Kuva 14. Sähkösuodattimen jännitteen vaikutus lukumääräpitoisuuteen sekä erotustehokkuuteen hiukkaskoon funktiona.



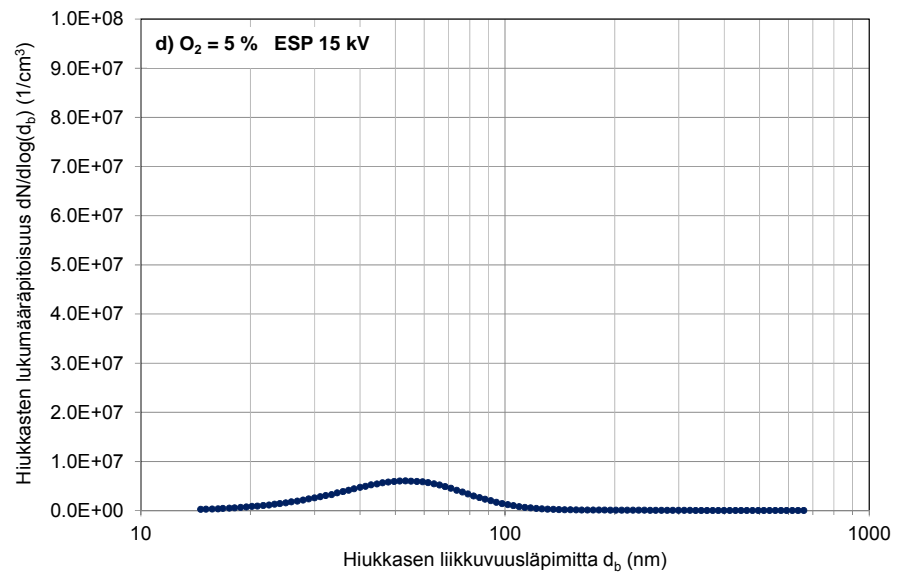
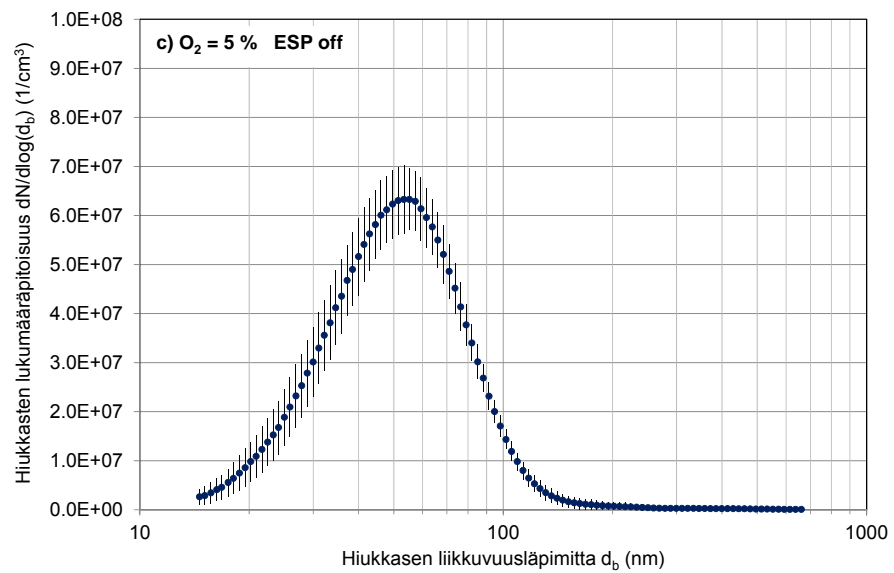
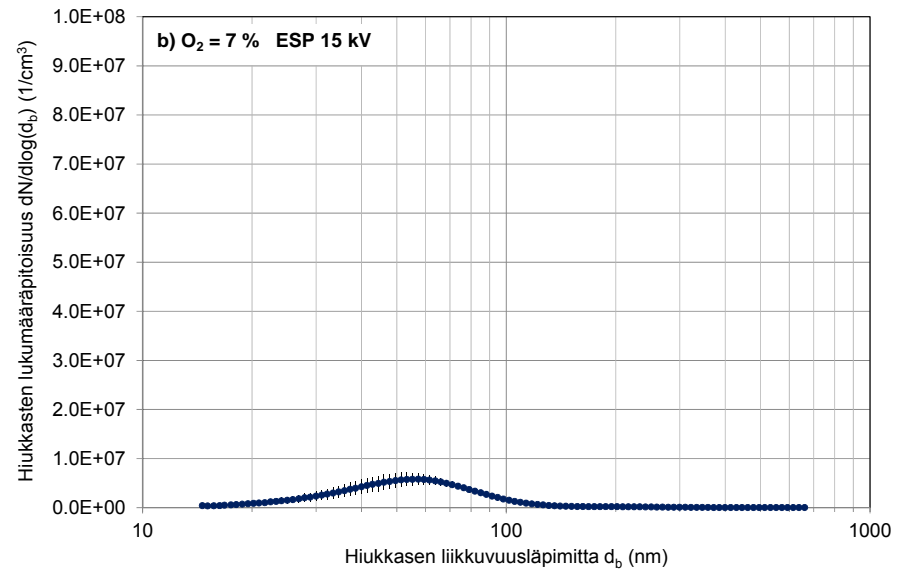
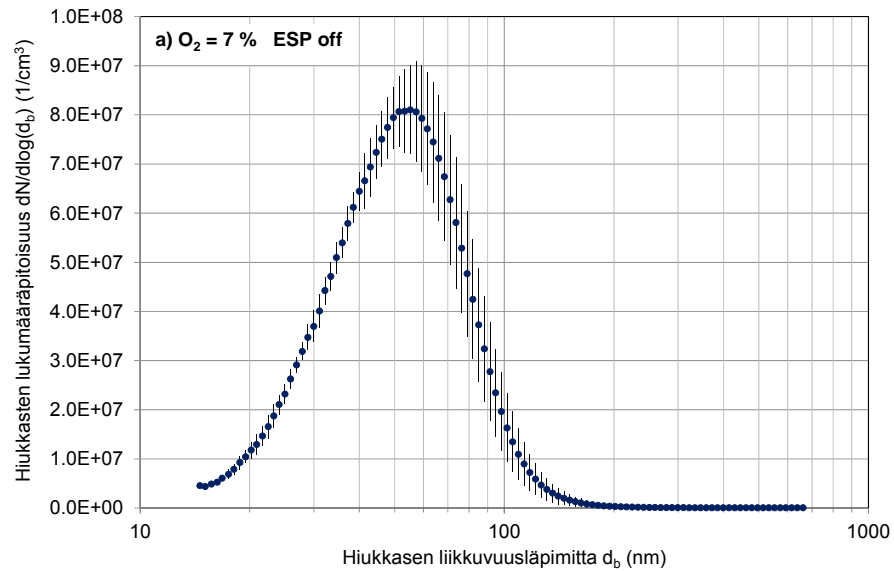
### 3.4 Lukumääräjakauma

Hiukkasten lukumääräpitoisuudet redusoiitiin 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen ja esitettiin vakiintuneen ilmaisutavan mukaisesti yksikössä  $1/\text{cm}^3$ . Hiukkaspäästöjen lukumääräjakamat olivat unimodaalisia jäännöshappipitoisuuksilla 7 % ja 5 % sähkösuodatin pois päältä sekä 15 kV:n jännitteellä. Jakaumien huiput sijaitsivat molemmilla jäännöshappipitoisuuksilla sekä sähkösuodatin pois päältä ja 15 kV:n jännitteellä hiukkaskokoalueella 50 – 60 nm. Huipun kohdalla hiukkaspitoisuudet olivat sähkösuodatin pois päältä 7 %:n jäännöshappipitoisuudella noin  $8,0 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella yli  $6,0 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$ . Sähkösuodatin päällä mitatut hiukkaspitoisuudet olivat molemmilla jäännöshappipitoisuuksilla alle  $1,0 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$ . Jakaumat olivat oikealle vinoja (kuva 15) (liite 6). Hiukkaspäästöjen lukumääräjakaman muoto ja huipun sijainti eivät muuttuneet sähkösuodattimen vaikutuksesta.

Absoluuttiset hiukkaspitoisuudet olivat 7 %:n happipitoisuudella ilman sähkösuodatinta  $3,5 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  ja 15 kV:n jännitteellä  $0,44 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$ . Vastaavat luvut 5 %:n jäännöshappipitoisuudella olivat  $3,0 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  ja  $0,67 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  (taulukko 6) (liite 1). Sähkösuodattimen vaikutuksesta hiukkasten lukumääräpäästöt vähenivät 7 %:n jäännöshappipitoisuudella  $3,1 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella  $2,3 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$ . Erotustehokkuus hiukkasten lukumääräpitoisuudelle 7 %:n jäännöshappipitoisuudella oli 0,87 ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 0,78. Jäännöshappipitoisuuden muutos 7 %:sta 5 %:in vähensi hiukkasten lukumääräpäästöjä sähkösuodatin pois päältä  $0,52 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  (14,7 %) ja oli 15 kV:n jännitteellä  $0,22 \times 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  (50,1 %) suurempi.

Taulukko 6. Hiukkaspäästöjen lukumääräpitoisuus ja sähkösuodattimen erotustehokkuus. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Mitattava suure	7 %		5 %	
	ESP off	ESP 15 kV	ESP off	ESP 15 kV
lukumääräpitoisuus ( $10^7/\text{cm}^3$ )	3,5	0,44	3,0	0,67
lukumääräpitoisuus ( $10^7/\text{MJ}$ )	2,1	0,17	1,00	0,16
erotustehokkuus		0,87		0,78



Kuva 15. Hiukkaspäästöjen lukumääräjakaumat 7 %:n ja 5 %:n jäännöshappipitoisuuksilla sähkösuodatin pois päältä ja 15 kV:n jännitteellä. Pitoisuudet on reducedu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen. Hajontapalkit kuvaavat mittausten keskihajontaa.

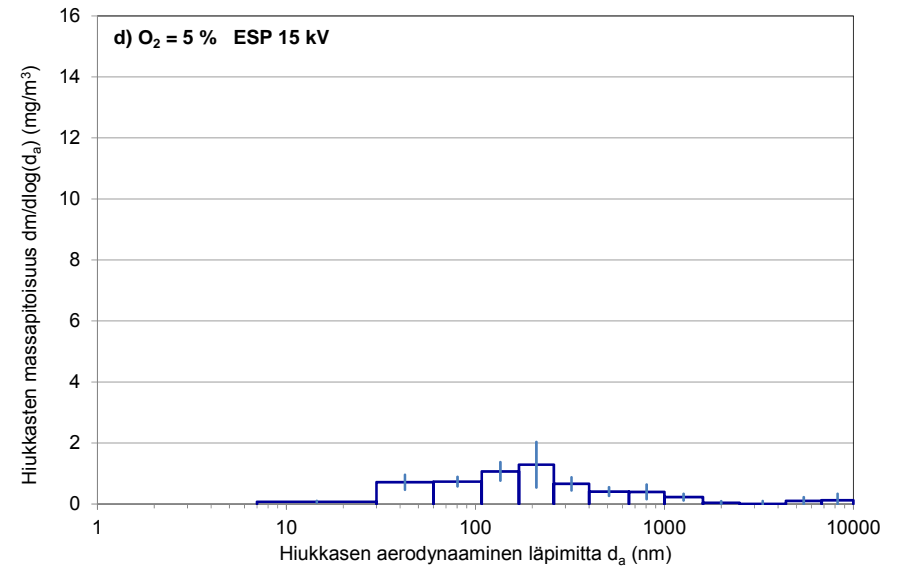
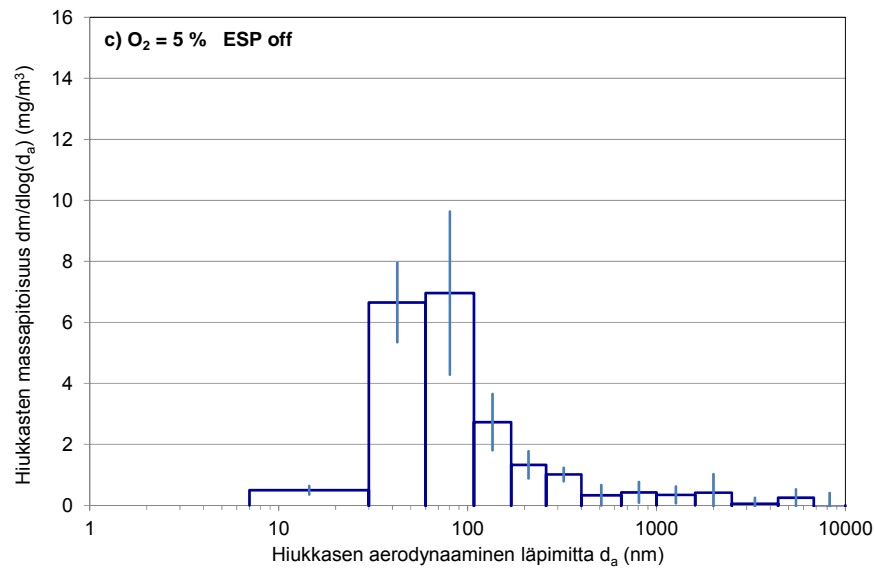
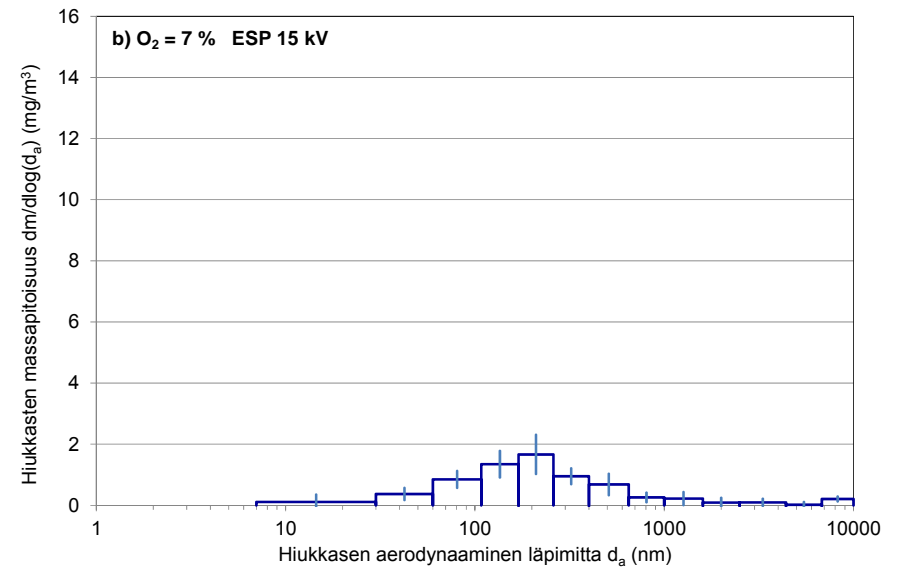
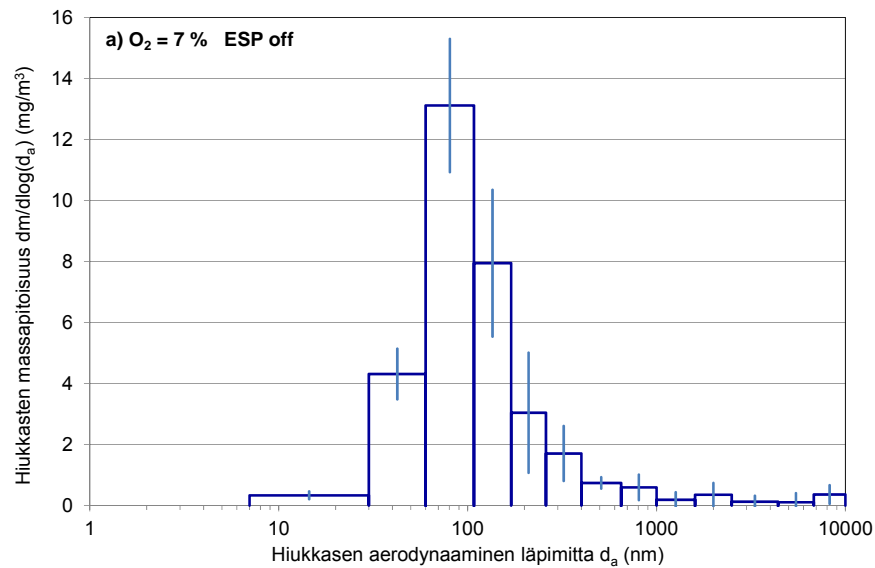
### 3.5 Massajakauma

Hiukkasten massapitoisuudet redusoiitiin 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen ja esitettiin vaikiintuneen ilmaisu-tavan mukaisesti yksikössä  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Hiukkaspäästöjen massajakaumat olivat unimodaalisia 5 %:n ja 7 %:n jäännöshappipitoisuuksilla sekä sähkösuodatin pois päältä ja 15 kV:n jännitteellä. Jakauman huippu oli sähkösuodatin pois päältä 7 %:n jäännöshappipitoisuudella kokoalueella 60 – 110 nm ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella kokoalueella 30 – 100 nm. Huipun kohdalla hiukkaspitoisuudet olivat 7 %:n jäännöshappipitoisuudella noin  $13 \text{ mg}/\text{m}^3$  ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella alle  $7,0 \text{ mg}/\text{m}^3$ . 15 kV:n jännitteellä jakaumien huiput olivat molemmilla jäännöshappipitoisuuksilla hiukkaskokoalueella 110 – 130 nm. Vastaavat hiukkaspitoisuudet olivat molemmilla jäännöshappipitoisuuksilla alle  $2,0 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Ilman suodatusta mitatut massajakaumat olivat oikealle vinoja. 15 kV:n jännitteellä mitatut jakaumat mukailivat log-normaalialia jakaumaa (kuva 16) (liite 7). Hiukkaspäästöjen massajakauman muoto ei muuttunut sähkösuodattimen vaikutuksesta. Massajakauman huipun sijainti siirtyi suuremmalle hiukkaskokoalueelle. Sähkösuodatin vähensi hiukkasten massapäästöjä tehokkaimmin hiukkaskokoalueella 60 – 110 nm, jolla mitattiin pelletin pienpolton suurimmat hiukkasten massapäästöt.

Absoluuttiset hiukkaspitoisuudet 7 %:n jäännöshappipitoisuudella olivat sähkösuodatin pois päältä  $7,8 \text{ mg}/\text{m}^3$  ja 15 kV:n jännitteellä  $1,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ . 5 %:n jäännöshappipitoisuudella vastaavat tulokset olivat  $5,4 \text{ mg}/\text{m}^3$  ja  $1,3 \text{ mg}/\text{m}^3$  (taulukko 7) (liite 2). Sähkösuodattimen vaikutuksesta hiukkasten massapäästöt vähenivät 7 %:n jäännöshappipitoisuudella  $6,3 \text{ mg}/\text{m}^3$  ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella  $4,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Sähkösuodattimen erotustehokkuus hiukkasten massapitoisuudelle 7 %:n jäännöshappipitoisuudella oli 0,81 ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 0,76. Jäännöshappipitoisuuden muutos 7 %:sta 5 %:in vähensi hiukkasten massapäästöjä sähkösuodatin pois päältä  $2,4 \text{ mg}/\text{m}^3$  (30,6 %) ja 15 kV:n jännitteellä  $0,18 \text{ mg}/\text{m}^3$  (12,3 %).

Taulukko 7. Hiukkaspäästöjen massapitoisuus ja sähkösuodattimen erotustehokkuus. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoiitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Mitattava suure	7 %		5 %	
	ESP off	ESP 15 kV	ESP off	ESP 15 kV
massapitoisuus ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	7,8	1,5	5,4	1,3
massapitoisuus ( $\text{mg}/\text{MJ}$ )	3,0	0,56	2,1	0,49
erotustehokkuus		0,81		0,76



Kuva 16. Hiukkaspäästöjen massajakaumat 7 %:n ja 5 %:n jäännöshappipitoisuuksilla sähkösuodatin pois päältä ja 15 kV:n jännitteellä. Pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen. Hajontapalkit kuvaavat mittausten keskihajontaa.

### 3.6 Kemiallinen koostumus

Hiukkaspäästöjen hiilipitoisuus 7 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodatin pois päältä oli  $1,6 \text{ mg/m}^3$  (20,8 %) ja 15 kV:n jännitteellä  $0,84 \text{ mg/m}^3$  (57,2 %). 5 %:n jäännöshappipitoisuudella hiilen massapitoisuus sähkösuodatin pois päältä oli  $0,76 \text{ mg/m}^3$  (14,1 %) ja sähkösuodatin päällä  $0,35 \text{ mg/m}^3$  (27,4 %) (taulukko 8) (kuva 17) (liite 3). 7 %:n jäännöshappipitoisuudella hiilipäästö väheni sähkösuodatuksen vaikutuksesta  $0,78 \text{ mg/m}^3$  ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella  $0,41 \text{ mg/m}^3$ . Sähkösuodattimen erotustehokkuus hiilelle oli 7 %:n jäännöshappipitoisuudella 0,48 ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 0,54. Jäännöshappipitoisuuden muuttaminen 7 %:sta 5 %:in vähensi hiukkasten hiilipitoisuutta sähkösuodatin pois päältä  $0,86 \text{ mg/m}^3$  (53,1 %) ja 15 kV:n jännitteellä  $0,49 \text{ mg/m}^3$  (58,3 %).

Hiukkaspäästöjen ionipitoisuudet (kloridi, nitraatti, nitriitti ja sulfaatti) olivat 7 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodatin pois päältä  $2,2 \text{ mg/m}^3$  (27,8 %) ja suodatin päällä  $0,14 \text{ mg/m}^3$  (9,5 %). 5 %:n jäännöshappipitoisuudella ionipitoisuus suodatin pois päältä oli  $1,7 \text{ mg/m}^3$  (30,8 %) ja suodatin päällä  $0,18 \text{ mg/m}^3$  (14,3 %) (taulukko 8) (kuva 17) (liite 4). 7 %:n jäännöshappipitoisuudella ionipitoisuus väheni sähkösuodattimen vaikutuksesta  $2,0 \text{ mg/m}^3$  ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella  $1,5 \text{ mg/m}^3$ . Sähkösuodattimen erotustehokkuus ioneille oli 7 %:n jäännöshappipitoisuudella 0,94 ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 0,89. Jäännöshappipitoisuuden muuttaminen 7 %:sta 5 %:in vähensi hiukkaspäästöjen ionipitoisuutta sähkösuodatin pois päältä  $0,49 \text{ mg/m}^3$  (22,7 %) ja oli 15 kV:n jännitteellä  $0,04 \text{ mg/m}^3$  (28,6 %) suurempi.

Kloridi-, nitraatti- ja nitriittipitoisuudet vaihtelivat 7 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodatin pois päältä  $0,072 - 0,22 \text{ mg/m}^3$  (0,9 – 2,8 %) välillä ja 15 kV:n jännitteellä  $0,0088 - 0,018 \text{ mg/m}^3$  (0,6 – 1,2 %) välillä. 5 %:n jäännöshappipitoisuudella kloridi-, nitraatti- ja nitriittipitoisuudet vaihtelivat sähkösuodatin pois päältä  $0,049 - 0,15 \text{ mg/m}^3$  (0,9 – 2,7 %) välillä ja sähkösuodatin 15 kV:n jännitteellä  $0,014 - 0,022 \text{ mg/m}^3$  (1,1 – 1,7 %) välillä. Sulfaattipitoisuus oli 7 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodatin pois päältä  $1,8 \text{ mg/m}^3$  (22,6 %) ja sähkösuodatin päällä  $0,10 \text{ mg/m}^3$  (6,9 %). 5 %:n jäännöshappipitoisuudella sulfaattipitoisuus oli sähkösuodatin pois päältä  $1,3 \text{ mg/m}^3$  (24,7 %) ja 15 kV:n jännitteellä  $0,13 \text{ mg/m}^3$  (10,3 %) (kuva 17) (liite 4).

Metallipitoisuus oli 7 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodatin pois päältä 3,5 mg/m<sup>3</sup> (44,7 %) ja suodatin 15 kV:n jännitteellä 0,18 mg/m<sup>3</sup> (12,0 %). 5 %:n jäännöshappipitoisuudella metallipitoisuus oli sähkösuodatin pois päältä 1,6 mg/m<sup>3</sup> (29,7 %) ja suodatin päällä 0,17 mg/m<sup>3</sup> (13,5 %) (taulukko 8) (kuva 17) (liite 5). Metallipitoisuus väheni sähkösuodatuksella 7 %:n jäännöshappipitoisuudella 3,3 mg/m<sup>3</sup> ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 1,4 mg/m<sup>3</sup>. 7 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodattimen erotustehokkuus hiukkaspäästöjen metallipitoisuudelle oli 0,95 ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 0,89. Jäännöshappipitoisuuden muuttaminen 7 %:sta 5 %:in vähensi hiukkaspäästöjen metallipitoisuutta sähkösuodatin pois päältä 1,9 mg/m<sup>3</sup> (53,7 %) ja 15 kV:n jännitteellä 0,01 mg/m<sup>3</sup> (5,6 %). Analysoiduista metalleista (alumiini, arseeni, barium, boori, kadmium, kalium, kalsium, koboltti, rikki, kromi, kupari, lyijy, magnesium, mangaani, molybdeeni, natrium, nikkeli, pii, rauta, seleeni, sinkki, strontium, titaani ja vanadiini) suurimmat pitoisuudet havaittiin ilman sähkösuodatusta kaliumilla, rikillä ja sinkillä sekä sähkösuodatuksen jälkeen kaliumilla, kalsiumilla ja raudalla. Määritysrajaa alhaisemmat pitoisuudet havaittiin arseenilla, kadmiumilla, koboltilla, magnesiumilla, molybdeenilla, seleenillä ja vanadiinilla.

Analyyseissa tuntemattomaksi jääneiden yhdisteiden osuus 7 %:n jäännöshappipitoisuudella oli sähkösuodatin pois päältä 0,52 mg/m<sup>3</sup> (6,7 %) ja suodatin 15 kV:n jännitteellä 0,31 mg/m<sup>3</sup> (21,4 %). 5 %:n jäännöshappipitoisuudella tuntemattomiksi yhdisteiksi jäi suodatin pois päältä 1,4 mg/m<sup>3</sup> (25,3 %) ja suodatin 15 kV:n jännitteellä 0,57 mg/m<sup>3</sup> (44,8 %). Hiukkaspäästöjen tuntematon osuus koostui metalleista, joiden massapitoisuus oli alle määritysrajan, kosteudesta sekä luultavasti fosforista, fosfaatista, typpiyhdisteistä ja metallioksidoista (taulukko 8) (kuva 17).

Sulfaatin ainemäärän osuus oli molemmilla jäännöshappipitoisuuksilla sekä sähkösuodatin pois päältä että suodatin 15 kV:n jännitteellä suurempi kuin kalsiumin ja natriumin osuudet (taulukko 9). Kaliumin ainemäärän osuus 7 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodatin pois päältä ja päällä sekä 5 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodatin pois päältä oli paljon suurempi kuin sulfaatin ainemäärän osuus. Savukaasun sisältämät sulfaatti-ionit olivat luultavasti sitoneet savukaasuun höyrystyneen kaliumin vähemmän reaktiiviseen muotoon kaliumsulfaatiksi, mikä oli havaittavissa savukaasun hiukkaspäästöjen korkeina sulfaatti- ja kaliumpitoisuuksina. Savukaasu sisälsi ainemääränä kaliumia 7 %:n jäännöshappipitoisuudella sähkösuodatin pois päältä 82,0 % ja 15 kV:n jännitteellä 40,0 % sekä 5 %:n

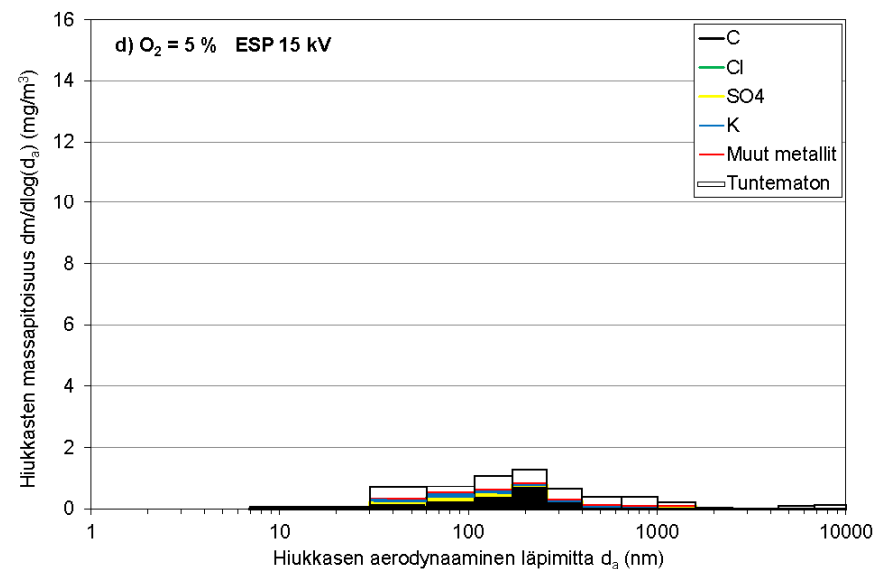
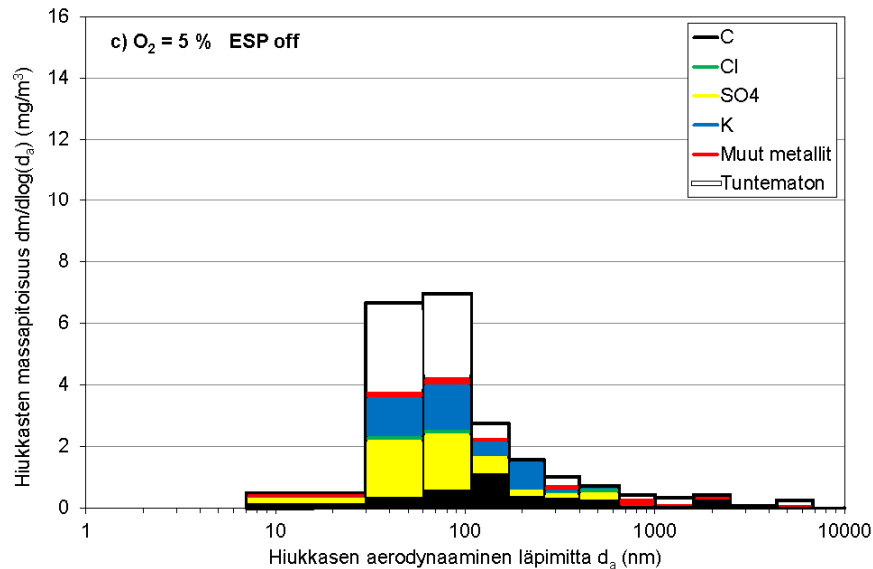
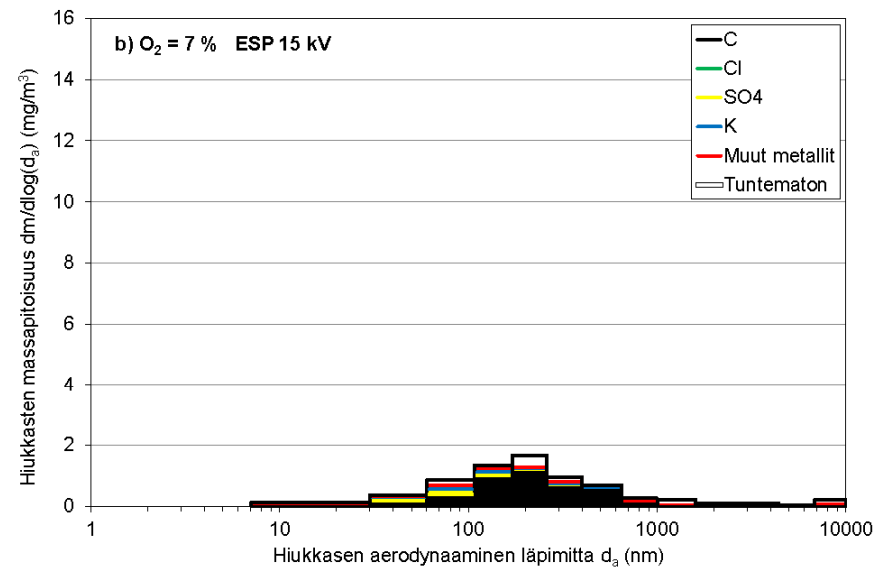
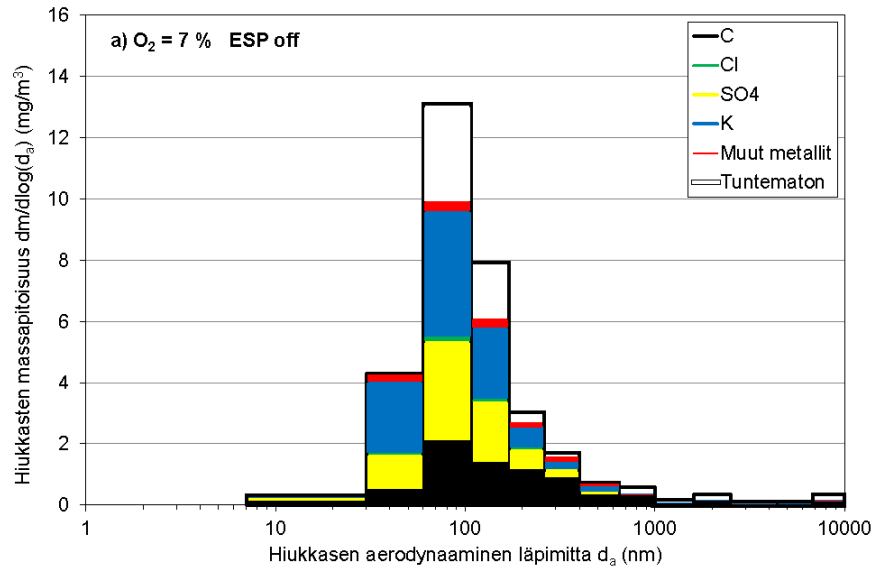
jäännöshappipitoisuudella suodatin pois päältä 2,9 % enemmän kuin sulfaatti pystyi sitomaan, mikä saattoi johtaa kaliumkarbonaatin ja kaliumhydroksidin muodostumiseen.

Taulukko 8. Hiukkaspäästöjen kemiallinen koostumus ja sähkösuodattimen erotustehokkuus. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Analyysi	Mitattava suure	7 %		5 %	
		ESP off	ESP 15 kV	ESP off	ESP 15 kV
hiili	massapitoisuus (mg/m <sup>3</sup> )	1,6	0,84	0,76	0,35
	massapitoisuus (mg/MJ)	0,62	0,32	0,29	0,13
	erotustehokkuus		0,48		0,54
ionit	massapitoisuus (mg/m <sup>3</sup> )	2,2	0,14	1,7	0,18
	massapitoisuus (mg/MJ)	0,83	0,053	0,64	0,070
	erotustehokkuus		0,94		0,89
metallit	massapitoisuus (mg/m <sup>3</sup> )	3,5	0,18	1,6	0,17
	massapitoisuus (mg/MJ)	1,3	0,067	0,61	0,066
	erotustehokkuus		0,95		0,89
tuntematon	massapitoisuus (mg/m <sup>3</sup> )	0,52	0,31	1,4	0,57
	massapitoisuus (mg/MJ)	0,20	0,12	0,52	0,22
	erotustehokkuus		0,40		0,58

Taulukko 9. Hiukkaspäästöjen sulfaatin, kaliumin, natriumin ja kalsiumin ainemäärät sekä kalium-, natrium- ja kalsiumsulfaattien mooliosuuksien suhteet.

Analyysi	Mitattava suure	7 %		5 %	
		ESP off	ESP 15 kV	ESP off	ESP 15 kV
sulfaatti	ainemäärä (10 <sup>-7</sup> /m <sup>3</sup> )	1,8	0,10	1,4	0,14
kalium	ainemäärä (10 <sup>-7</sup> /m <sup>3</sup> )	6,7	0,28	2,9	0,24
K/SO <sub>4</sub>	mooliosuuksien suhde	3,6:1	2,7:1	2,1:1	1,8:1
natrium	ainemäärä (10 <sup>-7</sup> /m <sup>3</sup> )	0,22	0,020	0,093	0,046
Na/SO <sub>4</sub>	mooliosuuksien suhde	0,12:1	0,19:1	0,07:1	0,34:1
kalsium	ainemäärä (10 <sup>-7</sup> /m <sup>3</sup> )	0,14	0,049	0,097	0,031
Ca/SO <sub>4</sub>	mooliosuuksien suhde	0,08:1	0,46:1	0,07:1	0,23:1

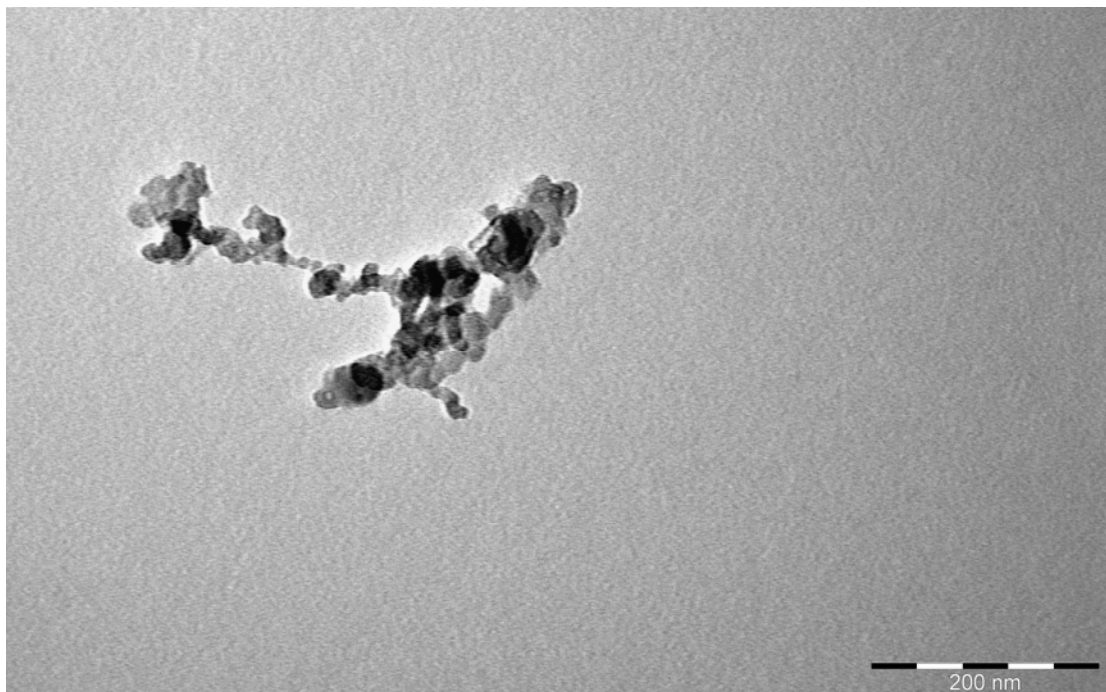


Kuva 17. Hiukkaspäästöjen kemiallinen koostumus 7 %:n ja 5 %:n jäännöshappipitoisuuksilla sähkösuodatin pois päältä ja 15 kV:n jännitteellä. Pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

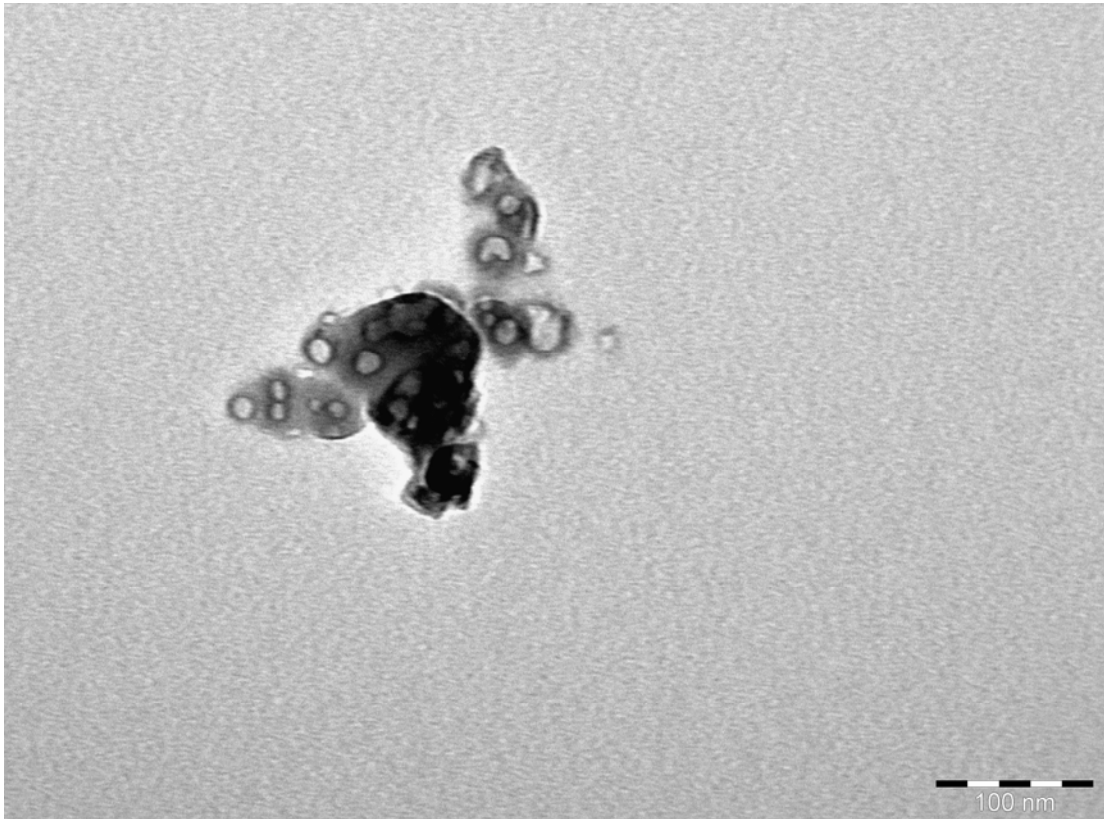


### 3.7 Mikroskooppianalyysi

Elektronimikroskooppikuvissa havaitut hiukkaset olivat luultavasti nokihiukkasten muodostamia agglomeraatteja (kuvat 18 ja 19). Havaittujen hiukkasten läpimitat olivat 200 – 500 nm. Kuvan 17 hiukkanen on luultavasti puhdasta nokea. Kuvan 18 hiukkasessa on noen lisäksi havaittavissa tuhkaa vaaleina hiukkasina. Pellettipolton hiukaspäästöissä tuhka näyttää olevan irrallisina hiukkasina savukaasussa sekä sitoutuneena kemiallisilla tai sähköisillä sidoksilla nokihiukkasten pinnalle. Kuvien perusteella ei voi päätellä, onko tuhka hiukkasia sitoutuneena tai irrallaan hiilimatriisin sisällä.



Kuva 18. TEM-kuva pellettipolton nokihiukkasesta. Kiihdytysjännite 80 kV.

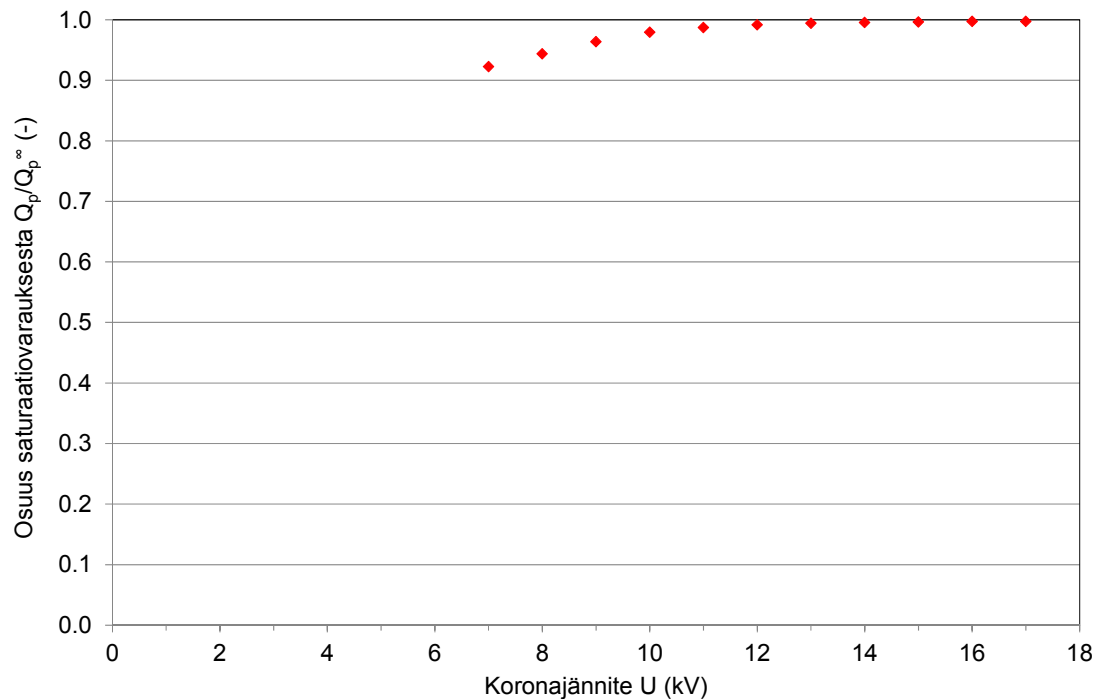


Kuva 19. TEM-kuva pellettipolton nokihiukkasesta. Kuvassa on havaittavissa tuhkaa sitoutuneena nokihiukkasen pinnalle vaaleina hiukkasina. Kiihdytysjännite 80 kV.

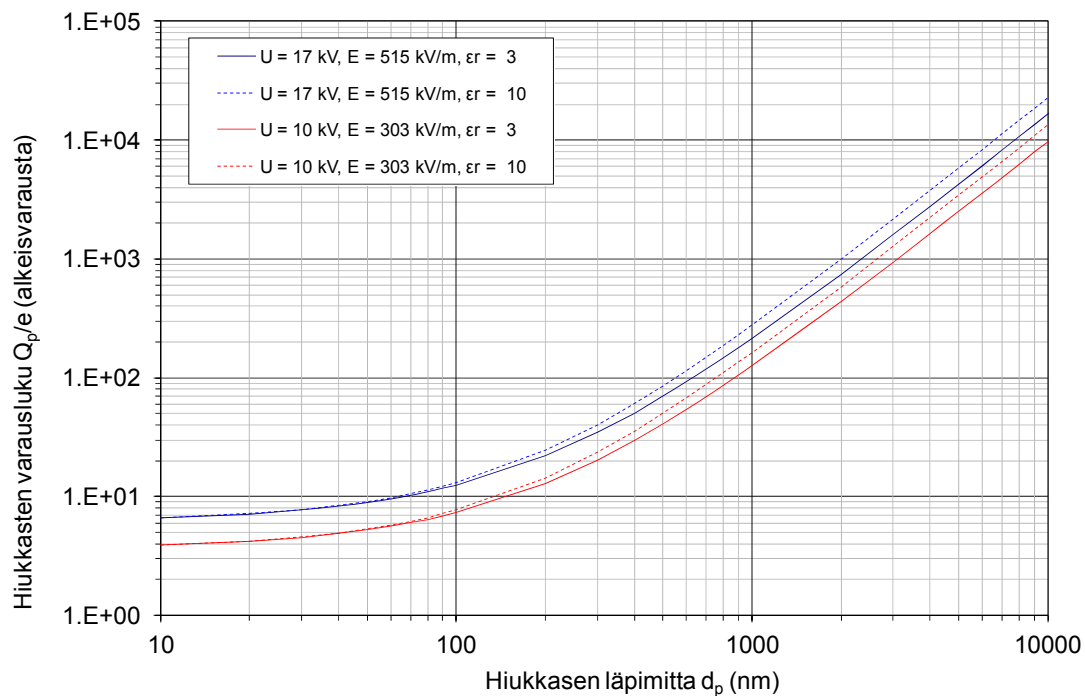
### 3.8 Hiukkasten varausluvun laskennallinen tarkastelu

Hiukkasten varautumisen laskennallinen tarkastelu osoitti sähkösuodattimen geometrian ja savukaasun viipymäajan suodattimessa olevan riittäviä hiukkasten saturaatiovarautumiselle (kuva 20). Laskennallisesti hiukkaset saavuttivat saturaatiovarauksen 12 kV:n jännitteellä.

10 ja 17 kV:n jännitteillä halkaisijaltaan 10 – 100 nm:n hiukkasilla oli laskennallisesti alle 10 elektronin varaus (kuva 21). Hiukkaskoon kasvaessa yli 100 nm hiukkasen varausluku alkoi voimakkaasti nousta. Lämpimitaltaan alle 100 nm:n hiukkasilla dielektrisyysvakio ei vaikuttanut merkittävästi hiukkasten varautumiseen. Halkaisijaltaan yli 100 nm:n hiukkasilla dielektrisyysvakion vaikutus varautumiseen osoittautui hieman suuremmaksi. Hiukkasen sähköjohtavuudella on luultavasti suurempi vaikutus hiukkasen erottumiseen sähkösuodattimessa kuin dielektrisyysvakiolla.



Kuva 20. Hiukkasen varauksen osuus saturaatiovarauksesta koronajännitteen funktiona. Laskennallisesti hiukkaset saavuttavat saturaatiovarauksen 12 kV:n jännitteellä.



Kuva 21. Hiukkasen varausluku halkaisijan funktiona parametrina sähkökentän voimakkuus ja hiukkasen dielektrisyysvakio.  $\epsilon_r = 3$  on nokihiukkasen dielektrisyysvakio ja  $\epsilon_r = 10$  on tuhkan dielektrisyysvakio.

## 4 TULOSTEN TARKASTELO

### 4.1 Sähkösuodattimen erotustehokkuus

Puun pienpolton hiukkaspäästöjen vähentämistä sähkösuodattimella on tutkittu vähän. Schmatloch & Rauch (2005) ovat saavuttaneet hiukkaspäästöjen sähkösuodatuksella 0,70 ja 0,80 erotustehokkuudet 18 – 20 kV:n jännitteellä. Dastoori ym. (2011) saavuttivat 0,91 erotustehokkuuden 20 kV:n jännitteellä. Bologna ym. (2009) ovat tutkineet panospolton hiukkaspäästöjen vaihtelua polttoprosessin eri vaiheissa ja saavuttivat keskimääräisesti 0,62 keräystehokkuuden 18 – 19 kV:n koronajännitteellä.

Tämän tutkimuksen yhteydessä kehitettiin puun pienpoltoon tarkoitettuna sähkösuodattimen prototyyppi. Sähkösuodattimen korona syttyi 6 – 7 kV:n jännitteellä ja toimi läpilyönnin rajalla 15 kV:n jännitteellä, jolloin purkaus- ja keräyselektrodien välillä kulki yli 2 mA:n virta. Sähkösuodattimen erotustehokkuus oli 7 %:n jäännöshappipitoisuudella hiukkasten lukumääräpitoisuudelle 0,87 ja massapitoisuudelle 0,81. 5 %:n jäännöshappipitoisuudella erotustehokkuus oli hiukkasten lukumääräpitoisuudelle 0,78 ja massapitoisuudelle 0,76. Erotustehokkuus osoittautui 7 %:n jäännöshappipitoisuudella hiukkasten lukumääräpitoisuudelle 11,5 % ja massapitoisuudelle 6,6 % suuremmaksi kuin 5 %:n jäännöshappipitoisuudella. Tuhkan erotustehokkuus 7 %:n jäännöshappipitoisuudella oli 95,8 % ja 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 64,8 % suurempi kuin hiilen erotustehokkuus. Erotustehokkuus laski pienillä, läpimitaltaan alle 100 nm:n hiukkasilla. Syynä tähän oli luultavasti hiukkasten huono varautuminen. Tämä oli havaittavissa myös hiukkasten varautumisen laskennallisessa tarkastelussa, jonka mukaan halkaisijaltaan alle 100 nm tuhka- ja nokihiukkasten varautuminen oli voimakkaasti riippuvainen hiukkaskoosta.

Puun panospolton epätäydellisen palamisen ja stabiilin polttoprosessin hiukkaspäästöjen eroja ovat tutkineet aikaisemmin Johansson ym. (2003) ja Tissari ym. (2008a). Johansson ym. (2003) havainnot ovat yhtäläisiä tämän tutkimuksen kanssa. Jäännöshappipitoisuuden alentaminen noin 7 %:sta noin 4 – 5 %:in vähensi hiukkaspäästöjen massapitoisuutta 67,4 %. Tissari ym. (2008a) havaintojen mukaan epätäydellisen palamisen aiheuttamat hiukkasten massapitoisuudet olivat noin kuusinkertaiset stabiiliin polttoprosessiin verrattuna.

Tässä tutkimuksessa pelletin pienpolton hiukkaspäästöjen lukumääräpitoisuudet osoittautuivat 17,3 % ja massapitoisuudet 44,1 % suuremmiksi 7 %:n jäännöshappipitoisuudella

kuin 5 %:n jäännöshappipitoisuudella. Hiilimonoksidin pitoisuus oli 5 %:n jäännöshappipitoisuudella 2,6-kertainen 7 %:n jäännöshappipitoisuuteen verrattuna. Hiilivetyjen pitoisuus savukaasussa oli 0 ppm molemmilla jäännöshappipitoisuuksilla. Yllättävää oli, että 5 %:n jäännöshappipitoisuudella hiukkaspäästöjen hiilipitoisuus oli pienempi kuin 7 %:n jäännöshappipitoisuudella. Tämän tutkimuksen perusteella 7 %:n jäännöshappipitoisuus oli luultavasti hiukkaspäästöjen kannalta liian iso happipitoisuus puupelletin poltossa.

#### **4.2 Sähkösuodattimen vaikutus hiukkasten tuhka-hiili-suhteeseen**

Puun pienpolton hiukkaspäästöjen kemiallista koostumusta käsitteleviä tutkimuksia on vähän (Sippula ym. 2007, Tissari ym. 2007, Sippula ym. 2008, Tissari ym. 2008b, Sippula ym. 2009a, Sippula ym. 2009b, Schmidl ym. 2011). Kokofraktoidun puun tai pelletin pienpolton hiukkaspäästön kemiallisesta koostumuksesta ei ole aikaisempaa tutkimustulosta. Sähkösuodattimen vaikutusta hiukkasten tuhka-hiili-suhteeseen ei ole aikaisemmin tutkittu lainkaan.

Tässä tutkimuksessa hiilen osuus hiukkaspäästöistä 7 %:n jäännöshappipitoisuudella ilman sähkösuodatusta oli 20,8 % ja tuhkan osuus 72,5 %. 15 kV:n jännitteellä hiilen osuus oli 57,2 % ja tuhkan 21,5 %. Hiukkaspäästöjen tuhka-hiili-suhde ilman suodatusta oli 3,5:1 ja 15 kV:n jännitteellä 0,36:1. 5 %:n jäännöshappipitoisuudella hiilen osuus ilman sähkösuodatusta oli 14,1 % ja tuhkan osuus 60,6 %. 15 kV:n jännitteellä hiilen osuus oli 27,4 % ja tuhkan osuus 27,8 %. Hiukkaspäästöjen tuhka-hiili-suhde ilman suodatusta oli 4,3:1 ja 15 kV:n jännitteellä 1:1.

Tutkimuksissa (Fujimura ym. 1998, Barranco ym. 2007, Thonglek ym. 2011) on osoitettu, että palamattoman hiilen ominaisvastus on alhainen ( $< 10^4 \Omega\text{cm}$ ) ja siitä johtuen nokihiukkaset ovat huonosti varattavissa sähkökentässä. Tämän tutkimuksen yhteydessä kehitetty sähkösuodatin erotti huomattavasti enemmän hiilihiukkasia kuin tuhka- ja nokihiukkasia. Molemmilla jäännöshappipitoisuuksilla sähkösuodattimen erotustehokkuus oli lähes kaksi kertaa suurempi tuhkapäästöille kuin hiilipäästöille. Tämä on havaittavissa myös hiukkasten varautumisen laskennallisessa tarkastelussa, jonka mukaan tuhka- ja nokihiukkasten dielektrisyysvakiot eivät aiheuttaneet huomattavaa eroa hiukkasten varautumiseen.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähkösuodattimen erotustehokkuus osoittautui suuremmaksi 7 % savukaasun jäännöshappipitoisuudella kuin 5 % savukaasun jäännöshappipitoisuudella. 7 %:n jäännöshappipitoisuudella myös hiukkaspäästöjen lukumäärä- ja massapitoisuudet sekä hiilen osuus olivat suuremmat. Erotustehokkuus nokihiukkasille oli huomattavasti alhaisempi kuin tuhka hiukkasille. Mittaustulokset ja hiukkasten varautumisen laskennallinen tarkastelu osoittivat, että hiukkaspäästöjen erotustehokkuus oli alhaisin pienhiukkasmoodin hiukkasilla.

Tämän tutkimuksen yhteydessä kehitetyn sähkösuodattimen erotustehokkuus osoittautui riittävän korkeaksi täyttämään hiukkaspäästöjen tulevat päästörajoitukset. Haasteellista oli mitoitaa sähkösuodattimen toimintaparametrit ja puupelletin polttoprosessi siten, että hiilipäästöjen erotustehokkuus olisi ollut suurempi. Puun panospolton hiilipäästöjen vähentämisessä sähkösuodatuksella sekä sähkösuodattimen elektrodien puhdistamisessa ja erotustehokkuuden ylläpidossa ilmeni jatkokehitystarvetta.

## KIITOKSET

Kiitos ohjaajalleni Timo Ålanderille yhteistyöstä. Pekka Höltälle ja Riikka Reitzerille Jyväskylän yliopiston Tutkimus- ja innovaatiopalvelusta haluan esittää kiitokset mahdollisuudesta osallistua hankkeeseen. Petteri Malkavaaralle Jyväskylän yliopiston ympäristöntutkimuskeskuksesta esitän kiitoksen mahdollisuudesta kenttämittausten toteuttamiseen sekä aineiston keräämiseen ja analysointiin. Kiitos Ariterm Oy:stä Jarno Sauraselle ja Vesa Kalliokoskelle avusta ja yhteistyöstä kenttämittausten aikana. Kiitos Ambiotica-laboratoriolle, erityisesti Virve Kustulalle ja Raija Paukulle, analyysipalveluista. Erityiset kiitokset Toni Keskitalolle teknisestä ja henkisestä tuesta.

Suurimmat kiitokset Mikalle. Kaikesta.

**KIRJALLISUUS**

- Akagi, S.K., Yokelson, R.J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M.J., Reid, J.S., Karl, T., Crounse, J.D. & Wennberg, P.O. 2011: Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. – *Atmos. Chem. Phys.* 11: 4039 – 4072.
- Amann, C.A. & Sieglä, D.C. 1981: Diesel particulates – what they are and why? – *Aerosol Sci. Tech.* 1: 73 – 101.
- Andreae, M.O., Andreae, T.W., Annegarn, H., Beer, J., Cachier, H., Le Canul, P., Elbert, W., Maenhaut, W., Salma, I., Wienbold, F.G. & Zenker, T. 1998: Airborne studies of aerosol emissions from savanna fires in southern Africa: 2. Aerosol chemical composition. – *J. Geophys. Res.* 103: 32,119 – 32,128.
- Andreae, M.O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A.A., Frank, G.P., Longo, G.M. & Silva-Dias, M.A.F. 2004: Smoking rain clouds over the Amazon. – *Science* 303: 1337 – 1342.
- Arctic Council 2011: An assessment of emissions and mitigation options for black carbon for the Arctic Council. Technical report of The Arctic Council Task Force on short-lived climate forcers. – Arctic Council.
- Bajus, M. 2010: Pyrolysis of woody material. – *Petroleum & Coal* 52: 207 – 214.
- Bari, A., Baumbach, G., Kuch, B. & Scheffknecht, G. 2009: Wood smoke as a source of particle-phase organic compounds in residential areas. – *Atmos. Environ.* 43: 4722 – 4732.
- Barranco, R., Gong, M., Thompson, A., Cloke, M., Hanson, S., Gibb, W. & Lester, E. 2007: The impact of fly ash resistivity and carbon content on electrostatic precipitator performance. – *Fuel* 86: 2521 – 2527.
- Barregard, L., Sällsten, G., Gustafson, P., Andersson, L., Johansson, L., Basu, S. & Stigendal, L. 2006: Experimental exposure to wood-smoke particles in healthy humans: Effects on markers of inflammation, coagulation, and lipid peroxidation. – *Inhal. Toxicol.* 18: 845 – 853.
- Bartok, W. & Sarofilm, A.F. 1991: Fossil fuel combustion. A source book. 866 p. – John Wiley & Sons, New York.
- Baxter, L.L., Miles, T.R., Miles Jr, T.R., Jenkins, B.M., Milne, T., Dayton, D., Bryers, R.W. & Oden, L.L. 1998: The behavior of inorganic material on biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. – *Fuel Process. Technol.* 54: 47 – 78.
- Blander, M., Ragland, K.W., Cole, R.L., Libera, J.A. & Pelton, A. 1995: The inorganic chemistry of wood combustion for power production. – *Biomass Bioenerg.* 8: 29 – 38.
- Bockhorn, H. 1994: Soot formation in combustion, mechanisms and models. 596 p. – Springer-Verlag, Berlin.
- Bologa, A., Paur, H.-R., Seifert, H. & Woletz, K. 2009: Particle collection by an electrostatic precipitator from the exhaust gas of a wood combustion stove. – Proceedings of the European Combustion Meeting.

- Boman, C., Nordin, A., Bostrom, D. & Ohman, M. 2004: Characterization of inorganic particulate matter from residential combustion of pelletized biomass fuels. – *Energy Fuels* 18: 338 – 348.
- Boman, C., Nordin, A. & Thaning, L. 2003: Effects of increased biomass pellet combustion on ambient air quality in residential areas – a parametric dispersion modeling study. – *Biomass Bioenerg.* 24: 465 – 474.
- Bryers, R.W. 1996: Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. – *Prog. Energy Combust. Sci.* 22: 29 – 120.
- Bylaw No. 1087: Greater Vancouver regional district boilers and process heaters emission regulation. 24.10.2008.
- Bäfver, L.S., Rönnbäck, M., Leckner, B., Claesson, F. & Tullin, C. 2009: Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin. – *Fuel Process. Technol.* 90: 353 – 359.
- Caseiro, A., Bauer, H., Schmidl, C., Pio, C.A. & Puxbaum, H. 2009: Wood burning impact on PM<sub>10</sub> in three Austrian regions. – *Atmos. Environ.* 43: 2186 – 2195.
- Cereda, E., Marcazzan, M.B., Pedretti, M., Grime, G.W. & Baldacci, A. 1996: Influence of the elemental composition of individual fly ash particles on the efficiency of the electrostatic precipitators. – *J. Aerosol Sci.* 27: 607 – 619.
- Christensen, K.A., Stenholm, M. & Livbjerg, H. 1998: The formation of submicron aerosol particles, HCl and SO<sub>2</sub> in straw-fired boilers. – *J. Aerosol Sci.* 29: 421 – 444.
- Christian, T.J., Kleiss, B., Yokelson, R.J., Holzinger, R., Crutzen, P.J., Hao, W.M., Shirai, T. & Blake D.R. 2004: Comprehensive laboratory measurements of biomassburning emissions. 2. First intercomparison of open-path FTIR, PTR-MS, and GC-MS/FID/ECD. – *J. Geophys. Res.* 109, D02311, doi: 10.1029/2003JD003874.
- Cooper, D.W. 2001: Methods of size distribution data analysis and presentation. Teoksessa: Baron, P.A. & Willeke, K. (toim.), *Aerosol measurement – Principles, techniques and applications.* 1172 p. – John Wiley & Sons, New York, NY: 667 – 701.
- 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.* – Springer-Verlag, Berlin: 83 – 103.
- Dastoori, K., Kolhe, M., Mallard, C. & Makin, B. 2011: Electrostatic precipitation in a small scale wood combustion furnace. – *J. Electrostat.* 69: 466 – 472.
- Davidsson, K.O., Korsgren, J.G., Pettersson, J.B.C. & Jäglid, U. 2002a: The effects of fuel washing techniques on alkali release from biomass. – *Fuel* 81: 137 – 142.
- Davidsson, K.O., Stojkova, B.J. & Pettersson, J.B.C. 2002b: Alkali emission from birchwood particles during rapid pyrolysis. – *Energy Fuels* 16: 1033 – 1039.
- Dayton, D.C., French, R.J. & Milne, T.A. 1995: Direct observation of alkali vapor release during biomass combustion and gasification. 1. Application of molecular beam/mass spectrometry to switchgrass combustion. – *Energy Fuels* 9: 855 – 865.



- Dayton, D.C., Jenkins, B.M., Turn, S.Q., Bakker, R.R., Williams, R.B., Belle-Oudry, D. & Hill, L.M. 1999: Release of inorganic constituents from leached biomass during thermal conversion. – *Energy Fuels* 13: 860 – 870.
- Direktiivi 1999/30/EC: Council directive 1999/30/EC relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. 29.6.1999.
- Direktiivi 2009/28/EY: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta. 23.4.2009.
- Dixkens, J. & Fissan, H. 1999: Development of an electrostatic precipitator for off-line particle analysis. – *Aerosol Sci. Tech.* 30: 438 – 453.
- Dockery, D.W., Pope, C.A. 3rd, Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G. Jr. & Speizer, F.E. 1993: An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. – *New Engl. J. Med.* 329: 1753 – 1759.
- Durant, J.L., Busby, W.F., Lafleur, A.L., Penman, B.W. & Crespi, C.L. 1996: Human cell mutagenicity of oxygenated, nitrated and unsubstituted polycyclic aromatic hydrocarbons associated with urban aerosols. – *Mutat. Res.–Genet. Tox.* 371: 123 – 157.
- EPA 3051A 2007: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils. 2.2007.
- Evyugina, M., Calvo, A.I., Nunes, T., Alves, C., Fernandes, A.P., Tarelho, L., Vicente, A. & Pio, C. 2013: VOC emissions of smouldering combustion from Mediterranean wildfires in central Portugal. – *Atmos. Environ.* 64: 339 – 348.
- Fan, Z., Liou, P., Weschler, C., Fiedler, N., Kipen, H. & Zhang, J. 2003: Ozone-initiated reactions with mixtures of volatile organic compounds under simulated indoor conditions. – *Environ. Sci. Technol.* 37: 1811 – 1821.
- Fernandez, A., Davis, S.B., Wendt, J.O., Cenni, R., Young, R.S. & Witten, M.L. 2001: Particulate emission from biomass combustion. – *Nature* 409: 998 – 999.
- Finlayson-Pitts, B.J. & Pitts Jr., J.N. 2000: Chemistry of the upper and lower atmosphere. Theory, experiments, and applications. 969 p. – Academic Press, London, UK.
- Flagan, R. 2001: Electrical techniques. Teoksessa: Baron, P.A. & Willeke, K. (toim.), *Aerosol measurement – Principles, techniques and applications*. 1172 p. – John Wiley & Sons, New York, NY: 537 – 568.
- Flagan, R.C. & Seinfeld, J.H. 1988: *Fundamentals of air pollution engineering*. 542 p. – Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Frandsen, F.J., van Lith, S.C., Korbee, R., Yrjas, P., Backman, R., Obernberger, I., Brunner, T. & Jöller, M. 2007: Quantification of the release of inorganic elements from biofuels. – *Fuel Process. Technol.* 88: 1118 – 1128.
- Fujimura, H., Zukeran, A., Ehara, Y., Ito, T., Takahashi, T. & Takamatsu, T. 1998: Influence on visibility index of re-entrainment phenomena in electrostatic precipitator. – *J. Aerosol Sci.* 29: 5483 – 5484.

- Gabra, M., Nordin, A., Öhman, M. & Kjellström, B. 2001: Alkali retention/separation during bagasse gasification: a comparison between a fluidised bed and a cyclone gasifier. – *Biomass Bioenerg.* 21: 461 – 476.
- Glasius, M., Ketzler, M., Wahlin, P., Jensen, B., Monster, J., Berkowicz, R. & Palmgren, F. 2006: Impact of wood combustion on particle levels in a residential area in Denmark. – *Environment* 40: 7115 – 7124.
- Glassman, I. & Yetter, R.A. 2008: *Combustion*. 4. painos. 773 p. – Academic Press, New York.
- Graf, H.-F. 2004: The complex interaction of aerosols and clouds. – *Science* 303: 1309 – 1311.
- Gustafson, P. 2009: Exposure to some carcinogenic compounds in air, with special reference to wood smoke. – PhD Thesis, University of Gothenburg, Sweden.
- Hedberg, E., Kristensson, A., Ohlsson, M., Johansson, C., Johansson, P.-Å., Swietlicki, E., Vesley, V., Wideqvist, U. & Westerholm, R. 2002: Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove. – *Atmos. Environ.* 36: 4823 – 4837.
- Herdan, G. 1980: *Small particle statics*. 2. painos. – Academic Press, New York.  
Artikkelissa: Kim, S.H. & Lee, K.W. 1999: Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models. – *J. Electrostat.* 48: 3 – 25.
- Hinds, W.C. 1998: *Aerosol technology – Properties, behavior and measurement of airborne particles*. 483 p. – John Wiley & Sons, New York, NY.
- Housecroft, C.E. & Constable, E.C. 2006: *Chemistry*. 3rd edition. 1285 p. – Pearson Education Limited, UK.
- Huotari, J. & Vesterinen, R. 2002: Muut polton päästöt. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. (toim.), *Poltto ja palaminen*. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. 2. täydennetty painos. 750 s. – Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä: 371 – 395.
- Hytönen, K., Jokiniemi, J., Obernberger, I., Brunner, T., Salonen, R.O., Aurela, M., Bellmann, B., Boman, C., Bärnthaler, G., Ellner-Schubert, F., Forsberg, B., Trey, A., Friesenbichler, J., Happonen, M., Hartmann, H., Hillamo, R., Hirvonen, M.-R., Jalava, P., Markkanen, P., Pennanen, A., Pettersson, E., Roßmann, P., Saarikoski, S., Saarnio, K., Sandström, T., Sehlstedt, M., Sillanpää, M., Teinilä, K., Timonen, H., Tissari, J., Turowski, P., Vallius, M. & Wiinikka, H. 2008: Biomass combustion in residential heating: Particulate measurements, sampling, and physicochemical and toxicological characterization. Final report of the project funded by ERA-NET Bioenergy programme 2007-2008. 93 p. – Report series of Department of Environmental Science 1/2008, University of Kuopio.
- Hänninen, O., Leino, O., Kuusisto, E., Komulainen, H., Meriläinen, P., Haverinen-Shaughnessy, U., Miettinen, I. & Pekkanen, J. 2010: Elinympäristön altisteiden terveysvaikutukset Suomessa. – *Ympäristö ja Terveys* 3: 12 – 35.
- IEA 2012: *Technology roadmap. Bioenergy for heat and power*. 68 p. – International Energy Agency, Corlet, France.
- Iisa, K., Lu, Y. & Salmenoja, K. 1999: Sulfation of potassium chloride at combustion conditions. – *Energy and Fuels* 13: 1184 – 1190.

- IPCC 2007: Summary for policymakers. In: Climate change 2007: Mitigation, contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. – Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Ishiguro, T., Takatori, Y. & Akihama, K. 1997: Microstructure of diesel soot particles probed by electron microscopy: First observation of inner core and outer shell. – *Combust. Flame* 108: 231 – 234.
- Jalava, P.I., Salonen, R.O., Hälinen, A.I., Sillanpää, M., Sandell, E. & Hirvonen, M.-R. 2005: Effects of sample preparation on chemistry, cytotoxicity, and inflammatory responses induced by air particulate matter. – *Inhal. Toxicol.* 17: 107 – 117.
- Jalava, P.J., Salonen, R.O., Nuutinen, K., Pennanen, A.S., Happonen, M.S., Tissari, J., Frey, A., Hillamo, R., Jokiniemi, J. & Hirvonen, M.-R. 2010: Effect of combustion condition on cytotoxic and inflammatory activity of residential wood combustion particles. – *Atmos. Environ.* 44: 1691 – 1698.
- Jaworek, A., Czech, T., Sobczyk, A.T. & Krupa, A. 2013: Properties of biomass vs. coal fly ashes deposited in electrostatic precipitator. – *J. Electrostat.* 71: 165 – 175.
- Jedrusik, M., Gajewski, J.B. & Swierczok, A.J. 2001: Effect of the particle diameter and corona electrode geometry on the particle migration velocity in electrostatic precipitators. – *J. Electrostat.* 51 – 52: 245 – 251.
- Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R. & Miles, T.R. 1998: Combustion properties of biomass. – *Fuel Process. Technol.* 54: 17 – 46.
- Jensen, P.A., Frandsen, F.J., Dam-Johansen, K. & Sander, B. 2000: Experimental investigation of the transformation and release to gas phase of potassium and chlorine during straw pyrolysis. – *Energy Fuels* 14: 1280 – 1285.
- 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. – *Atmos. Environ.* 38: 4183 – 4195.
- Johansson, L.S., Tullin, C., Leckner, B. & Sjövall, P. 2003: Particle emissions from biomass combustion in small combustors. – *Biomass Bioenerg.* 25: 435 – 446.
- Jokiniemi, J. & Kauppinen, E. 2002: Polttoprosessien aerosolit. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. (toim.), Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. 2. täydennetty painos. 750 s. – Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä: 233 – 268.
- Jones, J.E., Boulloud, A. & Waters, R.T. 1990: Dimensional analysis of corona discharges: the small current regime for rod-plane geometry in air. – *Journal of Physics* 23: 1652 – 1662.
- Jöller, M., Brunner, T. & Obernberger, I. 2007: Modeling of aerosol formation during biomass combustion for various furnace and boiler types. – *Fuel Process. Technol.* 88: 1136 – 1147.
- Kansallinen energia- ja ilmastostrategia 2013: Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Strategian päivitys 2013. Taustaraportti.

- Kappos, A.D., Bruckmann, P., Eikmann, T., Englert, N., Heinrich, U., Höppe, P., Koch, E., Krause, G.H.M., Kreyling, W.G., Rauchfuss, K., Rombout, P., Schulz-Klemp, V., Thiel, W.R. & Wichmann, H.-E. 2004: Health effects of particles in ambient air. – *Int. J. Hyg. Envir. Heal.* 201: 399 – 407.
- Karvosenoja, N. & Johansson, M. 2003: Primary particulate matter emissions and the Finnish climate strategy. – *Boreal Environ. Res.* 8: 125 – 133.
- Karvosenoja, N., Tainio, M., Kupiainen, K., Tuomisto, J.T., Kukkonen, J. & Johansson, M. 2008: Evaluation of the emissions and uncertainties of PM<sub>2,5</sub> originated from vehicular traffic and domestic wood combustion in Finland. – *Boreal Environ. Res.* 13: 465 – 474.
- Kennedy, I.M. 2007: The health effects of combustion-generated aerosols. – *P. Combust. Inst.* 31: 2757 – 2770.
- Keown, D.M., Favas, G., Hayashi, J.-i. & Li, C.-Z. 2005: Volatilisation of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis of biomass: differences between sugar cane bagasse and cane trash. – *Bioresource Technol.* 96: 1570 – 1577.
- Kim, S.H. & Lee, K.W. 1999: Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models. – *J. Electrostat.* 48: 3 – 25.
- Kim, S.H., Woo, K.S., Liu, B.Y.H. & Zachariah, M.R. 2005: Method of measuring charge distribution of nanosized aerosols. – *J. Colloid Interf. Sci.* 282: 46 – 57.
- Kittelson, D.B. 1998: Engines and nanoparticles: a review. – *J. Aerosol Sci.* 29: 575 – 588.
- Klippel, N. & Nussbaumer, T. 2006: Feinstaubbildung in Holzfeuerung und Gesundheitsrelevanz von Holztaub im Vergleich zu Dieselruss. – *Proceedings of ninth holzennergiesymposium, Zürich, Switzerland 20.10.2006.*
- Knudsen, J.N., Jensen, P.A. & Dam-Johansen, K. 2004: Transformation and release to the gas phase of Cl, K and S during combustion of annual biomass. – *Energy & Fuels* 18: 1385 – 1399.
- Kocik, M., Dekowski, J. & Mizeraczyk, J. 2005: Particle precipitation efficiency in an electrostatic precipitator. – *J. Electrostat.* 63: 761 – 766.
- Kozinski, J.A. & Saade, R. 1998: Effect of biomass burning on the formation of soot particles and heavy hydrocarbons. An experimental study. – *Fuel* 71: 225 – 231.
- Krecl, P. 2008: Impact of residential wood combustion on urban air quality. – *PhD Thesis, Stockholm University, Sweden.*
- Krinke, T.J. 2001: Nanopartikler aus der Gasphase: Depositionsmechanismen und strukturierte Anordnung auf glatten Substratoberflächen. – *PhD Thesis, Gerhard-Mercator Universität Duisburg, Germany.*
- Kroll, J.H. & Seinfeld, J.H. 2008: Chemistry of secondary organic aerosol: Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere. – *Atmos. Environ.* 42: 3593 – 3624.
- Krzyzanowski, M. & Cohen, A. 2008: Update of WHO air quality guidelines. – *Air Qual. Atmos. Health* 1: 7 – 13.

- Kuroda, Y., kawada, Y., Takahashi, T., Ehara, Y., Ito, T., Zukeran, A., Kono, Y. & Yasumoto, K. 2003: Effect of electrode shape on discharge current and performance with barrier discharge type electrostatic precipitator. – *J. Electrostat.* 57: 407 – 415.
- Lamberg, H., Nuutinen, K., Tissari, J., Ruusunen, J., Yli-Pirilä, P., Sippula, O., Tapanainen, M., Jalava, P., Makkonen, U., Teinilä, K., Saarnio, K., Hillamo, R., Hirvonen, M.-R. & Jokiniemi, J. 2011: Physicochemical characterization of fine particles from small-scale wood combustion. – *Atmos. Environ.* 45: 7635 – 7643.
- Lammel, G., Sehili, A.M., Bond, T.C., Feichter, J. & Grassl, H. 2009: Gas/particle partitioning and global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons – A modelling approach. – *Chemosphere* 76: 98 – 106.
- Lanz, Z.A., Alfara, M.R., Baltensberger, U., Buchmann, B., Hüglin, C., Szidat, S., Wehrli, M., Wacker, R., Weiner, S., Caseiro, A., Puxbaum, H. & Prevot, A. 2008: Source attribution of submicron organic aerosol during wintertime inversions by advanced factor analysis of aerosol mass spectra. – *Environ. Sci. Technol.* 42: 214 – 220.
- Li, C.-Z., Sathe, C., Kershaw, J.R. & Pang, Y. 2000: Fates and roles of alkali and alkaline earth metals during the pyrolysis of a Victorian brown coal. – *Fuel* 79: 427 – 438.
- Li, X., Wu, H., Hayashi, J.-i. & Li, C.-Z. 2004: Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal. Part VI. Further investigation into the effects of volatile-char interactions. – *Fuel* 83: 1273 – 1279.
- Li, Y., Suriyawong, A., Daukoru, M., Zhuang, Y. & Biswas, P. 2009: Measurement and capture of fine and ultrafine particles from a pilot-scale pulverized coal combustor with an electrostatic precipitator. – *J. Air Waste Manage.* 59: 553 – 559.
- Lighty, J.S., Veranth, J. & Sarofim, A. 2000: Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health. – *J. Air Waste Manage.* 50: 1565 – 1618.
- Lillieblad, L., Strand, M. & Porle, K. 2004: Conditions for electrostatic precipitators after biomass fired boilers. – International Society for Electrostatic Precipitation. ICESP IX Conference paper. Kruger Gate, Mpumalanga, South Africa 19.5.2004.
- Lind, T. 1999: Ash formation in circulating fluidized bed combustion of coal and solid biomass. – PhD Thesis, Technical Research Centre of Finland, Espoo.
- Lind, T., Hokkinen, J., Jokiniemi, J.K., Saarikoski, S. & Hillamo, R. 2003: Electrostatic precipitator collection efficiency and trace element emissions from co-combustion of biomass and recovered fuel in fluidized-bed combustion. – *Environ. Sci. Technol.* 37: 2842 – 2846.
- Liousse, C., Devaux, C., Dulac, F. & Cachier, H. 1995: Aging of savannah biomass burning aerosols: Consequences on their optical properties. – *J. Atmos. Chem.* 22: 1 – 17. Saatavilla [www.stä osoitteesta: http://link.springer.com/article/10.1007%2F978-1-4020-0708-1\\_178?LI=true](http://link.springer.com/article/10.1007%2F978-1-4020-0708-1_178?LI=true).
- Lipsky, E. & Robinson, A. 2005: Design and evaluation of a portable dilution sampling system for measuring fine particle emissions from combustion systems. – *Aerosol Sci. Tech.* 39: 542 – 553.
- Maricq, M.M. 2006a: A comparison of soot size and charge distributions from ethane, ethylene, acetylene, and benzene/ethylene premixed flames. – *Combust. Flame* 144: 730 – 743.

- Maricq, M.M. 2006b: On the electrical charge of motor vehicle exhaust particles. – *J. Aerosol Sci.* 37: 858 – 874.
- Maricq, M.M. 2004: Size and charge of soot particles in rich premixed ethylene flames. – *Combust. Flame* 137: 340 – 350.
- Maricq, M.M. 2005: The dynamics of electrically charged soot particles in a premixed ethylene flame. – *Combust. Flame* 141: 406 – 416.
- Masiá, A.A.T., Buhre, B.J.P., Gupta, R.P. & Wall, T.F. 2007: Characterising ash of biomass and waste. – *Fuel Process. Technol.* 88: 1071 – 1081.
- Maskuniitty, H. 2002: Arinapoltto. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. (toim.), Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. 2. täydennetty painos. 750 s. – Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä: 466 – 489.
- Maynard, A.D. & Maynard, R.L. 2002: A derived association between ambient aerosol surface area and excess mortality using historic time series data. – *Atmos. Environ.* 36: 5561 – 5567.
- Moffet, R.C. & Prather, K.A. 2009: In-situ measurements of the mixing state and optical properties of soot with implications for radiative forcing estimates. – *P. Natl. Acad. Sci. USA* 106: 11872 – 11877.
- Mohr, M., Ylätaalo, S., Klippel, N., Kauppinen, E.I., Riccius, O. & Burtscher, H. 1996: Submicron fly ash penetration through electrostatic precipitators at two coal power plants. – *Aerosol Sci. Technol.* 24: 191 – 204.
- Moilanen, A. 2006: Thermogravimetric characterizations of biomass and waste for gasification processes. – PhD Thesis, Åbo Akademi University, Finland.
- Noda, N. & Makino, H. 2010: Influence of operating temperature on performance of electrostatic precipitator for pulverized coal combustion boiler. – *Adv. Powder Technol.* 21: 495 – 499.
- Novakovic, A., van Lith, S.C., Frandsen, F.J., Jensen, P.A. & Holgersen, L.B. 2009: Release of potassium from the systems K-Ca-Si and K-Ca-P. – *Energ. Fuel* 23: 3423 – 3428.
- Nóbrega, S.W., Falaguasta, C.R. & Coury, J.R. 2004: A study of a wire-plate electrostatic precipitator operating in the removal of polydispersed particles. – *Braz. J. Chem. Eng.* 21: 275 – 284.
- Obernberger, I., Brunner, T. & Jöller, M. 2001: Characterization and formation of aerosols and fly-ashes from fixed-bed biomass combustion. Teoksessa: Nussbaumer, T. (toim.), Aerosols from biomass combustion. 98 p. – International seminar, Bioenergy task 32: Biomass combustion and cofiring. IEA and Swiss Federal office of energy in Zurich, Switzerland 27.6.2001: 69 – 74.
- Okuno, T., Sonoyama, N., Hayashi, J.-i., Li, C.-Z., Sathe, C. & Chiba, T. 2005: Primary release of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis of pulverized biomass. – *Energy Fuels* 19: 2164 – 2171.
- Olsson, J.G., Jäglig, U., Pettersson, J.B.C. & Hald, P. 1997: Alkali metal emission during pyrolysis of biomass. – *Energy Fuels* 11: 779 – 784.

- Oser, M., Nussbaumer, T., Schweizer, B., Mohr, M. & Figi, R. 2001: Influences on aerosol formation in an automatic wood furnace. Teoksessa: Nussbaumer, T. (toim.), *Aerosols from biomass combustion*. 98 p. – International seminar, Bioenergy task 32: Biomass combustion and cofiring. IEA and Swiss Federal office of energy in Zurich, Switzerland 27.6.2001: 59 – 64.
- Parker, K. 2003: Electrical operation of electrostatic precipitators. 270 p. – IET Power and Energy Series 41.
- Parker, K. 1997: Milestones in the history of precipitation. Teoksessa: Parker, K.R. (toim.), *Applied electrostatic precipitation*. 521 p. – Blackie Academic & professional, London, UK: 11 – 24.
- Pedersen, A.J., van Lith, S.C., Frandsen, F.J., Steinsen, S.D. & Holgersen, L.B. 2010: Release to the gas phase of metals, S and Cl during combustion of dedicated waste fractions. – *Fuel Process. Technol.* 91: 1062 – 1072.
- Pekkanen, J. 2010: Elin- ja työympäristön riskit Suomessa. – *Ympäristö ja Terveys* 3: 4 – 5.
- Pekkanen, J., Hänninen, O., Karjalainen, A., Kauppinen, T., Komulainen, H., Kurttio, P., Kuusisto, E., Leino, O. & Priha, E. 2010: Elin- ja työympäristön altisteet ja terveys Suomessa. – *Ympäristö ja Terveys* 3: 6 – 11.
- Peters, A., Wichmann, E., Tuch, T., Heinrich, J. & Heyder, J. 1997: Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. – *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 155: 1376 – 1383.
- Petersen, H.H. 1981: New trends in electrostatic precipitation: wide duct spacing, precharging, pulse energization. – *IEEE Transactions Industry Applications* 17: 496 – 501.
- Pettersson, A., Zevenhoven, M., Steenari, B.-M. & Åmand, L.-E. 2008: Application of chemical fractionation methods for characterization of biofuels, waste derived fuels and CFB co-combustion fly ashes. – *Fuel* 87: 3183 – 3193.
- Pope III, C.A. 2000: Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: biologic mechanisms and who's at risk? – *Environ. Health Persp.* 108: 713 – 723.
- Pope III, C.A., Burnett, R.T., Thurston, G.D., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D. & Godleski, J.J. 2004: Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution. Epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. – *Circulation* 6: 71 – 77.
- Pope III, C.A. & Dockery, D.W. 2006: Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. – *J. Air Waste Manage.* 56: 709 – 742.
- Porteous, A. 2008: Dictionary of environmental science and technology. Fourth edition. 794 p. – John Wiley & Sons Ltd., UK.
- Pyykönen, J., Miettinen, M., Sippula, O., Leskinen, A., Raunemaa, T. & Jokiniemi, J. 2007: Nucleation in a perforated tube diluter. – *J. Aerosol Sci.* 38: 172 – 191.
- Quyn, D.M., Wu, H., Bhattacharya, S.P. & Li, C.-Z. 2002: Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal. Part II. Effects of chemical form and valence. – *Fuel* 81: 151 – 158.

- Radke, L.F., Hegg, D.A., Hobbs, P.V., Nance, J.D., Lyons, J.H., Laursen, K.K., Weiss, R.E., Riggan, P.J. & Ward, D.E. 1991: Particulate and trace gas emissions from large biomass fires in North America. Teoksessa: Levine, J.S. (toim.), *Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications*. – MIT Press, Cambridge, MA: 209 – 224. Saatavissa [www.stä.osoitteesta](http://www.stä.osoitteesta): <http://mitpress.mit.edu/books/global-biomass-burning>
- Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Kiehl, J.T. & Rosenfeld, D. 2001: Aerosols, climate, and the hydrological cycle. – *Science* 294: 2119 – 2124.
- Raveendran, K. & Ganesh, A. 1998: Adsorption characteristics and pore-development of biomasspyrolysis char. – *Fuel* 77: 769 – 781.
- Reid, J.S., Eck, T.F., Christopher, S.A., Koppmann, R., Dubovik, O., Eleuterio, D.P., Holben, B.N., Reid, E.A. & Zhang, J. 2005a: A review of biomass burning emissions part III: intensive optical properties of biomass burning particles. – *Atmos. Chem. Phys.* 5: 827 – 849.
- Reid, J.S., Koppmann, R., Eck, F. & Eleuterio, D.P. 2005b: A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. – *Atmos. Chem. Phys.* 5: 799 – 825.
- Riehle, C. 1997: Basic and theoretical operation of ESPs. Teoksessa: Parker, K.R. (toim.), *Applied electrostatic precipitation*. 521 p. – Blackie Academic & professional, London, UK: 25 – 88.
- Robinson, A.L., Donahue, N.M., Shrivastava, M.K., Weitkamp, A.P., Lane, T.E., Pierce, J.R. & Pandis, S.N. 2007: Rethinking organic aerosols: semivolatile emissions and photochemical aging. – *Science* 315: 1259 – 1262. Saatavissa [www.stä.osoitteesta](http://www.stä.osoitteesta): <http://www.sciencemag.org/content/315/5816/1259.full>
- Rounds, S.A. & Pankow, J.F. 1990: Application of a radial diffusion model to describe gas/particle sorption kinetics. – *Environ. Sci. Technol.* 24: 1378 – 1386.
- Ruttanachot, C., Tirawanichakul, Y. & Tekasakul, P. 2011: Application of electrostatic precipitator in collection of smoke aerosol particles from wood combustion. – *Aerosol Air Qual. Res.* 11: 90 – 98.
- Saarela, K.-E., Harju, L., Rajander, J., Lill, J.-O., Heselius, S.-J., Lindroos, A. & Mattsson, K. 2005: Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study. – *Sci. Total. Environ.* 343: 231 – 241.
- Salonen, R.O. & Pennanen, A. 2007: The impact of fine particles on health. Views and conclusions on from the FINE Particles – Technology, Environment and Health Technology Programme. 32 p. – Tekes, Helsinki, Finland.
- Samet, J.M., Dominici, F., Curriero, F.C., Coursac, I. & Zeger, S.L. 2000: Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. – *New Engl. J. Med.* 343: 1742 – 1749.
- Sathe, C., Hayashi, J.-i., Li, C.-Z. & Chiba, T. 2003: Release of alkali and alkaline earth metallic species during rapid pyrolysis of a Victorian brown coal at elevated pressures. – *Fuel* 82: 1491 – 1497.
- Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G. & Simoneit, B.T. 2001: Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C<sub>1</sub> – C<sub>29</sub> organic compounds from fireplace combustion of wood. – *Environ. Sci. Technol.* 35: 1716 – 1728.



- Schmatloch, V. & Rauch, S. 2005: Design and characterization of an electrostatic precipitator for small heating appliances. – *J. Electrostat.* 63: 85 – 100.
- Schmidl, C., Luisser, M., Padouvas, E., Lasselsberger, L., Rzaca, M., Ramirez-Santa Cruz, C., Handler, M., Peng, G., Bauer, H. & Puxbaum, H. 2011: Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems. – *Atmos. Environ.* 45: 7443 – 7454.
- Schnelle, K.B. & Brown, C.A. 2002: Air pollution control technology handbook. 386 p. – CRC Press, USA.
- Schwartz, J., Dockery, D.W. & Neas, L.M. 1996: Is daily mortality associated specifically with fine particles? – *J. Air Waste Manage.* 46: 927 – 939.
- Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N. 2006: Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. Second edition. 1203 p. – A Wiley-Interscience publication, USA.
- Senior, C.L. & Flagan, R.C. 1982: Ash vaporization and condensation during combustion of a suspended coal particle. – *Aerosol Sci. Tech.* 1: 371 – 383.
- SFS 5624 1990: Ilmansuojelu. Savukaasun tilan määrittäminen. 4.6.1990.
- SFS-EN 303-5:en 2012: Lämmityskattilat. Osa 5: Kiinteää polttoainetta käyttävät lämmityskattilat, manuaali- ja automaattisyyttöiset, nimellinen teho 500 kW:iin asti. Termit, vaatimukset, testaus ja merkintä. 13.8.2012.
- SFS-EN 14774-1 2010: Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uuni-kuivausmenetelmä. Osa 1: Kokonaiskosteus. Vertailumenetelmä. 10.5.2010.
- SFS-EN ISO 10304-1:en 2009: Water quality. Determination of dissolved anions by liquid chromatography of ions. Part 1: Determination of bromide, chloride, fluoride, nitrate, nitrite, phosphate and sulfate. 11.5.2009.
- SFS-EN ISO 11885 2009: Water quality. Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). 22.6.2009.
- SFS-EN ISO 17294-1 2006: Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Part 1: General guidelines. 18.12.2006.
- SFS-EN ISO 17294-2 2005: Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Part 2: Determination of 62 elements. 16.5.2005.
- Shi, J.P. & Harrison, R.M. 1999: Investigation of ultrafine particle formation during diesel exhaust dilution. – *Environ. Sci. Technol.* 33: 3730 – 3736.
- Simoneit, B.R.T., Schauer, J.J., Nolte, C.G., Oros, D.R., Elias, V.O., Fraser, M.P., Rogge, W.F. & Cass, G.R. 1999: Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles. – *Atmos. Environ.* 33: 173 – 182.
- Sippula, O., Hokkinen, J., Lamberg, H., Puustinen, H., Yli-Pirilä, P., Tissari, J. & Jokiniemi, J. 2009a: Particle emissions from small biomass and fuel oil fired heating units. – 17<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition. Proceedings of the International Conference. Hamburg, Germany 29.6. – 3.7. 2009: 1329 – 1337.
- Sippula, O., Hokkinen, J., Puustinen, H., Yli-Pirilä, P. & Jokiniemi, J. 2009b: Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers. – *Atmos. Environ.* 43: 4855 – 4864.
- Sippula, O., Hytönen, K., Tissari, J., Raunemaa, T. & Jokiniemi, J. 2007: Effect of wood fuel on the emissions from a top-feed pellet stove. – *Energ. Fuel* 21: 1151 – 1160.

- Sippula, O., Lind, T. & Jokiniemi, J. 2008: Effects of chlorine and sulphur on particle formation in wood combustion performed in a laboratory scale reactor. – *Fuel* 87: 2425 – 2436.
- Skrifvars, B.-J. & Hupa, M. 2002: Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. (toim.), Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. 2. täydennetty painos. 750 s. – Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä: 269 – 299.
- SoPS 40/2005: Happamoitumista, rehevöitymistä ja alailmakehän otsonia vähentävä Göteborgin pöytäkirja. 21.4.2005.
- Strand, M., Pagels, J., Szpila, A., Gudmundsson, A., Swietlicki, E., Bohgard, M. & Sanati, M. 2002: Fly ash penetration through electrostatic precipitator and flue gas condenser in a 6 MW biomass fired boiler. – *Energy & Fuels* 16: 1499 – 1506.
- Szidat, S., Rulf, M., Perron, N., Wacker, L., Synal, H.-A., Hallquist, M., Shannigrahi, A.S., Yttri, K.E., Dye, C. & Simpson, D. 2009: Fossil and non-fossil sources of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in Goeteborg, Sweden. – *Atmos. Chem. Phys.* 9: 1521 – 1535.
- Tekasakul, S., Tantichaowan, M., Otani, Y., Kuruhongsa, P. & Tekasakul, P. 2006: Removal of soot particles in rubber smoking chamber by electrostatic precipitator to improve rubber sheet color. – *Aerosol Air Qual. Res.* 6: 1 – 14.
- Thonglek, N., Dechthummarong, C. & Kiatsiriroat, T. 2011: Soot treatment by using high voltage pulse energized electrostatic precipitator. – *Energy Procedia* 9: 292 – 298.
- Tilasto 2013a: Suomen virallinen tilasto (SVT): Asumisen energiankulutus. Liitetaulukko 2. Asumisen energiankulutus energialähteittäin vuonna 2011, GWh. 13.2.2013. Saatavissa [www:stä osoitteesta:](http://www.stat.fi/til/asen/2011/asen_2011_2012-11-16_tau_002_fi.html)  
[http://www.stat.fi/til/asen/2011/asen\\_2011\\_2012-11-16\\_tau\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/asen/2011/asen_2011_2012-11-16_tau_002_fi.html)
- Tilasto 2013b: Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin (ktoe ja TJ) ja CO<sub>2</sub> päästöt (Mt). 13.2.2013. Saatavissa [www:stä osoitteesta:](http://193.166.171.75/database/statfin/ene/ehk/ehk_fi.asp)  
[http://193.166.171.75/database/statfin/ene/ehk/ehk\\_fi.asp](http://193.166.171.75/database/statfin/ene/ehk/ehk_fi.asp)
- Tilasto 2013c: Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin (yksityiskohtaisesti). 13.2.2013. Saatavissa [www:stä osoitteesta:](http://193.166.171.75/database/statfin/ene/ehk/ehk_fi.asp)  
[http://193.166.171.75/database/statfin/ene/ehk/ehk\\_fi.asp](http://193.166.171.75/database/statfin/ene/ehk/ehk_fi.asp)
- Tilasto 2013d: Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto. Liitetaulukko 1. Sähkön ja lämmön tuotanto tuotantomuodoittain ja polttoaineittain vuonna 2011. 13.2.2013. Saatavissa [www:stä osoitteesta:](http://www.stat.fi/til/salatu/2011/salatu_2011_2012-10-16_tau_001_fi.html)  
[http://www.stat.fi/til/salatu/2011/salatu\\_2011\\_2012-10-16\\_tau\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/salatu/2011/salatu_2011_2012-10-16_tau_001_fi.html)
- Tissari, J., Hytönen, K., Lyyränen, J. & Jokiniemi, J. 2007: A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion. – *Atmos. Environ.* 41: 8330 – 8344.
- Tissari, J., Hytönen, K., Sippula, O. & Jokiniemi, J. 2009: The effects of operating conditions on emissions from masonry heaters and sauna stoves. – *Biomass Bioenerg.* 33: 513 – 520.

- Tissari, J., Lyyräinen, J., Hytönen, K., Sippula, O., Tapper, U., Trey, A., Saarnio, K., Penanen, A.S., Hillanen, R., Salonen, R.O., Hirvonen, M. & Jokiniemi, J. 2008a: Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion in a conventional masonry heater. – *Atmos. Environ.* 42: 7862 – 7873.
- Tissari, J., Sippula, O., Kouki, J., Vuorio, K. & Jokiniemi, J. 2008b: Fine particle and gas emissions from the combustion of agricultural fuels fired in a 20 kW burner. – *Energy & Fuels* 22: 2033 – 2042.
- TSI 2010: Aerosol Instrument Manager Software for Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) Spectrometer. User's manual. – TSI. Shoreview, MN, USA.
- Tucker, W.G. 2001: Volatile organic compounds. Teoksessa: Spengler, J.D., Samet, J.M., McCarthy, J.F. (toim.), *Indoor air quality handbook*. 1488 p. – McGraw-Hill, New York. Saatavilla [www:stä osoitteesta](http://www.sta.oulu.fi/osoitteesta): [http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=601](http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=601)
- Valmari, T. 2000: Potassium behaviour during combustion of wood in circulating fluidized bed power plants. 88 p. – VTT publications 414, Otamedia Oy, Espoo.
- 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. – *J. Aerosol Sci.* 29: 445 – 459.
- Valmari, T., Lind, T. & Kauppinen, E.I. 1999: Field study on ash behavior during circulating fluidized-bed combustion of biomass. 1. Ash formation. – *Energy & Fuels* 13: 379 – 389.
- Van Cauwenberghe, K.A. 1986: Sampling, size distribution, reactivity and analysis of organic aerosol constituents. Teoksessa: Lee, S.D., Schneider, T., Grant, L.D. & Verkerk, P.J. (toim.), *Aerosols: Research, risk assessment and control strategies*. 1221 p. – Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan, USA: 151 – 171.
- Van Dingenen, R., Raes, F., Putaud, J.-P., Baltensberger, U., Charron, A., Facchini, M.-C., Decesari, S., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.-C., Harrison, R.M., Hüglin, C., Jones, A.M., Laj, P., Lorbeer, G., Maenhaut, W., Palmgren, F., Querol, X., Rodriguez, S., Schneider, J., ten Brink, H., Tunved, P., Tørseth, K., Wehner, B., Weingartner, E., Wiedensohler, A. & Wählin, P. 2004: A European aerosol phenomenology – I: physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. – *Atmos. Environ.* 38: 2561 – 2577.
- Van Lith, S.C., Alonso-Ramirez, V., Jensen, P.A., Frandsen, F.J. & Glarborg, P. 2006: Release to the gas phase of inorganic elements during wood combustion. Part 1: Development and evaluation of quantification methods. – *Energy and Fuels* 20: 964 – 978.
- Van Loo, S. & Koppejan, J. 2008: *Handbook of biomass combustion and co-firing*. 442 p. – Twenty University Press, Enchede. Saatavissa [www:stä osoitteesta](http://www.sta.oulu.fi/osoitteesta): [http://books.google.fi/books/about/The\\_handbook\\_of\\_biomass\\_combustion\\_and\\_c.html?id=KE565zmFumQC&redir\\_esc=y](http://books.google.fi/books/about/The_handbook_of_biomass_combustion_and_c.html?id=KE565zmFumQC&redir_esc=y)
- VNA 2006/128: Valtioneuvoston asetus asuntojen korjaus-, energia- ja terveyshaittavastuksista. 16.2.2006.
- VNS 2008: Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastратегия. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle. 6.11.2008.

- VNS 2009: Valtioneuvoston tulevaisuusselonteko ilmasto- ja energiapolitiikasta: kohti vähäpäästöistä Suomea. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 28/2009. – Yliopistopaino, Helsinki.
- Walter, J. 2001: Size distribution characteristics of aerosols. Teoksessa: Baron, P.A. & Willeke, K. (toim.), *Aerosol measurement – Principles, techniques and applications*. 1172 p. – John Wiley & Sons, New York, NY: 99 – 116.
- Warneke, C., Roberts, J.M., Veres, P., Gilman, J., Kuster, W.C., Burling, I., Yokelson, R. & de Gouw, J.A. 2011: VOC identification and inter-comparison from laboratory biomass burning using PTR-MS and PIT-MS. – *Int. J. Mass. Spectrom.* 303: 6 – 14.
- Watanabe, T., Tochikubo, F., Koizumi, Y., Tsuchida, T., Hautanen, J. & Kauppinen, E.I. 1995: Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator. – *J. Electrostat.* 34: 367 – 585.
- Wei, X., Schnell, U. & Hein, K.R.G. 2005: Behaviour of gaseous chlorine and alkali metals during biomass thermal utilisation. – *Fuel* 84: 841 – 848.
- Weidenkaff, A., Steinfeld, A., Wokaun, A., Auer, P.O., Eichler, B. & Reller, A. 1999: Direct solar thermal dissociation of zinc oxide: condensation and crystallization of zinc in the presence of oxygen. – *Sol. Energy* 65: 59 – 69.
- Werkelin, J., Skrifvars, B.-J. & Hupa, M. 2005: Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: Summer harvest. – *Biomass Bioenerg.* 29: 451 – 466.
- WHO 2003: Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. 98 p. – Bonn, Germany.
- Wiinikka, H. 2005: High temperature aerosol formation and emission minimization during combustion of wood pellets. – PhD Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- Wiinikka, H. & Gebart, R. 2004: Critical parameters for particle emissions in small-scale fixed-bed combustion of wood pellets. – *Energy & Fuels* 18: 897 – 907.
- Wiinikka, H., Gebart, R., Boman, C., Boström, D., Nordin, A. & Öhman, M. 2006: High-temperature aerosol formation in wood pellets flames: Spatially resolved measurements. – *Combust. Flame* 147: 278 – 293.
- Wiinikka, H., Gebart, R., Boman, C., Boström, D. & Öhman, M. 2007: Influence of fuel ash composition on high temperature aerosol formation in fixed bed combustion of woody biomass pellets. – *Fuel* 86: 181 – 193.
- Yamasaki, H., Kuwata, K. & Miyamoto, H. 1982: Effects of ambient temperature on aspects of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons. – *Environ. Sci. Technol.* 16: 189 – 194.
- Yu, S. 2000: Role of organic acids (formic, acetic, pyruvic and oxalic) in the formation of cloud condensation nuclei (CCN): a review. – *Atmos. Res.* 53: 185 – 217.
- Zelikoff, J.T., Chen, L.C., Cohen, M.D., Fang, K., Gordon, T., Li, Y., Nadziejko, C. & Schlesinger, R.B. 2003: Effects of inhaled ambient particulate matter on pulmonary antimicrobial immune defense. – *Inhal. Toxicol.* 15: 131 – 150.
- Zelikoff, J.T., Chen, L.C., Cohen, M.D. & Schlesinger, R.B. 2002: The toxicology of inhaled woodsmoke. – *J. Toxicol. Env. Health* 5: 269 – 282.

- Zevehoven-Onderwater, M. 2001: Ash forming matter in biomass fuels. – PhD Thesis, Åbo Akademi, Turku, Finland.
- Zhuang, Y., Kim, Y.J., Lee, T.G. & Biswas, P. 2000: Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators. – J. Electrostat. 48: 245 – 260.
- Zolin, A., Jensen, A., Jensen, P.A., Frandsen, F. & Dam-Johansen, K. 2001: The influence of inorganic materials on the thermal deactivation of fuel chars. – Energy Fuels 15: 1110 – 1122.

## LIITTEET

### LIITE 1. Hiukkaspäästöjen lukumääräpitoisuudet

Taulukko 1. Hiukkaspäästöjen lukumääräpitoisuudet ja keskihajonnat 7 %:n ja 5 %:n jäännöshappipitoisuuksilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

ESP	O <sub>2</sub> (%)	Lukumääräpitoisuus	
		10 <sup>7</sup> /cm <sup>3</sup>	10 <sup>7</sup> /MJ
off	7	3,15 ± 1,59	1,20 ± 0,61
off	7	4,11 ± 1,55	3,84 ± 0,21
off	7	3,33 ± 1,51	1,27 ± 0,19
15 kV	7	0,31 ± 1,69	0,12 ± 0,65
15 kV	7	0,24 ± 1,78	0,02 ± 0,58
15 kV	7	0,78 ± 1,57	0,30 ± 0,60
off	5	3,13 ± 1,52	1,24 ± 0,58
off	5	3,35 ± 1,56	1,12 ± 0,60
off	5	2,54 ± 1,52	0,85 ± 0,58
15 kV	5	0,58 ± 1,57	0,19 ± 0,60
15 kV	5	0,45 ± 1,53	0,15 ± 0,58
15 kV	5	0,97 ± 1,61	0,32 ± 0,62

LIITE 2. Hiukkaspäästöjen massapitoisuudet

Taulukko 1. Hiukkaspäästöjen massapitoisuudet ja keskihajonnat 7 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla ilman savukaasun sähkösuodatusta. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Massapitoisuus	
	mg/m <sup>3</sup>	mg/MJ
1	0,21 ± 0,13	0,08 ± 0,05
2	1,30 ± 0,83	0,50 ± 0,32
3	3,35 ± 2,18	1,28 ± 0,83
4	1,56 ± 2,41	0,60 ± 0,92
5	0,56 ± 1,97	0,21 ± 0,75
6	0,32 ± 0,90	0,12 ± 0,34
7	0,16 ± 0,18	0,06 ± 0,71
8	0,11 ± 0,42	0,04 ± 0,16
9	0,04 ± 0,24	0,02 ± 0,09
10	0,07 ± 0,39	0,03 ± 0,15
11	0,03 ± 0,19	0,01 ± 0,07
12	0,02 ± 0,30	0,01 ± 0,11
13	0,06 ± 0,31	0,02 ± 0,12

Taulukko 2. Hiukkaspäästöjen massapitoisuudet ja keskihajonnat 7 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla savukaasun sähkösuodatuksen jälkeen (ESP 15 kV). Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Massapitoisuus	
	mg/m <sup>3</sup>	mg/MJ
1	0,07 ± 0,24	0,03 ± 0,09
2	0,11 ± 0,20	0,04 ± 0,08
3	0,22 ± 0,27	0,08 ± 0,11
4	0,26 ± 0,44	0,10 ± 0,17
5	0,31 ± 0,64	0,12 ± 0,24
6	0,18 ± 0,26	0,07 ± 0,10
7	0,14 ± 0,35	0,06 ± 0,13
8	0,05 ± 0,16	0,02 ± 0,06
9	0,05 ± 0,21	0,02 ± 0,08
10	0,02 ± 0,16	0,01 ± 0,06
11	0,02 ± 0,12	0,01 ± 0,05
12	0,003 ± 0,09	0,001 ± 0,04
13	0,04 ± 0,08	0,01 ± 0,03

Taulukko 3. Hiukkaspäästöjen massapitoisuudet ja keskihajonnat 5 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla ilman savukaasun sähkösuodatusta. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Massapitoisuus	
	mg/m <sup>3</sup>	mg/MJ
1	0,31 ± 0,14	0,12 ± 0,05
2	2,00 ± 1,30	0,77 ± 0,50
3	1,76 ± 2,67	0,68 ± 1,02
4	0,54 ± 0,92	0,21 ± 0,35
5	0,24 ± 0,44	0,09 ± 0,17
6	0,19 ± 0,22	0,07 ± 0,08
7	0,07 ± 0,33	0,03 ± 0,13
8	0,08 ± 0,34	0,03 ± 0,13
9	0,07 ± 0,28	0,03 ± 0,11
10	0,08 ± 0,61	0,03 ± 0,23
11	0,01 ± 0,19	0,005 ± 0,07
12	0,05 ± 0,28	0,02 ± 0,11
13	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00

Taulukko 4. Hiukkaspäästöjen massapitoisuudet ja keskihajonnat 5 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla savukaasun sähkösuodatuksen jälkeen (ESP 15 kV). Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Massapitoisuus	
	mg/m <sup>3</sup>	mg/MJ
1	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,01
2	0,22 ± 0,24	0,08 ± 0,09
3	0,19 ± 0,15	0,07 ± 0,06
4	0,21 ± 0,30	0,08 ± 0,12
5	0,24 ± 0,74	0,09 ± 0,28
6	0,12 ± 0,21	0,05 ± 0,08
7	0,09 ± 0,14	0,03 ± 0,06
8	0,08 ± 0,24	0,03 ± 0,09
9	0,05 ± 0,11	0,02 ± 0,04
10	0,01 ± 0,05	0,003 ± 0,02
11	0,001 ± 0,09	0,0005 ± 0,04
12	0,02 ± 0,12	0,008 ± 0,05
13	0,02 ± 0,21	0,01 ± 0,08



### LIITE 3. Hiukkaspäästöjen hiilipitoisuudet

Taulukko 1. Hiukkaspäästöjen hiilipitoisuudet 7 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla ilman savukaasun sähkösuodatusta sekä hiukkaspäästöjen hiilipitoisuuden osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Hiilipitoisuus		
	mg/m <sup>3</sup>	mg/MJ	%
1	0,09	0,03	40,3
2	0,15	0,07	11,3
3	0,54	0,21	16,0
4	0,27	0,10	17,3
5	0,21	0,08	38,1
6	0,16	0,06	51,1
7	0,08	0,03	47,9
8	0,06	0,02	53,8
9	0,01	0,003	18,6
10	0,02	0,01	34,4
11	0,02	0,01	75,7
12	0,00	0,00	0,0
13	0,02	0,01	32,2

Taulukko 2. Hiukkaspäästöjen hiilipitoisuudet 7 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla savukaasun sähkösuodatuksen jälkeen (ESP 15 kV) sekä hiukkaspäästöjen hiilipitoisuuden osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Hiilipitoisuus		
	mg/m <sup>3</sup>	mg/MJ	%
1	0,02	0,01	34,7
2	0,03	0,01	22,2
3	0,07	0,03	35,3
4	0,18	0,07	68,2
5	0,21	0,08	70,0
6	0,13	0,05	73,8
7	0,12	0,05	84,8
8	0,03	0,01	59,0
9	0,004	0,002	9,9
10	0,01	0,004	57,2
11	0,01	0,003	30,5
12	0,001	0,001	42,2
13	0,01	0,004	32,2

Taulukko 3. Hiukkaspäästöjen hiilipitoisuudet 5 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla ilman savukaasun sähkösuodatusta sekä hiukkaspäästöjen hiilipitoisuuden osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Hiilipitoisuus		
	mg/m <sup>3</sup>	mg/MJ	%
1	0,06	0,02	20,5
2	0,10	0,04	5,0
3	0,14	0,06	8,0
4	0,22	0,08	40,2
5	0,07	0,03	27,6
6	0,06	0,02	29,7
7	0,05	0,02	68,8
8	0,01	0,01	18,1
9	0,01	0,01	20,7
10	0,06	0,02	70,4
11	0,001	0,0005	9,9
12	0,01	0,002	12,9
13	0,00	0,00	0,0

Taulukko 4. Hiukkaspäästöjen hiilipitoisuudet 5 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla savukaasun sähkösuodatuksen jälkeen (ESP 15 kV) sekä hiukkaspäästöjen hiilipitoisuuden osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Hiilipitoisuus		
	mg/m <sup>3</sup>	mg/MJ	%
1	0,01	0,004	21,4
2	0,03	0,01	14,3
3	0,05	0,02	24,2
4	0,07	0,03	34,0
5	0,13	0,05	54,7
6	0,04	0,02	32,4
7	0,01	0,004	12,3
8	0,01	0,003	12,1
9	0,02	0,01	41,8
10	0,00	0,00	0,0
11	0,00	0,00	0,0
12	0,0004	0,0002	2,1
13	0,00	0,00	0,0

#### LIITE 4. Hiukkaspäästöjen ionipitoisuudet

Taulukko 1. Hiukkaspäästöjen ionipitoisuudet 7 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla ilman savukaasun sähkösuodatusta sekä hiukkaspäästöjen ionipitoisuuksien osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Ionipitoisuus											
	kloridi			nitraatti			nitriitti			sulfaatti		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	4,90	1,87	2,3	4,90	1,87	2,3	4,90	1,87	2,3	45,7	17,5	21,8
2	19,8	7,57	1,5	13,9	5,30	1,1	39,6	15,1	3,1	335	128	25,8
3	40,3	15,4	1,2	23,7	9,06	0,7	92,4	35,3	2,8	822	314	24,6
4	22,5	8,61	1,4	16,1	6,15	1,0	48,2	18,4	3,1	389	149	24,9
5	12,0	4,59	2,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	12,0	4,59	2,1	114	43,6	20,3
6	8,70	3,33	2,7	13,1	4,99	4,1	13,1	4,99	4,1	43,5	16,6	13,6
7	3,22	1,23	2,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	9,66	3,69	6,2	12,9	4,92	8,3
8	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1

mr, määrittäjäraja: <sup>1</sup>  $2,03 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>2</sup>  $7,77 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>3</sup>  $6,10 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>4</sup>  $2,33 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>5</sup>  $1,02 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>6</sup>  $3,89 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>7</sup>  $6,10 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>8</sup>  $2,33 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 2. Hiukkaspäästöjen ionipitoisuudet 7 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla savukaasun sähkösuodatuksen jälkeen (ESP 15 kV) sekä hiukkaspäästöjen ionipitoisuuksien osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Ionipitoisuus											
	kloridi			nitraatti			nitriitti			sulfaatti		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
2	2,95	1,13	2,6	3,93	1,50	3,5	1,97	0,751	< 0,1	28,5	10,9	25,6
3	3,54	1,35	1,6	4,43	1,69	2,0	3,54	1,35	< 0,1	44,3	16,9	20,4
4	1,82	0,694	0,7	3,63	1,39	1,4	1,82	0,694	< 0,1	24,5	9,38	9,3
5	1,38	0,526	0,4	5,50	2,10	1,8	5,50	2,10	< 0,1	9,63	3,68	3,1
6	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
7	2,52	0,96	1,8	1,89	0,721	1,3	0,629	0,240	< 0,1	3,14	1,20	2,2
8	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1

mr, määrittäjäraja: <sup>1</sup>  $0,02 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>2</sup>  $3,89 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>3</sup>  $3,05 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>4</sup>  $1,17 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>5</sup>  $5,08 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>6</sup>  $1,94 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>7</sup>  $3,05 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>8</sup>  $1,17 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 3. Hiukkaspäästöjen ionipitoisuudet 5 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla ilman savukaasun sähkösuodatusta sekä hiukkaspäästöjen ionipitoisuuksien osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Ionipitoisuus											
	kloridi			nitraatti			nitriitti			sulfaatti		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	9,84	3,76	3,2	9,84	3,76	3,2	9,84	3,76	3,2	103	39,5	33,2
2	43,7	16,7	2,2	16,1	6,16	0,8	52,9	20,2	2,6	552	211	27,6
3	30,4	11,6	1,7	15,2	5,82	0,9	53,3	20,4	3,0	462	177	26,0
4	8,19	3,13	1,5	8,19	3,13	1,5	16,4	6,27	3,0	101	38,6	18,8
5	4,74	1,81	1,9	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	4,74	1,81	1,9	33,2	12,7	13,5
6	5,28	2,02	2,8	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	2,64	1,01	1,4	23,8	9,08	12,6
7	33,2	12,7	48,0	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	8,29	3,17	12,0	58,1	22,2	84,0
8	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1

mr, määrittäjäraja: <sup>1</sup>  $1,77 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>2</sup>  $6,79 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>3</sup>  $5,33 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>4</sup>  $2,04 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>5</sup>  $8,89 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>6</sup>  $3,40 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>7</sup>  $5,33 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>8</sup>  $2,04 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 4. Hiukkaspäästöjen ionipitoisuudet 5 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla savukaasun sähkösuodatuksen jälkeen (ESP 15 kV) sekä hiukkaspäästöjen ionipitoisuuksien osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Ionipitoisuus											
	kloridi			nitraatti			nitriitti			sulfaatti		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	6,59	2,52	14,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	1,65	0,629	3,5	18,1	6,92	38,8
2	2,80	1,07	1,3	2,80	1,07	1,3	3,37	1,29	1,6	30,3	11,6	14,1
3	4,68	1,79	2,5	4,68	1,79	2,5	5,62	2,15	3,0	43,1	16,5	23,0
4	2,43	0,930	1,2	3,65	1,40	1,7	2,43	0,930	1,2	21,9	8,37	10,4
5	1,59	0,606	0,7	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	9,51	3,64	4,0
6	1,16	0,443	0,9	3,48	1,33	2,8	1,16	0,443	0,9	4,64	1,77	3,8
7	2,59	0,988	3,0	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	3,88	1,48	4,5
8	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>1</sup>  $8,89 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>2</sup>  $3,40 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>3</sup>  $2,67 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>4</sup>  $1,02 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>5</sup>  $4,47 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>6</sup>  $1,70 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>7</sup>  $2,67 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>8</sup>  $1,02 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$

LIITE 5. Hiukkaspäästöjen metallipitoisuudet

Taulukko 1. Hiukkaspäästöjen metallipitoisuudet 7 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla ilman savukaasun sähkösuodatusta sekä hiukkaspäästöjen metallipitoisuuksien osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	alumiini			barium			boori			kalium		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	3,07	1,17	1,5	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	2,78	1,06	1,3	87,1	33,3	41,6
2	2,67	1,02	0,2	1,77	0,676	0,1	4,62	1,77	0,4	807	308	62,2
3	3,27	1,25	0,1	2,16	0,824	< 0,1	4,00	1,53	0,1	1 040	400	31,2
4	2,75	1,05	0,2	1,03	0,392	< 0,1	3,10	1,19	0,2	461	176	29,5
5	2,41	0,921	0,4	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	1,85	0,707	0,3	122	46,6	21,8
6	2,04	0,778	0,6	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	1,61	0,616	0,5	48,4	18,5	15,2
7	1,55	0,592	1,0	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	0,973	0,372	0,6	32,8	12,5	21,1
8	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1

mr, määrittäjäraja: <sup>1</sup>  $2,54 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>2</sup>  $9,71 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>3</sup>  $2,54 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>4</sup>  $9,71 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>5</sup>  $2,54 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>6</sup>  $9,71 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>7</sup>  $5,08 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>8</sup>  $1,94 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 1. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	kalsium			rikki			kromi			kupari		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	7,19	2,75	3,4	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,970	0,371	0,5	0,741	0,283	0,4
2	7,68	2,94	0,6	184	70,5	14,2	1,89	0,724	0,2	1,54	0,589	0,1
3	7,34	2,81	0,2	226	86,3	6,7	1,42	0,541	< 0,1	1,68	0,644	< 0,1
4	9,68	3,70	0,6	116	44,4	7,4	1,35	0,515	< 0,1	0,969	0,371	< 0,1
5	11,0	4,20	2,0	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	1,02	0,389	0,2	0,656	0,251	0,1
6	7,27	2,78	2,3	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	1,66	0,633	0,5	1,30	0,498	0,4
7	5,96	2,28	3,8	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	1,03	0,395	0,7	0,462	0,177	0,3
8	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>9</sup>  $2,54 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>10</sup>  $9,71 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>11</sup>  $5,08 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>12</sup>  $1,94 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>13</sup>  $1,02 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>14</sup>  $3,89 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>15</sup>  $5,08 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>16</sup>  $1,94 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$



Taulukko 1. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	lyijy			mangaani			natrium			nikkeli		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	0,078	0,030	< 0,1	0,339	0,129	0,2	4,49	1,72	2,1	0,238	0,091	0,1
2	0,817	0,312	< 0,1	4,17	1,59	0,3	11,5	4,41	0,9	0,737	0,282	< 0,1
3	0,899	0,344	< 0,1	5,28	2,02	0,2	7,34	2,81	0,2	0,425	0,162	< 0,1
4	0,422	0,161	< 0,1	2,62	1,00	0,2	3,63	1,39	0,2	0,379	0,145	< 0,1
5	0,099	0,038	< 0,1	0,642	0,245	0,1	4,40	1,68	0,8	0,269	0,103	< 0,1
6	0,052	0,020	< 0,1	0,518	0,198	0,2	3,63	1,39	1,1	0,584	0,223	0,2
7	0,076	0,029	< 0,1	0,222	0,085	0,1	14,9	5,70	9,6	0,317	0,121	0,2
8	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>17</sup>  $2,54 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>18</sup>  $9,71 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>19</sup>  $5,08 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>20</sup>  $1,94 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>21</sup>  $2,54 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>22</sup>  $9,71 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>23</sup>  $1,02 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>24</sup>  $3,89 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 1. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	rauta			sinkki			strontium			titaani		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	4,53	1,73	2,2	3,24	1,24	1,5	0,026	0,100	< 0,1	0,542	0,207	0,3
2	6,05	2,31	0,5	39,9	15,2	3,1	0,137	0,052	< 0,1	0,693	0,265	< 0,1
3	4,26	1,63	0,1	49,8	19,0	1,5	0,144	0,055	< 0,1	0,642	0,245	< 0,1
4	3,55	1,36	0,2	24,1	9,21	1,5	0,093	0,036	< 0,1	0,741	0,283	< 0,1
5	2,72	1,04	0,5	5,96	2,28	1,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,714	0,273	0,1
6	5,30	2,02	1,7	3,28	1,25	1,0	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,683	0,261	0,2
7	3,52	1,35	2,3	0,932	0,356	0,6	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,609	0,233	0,4
8	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>25</sup>  $2,54 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>26</sup>  $9,71 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>27</sup>  $2,54 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>28</sup>  $9,71 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>29</sup>  $5,08 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>30</sup>  $1,94 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>31</sup>  $5,08 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>32</sup>  $1,94 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 2. Hiukkaspäästöjen metallipitoisuudet 7 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla savukaasun sähkösuodatuksen jälkeen (ESP 15 kV) sekä hiukkaspäästöjen metallipitoisuuksien osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	alumiini			barium			boori			kalium		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	0,400	0,151	0,6	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	0,081	0,031	0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
2	1,17	0,448	1,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	0,616	0,236	0,6	29,8	11,4	26,7
3	3,09	1,18	1,4	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	0,489	0,187	0,2	35,1	13,4	16,2
4	1,86	0,710	0,7	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	0,258	0,099	< 0,1	24,8	9,47	9,3
5	0,539	0,206	0,2	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	0,118	0,045	< 0,1	3,91	1,49	1,3
6	0,770	0,294	0,4	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	1,07	0,408	0,6	11,4	4,35	6,4
7	0,868	0,332	0,6	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	0,213	0,081	0,2	4,15	1,59	2,9
8	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1

mr, määrittäjäraja: <sup>1</sup>  $1,27 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>2</sup>  $4,86 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>3</sup>  $1,27 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>4</sup>  $4,86 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>5</sup>  $1,27 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>6</sup>  $4,86 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>7</sup>  $2,54 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>8</sup>  $9,71 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 2. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	kalsium			rikki			kromi			kupari		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	0,710	0,271	1,0	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,132	0,051	0,2	0,062	0,024	< 0,1
2	4,86	1,86	4,4	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,685	0,262	0,6	0,229	0,088	0,2
3	3,93	1,49	1,8	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,879	0,336	0,4	0,786	0,300	0,4
4	2,30	0,881	0,9	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,657	0,251	0,3	0,385	0,147	0,2
5	2,60	0,996	0,9	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,370	0,141	0,1	0,161	0,062	< 0,1
6	1,98	0,756	1,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,465	0,178	0,3	0,293	0,112	0,2
7	3,11	1,19	2,2	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,836	0,320	0,6	1,06	0,405	0,7
8	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>9</sup>  $1,27 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>10</sup>  $4,86 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>11</sup>  $2,54 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>12</sup>  $9,71 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>13</sup>  $5,08 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>14</sup>  $1,94 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>15</sup>  $2,54 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>16</sup>  $9,71 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 2. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	lyijy			mangaani			natrium			nikkeli		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	0,005	0,002	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	0,828	0,316	1,2	0,045	0,017	< 0,1
2	0,031	0,012	< 0,1	0,147	0,056	0,1	3,04	1,16	2,7	0,218	0,083	0,2
3	0,040	0,015	< 0,1	0,207	0,079	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	0,292	0,112	0,1
4	0,029	0,011	< 0,1	0,126	0,048	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	0,158	0,061	< 0,1
5	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	0,031	0,012	< 0,1	0,326	0,124	0,1	0,137	0,052	< 0,1
6	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	0,050	0,019	< 0,1	0,494	0,189	0,3	0,122	0,047	< 0,1
7	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	0,042	0,016	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	0,323	0,124	0,2
8	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>17</sup>  $1,27 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>18</sup>  $4,86 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>19</sup>  $2,54 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>20</sup>  $9,71 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>21</sup>  $1,27 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>22</sup>  $4,86 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>23</sup>  $5,08 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>24</sup>  $1,94 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 2. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	rauta			sinkki			strontium			titaani		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	0,464	0,177	0,7	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,065	0,025	< 0,1
2	1,95	0,746	1,8	1,79	0,686	1,6	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,293	0,112	0,3
3	3,25	1,24	1,5	2,22	0,850	1,0	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,398	0,152	0,2
4	2,83	1,07	1,1	1,53	0,584	0,6	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,392	0,150	0,2
5	1,15	0,440	0,4	0,120	0,046	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,203	0,078	< 0,1
6	1,45	0,554	0,8	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,354	0,135	0,2
7	2,90	1,11	2,0	0,474	0,181	0,3	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,275	0,105	0,2
8	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
9	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>25</sup>  $1,27 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>26</sup>  $4,86 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>27</sup>  $1,27 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>28</sup>  $4,86 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>29</sup>  $2,54 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>30</sup>  $9,71 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>31</sup>  $2,54 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>32</sup>  $9,71 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 3. Hiukkaspäästöjen metallipitoisuudet 5 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla ilman savukaasun sähkösuodatusta sekä hiukkaspäästöjen metallipitoisuuksien osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	alumiini			barium			boori			kalium		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	1,02	0,389	0,3	0,305	0,117	< 0,1	0,890	0,340	0,3	66,5	25,4	21,3
2	0,951	0,363	< 0,1	2,30	0,879	0,1	0,998	0,382	< 0,1	378	145	18,9
3	1,01	0,387	< 0,1	2,27	0,869	0,1	0,554	0,212	< 0,1	379	145	21,3
4	1,20	0,457	0,2	0,616	0,236	0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	94,0	35,9	17,5
5	0,902	0,345	0,4	0,164	0,063	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	173	66,0	70,5
6	2,12	0,810	1,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	22,9	8,74	12,1
7	0,797	0,305	1,2	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	4,73	1,81	6,8
8	8,42	3,22	10,9	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	6,42	2,45	8,1
9	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1

mr, määrittäjäraja: <sup>1</sup>  $2,22 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>2</sup>  $8,49 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>3</sup>  $2,22 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>4</sup>  $8,49 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>5</sup>  $2,22 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>6</sup>  $8,49 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>7</sup>  $4,44 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>8</sup>  $1,70 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 3. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	kalsium			rikki			kromi			kupari		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	7,90	3,02	2,5	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,621	0,237	0,2	0,362	0,138	0,1
2	5,54	2,12	0,3	114	43,6	5,7	0,669	0,256	< 0,1	0,878	0,336	< 0,1
3	5,89	2,25	0,3	118	45,3	6,7	0,946	0,362	< 0,1	1,36	0,519	< 0,1
4	4,24	1,62	0,8	36,0	13,8	6,7	0,691	0,264	0,1	0,435	0,166	< 0,1
5	6,68	2,55	2,7	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,687	0,263	0,3	0,297	0,113	0,1
6	3,39	1,30	1,8	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,719	0,275	0,4	0,771	0,295	0,4
7	1,46	0,556	2,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,336	0,128	0,5	0,322	0,123	0,5
8	3,67	1,40	4,6	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	10,5	0,401	1,3	0,856	0,327	1,1
9	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>9</sup>  $2,22 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>10</sup>  $8,49 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>11</sup>  $4,44 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>12</sup>  $1,70 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>13</sup>  $8,89 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>14</sup>  $3,40 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>15</sup>  $4,44 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>16</sup>  $1,70 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$



Taulukko 3. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	lyijy			mangaani			natrium			nikkeli		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	0,166	0,063	< 0,1	0,238	0,091	< 0,1	3,95	1,51	1,3	0,177	0,068	< 0,1
2	1,20	0,461	< 0,1	2,15	0,821	0,1	0,692	0,265	< 0,1	0,156	0,060	< 0,1
3	1,18	0,452	< 0,1	2,22	0,847	0,1	0,736	0,281	< 0,1	0,275	0,105	< 0,1
4	0,317	0,121	< 0,1	0,535	0,205	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	0,111	0,042	< 0,1
5	0,096	0,037	< 0,1	0,144	0,055	< 0,1	3,90	1,49	1,6	0,215	0,082	< 0,1
6	0,103	0,040	< 0,1	0,213	0,081	0,1	5,08	1,94	2,7	0,251	0,096	0,1
7	0,021	0,008	< 0,1	0,045	0,017	< 0,1	1,46	5,56	2,1	0,117	0,045	0,1
8	0,039	0,015	< 0,1	0,188	0,072	0,2	5,50	2,10	6,9	0,411	0,157	0,5
9	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>17</sup>  $2,22 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>18</sup>  $8,49 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>19</sup>  $4,44 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>20</sup>  $1,70 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>21</sup>  $2,22 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>22</sup>  $8,49 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>23</sup>  $8,89 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>24</sup>  $3,40 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 3. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	rauta			sinkki			strontium			titaani		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	1,69	0,644	0,5	4,15	1,59	1,3	0,034	0,013	< 0,1	0,491	0,188	0,2
2	1,55	0,591	< 0,1	29,2	11,2	1,5	0,122	0,047	< 0,1	0,360	0,138	< 0,1
3	2,18	0,832	0,1	31,4	12,0	1,8	0,140	0,053	< 0,1	0,668	0,255	< 0,1
4	1,03	0,392	0,2	7,62	2,91	1,4	0,048	0,018	< 0,1	0,412	0,158	< 0,1
5	2,07	0,791	0,8	1,97	0,75	0,8	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,431	0,165	0,2
6	6,71	2,57	3,6	1,55	0,591	0,8	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,419	0,160	0,2
7	3,49	1,33	5,0	0,373	0,142	0,5	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,238	0,091	0,3
8	9,28	3,55	11,7	0,537	0,205	0,7	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,431	0,165	0,5
9	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>25</sup>  $2,22 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>26</sup>  $8,49 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>27</sup>  $2,22 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>28</sup>  $8,49 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>29</sup>  $4,44 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>30</sup>  $1,70 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>31</sup>  $4,44 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>32</sup>  $1,70 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 4. Hiukkaspäästöjen metallipitoisuudet 5 %:n jäännöshappipitoisuudella eri impaktioasteilla savukaasun sähkösuodatuksen jälkeen (ESP 15 kV) sekä hiukkaspäästöjen metallipitoisuuksien osuudet eri impaktioasteilla. Tilavuusyksikköä kohti lasketut pitoisuudet on redusoitu 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	alumiini			barium			boori			kalium		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	0,934	0,357	2,0	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	10,1	3,87	21,7
2	0,890	0,340	0,4	0,125	0,048	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	27,3	10,4	12,7
3	0,726	0,277	0,4	0,102	0,039	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	34,8	13,3	18,6
4	0,807	0,309	0,4	0,097	0,037	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	19,7	7,55	9,4
5	1,39	0,530	0,6	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	2,80	1,07	1,2
6	1,30	0,496	1,0	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
7	0,760	0,291	0,9	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
8	0,384	0,147	0,5	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	0,121	0,046	0,2	0,630	0,241	0,9
9	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>1</sup>	< mr <sup>2</sup>	< 0,1	< mr <sup>3</sup>	< mr <sup>4</sup>	< 0,1	< mr <sup>5</sup>	< mr <sup>6</sup>	< 0,1	< mr <sup>7</sup>	< mr <sup>8</sup>	< 0,1

mr, määrittäjäraja: <sup>1</sup>  $1,11 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>2</sup>  $4,25 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>3</sup>  $1,11 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>4</sup>  $4,25 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>5</sup>  $1,11 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>6</sup>  $4,25 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>7</sup>  $2,22 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>8</sup>  $8,49 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 4. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	kalsium			rikki			kromi			kupari		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	0,965	0,369	2,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,542	0,207	1,2	0,401	0,153	0,9
2	1,73	0,662	0,8	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,338	0,129	0,2	0,306	0,117	0,1
3	0,740	0,283	0,4	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,225	0,086	0,1	0,312	0,119	0,2
4	0,731	0,279	0,4	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,245	0,094	0,1	0,262	0,100	0,1
5	1,86	0,713	0,8	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,934	0,357	0,4	0,465	0,178	0,2
6	2,65	1,01	2,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,657	0,251	0,5	0,837	0,320	0,7
7	1,78	0,681	2,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,975	0,373	1,1	0,240	0,092	0,3
8	1,89	0,722	2,5	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	0,621	0,237	0,8	0,144	0,055	0,2
9	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>9</sup>	< mr <sup>10</sup>	< 0,1	< mr <sup>11</sup>	< mr <sup>12</sup>	< 0,1	< mr <sup>13</sup>	< mr <sup>14</sup>	< 0,1	< mr <sup>15</sup>	< mr <sup>16</sup>	< 0,1

mr, määrittäysraja: <sup>9</sup>  $1,11 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>10</sup>  $4,25 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>11</sup>  $2,22 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>12</sup>  $8,49 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>13</sup>  $4,44 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>14</sup>  $1,70 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>15</sup>  $2,22 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>16</sup>  $8,49 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 4. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	lyijy			mangaani			natrium			nikkeli		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	0,048	0,018	0,1	1,45	0,553	3,1	0,184	0,070	0,4
2	0,050	0,019	< 0,1	0,148	0,056	< 0,1	1,30	0,496	0,6	0,100	0,038	< 0,1
3	0,040	0,015	< 0,1	0,109	0,042	< 0,1	1,85	0,707	1,0	0,087	0,033	< 0,1
4	0,024	0,009	< 0,1	0,086	0,033	< 0,1	1,10	0,419	0,5	0,273	0,105	0,1
5	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	0,090	0,034	< 0,1	1,40	0,535	0,6	0,428	0,164	0,2
6	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	0,069	0,026	< 0,1	2,00	0,760	1,6	0,311	0,119	0,3
7	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	0,044	0,017	< 0,1	0,891	0,341	1,0	0,431	0,165	0,5
8	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	0,630	0,241	0,9	1,04	0,396	1,4
9	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>17</sup>	< mr <sup>18</sup>	< 0,1	< mr <sup>19</sup>	< mr <sup>20</sup>	< 0,1	< mr <sup>21</sup>	< mr <sup>22</sup>	< 0,1	< mr <sup>23</sup>	< mr <sup>24</sup>	< 0,1

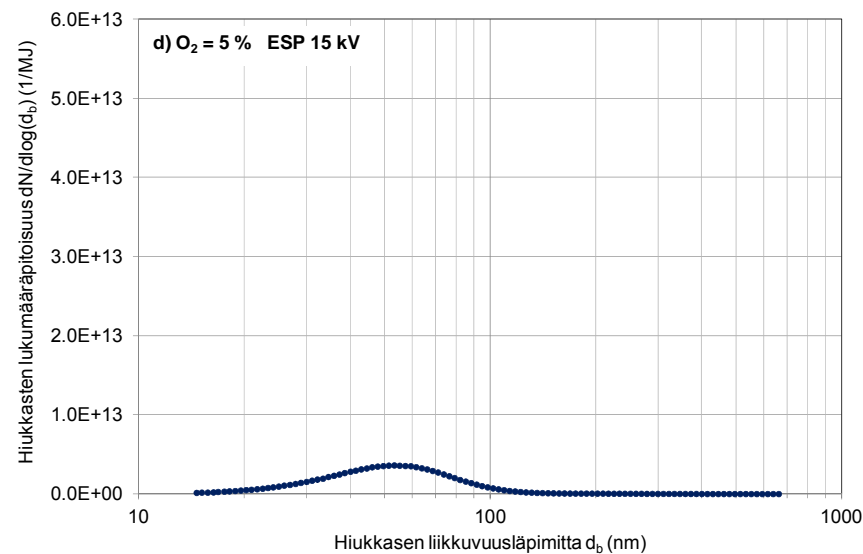
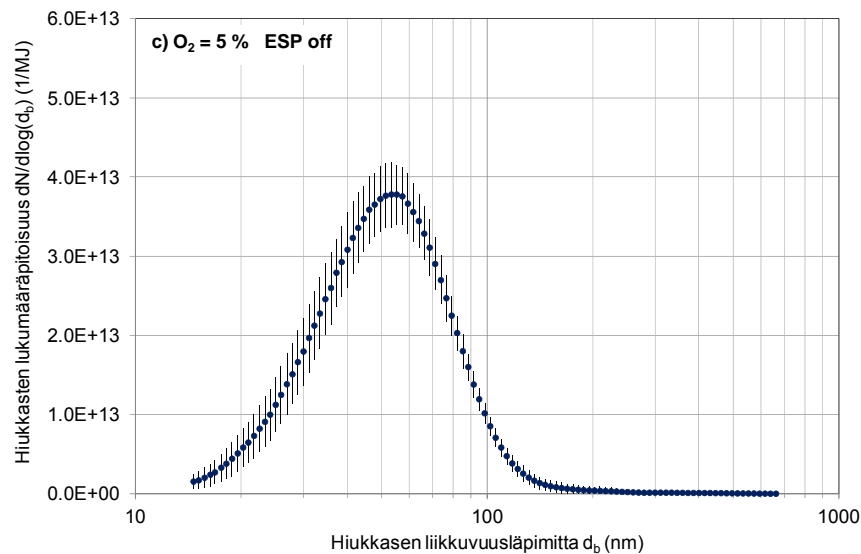
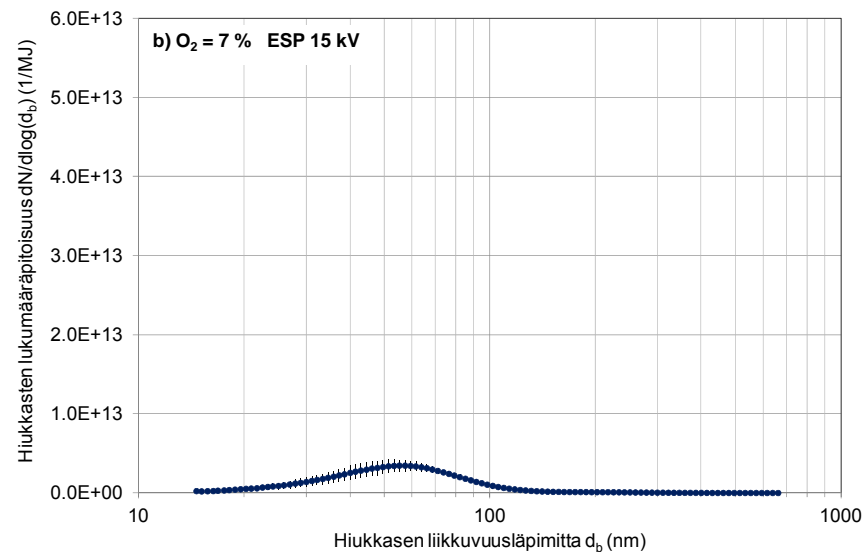
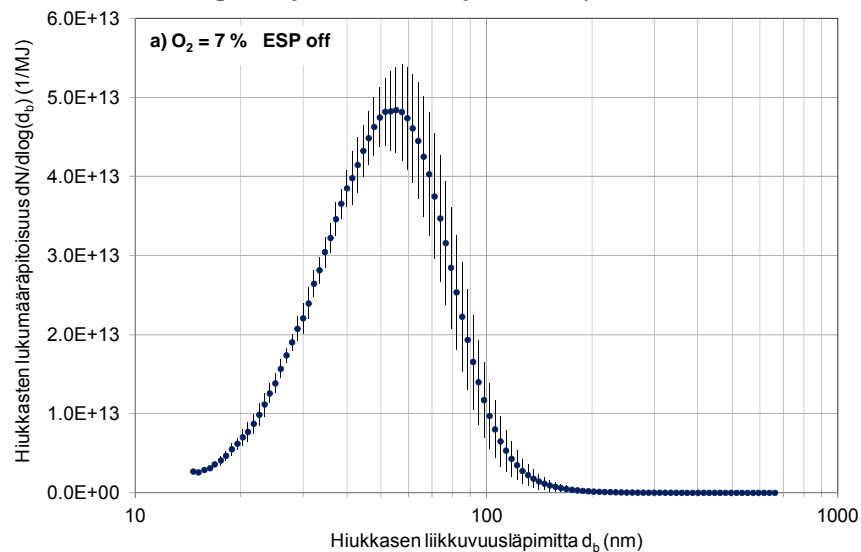
mr, määrittäysraja: <sup>17</sup>  $1,11 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>18</sup>  $4,25 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>19</sup>  $2,22 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>20</sup>  $8,49 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>21</sup>  $1,11 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>22</sup>  $4,25 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>23</sup>  $4,44 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>24</sup>  $1,70 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$

Taulukko 4. jatkuu.

Impaktioaste	Metallipitoisuus											
	rauta			sinkki			strontium			titaani		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{MJ}$	%
1	4,33	1,65	9,3	0,301	0,115	0,7	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,188	0,072	0,4
2	3,10	1,18	1,4	2,25	0,860	1,0	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,241	0,092	0,1
3	2,82	1,08	1,5	1,93	0,739	1,0	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,153	0,059	< 0,1
4	2,15	0,820	1,0	1,55	0,592	0,7	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,151	0,058	< 0,1
5	4,27	1,63	0,8	0,470	0,180	0,2	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,179	0,064	< 0,1
6	4,79	1,83	3,9	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,463	0,177	0,4
7	4,50	1,72	5,2	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,184	0,070	0,2
8	1,18	0,452	1,6	0,562	0,215	0,8	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	0,163	0,062	0,2
9	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
10	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
11	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
12	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1
13	< mr <sup>25</sup>	< mr <sup>26</sup>	< 0,1	< mr <sup>27</sup>	< mr <sup>28</sup>	< 0,1	< mr <sup>29</sup>	< mr <sup>30</sup>	< 0,1	< mr <sup>31</sup>	< mr <sup>32</sup>	< 0,1

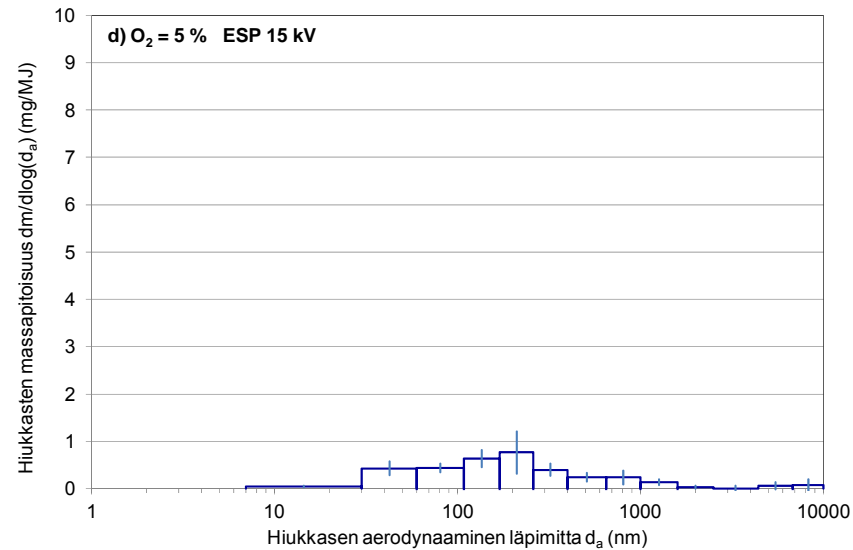
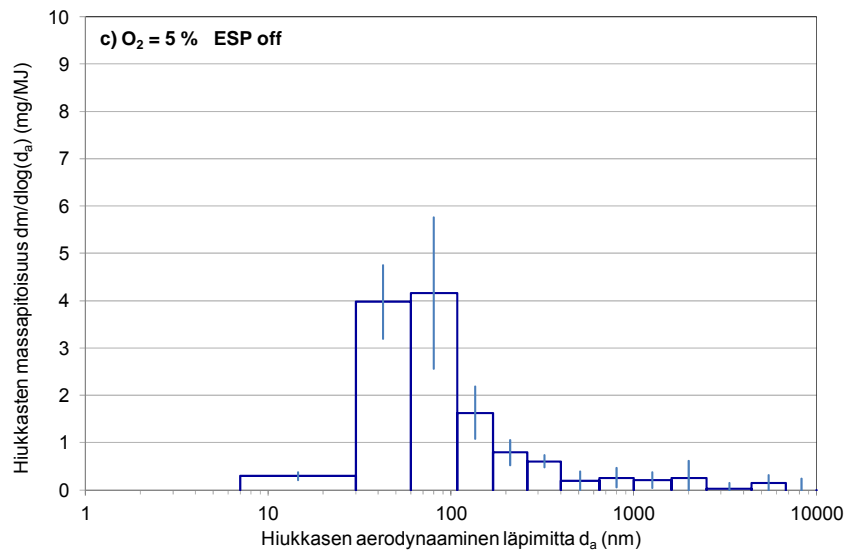
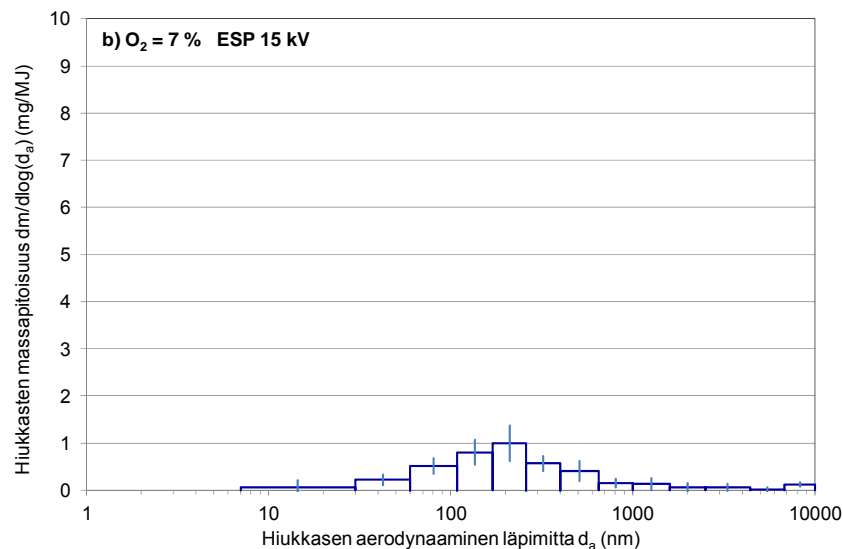
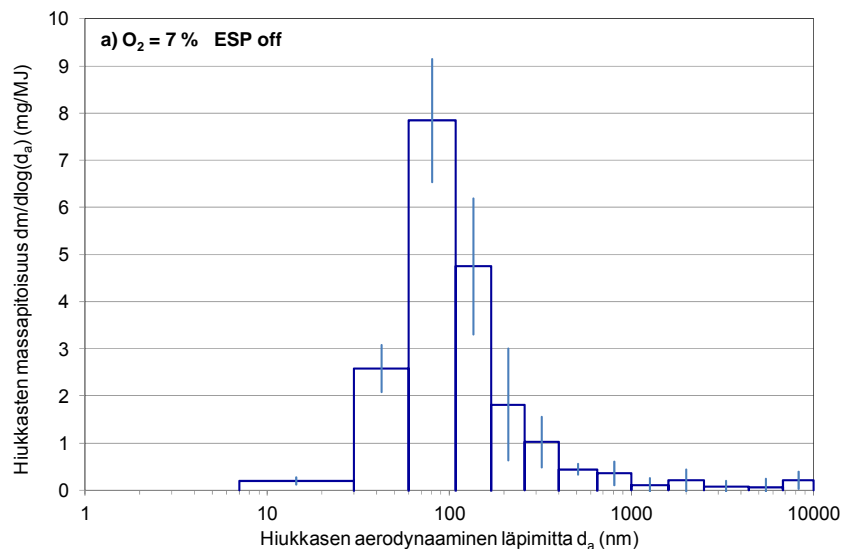
mr, määrittäysraja: <sup>25</sup>  $1,11 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>26</sup>  $4,25 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>27</sup>  $1,11 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>28</sup>  $4,25 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{MJ}$ , <sup>29</sup>  $2,22 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>30</sup>  $8,49 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$ ,  
<sup>31</sup>  $2,22 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , <sup>32</sup>  $8,49 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{MJ}$

## LIITE 6. Hiukkaspäästöjen lukumääräjakaumat yksikössä 1/MJ



Kuva 1. Hiukkaspäästöjen lukumääräpitoisuudet 7 %:n ja 5 %:n jäännöshappipitoisuuksilla sähkösuodatin pois päältä ja 15kV:n jännitteellä. Hajon-  
tapalkit kuvaavat mittausten keskihajontaa.

LIITE 7. Hiukkaspäästöjen massajakaumat yksikössä mg/MJ



Kuva 1. Hiukkaspäästöjen massapitoisuudet 7 %:n ja 5 %:n jäännöshappipitoisuuksilla sähkösuodatin pois päältä ja 15 kV:n jännitteellä. Hajontapalkit kuvaavat mittausten keskihajontaa.