

Pienpolton hiukkasten sähköinen suodattaminen

Ismo Talka

Pro gradu -tutkielma

Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos

Uusiutuvan energian koulutusohjelma

26.2.2006

Tiivistelmä

Tässä työssä on tarkasteltu sähkösuotimen soveltuvuutta pienpolton savukaasujen hiukkasten poistoon. Työssä on esitelty pienpolton savukaasuhiukkasten ominaisuuksia ja keräysmahdollisuuksia sekä sähkösuotimen toiminnan teoriaa.

Hiukkasten ominaisuuksista niiden koko ja resistiivisyys ovat ratkaisevassa asemassa keräyshyötysuhteen kannalta. Sähkösuotimen toiminta on heikoimmillaan halkaisijaltaan noin 0,3 μm :n hiukkasilla, mutta riittävän vahvalla sähkökentällä ja sopivalla suotimen mitoituksella saavutetaan korkea keräyshyötysuhde. Pienpolton savukaasuvirrassa jatkuva ja luotettava hiukkasten keräys on mahdollista kun hiukkassuotimen keräysosan puhdistus on oikein järjestetty.

Tämän työn pohjalta sähkösuotimen rakentaminen pienpolttolaitteisiin on mahdollista ja hyvin suunnitellulla laitteella pystytään poistamaan merkittävä osa savukaasun pienhiukkasista. Pienpolttokokoluokan laitteisiin rakennettavilla sähkösuotimilla voitaisiin alittaa jo kehitteillä olevat polttolaitteiden hiukkaspäästörajat sekä vähentää huomattavasti pienpolton hiukkaspäästöjä.

Esipuhe

Tämä opinnäytetyö on tehty osana Minidust-projektia, jossa on tarkoituksena luoda kokeellinen ja teoreettinen pohja kehittää yksinkertaisen sähköavusteisen hiukkaspoistimen tutkimusversio, joka pienentää merkittävästi pienpolton hiukkaspäästöjä. Minidust-projektin tavoitteena on luoda pohja versiolle, jolla voidaan erottaa sähköisesti 80% hiukkasten massavirrasta ja ratkaista likaantumiseen ja hiukkasten keruuseen liittyvät ongelmat. Sähköisen hiukkaspoiston perusteita kehitetään jatkuvan polttoainesyötön (pellettipoltt) olosuhteita ja perinteistä pienpoltto-olosuhteita vastaavilla savukaasuilla. Projektin on rahoittanut TEKES, Genano Oy, Tulikivi Oyj, Veljekset Ala-Talkkari ja Jyväskylän yliopisto. Projektin toteuttajana Jyväskylän yliopiston lisäksi ovat Tampereen teknillinen yliopisto/Aerosolifysiikka, ja Teknillinen Korkeakoulu/Sovellettu termodynamiikka. Projektin päättymispäivä on 31.12.2006.

Opinnäytteen ohjaajat ovat Jussi Maunuksela ja Martti Aho. Opinnäytteen tarkastajat ovat Jussi Maunuksela ja Ari Laitinen (TTY). Lisäksi kiitän seuraavia henkilöitä avusta ja vastauksista työtäni varten: Linda Johansson (SP, Ruotsi), Jorma Jokiniemi (VTT), Niko Karvosenoja (Ympäristökeskus) Norbert Klippel (Verenum, Sveitsi), Matti Lehtimäki (VTT), Lena Lillieblad (VXU, Ruotsi), Hannu Luoma (VTT), Antero Moilanen (VTT), Heikki Oravainen (VTT), Kai Pietilä (VTT), Janusz Podlinski (IMP, Puola), Martti Purtoala (Tulikivi), Marko Rasi (JYU), Raimo Salonen (KTL), Volker Schmatloch (Russfilter, Sveitsi), Olli Sippula (UKU), Michael Strand (VXU, Ruotsi), Raili Taipale (VTT), Jarkko Tissari (UKU), Håvard Vetrhus (ASA, Norja), Annele Virtanen (TTY).

Ismo Talka, Uusiutuvan energian koulutusohjelma, soveltava fysiikka

ismo.talka@gmail.com

Jyväskylässä 26.2.2006

Sisällysluettelo

Esipuhe.....	ii
1 Johdanto	8
2 Pienpoltto.....	9
3 Puun poltto ja pienpolton savukaasut.....	11
3.1 Savukaasun lämpötila ja veto	17
3.2 Häkä ja hiilivedyt.....	17
3.3 Hiukkaspäästö.....	18
3.4 Savukaasun hiukkaset	19
3.5 Lentotuhka.....	21
3.6 Noki	22
3.7 Terva.....	22
4 Päästöhiukkasten fysiikka.....	23
4.1 Reynoldsin luku.....	23
4.2 Stokesin laki.....	24
4.3 Brownin liike ja diffuusio	26
4.4 Nukleaatio	27
4.5 Tiivistyminen eli kondensaatio ja haihtuminen.....	28
4.6 Koagulaatio ja agglomeraatio	28
4.7 Depositio ja re-emissio	30
5 Hiukkaskokojakaumat.....	31
5.1 Normaalijakauma	31
5.2 Lognormaali jakauma	32
5.3 Pienpolton hiukkaskokojakaumat	33
6 Hiukkasten sähköiset ominaisuudet ja varautuminen	38
6.1 Koronapurkaus	38
6.2 Hiukkasten varautuminen	41
7 Sähkösuodin	45

8	Hiukkasten kerääminen ja kerätyn aineksen poisto.....	52
8.1	Erilaisia kerätyn hiukkasaineksen poistomahdollisuuksia.....	52
8.2	Sähkösuotimella kerättyjen hiukkasten ominaisuudet ja poistomahdollisuudet.....	53
8.3	Hiukkasten resistiivisyyden vaikutus keräystehokkuuteen.....	56
8.4	Hiukkasmassan ravistus, kvasistaattinen teoria.....	58
8.5	Laboratoriokokoluokan sähkösuotimen ravistusmittaustuloksia.....	59
9	Hiukkaskerroksen syttyminen ja paloturvallisuus.....	62
9.1	Syttyminen.....	62
9.2	Paloturvallisuus, nokipalo.....	63
9.3	Noki ja terva.....	64
9.4	Pienpolton noki- ja tuhkahiukkasten kerääntyminen savukanavaan.....	65
9.5	Savukaasun hiukkasten määrän ja koostumuksen arviointi.....	66
10	Pienpoltoon kehitettyjä sähkösuotimia.....	67
10.1	MINIature Particle ABSorber.....	67
10.2	CleanAir.....	71
11	Johtopäätökset.....	75

Symboliluettelo

a	ravistuksessa käytetty kiihtyvyys [m/s^2] (yhtälö (40))
A	sähkösuotimen keräyspinta-ala [m^2]
A_l	hiukkaskerroksen pinta-ala [m^2]
B	hiukkasen (mekaaninen) liikkuvuus [kg/s]
C_c	Cunninghamin korjauskerroin eli liukukorjaustekijä [dimensioton]
c_{in}	sähkösuotimen alussa vallitseva hiukkaskonsentraatio [mg/m^3]
c_m	mitattu konsentraatiopitoisuus kuivassa kaasussa [mg/m^3]
c_{out}	sähkösuotimen lopussa vallitseva hiukkaskonsentraatio [mg/m^3]
c_{ref}	muunnettu konsentraatiopitoisuus normaalitilassa [mg/m^3]
D	diffuusiokerroin [m^2/s]
D	sähkösuotimen keräyslevyjen välinen etäisyys [m] (yhtälö (33))
d	virtauskanavan tai hiukkasen halkaisija [m]
$d(t)$	hiukkasen halkaisija ajan t kuluttua [m]
d_0	hiukkasen alkuperäinen halkaisija ennen koagulaatiota [m]
D_B	Brownin diffuusiokerroin [m^2/s]
De	Deutschin luku [dimensioton]
δ	hiukkaskerroksen paksuus [m]
\bar{D}	hiukkasten halkaisijoiden keskiarvo [m]
D_p	hiukkasen diffusiviteetti [m^2/s]
D_t	turbulenttinen diffuusiokerroin [m^2/s]
e	alkeisvaraus ($e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
E	sähkökentän voimakkuus [V/m]
E_m	mitattu O_2 -pitoisuus
ϵ_0	tyhjiön permittiivisyys ($\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)
ϵ_r	hiukkasen sähköinen permittibiliteetti eli suhteellinen permittiivisyys [dimensioton]
E_{ref}	muunnokseen käytettävä O_2 -pitoisuus (%)
η	fluidin viskositeetti [Ns/m^2]
η_{De}	sähkösuotimen keräyshyötysuhde [dimensioton]

η_r	referenssiviskositeetti [Ns/m^2]
η_{Zhi}	Zhibinin ja Guoquanin hyötysuhde sähkösuotimelle [dimensioton]
F	kappaleeseen vaikuttava voima [N]
F_d	hiukkasen liikettä vastustava voima [N]
F_e	hiukkasen kokema voima sähkökentässä [N]
F_f	kitkavoima [N]
F_i	hitausvoima [N]
F_r	ravistusvoima [N]
g	putoamiskiihtyvyyys ($g=9,81 \text{ m/s}^2$)
H	sähkösuotimen keräyslevyn pituus (virtauksen suunnassa) [m]
I	ilman happipitoisuus, vakio (20,9 %)
J	aerosolihiukkasten vuo ($\text{kpl}/\text{m}^2\text{s}$)
j_{NE}	virrantiheys [mA/m^2]
k	Boltzmannin vakio ($k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)
K	koagulaatiokerroin [m^3/s]
K	polttoaineen kosteusprosentti (yhtälö (3))
L	sähkösuotimen keräyslevyn korkeus [m]
λ_i	ilmakerroin [dimensioton]
λ	kaasun vapaa matka [m]
m	hiukkasen massa [kg]
n	hiukkasten kiinnittyneiden varauksien kokonaislukumäärä (kpl)
n	hiukkasten konsentraatio (kpl/m^3) (yhtälö (13))
N	hiukkasten tilavuuslukumäärä (kpl/m^2)
N_0	lähtöhetken konsentraatio (kpl/m^3)
O_2	mitattu savukaasun happipitoisuus (%)
P	kaasun paine [kPa]
P	polttoaineteho [kW] (yhtälö (2))
Pe	Pecletin luku [dimensioton]
Q	savukaasun tilavuusvirta [m^3/s] (yhtälö (36))
Q	savukaasuvirta [m^3/h]
q_e	ominaispäästö [mg/MJ]

$Q_p(t)$	hiukkasen saturaatiovaraus ajassa t [C]
Q_p^∞	hiukkasen saturaatiovaraus [C]
r	etäisyys potentiaalista [m]
R	pölykerroksen murtumiseen/irtoamiseen tarvittava leikkausjännitys [N/m ²]
Re	Reynoldsin luku [dimensioton]
ρ	fluidin tiheys [kg/m ³]
ρ_l	hiukkaskerroksen tiheys [kg/m ³]
ρ_p	hiukkasen tiheys [kg/m ³]
S	Sutherlandin interpolaatiovakio [K]
σ	hiukkasten halkasijoiden keskihajonta [m]
σ	leikkausjännitys [N/m ²] (yhtälö (40))
t	aika (s)
T	kaasun lämpötila [K]
τ_Q	aikavakio [s]
T_r	referenssilämpötila [K]
U	potentiaali eli jännite [V]
V	fluidin ja tutkittavan kappaleen välinen nopeusero [m/s]
V	hiukkasen nopeus virtauksen suunnassa [m/s] (yhtälö (33))
w	hiukkasen vaellusnopeus ajanhetkellä t [m/s]
V_{TS}	hiukkasen terminaalinopeus kaasussa [m/s]
χ	hiukkasen dynaaminen muototekijä [dimensioton]

1 Johdanto

Asuintalojen lämmönlähteenä puu on merkittävä pienhiukkasten päästölähde. Pienhiukkasten on todettu aiheuttavan monia terveysvaikutuksia, jonka vuoksi pienpolton kokoluokkaan on kaavailtu päästörajoja. Suurissa polttovoimalaitoksissa pienhiukkasten poistomenetelmänä on käytetty sähkösuodinta, jolla pystytään tehokkaasti poistamaan hiukkaset savukaasuvirrasta. Sähkösuodintekniikkaa käytetään myös kotitalouksien pienissä ilmanpuhdistuslaitteissa.

Tässä tutkielmassa on selvitetty pienpolton ominaisuuksia sekä jatkuvassa että panospolttoperiaatteella toimivassa poltossa. Hiukkasten ominaisuuksia savukaasuvirrassa on kuvailtu aerosolifysiikan keinoin, joilla on selitetty savukaasun hiukkasten muuntumis- ja käyttäytymismekanismeja sekä esitetty tyypillisiä pienhiukkasten jakaumia polton eri tilanteissa.

Sähkösuotimen toimintaperiaate kuvataan tässä työssä erityisesti sen hyötysuhteen osalta. Kerätyn hiukkasaineksen osalta on tutkittu sen poistomahdollisuuksia ja nokipalon mahdollisuutta, viimeiseksi on esitelty jo pienpolttokokoluokkaan kehitettyjä sähkösuotimia.

2 Pienpoltto

Pienpoltolla tarkoitetaan pienimuotoista polttoa, jossa yleensä käytetään polttoaineena puuta, kevyttä polttoöljyä tai kotitalousjätettä. Pienpoltolla lämmitetään mm. omakoti- ja rivitaloja, ulko- ja pienrakennuksia, maataloja ja suurempia yksittäisiä rakennuksia. Polttolaitteina käytetään polttoaineesta riippuen erilaisia ratkaisuja kuten kattiloita, tulisijoja ja kiukaita. Tulisija rakennetaan lähes poikkeuksetta jokaiseen pientaloon ainakin toissijaiseksi lämmitysmuodoksi tai -lähteeksi. Arvioiden mukaan viidennes Suomen omakotitaloista lämmitetään puulla. [8]

Puun pienpoltossa vapautuva hiilidioksidi sitoutuu uuden puubiomassan kasvuun luonnon nopeassa hiilikierrossa eikä puunpoltolle tämän vuoksi lasketa hiilidioksidin päästökerrointa. Puupellettilämmitykselle on kaavailtu tukea, vaikka se on jo nyt kokonaiskustannuksissa edullisin lämmitysmuoto kotitalouksille.

Puun pienpoltossa palaminen on joko jatkuvatoimista tai poltto tapahtuu panoksittain. Kattiloissa jatkuvatoiminen poltto mahdollistaa korkean, jopa 90 %:n hyötysuhteen. Polttoaineena käytetään tyypillisesti haketta ja pellettejä. Vaikka puun pienpolton ei katsota lisäävän kasvihuoneilmiötä, tuottaa se Suomessa kolmanneksen pienhiukkasten kokonaispäästöistä, joihin luetaan kaikki alle 2,5 μm :n (PM_{2,5}) halkaisijaltaan olevat hiukkaset (Ks. 3.4 Savukaasun hiukkaset [15,16]).

Öljylämmityksen pienhiukkaspäästöt ovat pienemmät kuin puulämmityksessä [8]. Polttoaineena öljy palaa varsin puhtaasti ja jatkuvatoiminen poltto mahdollistaa hyvän polttoprosessin säädön. Tosin korkeahko polttolämpötila aiheuttaa palamisilman typen hapettumista mikä johtaa puulämmitystä korkeampiin NO_x-päästöihin. Puun poltossa palaminen on epätäydellisempää ja jakautuu useampaan osaan, jotka voidaan helposti tunnistaa panospoltossa. Öljylämmityksen korvaaminen puulämmityksellä

saattanee nostaa pienpolton pienhiukkaspäästöjen osuutta merkittävästi pienhiukkasten kokonaispäästöistä.

Suomessa tulisijoille ja pienkattiloille ei vielä ole asetettu päästövaatimuksia kuten joissakin Euroopan maissa, mutta kiinteän polttoaineen pienkattiloille on pidemmällä aikavälillä suunniteltu päästörajoja. Esimerkiksi Saksassa, missä tulisijat ovat tutkimusten mukaan merkittävä päästöjen aiheuttaja, Regensburgin kaupunki on ottanut uusille tulisijoille käyttöön 75 mg/Nm³ rajan hiukkasille (kun päästöt on redusoitu 13 % O₂:lle)¹.

Päästörajojen tutkimusta vaikeuttaa yhteisen mittausstandardin puuttuminen. Euroopassa on käytössä päästöille useita eri mittausmenetelmiä ja käytettävien mittauslaitteiden ja -tekniikoiden kirjo on laaja. Eri maissa sovellettavat standardit eivät usein ole suoraan vertailukelpoisia, sillä päästöarvoja esitetään monessa eri muodossa ja käytettävät mittaustekniikat eivät ole yhteneviä. Suomessa ei ole mitään vaatimuksia tulisijojen päästöille, eikä täällä vaadita laitteiden testausta. Ympäristöministeriö valmistelee päästörajoja tulisijoille, mutta aikataulusta ei ole tarkkaa tietoa. Keski-Euroopassa myytävät kattilat ovat rakenteeltaan suomalaisia edistyksellisempiä ja siksi vähäpäästöisempiä, mutta myös hinnaltaan huomattavasti kalliimpia (hintaa jopa viisinkertainen) [42].

¹ Ks. Luku 3: Puun poltto, pienpolton savukaasut

3 Puun poltto ja pienpolton savukaasut

Puu koostuu kuiva-aineksesta ja vedestä. Tuoreena puun painosta on vettä jopa 50-60 %. Kuiva-aineesta haihtuvien aineiden osuus on 80-90 %, kiinteää hiiltä 10-20 % ja tuhkapitoisuus 0,5 %. Kuiva-aineen alkuainekoostumuksessa 50 % on hiiltä, vetyä 6 %, happea 40 % ja typpeä 0,3 %, sekä rikkiä 0,05 %. Puun tärkeimmät rakennusosat ovat selluloosa, hemiselluloosat ja ligniini ja sen lämpöarvo on 19 MJ/kg. Puun tuhka koostuu pääosin maa-alkali- ja alkalimetalleista. Näitä alkuaineita ovat natrium (Na), kalium (K), kalsium (Ca), fosfori (P), magnesium (Fe), rikki (S), pii (Si), rauta (Fe), alumiini (Al) ja mangaani (Mn).

Puun palaminen jaetaan seuraaviin vaiheisiin: lämpeneminen, kosteuden haihtuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen. Panospoltossa nämä eri vaiheet ovat helposti tunnistettavissa, mutta jatkuvatoimisessa poltossa kaikkia vaiheita tapahtuu yhtä aikaa. Polttoaineen lämmitessä veden haihtuminen kiihtyy ja höyrystyminen saavutetaan 100°C lämpötilassa. Puun hajoaminen ja kaasuuntuminen alkaa 190 asteessa ja varsinainen pyrolyysivaihe 225-300°C lämpötilassa. Pyrolyysin aikana selluloosat hajoavat ja niistä muodostuvat keveät kaasumaiset hiilivedyt ja -monoksidit irtaantuvat puuaineksesta. Samalla muodostuu nestemäisiä tervoja. Kaasumaiset pyrolyysituotteet syttyvät ja palavat herkimmin 500-600°C lämpötilassa, mikä nähdään nopeasti etenevänä diffuusioliekinä puun pinnan lähellä. poltto-olosuhteiden salliessa palaminen kiihtyy tässä vaiheessa nopeasti, kunnes pyrolyysituotteiden muodostuminen hidastuu. Kun pyrolyysikaasujen haihtuminen on enää vähäistä, palaa lopuksi ns. jäännöshiili. Tällöin kiinteä hiili ja terva palavat hitaasti 800-1000°C lämpötilassa, sillä hapettuminen tapahtuu ainoastaan polttoaineen pinnasta ja huokosten sisältä. Keltaista diffuusioliekkiä ei tällöin enää näe kuin satunnaisesti viimeisten pyrolyysikaasujen vapautuessa.

Puun täydellinen palaminen saa teoriassa viidenneksen tarvitsemastaan hapesta polttoaineeseen sitoutuneesta hapesta. Palamisilmaa tarvitaan tilanteesta riippuen tavallisesti 1,5-2,5 -kertainen määrä teoreettiseen määrään verrattuna ja voi olla avotakoilla moninkertainen. Todellisen ja teoreettisen ilmamäärän suhdetta kutsutaan ilmakertoimeksi, joka voidaan laskea likimääräisesti yhtälöstä:

$$\lambda_i = \frac{I}{I - O_2}, \quad (1)$$

missä I on ilman happipitoisuus (20,9 %)

O_2 on mitattu savukaasun happipitoisuus (%).

Ilmakerroin vaikuttaa oleellisesti polttotapahtumaan ja yhdessä puun kosteuspitoisuuden kanssa ratkaisee suureltaosin polton savukaasujen rakenteen. Vaihtelevan yli-ilmamäärän vuoksi eri polttolaitteiden välillä on järkevää ilmoittaa savukaasujen ja hiukkaspäästöjen mittaustulokset suhteessa saatavaan polttoainetehoon, tai päästöarvot on muunnettava eli redusoitava yhdenvertaisiksi. Puun pienpoltoissa keskimääräinen savukaasuvirta voidaan laskea likimääräisesti yhtälöstä (ilmakertoimella 1,5; ideaalinen poltto, savukaasun lämpötila 200°C):

$$Q \approx 2P, \quad (2)$$

missä Q on savukaasuvirta [m³/h]

P on polttoteho [kW]

Hiukkaspäästö voidaan ilmoittaa myös yksikössä mg/MJ. Muunnos voidaan tehdä likimääräisesti seuraavan yhtälön mukaan:

$$q_e = \frac{c_m \lambda_i}{4} (1,015 - 0,0007K + 5,893 \cdot 10^{-5} K^2), \quad (3)$$

missä q_e on ominaispäästö [mg/MJ]

c_m on mitattu konsentraatiopitoisuus kuivassa kaasussa [mg/m³]

K on polttoaineen kosteusprosentti

Koska polttolaitteiden välillä ilmakerroin vaihtelee, voidaan hiukkaspäästötulokset ilmoittaa yhdenvertaisesti mitatun savukaasun happipitoisuuden mukaan. Muunnosyhtälö on muotoa:

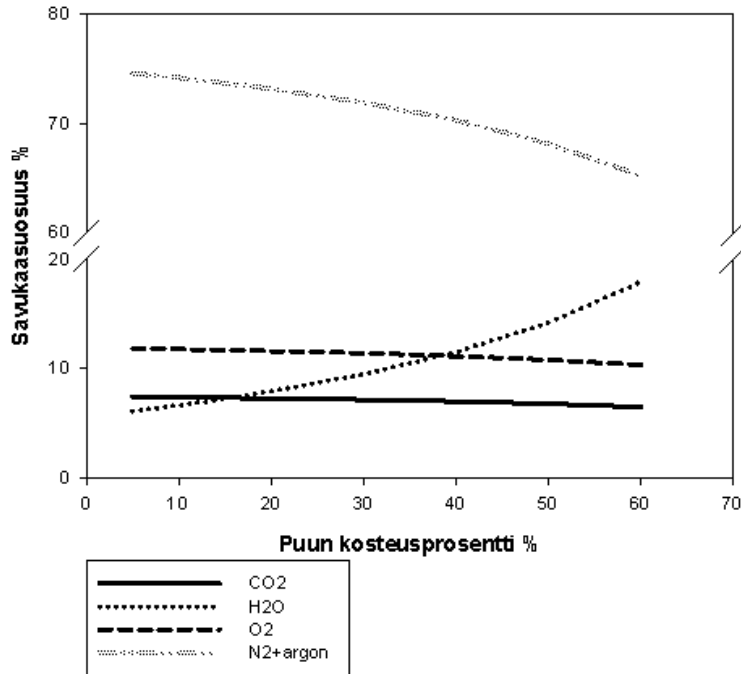
$$c_{ref} = c_m \frac{I - E_{ref}}{I - E_m}, \quad (4)$$

missä c_{ref} on muunnettu konsentraatiopitoisuus normaalitilassa [mg/m³]

c_m on mitattu konsentraatiopitoisuus normaalitilassa [mg/m³]

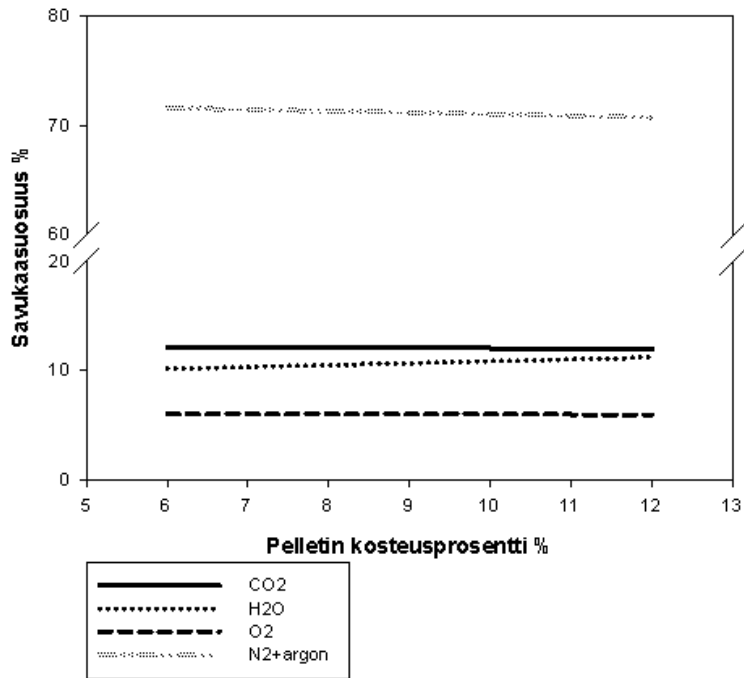
E_{ref} on muunnokseen käytettävä O_2 -pitoisuus (%)

E_m on mitattu O_2 -pitoisuus (%)

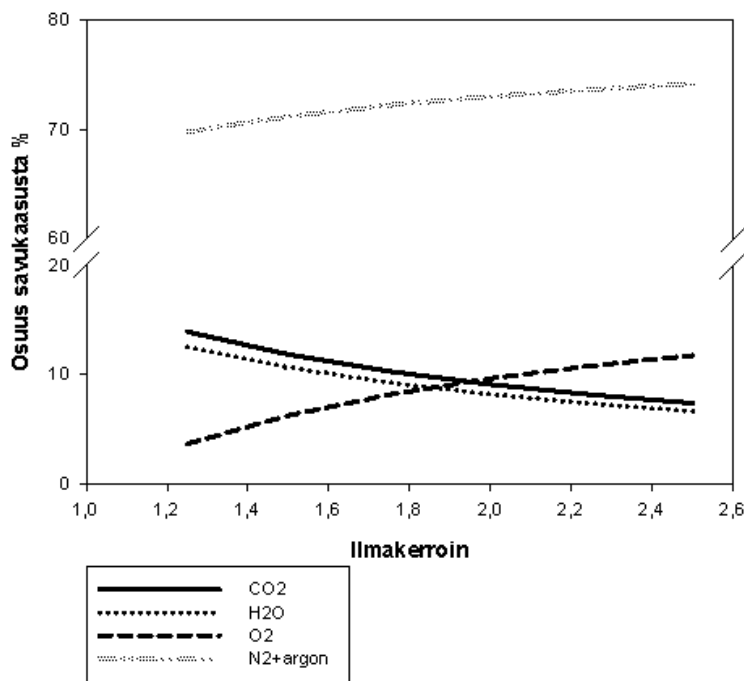


Kuva 1: Tulisijan puupolttoaineen savukaasuosuudet puun eri kosteusprosentteilla (p-%), ilmakerroin 2,5

Kuvista 1-2 nähdään polttoaineen kosteuspitoisuuden vaikutus savukaasujen pääkomponenttien osuuksiin. Pellettipoltossa tyypillinen ilmakerroin on 1,5 ja tulisijoilla vastaavasti 2,5. Siksi tulisijapolton savukaasun happipitoisuus on kaksikertainen pellettipolttoon nähden polttoaineen kosteuspitoisuudesta riippumatta. Ilmakertoimen vaikutus pellettipoltossa savukaasun pääkomponenttien osuuksiin näkyy kuvasta 3.



Kuva 2: Pellettipolton savukaasuosuudet eri kosteusprosentteilla (p-%), ilmakerroin 1,47

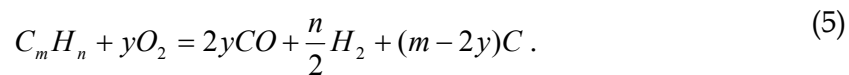


Kuva 3: Pellettipolton savukaasukomponenttien osuudet kosteuspitoisuudella 10 %

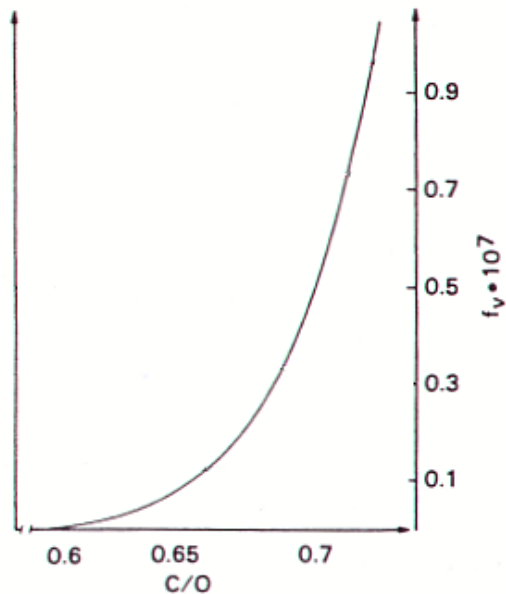
Ilmakerrointa kasvattamalla savukaasun happipitoisuus ja typpipitoisuus kasvavat, jolloin yhä suurempi määrä lämmitettyä ilmaa karkaa savupiipusta. Tästä seuraa polttohyötysuhteen pieneneminen. Mahdollisimman suureen lämmityshyötysuhteeseen pyrittäessä on minimoitava savukaasun termien lämpöhäviö, savukaasun palamattomien aineiden osuus sekä tulipesään jäävien tuhkien palamattomien osuus.

Tulisijojen hyötysuhdelaskennassa joudutaan käyttämään ns. *epäsuoraa menetelmää*, jossa laskenta tehdään standardin EN 13240 mukaan. Epäsuorassa menetelmässä täydestä 100 %:n hyötysuhteesta vähennetään yllämainitut häviöt. Polttoprosesseissa ilmakerroin saattaa muuttua paljonkin polton aikana, polttoaineen laatu voi muuttua, sekä lukuiset muut tekijät vaikuttavat polton hyötysuhteeseen. Usein joudutaankin laskennassa käyttämään keskiarvoja ja pieniä oletuksia. Esimerkiksi tuhkien palamattoman hiilen osuus arvioidaan standardissa 0,5 %:n häviöksi eikä siinä oteta huomioon suoraan palamisessa savukaasujen mukana kulkeutuvan hiukkasmassan tuottamaa häviötä [39].

Polton hyötysuhteen parantamiseksi polton yli-ilmamäärää vähennetään, jolloin yleensä ilmakertoimen arvolla 1,5 palamisprosessissa osa polttoaineesta jää palamatta. Lisäksi tällöin osa hiilestä ei suoraan hapetu hiilidioksidiksi ja hään muodostuminen vahvistuu. Lisäksi palamisprosessissa aina syntyvän noen määrä alkaa kasvaa eksponentiaalisesti. Noen syntymistä voidaan kuvata yhtälöllä [49]:



Yhtälöstä (5) nähdään, että kun m on suurempi kuin $2y$, niin nokea syntyy. Kuva 4 nähdään noen savukaasun tilavuusosuuden kasvu hiili-happi suhteen muuttuessa. C/O-suhde voidaan tulkita ilmakertoimen käänteisluvuksi, jolloin esim. ilmakerroin 1,5 vastaa C/O-suhdetta 0,67. Kuvasta nähdään, että noen tilavuusosuus kasvaa rajusti, kun C/O-suhde kasvaa yli 0,67:n eli kun ilmakerroin on alle 1,5.



Kuva 4: C/O -suhteen vaikutus noen tilavuusosuuteen savukaasussa [49]

3.1 Savukaasun lämpötila ja veto

Savukaasujen lämpötilat pienpoltossa vaihtelevat käytettävän polttolaitteen mukaan siten, että kattiloilla lämpötila ovat 120–190°C, varaavilla tulisijoilla 210°C ja kiukailla 350°C. Savukaasujen lämpötila kohoaa nopeasti panospolttolaitteilla syttymisen jälkeen ja useamman panoksen jälkeen hetkellinen savukaasulämpötila voi olla esimerkiksi kiukailla 900°C. Pellettikattiloiden savukaasulämpötilat ovat 135°C ja öljykattiloilla 165°C. Savukaasun alipaine on kattiloilla 18–45 kPa ja takoilla 12 kPa. [42]

3.2 Häkä ja hiilivedyt

Häkäpäästöt lisääntyvät epätäydellisen palamisen aikana, jolloin hiili ei hapetu suoraan hiilidioksidiksi. Panospoltossa häkäpäästöjä syntyy eniten syttymis- ja hiillosvaiheessa. Hiilivetypäästöt ovat suuret pyrolyysin aikana erityisesti kun ne vapautuessaan puuaineksesta eivät ehdi palaa ja kulkeutuvat

savukaasuvirtaan. Hiilivedyt tiivistyvät tuhka- ja nokihiukkasten pinnoille. Keskimääräiset hiilivety päästöt jatkuvasyöttösillä polttolaitteilla ovat 1-20 mg/MJ, mutta panspolttolaitteilla huomattavasti korkeammat (130 mg/MJ), kuten kiukailla keskimäärin 600 mg/MJ. [42]

3.3 Hiukkaspäästö

Puun polttamisesta syntyy aina hiukkasia, jotka kulkeutuvat savukaasuvirran mukana ilmaan. Teollisuuden suurissa polttovoimaloissa savukaasujen hiukkaspitoisuuksille on asetettu päästörajoja. Päästörajat alittavissa laitoksissa käytetään savukaasujen puhdistukseen tyypillisesti sykloneja, multisykloneja ja sähkösuotimia, joilla pystytään kokonaishiukkasmäärät savukaasussa pudottamaan alle 5 %:iin [40]. Laitoskoon pienentyessä päästörajat kevenevät eikä alle 1 MW:n laitoksille ole Suomessa säädetty päästörajaa.

Pienpolttokokoluokassa hiukkaspäästöjä ei ole rajoitettu. Pienhiukkasten on todettu lisäävän välitöntä kuolleisuutta ja sairastuvuutta. Hiukkaspitoisuuksien on havaittu olevan yhteydessä sydän- ja verisuonitautiin sekä hengitystietauteihin. Maailman terveysjärjestö (WHO) on arvioinut, että halkaisijaltaan alle 2,5 mikrometrin (μm) pienhiukkaset (PM_{2,5}) lyhentävät keskimääräistä elinikää Euroopassa 1-2 vuotta. Erityisen herkkiä pienhiukkaspäästöille ovat lapset ja vanhukset, sekä jo hengitystiesairauksia sairastavat kuten astmaatit [8].

Pienhiukkasten toksisuutta on tutkittu Sveitsissä vertailemalla liikenteen diesel-pienhiukkasten ja jatkuvatoimisen puunpolttolaitteen pienhiukkasten eroja. Diesel-pienhiukkasten toksisuus osoittautui merkittävästi voimakkaammaksi kuin jatkuvatoimisen puunpolton pienhiukkasilla samoilla hiukkaskonsentraatioilla. Kokeet ovat jatkuneet pienpolttolaitteiden osalta, joissa pienhiukkasien tiedetään sisältävän enemmän hiiltä kuin täydellisemmän jatkuvatoimisen polton yhteydessä, ja tuloksia on luvassa vuonna 2006 [19].

Tavallista suurempia pienhiukkaspitoisuuksia sisältävä ulkoilma pääsee helposti hiukkaspitoisuuden muuttumatta sisätiloihin, jolloin altistuminen pienhiukkasille on välitön. Kotitalouksiin on kehitetty ilmapuhdistuslaitteita,

joista kehittyneimmät mallit toimivat samalla periaatteella kuin teollisuuden sähkösuotimet. EU:n säädöksiensä myötä, sekä jo kehitteillä olevien pienpolton päästörajojen takia, pienpolton hiukkaspäästöjä tullaan Suomessa rajoittamaan. Polttolaitteiden rakennetta monimutkaistamalla keskieuropallaiseen suuntaan saavutetaan tuntuva hiukkaspäästöjen aleneminen, mutta samalla polttolaitteiden hinta voi moninkertaistua. Pienpolton savukaasuja voidaan vähentää myös teollisuudesta ja kotitalouksista tutulla tavalla eli sähkösuotimella. Sähkösuotimen kehitys pienpoltoon on haaste, jossa on otettava huomioon monia tekijöitä.

3.4 Savukaasun hiukkaset

Savukaasun hiukkasia voi muodostua varsinaisen polttotapahtuman lisäksi savukaasuvirrassa ja ilmakehässä. Polton hiukkaset koostuvat lentotuhkasta, noesta ja tervayhdisteistä. Puunpolton hiukkaspäästöt ovat suurimmat vanhoilla tulisijoilla ja kattiloilla. Hiukkasten muodostumiseen vaikuttavista tekijöistä tärkeimmät ovat polton lämpötila, polttoaineen laatu (polttoaine ja sen kosteus) ja polton hiukkasten viipymä ja sekoittuminen palamistilassa.

Jatkuvassa poltossa keskimääräiset hiukkasmassapäästöt ovat 10-50 mg/MJ, hyvässä panospoltossa 50 mg/MJ, mutta keskimäärin noin 100 mg/MJ. Hiukkaspäästö voi alimmillaan olla muutamia mg/MJ, ja hetkellisesti jopa huonoissa palamisolosuhteissa 1000 mg/MJ [42]. Panospolton eri palamisvaiheissa syntyvät hiukkaspäästöt ovat suurimmillaan syttymisvaiheessa (Taulukko 1).

Taulukko 1: Erään panosperustaisen polttilanteen hiukkaslukumääräpitoisuudet eri palamisvaiheissa [7]

Polttovaihe	Hiukkaspäästö (kuiva kaasu)	Hiukkasten lukumääräpitoisuus (kpl/cm ³)
Syttymisvaihe	126 mg/ Nm ³	3,5·10 ⁹
Palamisvaihe	36 mg/ Nm ³	1,65·10 ⁷
Hiillos	4,6 mg/ Nm ³	2,04·10 ⁷

Puun orgaanisten aineiden selluloosan ja ligniinin pyrolyysituotteet sisältävät monia haitallisia aineita: aldehydeja, fenoleja, PAH-yhdisteitä ja kresoleja vaikka itse selluloosa ja ligniini ovat myrkyttömiä [8]. Noki sisältää useita PAH-yhdisteitä kuten hyvin karsinogeenista ja mutageenista bentsopyreeniä. Jos polttoaine sisältää klooria kuten jätepoltossa (PVC-muovi) tai jätteillä sytyttäessä voi polttamisessa syntyä kloorivetyä (HCl) ja hyvin haitallisia furaaneja (PCDF) ja dioksiineja (PCDD). Monet polttoaineeseen sitoutuneet raskasmetallit höyrystyvät poltossa ja lämpötilan laskiessa rikastuvat tiivistymällä lentotuhkan pienhiukkasiin [1].

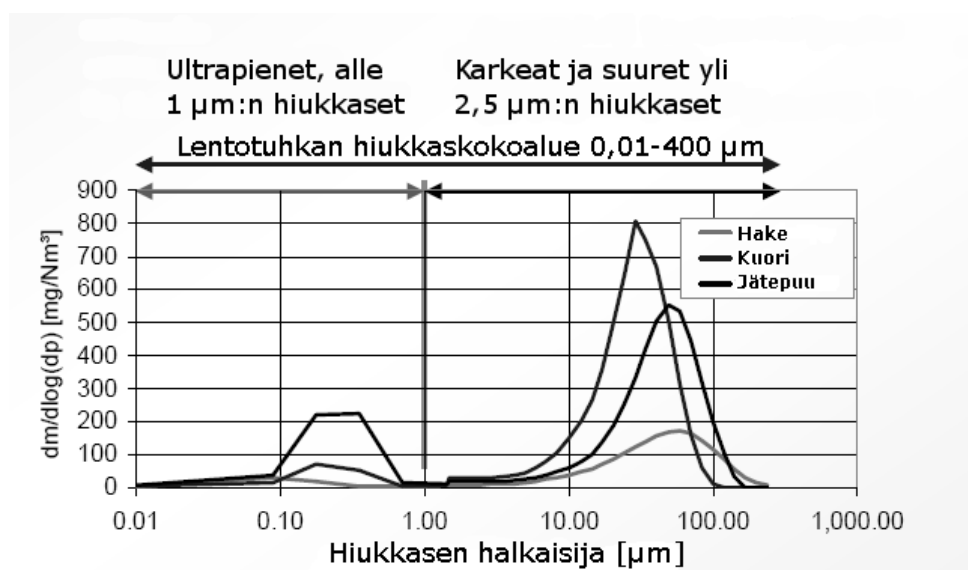
Erikokoisten pienhiukkasten viipymä ulkoilmassa riippuu vahvasti hiukkasen koosta (Taulukko 2), esimerkiksi halkaisijaltaan 2,5 µm:n pienhiukkanen voi kulkeutua yli 2000 km [34]. Alle 10 µm:n hiukkaset kulkeutuvat hengitysteihin, joista kaikkein pienimmät pääsevät verenkiertoon asti. Päästölähteistä ulkoilmaan tulevat hiukkaset voivat jäädä suuriksi pitoisuuksiksi, mikäli ulkoilmassa esiintyy voimakasta lämpötilan kerrostuneisuutta, jota edelleen vahvistaa ilmamassan huono sekoittuvuus vähätuulisissa olosuhteissa.

Taulukko 2: Hiukkasten kuvauksia koon mukaan

Termi: -Hiukkaset	Lyhenne	Kuvaus
Ultrapienet	PM ₁	Halkaisija alle 1 µm
Hienot	PM _{2,5}	Halkaisija alle 2.5 µm
Karkeat		Halkaisija välillä 2.5 ja 10 µm
Hengitysteihin kulkeutuvat	PM ₁₀	Halkaisija alle 10 µm
Suuret	>PM ₁₀	Halkaisija yli 10 µm

3.5 Lentotuhka

Puu sisältää epäorgaanisia aineita, joista polttoprosessissa jää tuhkaa. Tuhkahiukkasista suurimmat jäävät polttotilaan mutta pienimmät kulkeutuvat savukaasuvirtauksen mukana savukanavaan ja tätä hiukkaspäästöosuutta kutsutaan lentotuhkaksi. Osa savukaasukanavaan kulkeutuvista lentotuhkahiukkasista tarttuu kanavan pinnoille. Hyvissä palamisolosuhteissa hiukkaspäästö koostuu lähes kokonaan lentotuhkasta. Puun polton hiukkasten kokojakaumat ovat tyypillisesti kaksihuippuisia, joissa on erotettavissa ultrapienien hiukkasten ja tätä suurempien hiukkasten moodit. Kuvassa 5 on esitelty lentotuhkan hiukkaskokoalueella puun polton hiukkaskokojakaumia. Ultrapienet hiukkaset ovat halkaisijaltaan alle 1 μm ja karkeat hiukkaset tätä suurempia (yli 2,5 μm), joista suurimmat ovat 250 μm . Esimerkiksi ihmisen hiuksen paksuus on 80 μm . Puun poltossa hiukkaskonsentraatio on polttotavasta ja -laitteesta riippuen 100-1000 mg/Nm^3 , modernilla puupellettipolttolaitteella (300 kW) voidaan saavuttaa hiukkaspäästötaso 50 mg/Nm^3 [39,42].



Kuva 5: Tyypillisiä puun polton hiukkaskokojakaumia [24, suom.]

3.6 *Noki*

Noki koostuu alkuaine hiilestä ja syntyy kemiallisten reaktioiden sarjasta, joista osa on palautumattomia. Noen muodostumismekanismi on mutkikas eikä sitä tunneta täysin. Noen muodostuminen riippuu hiilivetyjen fysiikasta ja kemiasta liekkialueella, jossa hapetusolosuhteet vaihtelevat jatkuvasti. Liekeissä on aina vähähappisia alueita, joista nokea syntyy. Hiilivetyketjut katkeilevat, törmäyksissä yhtyvät ja osasta niistä syntyy rengasrakenteisia polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH). Tyypilliset ketjumaiset nokihiukkaset koostuvat 20-50 nm:n alkuainehiilihiukkasista. Tästä nokihiukkaset kasvavat edelleen koagulaation kautta. Nokihiukkasten lukumäärä vähentää riittävä viipymäaika hapekkaassa palotilassa, jossa hiukkaset ehtivät palaa [37].

3.7 *Terva*

Puun poltolle ominainen piirre on tervan syntyminen. Terva on erittäin monimutkainen sekoitus yhdisteitä, joita voi olla yli 200 erilaista. Tervaa sanotaan myös raskaiksi tiivistyneiksi hiilivedyiksi. Tervan muodostuminen liittyy polton kyttemisvaiheeseen, jossa puu hiiltyy. Pyrolyysikaasujen haihtuessa puusta ja palaessa puun pinta hiiltyy ja hiiltyvä kerros toimii pyrolyysikaasuja salpaavana kerroksena. Vaikka kerros on huokoinen, se saattaa estää hapen diffuusiota syvemmälle puun sisään. Hiililymisalueella tapahtuva hapettuminen vähentää oleellisesti puun sisälle pääsevä happea, ja voimakas puun pinta-alueen lämpötila rikkoo puun pintaa. Tervaa syntyy puun sisällä, jossa lämpötila on paljon pienempi kuin pinnalla. Tervakaasu pääsee rikkoontuneen hiiltyneen pinnan välistä kuumalle alueelle, jossa sen kemialliset reaktiot tapahtuvat. Polttoaineen kosteuspitoisuus vaikuttaa palamislämpötilaan ja oleellisesti tervan syntymiseen [49].

4 Päästöhiukkasten fysiikka

Polton savukaasuvirtaan siirtyvät hiukkaset ja savukaasuvirrassa syntyvät hiukkaset ovat tyypillisesti kooltaan 0,02-250 μm . Savukaasuhiukkasten lukumäärä pienpoltossa on 10^{12} - 10^{14} kpl/MJ [42]. Vastaavasti savukaasun kaasumolekyylien koko on 0,1-6 nm ja lukumäärä luokkaa 10^{24} kpl/MJ. Savukaasun fysiikka muuttuu kaasun molekyylitasolta karkean hiukkasten kokoluokkaan paljon ja hiukkasten liikkeeseen vaikuttaa merkittävästi kaasumolekyylin liike.

Kiinteiden tai nestemäisten hiukkasten ja kaasun seosta sanotaan aerosoliksi. Savukaasun hiukkasten tärkein fysikaalinen ominaisuus laskennan kannalta on hiukkasen halkaisija. Hiukkaset ovat muodoltaan hyvin erilaisia, jolloin joissakin laskennallisissa tilanteissa käytetään joko Stokes'n halkaisijaa tai aerodynaamista halkaisijaa.

4.1 Reynoldsin luku

Oleellinen aerosolin aerodynaamisiin ominaisuuksiin liittyvä dimensioton suure on Reynoldsin luku. Reynoldsin luvulla voidaan saada tietoa virtauksen luonteesta eli onko itse virtaus kanavassa tai virtaus hiukkasen ympärillä laminaarista vai turbulentista. Reynoldsin luku määritellään fluidiin vaikuttavien voimien suhteena [10]:

$$\text{Re} = \frac{F_i}{F_f} = \frac{\rho V d}{\eta}, \quad (6)$$

missä F_i on hitausvoima [N]

F_f on kitkavoima [N]

ρ on fluidin tiheys [kg/m^3]

V on fluidin ja tutkittavan kappaleen välinen nopeusero [m/s]

d on virtauskanavan tai hiukkasen halkasija [m]

η on fluidin viskositeetti [Ns/m²]

Viskositeetti ei käytännössä riipu paineesta eli savukanavassa vallitseva alipaine ei juuri vaikuta savukaasun viskositeettiin. Hiukkasen Reynoldsin lukua laskettaessa V on hiukkasen suhteellinen nopeus kaasunvirtaukseen nähden. Puun polton yhteydessä savukaasuhiukkasille laskettu Reynoldsin luku on $Re \ll 1$ ja savukaasun virtaus on savukanavassa tyypillisesti turbulენტista ($Re > 2500$). Savukaasun viskositeetti saadaan yhtälöstä [46]:

$$\eta = \eta_r \left(\frac{T_r + S}{T + S} \right) \left(\frac{T}{T_r} \right)^{3/2}, \quad (7)$$

missä η_r on referenssiviskositeetti ($\eta_r = 182,03 \mu\text{P}$, kun $T_r = 293,15 \text{ K}$)

[Ns/m²]

T_r on referenssilämpötila [K]

S on Sutherlandin interpolaatiovakio ($S = 110,4 \text{ K}$, kun $T = [80-2000] \text{ K}$) [K]

T on kaasun lämpötila [K]

4.2 Stokesin laki

Stokes'n laki on virtausdynamikasta tutun epälineaarisen osittaisdifferentiaaleja sisältävän Navier-Stokes'n lain ratkaisu, jossa oletetaan inertiaalisten voimien olevan merkityksettömiä verrattuna viskoottisiin voimiin, toisinsanoen kun Reynoldsin luku on hyvin pieni. Tällöin lisäksi oletetaan, että fluidi on kokoonpuristomatonta, hiukkasen liike on kaukana seinämästä, liike on tasaista, kappale on muodoltaan pallo ja että fluidin liike hiukkasen pinnalla on nolla. Tällöin voidaan arvioida hiukkasen liikettä vastustavaa voimaa Cunninghamin korjauskertoimen avulla seuraavasti [10]:

$$F_D = \frac{3\pi\eta Vd}{C_c}, \quad (8)$$

missä C_c on liukukorjaustekijä eli Cunninghamin korjauskerroin

C_c liukukorjaustekijä ottaa huomioon hiukkasen koon ja vallitsevan kaasun ominaisuudet. Koska Stokes'n laissa oletetaan, että kaasun nopeus hiukkasen pinnalla on nolla, ei tämä toteudu riittävän pienillä hiukkasilla, jotka lähestyvät kooltaan kaasun vapaata matkaa. Liukukorjaustekijä on seuraavaa muotoa [10]:

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d} \left[2,514 + 0,8 \exp\left(-0,55 \frac{d}{\lambda}\right) \right], \quad (9)$$

missä λ on kaasun vapaa matka [m]

Kaasun vapaa matka (matka, jonka jälkeen suunta on muuttunut 90° alkuperäisestä) voidaan laskea yhtälöstä [46]:

$$\lambda = \lambda_r \left(\frac{101,3}{P} \right) \left(\frac{T}{293,15} \right) \left(\frac{1 + 110,4 / 293,15}{1 + 110,4 / T} \right), \quad (10)$$

missä λ_r on kaasun vapaa matka ($\lambda_r = 0,0665 \mu\text{m}$, kun $T = 20^\circ\text{C}$ ja $P = 101,3 \text{ kPa}$) [m]

P on kaasun paine [kPa]

Hiukkasen liike kaasussa on aina suhteessa kaasumolekyylien keskimääräiseen nopeuteen ja pienillä hiukkasilla liikettä vastustava Stokes'n liikevastusvoima on merkittävä voima, kun hiukkaselle laskettu Reynoldsin luku on alle < 1 . Kun varautumaton hiukkanen kaasussa kokee ainoastaan gravitaatiovoiman, voidaan hiukkasen terminaalinopeutta kaasussa kuvata yhtälöllä [10]:

$$V_{TS} = \frac{\rho_p d^2 g C_c}{18\eta}, \quad (11)$$

missä ρ_p on hiukkasen tiheys [kg/m³]

g on putoamiskiihtyvyyys ($g=9,81$ m/s²)

Terminaalinopeuden yhtälöstä voidaan laskea, että mikäli polttolaitteilla savukaasun nopeus on 1 m/s, yli 170 µm:n pallomaiset hiukkaset eivät tämän virtauksen mukana enää pysty liikkumaan. Hiukkasen liikettä vastustavaa voimaa (drag force) voidaan edelleen korjata muoto-tekijällä [10]:

$$F_D = 3\pi\eta V d \chi, \quad (12)$$

missä χ on hiukkasen dynaaminen muototekijä [dimensioton]

Muototekijät erimuotoisille hiukkasille vaihtelevat pallon arvosta 1 tekijään 2 asti, esimerkiksi talkkipölyhiukkaselle $\chi = 2,04$

4.3 *Brownin liike ja diffuusio*

Ilmalle (20 °C, 1 atm) kaasun vapaa matka on $\lambda = 0,0665$ µm. Pienimmät hiukkaset, joiden koko on alle 0,01 µm ovat ns. vapaassa molekyylialueessa, jossa ne törmäilevät satunnaisesti ja törmäykset muuttavat hiukkasen liikesuuntaa ja nopeutta paljon. Kun $d \gg \lambda$, hiukkaset ovat jatkumoalueella, jossa ne kokevat samalla hetkellä monia kaasumolekyylien törmäyksiä useasta eri suunnasta, eikä hiukkasen nopeus tai suuntaa muutu niin paljon kuin pienemmillä hiukkasilla. Hiukkaset, jotka ovat kaasun vapaan matkan kokoisia, ovat transitioalueella.

Brownin liike on aerosolihiukkasen epäsäännöllistä kieturtelevaa liikettä kaasussa, jonka aiheuttaa vaihtelevista suunnista hiukkaseen törmäilevät kaasumolekyylit. Diffuusio on näiden aerosolihiukkasten kokonaissiirtymistä konsentraatiogradientin suuntaan. Hiukkaset siirtyvät aina korkeammasta konsentraatiosta kohti matalampaa konsentraatiota. Fick'n laki diffuusiolle on [10]:

$$J = -D \frac{dn}{dx}, \quad (13)$$

missä D on diffuusiokerroin [m^2/s]
 n on hiukkasten konsentraatio (kpl/m^3)

Diffuusiokerroin voidaan johtaa seuraavaan muotoon, joka on Stoke-Einsteinin yhtälö aerosolihiukkasen diffuusiokerroimelle [10]:

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\eta d} = kBT, \quad (14)$$

missä k on Boltzmannin vakio ($k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)
 B on hiukkasen (mekaaninen) liikkuvuus [kg/s]

Yhtälöstä (14) nähdään välittömästi, että diffuusio on suoraan verrannollinen lämpötilaan ja kääntäen verrannollinen hiukkasen kokoon. Ts. diffuusio liikuttaa pienempiä hiukkasia paremmin kuin suurempia kohti matalampaa konsentraatioaluetta.

4.4 Nukleaatio

Nukleaatio on ilmakehässä tärkein pienhiukkasten luonnollinen muodostumismekanismi. Pienpolton savukanavassa nukleatiota voi tapahtua joko homogeenisesti tai heterogeenisesti. Homogeenisessa nukleaatiossa muodostuu uusia aerosolihiukkasia suoraan kaasufaasista kun taas

heterogeenisessä nukleaatiossa muodostuminen tapahtuu tiivistymällä ytimen kuten ionin ympärille. Nukleaatio lisää hiukkasten lukumääräpitoisuutta, mutta pienentää hiukkaskokojakauman keskimääräistä kokoa [3].

4.5 Tiivistyminen eli kondensaatio ja haihtuminen

Savukaasun aerosolihiukkaset ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa ympäröivän kaasufaasin kanssa ja kokevat jatkuvasti molekyylien törmäyksiä. Osa molekyyleistä saattaa irrottaa aerosolista molekyyliä (haihtuminen) tai vastaavasti lisätä hiukkasen molekyyliä (tiivistyminen). Tiivistymisen ja haihtumisen voimakkuuteen vaikuttavat kemialliset reaktiot aineessa sekä kaasufaasissa ja nk. Kelvinin ilmiö [3]. Pienpoltossa savukanavan pyrolyysissä vapautuneet kaasumaiset, raskaat hiilivedyt tiivistyvät savukanavassa hiukkasten pinnoille. Tiivistyminen ei muuta hiukkasten lukumääräpitoisuutta, mutta kasvattaa hiukkasten kokoa.

4.6 Koagulaatio ja agglomeraatio

Koagulaatio on hiukkasten törmäämisestä johtuvaa hiukkasten tarttumista toisiinsa. Koagulaatiossa törmänneet vielä nestemäisessä tai tervamaisessa olomuodossa olevat hiukkaset muodostavat yhtenäisen uuden hiukkasen. Agglomeraatio on kiinteiden hiukkasten törmäyksistä aiheutuvaa hiukkasten kiinnittymistä toisiinsa, jossa törmänneet hiukkaset säilyttävät alkuperäisen muotonsa, mutta muodostavat agglomeraatteja eli pallomaisia ryppäitä tai ketjumaisia rakenteita. Tekstin jatkossa koagulaatiosta ja agglomeraatiosta käytetään yhteisnimitystä koagulaatio [50].

Koagulaatiota tapahtuu pääasiassa termisesti eli Brownin liikkeen aiheuttaman diffuusion johdosta. Koagulaatiota voi tapahtua myös kinemaattisesti, jolloin esimerkiksi erinopeuksilla liikkuvat hiukkaset voivat savukaasuvirrassa turbulentissa virtauksessa törmätä toisiinsa. Turbulenttinen koagulaatio on merkityksetöntä 1 μm :n tai sitä pienemmillä hiukkasilla, mutta on tärkeä mekanismi kun hiukkasten koko on yli 10 μm . Hiukkasten

koagulaation voimakkuus riippuu mm. hiukkasten pitoisuudesta, törmäävien hiukkasten koosta ja ympäröivän kaasun ominaisuuksista. Brownin liikkeestä eli ns. termisestä koagulaatiosta aiheutuvaa hiukkaspitoisuuden eli konsentraation pienentymistä (monodispersiivisillä eli samankokoisilla hiukkasilla) aikayksikössä voidaan kuvata yhtälöllä [10]:

$$\frac{dN}{dt} = -KN^2, \quad (15)$$

missä $K = 4\pi dD$ on koagulaatiokerroin [m^3/s]
 N on hiukkasten tilavuuslukumäärä (kpl/m^3)

Kun törmäävät hiukkaset ovat erikokoisia, voidaan K saada yhtälöstä [10]:

$$K_{1,2} = \pi(d_1 + d_2)(D_1 + D_2). \quad (16)$$

Hiukkasten konsentraatio ajanhetkellä t saadaan yhtälöstä [10]:

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 K t}, \quad (17)$$

missä N_0 on lähtöhetken konsentraatio (kpl/m^3)

Monodispersiivisten hiukkasten törmäyksestä johtuva hiukkaskoon kasvu saadaan yhtälöstä [10]:

$$d(t) = d_0(1 + N_0 K t)^{1/3}, \quad (18)$$

missä $d(t)$ on hiukkasen halkaisija ajan t kuluttua [m]
 d_0 on hiukkasen alkuperäinen halkaisija ennen koagulaatiota [m]

Termistä koagulaatiota voidaan arvioida myös hiukkaskokojakauman ominaisuuksien perusteella. Esimerkiksi pellettipoltossa tyypillinen lukumääräpitoisuuden huippu vastaan hiukkasten halkaisijaa välillä 0,03-0,3 μm , savukaasun lämpötila on 400 K ja hiukkasten lukumääräpitoisuus $6 \cdot 10^{11}$ kpl/ m^3 , jolloin terminen koagulaatio on hallitseva koagulaatiomekanismi. Koagulaatiokerroin vaihtelee törmäävien hiukkasten koosta riippuen silloin välillä $1 \cdot 10^{-14}$ – $6 \cdot 10^{-16}$. Hiukkasten nopeus savukaasuvirrassa on 1 m/s, jolloin viipymäaika savukanavassa lasketaan olevan 3-10 sekuntia. Tässä ajassa termisestä koagulaatiosta johtuva hiukkaslukumääräpitoisuus voi teoreettisesti muuttua korkeintaan muutamia prosentteja, jolloin keskimääräinen hiukkaskoko savukaasussa ei kasva juurikaan.

4.7 Depositio ja re-emissio

Depositio tarkoittaa aerosolihiukkasten poistumaa kaasusta pinnoille. Depositiota pinnoille tapahtuu mm. Brownin liikkeen aiheuttaman diffuusion, turbulenttisen diffuusion ja termisen diffuusion kautta. Depositiota tapahtuu mm. impaktiossa, jossa ilmavirtausta seuraava hiukkanen törmää pintaa vastaan tai varattu hiukkanen törmää sähkökentän ajamana pintaan. Mikäli kaasussa ei ole hiukkasen terminaalinopeutta kumoamia virtauksia, voi depositiota tapahtua myös gravitaation avulla. Termisessä diffuusiossa kaasun ja törmäyspinnan välinen lämpötilaero aiheuttaa kaasumolekyylien liikkeen kääntymistä lämpötilagradientin suuntaan ja voi riittävän suuren lämpötilaeron vuoksi olla voimakkaampaa kuin Brownin liikkeestä johtuva diffuusio [10].

Re-emissio tarkoittaa jo depositeidien hiukkasten irtoamista takaisin kaasuun. Re-emissiota eli uudelleentempautumista tapahtuu tyypillisesti kun pintaan kohdistetaan riittävän voimakas ilmavirtaus. Hiukkasia pintaan sitova adheesiovoima on suoraan verrannollinen hiukkasen halkaisijaan, mutta hiukkasen ilmavirran aiheuttama voima puolestaan hiukkasen halkaisijan neliöön. Siksi pienimpien hiukkasten re-emissio pinnoilta ilmavirtauksen avulla on huomattavasti epätodennäköisempää kuin suurien hiukkasten [10].

5 Hiukkaskokojakaumat

Hiukkaskoko pienpoltossa vaihtelee muutaman kertaluokan verran ja halkaisijaltaan erikokoisia hiukkasia on lukumääräpitoisuudeltaan vaihtelevasti. Koska hiukkaskoot ja lukumäärät vaihtelevat savukanavassa polttotilanteen mukaan, on näitä ominaisuuksia järkevää kuvata eri tilanteissa jakaumien avulla. Hiukkaslukumäärät pienpoltossa ovat suuret ja tästä syystä tilastollinen laskenta kokojakaumien avulla luontevaa. Hiukkasten ominaisuuksista kiinnostavin on hiukkasen halkaisija, jota kuvataan riippumattomana muuttujana ja tilanteesta riippuen riippuvana muuttujana käytetään mm. lukumääräpitoisuutta vai frekvenssiä. Kokojakaumakuvaajista käytetään histogrammia, jossa x-akseli on paloitetu tasavälein ja näille hiukkasen kokoväleille kuuluvia hiukkasmääriä kuvataan y-akselin avulla, jolloin pylvään korkeus ilmoittaa kyseiselle hiukkaskokovälille kuuluvan hiukkaslukumäärän tai osuuden.

5.1 Normaalijakauma

Tilastollisessa analyysissä tyypillinen jakauma on normaalijakauma. Luonnossa varsin moni satunnaistapahtuma noudattaa tarkasti normaalijakaumaa. Matemaattisesti on todistettavissa, että mikäli on olemassa äärellinen joukko satunnaisia, riippumattomia muuttujia ja niille on olemassa keskiarvo ja varianssi, niin nämä muuttujat noudattavat normaalijakaumaa. Riippumattomuuden toteutumista voidaan testata autokorrelaatiokertoimella. Normaalijakauma on symmetrinen jakauma ja sen funktio on muotoa [39]:

$$df = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(d-\bar{D})^2}{2\sigma^2}\right] dd, \quad (19)$$

missä d on hiukkasen halkaisija [m]

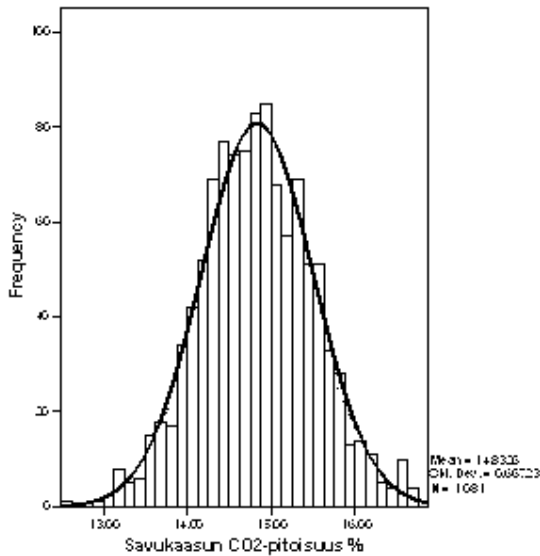
σ on hiukkasten halkaisijoiden keskihajonta [m]

\bar{D} on hiukkasten keskihalkaisija [m],

jossa hiukkasten halkaisijoiden keskihajonta on [39]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{D})^2}, \quad (20)$$

missä N on hiukkasten kokonaismäärä (kpl)



Kuva 6: Savukaasun hiilidioksidipitoisuus jatkuvatoimisessa polttolaitteessa noudattaa normaalijakaumaa [39].

5.2 Lognormaali jakauma

Vaikka polttoprosessissa vapautuva hiukkaskokojakauma noudattaisikin normaalijakaumaa, ei myöhemmässä vaiheessa mitattava hiukkaskokojakauma enää välttämättä noudatakaan sitä. Savukaasun hiukkaspitoisessa kaasussa tapahtuvat fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt saattanevat ratkaisevasti muuntaa hiukkaskokojakauman muotoa. Aerosolihiukkasten kokojakaumien analyyseissa jakaumat noudattavat tarkemmin nk. lognormaalia jakaumaa, jonka teoreettista noudattamista aerosolimaailmassa ei voida johtaa. Lognormaalin jakauman funktio on muotoa [10]:

$$df = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp\left[-\frac{(\ln d - \ln d_g)^2}{2(\ln \sigma_g)^2}\right] d(\ln d), \quad (21)$$

jossa geometrinen keskihajonta on [10]:

$$\ln d_g = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \ln d_i}{N}. \quad (22)$$

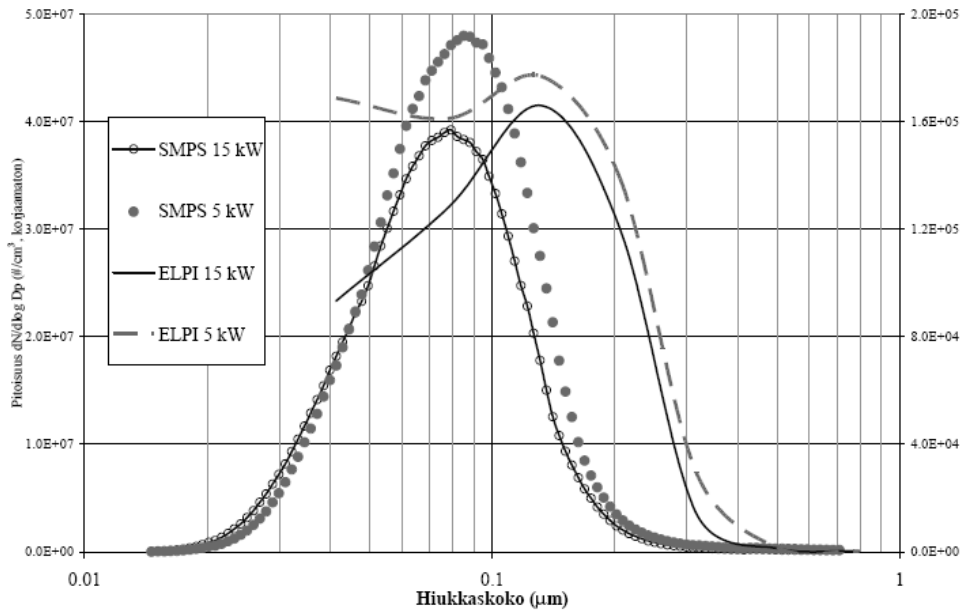
5.3 Pienpolton hiukkaskokojakaumat

Vasta julkaistussa *Puun polton pienhiukkaspäästöt* loppuraportissa [42] julkaistiin pienhiukkasten kokojakaumia erilaisilla polttolaitteilla ja polton eri vaiheilta. Hiukkaskokojakaumamittaukset ovat haasteellisia mittauksia, sillä käytettävät mittalaitteet on kalibroitava oikein ja savukaasun näytteenotto ja laimennus on tehtävä tarkasti, jotta saadaan mittalaitteelle mahdollisimman hyvä ja muuttumaton otos savukaasusta.

Kokojakaumien mittaamiseen käytettiin sähköistä alipaineimpaktoria (ELPI) ja skannaavaa liikkuvuuskokoanalyysointia (SMPS). SMPS mittaa hiukkasen sähköistä liikkuvuuskokoa ja aerodynaamista kokoa. Tutkimuksessa havaittiin, että hiukkaskokojakaumatulokset muuttuivat samoilla laitteilla eri asetuksilla ja mittausalustoilla (ELPI) paljon, hiukkasten lukumääräpitoisuuden osalta jopa 30 %. Lisäksi SMPS:n antama hiukkaskoko oli 30 % pienempi kuin ELPI:n, mikä osaksi selittyy laitteiden mittauseriaatteesta [42].

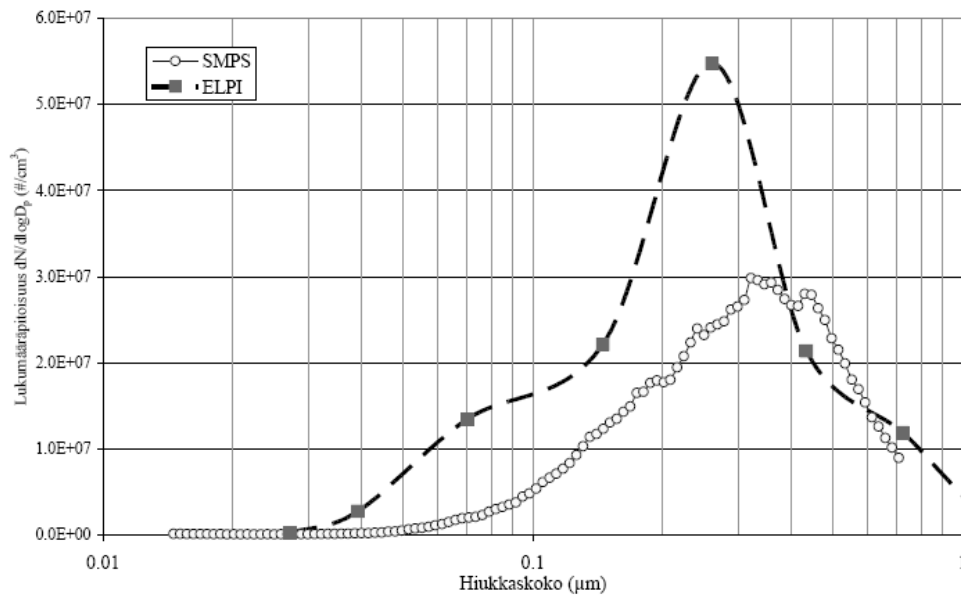
Näiden mittalaitteiden hiukkaskokoja ei voida yhtenäistää, mikäli ei tiedetä eri kokoluokkien hiukkasten tiheyksiä, mikä on melko mahdoton tehtävä. Kuvissa 7-9 jotkut pitoisuudet ovat laimennuskorjattuja, toiset eivät, ja y-akselien pitoisuusarvoihin pitää suhtautua varauksella yllä mainituista syistä, eikä varsinaisiin lukuarvoihin kannata kiinnittää huomiota. Hiukkaskokojakaumien lukumääräpitoisuuden huippu puupoltossa

normaaliolosuhteissa vastasi hiukkasen halkaisijaa 0,1 μm , mikä vastaa kaasumolekyylien vapaata matkaa 400 K:n savukaasulämpötilassa.



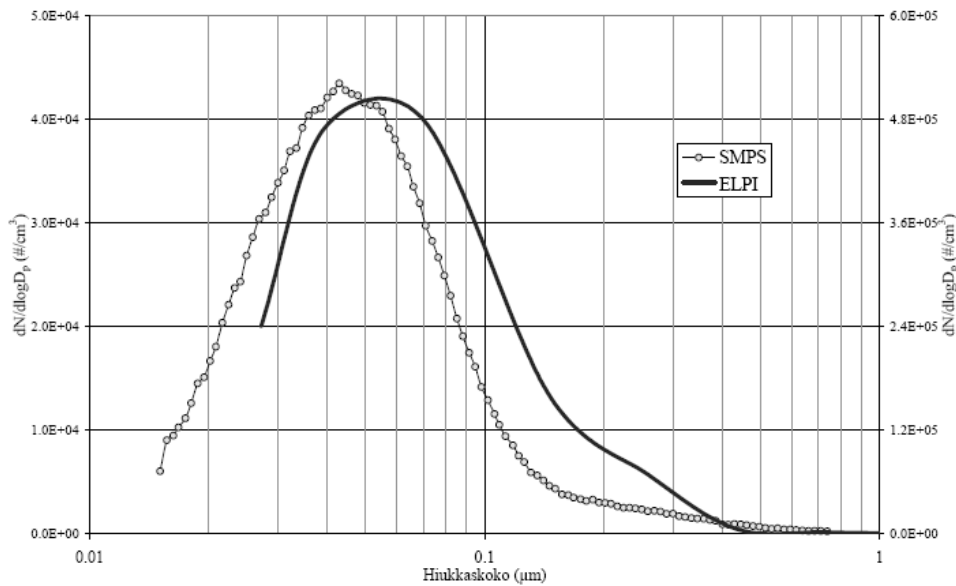
Kuva 7: Puupellettipolton pienhiukkaskokojakauma nimellis- ja osateholla [42]

Pienhiukkasjakauman huippu huonoissa palamisolosuhteissa on siirtynyt 0,3 μm :n kohdalle (Kuva 8). Kitupoltossa täydelliseen palamiseen tarvittava happi ei riitä, josta seuraa häkä- ja hiilivetypäästöjen voimakas kasvu. Palaminen tapahtuu epätäydellisesti ja palotilan lämpötila on alhaisempi kuin normaalissa polttotapahtumassa.



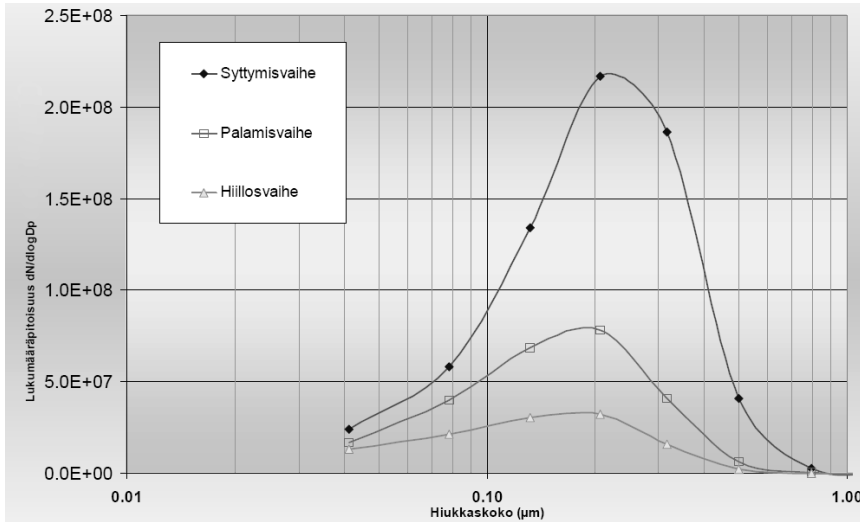
Kuva 8: Yläalokattilassa koivupilkeen kitupolton keskimääräinen pienhiukkaskokojakauma [42]

Panospolton loppuvaiheessa pyrolyysikaasuja ei juurikaan enää muodostu ja palotilassa lämpötila hiilloksen lähellä on korkea. Pienhiukkaskokojakauman huippu on 0,05 μm :n kohdalla (Kuva 9).



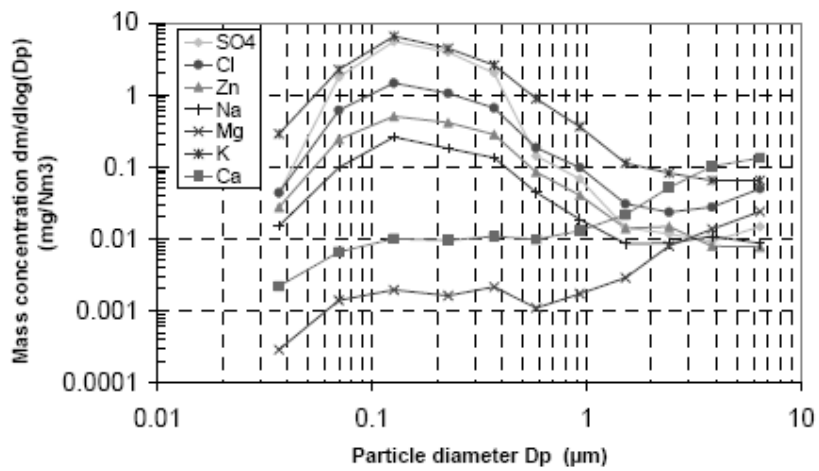
Kuva 9: Kiukaan koivupilkepolton hiillosvaiheen pienhiukkaskokojakauma [42]

Panospoltoissa syttymisvaiheessa hiukkaspäästöt ovat korkeimmillaan ja vähitellen polton edetessä laskevat jatkuvatoimisten laitteiden tasolle (Kuva 10). Lukumääräpitoisuus syttymisvaiheessa on pari kertaluokkaa korkeampi kuin muissa vaiheissa, jolloin koko lämmitysajanjaksolta lukumääräpitoisuus on lähes syttymisvaiheen tasoa ja kokonaishiukkaspäästö on tuntuvasti korkeampi kuin jatkuvatoimissa polttolaitteilla.

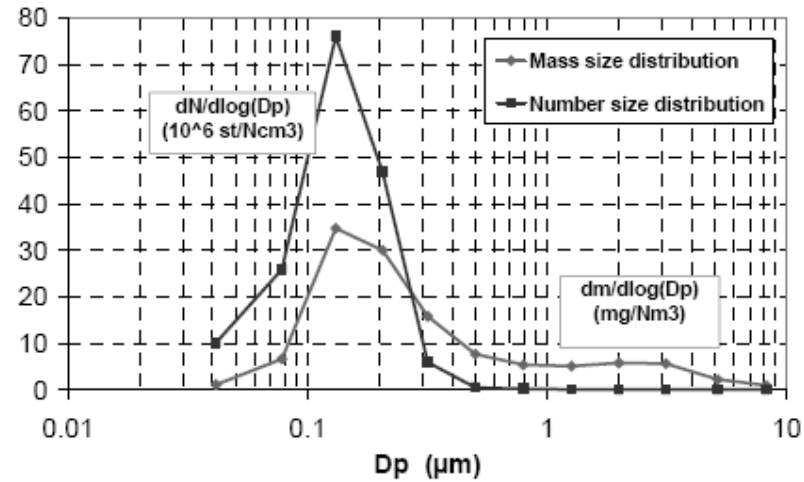


Kuva 10: Panospolton eri palamisvaiheiden pienhiukkaspäästöt [32]

Eri alkuaineet esiintyvät erikokoisissa pienhiukkasilla hieman vaihtelevasti (Kuva 11). Vaikka pienhiukkasista suurimpia hiukkasia onkin lukumääräisesti vähän yksikkötilavuutta kohden, on näiden suurimpien hiukkasten massallinen osuus kohtalaisen suuri vastaavassa tilavuudessa (Kuva 12).



Kuva 11: Pienhiukkasten alkuainemassaosuudet erikokoisilla hiukkasilla pellettipoltossa [51]



Kuva 12: Pellettipolton pienhiukkasten tyypillinen massa- ja lukumääräpitoisuusjakauma [51]

6 Hiukkasten sähköiset ominaisuudet ja varautuminen

Hiukkasten liikettä savukaasukanavassa hallitsee Stokes'n vastusvoima, joka pienhiukkasten kokoluokassa savukaasun 1 m/s virtausnopeudella on huomattavasti vahvempi voima kuin hiukkasiin kohdistuva gravitaatiovoima. Jotta hiukkaset saataisiin kerättyä savukaasuvirrasta, on niihin vaikuttavan voiman oltava riittävän suuri. Hiukkaset voidaan savukaasussa varata sähköisesti, jolloin kuhunkin hiukkaseen voidaan vaikuttaa sähkökentän avulla. Varatun hiukkasen sähkökentässä kokema voima, on sähkökentän voimakkuuden ja hiukkasen kokonaisvarauksen tulo:

$$F_E = neE, \quad (23)$$

missä n on hiukkaseen kiinnittyneiden varauksien kokonaislukumäärä (kpl)
 e on alkeisvaraus ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C)
 E on sähkökentän voimakkuus [V/m]

6.1 Koronapurkaus

Hiukkasia voidaan varata ns. korona-purkauksen avulla. Varaajaelektrodina voi toimia mm. neula tai ohut lanka, jolle tuodaan korkea positiivinen tai negatiivinen potentiaali. Varaajaelektrodin ympärillä riittävän vahva, epähomogeeninen sähkökenttä aiheuttaa ilman muodostumisen johteeksi, missä tapahtuu kaasun molekyylien ionisaatio, jolloin kaasun atomeista irtoaa elektroneja. Epähomogeeninen sähkökenttä elektrodin ympärillä rajoittaa sähkökentän voimakkuuden vahvaksi vain pienellä alueella jolloin nopeaa virranjohtumista eli elektronien liikettä vastakkaiseen potentiaalisiin eli

läpilyöntiä ei tapahdu. Samalla voimakas sähkökenttä kiihdyttää syntyneet positiiviset ja negatiiviset ionit kohti vastakkaismerkkistä potentiaalia.

Ionisaatiossa atomista irtoava elektroni voi yhä edelleen ionisoida muita kaasun atomeja. Jatkuvassa sähkökentän ylläpidossa tällä ionisaatioalueella (korona-alue) sähkökentän eri suuntiin liikkuvat positiiviset ja negatiiviset ionit törmäävät kaasun muihin neutraaleihin molekyyliin ja hiukkasiin. Ionisaatioalueen törmäyksessä neutraalit kaasunmolekyylit ionisoituvat edelleen jolloin syntyy varaajaelektrodin potentiaalin merkistä riippuen joko positiivisten tai negatiivisten ionien joukkovaellus kohti vastakkaismerkkistä potentiaalia.

Samanmerkkiset varaukset eivät törmäile keskenään sähkökentän alueella, jolloin tasainen, sankka ionipilvi jatkaa liikettään aina ionisaatioalueen ulkopuolelle jossa yksittäiset ionit edelleen varaavat kaasun neutraaleja molekyyliä. Ionien joukkovaellus aiheuttaa kaasun ilmavirran kääntymistä kohti ionien vastakkaista potentiaalia. Tätä varattujen ja varaamattomien molekyylien liikettä kutsutaan ionituuleksi.

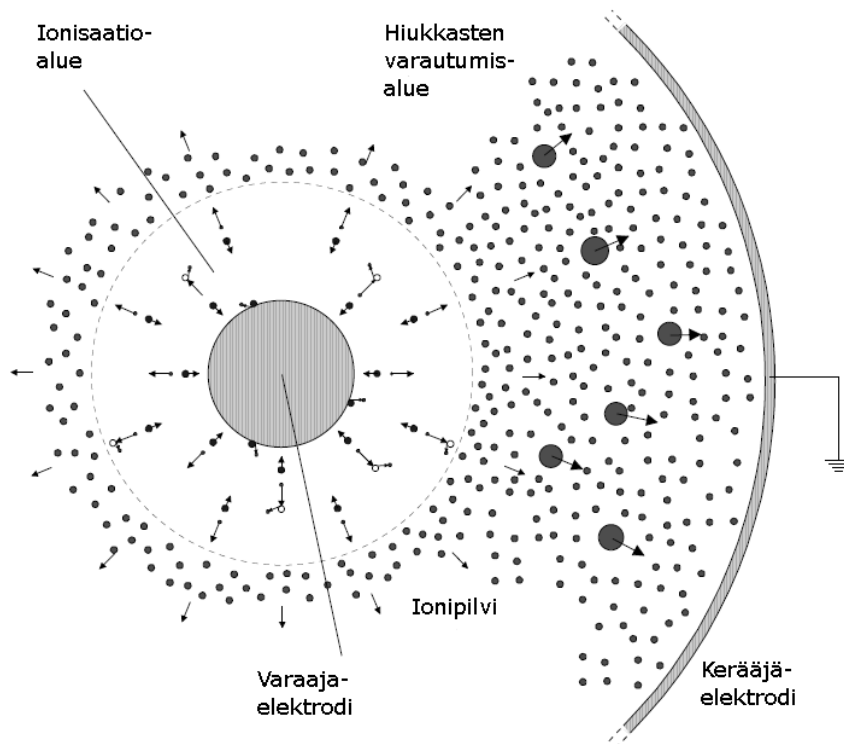
Ionien liike ja niiden kantama varaus muuttaa ja vahvistaa paikallista sähkökenttää ionisaatioalueen ulkopuolella huomattavasti. Neutraalikaasun, positiivisten ionien ja elektronien seosta kutsutaan plasmaksi. Sankan joukkovaelluksen ionihiukkasten törmäykset neutraalin kaasun molekyylien kanssa virittävät kaasun molekyyliä, joiden viritystilojen purkautuessa emittoituu ilmeisesti typpimolekyyleistä violetin tai sinisen valon väriä, joka nähdään revontulimaisena pilvenä.

Vahvaa koronapurkausta tavoiteltaessa sähkökenttää kasvatetaan kunnes kahden eri potentiaalissa olevan kappaleen välissä oleva väliaine muuttuu johtavaksi ja tapahtuu läpilyönti, eli samanlainen sähköpurkaus kuten salamassa. Varaajaelektrodin varaus voi olla joko positiivinen tai negatiivinen. Positiivisen varaajaelektrodin ionisaatioalueelta kaasun atomeista irtaantuneet elektronit törmäävät varaajaelektrodiin ja positiiviset ionit jatkavat kohti negatiivista sähkökentän potentiaalia. Positiivisten ionien liikkuvuus on

negatiivisia ioneja heikompi ja sähkökentän läpilyönti tapahtuu vastaavasti korkeimmilla jännitteillä aikaisemmin kuin negatiivisella varaajaelektrodilla.

Vahvat epäsäännölliset koronapurkaukset tuottavat otsonia. Positiivisella varaajaelektrodilla tapahtuu tasaisempi koronapurkaus, kun taas negatiivisella varaajaelektrodilla purkaukset ovat yleensä äkkinäisiä ja satunnaisesti tapahtuvia. Positiivinen koronapurkaus tuottaa huomattavasti vähemmän otsonia kuin negatiivinen koronapurkaus.

Koronapurkauksesta syntyy eniten hapen ioneja, sillä vety-, typpi- ja argonkaasut eivät ionisoidu. Koronapurkausalueen kaasun lämpötila vaikuttaa ionien liikkuvuuteen, kaasun vapaaseen matkaan ja kaasun läpilyöntiherkkyyteen, jolloin kaasun lämpötilan noustessa läpilyöntitodennäköisyys kasvaa. Korkeissa kaasun lämpötiloissa positiivinen korona saattaa tuottaa tasaisemman koronapurkauksen ilman läpilyöntejä kuin negatiivinen korona.



Kuva 13: Koronapurkaus sähkösuotimessa [20, suom.]

6.2 Hiukkasten varautuminen

Erikokoiset hiukkaset kykenevät vastaanottamaan vain rajallisen määrän varausta. Hiukkasten materiaali ratkaisee hiukkasen sähköisen permiabiliteetin eli suhteellisen permittiivisyyden. Ionisaatioalueelta sähkökentän avulla syöksyvät ionit törmäävät kaasun hiukkasiin, jotka lopulta saavuttavat *saturaatiovarauksensa*, jonka jälkeen hiukkanen ei voi enää vastaanottaa varauksia. Hiukkasen saavuttamaa varausta sähkökentässä voidaan kuvata yhtälöllä (kenttävarautuminen) [20]:

$$s_0 = \frac{3\pi\epsilon_0}{e} \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} d^2 E, \quad (24)$$

missä ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m)
 ϵ_r on hiukkasen sähköinen permiabiliteetti eli suhteellinen permittiivisyys [dimesioton]

Yhtälöstä nähdään, että hiukkasten varautuminen heikkenee hiukkasen koon pienetessä ja sähkökentän heiketessä.

Kun hiukkasten koko on alle $0,3 \mu\text{m}$, hiukkasten koko lähestyy vallitsevan kaasun vapaata matkaa ja hiukkaset kokevat ionien törmäyksiä joka suunnasta. Brownin liikkeen aiheuttama ionien diffuusio nopeuttaa pienten hiukkasten varautumista. Ionien diffuusiota voimistaa kaasun virtaukset, erityisesti jos kaasu virtaa turbulentlyisesti.

Hiukkasen saturaatiovarausta voidaan kuvata yhtälöllä [26]:

$$Q_p^\infty = \left[(1 + 2\lambda/d)^2 + \left(\frac{2}{1 + 2\lambda/d} \right) \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right] \pi\epsilon_0 d^2 E. \quad (25)$$

Tämä Cochet:n yhtälö arvioi hiukkasten saavuttaman saturaatiovarauksen kokoalueella $0,2\text{-}0,8 \mu\text{m}$ hieman todellista tilannetta heikommaksi.

Hiukkasten saturaatiovarauksen saavuttaminen on riippumatonta hiukkasen koosta, mikäli sähkökenttä on homogeeninen. Hiukkasen saturaatiovarautumista ajassa t voidaan kuvata yhtälöllä [26]:

$$Q_p(t) = Q_p^\infty \frac{t}{t + \tau_Q}, \quad (26)$$

missä τ_Q aikavakio on muotoa [26]:

$$\tau_Q \approx \frac{4\epsilon_0}{j_{NE} / E}, \quad (27)$$

missä j_{NE} on virrantiheys [mA/m²]

Newtonin toisen lain mukaan kappaleeseen vaikuttavien resultanttivoimien summa on kappaleen massan ja kiihtyvyyden tulo:

$$\sum F = ma. \quad (28)$$

Mikäli sähkökenttä on kohtisuorassa gravitaatiokenttään nähden, hiukkaseen kohdistuu yksinkertaisimmillaan ainoastaan kaksi voimaa, jotka ovat Stokes'n vastusvoima ja sähköinen vetovoima [26]:

$$\frac{dw}{dt} + \underbrace{\frac{3\pi\eta d}{mC_C}}_A w = \underbrace{\frac{Q_p}{m}}_B E, \quad (29)$$

missä w on hiukkasen vaellusnopeus ajanhetkellä t [m/s]

m on hiukkasen massa [kg]

Hiukkasen koagulaatiosta (terminen ja kinemaattinen) aiheutuva massan kasvu voidaan olettaa olevan hyvin pientä varsinkin lyhyessä ajassa, jolloin yhtälön

massan kasvu on ajasta riippumatonta. Yhtälön termi B on selvästi ajan suhteen muuttuva termi, jossa hiukkanen lähestyy saturaatiovaraustaan yhtälön (26) mukaan. Lisäksi termi B on sähkökentän hallitsema funktio, sillä saturaatiovaraus on suoraan verrannollinen sähkökenttään. Yhtälö (29) on ensimmäistä kertalukua oleva differentiaaliyhtälö ja sen ratkaisu on muotoa (olettamalla kaksi oikeanpuoleista termiä ajasta riippumattomiksi):

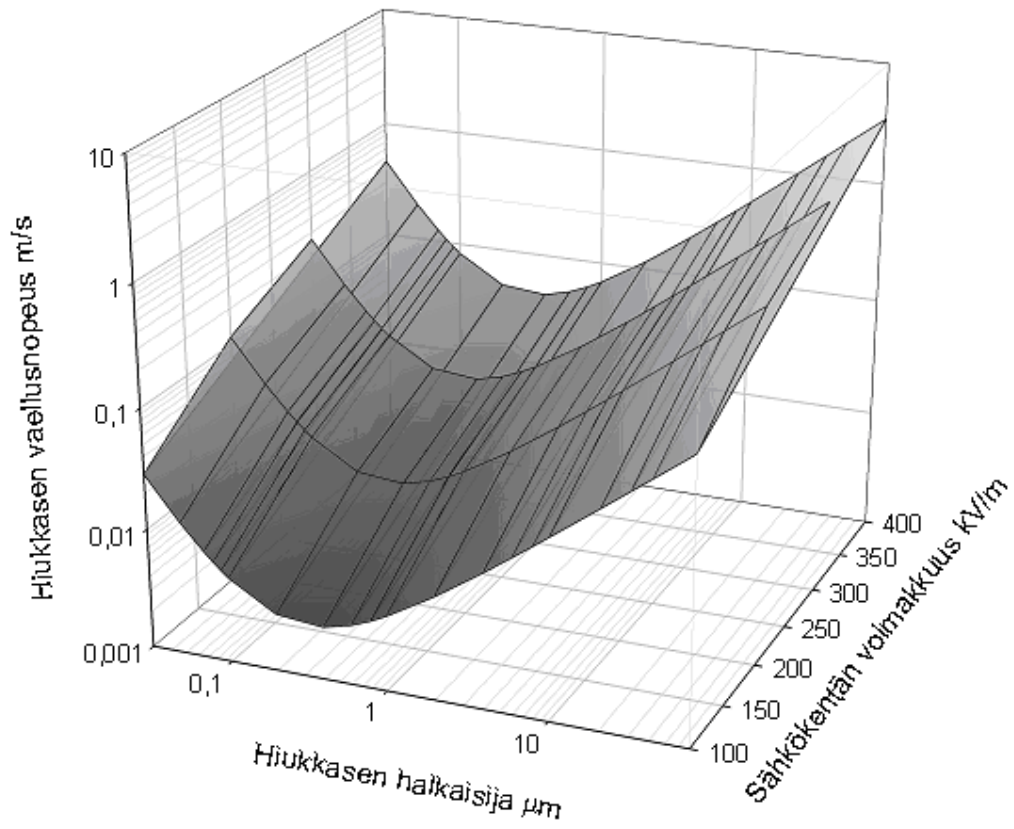
$$w(t) = Ce^{-At} + e^{-At} \int_0^t e^{A(t')} B(t') dt' \quad (30)$$

$$= -\frac{Q_p^\infty EC_C}{3\pi d \eta} e^{-\frac{3\pi d \eta}{mC_C} t} + \frac{C_C Q_p^\infty E}{3\pi d \eta}.$$

Yhtälön vasen puoli on käytännössä merkityksetön kaikilla t , jolloin hiukkasen vaellusnopeus homogeenisessa sähkökentässä on muotoa [26]:

$$w(t) = \frac{Q_p^\infty E}{3\pi d \eta} C_C. \quad (31)$$

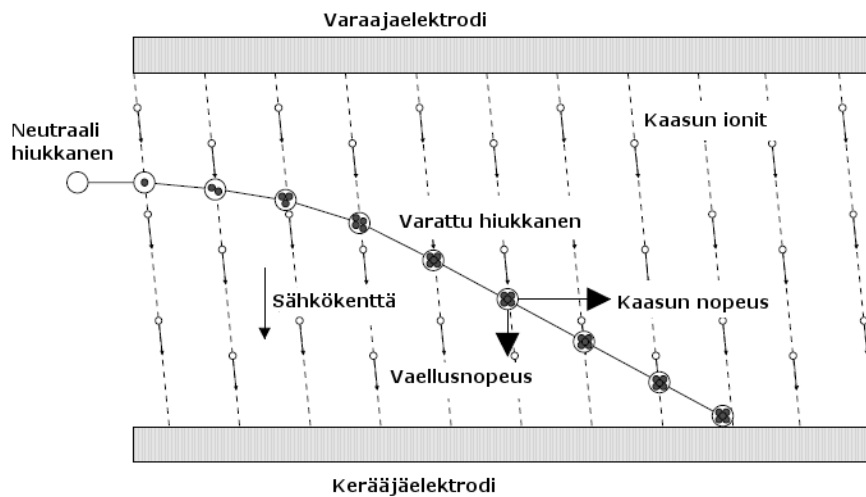
Hiukkasen vaellusnopeus sähkökentässä on vahvasti hiukkasen koosta riippuvaa, sillä Cunninghamin korjaustekijä riippuu myös hiukkasen koosta. Hiukkasen vaellusnopeus sähkökentässä riippuu myös erityisesti sähkökentän voimakkuudesta, joka puolestaan sovelluksissa on epähomogeeninen ja hiukkasen paikasta riippuva funktio. Eli hiukkasen liike heikentyvässä sähkökentässä hidastuu selvästi sähkökentän heiketessä, koska hiukkasen liikettä vastustaa hiukkasen nopeudesta riippuva Stokes'n vastusvoima.



Kuva 14: Hiukkasten vaellusnopeudet sähkökentän funktiona, $T=423\text{ K}$, $\epsilon_r=10$, $V=1\text{ m/s}$

7 Sähkösuodin

Sähkösuodin on laite, jolla tuotetaan hallitusti hiukkasten varaus ja jossa sähkökentällä kerätään varatut hiukkaset keräinpinoille. Sähkösuotimen jatkuvan ja tehokkaan toimimisen mahdollistaa oikein toteutettu kerätyn hiukkaskerroksen poisto keräyspinoilta.



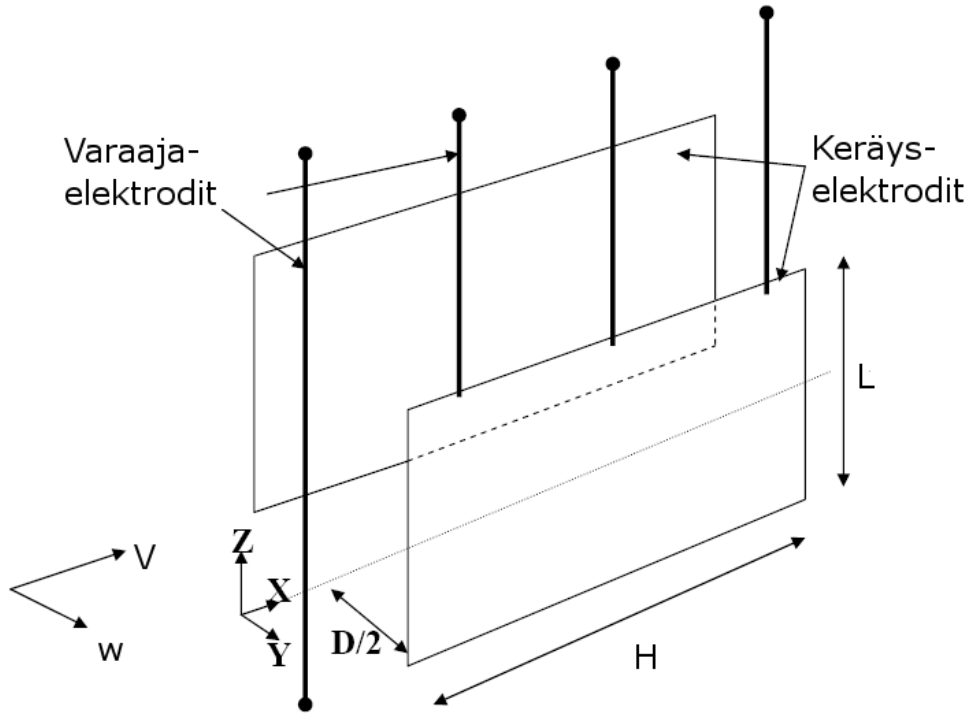
Kuva 15: Varatun hiukkasen liike sähkösuotimessa [20, suom.]

Sähkösuotimen keräystehokkuutta voidaan arvioida tarkastelemalla hiukkaskonsentraation vähennystä ennen ja jälkeen sähkösuotimen, jolloin voidaan määrittellä sähkösuotimen keräyshyötysuhde:

$$\eta_{De} = \frac{c_{in} - c_{out}}{c_{out}} = 1 - \frac{c_{out}}{c_{in}}, \quad (32)$$

missä c_{in} on ennen sähkösuodinta vallitseva hiukkaskonsentraatio
[mg/m³]

c_{out} on sähkösuotimen jälkeen vallitseva hiukkaskonsentraatio
[mg/m³]



Kuva 16: Sähkösuodin [40, suom.]

Konsentraation muutosta voidaan arvioida suotimen keräämän hiukkasmäärä avulla olettamalla hiukkaskonsentraation olevan yz-tasossa (Kuva 16) tasaisesti jakautunutta. Kuvan 16 mittojen avulla saadaan yhtälö, jossa hiukkasmassan vähennys matkalla dx on yhtäsuuri kuin keräyspinnalle jäänyt massa (oletetaan, että kerättyä massaa ei irtoa takaisin):

$$VDL \underbrace{(-c(x+dx) + c(x))}_{-dc(x)} = \frac{1}{2} \underbrace{(c(x+dx) + c(x))}_{\approx c(x), \text{ kun } dx \rightarrow 0} 2dxLw \quad (33)$$

$$\frac{1}{2}VD \frac{dc(x)}{dx} = -wc(x)$$

Yhtälöä (33) integroimalla ja olettamalla hiukkasen liike x-suunnassa (nopeus V) tasaiseksi ja hiukkasen vaellusnopeus (w) x-suunnasta riippumattomaksi saadaan keräimen matkalla H ulostulevan ja sisäänmenevän hiukkaskonsentraation suhteen riippuvuus:

$$\int_{c_{in}}^{c_{out}} \frac{dc}{c} = -\int_0^H \frac{2w}{VD} dx \quad (34)$$

$$\frac{c_{out}}{c_{in}} = e^{-\frac{2wH}{VD}}$$

Yhdistämällä yhtälöt (34) ja (32) saadaan Deutschin yhtälö:

$$\eta_{De} = 1 - e^{-\frac{2wH}{VD}} \quad (35)$$

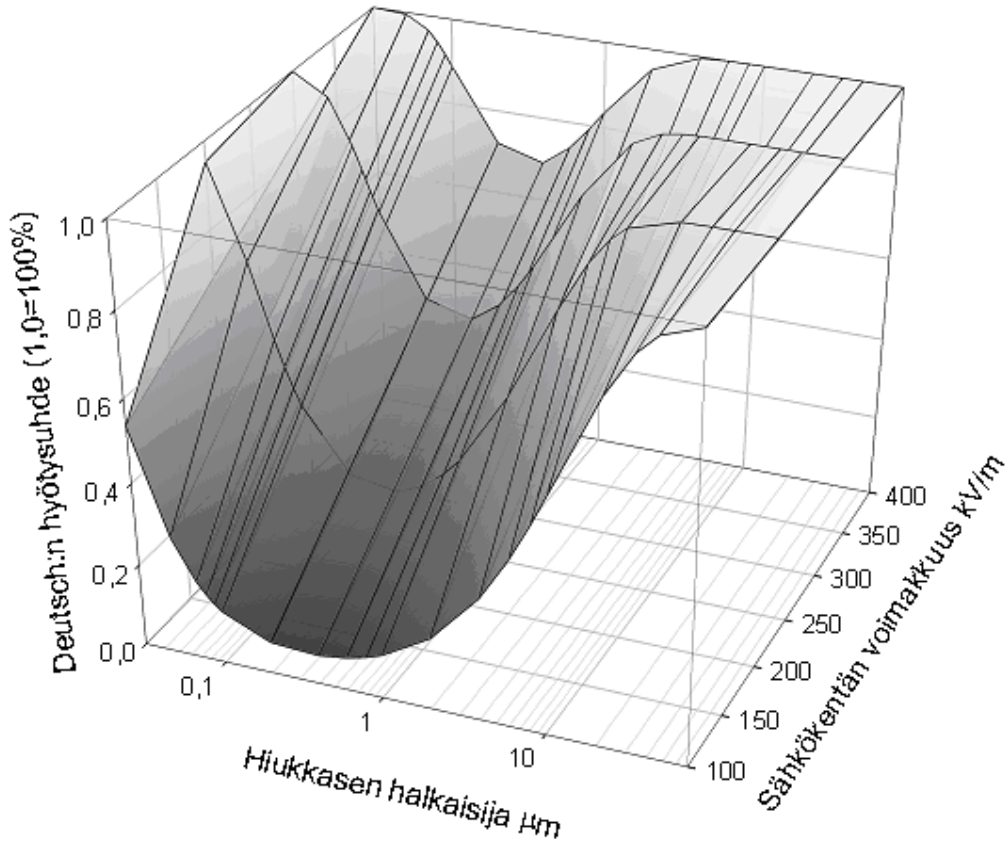
Yhtälö (35) voidaan esittää myös tilavuusvirran ja keräimen keräyspinta-alan avulla:

$$\eta_{De} = 1 - e^{-\frac{wA}{Q}} = 1 - e^{-De} \quad (36)$$

missä A on sähkösuotimen keräyspinta-ala [m²]
 Q on savukaasun tilavuusvirta [m³/s]
 De on Deutschin luku [dimensioton]

Yhtälö (36) pätee myös lieriönmuotoisille sähkösuotimille ja siitä nähdään kuinka sähkösuodatin on mitoitettava, jotta ylletään mahdollisimman suureen hyötysuhteeseen. Sähkösuotimen hyötysuhteen kasvattamiseksi on kasvatettava suodattimen pinta-alaa, hiukkasten nopeutta kohti kerääjäelektrodia, ja suodattimen pituutta. Samalla tilavuusvirta, savukaasun nopeus ja kerääjäelektrodien etäisyys on oltava mahdollisimman pieniä. Savukaasun puhdistamishyötysuhde vaihtelee savukaasun nopeuden ja hiukkasten vaellusnopeuden mukaan. Deutschin yhtälö on hyvä lähtökohta sähkösuotimen toiminnan arvioimiseksi, kun halutaan arvioida hyvään hyötysuhteeseen tarvittava mitoitus. Monissa mallinnustapauksissa Deutschin hyötysuhteen antava arvio on jopa todellisuutta paljon heikompi

hiukkaskokoalueella 0,3 μm . Deutschin hyötysuhteessa ei ole otettu huomioon, että osa hiukkasista saattaa jäädä varaamatta, hiukkasten varaus saattaa neutraloitua tai osa hiukkasista palaa takaisin savukaasuvirtaan mm. keräyselektrodeja ravistettaessa.



Kuva 17: Deutschin hyötysuhde hiukkasten koon ja sähkökentän funktiona, $T=423\text{ K}$, $\epsilon_r=10$, $V=1\text{ m/s}$, $H=1\text{ m}$, $r=0,075\text{ m}$ (varaajaelektrodin etäisyys keräyspinnasta), sylinterinmuotoinen sähkösuodin

Sähkösuotimen hyötysuhteen arvioimiseen on kehitetty Deutschin yhtälöä monimutkaisempia yhtälöitä, joista esimerkiksi Zhibinin and Guoquanin yhtälössä otetaan huomioon vallitsevan kaasuvirtauksen turbulenttisuus [17,18,23]:

$$\eta_{zhi} = 1 - \sqrt{\frac{Pe}{4\pi De}} \int_0^1 \exp\left[-\frac{Pe}{4De}(\xi - De)^2\right] d\xi \quad (37)$$

$$Pe = \frac{wD}{2D_p}$$

missä Pe on Pecletin luku [dimensioton]

D_p on hiukkasen diffusiviteetti [m^2/s] [18]:

$$D_p = D_t + D_B \approx D_t, \quad (38)$$

missä D_t on turbulenttinen diffuusiokerroin [m^2/s]

D_B on Brownin diffuusiokerroin [m^2/s]

Sähkösuotimen elektrodien välillä vallitseva sähkökenttä ei ole voimakkuudeltaan tasainen, vaan se heikkenee kääntäen verrannollisesti etäisyyden funktiona:

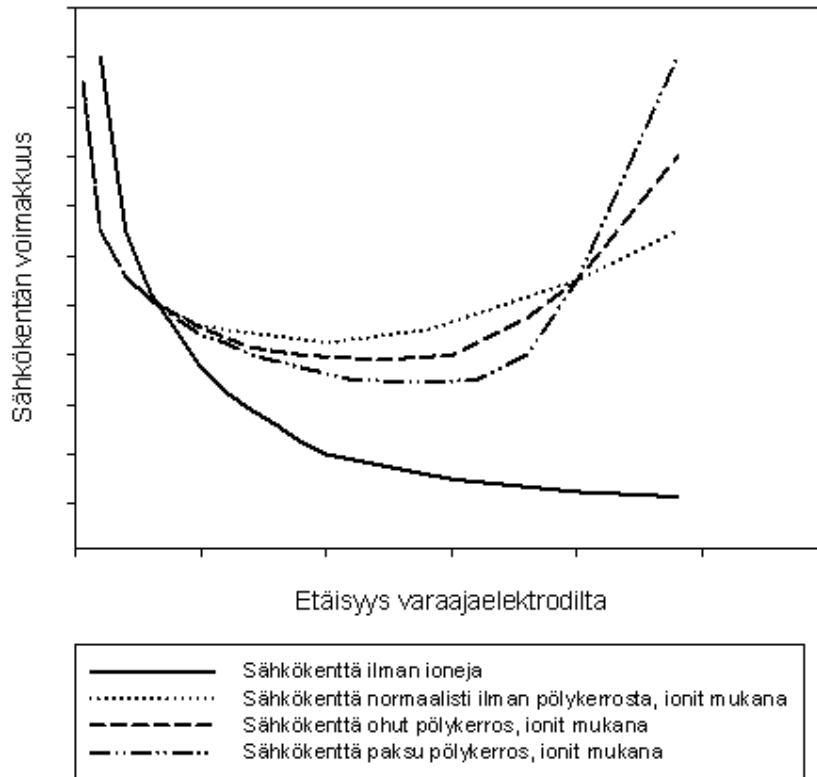
$$E = \frac{U}{r}, \quad (39)$$

missä U on potentiaali eli jännite [V]

r on etäisyys potentiaalista [m]

Koronapurkauksen synnyttyä jatkuva ionien joukkovaellus kohti vastakkaista potentiaalia muokkaa elektrodien välillä olevaa sähkökenttää oleellisesti. Keräjäelektrodille tarttuneet hiukkaset luovuttavat varauksensa tavallisesti hyvin nopeasti, mutta mikäli hiukkasten sähköinen resistiivisyys on suuri, voi jo kerääntynyt hiukkasmassa toimia eristeenä, jolloin vanhan hiukkasaineksen päälle törmäävät varautuneet hiukkaset luovuttavat varauksensa hitaasti. Tästä seuraa keräysalueen paikallisesti suuri varausten lukumäärä, joka edelleen johtaa kasvaneeseen sähkökentän voimakkuuteen tällä alueella ja saattaa aiheuttaa läpilyönnin hiukkaskerroksessa. Lisäksi

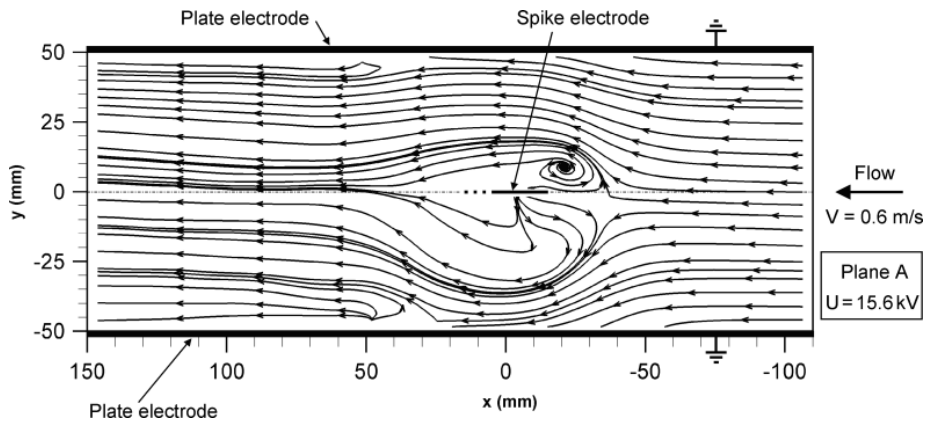
sähkökenttä kerätyn hiukkaskerroksen ja koronavaraajan välillä heikkenee, mikä heikentää korona-alueelta tulevien hiukkasten vaellusnopeutta alentaen sähkösuotimen keräyshyötysuhdetta.



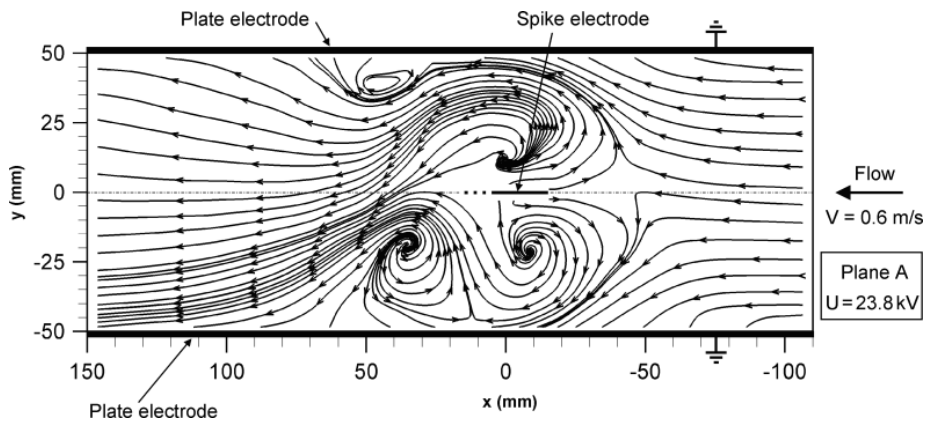
Kuva 18: Sähkökentän voimakkuuden muutos etäisyyden funktiona

Sähkösuotimen läpi kulkeva kaasu on virtaukseltaan tyypillisesti turbulენტista, jolloin hiukkaskonsentraation voidaan olettaa olevan varsin tasainen läpi suotimen poikkileikkauksen. Sähkösuotimen toiminnan kannalta on synnyttävä riittävän voimakas sähkökenttä, jotta hiukkaset saataisiin mahdollisimman tehokkaasti kerättyä, mutta tämä aiheuttaa kohtalaisen voimakkaan ionituulen. Sähkösuotimen keräyshyötysuhde on heikoimmillaan hiukkasilla, joiden halkaisija on $0,3 \mu\text{m}$. Viimeisimmät tutkimukset sähkösuotimen keräystekokkuuden parantamiseen tällä hiukkaskokoalueella ovat koskeneet ionituulen aiheuttamaa savukaasun pyörteilyä, ja tästä

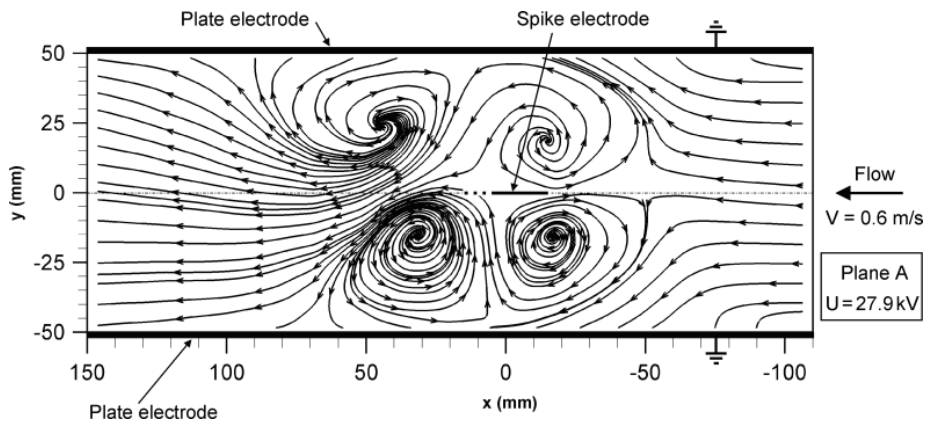
aiheutuvaa sekundaarista pyörteilyä, jotka saattavat vaikeuttaa hiukkasten varautumista kokoalueella 0,1-1 μm (Kuvat 19-21) [28,29].



Kuva 19: Matalalla jännitteellä ($U=15,6$ kV) lievää ilmavirran pyörteilyä [28]



Kuva 20: Jännitteellä ($U=23,8$ kV) kohtalaista ilmavirran pyörteilyä [28]



Kuva 21: Jännitteellä ($U=27,9$ kV) voimakkaita ilmavirran pyörteitä [28]

8 Hiukkasten kerääminen ja kerätyn aineksen poisto

Aerosolihiukkaset kiinnittyvät tiukasti kaikenlaisille pinnoille ja toisiinsa törmätessään lähes poikkeuksetta tarkertuvat toisiinsa muodostaen agglomeraatteja. Aerosolihiukkasten koon pienetessä niitä pintoihin ja hiukkasiin sitovat voimat ovat merkittäviä ja usein riittäviä kumoamaan gravitaatiovoiman, joka on kolmanteen potenssiin verrannollinen hiukkasen halkaisijaan, ja tyypillisesti riittäviä kumoamaan aerosolihiukkasiin vaikuttavan Stokes'n voiman. Näitä hiukkasia sitovia voimia sanotaan adheesiovoimiksi.

Adheesio kuvaa sitä vastustusvoimaa, joka tarvitaan kahden eri kappaleen pinnan erottamiseen toisistaan. Tyypillisiä adheesiovoimia ovat van der Waalsin voimat, sähköstaattiset voimat ja nestemäisten kalvojen jännitysvoimat. Adheesiovoimien kuvaaminen on hankalaa, sillä lukuiset voimat muuttuvat riippuen mm. hiukkasten koosta, niiden pinnanmuodoista ja rakenteesta sekä pintojen välillä olevista nestemäisistä kalvoista. Monet pintojen välisistä voimista muuttuvat etäisyyden ja lämpötilan ja kosteuden funktiona. Useista erikokoisista ja -aineksisista hiukkasista muodostuneiden agglomeraattien törmäykset ja sitoutumiset ovat erittäin vaikeasti mallinnettavissa. Adheesiovoimien vaikutus on suoraan verrannollinen hiukkasen halkaisijaan. [10]

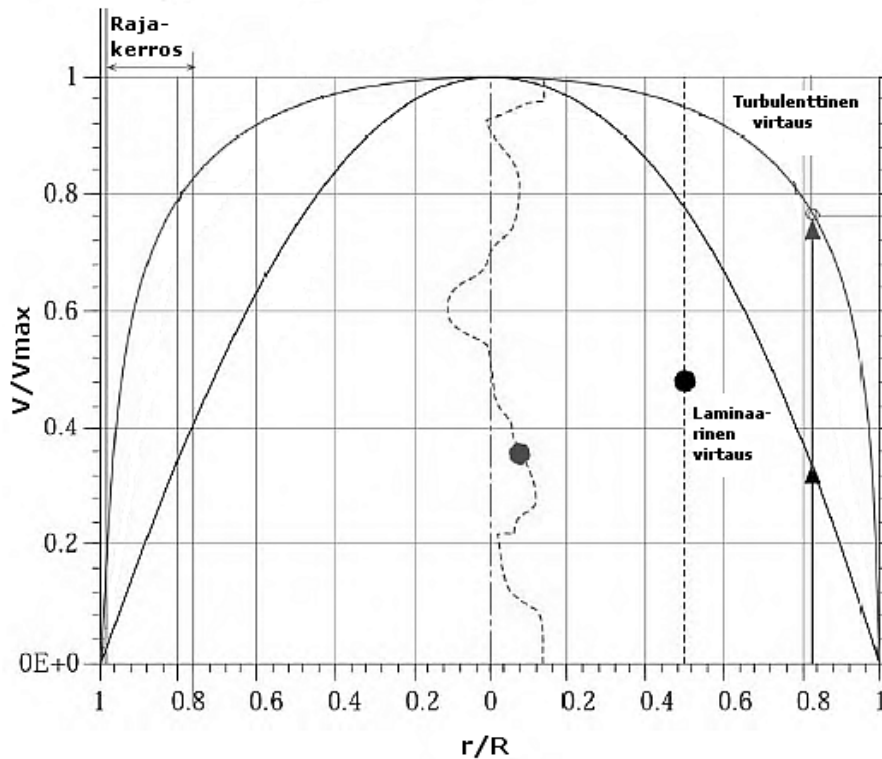
8.1 Erilaisia kerätyn hiukkasaineen poistomahdollisuuksia

Sähkösuotimen pinnoille kertynyt hiukkasaine on aika-ajoin poistettava, jotta suodin toimisi luotettavasti. Kerätyn hiukkasaineen ja noen poistamiseksi käytetään esimerkiksi laivojen pakokaasukattiloissa mekaanista nuohousta, korkeapaineista höyrynuohousta, tavallista vesinuohousta, korkeapaineilmaa ja ultraääntä [12]. Teollisuuden sähkösuotimien puhdistukseen käytetään ravistusta. Autoteollisuus on siirtynyt yhä tiukentuneiden hiukkaspäästörajoitusten myötä käyttämään diesel-ajoneuvoissa

hiukkasloukkuja. Hiukkasloukut hapettavat katalyyttien avulla jäännöshiilivetyjä ja keräävät nokihiukkasmassaa. Kun loukun vastapaine kasvaa kerätyn hiukkasmassan vuoksi suureksi, ruiskutetaan loukkuun polttoainetta, jolla suurin osa kerääntyneestä noesta ja epätäydellisistä hiilivedyistä palaa kun lämpötila nousee yli 550°C:een. Poltto tapahtuu 1000 km ajon välein ja lisäaineiden avulla voidaan tarvittavaa lämpötilaa laskea. Hiukkasloukut ovat kehittyneet nopeasti ja nykyään on olemassa malleja, joita ei tarvitse vaihtaa.

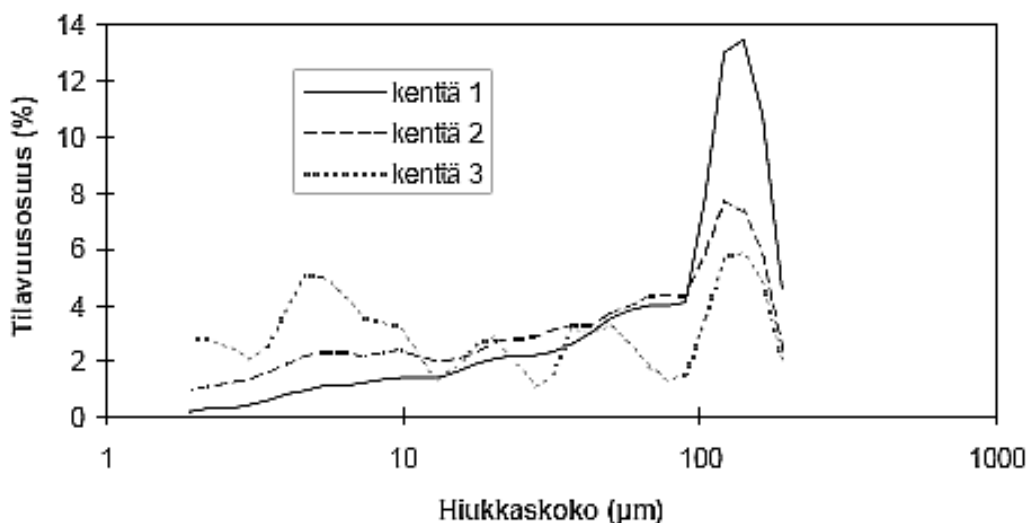
8.2 Sähkösuotimella kerättyjen hiukkasten ominaisuudet ja poistomahdollisuudet

Teollisuuden sähkösuotimissa käytettävä ravistus on aina kompromissi, jossa tavoitteena on yltää mahdollisimman suureen keräyshyötysuhteeseen. Ravistuksessa irtoava hiukkasmassa on saatava talteen, eikä se saa joutua takaisin savukaasuvirtaan. Ravistuksessa irronnut tarpeeksi pienikokoinen hiukkasaines tempaantuu vallitsevaan hiukkasvirtaan, mikäli hiukkasen terminaalinopeus on pienempi kuin vallitseva savukaasuvirtauksen nopeus. Mekaanisella ravistuksella sähkösuotimen pinnalta irtoavat vain yli yhden mikrometrin hiukkaset [22]. Usein kaikkein suurin sähkösuotimen kokonaiskeräyshyötysuhdetta heikentävä tekijä on ravistuksesta aiheutuva hiukkasten takaisintempautuminen. Savukaasuvirtaus keräyspintojen ympärillä voi olla joko laminaarista tai turbulენტtista, mutta keräyspintojen lähellä savukaasun virtaus on aina heikompa ja hitaampaa kuin keskellä virtauskanavaa. Ravistuksen kannalta hyödyllistä on se, että irronnut hiukkasmassa pysyy hitaan kaasuvirtauksen nk. rajakerrosalueen sisällä (Kuva 22). Gravitaation avulla ravistuksessa irronnut, alas laskeutuva hiukkasmassa kerätään suppiloihin, joista hiukkasmassa saadaan talteen.



Kuva 22: Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus savukanavassa [16, suom.]

Sähkösuotimen keräyslevyille kertyvä hiukkasmassa vähenee eksponentiaalisesti kerääjän etäisyyden suhteen savukaasuvirtauksen suuntaan. Alkuosassa kerääjälevyä voi olla paljon enemmän kerättyä hiukkasainetta kuin esimerkiksi viimeisillä savukaasukanavan keräyslevyillä (Kuva 23). Helpoimmin kertyy karkea, halkaisijaltaan suuri hiukkasaines, jonka vaellusnopeus kerääjäelektrodille on suurin. Vaellusnopeudeltaan heikoimmat hiukkaset ovat kooltaan $0,3 \mu\text{m}$ ja nämä hiukkaset kerääntyvät todennäköisimmin vasta myöhemmässä vaiheessa viimeisille keräyslevyille.



Kuva 23: Hiukkasten keräytyminen peräkkäisissä sähkökentissä [41]

Hiukkaspaksuuden lisäksi kerätyn hiukkasmassan tiheys voi vaihdella keräyslevyjen matkalla ja jopa pienillä alueilla kerääjälevyllä myös kerätyn hiukkasmassan syvyysuunnassa. Negatiivisella varaajaelektrodilla tapahtuvat satunnaiset koronapurkaukset aiheuttavat voimakkaita ionituulipurkauksia, jotka puolestaan piikkipäisissä varaajaelektrodeissa tapahtuvat aina piikin päässä. Piikeistä puhaltava ionituuli muokkaa kerääjäelektrodin pinnalle kerääntyvän hiukkasmassan muotoa, siten että keräyslevyn alueelle muodostuu pinnanmuotoja, joissa on erotettavissa tiheyksiltään vaihtelevia hiukkasalueita.

Voimalaitoskokoluokan sähkösuotimissa käytetään useita keräyslevyjä laajalla matkalla, joiden ravistukset voidaan tehdä eri aikoina. Savukanavan alkupään levyt voivat vaativat useampia ravistuksia kuin loppupään levyt. Ravistukset on optimoitava sopiviksi riippuen kerätyn hiukkasaineen ominaisuuksista. Keräyslevyjen on kestettävä ravistuksien mekaaniset rasitukset ja rakenteen vahvistamiseksi ne voidaan muotoilla siten, että ne estävät hiukkasten takaisintempaantumista savukaasuvirtaan, mutta tämä saattaa heikentää savukaasuvirtausta ja aiheuttaa turbulenssia sekä sekundaarisia virtauksia. Kertynyt hiukkasmassa osaltaan voi myös aiheuttaa vastaavia ilmiöitä. Keräyslevyjen on pystyttävä johtamaan sähköä hyvin, jotta kerätyn hiukkasmassan tuomat varaukset voidaan johtaa pois. [5]

8.3 Hiukkasten resistiivisyyden vaikutus keräystehokkuuteen

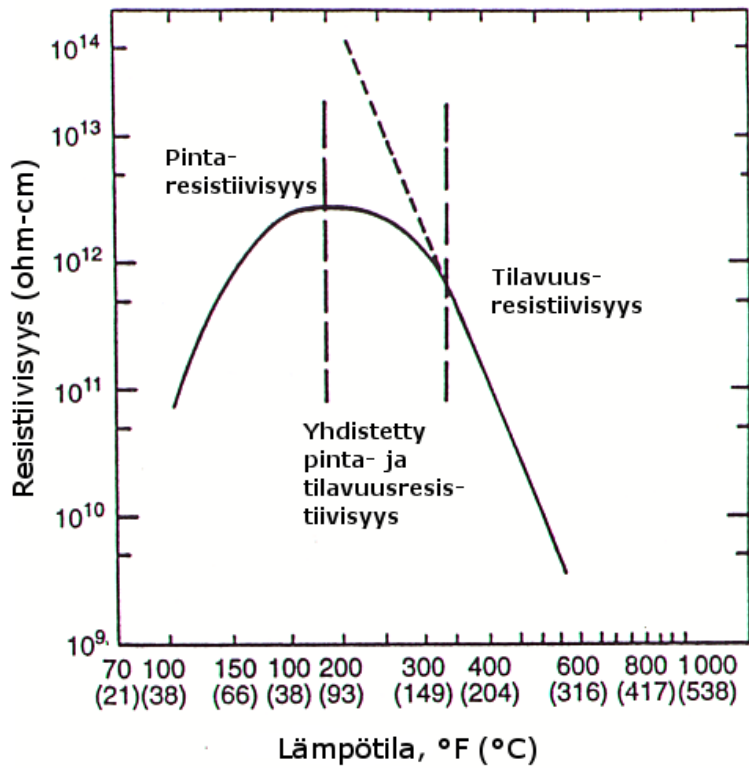
Kerätyn hiukkasmassa tiheyden ja paksuuden lisäksi tärkeä ominaisuus on hiukkasmassan resistanssi. Hiukkasen resistiivisyyden kriittisenä rajana sähkösuotimen toiminnan kannalta pidetään arvoa $10^{10} \Omega\text{cm}$. Korkea resistiivisyys voi johtaa vasta-koronailmiöön, jossa sähkösuotimen tehokkuus alenee [26]. Hiukkasten luokitellut resistiivisyydet ovat taulukossa 3.

Taulukko 3: Hiukkasten resistiivisyyksiä [26]

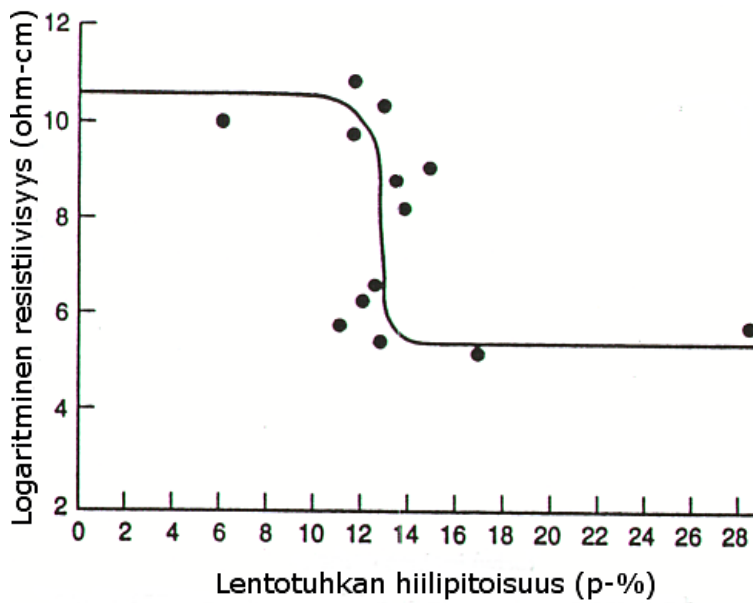
Resistiivisyys, (Ωcm)	Luokittelu
10^4 - 10^8	Johde
10^8 - 10^{10}	Normaali
10^{10} - 10^{11}	Kohtalainen
10^{11} - 10^{13}	Suuri

Hiukkasen resistanssi on sen johtavuuden käänteisluku, jossa johtavuus voidaan jakaa kahteen osaan: pinta- ja tilavuusjohtavuuteen. Pienhiukkasten pinnalle rikastuneet raskasmetallit, absorboitunut kosteus ja ionit vaikuttavat pintajohtavuuteen merkittävästi. Lämpötilan noustessa tilavuusjohtavuus kasvaa nopeasti ja korkeissa lämpötiloissa ratkaisee hiukkasen johtavuuden (Kuva 24) [5].

Lentotuhkan resistiivisyys muuttuu voimakkaasti sen hiilisisällön funktiona, kun hiilen osuus lentotuhkassa on noin 13 % (Kuva 25). Hiilenpolttolaitoksilla ja suurimmissa biopolttolaitoksissa lentotuhkan alhainen hiilipitoisuus tuottaa ongelmia. Matalaresistiiviset hiukkaset varautuvat nopeasti ja saattavat keräyselektrodiin törmätessään menettää varauksensa ja kimpoavat välittömästi takaisin savukaasuvirtaan. Korkeaan resistiivisyyteen voidaan vaikuttaa lisäaineiden, kosteuden sekä vallitsevan lämpötilan avulla [26].



Kuva 24: Hiukkasen resistiivisyyden muutos lämpötilan funktiona [26, suom.]



Kuva 25: Hiukkasen resistiivisyyden muutos sen hiilipitoisuuden muuttuessa [26, suom.]

Pellettipoltossa lentotuhkan hiilisisältö on alhaisempi kuin puun panospoltossa, jossa hiilisisältö on puolet lentotuhkan massasta. Polttotapahtuman luonteesta riippuen alhaisissa lämpötiloissa tästä hiilimassasta 87-95 % on orgaanisessa muodossa, kun taas korkeassa polttolämpötilassa 27-48 %. Loput hiilimassasta on epäorgaanisessa muodossa. Orgaanisen hiilen osuus lentotuhkan hiilisisällöstä korreloi voimakkaasti polttotapahtuman täydellisyyden kanssa [50].

8.4 Hiukkasmassan ravistus, kvasistaattinen teoria

Sähkösuotimen keräyslevyille pakkaantunut hiukkasmassa voidaan ravistaa mekaanisesti pois. Ravistukseen vaadittava kiihtyvyys voi olla joko keräyslevylle kohtisuoraa, yhdensuuntaista tai näiden yhdistelmä. Hiukkasmassan irrottamiseksi keräyslevyltä on sitä kiihdytettävä voimalla, joka ylittää jossakin hiukkaskerroksessa vaadittavan leikkausjännityksen (kvasistaattinen teoria) [5]

$$\sigma = \frac{F_r}{A_l} = \rho_l \delta a \geq R \quad (40)$$

$$a \geq \frac{A_l}{\rho_l \delta}$$

missä F_r on ravistusvoima [N]

A_l on hiukkaskerroksen pinta-ala [m²]

ρ_l on hiukkaskerroksen tiheys [kg/m³]

δ on hiukkaskerroksen paksuus [m]

a on ravistuksessa käytetty kiihtyvyys [m/s²]

R on pölykerroksen murtumiseen/irtoamiseen tarvittava leikkausjännitys [N/m²]

Yhtälöstä (40) nähdään, että ravistukseen tarvittava kiihtyvyyden pienenee, jos hiukkaskerroksen paksuus kasvaa tai tihenee. Hiukkasia toisiinsa sitova adheesiovoima voi olla voimakkaasti hiukkastiheyden funktio, jolloin hiukkaskerroksen tiheyden kasvu ei välttämättä alenna tarvittavaa kiihtyvyyttä. Mikäli ravistus tehdään koronapurkauksen tapahtuessa tai sähkökentän päällä ollessa, ionien läsnäolo kerätyn hiukkaskerroksen hiukkasissa vahvistaa adheesiovoimia ja tarvitaan suurempi ravistuskihtyvyyden, kuin ilman sähkökenttää. Hiukkaskerroksen tiheys pienentää kerroksen resistiivisyyttä ja vahvistaa ionien kulkemista kerroksen läpi.

Sähkösuotimissa ravistukset tuotetaan usein joko vasaralla, jolla tuotetaan vahva impulssi, tai ravistus tehdään värähtelyn avulla. Keräyslevyihin kohdistetut impulssit aiheuttavat jälkivärähtelyjä ja resonansseja, jotka saattavat korkeataajuisina aiheuttaa hiukkaskerroksen tihentymistä. Resonansseja vähennetään kumipäisillä vasaroilla ja keräyslevyjen kiinnityskohdilla. Jälkivärähtelyiden voimakkuudet ja resonanssitaajuudet muuttuvat kerätyn hiukkasmassan paksuuden, tiheyden ja sijainnin mukaan.

8.5 Laboratoriokokoluokan sähkösuotimen ravistusmittaustuloksia

Choi Dong Ho tutki väitöskirjatyössään [5] laboratoriokokoluokan sähkösuodinta, jonka läpi imettiin kosteutettua ilmaa ja johon sekoitettiin suuttimella lämmitettyä, uudelleen hajotettua, voimalaitokselta sähkösuotimella kerättyä lentotuhkaa. Läpi-imetyn ilma suhteellinen kosteus oli yli 52% vastakorona -ilmiön välttämiseksi. Ilman virtausnopeutta pystyttiin säätämään välillä 0-3 m/s ja koronajännitettä välillä 0-60 kV. Sähkösuotimen kerääjäelektrodilta tutkittiin erillistä keräyslevyä, jota pystyttiin ravistamaan vaihtuvilla kiihtyvyyksillä.

Tutkimuksessa havaittiin aluksi selvä koronavirran kasvattamisen vaikutus, jossa keräysajan funktiona hiukkaskerroksen paksuus kasvoi koronavirran myötä, mutta samalla ravistustehokkuus laski kasvaneen sähkökentän voimakkuuden vuoksi. Koronaelektrodin vaihto piikkipäiseksi korosti hiukkaskerroksen eritiheyksisten alueiden muodostumista. Ravistuksia

tutkittiin erityisesti ravistussuuntien avulla, joissa keräyslevyn suuntaiset ravistukset vaativat alhaisemmat ravistusvoimakkuudet kuin keräyslevyä kohtisuoraan tehdyt ravistukset lukuisissa eri testeissä. Ravistustehokkuudet eivät levynmyötäisissä ravistuksissa olleet niin herkkiä pölykerroksen paksuudelle kuin kohtisuorissa ravistuksissa ja ravistustehokkuus oli kaasun virtausnopeudesta riippumatonta. Hiukkaskerroksen uudelleentempautuminen kaasuvirtaan havaittiin olevan jopa vahvempaa kuin lineaarisesti riippuvaa kaasun virtausnopeudesta, mutta silti virtausnopeudella 1,5 m/s levynsuuntaisella ravistuksella päästiin 95 %:n ravistushyötysuhteeseen kun samalla uudelleentempautuminen oli vain 0,05 %. Tämä vahvistaa kvasistaattisen teorian tukeman arvion siitä, että ravistuksessa pölykerros irtaoo varsin suurina palasina. Kokeissa osa tällaisista palasista irtosi hetkellisesti keräyslevyn pinnalta samalla laskeutuen jonkun matkaa, ja palaset tarttuivat uudelleen levyyn kiinni, kun sähkökenttä oli päällä.

Kvasistaattisen teorian ennustus sille, että hiukkaskerros irtaoo paremmin, kun se on paksumpi, sai vahvistuksen kokeista, mutta pölykerroksen tiheyden kasvu huononsi ravistushyötysuhdetta. Tämä viittaa siihen, että pölykerroksen mekaaninen jäykkyys ja sitä sitovat adheesiovoimat suurenevat voimakkaasti kerroksen tiheyden kasvaessa. Samoihin ravistushyötysuhteisiin pääsemiseksi pölykerroksien paksuuden kohtisuorilla ravistuksilla täytyi olla yli kaksinkertainen levynsuuntaisiin ravistuksiin nähden. Hieman yllättävää oli se, että pölykerroksen tiheydellä ei ollut vaikutusta uudelleentempautumiseen, mutta uudelleentempautuminen väheni pölykerroksen paksuuden kasvaessa.

Tutkimuksesta voidaan vetää seuraavia johtopäätöksiä:

- Koronavirta vahvistaa pölykerroksen lujuutta ja alentaa ravistushyötysuhdetta, mutta ei suoraan määrää takaisintempaantumista. Mikäli ravistus tehdään koronavirta päällä, merkittävä osa pölystä ~50% tarttuu uudelleen keräimeen.
- Ravistushyötysuhde kasvaa, kun ravistuskiihtyvyyys kasvaa ja ravistustaajuus pienenee

- Pölykerroksen mekaaninen lujuus kasvaa sen tiheyden kasvaessa ja sähköinen lujuus kasvaa koronavirran kasvaessa.
- Kvasistaattinen teoria heikkenee ravistustaajuuden kasvaessa.
- Pölykerroksen lujuus kohtisuorassa ravistussuunnassa on voimakkaampi kuin levynsuuntaisessa ravistuksessa
- Värähtelytaajuuden nosto pilkkoo irtaantuvaa hiukkasainesta pilvimäiseksi ja kasvattaa uudelleentempautumista
- Positiivinen koronapurkaus saattaa tuottaa tiheydeltään tasaisemman kerätyn hiukkaskerroksen
- Mikäli sähkösuotimen ravistettavia levyjä on useita, niiden ravistuksissa sähkökenttä päällä viimeisen levyn ravistus ratkaisee olennaisesti savutettavan sähkösuotimen keräyshyötysuhteen

9 Hiukkaskerroksen syttyminen ja paloturvallisuus

9.1 Syttyminen

Syttymiseen ja palamiseen vaaditaan polttoaineen ja hapen sekoittuminen riittävän korkeassa lämpötilassa. Syttymispisteellä tarkoitetaan Semenovin määritelmän mukaan tilaa ja ajankohtaa, jossa polttoaineen ja hapen reaktioissa muodostuva nettoenergia aikayksikössä on yhtäsuuri kuin ympäristöön siirtyvä nettoenergiavirta. Syttymiseen vaadittava lämpöenergia voidaan saada ulkopuolisesta lämmönlähteestä, joka voi olla suoraan kosketuksissa syttyvän polttoaineen kanssa tai lämpöenergiaa voi tulla säteilemällä tai kuuman virtauksen avulla. Syttymiselle tyypillistä on nopea polttoaineen lämmön nousu, jossa polttoaineen palamisesta vapautuva energia kiihdyttää sen palamista. *Itsesyttyminen* tarkoittaa polttoaineen syttymistä hapettimen ja lämpöenergian avulla, ja *pakotettu syttyminen* tarkoittaa puolestaan syttymistä kuuman syttymislähteen välittömässä läheisyydessä. Pakotettuna syttymislähteenä voi toimia esim. liekki, hehkuva hiukkanen ja sähkökipinä. [11]

Tärkeitä syttymiseen ja palamiseen vaikuttavia tekijöitä ovat polttoaineen kosteus, haihtuvien aineiden pitoisuudet (pyrolyysikaasut), polttoaineen lämpöarvo, hiukkaskerroksen koko, paksuus, huokoisuus ja tiheys, sekä syttymisalueelle virtaava lämpöenergia ja happi. Haihtuvien aineiden massapitoisuus vaikuttaa ratkaisevasti hiilipölykerroksen syttymislämpötilaan. Harvassa, hiukkaskooltaan pienessä hiukkaskerroksessa hiukkasten happeen reagoiva pinta-ala on suuri suhteessa hiukkaskerroksen tilavuuteen sekä kerros johtaa huonosti lämpöä. Siksi syttyminen tapahtuu harvassa hiukkaskerroksessa alhaisemmassa lämpötilassa kuin tiheämmissä.

9.2 Paloturvallisuus, nokipalo

Suomessa tapahtui vuonna 2004 yhteensä 458 kpl tulisija- ja savuhormipaloa, joista syntyi 3,5 milj. euron vahingot. Aikaisempina vuosina vahingot olivat 5,5 milj. euroa/vuosi. Näistä paloista 103 kpl oli nokipaloja, jotka savuhormin asianmukaisella käytöllä ja huoltamisella olisivat olleet estettävissä. Turvatekniikan keskus on selvittänyt kolmena vuotena (2002- 2004) tulisijojen aiheuttamien tulipalojen määriä, vahinkoja ja syttymissyitä. Jokaisen selvityksen johtopäätöksenä on ollut tulisijojen ja hormien kyseenalainen, jopa huono kunto Suomessa. Tulipaloista suurin osa on ennalta ehkäistävissä, koska suurin osa niistä aiheutuu tulisijojen ja hormien heikosta kunnosta, selkeistä asennusvirheistä sekä ihmisen virheellisestä ja huolimattomasta toiminnasta. [33]

Nokipalossa savukanavaan kertynyt lentotuhka-nokiaines (voi sisältää tervayhdisteitä) voi syttyä palamaan sopivissa olosuhteissa ja palo leviää nopeasti koko hormiin kerääntyneeseen hiukkasainekseen. Palon syttyessä yhä lämpenevä, kertynyt hiukkasaines laajenee nopeasti ja palo kiihtyy nopeasti lämpötilan kohotessa. Tämä aiheuttaa halkeamia ja rapautumista tiilihormeissa tai kuumentaa teräshormin kantavan osan sortumisvaaraan asti. Nokipalon kuumentaman savukanavan lämpötila voi sytyttää lähellä olevat palavat rakenteet ja pitkäkestoisena palona hormoneissa käytettävät eristeet sintraantuvat eli tuhoutuvat. Pitkäkestoisen lämmityksen aiheuttamaa lämpörasitusta ei tarvitse nykyisin testata eurooppalaisten tuotestandardien mukaan, kun tuotetta toimitetaan markkinoille [33]. Nokipaloja sattuu usein kesälomakuukauksina, jolloin savukanavaan yritetään saada hyvä veto aikaiseksi polttamalla sanomalehtiä tai muita herkästi palavia materiaaleja. Nopeasti kuumentunut, kyteviä tai vielä palavia hiukkasia sisältävä savukaasu voi aiheuttaa nokipalon syttymisen.

Nokipalon alkuvaiheessa piipusta nousee voimakas savu ja savukaasujen lämpötila on 600 celsiusastetta. Läpivalovaiheessa savu vähenee ja loppuu kokonaan, sekä liekit lyövät ulos hormin yläpäästä. Savukaasujen lämpötila on tällöin jo huomattavasti alkuvaihetta korkeampi. Pitkäkestoisen nokipalon

jälkivaiheessa savuhormi on kuumentunut voimakkaasti ulkopintaan asti. Noen laajetessa ja lämpötilan noustessa savukaasut saattavat päästä rakenteisiin hormin rikkoontuneista kohdista. Palon voimakkuutta voidaan yrittää hallita estämällä palamiseen tarvittavan ilman saantia. Savupiippuun ei saa ruiskuttaa vettä, eikä sammutusjauhetta, sillä tämä voi rikkoa piipun. Nokipalo kestää 1-3 tuntia ja ympäröiviin rakenteisiin johtuva lämpö saattaa vielä vuorokauden aika sytyttää tulipalon. Loppuun palanut nokipalo helpottaa piipun puhdistamista ja jälkitarkastusta merkittävästi, mutta usein loppuunpalamista ei kannata sallia. [47]

9.3 Noki ja terva

Noen ja tervayhdisteiden muodostuminen on puun palospoltossa tyypillistä huonoissa palamisolosuhteissa, joissa hapen sekoittuminen polttoaineeseen on riittämätöntä alhaisissa polttolämpötiloissa ja puu on tuoretta tai sisältää paljon kosteutta. Noen ja tervan yhdisteet kerrostuvat savukanavaan hitaasti. Savukaasusta tiivistyvät raskaat hiilivedyt tarttuvat noki- ja lentotuhka-aineksen, sekä savukanavan pinnoille. Lämpötilan laskiessa tiivistyneet nestemäiset tervayhdisteet jähmettyvät vähitellen lämpötilan laskiessa.

Huokoinen, nestemäinen hiilivetyypinta kerää tehokkaasti siihen tarttuvat lentotuhka- ja nokihiukkaset, jolloin huonoissa olosuhteissa kerrostuma voi kasvaa nopeasti. Noki- ja tervayhdisteiden syttymislämpötiloja arvioitaessa helpoimmin palavat juoksevat, huokoiset yhdisteet ja aineksen kovettuessa syttymislämpötilat ovat korkeammat. [49]

Savukanavan nestemäinen terva syttyy jo 120-150°C lämpötilassa, vahvempi, viskoottisempi terva 250°C lämpötilassa ja kiinteä, kova terva 350°C lämpötilassa. Noella on tätä korkeampi syttymislämpötila, joka on 400-650°C. Korkean lämpötilan poltto vähentää tervan muodostumista, sillä palamattomat hiilivedyt eivät tällöin kondensoidu niin helposti. Palotilassa syntyvä nestemäinen terva palaa helposti alhaisen syttymislämpötilan vuoksi, mutta palamattomat kaasumaiset hiilivedyt tiivistyvät lämpötilan viiletessä. Noki-tervayhdisteiden syttyessä terva palaa ensiksi ja lämpötilan noustessa

myöhäisemmässä vaiheessa palaa noki. Jos nokiterveyhdiste sisältää yli 20 % tervaa, alenee yhdisteen syttymislämpötila verrattuna pelkän noen syttymislämpötiloihin. [49]

9.4 Pienpolton noki- ja tuhkahiukkasten kerääntyminen savukanavaan

Ruotsissa tehtiin vuonna 2000-2001 tutkimus kotitalojen lämmityslaitteiden (teho alle 60 kW) nokikerrostumien laadusta, kasvunopeuksista ja yhteyksistä nokipaloihin [6]. Tutkimuksissa oli mukana mm. tavallisia ja ympäristöystävällisempiä puukattiloita sekä pelletti- ja öljykattiloita. Tutkimuksessa koottiin yhteensä 307 kpl nokinäytteitä, joista laskettiin lukuisia eri keskiarvoja, joille tyypillistä oli varsin suuri tulosten hajonta. Näytteisiin kerättiin tulipesään jäänyt tuhka ja sekä koko savukanavaan kertynyt noki-tuhka-aines. Puukattiloista kerätyt noki-tuhkamäärät olivat 1,5-3-kertaiset pellettikattiloihin nähden. Pellettikattilan noen tiheys oli 390 kg/m^3 ja puukattiloilla se vaihteli $450\text{-}600 \text{ kg/m}^3$. Savupiippuun kertyneestä noesta puukattiloilla teräspiippuun kertyi yli 40 % vähemmän nokiainesta kuin muurattuihin tiilipiippuihin. Pellettikattiloilla piipun tyypillä ei ollut merkittävää vaikutusta kerääntyneen nokiaineksen määrään, joka oli 1100 g koko lämmitysajanjaksolta. Puukattiloiden osalta piippuun kertyi pellettikattiloihin verrattuna 1-2-kertainen määrä nokiainesta, riippuen kattilasta ja piipusta. Savupiippuun kertyneen noen tiheys oli $380\text{-}400 \text{ kg/m}^3$ ja puukattiloilla vastaavasti $440\text{-}500 \text{ kg/m}^3$.

Tutkimuksessa selvitettiin myös nokinäytteiden palamattomien osuus, joka puukattiloilla oli 65 %. Pellettikattiloiden nokinäytteiden palamattomien osuus oli vain hieman pienempi, 59 %. Noen kerääntymis- ja kasvunopeudet (g/vuorokausi) olivat pelletti- ja puukattiloilla teräspiippujen osalta savukanavaan samaa luokkaa (6-8 g/vuorokausi), mutta puukattiloiden tiilipiippujen osalta 10-14 g/vuorokausi. Noen kertyminen savukanavaan oli pelletti- ja puukattiloilla 0,007-0,011 mm/vuorokausi. Noen syttymislämpötilat olivat 280°C . Yhteyttä pölypitoisuuden ja noen kerrostumisnopeudelle ei

löydetty, mutta pöly ja CO-pitoisuudet savukaasussa puukattiloilla olivat tuntuvasti korkeammat kuin pellettikattiloilla.

9.5 Savukaasun hiukkasten määrän ja koostumuksen arviointi

Suomessa lämmityskaudella 2000/2001 pientaloissa käytettiin polttopuuta yhteensä 6,1 milj. m³, josta asuintilojen lämmitykseen 4,4 milj. m³. Pientilojen polttopuun keskimääräinen käyttö vuodessa toissijaisena lämmityslähteenä oli omakotitaloissa keskimäärin 1,1-2,9 m³. Uunilämmityksessä omakotitaloissa polttopuuta käytettiin vuodessa 7,1 m³ ja puukeskuslämmitteisissä 13,7 m³ ja vastaavasti maataloilla 10 m³ ja 25,6 m³. Kaikki tois- ja ensisijaiset puulämmityskohteet huomioon ottaen käytettiin omakotitaloilla keskimäärin 3,8 m³ ja maataloilla 14,4 m³ puuta vuodessa [42].

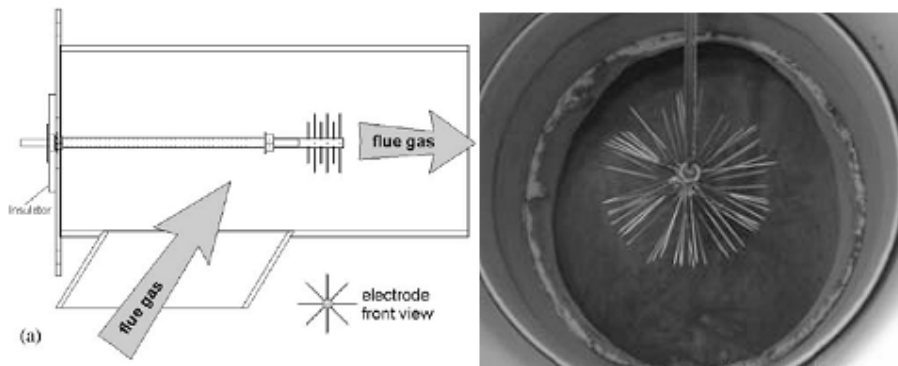
Sähkösuotimen vuosittain keräämä hiukkasmassa voidaan arvioida, jos oletetaan, että puun keskimääräinen kosteus on noin 20 %, puuta käytetään vuodessa 13,7 m³, puun tiheys on 400 kg/m³ ja hiukkaspäästö on keskimäärin 100 mg/MJ. Tämä vastaa tilannetta, jossa omakotitaloa lämmitetään panospolttoperiaatteella. Tällöin puuta kuluu vuodessa 5500 kg, josta hiukkaspäästöjä tulee 10 kg. Tästä kokonaishiukkasmassasta 1/3-1/2 on pienhiukkasia (PM10), mutta tästä ei ole täyttä yksimielisyyttä tutkijoiden, tutkimuslaitosten eikä ympäristöviranomaisten kesken.

10 Pienpolttoon kehitettyjä sähkösuotimia

Pienpolttoon on kehitetty ainakin kolmessa erillisessä projektissa sähköavusteinen hiukkaspoisto. Itävallassa tutkittiin jo vuonna 1989 sähkösuotimen soveltuvuutta 15-100 kW lämpöteholuokkaan ja havaittiin, että 100 kW-tehoiseen polttolaitteeseen pystyttiin 400 eurolla rakentamaan suodin, joka lyhyessä testissä poisti 90 % hiukkasista. Lisäksi suotimia on kehitetty Sveitsissä ja Norjassa.

10.1 *MINIature Particle ABSorber*

Sveitsissä pienpolttoon kehitettyä sähkösuodinta on testattu ainakin vuodesta 2001 asti, jolloin sillä saavutettiin heti 50 %:n keräyshyötysuhde. Sähkösuodinta on kehitetty ja tutkittu kenttäolosuhteiden lisäksi myös laboratoriossa, jossa suotimen erilaisia kehitysversioita liitettiin jatkuvatoimiseen pellettipolttimeen, jonka lämpöteho oli alle 20 kW. Tutkimuksissa savukaasujen lämpötila oli 200°C, savukaasun nopeus oli 1 m/s ja siinä käytettiin positiivista koronavaraajaa. Varsinaista keräintä ei käytetty, vaan savukanavan materiaalina käytettiin ruostumatonta terästä, joka sähköä johtavana toimi loppumatkaltaan keräysalueena. Ensimmäisissä koronavaraajaversioissa kokeiltiin piikkipäistä koronaelektrodia (Kuva 26), jolla saavutettiin hyvä keräystehokkuus jo varsin alhaisilla jännitteillä, mutta neulamaisen, hieman monimutkaisen rakenteen vuoksi tämä varaajaelektrodin muoto todettiin liian kalliiksi ratkaisuksi.

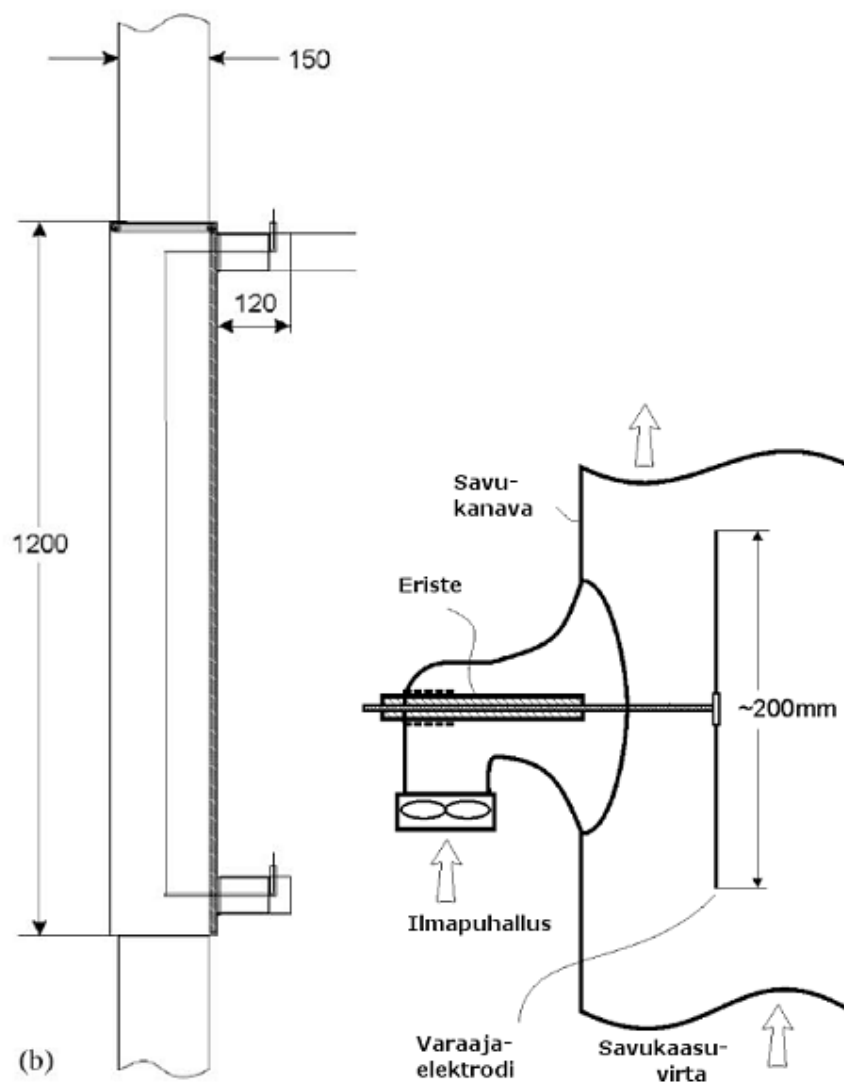


Kuva 26: Piikkipäinen varaajaelektrodi [36]

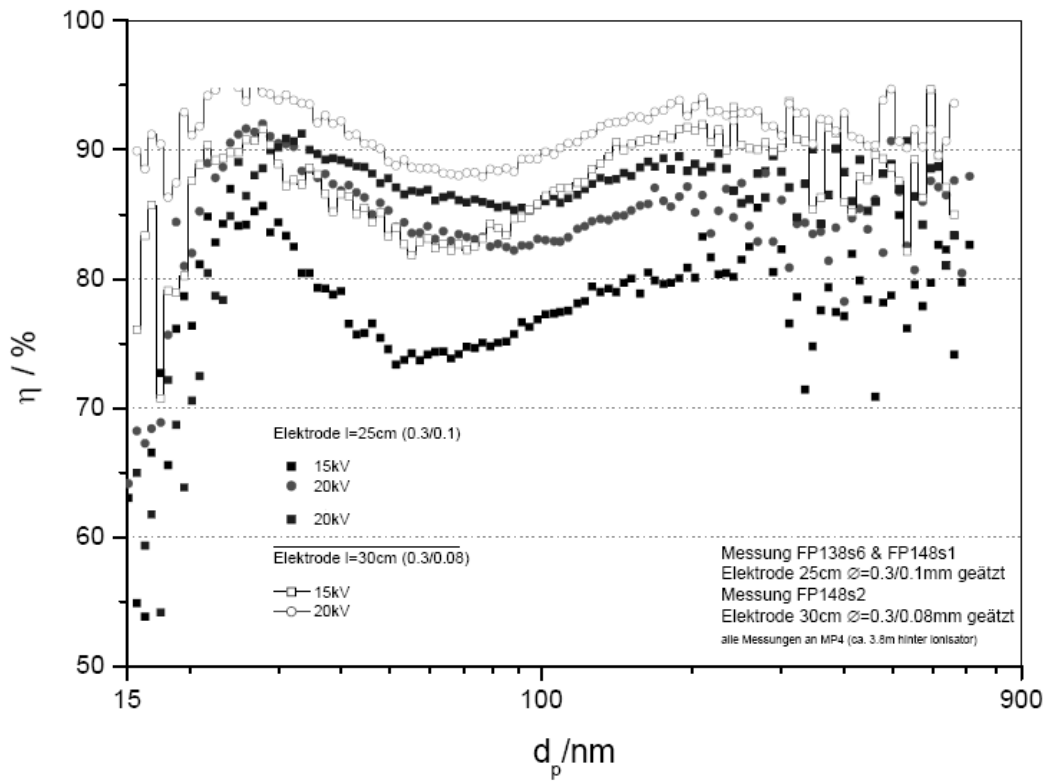
Paras keräyshyötysuhde saavutettiin pitkällä koronalangalla (Kuva 27), joka kiinnitettiin kahdesta eristetystä kohdasta savukanavaan. Nämä kaksi jännitteen läpivientikohtaa aiheuttivat ongelmia, sillä sähkösuotimen toimiessa eristeille ja niiden välille kerrostui nokea. Lisäksi ohut, pitkä koronalanka joutui kestämään suurta lämpövaihtelua sekä taipui sähkökentässä merkittävästi.

Parhaaksi vaihtoehdoksi arvioitiin koronavaraaja, jonka jännite tuotiin yhdestä läpivientikohdasta. Läpivientikohdassa käytettiin halpaa 100 kV/mm kestävää eristettä. Eristettä jouduttiin viilentämään, sillä se sulii jo 350°C lämpötilassa, siksi eristeen ympäri puhallettiin ilmaa savukanavaan. Ilmapuhalluksen avulla eristeen pinta saatiin pysymään myös puhtaampana kuin ilman puhallusta.

Varaajaelektrodin materiaalina käytettiin mm. terästä ja muutaman watin teholla saavutettiin laboratoriotesteissä yli 80 % keräyshyötysuhde (Kuva 28). Kenttätesteissä tällä sähkösuotimella on saavutettu kaikissa testeissä ainakin 50 %:n keräyshyötysuhde ja viimeisillä versioilla 60-80 %:n keräyshyötysuhde.

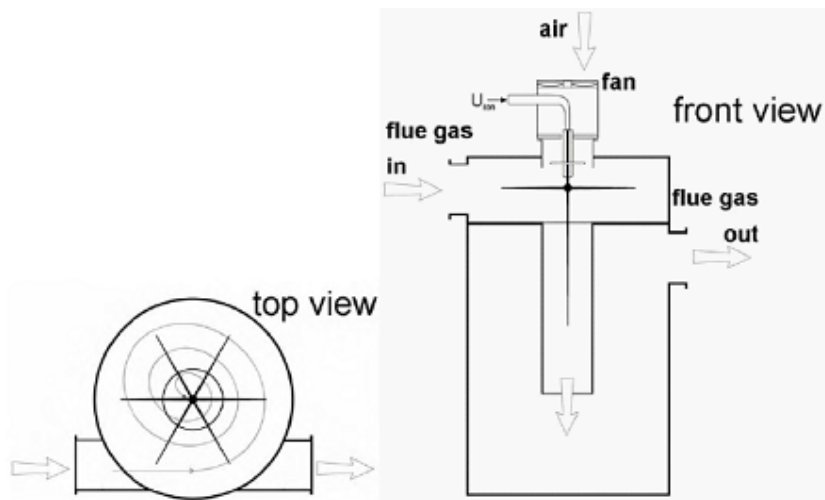


Kuva 27: Lankamalliset varaajaelektrodit [36, suom.]



Kuva 28: Laboratoriotesteissä saavutettu keräyshyötysuhde hiukkaskoon mukaan [35]

Sähkösuodinta on kehitetty lisäksi automaattisesti toimiviin 100 kW:n polttolaitteisiin, joissa on käytetty kahta rinnakkaista suodinlaitteistoa. Suotimissa käytetään piikkipäistä varaajaelektrodia, ja varatut hiukkaset johdetaan erilliseen kammioon, jossa ne savukaasunvirtausnopeuden laskiessa kiinnittyvät kammion seiniin tai laskeutuvat sen pohjalle (Kuva 29). Rinnakkaisten suotimien avulla saavutetaan yhtä suodinta parempi keräyshyötysuhde ja laitteiston toimiessa toista suodinta voidaan huoltaa ja puhdistaa toisen toimiessa. Tällä sähkösuodinrakenteella on saavutettu 60- 80 %:n hyötysuhde, suodinjärjestelmä on helposti skaalattavissa erikokoisiin polttolaitteisiin ja sen virrankulutus on alle 12 W. Laitteiston hinnaksi on arvioitu 1000-1500 euroa.

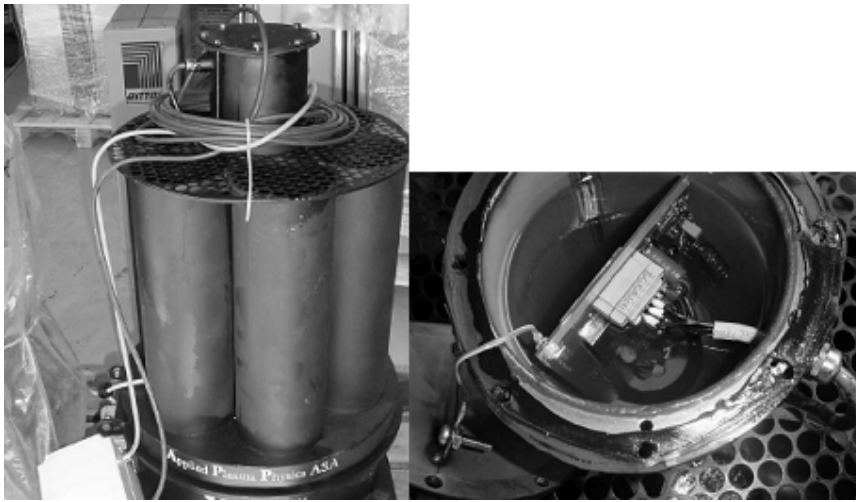


Kuva 29: 100 kW-teholuokkaan kehitetty sähkösuodinratkaisu [35]

10.2 CleanAir²

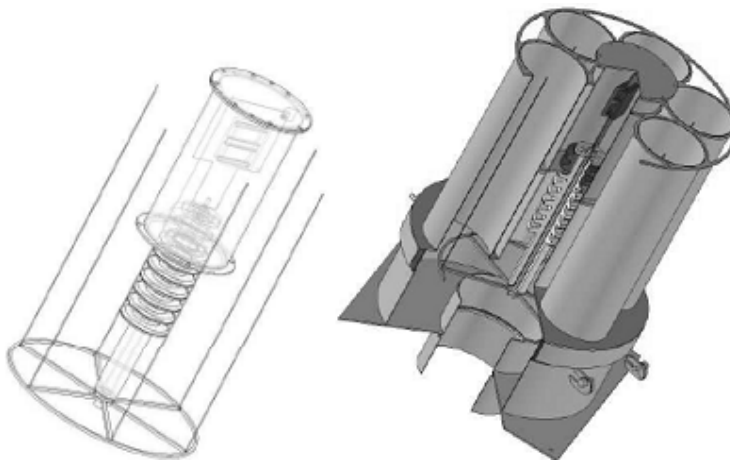
Sähkösuodinta pienpoltttoon kehitettiin vuosina 2002-2004 CleanAir-projektissa, jonka kustannukset olivat 1,3 milj. euroa. Teollisuuden osalta projektissa oli osajia Norjasta, Tanskasta, Saksasta, Slovakiasta ja Iso-Britanniasta. Projektissa kehitettiin savupiipun yläosaan liitettävä sähkösuodin (Kuva 30), jolla saavutettiin testeissä 90-95 %:n keräyshyötysuhde. Laitteen hinnaksi on arvioitu 400 euroa, jopa alle 250 euroa jos sarjatuotanto saadaan käyntiin. Laitteen tehonkulutus on alle 120 W ja se on suunniteltu keräämään jopa 20 kg hiukkasainesta. Mekaanisten osien on suunniteltu kestävän 20 vuotta. Sähkösuodinlaitteessa on automaattinen käynnistys ja sammutus polttotilanteen mukaan, sen painehäviön ei pitäisi vaikuttaa polttolaitteen toimintaan ja savupiipun nuohouksen toteuttamiseksi sähkösuodin voidaan kääntää sivuun.

² Lupa tekstiin: Applied Plasma Physics ASA, Norway



Kuva 30: CleanAir -sähkösuodin

CleanAir sähkösuodinta on testattu puupolttolaitteiden lisäksi myös öljypolttimilla. Vanhoilla tulisijoilla testattaessa sähkösuotimen avulla hiukkaspäästötasoksi on saatu 4-5 mg/MJ. Laite koostuu 25 osasta, sen halkaisija on 424 mm, korkeus 526 mm ja kuuden sylinterimäisen keräysputken halkaisijat 129 mm ja pituudet 400 mm (Kuva 31).



Kuva 31: CleanAir sähkösuodin, rakennekuva

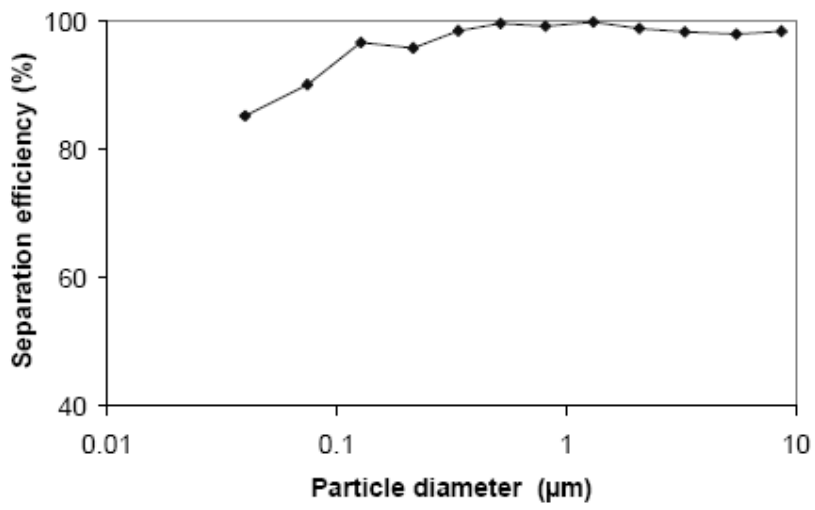
ClearAir sähkösuotimen alkutesteissä ongelmia tuotti korkeajänniteyksikön toiminta, jossa kytkettäessä esiintyi voimakkaita virtapiikkejä. Ongelmasta päästiin eroon lisäämällä muuntajan kanssa sarjaan kondensaattori. Aluksi korkeajänniteyksiköllä saavutettiin vain 20 kV:n jännite, sillä yksikön

komponenteissa syntyi kipinöintiä. Myöhemmässä prototyypissä yksikön eriste-etäisyyksiä kasvatettiin ja lisättiin oikosulkusuojaus, jolloin laitteella saavutettiin -40 kV:n jännite. Varaajaelektrodin tukema keraaminen eriste todettiin liian kalliiksi massatuotantoa varten.

ClearAir sähkösuodinta on testattu Norjalaisessa talossa, jossa se liitettiin piipun yläpäähän. Polttolaitteena käytettiin 1960-luvun panospolttoperiaattella toimivaa tulisijaa. Testeissä poltettiin 700 kg puuta, jonka keskimääräinen kosteusprosentti oli 20 %. Testit kestivät 350 h, jonka todettiin vastaan keskimääräistä yli vuoden mittaista norjalaista lämmityskautta. Sähkösuodin asetettiin käynnistymään, kun savukaasun lämpötila nousi yli 45°C:een. Savukaasun lämpötila piipun yläpäässä oli suurimmillaan 128°C lämpöistä. Tässä lämpötilassa suotimeen kerääntynyt noki-terva-aines oli varsin notkeaa ja helposti poistettavaa. Kuitenkin varaajaelektrodille ja sen eristeelle kerääntynyt aines aiheutti voimakasta kipinöintiä ja sähkösuodin jouduttiin ainakin kerran pysäyttämään testin aikana ja varaajaelektrodi sekä sen eriste puhdistettiin. Tätä puhdistettua hiukkasmassaa ei otettu huomioon keräyshyötysuhdetta arvioitaessa. Testin aika sähkösuotimeen kerääntyi 4,4 kg hiukkasainesta ja keräyshyötysuhteeksi saatiin 80-91 % (Kuva 33).



Kuva 32: CleanAir sähkösuotimen sisäkuva ennen ja jälkeen polttotestin



Kuva 33: CleanAir -sähkösuotimella saavutettu keräyshyötysuhde

11 Johtopäätökset

Tämän työn tarkoituksena on ollut selvittää mahdollisuuksia poistaa pienpolton savukaasun hiukkasia sähköisesti. Pienpolttokokoluokka poikkeaa varsin paljon suurempien polttolaitosten tilanteesta, sillä pienpoltossa savukaasujen ominaisuudet muuttuvat nopeasti erityisesti panospolton osalta. Jatkuvassa pellettipoltossa polttoaineen laatu on tasaista, kosteuspitoisuus on varsin pieni ja polttoprosessin hallittavuus ja olosuhteet paremmat kuin panospoltossa.

Savukaasun happipitoisuus on pienestä ilmakertoimesta johtuen jatkuvassa poltossa panospolttoa pienempi. Polttotapahtuman täydellisyyttä voidaan kuvata ilmakertoimella, sillä ilmakerrointa kasvattamalla polton hyötysuhde heikkenee ja pienhiukkaspäästöt kasvavat. Teoreettisesti paras poltto saavutetaan ilmakertoimella 1. Pienpolton kokoalueella tämän hetken polttolaitteilla ilmakertoimen pienetessä 1,5 kohdille ei ilman sekoittuminen palotilassa ole riittävän täydellistä, jolloin osa polttoaineesta jää palamatta. Samalla noen osuus hiukkaspäästöissä kasvaa voimakkaasti. Jos polttoaineena käytetään tuoretta tai kostea puuta, jää polttolämpötila alhaiseksi ja hiilivetyypäästöt kasvavat, mistä seuraa savukanavan tiivistyneiden tervojen lisääntyminen.

Pienpolton hiukkaspäästö koostuu lentotuhkasta, noesta ja tervoista, ja niiden yhdistelmästä. Savukaasuvirran nopeus ratkaisee sen, kuinka suuri aines pystyy liikkumaan savukaasuvirran mukana. Pienpolton hiukkaspäästön jakauma on kaksihuippuinen, jossa on pienhiukkasten- ja karkeiden, suurempien hiukkasten alue. Suurempien hiukkasten eli karkeiden hiukkasten kokoalueen osuus voi polttolaitteesta ja savukanavasta riippuen olla kokonaishiukkasmassan osalta paljon suurempikin kuin pienhiukkaskokoalueesta tuleva hiukkasmassa.

Hiukkasten alkuainesisällöistä on jonkin verran vaihtelevaa tietoa ja pienhiukkasten osalta puun pienpolton kokoluokassa hiilisisältö on 50-60 p-%. Savukaasuhiukkasten lukumäärä pienpoltossa on 10^{12} - 10^{14} kpl/MJ, panospoltossa syttymisvaiheen hiukkaspitoisuus on suurin ja nosta koko polttotapahtuman ajalta kokonaishiukkaspäästön suuremmaksi kuin jatkuvassa poltossa.

Savukaasunhiukkasten suuri kokovaihtelu ja niiden aerosolimekanismit yhdistettynä vaihteleviin poltto-olosuhteisiin ja laitteisiin tekevät matemaattisen mallintamisen haastavaksi. Hiukkasten halkaisija on tärkeä arvo laskennan kannalta, jolloin hiukkaseen vaikuttavia voimia voidaan arvioida. Hiukkasia voidaan poikkeuttaa savukaasusta sähkökentän avulla, mikäli hiukkaset on varattu sähköisesti. Sähkösuotimella voidaan tuottaa hallittu hiukkasten varaaminen ja kerääminen savukaasuvirrasta. Sähkösuotimen korkeaan keräyshyötysuhteen pyrittäessä on suotimen koko mitoitettava sopivaksi savukaasuvirtaan nähden. Kun hiukkaset on saatu varattua, on ne kerättävä vahvalla sähkökentällä kerääjällevyille.

Puun pienpoltossa pienhiukkasten kokojakauman huippu osuu kiusallisesti polttolaitteesta ja -tavasta riippumatta sähkösuotimen heikoimmalle alueelle, mikä on $0,3 \mu\text{m}$. Sähkösuotimessa tai erillisessä keräysoosassa saavutettava sähkökenttä on korkean hyötysuhteen avaintekijä.

Suotimella kerätty hiukkasaine on aika-ajoin poistettava jatkuvan toiminnan mahdollistamiseksi. Keräyslevyille kertynyt hiukkasaine heikentää sähkösuotimen toimintaa, sillä se heikentää sähkökenttää ja hiukkasaineksessa saattaa korkeassa sähkökentässä syntyä vasta-korona -ilmiötä eli kipinöintiä. Hiukkasaineksen ominaisuuksista hiukkasten resistiivisyys vaikuttaa hiukkasten kiinnittymiseen keräyspinnoille. Resistiivisyys muuttuu lämpötilan ja hiukkasten ominaisuuksien mukaan. Puun poltossa korkea hiukkasaineksen hiilipitoisuus johtaa hiukkasten pieneen resistiivisyyteen, jolloin hiukkaset tarttuvat heikosti keräyspinnoille.

Kerätyn hiukkasaineksen poisto voidaan tehdä ravistamalla, jolloin riittävän kiihtyvyyden avulla hiukkaskerros irtaana paloina. Ravistettu

hiukkasaines on kerättävä talteen, eikä se saa joutua takaisin savukaasuvirtaan. Pienpoltossa kerätyn hiukkasaineksen massasta jopa puolet on palavaa, joten ainakin teoriassa tämä hiukkasaines voitaisiin polttaa keräimessä.

Sähkösuotimen asentaminen savukanavaan saattaa lisätä nokipalon riskiä. Nokipalo voi pienpoltossa syttyä, jos savukanavaan on kerääntynyt herkästi palavaa hiukkasainesta, joka voi syttyä voimakkaan tai väärän lämmittämisen johdosta.

Viime vuosina on ainakin kahdessa eri paikassa kehitetty pienpolttokokoluokkaan soveltuva sähkösuodin. Rakennetuissa, osin patentoiduissa sähkösuotimissa on saavutettu korkea keräyshyötysuhde. Sveitsiläisessä mallissa keräintä on kokeiltu savukanavan alkuosassa, jossa savukaasun korkea lämpötila on korkea. Tällöin keräimen hiukkaskerroksen paksuus ei kasvanut muutamaa milliä paksummaksi, sillä korkeasta hiukkasaineksen hiilipitoisuudesta johtuen tässä varsin kevyessä ja avoimessa kerroksessa tapahtui hapettumista. Samalla saavutettiin ainakin yli 50 %:n keräyshyötysuhde usean kuukauden ajalta. Norjalaisessa sähkösuodinlaitteessa suodin koostuu useasta varaaja- ja keräystilasta, ja koko laite on suunniteltu asennettavaksi piipun päälle. Tällä laitteella on saavutettu testeissä vuoden lämmityskäyttöä vastaava toiminta-aika, mutta virrankulutus ja kipinäinti ovat suuremmat kuin sveitsiläisessä mallissa.

Lähdeluettelo

- [1] Aho, M., 2005, YMP465 Vaativien ja jäteperäisten biomassojen poltto, luentomoniste, Uusiutuvan energian koulutusohjelma, Jyväskylän yliopisto
- [2] Alakangas, E., 2000, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 2045, Espoo
- [3] Asmi, A., 2000, Ulkoilman pienhiukkaspitoisuuden vaikutus sisäilman pitoisuuksiin, Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto
- [4] Berntsen, M., Industrial Validation, "CleanAir" Task 4.1. EVK4-CT-2001-30005
- [5] Choi, Dong Ho, 1991, Experimental study of ash layer rapping and re-entrainment from the collector plates of a laboratory-scale electrostatic precipitator, Ph.D. thesis, Stanford University, USA
- [6] Gustavsson, L., Johansson, M., Rönnbäck, M., 2001, Sotbeläggningar och brandrisk, SP-Sveriges Provnings- och Forskiningsinsitut
- [7] Haaland, A., T., 2005, End-of-pipe solution for removing respirable particles from combustion of solid fuels in domestic households. Bioenergy 2005 esitys saatavilla PDF-muodossa <
<http://www.bioenergy2005.no/downloads/Presentationer/26.%20oktober/1D/Arne%20Thomas%20Haaland.pdf>>, viitattu 11.1.2006.
- [8] Haaparanta, S., Myllynen, M., Koskentalo, T., 2003, Pienpoltto pääkaupunkiseudulla, Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2003:18, Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV)
- [9] Henriksen, E., 2004, Industrial Validation, "CleanAir" Task 4.2. EVK4-CT-2001-30005
- [10] Hinds, W., C., 1982, Aerosol Technology, Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, John Wiley & Sons, USA
- [11] Horttanainen, M., 1999, Syttyminen ja palamisen eteneminen partikkelikerroksessa, Lisensiaattitutkielma, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lpr

- [12] Häkkinen, P., Kehittynyt lämmön talteenotto (KELTO), TKK Laivalaboratorio
- [13] Johansson, L., S., 2002, Characterisation of Particle Emissions from Small-Scale Biomass Combustion, Licentiate Thesis, Göteborg, Sweden
- [14] Karvosenoja, N., Johansson M., and Porvari P., 2003, Emissions of Particulate, Sulphur Dioxide and Nitrogen Oxides from Biomass Combustion in Finland, Proceedings of International Nordic Bioenergy Congress and Exhibition 2.-5.9.2003, Jyväskylä, Finland, pp. 310-312.
- [15] Karvosenoja, N., et al., 2004, Fine Particulate Matter Emissions from Residential Wood Combustion and Reduction Potential in the Nordic Countries, Proceedings of the 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress and Exhibition, London 22-27 August 2004. 6 pp.
- [16] Kemenade, E., 2005, Aerosol and Particle Transport in Biomass Furnaces. Saatavilla PDF-muodossa <
http://www.ieabcc.nl/meetings/task32_Graz_aerosols/09_Kemenade.pdf>, viitattu 11.1.2006.
- [17] Kim, S.H., Lee, K.W., 1999, Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models, Journal of Electrostatics 48, (1999) : 3-25
- [18] Kim., S.H., Lee, K.W.,1999, Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles, Journal of Electrostatics 50, (2001) : 177-200
- [19] Klippel, N., 2005, Health Relevance of Aerosols from biomass Combustion in Comparison to Diesel Soot Indicated by Cytotoxicity Tests. Saatavilla PDF-muodossa <
http://www.ieabcc.nl/meetings/task32_Graz_aerosols/05_Klippel.pdf>, viitattu 11.1.2006.
- [20] Lehtimäki, M., 2000, Electrostatic Precipitators Fundamentals, Industrial Ventilation Design Guide Book, VTT Automation
- [21] Lehtimäki, M., Staattisen sähkön hallinta puhdistilatuotannossa, VTT, Automaatio
- [22] Moisio, M., 1997, Palamis aerosolien kokojakaumien mittaaminen sähköisellä alipaineimpaktorilla, Lisensiaattityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu
- [23] Nóbrega, S. W., 2004, A Study of a Wire-Plate Electrostatic Precipitator Operating in the Removal of Polydispersed Particles, Brazilian Journal of Chemical Engineering

- [24] Obernberger, I., 2005, Fly ash and aerosol formation in biomass combustion processes –an introduction, saatavilla PDF-muodossa <http://www.ieabcc.nl/meetings/task32_Graz_aerosols/01_Obernberger.pdf>, viitattu 11.1.2006.
- [25] Obernberger, I., Brunner, T., 2005, Aerosols in Biomass Combustion, Formation, characterisation, behavior, analysis, emissions, health effects
- [26] Parker, K.,R., 1997, Applied Electrostatic Precipitation, Chapman & Hall, Blackie Academic & Professional
- [27] Pietilä, K., 2005, Puun pienpolton identifionti ja säätö tulisijassa, DI-työ, Oulun yliopisto
- [28] Podliński, J., et al., EHD Flow in a Wide Electrode Spacing Spike-Plate Electrostatic Precipitator under Positive Polarity, Centre for Plasma and Laser Engineering, The Szewalski Institute of Fluid Flow Machinery, Polish Academy of Sciences, Fiszer 14, 80-231, Gdańsk, Poland
- [29] Podliński, J., et al., Electrohydrodynamic Gas Flow in a Positive Polarity Wire-Plate Electrostatic Precipitator and the Related Dust Particle Collection Efficiency, Centre for Plasma and Laser Engineering, The Szewalski Institute of Fluid Flow Machinery, Polish Academy of Sciences, Fiszer 14, 80-231, Gdańsk, Poland
- [30] Puolamäki, K., 2004, Hiukkaspäästöt, niiden mittaaminen ja vähentäminen, kurssimonistesarjassa "KEM502 Uusiutuvan energian laudatur-seminaari", Uusiutuvan energian maisteriohjelma, Jyväskylän yliopisto, s. 16-31. Saatavilla PDF-muodossa <http://www.uusiutuvaenergia.jyu.fi/frame_left/UEsem2004-Puolamaki.pdf>, viitattu 11.1.2006.
- [31] Raizer, Y., 1991, Gas Discharge Physics, Springer-Verlag
- [32] Raunemaa, T., Tissari, J., 2003 Puun pienpolton hiukkaspäästöt, Puuenergia-esitys
- [33] Saarnivuo, T., 2005, Tulisija ja savuhormitulipalot 2004, Syyt, aiheuttajat, vahingot ja muutokset, Tukes
- [34] Sarkkinen, S., 2005, Päästömääräykset -nyt ja huomenna, -Lämpöä ja sähköä puhtaasti-seminaari
- [35] Schmatloch, V., 2005, Exhaust Gas Cleaning for small wood fired appliances - recent progress and field test results, saatavilla PDF-muodossa <http://www.ieabcc.nl/meetings/task32_Graz_aerosols/14_Schmatloch.pdf>, viitattu

11.1.2006.

[36] Schmatloch, V., Rauch, S., 2004, Design and characterisation of an electrostatic precipitator for small heating appliances, *Journal of Electrostatics* 63, (2005) 85-100

[37] Sippula, O., 2002, Puun pienpolton hiukkastuoton analyysi, DI-työ, Kuopion yliopisto, Kuopio

[38] Strand, M., 2004, Particle Formation and Emission in Moving Grate Boilers Operating on Woody Biofuels, Ph.D Thesis, Växjö University

[39] Talka, I., 2005 Pienpolton mittaustulosten virheanalyysia, Erikoistyö, Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto

[40] Talka, I., 2005, Mahdollisuudet vähentää savukaasun hiukkaspitoisuuksia pienpoltossa (<100 kW), UE-laudatur-seminaari

[41] Thun, R., Korhonen, M., 1998, SIHTI 2, Energia- ja ympäristöteknologia tutkimusohjelman vuosikirja 1998, Projektiesittelyt, VTT

[42] Tissari, J., et al., 2005, Puun pienpolton pienhiukkaspäästöt, Loppuraportti (PIPO), Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja, Kuopion yliopisto

[43] Tullin, C., 2005, Particle Emissions from Residential Biofuel Boilers and Stoves - Old and Modern Techniques. Saatavilla PDF-muodossa <

http://www.ieabcc.nl/meetings/task32_Graz_aerosols/12_Tullin.pdf>, viitattu

11.1.2006.

[44] Tähti, A., 1998, Dimesioning of a Tubular Electrostatic Precipitator, Master's Thesis, Helsinki University of Technology

[45] Wiinikka, H., 2005, High Temperature Aerosol Formation and Emission Minimisation during Combustion of Wood Pellets, Doctoral Thesis, Luleå University

[46] Willike, K., Baron, P., A., Aerosol Measurement, Principles Techniques and Applications, John Wiley & Sons, USA

[47] Yli-Penttilä, M., 1981, Tutkimus pienten savuhormien nokipaloista ja nuohoustarpeesta, Valtion teknillinen tutkimuskeskus

[48] Zehenhoven, R., Kilpinen, P., 2001, Control of Pollutants in Fuel Gases, Teknillinen korkeakoulu

[49] Zhang, X., 1992, Soot and soot fires in wood combustion, Thesis for Licentiate of Engineering

[50] Ålander, T., 2000, Palamishiukkasten orgaanisen ja epäorgaanisen hiilen analyysi, Lisensiaattitutkimus, Kuopion yliopisto

[51] Johansson, L., Tullin, C., Partikelbildning vid biobränsleförbränning, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut