



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

MIKAEL KALLIOKOSKI

**DIFFUUSIOVARAUTUMISEEN PERUSTUVAN PIENHIUKKAS-
SUODATTIMEN KEHITYS**

Diplomityö

Tarkastajat: Prof. Jyrki Mäkelä ja
TkL Ari Laitinen
Aihe ja tarkastajat hyväksytty
Luonnontieteiden ja ympäristötekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
7. syyskuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma

KALLIOKOSKI, MIKAEL: Diffuusiovarautumiseen perustuvan pienhiukkas-suodattimen kehitys

Diplomityö, 72 sivua

Lokakuu 2011

Pääaine: Teknillinen fysiikka

Tarkastajat: Prof. Jyrki Mäkelä ja TkL Ari Laitinen

Avainsanat: Diffuusiovarautuminen, puhallusvaraaja, sähkösuodatin, keräystehokkuus

Tässä työssä tarkoituksena oli kehittää sähköinen pienhiukkasuodatin, joka koostuu puhallusvaraajista sekä keräimestä. Sylinterimäisen puhallusvaraajan sisälle synnytetään koronapurkaus ja syntyneet ionit puhalletaan paineilmalla ulos varaajasta. Pituudeltaan noin metrin kokoinen Suula-keräin koostuu useista keräyslevyistä ja sen kokonaiskeräyspinta-ala on noin 30 m². Pitemmässä ja kapeammassa prototyyppikeräimessä on yksi keräyslevy, jonka pinta-ala on noin 0,4 m². Sen sisääntuloon ja ulosmenoon sijoitetuilla virtausohjaimilla pyritään parantamaan virtausgeometriaa.

Aerosoli on kaasun sekä kiinteiden tai nestemäisten hiukkasten muodostama seos. Hiukkaset jaotellaan niiden koon perusteella hienoihin, karkeisiin ja siirtymäalueella oleviin. Niiden lukumäärään, kokoon ja muotoon vaikuttavat nukleaatio, tiivistyminen ja haihtuminen sekä koagulaatio ja agglomeraatio. Hiukkasen koko vaikuttaa ratkaisevasti sen fysikaalisiin ominaisuuksiin.

Diffuusiovarautumisessa lämpöliike saa ionit törmäilemään hiukkasiin ja siirtämään varauksensa niihin. Hiukkasia voidaan varata diffuusiolla tehokkaasti käyttäen ionien lähteenä joko radioaktiivista lähdettä tai koronapurkausta. Koronapurkaus saadaan aikaan käyttämällä teräväreunaista elektroodia, johon tuodaan korkea negatiivinen tai positiivinen jännite. Kenttävarautumisessa sähkökentän kenttäviivojen mukaisesti kulkevat ionit törmäävät virtauksessa kulkeviin hiukkasiin ja siirtävät varauksensa niihin. Diffuusiovarautuminen on tehokkainta pienillä ja kenttävarautuminen suurilla hiukkasilla.

Suodattimia on mekaanisia ja sähköisiä. Sähkösuodattimen on pystyttävä varaamaan hiukkaset ja tuottamaan suuri sähkökenttä, jolla varatut hiukkaset saadaan kulkeutumaan keräyspinnoille. Lisäksi on oltava mekanismi keräytyvän hiukkasaineen poistoon. Sähkösuodattimet ovat rakenteeltaan joko sylinteri- tai levymallisia ja toiminnaltaan yksi- tai kaksivaiheisia. Hiukkasia suodatetaan ilmakehän saastumisen estämiseksi, laitteiden suojaamiseksi sekä arvokkaiden hiukkasten keräämiseksi talteen.

Työssä mitattiin puhallusvaraajan tuottamaa ionituottoa ja tilavuusvirtausta, sen likaantumista sekä hiukkasille aikaansaatuja varauslukua. Suula-keräimellä mitattiin keräystehokkuutta TTY:n laboratoriossa ja Wärtsilän tehtaalla. Kokonaiskeräystehokkuuksiksi saatiin vastaavasti noin 80% ja 65%. Jälkimmäisen mittauksen huonompi keräystehokkuus saattoi johtua hiukkaskokojakauman epästabiilisuudesta vielä keräimessäkin sekä keräimessä palaneesta koronapurkauksesta. Prototyyppikeräimelle mitattiin TTY:n laboratoriossa kokonaiskeräystehokkuudeksi parhaimmillaan noin 70%. Laboratoriossa mitatut keräystehokkuudet olivat erittäin hyvät, kun otetaan huomioon käytettyjen keräimien koko ja keräyspinta-ala.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Science and Engineering

KALLIOKOSKI, MIKAEL: Development of the fine particles precipitator which is based on the diffusion charging

Master of Science Thesis, 72 pages

October 2011

Major: Technical Physics

Examiner: Prof. Jyrki Mäkelä and TkL Ari Laitinen

Keywords: Diffusion charging, blow charger, electrostatic precipitator, collection efficiency

In this work, the aim was to develop the electrostatic precipitator which consists of blow chargers and collection part. Corona discharge is born inside the cylindrical blow charger and the ions which have been born are blown out from the charger. The collection part which was named as a Suula is about one meter length and it consists of many collecting plates of which the surface area is in total about 30 m². In a longer and narrower prototype collection part there is only one the collecting plate of which the surface area is about 0,4 m². To its entrance and egress have been built air deflectors which lead up to improve flow geometry.

The aerosol is the mixture formed by gas and solid or fluid particles. The particles are categorized on the basis of their size. Nucleation, condensation, evaporation, coagulation and agglomeration affect their number, size and form.

In the diffusion charging ions crash into particles by thermal radiation and transfer their charge to them. The particles can be effectively charged by the diffusion using either the radioactive source or the corona discharge as a source of ions. In the field charging ions, which are going along the field lines of the electric field, crash into particles and transfer their charge to them.

The electric precipitator must be able to charge the particles and produce the high electric field so that charged particles will collect to the collecting surfaces. The electric precipitators have a either cylindrical or laminar structure and they operate either one-phasesly or two-phasesly. The particles are filtered for to prevent the pollution of the atmosphere, to protect devices and to recover valuable particles.

In this work were measured to ion yield and volume flow produced by blow charger. Furthermore, the getting dirty of the blow charger were studied and charge number of particles produced by the blow charger. With the Suula collection part was measured collection efficiency in the laboratory of TTY and at the factory of Wärtsilä Oyj. As collection efficiency about 80% and 65% were obtained correspondingly. The worse collection efficiency of the later measurement may still have been caused by the instability of the particle size distribution and by the corona discharge which had burnt in a collection part. To the prototype collection part was measured collection efficiency at best about 70% in the laboratory of TTY. The collection efficiencies that were measured in the laboratory were extremely good when the size and collecting area of the used collection part are taken into consideration.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Aerosolifysiikan laboratoriossa vuoden 2010 lokakuun ja 2011 syyskuun välisenä aikana. Työn ohjaajana toimi tekniikan tohtori Jukka Hautanen TassuESP Oy:stä. Työn tarkastajina toimivat professori Jyrki Mäkelä sekä tekniikan lisensiaatti Ari Laitinen.

Haluan kiittää kaikkia niitä henkilöitä, jotka ovat osaltaan auttaneet diplomityöni valmistumisessa. Ari Laitiselle ja Jukka Hautaselle osoitan erityiskiitokseni työn aikana saamastani tuesta ja neuvoista. Aivan erityisesti haluan kiittää rakasta vaimoani Soilia tuesta ja kannustuksesta sekä avusta yksityiskohdissa. Pikkuiselle ja rakkaalle Miropojalleni taas osoitan kiitokset päivieni piristämisestä, jonka ansiosta jaksoin raskaan kirjoittamisurakan.

Tampereella 15.9.2011

Mikael Kalliokoski

SISÄLLYS

1.	Johdanto	1
2.	Aerosolihiukkasten ominaisuuksia	2
2.1.	Reynoldsin luku	4
2.2.	Hiukkasen putoamisnopeus.....	5
2.3.	Brownin liike ja diffuusio	6
2.4.	Aerosolihiukkasten dynaamiset prosessit	7
3.	Hiukkasten sähköinen varautuminen	10
3.1.	Diffuusiovarautuminen	12
3.2.	Kenttävarautuminen	14
3.3.	Yhdistetty varautuminen	16
3.4.	Muita varautumismalleja.....	17
3.5.	Hiukkasen teoreettinen maksimivaraus.....	18
4.	Koronapurkaus	19
4.1.	Koronan sähköisiä ominaisuuksia kuvaavat yhtälöt	21
5.	Hiukkasten sähköinen suodatus	24
5.1.	Suodattimen keräystehokkuuden arviointi.....	26
5.1.1.	Deutsch-Andersonin yhtälön johto sylinterimalliselle suodattimelle...28	
5.1.2.	Deutsch-Andersonin yhtälön johto levyimalliselle suodattimelle.....29	
5.2.	Keräytyvän hiukkasaineoksen tarttuminen ja poistaminen.....	31
6.	Puhallusvaraaja ja hiukkaskeräimet	33
7.	Mittausjärjestelyt.....	37
7.1.	ELPI	39
8.	Tulokset.....	42
8.1.	Puhallusvaraajan toimintaan liittyvät mittaukset	42
8.2.	Mittaus 1: Mittaukset Suula-keräimellä TTY:n laboratoriossa.....	51
8.3.	Mittaus 2: Mittaukset Suula-keräimellä Wärtsilässä.....	55
8.4.	Mittaus 3: Mittaukset prototyypikeräimellä TTY:n laboratoriossa	60
9.	Yhteenveto	66
	Lähteet.....	69

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ELPI	Sähköinen alipaineimpaktori (engl. Electrical Low Pressure Impactor)
ESP	Sähkösuodatin (engl. Electrostatic Precipitator)
SMPS	Skannaava liikkuvuuskokoluokittelija (engl. Scanning Mobility Particle Sizer)
Ar	Argon
CCl ₄	Tetrakloorimetaani
Cl ₂	Kloori
CO ₂	Hiilidioksidi
HF	Fluorivety
H ₂ O	Vesi
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
Ne	Neon
O ₂	Happi
O ₃	Otsoni
SF ₆	Rikkifluoridi
Am-241	Amerikium-241
Kr-85	Kromi-85
Ni-63	Nikkeli-63
ϵ_0	Tyhjiön permittiivisyys ($8,854187817 \cdot 10^{-12}$ F/m)
ϵ_r	Hiukkasen suhteellinen permittiivisyys
η	Fluidin viskositeetti [Ns/m ²]
η_r	Referenssiviskositeetti ($\eta_r=182,03\mu\text{P}$, kun $T_r=293,15$ K) [Ns/m ²]
η_{diff}	Hiukkasen läpäisykerroin
η_s	Suodattimen keräystehokkuus
γ	Nestemäisen hiukkasen pintajännitys
δ	Ilman suhteellinen tiheys [kg/m ³]
λ	Kaasun vapaa matka [m]
λ_i	Ionin vapaamatka [m]

λ_r	Kaasun vapaa matka, kun lämpötila $T=20^\circ\text{C}$ ja paine $P=101,3\text{ kPa}$ (tällöin $\lambda_r=0,0665\text{ }\mu\text{m}$)
ρ	Fluidin tiheys [kg/m^3]
ρ_g	Väliainekaasun tiheys [kg/m^3]
τ	Relaksaatioaika
τ_Q	Aikavakio
χ	Muototekijä
A	Suodattimen keräyspinta-ala [m^2]
a	Koronakärkenä käytettävän langan säde [m]
B	Mekaaninen liikkuvuus [kg/s]
b	Sylinterielektrodin säde [m]
C_c	Cunninghamin liukukorjauskerroin
C_D	Hiukkasen muodosta, koosta ja nopeudesta riippuva kitkakerroin
c_i	Ionien keskimääräinen terminen nopeus kaasussa [m/s]
D	Diffuusiokerroin [m^2/s]
D_B	Brownin diffuusiokerroin [m^2/s]
De	Deutschin luku
D_H	Hiukkasten keskimääräinen etäisyys keräyspinnasta [m]
D_p	Hiukkasen diffusiviteetti [m^2/s]
D_t	Turbulenttinen diffuusiokerroin [m^2/s]
d	Virtauskanavan tai hiukkasen halkaisija [m]
d_0	Hiukkasen alkuperäinen halkaisija ennen koagulaatiota [m]
d_c	Näytteenottoputken halkaisija
d_p	Hiukkasen halkaisija [m]
d_t	Putken halkaisija [m]
d_w	Johtimen halkaisija [m]
E	Sähkökentän voimakkuus [V/m]
E_0	Syttymiskenttä [V/m]
E_C	Syttymiskenttä eli sähkökentän voimakkuus, joka vaaditaan koronan syttymiseksi
E_L	Kentän voimakkuus hiukkasen pinnalla, millä varaus emittoituu spontaanisti hiukkasesta pois [V/m]
e	Alkeisvaraus ($1,602\cdot 10^{-19}\text{ C}$)

F_d	Hiukkasen vastusvoima
F_E	Sähköinen voima, joka kohdistuu varautuneeseen hiukkaseen sähkökentässä
F_i	Hitausvoima [N]
F_j	Kitkavoima [N]
H	Keräyslevyjen korkeus [m]
i	Koronavirta [A]
J	Keräyslevyjen etäisyys toisistaan [m]
j_{NE}	Virantiheys [mA/m^2]
K	Koagulaatiokerroin [m^3/s]
K_E	Coulombin vakio ($8,987 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}$)
k	Koronakärjen naarmuista ja likaisuudesta yms. riippuva empiirinen kovuustekijä
k_B	Boltzmannin vakio ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)
L	Putken, suodattimen pituus [m]
M	Hiukkasen moolimassa [g/mol]
N	Hiukkasten tilavuuslukumäärä [kpl/m^3]
dN	Keräytyvien hiukkasten lukumäärä [kpl/m^3]
N_0	Hiukkaspitoisuus alussa [kpl/m^3]
N_{ennen}	Hiukkaspitoisuus ennen sähkösuodatinta [mg/m^3] tai [$\#/\text{cm}^3$]
N_i	Ionien pitoisuus kaasussa [kpl/m^3]
$N_{\text{jälkeen}}$	Hiukkaspitoisuus sähkösuodattimen jälkeen
N_k	K-kertaa varautuneiden hiukkasten lukumäärä
$N(t)$	Hiukkaspitoisuus ajan t kuluttua [kpl/m^3]
N_{tot}	Hiukkasten kokonaislukumäärä
n	Hiukkasten konsentraatio [kpl/m^3]
n_e	Alkeisvarausten määrä
n_L	Hiukkasen maksimivaraus [C]
n_{max}	Kenttävarautumisen maksimi [C]
$n(t)$	Hiukkasen saama varaus ajan t kuluessa
O	Suodattimen läpi pääsevien hiukkasten määrä eli läpäisy
P	Vallitseva paine [kPa]
Pe	Pecletin luku

p_0	Paine normaaliolosuhteissa
Q	Tilavuusvirtaus [m^3/s]
q	Hiukkasen varaus [C]
q_{tot}	Koronassa syntyneiden varausten lukumäärä
R	Kaasuvakio (8,3145 J/molK)
R_S	Radiaalinen etäisyys johtimesta [m]
r_t	Maaelektrodin säde [m]
r_w	Johtimen säde [m]
S	Sutherlandin interpolaatiovakio ($S=110,4$ K, kun $T=(80-2000)K$) [K]
Sc	Schmidtin luku
Sh	Sherwoodin luku
Stk	Stokes'n luku kertoo pysähtymismatkan sekä hiukkasen koon suhteen
T	Lämpötila [K]
T_0	Lämpötila normaaliolosuhteissa
T_r	Referenssilämpötila [K]
t	Lähtöhetkestä kulunut aika [s]
t_R	Viipymäaika [s]
U	Virtauksen tai hiukkasen nopeus [m/s]
U_0	Fluidin ja tutkittavan kappaleen välinen nopeusero [m/s] (virtausnopeus)
V	Koronan jännite [V]
V_0	Koronan syttymisjännite [V]
V_C	Syttymisjännite [V]
V_E	Hiukkasen ajautumisnopeus sähkökentässä tai sähkökentän hiukkaselle aiheuttama nopeus
V_i	Ionien sähköinen potentiaali
ΔV_p	Hiukkasen yli oleva potentiaaliero [V]
ΔW	Putken ja johtimen välillä vallitseva jännite-ero [V]
Z	Sähköinen liikkuvuus

1. JOHDANTO

Erilaisten poltto- tai muiden prosessien seurauksena syntyvien hiukkasten suodattamista on tehty jo pitkään. Suodattamiseen käytetään mekaanisia tai sähköisiä suodattimia, joilla pyritään poistamaan mahdollisimman suuri osa syntyneistä hiukkasista. Hiukkasten suodattamisen pääsyyt ovat niiden haitallisuus luonnolle sekä niiden ihmisille aiheuttamat terveyshaitat. Pienhiukkaspäästöistä aiheutuvat terveyshaitat ovat nousseet viime vuosina voimakkaasti yleiseenkin tietoisuuteen. Tutkimukset ovat osoittaneet, että pienhiukkaset aiheuttavat ihmisillä tulehduksia ja jopa syöpää sekä nostavat sydäninfarktin todennäköisyyttä. Hiukkasten suodattaminen onkin ollut arkipäivää liikenteessä ja suuremmissa voimalaitoksissa jo pitkään. Tiukentuneiden rajoitusten seurauksena on ollut suodatuksen tutkiminen ja suodattimien kehittyminen. Tämä diplomityö jatkaa tällä saralla pyrkien kehittämään pienempiin päästölähteisiin ja perinteisille sähkösuodattimille sopimattomiin sovelluskohteisiin käyvää suodatuslaitteistoa.

Tämän työn teoriaosiossa tarkastellaan aerosolihiukkasten ominaisuuksia yleisesti ja erityisesti niiden sähköistä varautumista. Lisäksi käydään läpi koronapurkauksen toimintaa sekä sähköiseen suodatuksen liittyvää teoriaa. Lukijalle pyritään näin antamaan kuva niistä tiedossa olevista tekijöistä ja fysikaalisista ilmiöistä, jotka vaikuttavat pienhiukkasten sähkösuodatuksessa.

Tässä diplomityössä tutkittiin aiemmin samassa projektissa kehitetyn puhallusvaraajan toimintaa ja tarkoituksena oli saada parempi kuva varaajan toiminnasta sekä kehittää muutamia siinä ilmenneitä heikkouksia. Puhallusvaraajia teetettiin sarja ulkopuolisella toimijalla, jotta saatiin mahdollisimman hyvin toisiaan vastaavia ja samalla tavalla toimivia puhallusvaraajia keräimien keräystehokkuusmittauksiin.

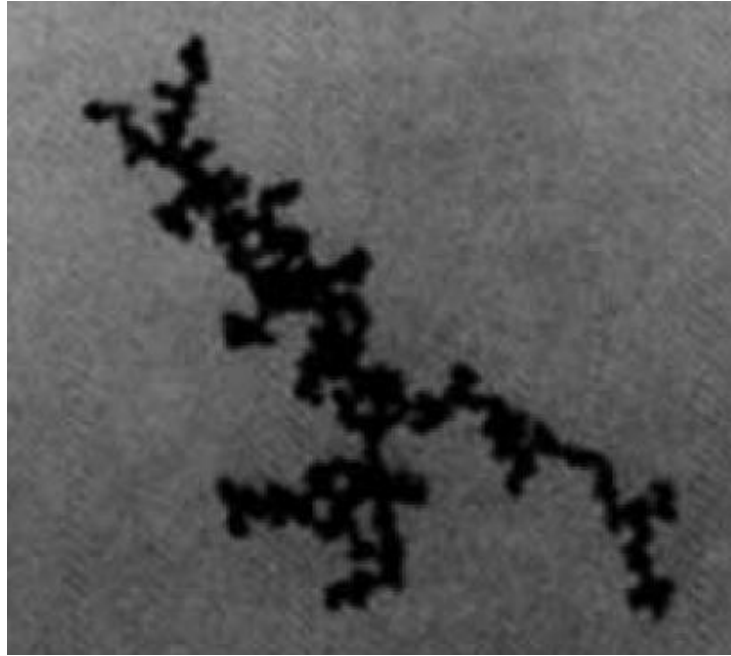
Työn päähuomio oli puhallusvaraajien perään rakennettavan keräimen kehittämisessä. Keräimen keräystehokkuutta mitattiin yksinkertaisella mittausjärjestelyllä, jossa hiukkasgeneroinnin lisäksi käytettiin suodatuslaitteistoa, ejektorilaimenninta ja ELPI:ä. Mittauksia suoritettiin sekä laboratoriossa että todellisessa tilanteessa. Keräimien kehityksen pohjana käytettiin myös tietokonesimulaatiota, jolla pyrittiin mallintamaan virtauksia ja löytämään optimaalinen geometria keräimille. Tavoitteena oli saada rakennettua puhallusvaraajista ja keräimestä luotettavasti toimiva ja suhteellisen pienikokoinen suodatuslaitteisto, jolla on hyvä keräystehokkuus.

2. AEROSOLIHUUKKASTEN OMINAISUUKSIA

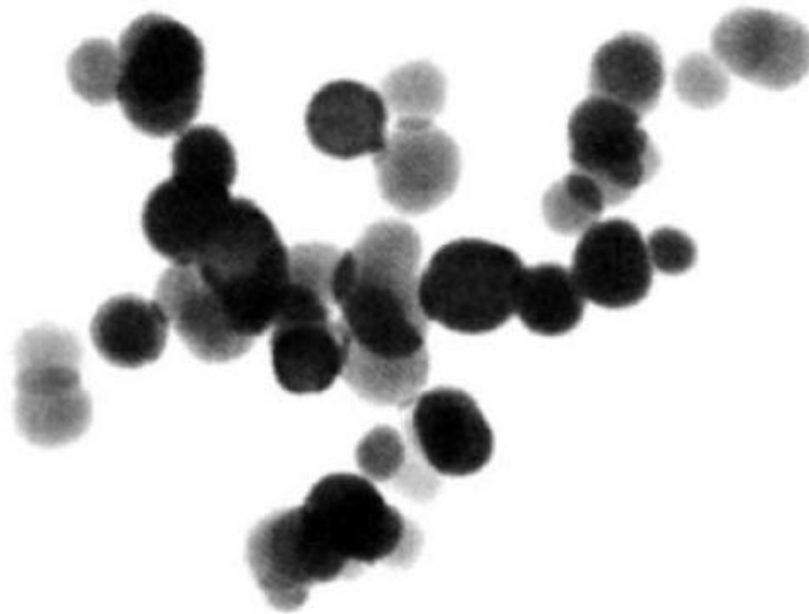
Aerosolilla tarkoitetaan kaasun sekä kiinteiden tai nestemäisten hiukkasten yhdessä muodostamaa seosta. Kaasussa ainakin hetkellisesti pysyvät hiukkaset voivat olla kooltaan yhdestä nanometristä jopa sataan mikrometriin. Usein hiukkaset jaotellaan kokonsa mukaan niin, että alle 0,1 mikrometrin kokoisia hiukkasia kutsutaan hienoiksi ja yli yhden mikrometrin kokoisia hiukkasia karkeiksi hiukkasiksi. Näiden kokojen väliin jäävän alueen hiukkaset eivät ominaisuuksiltaan selkeästi kuulu kumpaankaan pääryhmään, joten niiden sanotaan olevan kooltaan niin sanotulla siirtymäalueella. [1,2]

Aerosolihiukkasten koko on hyvin riippuvainen siitä, millä tavalla ne ovat syntyneet. Karkeat hiukkaset syntyvät yleensä mekaanisen jauhamisen tai hiomisen yhteydessä. Hienot hiukkaset taas ovat tavallisesti peräisin erilaisista polttoprosesseista tai sumutteista. On kuitenkin muistettava, että polttoprosesseissa syntyvien hiukkasten koko on hyvin paljolti riippuvainen siitä millaisesta polttoprosessista on kyse. Dieselmoottorien tuottamat hiukkaset ovat kooltaan pääosin 0,01 – 1,0 μm , kun taas puun poltossa syntyvät hiukkaset ovat kooltaan 0,02 – 250 μm . Hiukkasten fysikaaliset ominaisuudet muuttuvat paljon mentäessä hienoista hiukkasista karkeisiin ja aerosolin kaasumolekyylien liike vaikuttaa huomattavasti hiukkasten liikkeeseen. [2,3,4]

Aerosolihiukkasten tutkimisen kannalta niiden halkaisija on kaikkein merkittävin ominaisuus [2]. Hiukkasen halkaisija ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteinen käsite, koska hiukkaset ovat muodoiltaan hyvin erilaisia. Vaikka yleinen mielikuva hiukkasesta onkin, että ne ovat pyöreitä ja pallon kaltaisia, niin todellisuudessa hiukkaset ovat hyvin epäsäännöllisen muotoisia ja saattavat pallon sijasta muistuttaa pikemminkin ketjua, rypälettä tai sauvaa. Kuvista 1 ja 2 on nähtävissä esimerkkinä todellisten hiukkasten rakennetta. Ilmanvastusvoimaan pohjautuen voidaan määritellä muototekijä χ , jolla kuvataan sitä kuinka paljon todellisen hiukkasen muoto eroaa pallosta. Muototekijät erimuotoisille hiukkasille vaihtelevat pallon arvosta yksi noin kahteen asti, esimerkiksi talkkipölyhiukkaselle $\chi=2,04$. [5,6]



Kuva 1. Metaaniliekissä syntynyt agglomeroitunut nokihiukkanen. [7]



Kuva 2. Kuivatislauksessa syntynyt titaanidioksidihiukkanen. [7]

Hiukkasten muotojen moninaisuudesta johtuen laskennassa useimmiten käytetään todellisen halkaisijan sijaan Stokes'n halkaisijaa tai aerodynaamista halkaisijaa [2]. Stokes'n halkaisija kertoo sellaisen pallonmuotoisen hiukkasen halkaisijan, jonka tiheys ja putoamisnopeus vastaavat todellista hiukkasta. Aerodynaaminen halkaisija taas kertoo tiheydeltään yksikkötiheyksisen (1000 kg/m^3) ja pallonmuotoisen sekä todellisen hiukkasen kanssa saman putoamisnopeuden omaavan hiukkasen halkaisijan. Jos hiukkasen aerodynaaminen halkaisija tunnetaan, niin hiukkasen todellista kokoa tai tiheyttä ei välttämättä tarvitsekaan tietää. [6]

Hiukkasia mittaamaan pyrkivät laitteet jaottelevat hiukkasia eri fysikaalisten ominaisuuksien perusteella ja sen vuoksi tarvitaan sellainen halkaisijan käsite, jonka avulla tuloksia voidaan vertailla keskenään. Tavallisesti käytetään aerodynaamista halkaisijaa, koska impaktoreissa ja mekaanisissa suodattimissa hiukkaset jaotellaan sen perusteella. Sähköisien luokittelijoiden ja suodattimien yhteydessä puhutaan usein sähköisestä liikkuvuuskoosta. Sähköinen liikkuvuuskoosta ei kerro suoraan hiukkasen koosta, sillä pieni heikosti varautunut hiukkanen voi omata saman sähköisen liikkuvuuden kuin suurikokoinen hyvin varautunut hiukkanen. [5]

2.1. Reynoldsin luku

Reynoldsin luku on tärkeä aerosolin aerodynaamisista ominaisuuksista kertova dimensioton suure. Reynoldsin lukua tarvitaan silloin, kun halutaan laskea esimerkiksi mittauslaitteiston putkistoissa tapahtuvia häviöitä. Alkuperäisen hiukkaskokojakauman selville saamiseksi on mittaustuloksia korjattava mallinnetuilla häviöillä. Alle 1 μm :n kokoisille hiukkasille diffuusio on tärkein häviöiden syy ja yksi siihen vaikuttavista tekijöistä on virtauksen laminaarisuus tai turbulentsuus. Reynoldsin luku kertoo sekä kanavassa että hiukkasen ympärillä tapahtuvan virtauksen luonteen. Virtauksen kanavassa katsotaan olevan turbulentsia, jos Reynoldsin luku on yli 1000 ja vastaavasti pyöreän hiukkasen tapauksessa luvun tulee olla yli 1. Reynoldsin luvun määrittely pohjautuu fluidiin vaikuttavien voimien suhteeseen ja se lasketaan yhtälöllä:

$$\text{Re} = \frac{F_i}{F_j} = \frac{\rho U_0 d}{\eta}, \quad (1)$$

jossa F_i on hitausvoima [N], F_j on kitkavoima [N], ρ on fluidin tiheys [kg/m^3], U_0 on fluidin ja tutkittavan kappaleen välinen nopeusero [m/s], d on virtauskanavan tai hiukkasen halkaisija [m] ja η on fluidin viskositeetti [Ns/m^2]. [6]

Yhtälössä 1 oleva viskositeetti ei ole juurikaan riippuvainen virtauksen kohdistuvasta paineesta, joten mahdolliset paineen vaihtelut kanavassa eivät sitä muuta. Savukaasulle viskositeetti voidaan laskea yhtälöllä:

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

jossa η_r on referenssiviskositeetti ($\eta_r=182,03\mu\text{P}$, kun $T_r=293,15$ K) [Ns/m^2], T_r on referenssilämpötila [K], S on Sutherlandin interpolaatiovakio ($S=110,4$ K, kun $T=(80-2000)\text{K}$) [K] ja T on kaasun lämpötila [K]. [7]

2.2. Hiukkasen putoamisnopeus

Yksi merkittävimmistä hiukkasen liikkeeseen liittyvistä suureista on hiukkasen putoamis- eli asettumisnopeus. Putoamisnopeus on tärkeä, koska se määrittelee aerosolin pysyvyyden ja lisäksi sitä usein käytetään hiukkasten muun muassa aerodynaamisen koon määrittämiseen. Putoamisnopeutta tarkasteltaessa voidaan tilanteet jakaa Reynoldsin luvun perusteella Newtonin alueeseen, Stokes'n alueeseen ja välialueeseen. Newtonin alueella ollaan Reynoldsin luvun ollessa yli 1000, Stokes'n alueella Reynoldsin luvun ollessa alle 1 ja välialueella Reynoldsin luvun ollessa näiden välillä. Putoamisnopeus lasketaan hiukkasen kokeman vastusvoiman perusteella. Newtonin alueella hiukkasen vastusvoimalle on voimassa yhtälö:

$$F_d = C_D \frac{\pi}{8} \rho_g d_p^2 V^2, \quad (3)$$

jossa C_D on hiukkasen muodosta, koosta ja nopeudesta riippuva kitkakerroin, ρ_g on kaasun tiheys, d_p on hiukkasen halkaisija ja V on hiukkasen nopeus. [6]

Stokes'n alueella hiukkasen kokeman vastusvoiman yhtälöä kutsutaan Stokes'n laiksi. Stokes'n laki saadaan, kun ratkaistaan epälineaarinen osittaisdifferentiaaleja sisältävä Navier-Stokes'n yhtälö tietyin reunaehdoin. Tällöin oletetaan fluidin olevan kokoonpuristumatonta ja sen virtauksen olevan hiukkasen pinnalla nolla, tarkasteltavan hiukkasen olevan pallomainen ja sen liikkeen olevan tasaista ja tapahtuvan kaukana seinistä sekä inertiaalisten voimien olevan vähäisiä viskoottisiin voimiin verrattaessa eli Reynoldsin luvun olevan hyvin pienen. Näillä oletuksilla saadaan hiukkasen liikettä vastustavalle voimalle Cunninghamin liukukorjauskertoimen avulla yhtälö:

$$F_d = \frac{3\pi\eta V d_p}{C_c}, \quad (4)$$

jossa η on fluidin viskositeetti [Ns/m^2], V virtauksen nopeus [m/s], d_p hiukkasen halkaisija [m] ja C_c Cunninghamin liukukorjauskerroin. [6]

C_c on liukukorjauskerroin, jonka tarkoituksena on huomioida tarkasteltavan hiukkasen koko sekä kaasun ominaisuudet. Stokes'n lain oletus fluidin nopeuden olemisesta nolla hiukkasen pinnalla ei nimittäin toteudu, kun hiukkasen koko lähestyy kaasun vapaata matkaa. Liukukorjauskerroin voidaan laskea yhtälöllä:

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \cdot \left[2,34 + 1,05 \exp\left(-0,39 \cdot \frac{d_p}{\lambda}\right) \right], \quad (5)$$

jossa λ on kaasun vapaa matka [m]. Kaasun vapaalla matkalla tarkoitetaan sitä matkaa, jonka kaasumolekyylille keskimäärin ehtii kulkea kahden törmäyksen välillä. Kaasun

vapaa matka taas on riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta ja paineesta ja voidaan laskea yhtälöllä:

$$\lambda = \lambda_r \cdot \left(\frac{101,3}{P}\right) \cdot \left(\frac{T}{293,15}\right) \cdot \left(\frac{1+110,4/293,15}{1+110,4/T}\right), \quad (6)$$

jossa λ_r on kaasun vapaa matka, kun lämpötila $T=20^\circ\text{C}$ ja paine $P=101,3$ kPa (tällöin $\lambda_r=0,0665$ μm), T on vallitseva lämpötila [K] ja P on vallitseva paine [kPa]. [6,7]

2.3. Brownin liike ja diffuusio

Lämpöliikkeen vuoksi ilman kaasumolekyylit liikkuvat satunnaisesti eri suuntiin ja törmäilevät ilmassa oleviin hiukkasiin. Hiukkanen kokee tilanteen ja kaasumolekyylien törmäykset koostaan riippuen eri tavoin. Vertailulukuna hiukkasen koolle käytetään kaasun vapaata matkaa λ , joka 20°C lämpötilassa ja normaalipaineessa on $0,0665$ μm . Kaikkein pienimpien hiukkasten halkaisija on $0,01$ μm tai alle eli ne ovat kaasun vapaata matkaa pienempiä. Nämä hiukkaset kokevat vain satunnaisia törmäyksiä, mutta ne törmäykset muuttavat merkittävästi hiukkasen liikkeen suuntaa ja nopeutta. Hiukkasen sanotaan olevan niin kutsutulla vapaalla molekyylialueella. Jos sen sijaan hiukkasen halkaisija $d_p \gg \lambda$, niin hiukkanen kokee kaasumolekyylien törmäyksiä jatkuvasti useista suunnista. Tällaisen suuremman hiukkasen liikkeeseen ja nopeuteen ei kaasumolekyylien törmäyksillä ole niin suurta välitöntä vaikutusta kuin pienillä hiukkasilla, sillä törmäykset yleensä osittain kumoavat toistensa vaikutusta ja hiukkasen suurempi massa pienentää törmäyksen aiheuttamaa kiihtyvyyttä. Tällaisen ison hiukkasen sanotaan olevan nk. jatkumoalueella. Näiden alueiden välissä on nk. välialue, jossa hiukkaset ovat kooltaan kaasun vapaan matkan luokkaa. [6]

Kaasumolekyylien ja toisten hiukkasten törmäysten vuoksi hiukkasen liike kaasussa on epäsäännöllistä poukkoilua ja sitä kutsutaan Brownin liikkeeksi. Jos kaasumolekyylit ja hiukkaset eivät ole tasaisesti levittäytyneinä kaasussa, niin törmäykset aiheuttavat hiukkasten siirtymistä korkeamman pitoisuuden alueelta matalamman pitoisuuden alueelle. Tätä konsentraatioiden tasoittumiseen johtavaa liikkumista kutsutaan diffuusioksi. Diffuusiolle on voimassa yhtälö 7, jota kutsutaan Fick'n laiksi:

$$J = -D \cdot \frac{dn}{dx}, \quad (7)$$

jossa D on diffuusiokerroin [m^2/s] ja n on hiukkasten konsentraatio [kpl/m^3]. Diffuusiokertoimelle puolestaan voidaan johtaa Stoke-Einsteinin yhtälö:

$$D = \frac{k_B T C_c}{3\pi\eta d_p} = k_B T B, \quad (8)$$

jossa k_B on Boltzmannin vakio ($k_B=1,38\cdot 10^{-23}$ J/K), T on lämpötila [K] ja B on mekaaninen liikkuvuus [kg/s]. Yhtälöstä 8 on helppo nähdä, että lämpötila vaikuttaa diffuusioon suoraan ja hiukkasen koko kääntäen verrannollisesti. Tämä diffuusiovoimakkuuden kääntäen verrannollisuus hiukkasten kokoon nähden merkitsee sitä, että mitä pienempiä hiukkaset ovat niin sitä herkemmin diffuusio saa niitä liikutettua. [6]

Aikaisemmin jo mainittujen suureiden lisäksi esimerkiksi Stokes'n ja Sherwoodin luku ovat usein tarvittavia perussuureita. Stokes'n luku kertoo pysähtymismatkan ja hiukkasen koon suhteen. Sherwoodin luvun sekä siihen liittyvän apusuureen ζ avulla sen sijaan voidaan laskea turbulentsisella virtauksella putkistossa tapahtuvia diffuusiohäviöitä. Stokes'n luku saadaan yhtälöllä:

$$Stk = \frac{\tau U_0}{d_c} = \frac{m B U_0}{d_c}, \quad (9)$$

jossa U_0 on virtausnopeus, d_c näytteenottoputken halkaisija ja τ relaksaatioaika. Sherwoodin luvulle ja apusuurelle ζ pätevät yhtälöt 10 ja 11:

$$Sh = 0,0118 Re^{7/8} Sc^{1/3}, \quad (10)$$

$$\zeta = \frac{\pi D L}{Q}, \quad (11)$$

joissa Sc on Schmidtin luku, L putken pituus [m] ja Q tilavuusvirtaus [m^3/s]. Näitä käyttämällä voidaan laskea hiukkaselle läpäisykerroin yhtälöllä:

$$\eta_{diff} = e^{-\zeta Sh}. \quad [6] \quad (12)$$

2.4. Aerosolihiukkasten dynaamiset prosessit

Aerosolihiukkasten lukumäärään, kokoon ja muotoon vaikuttavia prosesseja ovat nukleaatio, tiivistyminen ja haihtuminen sekä koagulaatio ja agglomeraatio. Nukleaatio on ilmakehässä syntyvien pienihiukkasten tärkein luonnollinen muodostumismekanismi. Siinä uusia aerosolihiukkasia muodostuu homogeenisella nukleaatiolla suoraan kaasufaasista tai heterogeenisella nukleaatiolla tiivistymällä joidenkin tiivistymisytimien, esimerkiksi ionien, ympärille. Nukleaation seurauksena aerosolissa olevien hiukkasten lukumäärä lisääntyy ja niiden keskimääräinen koko pienenee. Jotta

hiukkasia voisi syntyä homogeenisella nukleaatiolla, täytyy kaasussa vallita huomattava ylisaturaatiotila esimerkiksi vedelle suhteellisen kosteuden on oltava yli 400%. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että homogeenisessa nukleaatiossa nukleoituvien aineiden molekyylien täytyy saada törmäysten kautta muodostettua riittävän suuri rypäs, jotta syntyy stabiili hiukkanen. Jos törmäyksiä ei tapahdu riittävän nopealla tahdilla, niin rypäs ei pysy kasassa, vaan hajoaa takaisin osiin. Yksi tärkeimmistä nukleoitivista aineista ilmakehässä sekä dieselmoottorien päästöissä on rikkihappo (H_2SO_4), joka pystyy tiivistymään ja nukleoitumaan tehokkaasti myös pienempinä pitoisuuksina. [8] Dieselmoottorien hiukkaspäästöjä tutkittaessa onkin havaittu, että rikkihappo-vesi nukleaatio on todennäköisesti suurin tekijä nukleaatiomoodin hiukkasten syntymisessä [9]. Nukleaation tutkiminen teoreettisesti taas on erittäin vaikeaa ja mittaamalla sekä laskennallisesti saatujen nukleaationopeuksien välillä onkin tavallisesti useiden kertaluokkien ero [10].

Tiivistymisessä ja haihtumisessa on kysymys hiukkasen vuorovaikutuksesta ympäröivän kaasun kanssa. Hiukkaseen voi törmäyksen seurauksena kiinnittyä uusia tai sen pinnasta voi irrota kiinni olleita kaasumolekyylejä. Tiivistymistä ja haihtumista säätelevät lähinnä eri aineiden pitoisuudet kaasussa hiukkasen läheisyydessä. Ratkaiseva tekijä on tasapainohöyrynpaine hiukkasen pinnan yläpuolella. [8] Tasapainohöyrynpaineeseen vaikuttavia tekijöitä ovat hiukkasen pinnalla olevien aineiden kemiallinen aktiivisuus sekä pinnan kaareutumiseen liittyvä nk. Kelvinin ilmiö. Jos pinta on hyvin kaareva, niin pinnan molekyylit eivät ole sidoksissa toisiinsa yhtä voimakkaasti kuin tasaisemmalla pinnalla. [6,8] Tiivistyminen ja haihtuminen eivät vaikuta aerosolin hiukkaslukumäärään, vaan ainoastaan kasvattavat tai pienentävät hiukkasten kokoa [2].

Koagulaatio ja agglomeraatio aiheutuvat aerosolin hiukkasten törmäilystä toisiinsa ja ne ovat ainoat aerosolifysiikan perusilmiöistä, joihin vaikuttavana tekijänä on pelkästään hiukkaspitoisuus. Koagulaationopeudelle on periaatteellinen laskentayhtälö, mutta siinä oleva koagulaatiokerroin on vahvasti riippuvainen koagulaatiotavasta ja törmäävien hiukkasten halkaisijoista. [8] Koagulaatiossa vielä nestemäiset tai tervamaiset hiukkaset tarttuvat toisiinsa muodostaen uuden saumattoman hiukkasen. Agglomeraatiossa taas kiinteät hiukkaset tarttuvat törmäyksen seurauksena yhteen sulautumatta kuitenkaan toisiinsa ja näin muodostavat nk. agglomeraatteja, jotka ovat pallomaisia ryppäitä tai ketjumaisia hiukkasia. [11] Tärkein koagulaatiota aiheuttava tekijä, erityisesti alle mikrometrin kokoisilla hiukkasilla, on Brownin liikkeen aikaansaaman diffuusion aiheuttama ns. terminen koagulaatio. Koagulaatiota voi kuitenkin tapahtua myös kinemaattisesti. Siinä hiukkaset liikkuvat erinopeudella esimerkiksi turbulentsissa virtauksessa osuvat ja jäävät kiinni toisiinsa. Näin tapahtuva koaguloituminen edellyttää sitä, että aerosolissa on merkittävä määrä suuria yli $10\mu\text{m}$:n kokoisia hiukkasia. [6]

Koagulaatio ja agglomeraatio pienentävät aerosolin hiukkaslukumäärää ja kasvattavat hiukkasten keskimääräistä kokoa. Termisen koagulaation yhdenkokoisilla

hiukkasilla aikaansaamaa hiukkaspitoisuuden laskua ajan funktiona voidaan kuvata yhtälöllä:

$$\frac{dn}{dt} = -KN^2, \quad (13)$$

jossa $K (=4\pi dD)$ on koagulaatiokerroin [m^3/s] ja N on hiukkasten tilavuuslukumäärä [kpl/m^3]. Jos toisiinsa törmäävät hiukkaset ovat erikokoisia, muuttuu koagulaatiokerroimen yhtälö muotoon:

$$K_{1,2} = \pi(d_1 + d_2)(D_1 + D_2). \quad (14)$$

Hiukkaspitoisuuden laskemiseen ajanhetkellä t käytetään yhtälöä:

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 K t}, \quad (15)$$

jossa N_0 on lähtöhetken konsentraatio [kpl/m^3] ja t on lähtöhetkestä kulunut aika [s]. Koagulaation toinen vaikutus eli hiukkaskoon kasvu ajan t kuluttua saadaan laskettua yhdenkokoisille hiukkasille yhtälöllä:

$$d(t) = d_0 (1 + N_0 K t)^{1/3}, \quad (16)$$

jossa d_0 on hiukkasen alkuperäinen halkaisija [m] ennen koagulaatiota. [6]

3. HIUKKASTEN SÄHKÖINEN VARAUTUMINEN

Kaasussa olevat aerosolihiuksat pystyvät varautumaan erilaisten kemiallisten, sähköisten ja fysikaalisten prosessien seurauksena monella tavalla. Tavallisessa ilmassa on positiivisia ja negatiivisia ioneja keskimäärin yhteensä noin 1000 kuutiometrissä. Positiivisten ja negatiivisten ionien esiintyminen on normaaliolosuhteissa suurin piirtein yhtä yleistä. Näiden vapaiden ionien lämpöliikkeestä johtuvat törmäykset hiukkasiin sekä hiukkasten törmäily toisiinsa ja muihin eri työfunktion omaaviin materiaaleihin saa alun perin neutraalit hiukkaset varautumaan heikosti. Tavallisempaa onkin, että hiukkaset luonnostaan varautuvat jonkin verran, kuin että ne olisivat täysin neutraaleja. Varautuneet hiukkaset voivat myös menettää varauksensa, sillä ne pyrkivät vetämään vastakkaismerkkisiä varauksia puoleensa. Varautuminen ja varauksen neutraloituminen johtavat ajan kuluessa varaustilan tasapainotilaan, jota kutsutaan Boltzmannin tasapainojakaumaksi. Varausjakauma hiukkaskoon funktiona saadaan yhtälöstä:

$$f_n = \frac{\exp\left(\frac{K_E n_e^2 e^2}{d_p k_B T}\right)}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{K_E n_e^2 e^2}{d_p k_B T}\right)}, \quad (17)$$

jossa n_e on alkeisvarausten määrä, e on alkeisvaraus ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C), K_E on Coulombin vakio ($8,987 \cdot 10^9$ Nm²/C), k_B on Boltzmannin vakio ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K) ja d_p on hiukkasen halkaisija [m]. [5,6] Vaikka yksittäinen hiukkanen yleensä luontaisesti varautuukin vähän, niin normaalissa tilassa olevassa kaasussa samankokoisten hiukkasten yhteinen nettovaraus on nolla. Sähkösuodatusta ajatellen tällaisenaan hiukkasten varaustaso on aivan liian matala ja siksi korkeita varaustiloja haluttaessa hiukkasten varauksen nostamiseen keinotekoisesti käytetään muun muassa UV-valoa, elektronisuihkua tai radioaktiivista lähdettä. Jos aerosolissa olevat hiukkaset ovat varautuneet yhdenmerkkisesti, puhutaan uniporaalisesti varautuneesta ja jos molempien merkkisesti, niin bipolaarisesti varautuneesta aerosolista. Tässä työssä käytettiin unipolaarisesti hiukkasia varaavaa koronavaraajaa, josta kerrotaan tarkemmin luvussa 4. [6,12]

Jos varautunut hiukkanen joutuu sähkökenttään, niin siihen kohdistuu sähköinen voima, joka saadaan yhtälöllä:

$$F_E = qE = neE, \quad (18)$$

jossa E on sähkökentän voimakkuus [V/m] ja q on hiukkasen varaus [C], jonka on osoitettu olevan aina alkeisvarauksen e monikerta n [6,13]. Tämä sähköinen voima F_E aiheuttaa hiukkaselle sähkökentän suuntaisen liikkeen. Sähkökentässä liikkuvaan varattuun hiukkaseen kohdistuu yksikertaisimmillaan sähköisen voiman lisäksi laminaarisella alueella Stokes'n lain eli yhtälön 4 mukainen hiukkasen liikettä vastustava viskoosi vastusvoima. [6] Newtonin toisen lain ($\Sigma F = ma$) mukaan hiukkaseen vaikuttavien resultanttivoimien summa on sen kiihtyvyyden ja massan tulo. Hiukkasen massan muuttuminen koagulaation ja agglomeraation kautta on periaatteessa mahdollista, mutta niiden hitauden vuoksi sen voidaan olettaa olevan lyhyessä ajassa pientä, jolloin se voidaan jättää huomioimatta. [14] Kun hiukkanen on saavuttanut liikkeessään tasapainotilanteen sähkökentässä, voidaan hiukkasen nopeus sähkökentässä saada ratkaisemalla näiden kahden voiman yhtäsuuruus. Näin saadaan hiukkasen ajautumisnopeudelle sähkökentässä yhtälö:

$$V_E = \frac{neC_c}{3\pi\eta d_p} \cdot E, \quad (19)$$

jossa C_c on Cunninghamin liukukorjauskerroin, η on kaasun viskositeetti [Ns/m^2], d_p on hiukkasen halkaisija [m] ja E on sähkökentän voimakkuus [V/m]. [6] Yhtälöstä 19 nähdään, että hiukkasen ajautumisnopeus sähkökentässä on hyvin vahvasti riippuvainen hiukkasen koosta, sillä suoran riippuvuuden lisäksi hiukkasen koko vaikuttaa myös Cunninghamin liukukorjauskertoimen kautta [14]. Sähkökentän hiukkaselle aiheuttaman nopeuden V_E ja sähkökentän E suhdetta kutsutaan sähköiseksi liikkuvuudeksi Z , jolle saadaan siis yhtälö:

$$Z = \frac{V_E}{E} = \frac{neC_c}{3\pi\eta d_p} = neB. \quad (20)$$

Tämä sähköisen liikkuvuuden yhtälö on käyttökelpoinen erityisesti yhden alkeisvarauksen omaaville hiukkasille ja ioneille sekä elektroneille. Yleensä esimerkiksi koronapurkauksessa syntyneet ionit ovatkin yksittäisvarautuneita ja niiden sähköiset liikkuvuudet tunnetaan, jolloin niiden ajautumisnopeuden laskeminen onnistuu helposti. Taulukkoon 1 on koottu elektronin, ionien sekä yksittäisvarautuneiden erikokoisten hiukkasten sähköiset liikkuvuudet normaaliolosuhteissa. [6]

Taulukko 1. Sähköiset liikkuvuudet elektronille, ioneille sekä yksittäisvarautuneille hiukkasille normaaliolosuhteissa. [6]

Ioni	Sähköinen liikkuvuus [m^2/Vs]
Elektroni	$6,7 \cdot 10^{-2}$
Negatiivinen ilman ioni	$1,6 \cdot 10^{-4}$
Positiivinen ilman ioni	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Hiukkanen $d_p=0,01 \mu\text{m}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
Hiukkanen $d_p=0,1 \mu\text{m}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$
Hiukkanen $d_p=1,0 \mu\text{m}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$

Jos lämpötila ja paine poikkeavat normaaliolosuhteista, niin sähköinen liikkuvuus saadaan yhtälöllä:

$$Z(p, T) = \frac{Z_0}{\delta}, \quad (21)$$

jossa δ on ilman suhteellinen tiheys. Ilman suhteellinen tiheys voidaan laskea, kun tunnetaan vallitseva paine ja lämpötila, yhtälöllä:

$$\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0}, \quad (22)$$

jossa T_0 ja p_0 ovat ilman normaaliolosuhteiden lämpötila ja paine. [15]

Hiukkasen ajautumisnopeudelle sähkökentässä saatu yhtälö 19 on voimassa vain laminaarisella alueella. Jos sähkökentässä oleva hiukkanen saavuttaa turbulenttisen nopeuden täytyy sen ajautumisnopeus laskea empiirisistä kaavoista tai iteroimalla yhtälöstä:

$$neE = C_D \frac{\pi}{8} \rho_g d_p^2 V_E^2, \quad (23)$$

jossa C_D on hiukkasen nopeudesta riippuva vastuskerroin ja ρ_g väliainekaasun tiheys. [6]

3.1. Diffuusiovarautuminen

Kuten aiemmin on jo mainittu, lämpöliike aiheuttaa hiukkasten varautumista diffuusiolla ionien törmäillessä hiukkasiin ja siirtäessä varauksensa niihin. Pieniä hiukkasia voidaan kuitenkin haluttaessa varata diffuusiolla tehokkaasti käyttäen ionien lähteenä joko radioaktiivista lähdettä tai koronapurkausta. Pienten, halkaisijaltaan alle

0,2 μm :n kokoisten, hiukkasten varautumista hallitsee diffuusiolla varautuminen, vaikka ne olisivat sähkökentässä. [6,16]

Käytettäessä radioaktiivista lähdettä esimerkiksi Ni-63, Am-241 tai Kr-85 saadaan aerosoli varattua bipolaarisesti. Hiukkasten varaaminen radioaktiivisella lähteellä toteutetaan johtamalla hiukkaset samaan kammioon lähteen kanssa, jolloin lähteestä emittoituneiden elektronien tai helium-ytimien ionisoiman varauspilven läpi kulkevat hiukkaset varautuvat diffuusioliikkeen ansiosta. [6,7] Jos pilven ionipitoisuus on suuri ja hiukkasilla kestää riittävän kauan sen läpi kulkemiseen saadaan synnytettyä tasapainotilanne erisuuruksille varauksille hiukkaskoon funktiona. Radioaktiivista lähdettä käytetään hiukkasten varaamisen lisäksi myös kaikenkokoisten jo varautuneiden hiukkasten neutraloimiseen. Hiukkasen neutraloituminen tapahtuu varautumista nopeammin, sillä varautuneet hiukkaset vetävät sähköisesti puoleensa erimerkkisiä varauksia, joka tehostaa erimerkkisten ionien diffuusiota hiukkaseen. [5,6]

Radioaktiivisen lähteen aiheuttamassa hiukkasten varautumisessa on muistettava, että negatiivisten ionien sähköinen liikkuvuus on keskimäärin suurempi kuin positiivisten. Negatiivisille ioneille sähköinen liikkuvuus on $Z_{i-}=1,35 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ja positiivisille $Z_{i+}=1,20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Tästä erosta sähköisessä liikkuvuudessa seuraa, että vaikka negatiivisia ja positiivisia ioneja olisi yhtä paljon, niin varautumistodennäköisyydessä on pieni polariteettiero. [5] Wiedensohlerin empiirisellä yhtälöllä voidaan arvioida k-kertaa varautuneiden hiukkasten osuutta suhteessa kokonaishiukkasmäärään:

$$\frac{N_k}{N_{tot}} = 10^{\left[\sum_{i=0}^5 a_{i,k} (\log_{10} d_p (nm)) \right]}, \quad (24)$$

jossa $a_{i,k}$:t ovat taulukossa 2 esiintyvät arvot halutulle varaukselle. Muistettava huomio on myös se, että hiukkasen halkaisijan tulee yhtälössä olla nanometreinä. [17]

Taulukko 2: Wiedensohlerin kaavan kokeelliset parametrit. [17]

k	-2	-1	0	1	2
$a_{0,k}$	-26,3328	-2,3197	-0,0003	-2,3484	-44,4756
$a_{1,k}$	35,9044	0,6175	-0,1014	0,6044	79,3772
$a_{2,k}$	-21,4608	0,6201	0,3073	0,4800	-62,8900
$a_{3,k}$	7,0867	-0,1105	-0,3372	0,0013	26,4492
$a_{4,k}$	-1,3088	-0,1260	0,1023	-0,1553	-5,7480
$a_{5,k}$	0,1051	0,0297	-0,0105	0,0320	0,5049

Jos diffuusiovaraamiseen käytetään koronapurkausta, niin syntyy vain yhdenmerkkisiä joko negatiivisia tai positiivisia ioneja. Tällaisessa unipolaarisessa diffuusiovarauksessa ei siis tapahdu erimerkkisistä ioneista johtuvaa neutraloitumista. Hiukkasen varaus voi

siis vain kasvaa jokaisen törmäyksen myötä ja varauksen suuruus kasvaakin jatkuvasti ajan kuluessa. Hiukkasen varautuminen kuitenkin hidastuu siihen jo tarttuneiden varausten aiheuttaman kentän kasvaessa, koska yhä harvemmalla ionilla on riittävän suuri nopeus kumoamaan hiukkaseen pääsemistä vastustava sähköinen voima. Hiukkasen saavuttamaan varaukseen unipolaarisessa diffuusiovarautumisessa vaikuttavat hiukkasen koko ja altistumisaika ioneille sekä ionien terminen nopeus. Yhden hiukkasen keskimäärin saavuttama varaus n ajassa t saadaan yhtälöllä:

$$n(t) = \frac{d_p k_B T}{2K_E e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi K_E d_p c_i e^2 N_i t}{2k_B T} \right), \quad (25)$$

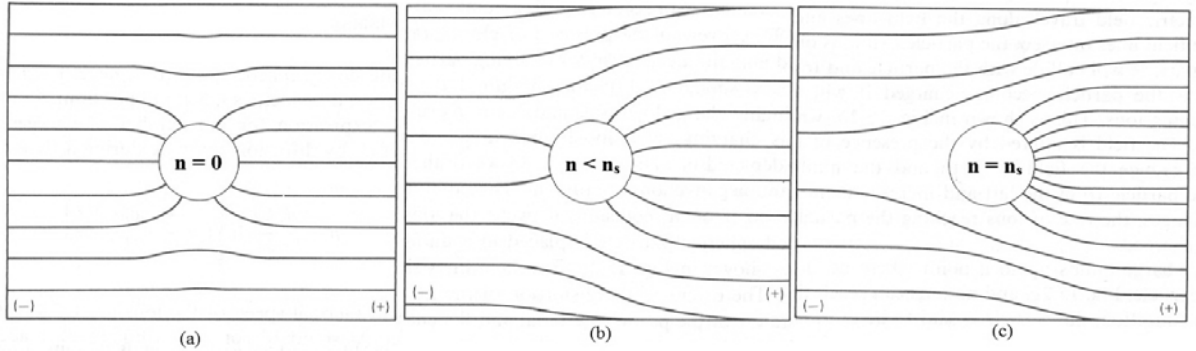
jossa d_p on hiukkasen halkaisija [m], k_B on Boltzmannin vakio [J/K], T on lämpötila [K], c_i on ionien keskimääräinen terminen nopeus kaasussa [m/s], N_i on ionien pitoisuus kaasussa [kpl/m³], t on aika [s] ja K_E on lyhenne tekijälle $1/4\pi\epsilon_0$, jossa ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys ($8,854187817 \cdot 10^{-12}$ F/m). Ionien keskimääräinen terminen nopeus c_i voidaan laskea yhtälöllä:

$$c_i = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad (26)$$

jossa R on kaasuvakio (8,3145 J/molK) ja M on hiukkasen moolimassa [g/mol]. [6] Diffuusiovarautumiselle on esitetty uudempiakin yhtälöitä, mutta ne ovat monimutkaisempia tuottamatta silti merkittävästi yhtälöstä 25 eroavia tuloksia [18].

3.2. Kenttävarautuminen

Kenttävarautuminen perustuu voimakkaan sähkökentän synnyttämien kenttäviivojen mukaisesti kulkevien ionien törmäämiseen ja niiden varausten siirtymiseen hiukkasiin. Hiukkasen materiaalista riippuvat sähköiset ominaisuudet vaikuttavat ulkopuoliseen sähkökenttään hiukkasen lähellä ja hiukkasen kenttävarauksella saaman varauksen suuruuteen. Tämä hiukkasen ulkopuoliseen kenttään kohdistaman vaikutuksen suuruus riippuu permittiivisyydestä, joka yleensä on välillä 1 – 10, mutta voi olla huomattavasti suurempikin esimerkiksi tislattelulle vedelle noin 80. Kuvassa 3 on kuvattu sitä, miten hiukkasen permittiivisyys ja siihen kertyvä varaus muuttavat ulkopuolista kenttää. [6]



Kuva 3. Varautumattoman ja varautuneen hiukkasen vaikutus ulkopuoliseen sähkökenttään. a) Mitä suurempi on varautumattoman hiukkasen permittiivisyys, sitä useampi sähkökentän kenttäviiva yhtyy hiukkaseen. b) Sähkökentän kenttäviivoja pitkin kulkevat ionit ovat törmänneet hiukkaseen ja hiukkanen on alkanut varautua. c) Hiukkanen on saavuttanut maksimivarauksensa eivätkä kenttäviivat enää osu lainkaan hiukkaseen. [6]

Sähkökentässä olevan hiukkasen varaus kasvaa kunnes siihen tulleiden varausten synnyttämä kenttä estää uusien ionien tulon hiukkaseen. Kenttävarautumiselle on siis olemassa maksimi, jota suuremmaksi hiukkasen varaus ei enää ajan kuluessa kasva. Tällöin sanotaan, että hiukkanen on saavuttanut saturaatiovarauksensa. Jos diffuusiovarautumista ei huomioida, niin hiukkasen saama varaus n ajan t kuluessa voidaan laskea yhtälöllä:

$$n(t) = \left(\frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \right) \cdot \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \cdot \left(\frac{\pi K_E e Z N_i t}{1 + \pi K_E e Z N_i t} \right), \quad (27)$$

jossa ε_r on hiukkasen suhteellinen permittiivisyys. Yhtälön 27 ensimmäinen termi pyrkii kuvaamaan hiukkasen permittiivisyyden vaikutusta varaukseen ja on arvoltaan 1-3. Toisesta termistä taas nähdään, että hiukkasen halkaisija vaikuttaa jopa neliöllisesti saavutetun varauksen suuruuteen. Tästä on helppo päätellä, että kenttävarautuminen on tehokkainta suurilla hiukkasilla ja se onkin hallitseva varautumismekanismi hiukkasen halkaisijan ollessa yli $1,0 \mu\text{m}$:ä. Hiukkasen varaukseen suoraan verrannollinen sähkökentän voimakkuus on tavallisesti joitakin kV/cm ja se on kääntäen verrannollinen vastaelektrodien välisen etäisyyden neliöön. Kolmas termi ottaa huomioon hiukkasen sähköisen liikkuvuuden, ionipitoisuuden sekä kuluneen ajan. Kuten aiemmin todettiin, kenttävarautumiselle on maksimi, joka saadaan, kun yhtälön 27 kolmas termi lähestyy ykköstä:

$$n_{\max} = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \cdot \frac{Ed_p^2}{4K_E e}. \quad (28)$$

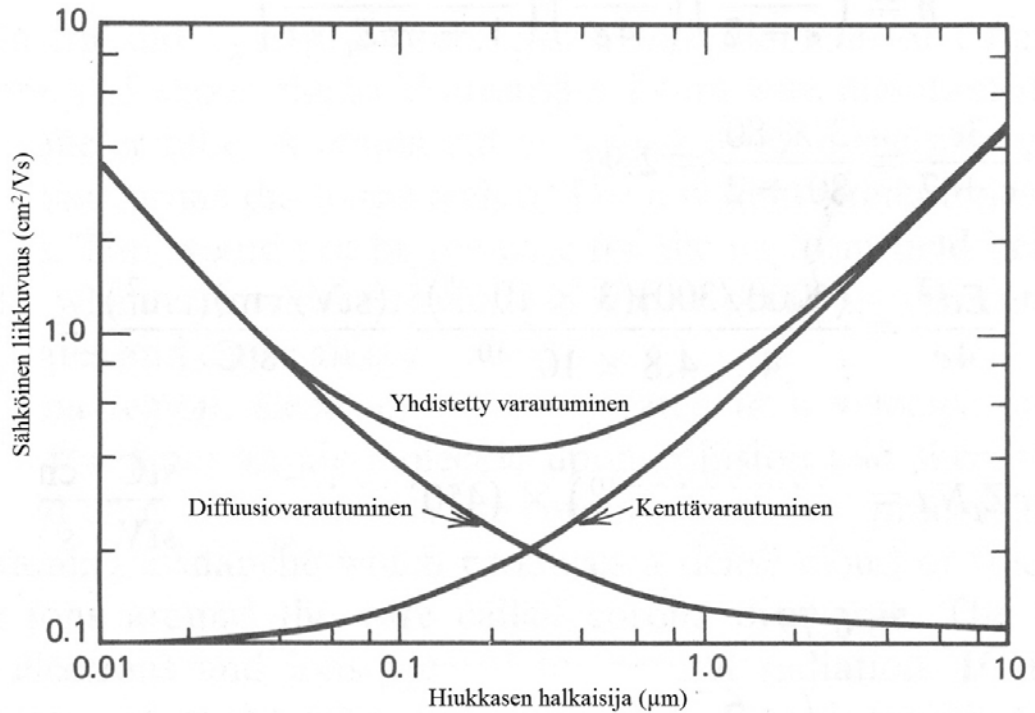
On huomattava, ettei maksimivarauksen saavuttamiseen menevä aika ole riippuvainen hiukkasen koosta tai sähkökentän voimakkuudesta, vaan ionien sähköisestä liikkuvuudesta sekä ionipitoisuudesta. Kuten diffuusiovarautumisessa, niin myös kenttävarautumisessa on olemassa pieni ero varautumisnopeudessa negatiivisten ionien suuremman sähköisen liikkuvuuden vuoksi. [6] Tavallisesti kenttävaraajassa vallitseva ionipitoisuus on noin 10^7 kpl/cm³, jonka perusteella voidaan laskea, että hiukkanen saa jo alle kolmessa sekunnissa noin 95%:ia maksimivarauksesta. Tämä aika on niin lyhyt, että maksimivarausta pidetään usein hyvänä arviona hiukkaselle kenttävarautumisella syntyvästä varauksesta. [19]

3.3. Yhdistetty varautuminen

Pienille, halkaisijaltaan alle 0,2 µm:n hiukkasille, on diffuusiovarautuminen hallitseva varautumismekanismi ja yli 1,0 µm:n kokoisille hiukkasille kenttävarautuminen. Kooltaan näiden hiukkaskokojen välistä olevilla hiukkasilla diffuusiovarautuminen heikkenee, mutta kenttävarautuminenkaan ei ole vielä kovin tehokasta. Tällä alueella kumpikin tapa varautua onkin otettava laskennassa huomioon. Molempien varautumistapojen huomioon ottamisen seurauksena tarkan ratkaisun antavat vain differentiaaliyhtälöt, joiden ratkaiseminen analyyttisesti ei onnistu. Ratkaisuksi on kehitetty numeerisia sekä likimääräisiä vaihtoehtoja hiukkasen varautumisen laskentaan, mutta numeeristen menetelmien monimutkaisuudesta johtuen niiden käyttö vaatii tietokonelaskentaa. [20,6] Kohtuullisen järkevä vaihtoehto on Cochet:n kehittämä analyyttisesti ratkeava yhtälö:

$$n(t) = \left[\left(1 + \frac{\lambda_i}{d_p} \right)^2 + \frac{2}{1 + \frac{\lambda_i}{d_p}} \cdot \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right] \cdot \frac{Ed_p^2}{e} \cdot \frac{t}{t + \frac{1}{N_i e Z_i \pi}}, \quad (29)$$

jossa λ_i on ionin vapaamatka [16]. Toinen järkevä vaihtoehto on havainnollistaa yhdistettyä varautumista esittämällä sähköinen liikkuvuus hiukkaskoon funktiona. Kuvassa 4 näin onkin tehty ja siitä nähdään, että sähköisen liikkuvuuden minimi on juuri tällä välialueella, jossa sekä diffuusio- että kenttävarautuminen ovat heikkoja. [6]



Kuva 4. Sähköinen liikkuvuus hiukkasen koon funktiona eri varautumismekanismeilla. [6]

3.4. Muita varautumismalleja

Hiukkasten varautumiselle on jo esitettyjen diffuusio- ja kenttävarautumismekanismien lisäksi esitetty muitakin analyttisesti ratkaistavissa olevia varautumismalleja. Näistä ehkä merkittävin on Cochet:n yhtälö, jota voidaan käyttää sekä suurille että pienille hiukkasille. Yhtälö toimii parhaiten silloin, kun sähkökenttä on voimakas, joten sitä voidaan hyvin käyttää esimerkiksi arvioitaessa hiukkasten saamaa varausta sähkösuodattimessa. Hiukkasen maksimivarausta laskettaessa Cochet:n yhtälö on:

$$Q_p^\infty = \left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \frac{2}{1 + 2\lambda/d_p} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right] \cdot \pi \epsilon_0 d_p^2 E, \quad (30)$$

Tällä yhtälöllä laskettaessa 0,2 – 0,8 μm :n kokoisten hiukkasten maksimivaraukseksi saadaan hiukan todellisuutta pienempi arvo. Jos varautumisessa huomioidaan aika, niin hiukkasen varaus ajassa t saadaan yhtälöllä:

$$Q_p(t) = Q_p^\infty \left(\frac{t}{t + \tau_Q} \right), \quad (31)$$

jossa τ_Q on aikavakio, joka voidaan laskea yhtälöllä:

$$\tau_Q \approx \frac{4\varepsilon_0}{j_{NE}/E}, \quad (32)$$

jossa j_{NE} on virrantiheys [mA/m^2]. [14]

Koronavaraajan hiukkaselle maksimissaan aikaansaamaa varausta on mahdollista arvioida hiukkasen kokeman potentiaalieron ja ionien diffuusion synnyttämän sähköisen potentiaalilin avulla. Yhtälön johtamisessa on tehtävä oletus, että hiukkanen on pyöreä, jotta voidaan käyttää pyöreälle kappaleelle olevaa kapasitanssin lauseketta. Hiukkasen maksimivaraukselle vakiosähkökentässä saadaan yhtälö:

$$n_L = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \cdot \pi\varepsilon_0 d_p \cdot \frac{\Delta V_p + V_i}{e}, \quad (33)$$

jossa ΔV_p on hiukkasen yli oleva potentiaaliero ja V_i on ionien diffuusion synnyttämä sähköinen potentiaali. Tällä yhtälöllä voidaan arvioida vain maksimivarausta, mutta se soveltuu kaikenkokoisille hiukkasille ja sitä laskettaessa ei tarvitse tuntea hankalasti määritettävissä olevaa ionituloa N_{it} . [21]

3.5. Hiukkasen teoreettinen maksimivaraus

Kun kiinteiden hiukkasten varaus kasvaa riittävän suureksi, tapahtuu hiukkasen pinnasta varauksen irrottava spontaani emissio. Pallonmuotoisille hiukkasille maksimivarauksen yhtälö on:

$$n_L = \frac{d_p^2 E_L}{4K_E e}, \quad (34)$$

jossa E_L on kentän voimakkuus hiukkasen pinnalla, millä varaus emittoituu spontaanisti hiukkasesta pois. Negatiivisesti varautuneelle hiukkaselle vaadittu sähkökentän voimakkuus on matalampi ($9,0 \cdot 10^8 \text{ V/m}$) kuin positiivisesti varautuneelle ($2,1 \cdot 10^{10} \text{ V/m}$). [6] Yleisesti voidaan todeta, että kun hiukkasen varaus kasvaa näin suureksi, niin hiukkasen käyttäytymistä hallitsevat pelkästään sähköiset voimat [22].

Nestemäisellekin hiukkaselle on olemassa yläraja sen saaman varauksen määrälle. Jos nestemäisen hiukkasen varaus kasvaa tämän rajan yli, niin se hajoaa pienempiin osiin varausten toisiaan hylkivien sähköisten voimien voittaessa hiukkasta koossa pitävän pintajännityksen. Tätä varautumisen ylärajaa kutsutaan Rayleighin rajaksi ja se voidaan laskea yhtälöllä:

$$n_L = \frac{2\pi\gamma \cdot d_p^3}{K_E e^2}, \quad (35)$$

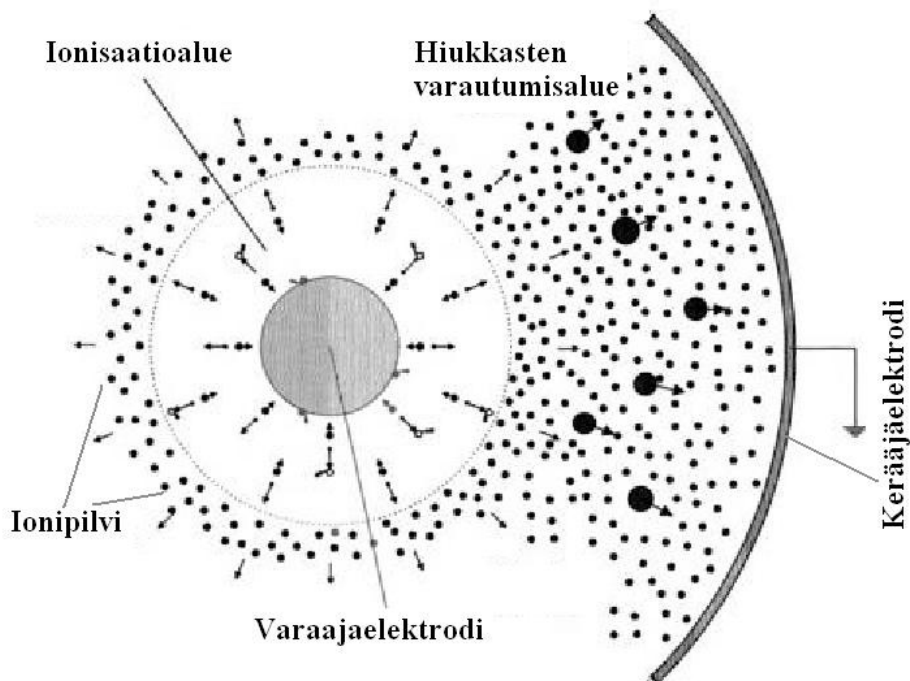
jossa γ on nestemäisen hiukkasen pintajännitys. [6,22]

4. KORONAPURKAUS

Hiukkasten varaamiseen käytetään yleisesti unipolaarista koronavaraajaa, jossa hiukkasten varaus tapahtuu ns. korona-purkauksen avulla. Koronapurkaus voidaan saada aikaan käyttämällä neulaa, ohutta metallilankaa tai muuta teräväreunaista elektrodia, johon tuodaan korkea negatiivinen tai positiivinen jännite. [2,5] Vaikka kaasut normaalissa tilanteessa ovat hyviä eristeitä, niin niissä on aina myös vapaita elektroneja ja varaajaelektrodin ympärille korkealla jännitteellä synnytetty vahva epähomogeeninen sähkökenttä saa nämä elektronit kiihtyvään liikkeeseen. Elektronien ja esimerkiksi ilman kaasumolekyyleiden välinen vapaa matka on sen verran pitkä, että elektronit ehtivät saada suuren nopeuden ja sen myötä kineettisen energian ennen törmäämistään kaasumolekyyleihin. Törmäyksissä molekyyleistä irtoaa uusia elektroneja, jotka sähkökentän vuoksi joutuvat myös kiihtyvään liikkeeseen. Syntyy nk. ionisaatioalue, jossa yhä uusien törmäyksien johdosta tapahtuu lumivyöryefekti, jossa vapautuvat elektronit ionisoivat kaasun. Tätä tapahtumaketjua sanotaan elektronivyöryksi. Kuvassa 5 on periaatekuva koronapurkauksesta sähkösuodattimessa. Koska sähkökenttä on epähomogeeninen, niin se on vahva vain pienellä alueella eikä nopeaa virranjohtumista vastakkaiseen elektrodiin eli läpilyöntiä tapahdu. [2,5,15,16] Yhtälöllä 36 voidaan laskea syntyvän sähkökentän voimakkuus johdin-putki-rakenteiselle koronavaraajalle:

$$E = \frac{\Delta W}{R_s \ln \frac{d_t}{d_w}}, \quad (36)$$

jossa ΔW on putken ja johtimen välillä vallitseva jännite-ero [V], R_s on radiaalinen etäisyys johtimesta [m], d_t on putken ja d_w johtimen halkaisija [m]. Yhtälöstä 36 on helppo nähdä, että johtimen ja putken halkaisijoiden pysyessä ennallaan sähkökentän voimakkuus heikkenee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Riittävän suurella etäisyydellä kentän voimakkuus ei enää riitä kiihdyttämään elektroneja riittävän suureen nopeuteen elektronivyöryn aikaansaamiseksi. Tällöin puhutaan nk. passiivisesta alueesta. [15,16]



Kuva 5. Periaatekuva koronapurkauksesta sähkösuodattimessa. [23]

Törmäyksen seurauksena ionisaatioalueella syntyneet, varaajaelektrodin potentiaalinen merkistä riippuen joko positiiviset tai negatiiviset, ionit alkavat kulkeutua sähkökentän mukana kohti vastakkaismerkkistä elektrodia. Elektrodien väliltä voidaankin mitata virtaa jännitteen funktiona. [2,5] Koska sähkökentässä liikkuvat samanmerkkiset varaukset eivät törmäile toisiinsa, niin nämä ionit poistuvat ionisaatioalueelta yhtenäisesti liikkuvana pilvenä. Ionisaatioalueen ulkopuolella neutraalit kaasumolekyylit varautuvatkin niihin törmäävistä ioneista. Ionipilven liika saa aikaan kaasussa myös ilmavirtauksen kääntymisen samansuuntaiseksi ionien liikesuunnan kanssa. Seurauksena on varattujen ja varaamattomien molekyylin joukkoliike, jota kutsutaan ionituuleksi. Joukkoliikkeen sivuvaikutuksena törmäyksissä virittyneet todennäköisesti tyypin molekyylit emittoivat viritystilojen purkautuessa violettiä tai sinistä väriä revontulimaisena pilvenä. [2]

Kuten edellä kävi ilmi, koronavaraajaa voidaan käyttää sekä positiivisella että negatiivisella jännitteellä. Negatiivisella jännitteellä passiiviselle alueelle varausta kuljettavat elektronit synnyttävät negatiivisia ioneja. Ionisaatioalueella syntyvät positiiviset ionit tällöin kulkeutuvat varaajaelektrodille. Positiivisella jännitteellä passiiviselle alueelle varauksen tuovat positiiviset ionit ja ionisaatioalueella kaasun atomeista irtautuneet elektronit taas kulkeutuvat varaajaelektrodille. [2,15,16] Jotta koronapurkaus voi toimia stabiilisti, niin passiiviselle alueelle on saatava synnytettyä riittävän suuri tilavaraus. Positiivisella koronalla riittävä tilavaraus saavutetaan aina, sillä varausta kuljettavien positiivisten ionien sähköinen liikkuvuus on niin pieni. Elektronien sähköinen liikkuvuus on noin 500 kertaa positiivisia ioneja suurempi, jonka vuoksi riittävän tilavarauksen syntyminen vaatii sen, että väliainekaasu on hyvin

elektronegatiivinen. Tällaisia kaasuja, jotka jo pienempinä pitoisuuksina riittävät ovat muun muassa O_2 , H_2O , CO_2 , Cl_2 , CCl_4 , SF_6 ja HF . Jos väliaineikaasu ei ole riittävän elektronegatiivinen, niin seurauksena on koronan epästabiilisuus eli läpilyöntien syntyminen. Jos taas väliaineikaasu on sellaista, joka ei ole ollenkaan elektronegatiivinen esimerkiksi Ne tai Ar , niin negatiivista koronaa ei saada syntymään. Jotta negatiivinen korona toimisi hyvin, tarvitaan tämän lisäksi vielä suuri paine ja tarpeeksi suuri välimatka elektrodien välillä. Jos paine on huomattavasti alle normaali-ilmanpaineen, voi korkeilla koronavirroilla käydä niin, että elektroneista suuri osa kulkee vastaelektrodille törmäämättä kaasun molekyyliin, jolloin koronavirta nousee. [5,16,24]

Kun pyritään saamaan aikaan mahdollisimman vahva koronapurkaus, niin sähkökentän voimakkuutta kasvatetaan kunnes väliaineikaasu muuttuu johtavaksi ja tapahtuu läpilyönti. Kun negatiivista ja positiivista koronaa on tutkittu kenttäolosuhteissa, niin on havaittu negatiivisella koronalla olevan parempi läpilyöntikestävyys. Tavallisesti sähkösuodatuksessa vallitsevissa olosuhteissa läpilyönti tapahtuu koronajännitteen kasvaessa niin suureksi, että se synnyttää soihtumaisia purkauksia elektrodien väliin. Kun jännitettä kasvatetaan, niin soihtupurkausten seurauksena avautuu hyvin sähköä johtavia kanavia, jotka voivat yltyä vastaelektrodille ja aiheuttavat läpilyönnin. Negatiivisella koronalla soihtupurkausten ja kanavan syntymiseen tarvitaan korkeampi jännite kuin positiivisella koronalla. Tämä johtuu negatiivisten ionien positiivisia ioneja suuremmasta sähköisestä liikkuvuudesta. Käytännössä on havaittu, että läpilyönnin synnyttämiseksi tarvitaan negatiivisella koronalla noin kaksi kertaa korkeampi jännite kuin positiivisella koronalla. [2,20,25]

Negatiivisen koronan haittapuolena on kuitenkin sen taipumus tuottaa haitallista otsonia (O_3) huomattavasti enemmän kuin positiivinen korona. Tämä johtuu siitä, että otsonia synnyttävät vahvat ja epäsäännölliset koronapurkaukset ja positiivisella koronalla varaajaelektrodilla tapahtuva koronapurkaus on tasaisempi kuin negatiivisella koronalla. Koronaa ympäröivän kaasun lämpötila vaikuttaa ionien liikkuvuuteen sekä kaasun vapaaseen matkaan ja sitä kautta läpilyöntiherkkyyteen. Positiivisen koronan etu negatiiviseen koronaan on, että se tuottaa korkeissa lämpötiloissa tasaisemman läpilyönnittömän koronapurkauksen. [2,5]

4.1. Koronan sähköisiä ominaisuuksia kuvaavat yhtälöt

Koronavaraajassa syntyvälle koronalle on määritettävissä nk. syttymiskenttä eli sähkökentän voimakkuus, joka vaaditaan koronan syttymiseksi. Tähän vaadittuun sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa lähinnä käytetyn koronakärjen paksuus. [26] Syttymiskenttä voidaan laskea Peekin semiempiirisellä yhtälöllä:

$$E_c = 3 \cdot 10^6 \cdot k \left(\delta + 3,0 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{a}} \right), \quad (37)$$

jossa a on koronakärkenä käytettävän langan säde [m], δ on ilman suhteellinen tiheys ja k on koronakärjen naarmuista ja likaisuudesta yms. riippuva empiirinen kovuustekijä. Tekijä k saa arvoja väliltä 0,5-0,9. Yhtälö 37 kertoo sen, että langan paksuuden kasvaessa vaadittavan syttymiskentän voimakkuus laskee. Integroimalla yhtälö 37 koronalangan pinnasta sylinterin mallisen elektrodin pinnalle saadaan syttymiskentän avulla syttymisjännitteelle yhtälö:

$$V_c = E_c a \ln \frac{b}{a}, \quad (38)$$

jossa b on sylinterielektrodin säde [m]. Yhtälöstä 38 nähdään, että koronalangan paksuuden kasvaessa syttymisjännite nousee. Mitä ohuempaa koronalankaa käytetään, niin sitä suurempi on syntyvä paikallinen sähkökenttä. Tosin ohuen langan aikaansaama sähkökenttä vaimenee nopeammin etäisyyden kasvaessa kuin paksun langan aikaansaama sähkökenttä. Yhtälöistä 37 ja 38 nähdään myös, että mitä pienempi paine ja korkeampi lämpötila, niin sitä matalampi on syttymiskenttä ja -jännite. [5]

Kun elektrodirakenne on putkimainen ja koronakärki on pyöreä johdin, kuten tässä työssä käytetyssä koronavaraajassa, niin syttymiskentän voimakkuus saadaan yhtälöllä:

$$E_0 = 30\delta + 9 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{r_w}}, \quad (39)$$

jossa r_w on johtimen säde [m] [27]. Syttymisjännitteelle puolestaan saadaan johdettua yhtälö:

$$V_0 = E_0 r_w \ln \frac{r_t}{r_w}, \quad (40)$$

jossa E_0 on syttymiskenttä [V/m] ja r_t on maaelektrodin säde [m] [20]. Käytännökokeissa on havaittu, että suhteen r_t/r_w täytyy olla vähintään 2,7 tai koronan sijasta syntyy vain kipinöintiä [27]. Yhtälön 40 pohjalta syntyvä yhtälö koronavirralle eri tilanteissa on sen verran monimutkainen, että siitä on käytännön käyttöä varten muokattu yksinkertaisempia yhtälöitä, joille on määritelty tietyt ehdot. Pienillä virran ja jännitteen arvoilla koronavirtaa voidaan arvioida yhtälöllä:

$$i = V(V - V_0) \frac{2Z}{r_t^2 \ln \frac{r_t}{r_w}}, \quad (41)$$

jossa V on koronan jännite [V] ja V_0 on koronan syttymisjännite [V]. Keskiuurten virtojen arvioimiseen on yhtälö:

$$i = \frac{2Z}{r_t^2} \left[(V - V_0)^2 + \frac{V_0(V - V_0)}{\ln \frac{r_t^2}{r_w^2}} \right], \quad (42)$$

jossa merkinnät ovat samat kuin yhtälössä 41. Näiden yhtälöiden lisäksi käytetään yksinkertaista yhtälöä, jossa koronavirta lasketaan koronassa syntyneiden varauksien liikkeen avulla:

$$i = \frac{q_{tot}}{t}, \quad (43)$$

jossa q_{tot} on koronassa syntyneiden varausten lukumäärä ja t on aika [s]. [20]

5. HIUKKASTEN SÄHKÖINEN SUODATUS

Aerosolihiukkasten suodatukseen on kehitelty useita eri menetelmillä hiukkasia kerääviä laitteita. Suodattimet voidaan ajatella jaettavaksi karkeasti kahteen päätyyppiin, mekaanisiin ja sähköisiin suodattimiin. Hiukkasten sähköiseen suodatukseen käytettävän laitteen on pystyttävä varaamaan hiukkaset hallitusti ja tehokkaasti sekä tuottamaan riittävän suuri sähkökenttä, jotta varatut hiukkaset saadaan kulkeutumaan keräyspinnoille. Lisäksi sähköisessä suodattimessa täytyy olla käytössä jokin mekanismi, jolla kerätty hiukkasaines voidaan poistaa keräyspinnoilta.

Sähkösuodattimen keräystehokkuuden voidaan yksinkertaisimmillaan ajatella olevan ennen suodatinta mitatun hiukkaspitoisuuden ja suodattimen jälkeen mitatun pitoisuuden ero. Tarkoituksesta riippuen hiukkaspitoisuutta voidaan mitata joko massan tai lukumäärän mukaan. Näin määriteltynä sähkösuodattimen keräystehokkuus on:

$$\eta_s = \frac{N_{ennen} - N_{jälkeen}}{N_{ennen}} = 1 - \frac{N_{jälkeen}}{N_{ennen}}, \quad (44)$$

jossa N_{ennen} on hiukkaspitoisuus ennen sähkösuodatinta ja $N_{jälkeen}$ sen jälkeen. Yksikkönä näillä on $[\text{mg}/\text{m}^3]$ tai $[\#/ \text{cm}^3]$. Tässä työssä tehdyissä keräystehokkuusmittauksissa hiukkaspitoisuus mitattiin aina suodattimen jälkeen joko suodatin päällä tai pois päältä. Tällä tavalla vältetään yhtälön 44 tilanne, jossa keräystehokkuuteen tulee sähköisen keräystehokkuuden lisäksi laskettua mukaan myös suodattimessa tapahtuva hiukkasten mekaaninen keräytyminen.

Kun puhutaan yleisesti sähköisestä aerosolihiukkasten suodatuksesta, käytetään usein lyhennettä ESP (*engl. Electrostatic Precipitator*). Hiukkassuodatuksella on yleisesti ottaen kolme mahdollista tavoitetta. Hiukkasten suodattamisen ehkä yleisin syy on voimalaitoksissa ja moottoreissa syntyvien hiukkasten poisto ilmakehän saastumisen estämiseksi. Muut syyt ovat kaasupuhaltimien ja turbiinien suojaus hiukkasten vahingollisilta vaikutuksilta sekä mahdollisten tärkeiden ja arvokkaiden hiukkasten kerääminen talteen. [28]

Käytettävät sähkösuodattimet ovat rakenteeltaan tavallisesti joko sylinteri- tai levymallisia. Sylinterin mallisissa suodattimissa on muodoltaan pyöreä tai kuusikulmainen putki, jonka keskelle on sijoitettu koronapurkauksen tuottava varaajaelektrodi. Levymallisissa suodattimissa taas on vierekkäin ja mahdollisesti myös peräkkäin ohuita tasomaisia levyjä. Jos levymallinen suodatin on yksivaiheinen, niin koronapurkauksen tuottavat varaajaelektrodit on sijoitettu keräyslevyjen väliin. Varaaminen ja kerääminen tapahtuvat sähkösuodattimissa joko yhtä aikaa tai sitten

peräkkäin. Jos nämä tapahtuvat yhtäaikaisesti puhutaan nk. yksivaiheisesta sähkösuodattimesta, jossa ei ole yleensä erillistä varaajaa, vaan hiukkaset varataan koronan avulla samassa tilassa hiukkasia keräävien keräyslevyjen kanssa. Toisessa tapauksessa puhutaan nk. kaksivaiheisesta suodattimesta, jossa ensin tulee hiukkasten varaamiseen keskittyvä erillinen varaajaosa ja sen jälkeen osa, jossa sähkökentän avulla pyritään keräämään varatut hiukkaset. Tässä työssä käytetyt suodattimet olivat rakenteeltaan levymallisia ja toiminnaltaan kaksivaiheisia. Kaksivaiheiset suodattimet ovat perinteisesti kooltaan isompia ja vähemmän haitallista otsonia tuottavia kuin yksivaiheiset suodattimet. [29]

Kuten edellä kuvattiin, niin sähköisessä suodatuksessa hiukkaset ensin varataan ja sitten kerätään keräyspinnoille. Hiukkanen tarttuu keräyspinnalle sähköisten, mekaanisten ja kemiallisten voimien yhteisvaikutuksesta. Tavallisesti pintaan kiinni jäävät hiukkaset luovuttavat kantamansa varauksen erittäin nopeasti. Jos kuitenkin hiukkasten sähköinen resistiivisyys on suuri, niin aikaisemmin kerääntyneet hiukkaset voivat eristeominaisuuksillaan vaikuttaa hidastavasti varauksen siirtymiseen. Tällöin on mahdollista, että keräysalueelle syntyy paikallisesti suuri varaustihentymä, jonka seurauksena sähkökentän voimakkuus tällä alueella kasvaa. Jos sähkökentän voimakkuus kasvaa riittävästi, niin hiukkaskerroksessa tapahtuu läpilyönti. Vaikka läpilyöntiä ei tapahtuisikaan, niin jo kerääntyneet hiukkaset heikentävät sähkökenttää, josta seurauksena on kerättävien hiukkasten ajautumisnopeuden pienentyminen ja suodattimen keräystehokkuuden huonontuminen. [2,26] Hiukkasen varauksen luovutusnopeuteen keräyslevyn pinnalle vaikuttavat hiukkasten resistiivisyyden lisäksi keräytyneen hiukkaskerroksen paksuus ja tiheys [14].

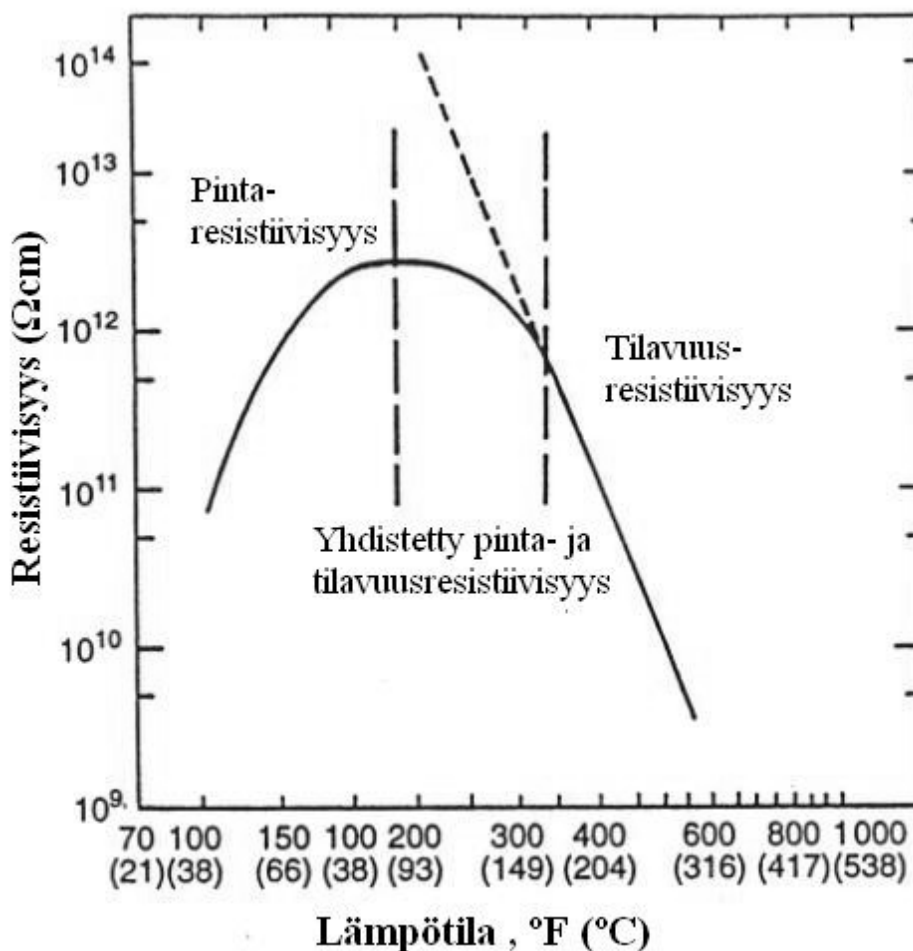
Resistiivisyyden vaikutuksesta keräykseen johtuen hiukkasen resistiivisyydelle pidetään ylärajana arvoa $10^{10} \Omega\text{cm}$. Tätä korkeampi resistiivisyys johtaa herkästi yllä kuvatun kaltaiseen läpilyönti-ilmiöön ja suodattimen toiminnan heikkenemiseen. Myös hiukkasten matala resistiivisyys voi olla ongelma. Hiukkaset luovuttavat varauksensa hyvin nopeasti ja koska kontaktiaika keräyslevyyn on lyhyt eivätkä sähköiset voimat pidä niitä kiinni keräyspinnassa, niin ne helpommin tempautuvat takaisin virtaukseen jääden kerääntymättä. [14] Taulukkoon 3 on koottu hiukkasten määritellyt resistiivisyydet.

Taulukko 3: Hiukkasten resistiivisyydet. [14]

Resistiivisyys [Ωcm]	Määritelmä
10^4 - 10^8	Johde
10^8 - 10^{10}	Normaali
10^{10} - 10^{11}	Kohtalainen
10^{11} - 10^{13}	Suuri

Hiukkasten resistanssi saadaan niiden johtavuuden käänteislukuna ja se voidaan jakaa pinta- ja tilavuusresistiivisyyteen. Pintaresistiivisyyteen vaikuttavat ratkaisevasti hiukkasen pinnalle kerääntyneet metallit ja ionit sekä siihen absorboitunut kosteus.

Tilavuusresistiivisyyteen puolestaan vaikuttaa merkittävästi vallitseva lämpötila ja tilavuusresistiivisyys on kääntäen verrannollisessa suhteessa siihen. [30] Kuvassa 6 on hiukkasen pinta- ja tilaresistiivisyyden muutos lämpötilan funktiona.



Kuva 6. Hiukkasen resistiivisyyden muutos lämpötilan funktiona. [14]

5.1. Suodattimen keräystehokkuuden arviointi

Sähkösuodattimen keräystehokkuutta arvioitaessa on gravitaatiosta aiheutuva hiukkasten keräytyminen ainakin pari kertaluokkaa sähköisten voimien aiheuttamaa keräytymistä pienempää, joten se voidaan jättää huomiotta. Sähkösuodattimessa aerosolin virtaus on yleensä turbulanttista, jolloin hiukkasen liike keräyspintojen välissä on epäsäännöllistä ja poukkoilevaa. Keräyspinnan läheisyydessä on kuitenkin aina ohut rajakerros, jossa kaasun virtaus on laminaarista ja tässä kerroksessa sähköinen voima hallitsee hiukkasten liikettä aikaansaaden hiukkasten keräytymisen. Suodattimen keräystehokkuutta turbulenttisen virtauksen tilanteessa voidaan arvioida yksinkertaisella Deutsch-Andersonin yhtälöllä:

$$\eta_{De} = 1 - \exp\left(\frac{-V_E A}{Q}\right), \quad (45)$$

jossa V_E on hiukkasten sähköinen ajautumisnopeus [m/s], A on suodattimen keräyspinta-ala [m²] ja Q on suodattimen läpi kulkevan kaasun tilavuusvirtaus [m³/s]. [6] Deutsch-Andersonin yhtälö kertoo vain sen kuinka suuri osa varautuneista hiukkasista päätyy keräyspinnalle. Suodattimen todellista keräystehokkuutta heikentävät varautumatta jäävät hiukkaset, hiukkaset joiden varaus neutraloituu ennen keräystä ja keräyspinnalta takaisin kaasuvirtaukseen tempautuvat hiukkaset. [2] Lisäksi yhtälössä tehdään useita oletuksia, jotka eivät todellisessa suodatustilanteessa välttämättä pidä paikkaansa. Hiukkasten ja sähkökentän oletetaan jakautuneen tasaisesti suodattimen sisällä, hiukkasen saavuttavan täyden varauksensa heti suodattimen sisään tullessaan, kaasun viskoosin vastusvoiman noudattavan Stokes'n lakia sekä hiukkasen vaellusnopeuden olevan riippumatonta kaasun virtausnopeudesta. Hiukkasten tasainen jakautuminen suodattimessa on turbulentsisella virtauksella järjestyvä oletus, mutta ainakin oletus viskoosin vastusvoiman suhteen ei turbulentsisessa virtauksessa päde ja myöskään oletus hiukkasten varautumisen suhteen ei pidä paikkaansa. Etenkin diffuusiovarautumisen tapauksessa varaus ei heti saavuta maksimiaan, vaan kuten luvussa 3 kerrottiin, niin diffuusiovarautumisessa hiukkasen varaus kasvaa ajan kuluessa. [5,6] On huomattava myös, että todellisessa tilanteessa ionipitoisuus suodattimen sisällä voi vaihdella ajan ja paikan funktiona. Lisäksi jos sähkösuodatin on toiminnaltaan yksivaiheinen, niin sen alkuun syntyy ns. tyhjennysalue, jossa suodattimen sisään tulevat varaamattomat hiukkaset keräävät itseensä vapaina olevat ionit. Sähkökenttä suodattimen sisällä ei tällöin ole tasaisesti jakautunut, sillä varautuneet hiukkaset saavat aikaan tilavarauksen, joka paikallisesti muuttaa keräyspintojen välissä vallitsevaa sähkökenttää. Hiukkasten synnyttämä tilavaraus heikentää sähkökenttää varaajaelektrodien läheisyydessä, minkä seurauksena koronavirta laskee. On tavallista, että virrantiheys suodattimen loppupään ja alkupään välillä eroaa 30 – 100%. [31]

On selvää, ettei Deutsch-Andersonin yhtälö kerro tarkkaa suodattimen keräystehokkuutta, mutta se on käyttökelpoinen arvioitaessa keräystehokkuuden suuruusluokkaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Yhtälöä käytetäänkin yleensä suodattimen karkeaan mitoituseseen ja siitä voidaan päätellä, että keräystehokkuutta parantavat keräyspinta-alan kasvattaminen eri tavoin, keräyspintojen välisen etäisyyden pienentäminen tai hiukkasten ajautumisnopeuden kasvattaminen sekä kaasun tilavuusvirran pienentäminen. Yhtälö ei myöskään aina liioittele keräystehokkuutta, vaan usein sen antama arvio esimerkiksi 0,3 µm kokoisten hiukkasten keräystehokkuudelle on todellista tilannetta huonompi, vaikka sähkösuodattimien keräystehokkuus on huonoimmillaan sen kokoisilla hiukkasilla. Yhtälön etuna voidaan pitää myös sen toimivuutta erimuotoisille suodattimille, jos vain tiedetään suodattimen keräyspinta-ala. [2,6]

Sähkösuodattimen keräystehokkuudelle turbulenttisen virtauksen tilanteessa on olemassa myös Deutsch-Andersonin yhtälöä monimutkaisempia malleja. Yksi näistä on Zhibinin ja Guoquanin yhtälö, joka pyrkii ottamaan todella huomioon kaasuvirtauksen turbulenttisuuden:

$$\eta_{Zhi} = 1 - \sqrt{\frac{Pe}{4\pi De}} \int_0^1 \exp\left[-\frac{Pe}{4De}(\xi - De)^2\right] d\xi, \quad (46)$$

jossa De on Deutschin luku ($V_E A/Q$) ja Pe Pecletin luku ($(V_E J)/(2D_p)$). Pecletin luvussa J on keräyslevyjen etäisyys toisistaan [m] ja D_p on hiukkasen diffusiviteetti [m^2/s], joka saadaan yhtälöllä:

$$D_p = D_t + D_B, \quad (47)$$

jossa D_t on turbulenttinen diffuusiokerroin [m^2/s] ja D_B on Brownin diffuusiokerroin [m^2/s]. [20]

Jos suodattimessa kaasuvirtaus on laminaarinen, niin tilanne on edellä esitettyä yksinkertaisempi, sillä hiukkasen liike on säännöllistä. Levymallisella suodattimella voidaan ajatella, että kaasuvirtaus aiheuttaa hiukkasen suuntaisen nopeuden ja homogeeninen sähkökenttä sitä vastaan poikittaisen nopeuden. Tällöin suodattimen keräystehokkuus saadaan yhtälöllä:

$$\eta_s = \frac{V_E D_H}{UL}, \quad (48)$$

jossa V_E on hiukkasten sähköinen ajautumisnopeus [m/s], D_H hiukkasten keskimääräinen etäisyys keräyspinnasta [m], U hiukkasten suodattimen suuntainen nopeus [m/s] ja L suodattimen pituus [m]. Yhtälöstä 48 voidaankin päätellä, että keräystehokkuus laminaarisen virtauksen tapauksessa on hiukkasen keräyspinnalle kulkeutumiseen kestävän ajan ja viipymääjan suhde. Sylinterimallisessa suodattimessa sähkökenttä ei ole homogeeninen, mutta tällöin voidaan käyttää sähkökentän voimakkuuden keskiarvoa hiukkasen ajautumisnopeuden määrittämiseen. [6]

5.1.1. Deutsch-Andersonin yhtälön johto sylinterimalliselle suodattimelle

Sylinterimallisessa suodattimessa voidaan ajatella keräytyvän kaikkien niiden hiukkasten, jotka päätyvät sylinterin keräysseinän läheisyydessä olevaan laminaarisen virtauksen kerrokseen. Tämän kerroksen paksuutta voidaan kuvata hiukkasen sähköisen ajautumisnopeuden V_E ja lyhyen ajan dt tulona. Kun oletetaan hiukkasten jakautuneen tasaisesti suodattimen sisällä, niin keräytyvien hiukkasten osuus dN kaikista hiukkasista N voidaan määrittellä laminaarisen virtausalueen ja koko sylinterin poikkipinta-alojen negatiivisena suhteena. Kun merkitään sylinterin sädettä r :llä, niin saadaan

rengasmaisen laminaarisen alueen pinta-alaksi $2\pi rV_E dt$ ja koko sylinterin poikkipinta-alaksi on πr^2 . Näistä saadaan yhtälö:

$$\frac{dN}{N} = -\frac{2\pi rV_E dt}{\pi r^2} = -\frac{2V_E dt}{r}. \quad (49)$$

Kun tämä yhtälö integroidaan ajan suhteen, niin hiukkaspitoisuudelle tietyllä ajanhetkellä t saadaan yhtälö:

$$\frac{N(t)}{N_0} = \exp\left(-\frac{2V_E t}{r}\right), \quad (50)$$

jossa N_0 on hiukkaspitoisuus alussa ja $N(t)$ ajan t kuluttua. Jos sylinterinmallisen suodattimen pituutta merkitään L :llä ja sen läpi kulkevaa tilavuusvirtausta Q :lla, niin hiukkasten viipymäajalle suodattimessa saadaan yhtälö:

$$t_R = \frac{\pi r^2 L}{Q}. \quad (51)$$

Sijoitetaan viipymäaika t_R yhtälöön 50, jolloin saadaan yhtälö suodattimen läpi pääsevien hiukkasten määrälle eli läpäisylle O :

$$O = \frac{N(L)}{N_0} = \exp\left(-\frac{2\pi V_E r L}{Q}\right). \quad (52)$$

Suodattimen keräystehokkuus taas on:

$$\eta_s = 1 - P. \quad (53)$$

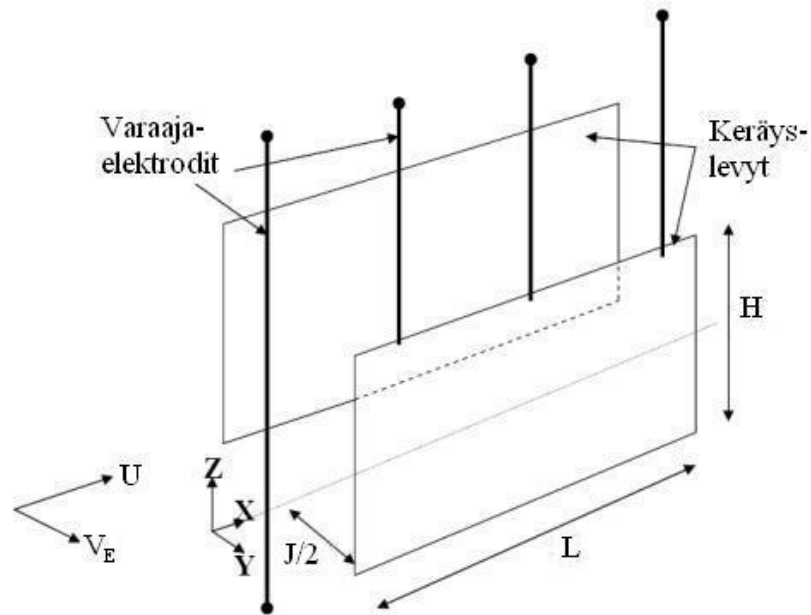
Kun lisäksi tiedetään, että sylinterimallisen suodattimen keräyspinta-ala $A = 2\pi rL$, niin saadaan sylinterimalliselle suodattimelle Deutsch-Andersonin yhtälö:

$$\eta_{De} = 1 - \exp\left(-\frac{V_E A}{Q}\right). \quad [6] \quad (54)$$

5.1.2. Deutsch-Andersonin yhtälön johto levymalliselle suodattimelle

Suodattimen keräämän hiukkasmäärän voidaan ajatella olevan yhtä suuri, kuin sen aikaansaaman hiukkaspitoisuuden vähentyminen kuljettaessa matka dx hiukkassuodattimessa. Tämä ajatus tarvitsee oletukset, että hiukkaset ovat tasaisesti

jakautuneena suodattimessa ja keräytyneet hiukkaset eivät palaudu takaisin virtaukseen. Kuvaan 7 on hahmoteltu sähkösuodatin ja merkitty kirjaimin eri mitat ja suureet.



Kuva 7. Sähkösuodattimen periaatekuva suuremerkintöineen. [2]

Kuvassa 7 V_E on hiukkasen sähköinen ajautumisnopeus, U on hiukkasen nopeus x -suunnassa, $J/2$ on keräyslevyjen etäisyys varaajaelektrodeista, L on keräyslevyjen pituus ja H on keräyslevyjen korkeus. Kirjoitetaan kuvan 7 merkintöjen avulla suodattimen keräämä hiukasmäärä ja hiukkaspitoisuuden vähennys yhtä suuriksi:

$$UJH [-c(x+dx) + c(x)] = \frac{1}{2} [c(x+dx) + c(x)] 2dxHV_E. \quad (55)$$

Käyttämällä yhtälön oikeaan puoleen oletusta $dx \rightarrow 0$, niin tämä yhtälö voidaan muokata muotoon:

$$\frac{1}{2} UJ \cdot \frac{dc(x)}{dx} = -V_E c(x). \quad (56)$$

Tehdään oletus, että hiukkasen x -suuntaan tapahtuvan liikkeen nopeus U on vakio ja hiukkasen ajautumisnopeus V_E ei riipu suuntaan x tapahtuvasta liikkeestä. Näillä oletuksilla ja integroimalla yhtälö 56, saadaan suodattimen matkalla L suodattimeen menevän ja siitä läpi pääsevän hiukkaspitoisuuden suhteelle yhtälö:

$$\frac{N_{\text{jälkeen}}}{N_{\text{ennen}}} = \exp\left(-\frac{2V_E L}{UJ}\right). \quad (57)$$

Kun tätä yhtälöä sovelletaan aikaisemmin esitettyyn yhtälöön 44, niin saadaan suodattimen keräystehokkuudelle yhtälö:

$$\eta_s = 1 - \exp\left(-\frac{2V_E L}{UJ}\right). \quad (58)$$

Kun huomataan, että kuvan 7 merkintöjen pohjalta voidaan kirjoittaa hiukkasen x-suuntaisen liikkeen nopeudelle $U=L/t$, suodattimen keräyspinta-alalle $A=2LH$ ja suodattimen läpi kulkevalle tilavuusvirtaukselle $Q=JHL/t$, niin saadaan levymalliselle suodattimelle Deutsch-Andersonin yhtälö:

$$\eta_{De} = 1 - \exp\left(-\frac{V_E A}{Q}\right). [2] \quad (59)$$

5.2. Keräytyvän hiukkasaineksen tarttuminen ja poistaminen

Suodattimien pinnoille kerättävien hiukkasten on tarkoitus tarttua keräyspintaan niin tiukasti, etteivät ne itsestään irtoa ja tempaudu takaisin kaasuvirtaukseen. Tavallisesti aerosolihukkaset törmätessään kiinnittyvätkin toisiinsa tai törmäyspintoihin. Hiukkasia pintaan tai toisiin hiukkasiin kiinni sitovia voimia kutsutaan yleisesti adheesiovoimiksi. Adheesiovoimia ovat muun muassa van der Waalsin voimat, nestemäisten kalvojen jännitysvoimat ja sähköstaattiset voimat. Mitä pienemmästä hiukkasesta on kyse, niin sitä helpommin niitä pintoihin sitovat voimat ovat riittävän suuria voittamaan gravitaatiovoiman ja niihin kaasuvirtauksessa vaikuttavan Stokes'n voiman. Tämä johtuu siitä, että esimerkiksi gravitaatiovoima on verrannollinen hiukkasen halkaisijan kolmanteen potenssiin ja heikkenee näin ollen nopeasti hiukkasen koon pienentyessä. Adheesiovoimien mallintaminen fysikaalisilla yhtälöillä on erittäin vaikeaa, sillä niiden suuruuteen vaikuttavat erittäin monet ja osin hankalasti kuvattavissa olevat tekijät. Tällaisia adheesiovoimien suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat ainakin hiukkasen koko, tarttuvien pintojen muodot ja rakenne, pintojen etäisyys, lämpötila, kosteus ja nestemäisten kalvojen ominaisuudet. [6]

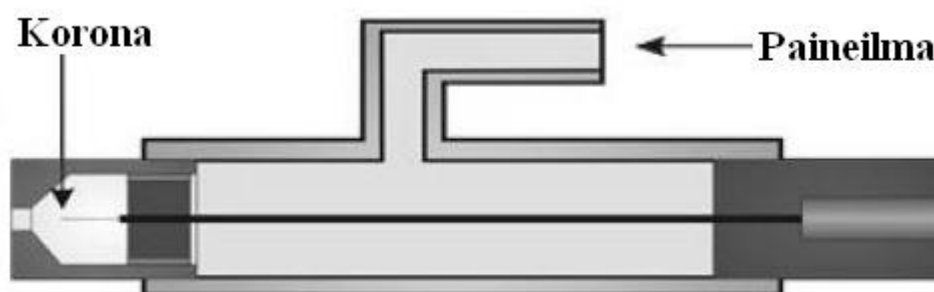
Suodattimen keräyspinnoille tarttuvien hiukkasten poistaminen on välttämätöntä suodattimen luotettavan toiminnan ja suodatuksen hyötysuhteen korkeana pysymisen vuoksi. Yleisimmin suodattimen puhdistukseen käytetään mekaanista täritystä tai nesteellä huuhtelua, mutta käytännössä puhdistukseen käytettävät keinot valitaan aina sovelluskohteen ominaisuuksista riippuen. [26] Autojen dieselmoottorien pakokaasusuodattimien puhdistamiseen niihin kerääntyvästä nokihukkasaineksesta käytetään korkeassa lämpötilassa polttoaineen avulla tapahtuvaa palamista. Noki saadaan palamaan lämpötilan noustessa yli 550 °C:een ja katalyyttejä käytettäessä myös matalammissa lämpötiloissa. [2] Laivojen pakokaasukattiloissa puolestaan käytetään

korkeapaineista höyrynuohousta, mekaanista nuohousta, vesinuohousta, ultraääntä sekä korkeapaineista ilmaa [32].

Teollisuudessa käytössä olevien sähkösuodattimien puhdistukseen pienemmän mittakaavan suodattimissa käytetään yleensä nestehuuhtelua, jossa keräyslevyjen pintaa pitkin valuvalla neste kerää mukaansa siihen tarttuneet hiukkaset ja valuu johonkin keräyslevyjen alla olevaan suppiloon, mistä neste voidaan ohjata eteenpäin. Suuremmissa sähkösuodattimissa puolestaan käytetään lähes aina mekaanista täritystä. Mekaanisessa tärityksessä ongelmana on se, etteivät pienimmät hiukkaset tahdo irrota keräyspinnasta ja jos irtoavatkin, niin ne tempautuvat takaisin kaasuvirtaukseen huonontaen keräystehokkuutta. Tutkimusten mukaan mekaanisella tärityksellä keräyspinnoista irtoavat vain yli 1 μm :n kokoiset hiukkaset, mutta silti hiukkasten tempautuminen takaisin virtaukseen on suurin suodattimen keräystehokkuutta heikentävä tekijä. [2,33] Tässä yhteydessä on muistettava, että hiukkaset agglomeroituvat levyllä, minkä vuoksi pienetkin keräytyvät hiukkaset voivat irrota levyltä agglomeroiduttuaan isommiksi. Tämä on keräystehokkuuden kannalta positiivinen asia, sillä jos hiukkaset irtoaisivat levyltä pieninäkin, niin ne tempautuisivat herkemmin virtauksen mukaan. Hiukkasten takaisintempautumisen estämiseksi olisi hyödyllistä myös saada pidettyä ravistuksessa irtoava hiukkasaines keräyspinnan lähellä olevan hitaan laminaarisen virtauksen alueella [34]. Suuremmissa suodattimissa voi olla useita keräyslevyjä peräkkäin, jolloin alkuosan keräyslevyille voi kertyä paljon enemmän hiukkasainesta kuin viimeisille keräyslevyille. Myös hiukkaskoolla on vaikutusta siihen, mille keräyslevylle hiukkaset kertyvät. Varautuneet alle 0,1 μm :n kokoiset ja hyvin varautuneet suuret yli 1 μm :n kokoiset hiukkaset kertyvät yleensä ensimmäisille ja huonoimmin varautuvat 0,2-0,3 μm :n kokoiset hiukkaset vasta myöhemmille keräyslevyille. [35] Tästä johtuen suurissa sähkösuodattimissa ensimmäiset keräyslevyt voivat tarvita puhdistavia tärityksiä useammin. Lisäksi kaikkia keräyslevyjä ei täristetä yhtä aikaa, jotta keräykseen ei tule taukoa. Mekaanisella tärityksellä puhdistaminen asettaa myös vaatimuksia keräyslevyjen rakenteelle ja niiden muotoilulle. Keräyslevyjen muotoilulla voidaan rakenteen vahvistamisen lisäksi pyrkiä estämään takaisintempautumista, mutta tällä voi olla virtauksen turbulentsuutta ja sekundaarisia virtauksia lisäävä vaikutus. [30]

6. PUHALLUSVARAAJA JA HIUKKASKERÄIMET

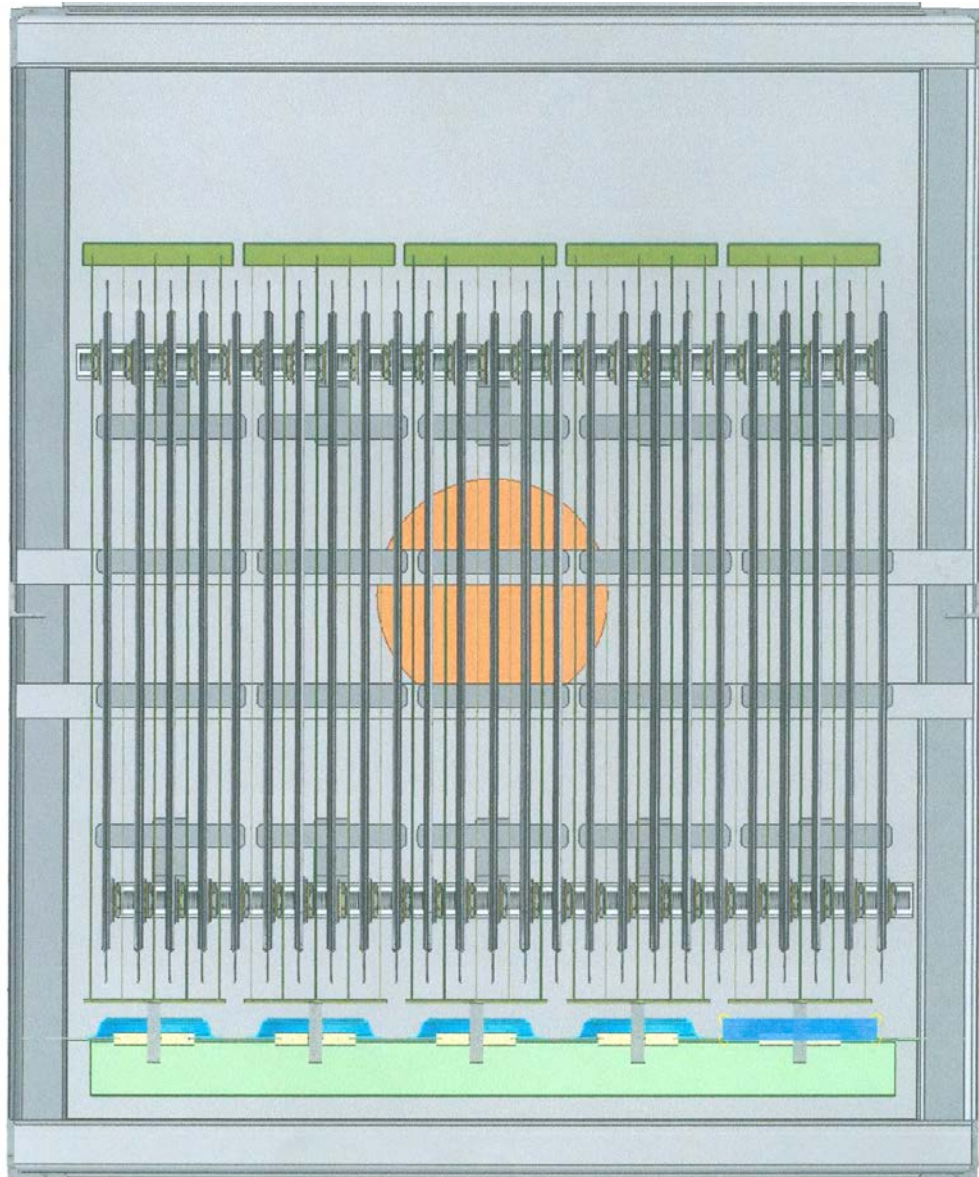
Tämän diplomityön alkuvaiheessa tutkittiin jo aiemmin projektissa kehitetyn puhallusvaraajan toimintaa. Ulkoapäin puhallusvaraaja on rakenteeltaan putkimainen ja halkaisijaltaan noin 2,5 cm sekä pituudeltaan noin 22 cm. Puhallusvaraajaan johdettiin 4-7 kV:n jännite, joka synnytti puhallusvaraajan sisällä olevan metallipiikin kärkeen ioneja tuottavan koronapurkauksen. Lisäksi puhallusvaraajaan syötettiin 1,5-4 barin ylipaineella ilmaa, minkä seurauksena syntynyt virtaus puhalsi koronapurkauksen tuottamat ionit ulos puhallusvaraajasta. Kuvassa 8 on periaatekuva puhallusvaraajasta.



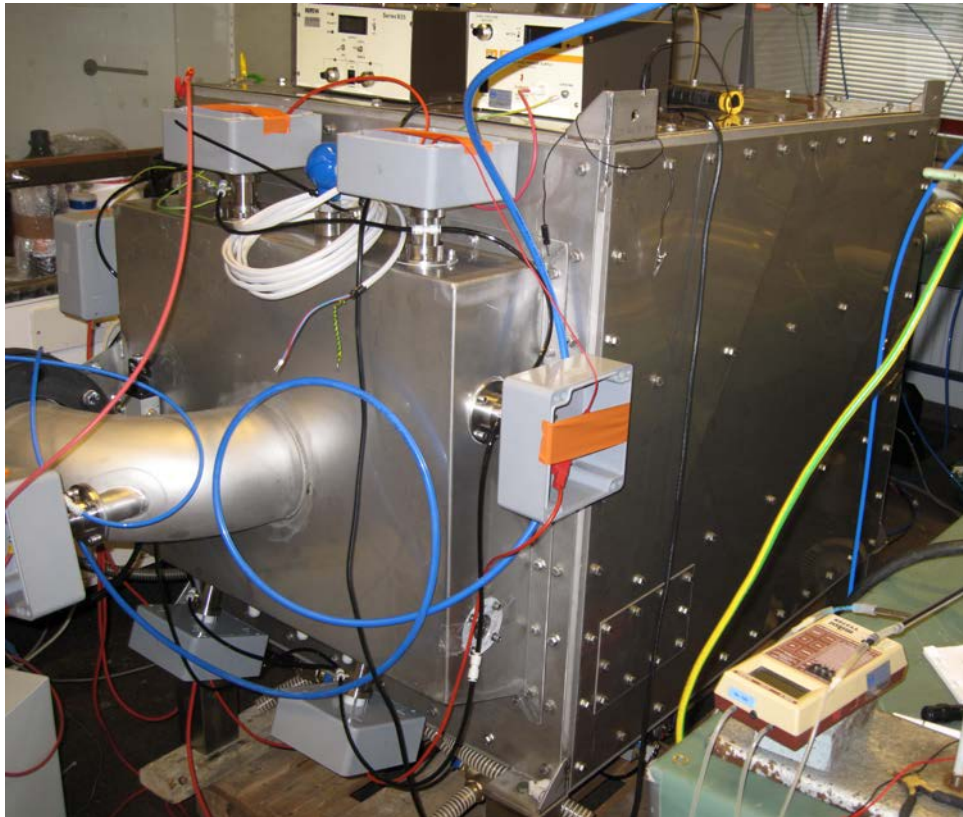
Kuva 8. Periaatekuva puhallusvaraajasta. [20]

Tammikuussa ja huhtikuun lopulla suoritetuissa keräystehokkuusmittauksissa käytettiin työnimellä Suula kutsuttua hiukkaskeräintä, joka rakennutettiin ulkopuolisella toimijalla. Keräin oli lähes suorakulmion muotoinen ja se oli leveydeltään noin 80 cm, korkeudeltaan noin 70 cm ja pituudeltaan vähän yli metrin. Itse keräyslevyt olivat 100 cm leveitä ja 60 cm korkeita ja niitä oli keräimessä 2 cm:n välein 25 kappaletta. Maadoitettujen keräyslevyjen välissä oli aina korkeajännitelevy, joka oli 1 cm:n etäisyydellä molemmista keräyslevyistä. Kun otetaan huomioon, että jokainen keräyslevy keräsi hiukkasia molemmille puolilleen, niin Suula-keräimen kokonaiskeräyspinta-alaksi saadaan noin 30 m²:ä. Suula-keräimellä laboratoriossa tehdyissä mittauksissa keräimen etuosassa oli kammio, johon usea puhallusvaraaja puhalsi ioninsa. Heti tämän kammion jälkeen tulivat keräyslevyt. Huhtikuun mittauksessa kammio oli muutettu spiraalina kiertäväksi 10 cm halkaisijaltaan olevaan nelikulmaiseen putkeen, jonka mutkiin puhallusvaraajat sijoitettiin. Keräimen keräystehokkuutta mitattaessa keräyslevyjen jännitteenä käytettiin 1-6 kV:a ja puhallusvaraajien jännitteenä käytettiin 4-6 kV:a. Laboratoriomittauksissa käytettiin

kahta jännitelähdettä. Toista keräyslevyjen jännitteen synnyttämiseen ja toista jännitteen tuomiseen kaikille puhallusvaraajille. Suula-keräimeen oli lisäksi rakennettu keräyslevyjen vesipuhdistuksen mahdollisuus, jota ei kuitenkaan käytetty tässä työssä suoritetuissa mittauksissa. Kuva 9 on periaatekuva Suula-keräimen sisältä ja kuva 10 valokuva Suula-keräimestä aerosolifysiikan laboratoriossa.

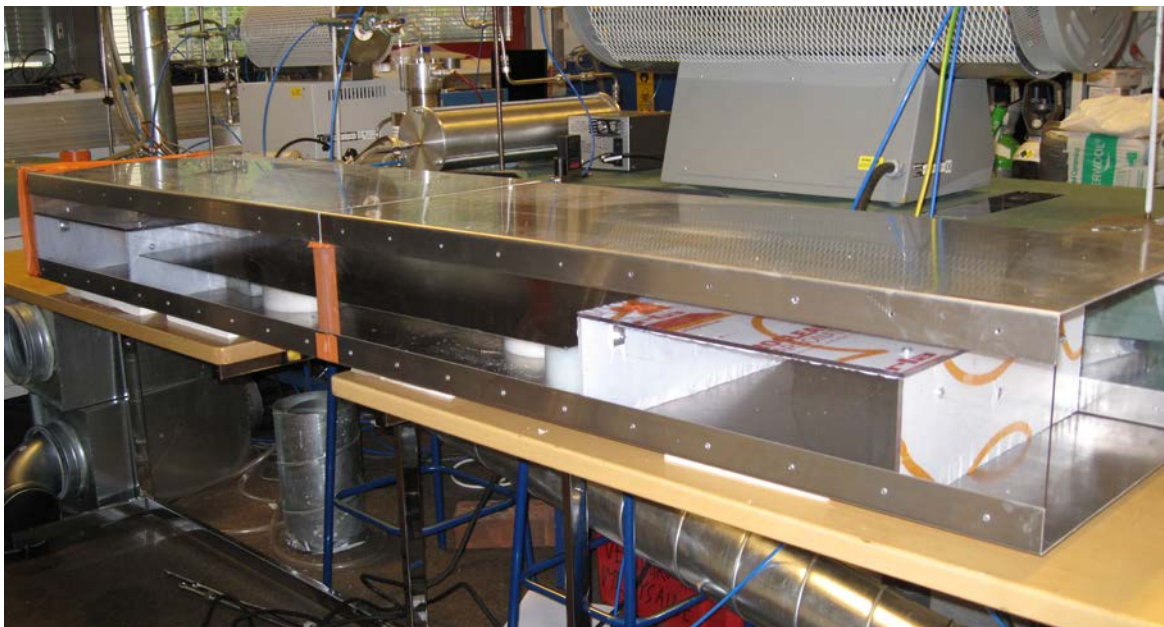


Kuva 9. Periaatekuva Suula-keräimen sisältä keräyslevyistä.



Kuva 10. Valokuva Suula-keräimestä.

Huhtikuun alkupuolella suoritetuissa keräystehokkuusmittauksissa käytettiin osittain itse rakennettua ja osittain laboratorion pajalla rakennettua ulkomuodoltaan suorakulmaista laatikkomaista keräintä. Keräimen katto ja lattia tehtiin metallista ja sivuseinät läpinäkyvästä muovista. Sivuseinät haluttiin läpinäkyviksi, jotta pystyttiin havainnoimaan savukaasuvirtauksen liikettä keräimen sisällä. Rakennettu keräin oli pituudeltaan 200 cm, leveydeltään 40 cm ja korkeudeltaan 20 cm. Kuvassa 11 näkyy prototyypikeräimen ulkoapäin ja kuvasta näkyy myös sen rakenne.



Kuva 11. Valokuva prototyypikeräimestä.

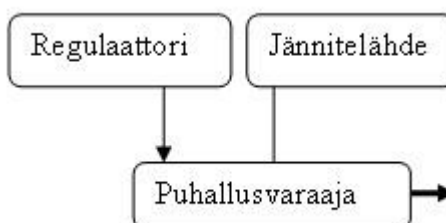
Keräinlaatikon sisällä varsinaisena keräimenä oli ohut 40 cm leveä ja 100 cm pitkä metallinen levy, jolloin keräyspinta-ala prototyypikeräimellä oli vaatimaton $0,4 \text{ m}^2$. Hiukkasia kerätessä keräyslevyyn johdettiin $\sim 10\text{-}25 \text{ kV}$:n suuruinen jännite. Keräyslevy asetettiin pyöreiden muovisten jalkojen päälle, jotta se olisi eristetty suorasta kosketuksesta keräimen metallisen lattian kanssa. Lisäksi keräimen sisääntuloon ja ulosmenoon rakennettiin läpinäkyvästä muovista 40 cm leveät, 40 cm pitkät ja 13 cm korkeat suorakulmaiset virtausohjaimet. Ajatuksena virtausohjaimissa oli, että keräimeen tuleva savukaasuvirtaus pysyisi mahdollisimman pitkään lähellä keräimen kattoa, jotta keräinlevylle keräytyvien hiukkasten uudelleen tempautuminen virtauksen mukaan olisi mahdollisimman vähäistä. Keräystehokkuus mittauksissa keräimen sisääntuloon ja ulosmenoon rakennettiin tiivis kansi, joissa oli savukaasuvirtauksen tuonti- ja vientiputken kokoiset reiät ja keräimen saumakohtat tiivistettiin teipin avulla.

7. MITTAUSJÄRJESTELYT

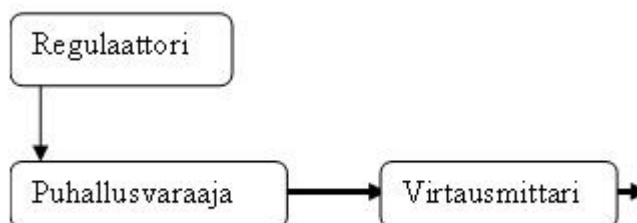
Tämän diplomityön alkupuolella selviteltiin yksinkertaisilla mittauksilla puhallusvaraajien likaantumista, jännitteen ja varaajalle syötettävän paineilman paineen vaikutusta varaajan koronavirtaan, varaajalle syötettävän paineilman paineen vaikutusta varaajasta ulostulevan ilman tilavuusvirtaukseen sekä varaajien ionituottoa.

Likaantumismittauksessa käytettiin halkaisijaltaan noin 17 cm:stä putkea, jonka T-haaraan asetettiin puhallusvaraaja. Putki yhdistettiin laboratorion poistoon, jolloin syntyi putken pääsuuntaan etenevä virtaus. Hiukkasgeneraattorilla tuotettiin putkeen savukaasua ja puhallusvaraaja laitettiin puhaltamaan ioneja virtaukseen 90 asteen kulmassa. Likaantumista tutkittiin vaihtelemalla puhallusvaraajan jännitettä sekä sille syötetyn paineilman painetta ja mittaamalla kuinka kauan aikaa kesti siihen, että varaajassa tapahtui ensimmäinen läpilyönti. Lisäksi tutkittiin puhallusvaraajan suuttimen muodon vaikutusta likaantumiseen muutamilla erimuotoisilla suuttimilla.

Puhallusvaraajan käyttöjännitteen ja syötettävän paineilman vaikutusta varaajan koronavirtaan mitattiin jännitelähteellä, joka mittasi myös varaajan käyttämää koronavirtaa. Kuvassa 12 on esitetty koronavirran mittauksessa käytetty mittausjärjestely. Puhallusvaraajan suuttimen kautta tulevan ilman tilavuusvirtaus varaajalle syötettävän paineen funktiona mitattiin lyhyen letkun sekä Gilian Gilibrator kuplavirtausmittarin ja Alicatin sähköisen virtausmittarin avulla. Varaajan suu työnnettiin letkun sisään ja letkun toiseen päähän kytkettiin virtamittari, jonka jälkeen vaihdeltiin varaajalle syötetyn paineilman painetta ja mitattiin syntyvä tilavuusvirtaus. Kuvassa 13 on esitetty tilavuusvirran mittauksessa käytetyn mittausjärjestelyn periaatekuva.

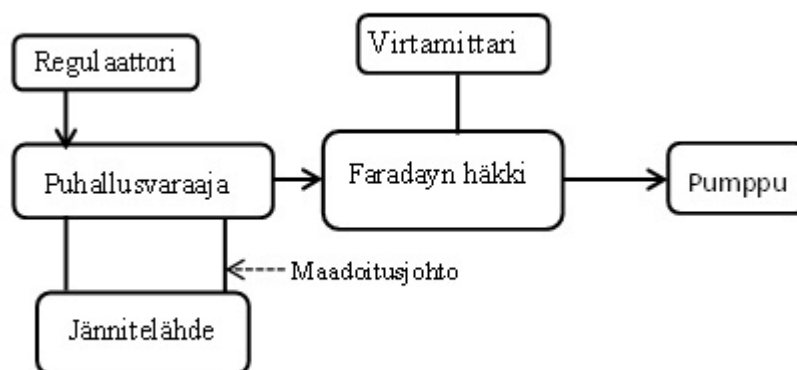


Kuva 12. Mittausjärjestely, jolla mitattiin koronavirta regulaattorin paineen funktiona.



Kuva 13. Mittausjärjestely, jolla mitattiin puhallusvaraajasta tuleva tilavuusvirtaus regulaattorin paineen funktiona.

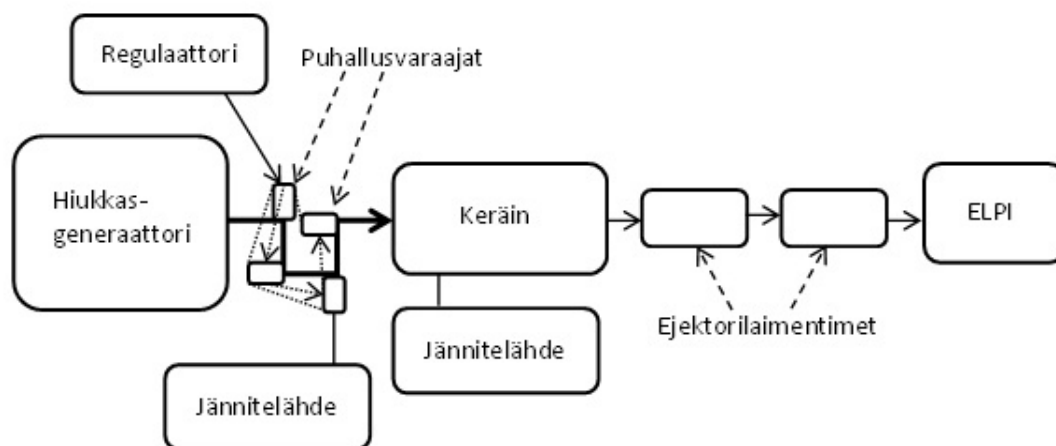
Tässä diplomityössä tehdyt puhallusvaraajan ionituottomittaukset suoritettiin loka- ja marraskuun vaihteessa 2010. Ionituottoa pyrittiin mittaamaan hyvin yksinkertaisella mittausjärjestelyllä. Puhallusvaraaja kytkettiin jännitelähteeseen sekä regulaattorin kautta paineilman syöttökanaavaan. Pumpulla imettiin Faradayn häkin läpi 30 litraa minuutissa ja puhallusvaraajan suu laitettiin vasten Faradayn häkin samankokoista suuaukkoa, jotta ioneista mahdollisimman pieni osa ehtisi hävitä ennen kuin ne päätyivät mitattaviksi. Virtamittarilla mitattiin Faradayn häkille tullut virta ja tästä mitatusta virranarvosta laskettiin puhallusvaraajan synnyttämä ionipitoisuus. Kuvassa 14 on ionituottomittauksissa käytettyä mittauslaitteistoa havainnollistava periaatekuva. Kuvaan on vahvoilla nuolilla merkitty virtauksen kulkusuunta.



Kuva 14. Ionituottomittauksessa käytetyn mittausjärjestelyn periaatekuva.

Diplomityön aikana tehtiin kolme keräystehokkuusmittausta. Ensimmäinen niistä tehtiin tammikuussa, toinen huhtikuun alussa erilaisella keräimellä ja kolmas huhtikuun lopussa ns. todellisessa tilanteessa samalla keräimellä kuin tammikuussa. Kaikissa kolmessa mittauksessa mittausjärjestely oli periaatteellisesti samanlainen. Hiukkasgeneraattorin tuottamat tai savukanavasta johdetut hiukkaset ohjattiin noin 17 senttimetriä halkaisijaltaan olleeseen metalliputkeen, jonka mutkiin oli sijoitettu puhallusvaraajia 90 asteen kulmassa puhaltamaan ioneja aerosoliin. Puhallusvaraajat oli kytketty jännitelähteeseen ja regulaattorin kautta paineilman syöttöön siten, että jännitejohto ja paineilmaputki tulivat kiinni yhteen puhallusvaraajista, mistä ne lyhyillä

johdoilla ja putkilla jaettiin muillekin varaajille. Tämän varausvaiheessa käytetyn putken perään oli sijoitettu omaan jännitelähteeseensä kytketty keräin. Keräimen jälkeen oli kaksi ejektorilaimenninta ja niiden jälkeen ELPI. Kuvassa 15 on keräysmittauksissa käytettyä mittauslaitteistoa havainnollistava periaatekuva.

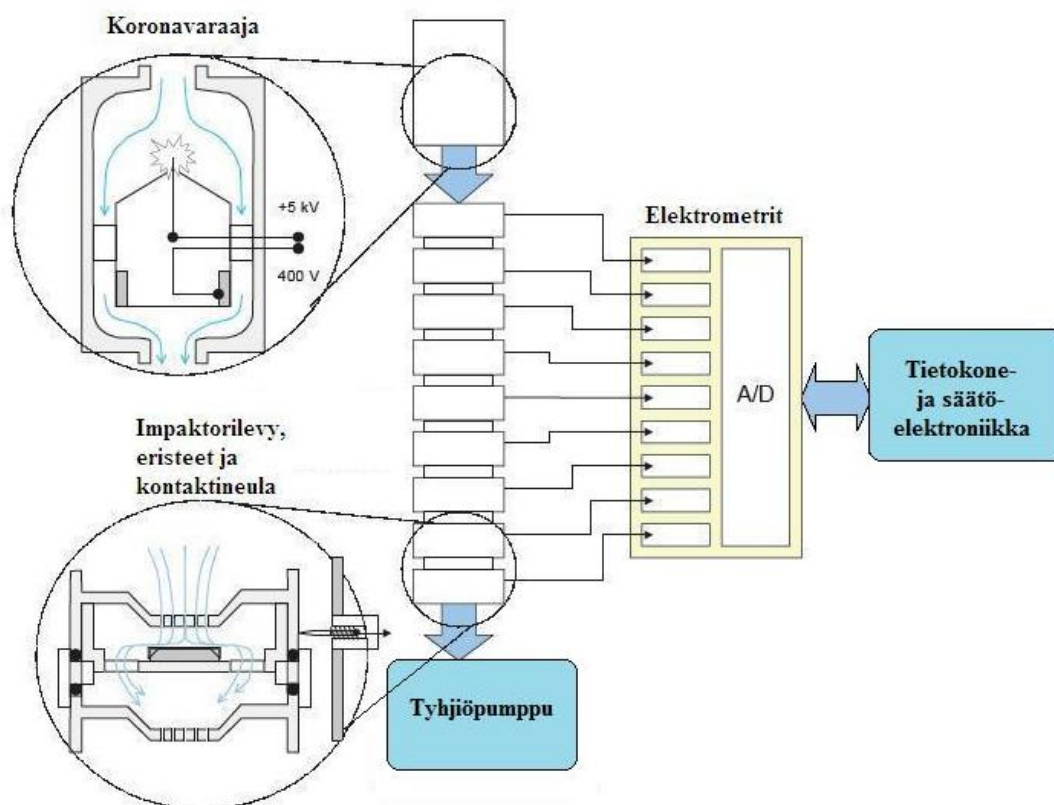


Kuva 15. Keräysmittauksissa käytetyn mittausjärjestelyn periaatekuva.

Kuvassa 15 puhallusvaraajien välillä kulkevat pisteviivat ja nuolet kuvaavat niiden välillä olleita paine- ja jänniteliitännöitä. Puhallusvaraajia oli mittauksissa käytössä useimmiten kuusi kappaletta, mutta kuvaan on selkeyden vuoksi piirretty vain neljä.

7.1. ELPI

ELPI (*engl. Electrical Low Pressure Impactor*) eli sähköinen alipaineimpaktori on reaalitajaisesti toimiva impaktioon perustuva aerosolin hiukaspitoisuutta mittaava laite, jota nykyisin valmistaa Dekati Oy. ELPI:ssä on koronavaraaja, jolla aerosolihiuksat varataan ja kaksitoista kaskadiin kytkettyä impaktoriastetta, joiden avulla hiukaset kokoluokitellaan niiden aerodynaamisen koon perusteella. [7,36] Aerosolin virtaus impaktoriasteiden läpi saadaan aikaan tyhjiöpumpulla ja yleensä käytetään 10 lpm suuruisesta virtauksesta [5]. Kuvassa 16 on läpileikkaus ELPI:n rakenteesta.



Kuva 16. ELPI:n rakenne

ELPI:iin tulevat hiukkaset varataan 5 kV:n positiivisella koronalla ja itse varautuminen perustuu lähinnä diffuusiovarautumiseen. Suurikokoisimmilla hiukkasilla myös kenttävarautuminen voi olla osatekijä varautumisessa. Tämän koronavaraajan perään on laitettu 400 V:n ioniloukku, jolla pyritään estämään mahdollisten varaajasta pois pääsevien ionien ajautuminen elektrometreille asti. Jos halutaan mitata pieniä hiukkasia voidaan ELPI:n 11. aste vaihtaa välikappaleeseen ja sijoittaa alimmaksi asteeksi suodatin. Tällä toimenpiteellä saadaan ELPI:n mitta-alue, joka tavallisesti on välillä 0,030 – 10 μm :ä, laajennettua aina 7 nm:n kokoiisiin hiukkasiin asti. Alle 7 nm:n kokoiset hiukkaset suodattuvat jo ELPI:n varaajassa, minkä vuoksi niitä ei pystytä mittaamaan. Pieniä hiukkasia suodatinasteen avulla mitattaessa tulee lisäksi muistaa vaihtaa normaalisti käytettävä 400 V:n ioniloukku 9 V:n paristoloukkuun, ettei myös osa pienimmistä hiukkasista jäisi ioniloukkuun. [5]

Varsinainen erottelu hiukkasten aerodynaamisen koon perusteella tapahtuu siten, että ELPI:iin tuleva virtaus kulkee ensin pienistä suutinrei'istä kohtisuorasti impaktorilevyä kohti ja suuttimen jälkeen virtaus kääntyy noin 90 asteen kulmassa impaktoriasteen ohi. Tällöin kullakin asteella aerodynaamiselta kooltaan tietyn kokoiset hiukkaset eivät enää inertiansa vuoksi pysty seuraamaan virtausta, vaan törmäävät impaktoriasteeseen ja ideaalissa tilanteessa jäävät kaikki siihen kiinni. Herkillä elektrometreillä mitataan asteille tullut varaus, josta voidaan laskea kullekin asteille tulleiden hiukkasten lukumäärä. Tätä laskemista varten on tunnettava Pn-käyrä eli

varautumisasteen ja läpäisyn tulo jokaisella hiukkaskoolla. Kullekin asteelle voidaan laskea niin sanottu katkaisukohta eli hiukkaskoko, joka vastaa 50% keräystehokkuutta. Kahden peräkkäisen asteen katkaisukohtien geometrista keskiarvoa käytetään sitten asteelle jääneiden hiukkasten laskennallisena kokona. Asteille lasketun hiukkaskoon ja lukumäärän avulla saadaan hiukkaskokojakauma. [7]

ELPI:n hiukkaskokoon liittyen on huomattava, että koska hiukkasten erottelu asteille tapahtuu niiden aerodynaamisen koon perusteella, mutta varautuminen ELPI:n varaajassa taas hiukkasten todellisen koon perusteella, niin jotta olisi mahdollista muuntaa hiukkasen aerodynaaminen koko liikkuvuuskooksi ja toisinpäin pitäisi tuntea hiukkasten tiheys. Tästä on seurauksena se, että jos samoja hiukkasia mitataan sekä ELPI:llä että SMPS:llä (Skannaava liikkuvuusokoluokittelija, *engl. Scanning Mobility Particle Sizer*), niin nämä laitteet näyttävät hiukkaset eri kokoisina. On tutkittu, että ELPI näkee 100 nm:n kokoiset suola hiukkaset isompina kuin SMPS ja mentäessä yli μm :n kokosiin hiukkasiin ero vaihtuu toisinpäin johtuen siitä, että liukukorjauskerroin ei enää vaikuta. [5] Pallonmuotoisille hiukkasille fyysinen ekvivalenttihalkaisija kuitenkin on sama kuin Stokes'n halkaisija, jolloin kokomuutos voidaan suorittaa yhtälöllä:

$$d_a^2 C(d_a) \rho_0 = d_s^2 C(d_s) \rho_e, \quad (60)$$

jossa ρ_0 on yksikkötiheys ja ρ_e käytetyn hiukkasmateriaalin tiheys. [37]

ELPI:n elektrometrien mittaaman virran mittausalueeksi on mahdollista valita 10 000 – 400 000 fA:ia. Jos valitaan pienin mittausalue, niin kohinasoksi muodostuu 1 fA ja tällöin havaintoraja on noin 2 fA:ia [5]. Tämä asettaa hiukkaspitoisuuden alhaisuudelle havaitsemisrajan, joka esimerkiksi 50 nm:n hiukkasille on 130 #/cm³ ja mitä isompiin hiukkasiin mennään, niin sitä alhaisempi on vaadittu hiukkaspitoisuus [38]. On huomattava, että ELPI:iin pätee sama kuin tavallisiin perinteisiin elektrometreihin eli sekään ei pysty erottamaan tietyn kokoisten hiukkasten monivarautuneisuutta, vaan hiukkasille voidaan laskea vain keskimääräinen varaus [5].

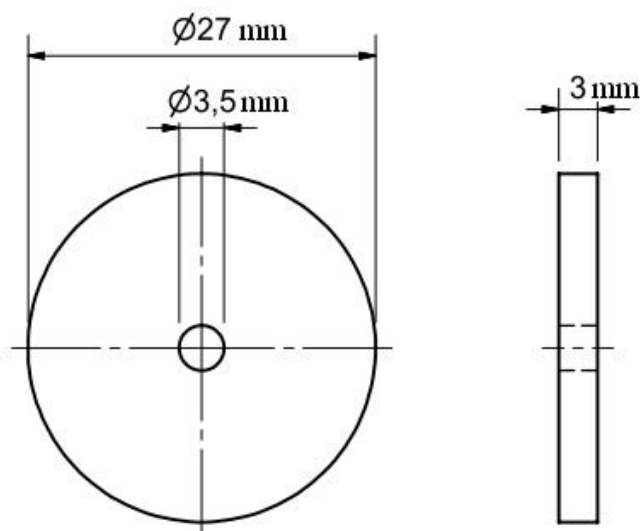
Jos ELPI:ä verrataan normaaliin massaimpaktoriin, on sillä puolellaan kaksi etua. Koska ELPI ei mittaa massaa, vaan varausta, niin se pystyy paremmin erottelemaan pieniä hiukkasia ja asteille tulevan virran mittaaminen onnistuu jopa sekunnin välein. ELPI:llä onkin mahdollista seurata hiukkaskokojakauman muutoksia käytännössä reaaliajassa. Tässä diplomityössä tehdyissä mittauksissa hiukkaskokojakaumaa tai suoraan varausta mitattaessa mittalaitteena käytettiin aina ELPI:ä.

8. TULOKSET

Tulokset –lukuun on koottu tämän diplomityön aikana tehdyistä mittauksista saadut tulokset kuvina ja käyty läpi niistä nähtävissä olevat havainnot. Tuloksilla on pyritty havainnollistamaan sitä tietoa, mitä mittauksilla on saatu puhallusvaraajien ja kerääjien toiminnasta. Kaikki tässä osiossa olevat hiukkaspitoisuuteen liittyvät kuvat on piirretty ELPI:llä saadun mittausdatan perusteella. Mittauksissa käytetty ELPI ei pystynyt luokittelemaan alle 20 nm:n kokoisia hiukkasia. Tästä johtuen muun muassa hiukkaskokojakauma-kuvissa ei näy tätä pienempiä hiukkasia, vaikka mittauksen kohteena olleessa aerosolissa niitä on mahdollisesti ollutkin.

8.1. Puhallusvaraajan toimintaan liittyvät mittaukset

Tässä luvussa käsitellyissä puhallusvaraajan toimintaan liittyvissä mittauksissa - likaantumismittauksia lukuun ottamatta - puhallusvaraajan suuttimen tulpan reikä oli viistoamaton ja halkaisijaltaan 3,5 mm. Kuvassa 17 on mittakuva käytetystä puhallusvaraajan suuttimen tulpasta.

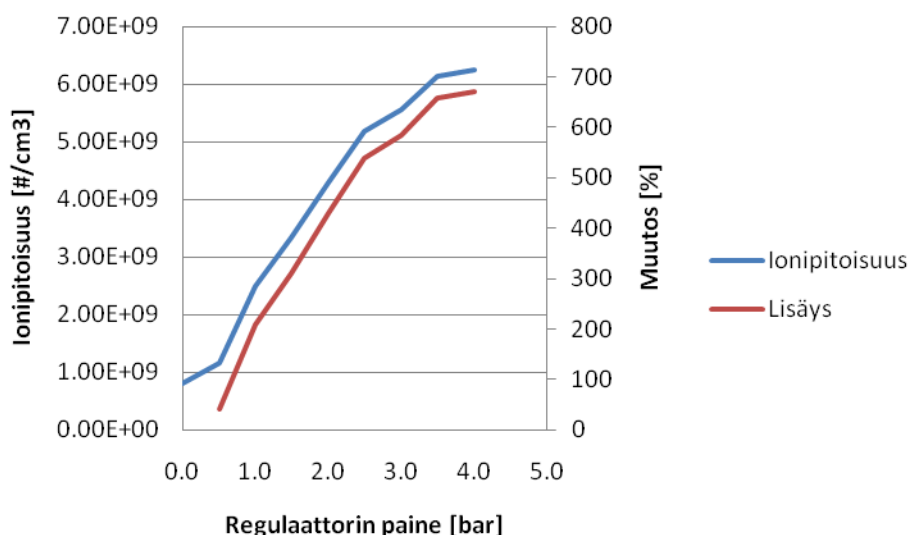


Kuva 17. Puhallusvaraajan suuttimen tulppa mittoineen.

Likaantumismittauksissa sen sijaan kokeiltiin muutamia erikokoisella ja -muotoisella reiällä varustettuja suuttimia. Tämän diplomityön alussa pyrittiin mittaamaan puhallusvaraajan aikaansaamaa ionituottoa Faradayn häkin ja pumpun avulla. Ionituotto oli kiinnostuksen kohteena, koska pyrittiin arvioimaan onko puhallusvaraajien

synnyttämä ionipitoisuus riittävä hiukkasten varaamiseksi. Lisäksi oli ryhdytty teettämään erä puhallusvaraajia ja haluttiin mahdollisuus myöhemmin vertailla näiden uusien ja vanhan puhallusvaraajan ionituottoa. Valitulla mittaustavalla ionihäviöt olivat kuitenkin merkittäviä, joten absoluuttista arvoa siitä, mikä on puhallusvaraajan ionituotto, ei näistä tuloksista voida nähdä. Ionihäviöt havaittiin siitä, että yleismittari näytti virtaa myös suoraan Faradayn häkin metallikotelon pinnasta mitattaessa. Osa ionien luovuttaman varauksen tuottamasta virrasta johtui siis Faradayn häkin metalliseen koteloon, eikä sen sisällä olevaan metalliverkkoon. Näistä ionituottomittauksista saaduista tuloksista nähdään kuitenkin ionituottoon vaikuttavien tekijöiden suhteellinen merkitys.

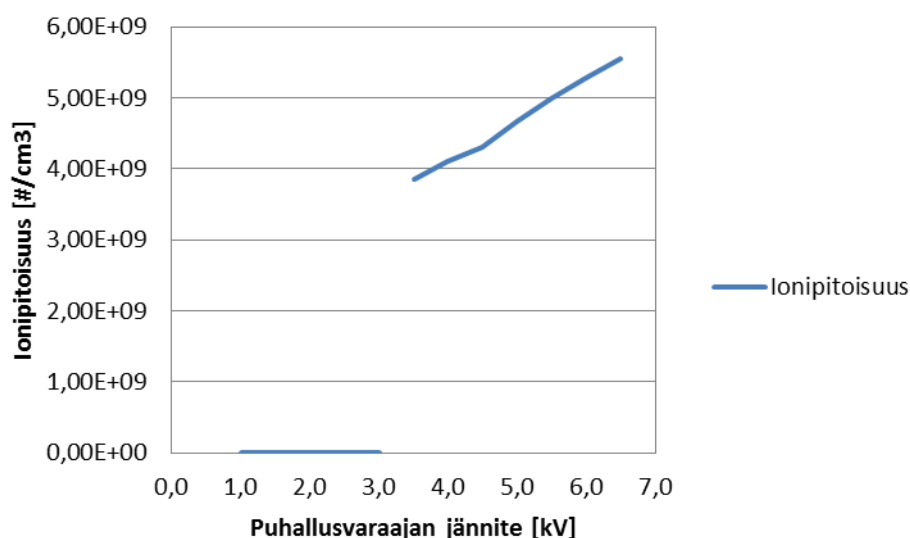
Kuvaan 18 on piirretty puhallusvaraajan synnyttämä ionipitoisuus regulaattorin mittaaman paineen funktiona. On huomattava, että kuvassa ilmoitettu regulaattorin mittaama paine kertoo, kuinka paljon paine ylittää normaali-ilmanpaineen. Jos siis halutaan tietää absoluuttipaine, niin kuvan lukemaan on lisättävä vielä normaali-ilmanpaine. Kuvan esittämässä mittauksessa puhallusvaraajan jännite pidettiin vakiona 6,0 kilovoltia ja lisäysprosentti on laskettu siten, että on verrattu kunkin paineen tuottamaa ionipitoisuutta siihen ionipitoisuuteen, joka on mitattu regulaattorin painemittarin näyttäessä nollaa.



Kuva 18. Paineen vaikutus puhallusvaraajan synnyttämään ionipitoisuuteen.

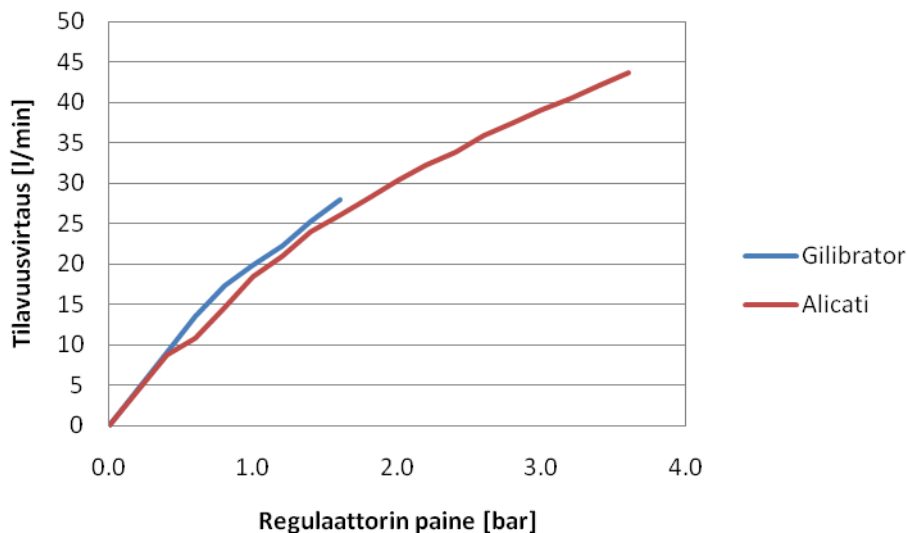
Kuvasta 18 on havaittavissa, että mitä suuremmalla paineella puhallusvaraajalle syötetään ilmaa, niin sitä suurempi on sen synnyttämä ionipitoisuus. Paineen kasvattaminen on siis ionituoton näkökulmasta hyödyllistä. On kuitenkin muistettava, että mitä suurempi paine halutaan, niin sitä tehokkaampi kompressori on oltava sitä tuottamassa, jolloin sähkönkulutus kasvaa. Voikin olla hyödyllisempää kasvattaa puhallusvaraajien lukumäärää, kuin nostaa määrättömästi puhallusvaraajalle syötettävän ilman painetta.

Kuvaan 19 on piirretty puhallusvaraajan synnyttämä ionipitoisuus puhallusvaraajan jännitteen funktiona. Kuvan mittauksessa puhallusvaraajalle tuleva paine pidettiin vakiona regulaattorin näyttäessä 2,5 barin painetta. Kuvasta havaitaan, että puhallusvaraaja alkaa tuottamaan ioneja vasta 3,5 kilovoltin jännitteellä, mikä merkitsee sitä, että puhallusvaraajassa syttyy korona vasta tällä jännitteellä. Koronan syttymisen jälkeen jännitteen kasvattaminen nostaa puhallusvaraajan tuottamaa ionipitoisuutta lähes lineaarisesti. Tästä voidaan päätellä, että ionituoton maksimoinnin kannalta myös jännite kannattaisi olla mahdollisimman korkea. Rajana jännitteen kasvattamiselle on tietysti läpilyönnin syntyminen puhallusvaraajassa.



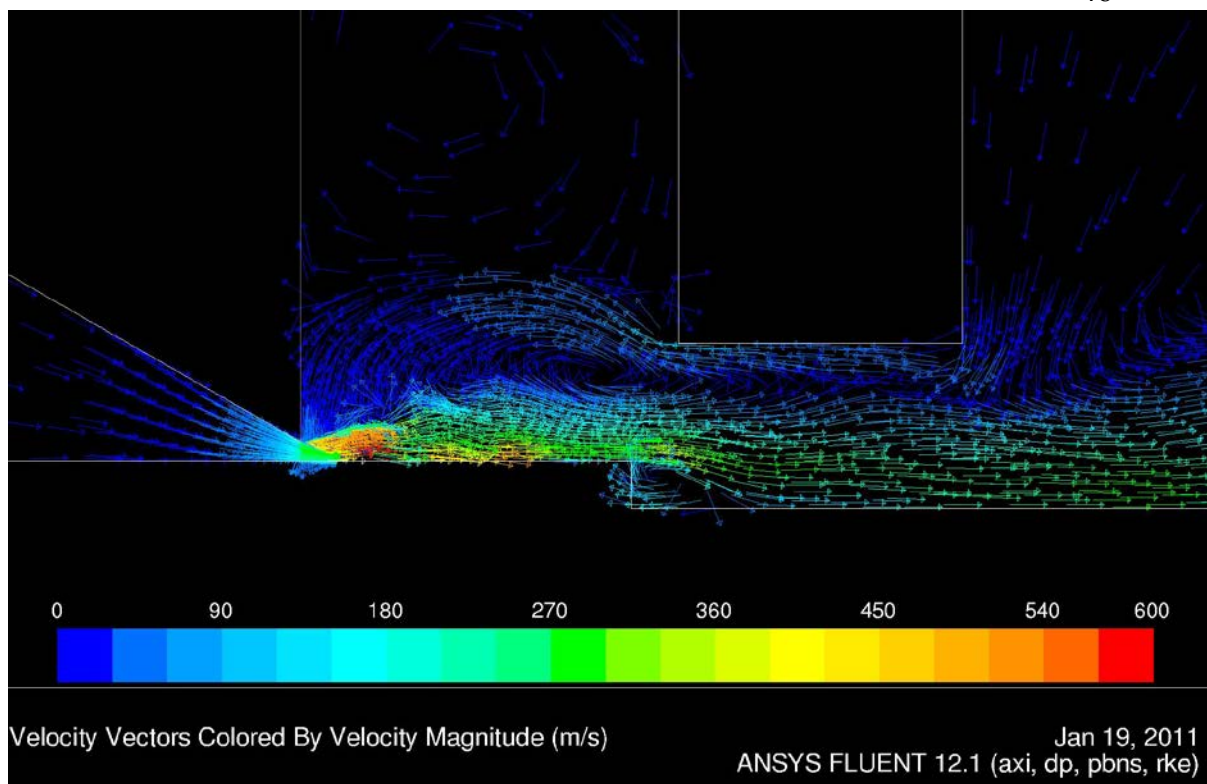
Kuva 19. Puhallusvaraajan jännitteen vaikutus sen synnyttämään ionipitoisuuteen.

Kuvaan 20 on piirretty puhallusvaraajasta tulevan ilman tilavuusvirtaus regulaattorin mittaaman paineen funktiona. Mittaus on tehty kahdella eri mittalaitteella. Gilian Gilibrator on perinteinen kuplavirtausmittari ja Alicati on sähköinen virtausmittari. Kuvasta nähdään, että molemmilla mittareilla saadaan samankaltainen tulos. Tilavuusvirtaus ei kasva aivan lineaarisesti, vaan sen kasvu hidastuu hieman paineen noustessa. Tilavuusvirtaus on puhallusvaraajan paineen todennäköisellä käyttöalueella (2,0-3,5 baria) välillä 30-43 l/min.



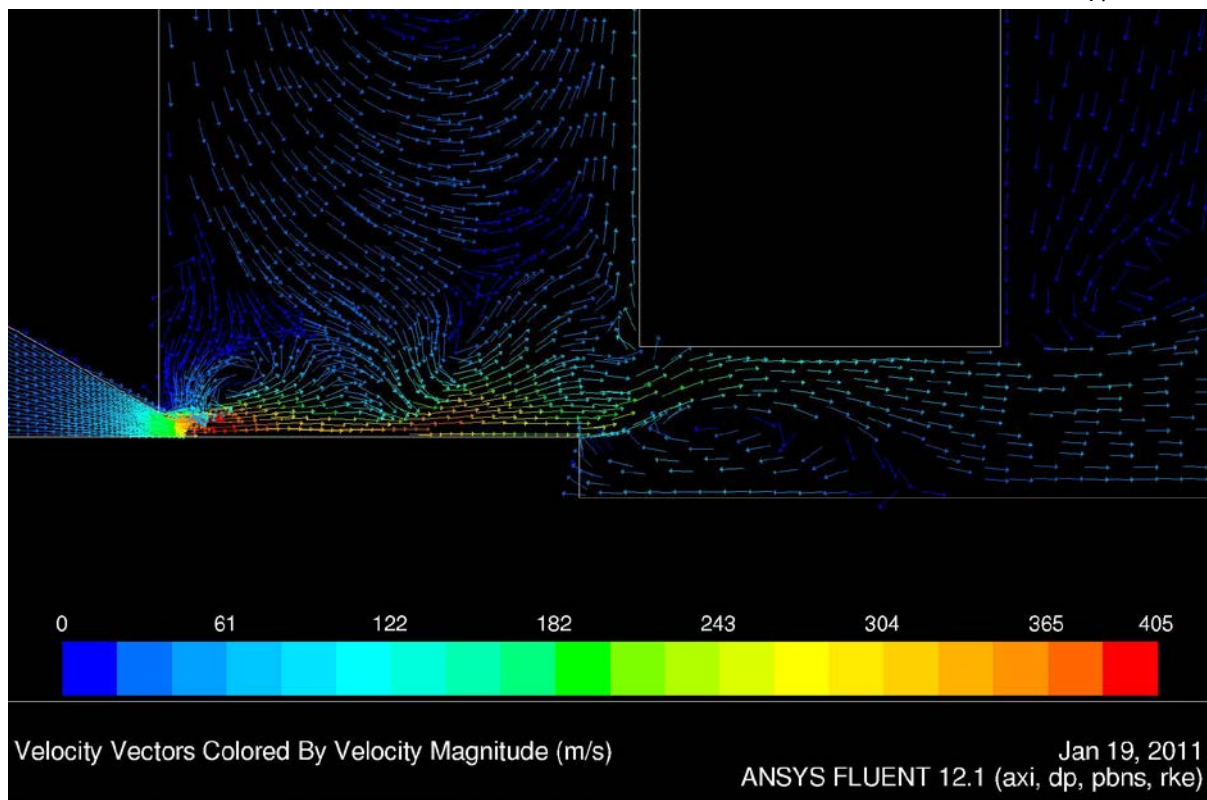
Kuva 20. Puhallusvaraajasta tulevan ilman tilavuusvirtaus regulaattorin paineen funktiona kahdella eri mittalaitteella.

Puhallusvaraajan toiminnan kannalta ongelmaksi nousi sen likaantuminen ja siitä aiheutuva koronan epästabiilisuus. Käytännössä puhallusvaraajan likaantuminen aiheutti sen, että koronakärjestä alkoi tapahtua läpilyöntejä vastaelektrodiin. Likaantumisen syynä oli puhallusvaraajan suuttimen suulla syntyvä takaisinvirtaus, joka imi savukaasussa olevia hiukkasia puhallusvaraajaan. Anssi Arfman pyrki mallintamaan ilman virtausta puhallusvaraajassa Fluent-ohjelmalla. Kuvassa 21 vasemmalla oleva viisto kappale mallintaa puhallusvaraajan suppiloa, pieni askelma koronaneulaa ja laatikko oikeammalla puhallusvaraajan suuttimen tulppaa. Kuvan virtaussimulaatio on tilanteesta, missä puhallusvaraajan suuttimen tulpan reiän halkaisija on 3,5 mm ja puhallusvaraajalle regulaattorin kautta syötettävän ilman ylipaine on 1 bar. Kuvassa 21 on väreillä merkitty virtauksen nopeus metreinä sekunnissa sinisen merkitessä pientä ja punaisen suurta virtausnopeutta. Kuvasta nähdään, että simulaation perusteella tässä tilanteessa syntyy hidas takaisinvirtaus, joka imee ilmaa puhallusvaraajan ulkopuolelta sen sisäpuolelle aiheuttaen näin likaantumista.



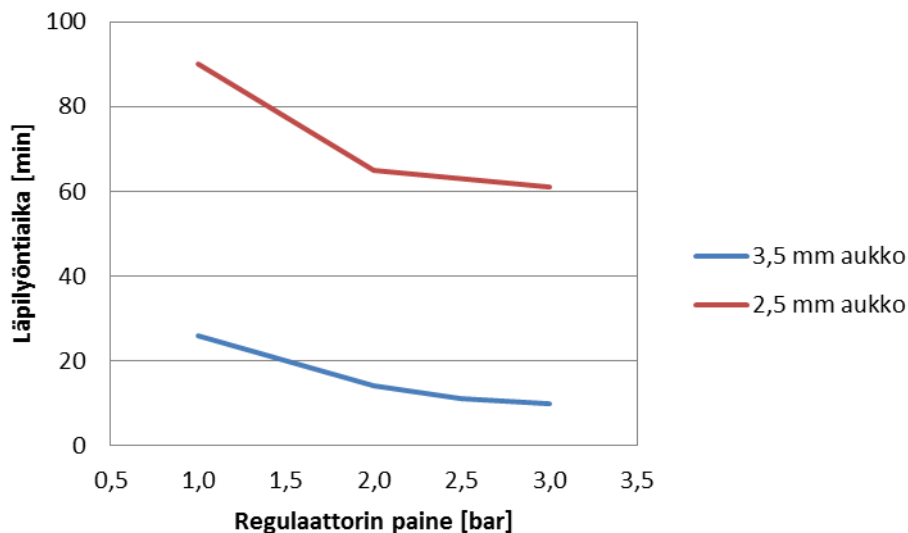
Kuva 21 . Simulaatiokuva virtauksesta puhallusvaraajasta ulos, kun suuttimen aukon halkaisija on 3,5 mm ja puhallusvaraajalle syötettävän ilman ylipaine 1 bar. [Tekijä: Anssi Arfman]

Kuvassa 22 on muuten vastaava tilanne kuin edellisessäkin kuvassa, mutta suuttimen tulpan reiän halkaisija on pienennetty 2,5 mm:iin. Tämän simulaatiokuvan perusteella virtauksen pitäisi muuttua niin, että pienemmällä reiällä ei ilmaa enää kulkeudu puhallusvaraajan ulkopuolelta sen sisään.



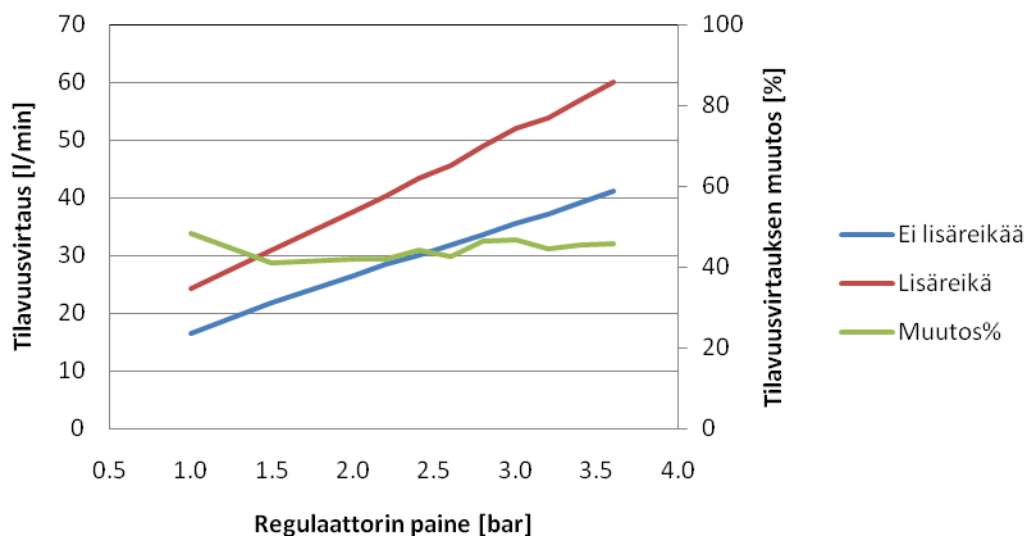
Kuva 22. Simulaatiokuva virtauksesta puhallusvaraajasta ulos, kun suuttimen aukon halkaisija on 2,5 mm ja puhallusvaraajalle syötettävän ilman ylipaine 1 bar. [Tekijä: Anssi Arfman]

Kuvaan 23 on piirretty puhallusvaraajan likaantumisen seurauksena syntyvän läpilyönnin tapahtumiseen kestävä aika puhallusvaraajalle syötettävän paineilman paineen funktiona kahdella eri suuttimen aukon koolla. Tässä mittauksessa puhallusvaraajan jännite oli 6,0 kV tulpan reiän ollessa 2,5 mm ja 7,5 kV tulpan reiän ollessa 3,5 mm. Jännite oli eri näillä kahdella reiän koolla, jotta koronavirta saatiin samaksi likaantumismittauksen alussa. Puhallusvaraajat asetettiin puhaltamaan putkeen, jossa poistoimun aikaansaaman virtauksen nopeus oli noin 1,8 m/s. Tilavuusvirtaukseksi muutettuna tämä tarkoittaa noin 2,5 m³/min. Kuvassa käytetty aika saatiin katsomalla milloin tapahtui ensimmäinen läpilyönti. Puhallusvaraaja toimi yleensä tämän ensimmäisen läpilyönnin jälkeen muutaman minuutin kohtuullisen stabiilisti, minkä jälkeen se alkoi lyömään jatkuvasti läpi. Kuvasta 23 on havaittavissa, että suuttimen tulpan reiän pienentäminen nostaa läpilyönnin syntymiseen kuluvaa aikaa merkittävästi, mutta ei estä läpilyönnin syntymistä toisin kuin simulaatiokuvien perusteella voitiin olettaa. Puhallusvaraajan likaantumista mitattiin myös sellaisilla suuttimen tulpilla, joiden reikä oli viistottu sisältä ulospäin kapenevaksi tai leveneväksi, mutta tällöin likaantuminen vain nopeutui merkittävästi suoraan reikään verrattuna.



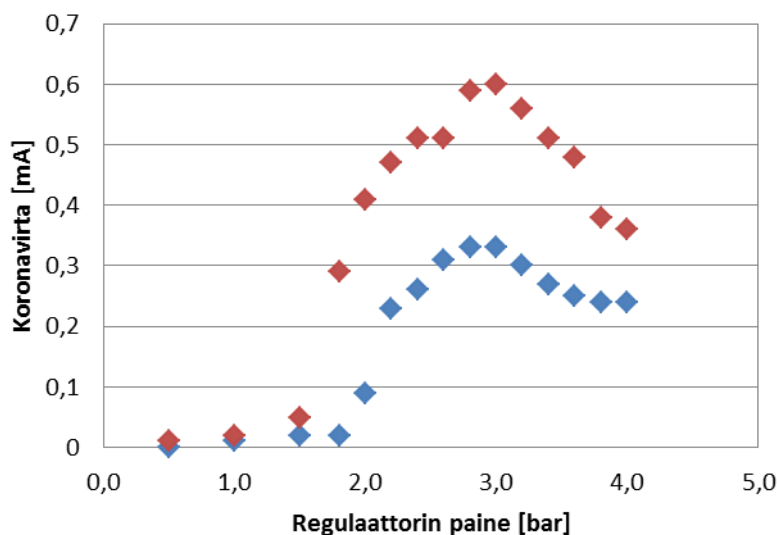
Kuva 23. Puhallusvaraajassa tapahtuvan läpilyönnin kesto aika regulaattorin paineen funktiona likaantumismittauksessa.

Likaantumisongelma pyrittiin ratkaisemaan vaihtamalla puhallusvaraajaan sellainen suppilo, johon oli porattu toinen reikä koronakärjen ympärillä olevan reiän lisäksi. Uuden reiän oli tarkoitus lisätä ilmavirtauksen määrää puhallusvaraajasta ulos niin paljon, että takaisinvirtaus puhallusvaraajaan - ja samalla likaantuminen - loppuisi. Kokeilu onnistuikin siltä osin, että varaajan likaantuminen loppui. Mahdolliseksi uudeksi ongelmaksi muodostui kuitenkin se, että lisääntynyt tilavuusvirtaus vaatisi varsinaisessa sovelluskohteessa käytetyltä kompressorilta lisätehoja useamman varaajan ollessa käytössä. Jos puhallusvaraajan ionituotto ei parane lisääntyneellä virtauksella juuri lainkaan, on lisäreiän käyttö ongelmallista, vaikka likaantuminen saatiinkin loppumaan. Kuvaan 24 on piirretty puhallusvaraajasta tulevan ilman tilavuusvirtaus regulaattorin paineen funktiona tavallisella sekä lisäreiällisellä suppilolla varustetulla puhallusvaraajalla. Kuvasta nähdään, että tilavuusvirtaus lisääntyy noin 40% kaikilla regulaattorin paineilla.



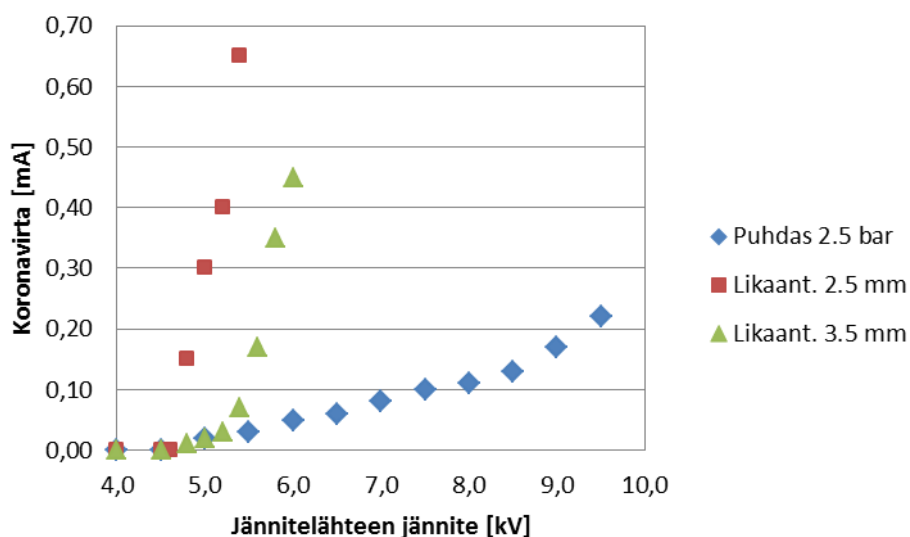
Kuva 24. Puhallusvaraajan suppilossa olevan lisäreiän vaikutus varaajasta tulevaan tilavuusvirtaukseen.

Tutkittaessa puhallusvaraajan likaantumista yhtenä parametrina käytettiin sitä painetta, millä paineilma syötettiin puhallusvaraajaan. Kuvaan 25 on piirretty kahdella eri puhallusvaraajan jännitteellä mitattu koronavirta regulaattorin paineen funktiona. Kuvasta nähdään, että paineen kasvaessa tulee tietyllä kynnyspaineella selkeä hyppäys koronavirtaan. Tämän kynnyspaineen suuruus on riippuvainen käytetystä jännitteestä siten, että korkeammalla jännitteellä tarvitaan matalampi paine. Kuvasta nähdään myös, että puhallusvaraajan koronavirta ei nouse suoraviivaisesti paineen nousun myötä, vaan se saavuttaa maksiminsa noin 3 barin kohdalla ja tämän jälkeen koronavirta pienenee paineen kasvaessa. Puhallusvaraajan ionituoton hyötysuhteen kannalta tämä merkitsee sitä, ettei puhallusvaraajaa kannata käyttää 3 barin paineella, vaan mieluummin sitä isommalla paineella.



Kuva 25. Paineen vaikutus puhallusvaraajan koronavirtaan kahdella eri jännitteellä.

Kuvaan 26 on piirretty jännite-virtakäyrä puhtaalla puhallusvaraajalla 2,5 barin paineella ja 3,5 mm tulpan reiällä sekä samalla puhallusvaraajalla likaantuneena 2,0 barin paineella ja 2,5 mm sekä 3,5 mm tulpan rei'illä. Kuvasta on nähtävissä, että puhtaana mitattaessa koronavirta nousee huomattavan paljon hitaammin jännitteen kasvaessa kuin likaantuneena mitattaessa. Lämpilyönti tapahtui likaantuneena mitattaessa 2,5 mm reiällä jo 5,5 kV:n ja 3,5 mm reiällä 6,0 kV:n jännitteellä, kun puhtaana puhallusvaraaja kesti jopa 9,5 kV:n jännitteen.

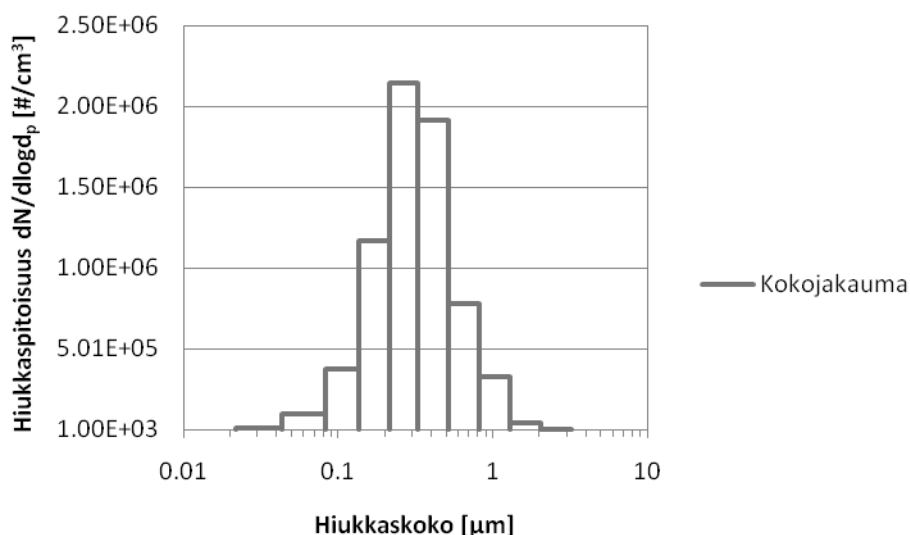


Kuva 26. Jännite-virta käyrä puhtaalla puhallusvaraajalla 2,5 barin paineella ja 3,5 mm suuttimen tulpan reiällä sekä samalla puhallusvaraajalla likaantuneena kahdella eri suuttimen aukolla ja 2,0 barin paineella.

Kuvan 26 perusteella voidaan sanoa, että likaantuneenakin puhallusvaraajan koronan käyttäytyminen vaikuttaa normaalilta koronan toiminnalta. Puhtaana koronavirta kasvaa hitaahkosti, mutta voisi nousta myös jyrkemmin, jos jännitettä olisi pystytty kasvattamaan vielä suuremmaksi. Puhallusvaraajaa lianneet hiukkaset olivat nestemäisiä öljystä höyrystettyjä ja öljy vaikutti sen johtavuutta mitattaessa hyvältä eristeeltä. Likaantumisen vaikutuksen syytä ei kuitenkaan tarkkaan tiedetä, eikä sitä lähdetty tarkemmin selvittämään, vaikka nähty vaikutus olikin mielenkiintoinen, sillä varsinainen ongelma, joka haluttiin ratkaista oli itse likaantuminen. Haluttiin siis löytää sellainen ratkaisu, jossa puhallusvaraaja ei pitkänkään ajan kuluessa likaantuisi lainkaan. Kuvasta nähdään myös, että tulpan reiän ollessa 3,5 mm koronavirta nousee hieman loivemmin kuin 2,5 mm reiällä. Tämän ero voi johtua kahdesta syystä. Koska 2,5 mm reiän tapaus mitattiin aiemmin, niin sillä mitattaessa tapahtuneet läpilyönnit ovat saattaneet hieman vähentää varaajan likaisuutta, mikä olisi parantanut sen jännitekestävyyttä. Tai sitten se, että 2,5 mm reiällä ilman on virtauksessa pakkaututtava tiiviimmäksi, saa ilman johtamaan paremmin sähköä.

8.2. Mittaus 1: Mittaukset Suula-keräimellä TTY:n laboratoriossa

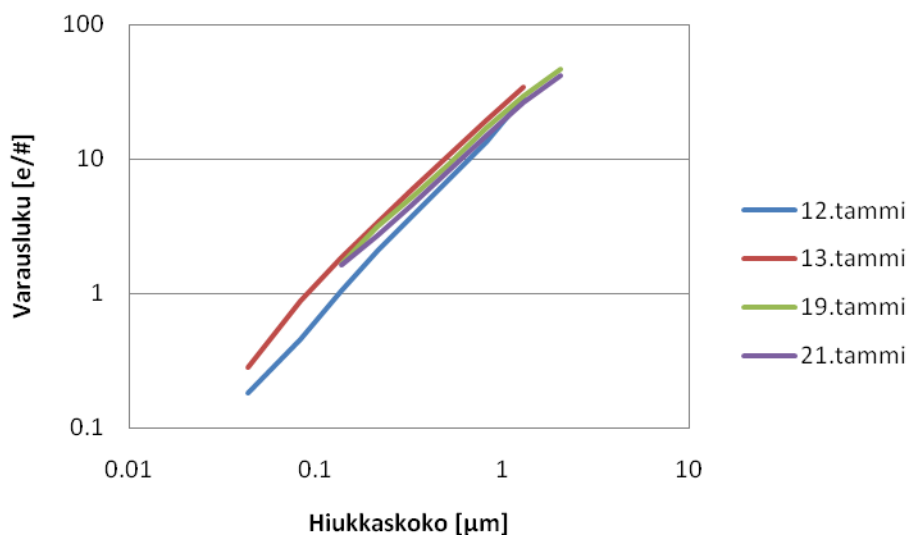
Nämä mittaukset suoritettiin TTY:n aerosolifysiikan laboratoriossa Suula-keräimellä tammikuussa 2011. Mittauksissa hiukkasgeneraattorina käytettiin öljystä höyrystämällä hiukkasia tuottavaa savugeneraattoria. Virtaus putkessa ja keräimen läpi synnyttiin laboratorion poistolinjan imulla, jolla pystyttiin säätämään virtausnopeutta. Jäljempänä tätä tammikuussa Suula-keräimellä suoritettua mittausta kutsutaan nimellä *Mittaus 1*. Kuvaan 27 on piirretty *Mittaus 1*:ssä saatu tyypillinen hiukkasgeneroinnin tuottama hiukkaskokojakauma. Kuvasta nähdään, että jakauma on yksihuippuinen ja sen huippu osuu $0,3 \mu\text{m}$:n kohdalle. Tämä on sikäli hyvä asia, että perinteisesti sähkösuodatuksella on ollut vaikeinta saada poistettua $0,1\text{-}0,3 \mu\text{m}$:n kokoiset hiukkaset, joten keräystehokkuudeksi saatavat tulokset eivät ainakaan anna liian hyvää kuvaa keräimen keräystehokkuudesta. Alla olevan kuvan tilanteessa generoinnin tuottama kokonaishiukkaspitoisuus oli noin $6,9 \cdot 10^6 \text{ \#/cm}^3$. $0,14 - 0,82 \mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten pitoisuus puolestaan oli noin $6,4 \cdot 10^6 \text{ \#/cm}^3$. Tätä lukua tarvitaan myöhemmin vertailtaessa näiden mittausten hiukkaspitoisuutta *Mittaus 2*:ssa suoritettujen mittausten hiukkaspitoisuuksiin.



Kuva 27. Tyypillinen hiukkasgeneroinnin tuottama hiukkaskokojakauma.

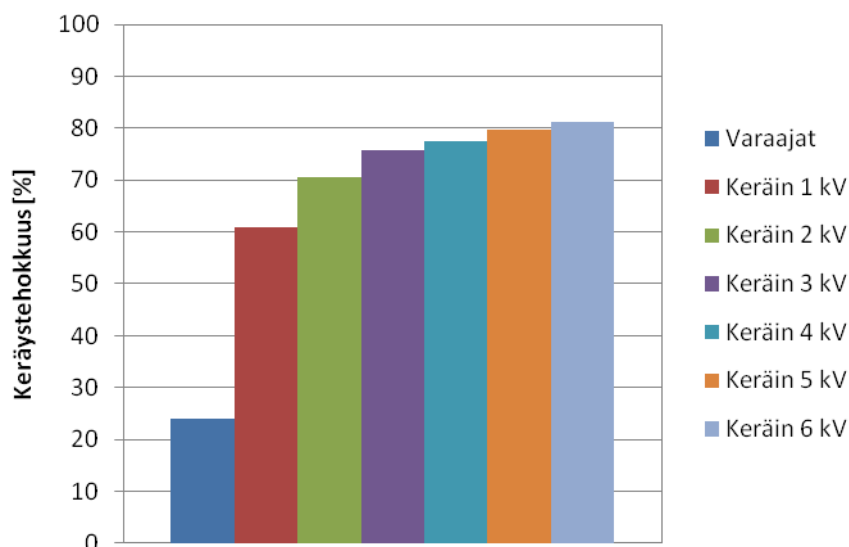
Kuvaan 28 on piirretty eri päivinä mitattuja hiukkasten varauslukuja hiukkaskoon funktiona. Varausluku kasvaa hiukkasen koon kasvaessa, mikä on ymmärrettävää, sillä isomman hiukkasen on helpompi olla useasti varautunut. Ero varausluvussa pienimmissä hiukkasissa 12. ja 13. päivän välillä johtunee siitä, että 12. päivänä hiukkasgenerointi tuotti suurempia pitoisuuksia ja 13. päivänä vaihdettiin yhden varaajan paikka ennen keräintä olevan putken ensimmäiseen mutkaan. Myöhempien 19. ja 21. päivien mittauksissa saadut varausluvut ovat lähellä 13. päivän varauslukuja, vaikka eivät aivan niin hyvät olekaan. Verrattaessa puhallusvaraajien varaustehokkuutta

ELPI:n varaajaan havaitaan, että 13. päivän mittauksessa puhallusvaraajien tuottamat varausluvut ovat hieman alle 40% ELPI:n aikaansaamasta varauksesta. Tässä vertailussa on kuitenkin huomattava, että verrataan ELPI:llä mitattuja virtoja ja näin ollen puhallusvaraajan parhaiten varaamat hiukkaset eivät tule mittaukseen, sillä ne ovat jo keräytyneet tilavarauksen vuoksi.



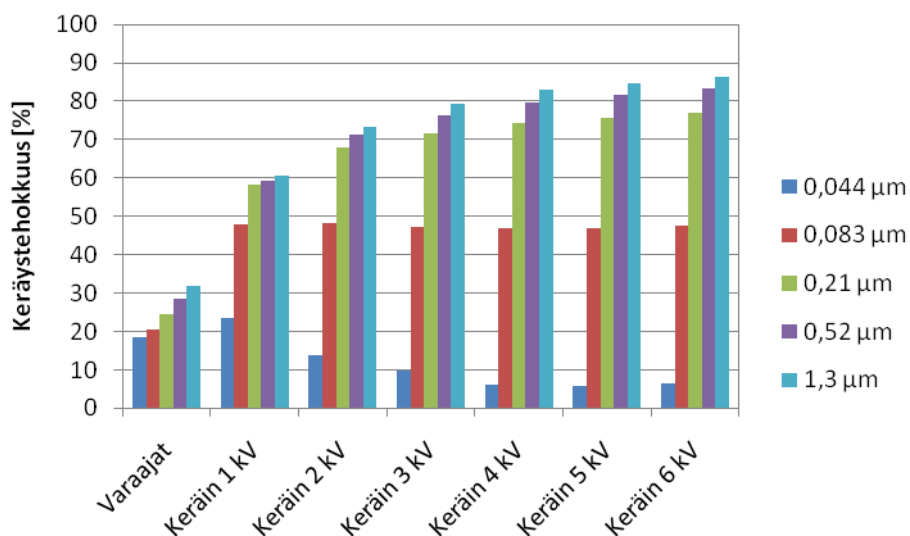
Kuva 28. Mitattuja varauslukuja hiukkaskoon funktiona.

Kuvaan 29 on piirretty tyypillinen mittaustulos varaajien sekä keräimen eri jännitteillä tuottamasta keräystehokkuudesta. Kun varaajat kytketään päälle, noin neljännes hiukkasista häviää tilavarauksen vaikutuksesta. Suurin hyppäys keräystehokkuudessa tapahtuu luonnollisesti kytkettäessä keräin päälle. Yhden kilovoltin jännitteellä varaajat ja keräin saavat poistettua noin 60% hiukkasista. Tästä keräystehokkuus nousee kokoajan hidastuen niin, että 6 kV jännitteellä saadaan kerättyä hieman yli 80% hiukkasista. Kuitenkin eroa 5 kV:n ja 6 kV:n jännitteen välillä on enää vain reilun prosentin verran, mikä on niin pieni ero, ettei keräimen jännitettä tämän perusteella ehkä kannata nostaa yli 5 kV:n.



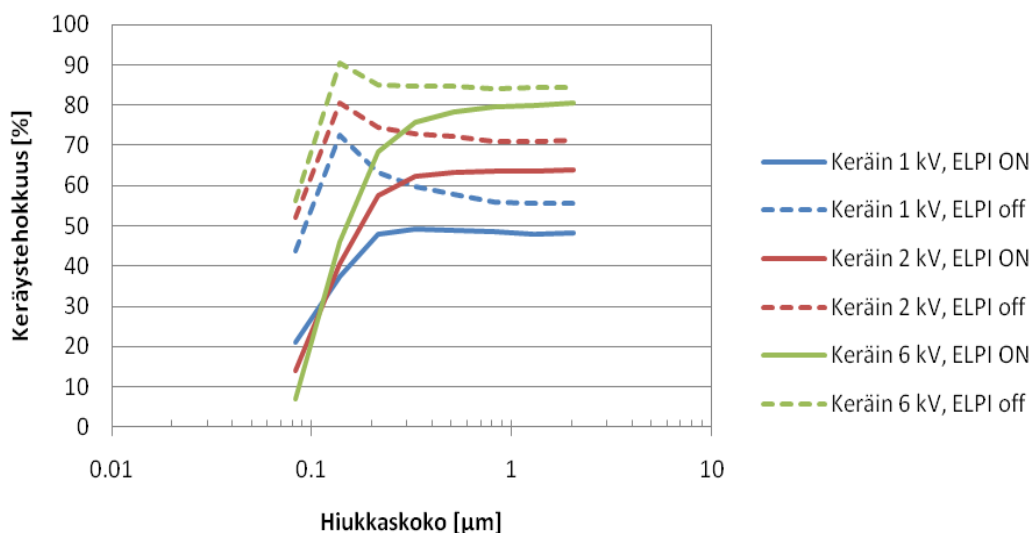
Kuva 29. Varaajien ja keräimen eri jännitteillä tuottama tyypillinen keräystehokkuus kokonaishiukkaspitoisuudesta.

Kuvaan 30 piirretty varaajien sekä keräimen eri jännitteillä tuottama keräysprosentti eri hiukkaskoilla. Tästä kuvasta nähdään, että erikokoisten hiukkasten keräysprosentissa on suuria eroja. Muutaman sadan nanometrin kokoisista hiukkasista ylöspäin keräimen jännitteen nostaminen parantaa kokoajan keräystehokkuutta keräystehokkuuden ollessa paras isoimmilla yli mikrometrin kokoisilla hiukkasilla. 1,3 μm :n hiukkasista saadaan kerättyä 6 kV:n keräimen jännitteellä jo lähes 90%. Sen sijaan pienimmillä hiukkasilla keräimen jännitteen nostaminen ei paranna keräystehokkuutta, vaan keräystehokkuus päinvastoin laskee keräimen jännitteen noustessa. Kaikkein pienimmillä 22 nm:n hiukkasilla keräysprosentti oli jopa negatiivinen ja sitä enemmän mitä korkeampi oli keräimen jännite. Tämä vielä voisi olla selitettävissä generoinnin vaihtelulla, sillä tämänkokoisten hiukkasten pitoisuus oli vain joitakin kymmeniä kuutiosentissä. Samansuuntainen ilmiö näkyy kuitenkin myös 44 nm:n hiukkasilla, joiden pitoisuus on huomattavasti suurempi. Myöskään 83 nm:n hiukkasilla keräimen jännitteen nostaminen ei paranna keräystehokkuutta. Syy pienimpien hiukkasten keräystehokkuuden huonontumiseen keräimen jännitteen kasvaessa voi olla se, että keräimen sisällä on ollut heikko koronapurkaus, joka on neutraloinut pienimpiä hiukkasia ja näin aiheuttanut niiden keräytymisen heikentymisen. Tämä koronapurkaus on ehkä voimistunut keräimen jännitteen noustessa, josta seurauksena on ollut keräystehokkuuden laskeminen pienillä hiukkasilla.



Kuva 30. Varaajien sekä keräimen eri jännitteillä tuottama keräystehokkuus eri hiukkaskoilla.

Kuvaan 31 on piirretty ELPI:n mittaaman virran perusteella lasketut keräysprosentit hiukkaskoon funktiona kolmella eri keräimen jännitteellä ELPI:n varaajan ollessa päällä tai pois päältä. Ajatuksena on, että ELPI:n varaajan ollessa päällä saadaan laskettua keräimen keräystehokkuus kaikista hiukkasista ja ELPI:n varaajan ollessa pois päältä keräimen keräystehokkuus niille hiukkasille, jotka puhallusvaraajat ovat saaneet varattua. Lähtötasona molemmissa tilanteissa on pidetty tilannetta, jossa puhallusvaraajat ovat päällä ja keräin on kytketty pois päältä. Tässä tilanteessa ELPI:n mittaaman virran arvoon on sitten verrattu ELPI:n mittaaman virran muutosta, kun keräin on kytketty päälle. ELPI:n varaajan ollessa pois päältä ELPI pystyy havaitsemaan vain ne hiukkaset, jotka puhallusvaraajat ovat saaneet varattua ja keräimen keräystehokkuus kertoo sen, kuinka suuri osa näistä puhallusvaraajien varaamista hiukkasista saadaan kerättyä. ELPI:n varaajan ollessa päällä sen pitäisi varata positiivisesti niin puhallusvaraajien negatiivisesti varaamat kuin varautumatta jääneetkin hiukkaset, jolloin se havaitsee kaikki generoinnin tuottamat hiukkaset. Näin todennäköisesti myös käytännössä tapahtuu, sillä 20. tammikuuta tehdyissä mittauksissa havaittiin, että ELPI:n varaajan ollessa päällä elektrometrit mittaavat noin 50% suurempaa virtaa, kuin ELPI:n varaajan ollessa pois päältä.



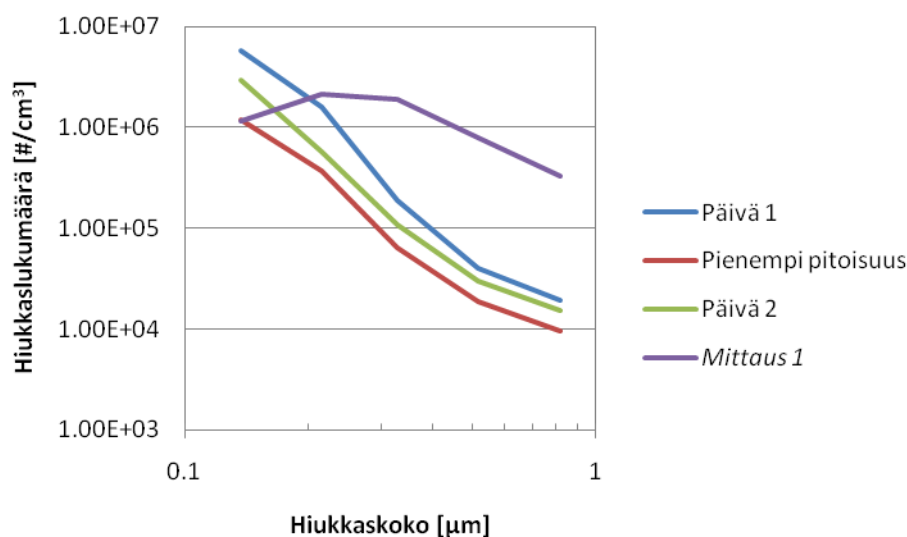
Kuva 31. ELPI:n mittaamien virtojen perusteella laskettu keräimen keräystehokkuus hiukkaskoon funktiona eri keräimen jännitteillä ELPI:n varaajan ollessa päällä ja pois päältä.

Kuvasta 31 nähdään, että puhallusvaraajien varaamista hiukkasista tehokkaimmin keräytyvät 0,14 μm:n kokoiset hiukkaset. Sitä pienempien hiukkasten keräystehokkuus laskee jyrkästi kaikilla keräimen jännitteillä ja sitä suurempien sitä loivemmin, mitä korkeampi on keräimen jännite. Sen sijaan ELPI:n varaajan ollessa päällä keräystehokkuus nousee kokoajan hiukkaskoon kasvaessa, mikä on sama tulos kuin jo aikaisemmin oli saatu. Kuvasta nähdään myös, että keräimen keräystehokkuus varautuneille hiukkasille on aina suurempi kuin kaikille hiukkasille laskettu keräystehokkuus. Tämä on luonnollinen tulos, sillä keräin voi kerätä vain varautuneita hiukkasia, jolloin parhaimmassakin tapauksessa keräystehokkuudet voivat olla korkeintaan yhtäsuuret. Kuvasta voidaan päätellä myös puhallusvaraajien saavan varattua paremmin suuria kuin pieniä hiukkasia. Tämä nähdään siitä, että pienillä hiukkasilla varautuneiden keräystehokkuus on suurempi kuin isoilla, mutta kokonaiskeräystehokkuus on pienempi. Pienistä hiukkasista siis pienempi prosentuaalinen osuus on varautuneita. Lisäksi kuvasta nähdään, että pieniä hiukkasia täytyy syntyä tai neutraloitua keräimen keräysjännitteen kasvaessa, sillä varautuneiden hiukkasten keräystehokkuus nousee keräimen jännitteen kasvaessa, mutta kokonaiskeräystehokkuus laskee. Todennäköisin selitys on jo edellisen kuvan yhteydessä kerrottu heikon koronapurkauksen mahdollisuus.

8.3. Mittaus 2: Mittaukset Suula-keräimellä Wärtsilässä

Nämä mittaukset suoritettiin Wärtsilän tehtaalla Vaasassa. Mitatut hiukkaset syntyivät laivan moottorissa ja otettiin savukanavasta mittalaitteille ja laimennettiin ulkoilmalla. Näissä mittauksissa saatiin tuloksiin sisältyä merkittävä mittausolosuhteista johtuva

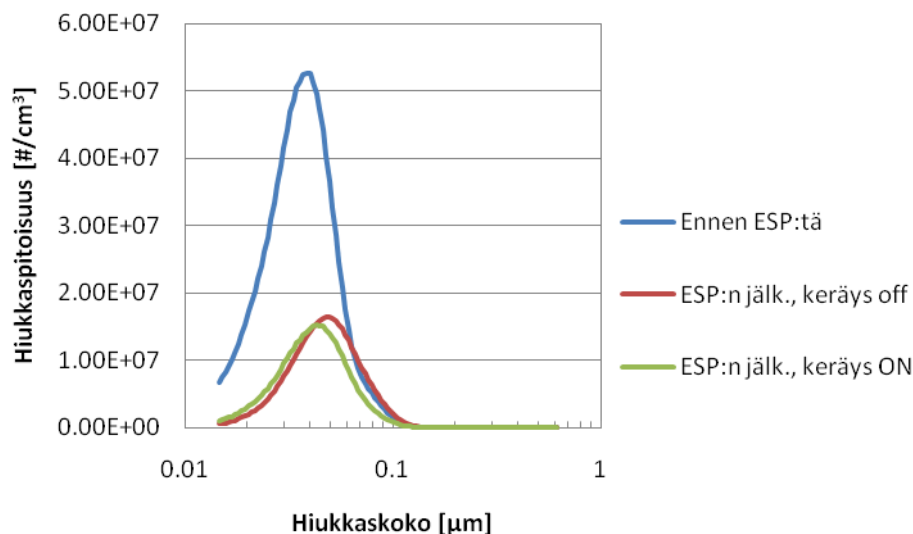
epävarmuus. Epävarmuutta aiheuttavia ongelmia mittauksissa olivat hiukkasten muodostumisen ja kondensoitumisen jatkuminen ainakin vielä keräimen sisälle asti sekä keräimen sisällä palanut koronapurkaus. Näiden ongelmien seurauksena on, että mittausten tuloksista ei voida vetää johtopäätöksiä absoluuttisesta keräysehokkuudesta tai varaustehokkuuden vaikutuksesta siihen, vaan tulokset ovat vain suuntaa antavia. Lisäksi mittausten tuloksina piirrettyihin kuviin on hiukkasten muodostumisessa olleiden ongelmien vuoksi otettu vain luotettavimpina pidetyn kokoiset hiukkaset (välillä 0,1 – 1 µm olleet). Kuvaan 32 on piirretty *Mittaus 2*:ssa ensimmäisenä ja toisena mittauspäivänä sekä pienennetyllä savukaasun hiukkaspitoisuudella mitattu suodattamattoman savukaasun hiukkaskokojakauma. Lisäksi kuvaan on piirretty *Mittaus 1*:ssä mitattu hiukkaskokojakauma samalta hiukkaskokoväliltä. Verrattaessa hiukkaspitoisuutta *Mittaus 1*:ssä tehtyihin mittauksiin huomataan, että vaikka välin 0,14-0,82 µm kokonaispitoisuus onkin samaa suuruusluokkaa (ensimmäisenä päivänä $7,5 \cdot 10^6$ #/cm³ ja toisena päivänä $5,9 \cdot 10^6$ #/cm³), niin hiukkaskokojakauma on muodoltaan varsin erilainen. *Mittaus 2*:ssa tehdyissä mittauksissa savukaasun hiukkaspitoisuuden huippu on 0,14 µm:ssä ja laskee suhteellisen jyrkästi hiukkaskoon kasvaessa. Näissä mittauksissa oletettavasti kaikkein vaikeimmin poistettavissa olevien noin 0,1 µm:n kokoisten hiukkasten osuus on siis vielä suurempi kuin *Mittaus 1*:ssä.



Kuva 32. Hiukkaskokojakauma Wärtsilän mittausten ensimmäisenä päivänä kahdella eri savukaasun hiukkaspitoisuudella, toisena päivänä sekä *Mittaus 1*:ssä generoinnin tuottama hiukkaskokojakauma.

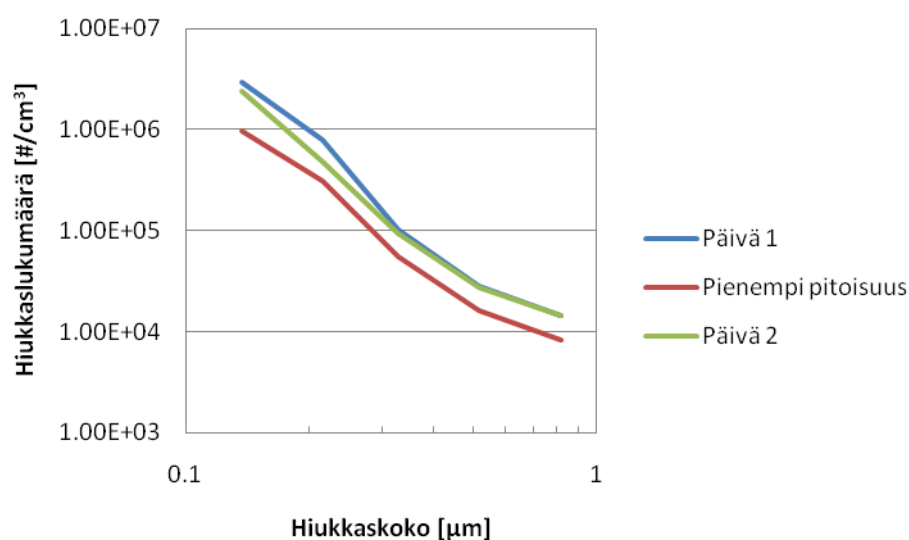
Kuvassa 33 on SMPS:llä mitatut hiukkaskokojakaumat ennen suodatinta ja suodattimen jälkeen keräyksen ollessa pois päältä sekä suodattimen jälkeen keräyksen ollessa päällä. SMPS oli Wärtsilä Oyj:n mittalaite ja kuvan aineisto on saatu Wärtsilä Oyj:ltä. Kuvasta nähdään, että SMPS:n perusteella hiukkaspitoisuuden lukumäärähuippu on noin 0,04 – 0,05 µm:n kohdalla, mutta kuten edellä kerrottiin, niin pienten hiukkasten lukumäärään liittyy suuri epävarmuus mittaolosuhteiden vuoksi. Tämä on myös helppo nähdä

kuvasta, sillä pienten hiukkasten pitoisuuden muutos on niin suuri, ettei se ole selitettävissä mekaanisella tai sähköisellä suodattumisella. kuvan SMPS aineiston pohjalta laskettu kokonaiskeräystehokkuus yli $0,1 \mu\text{m}$:n kokoisille hiukkasille oli noin 60%, mikä on vastaa hyvin ELPI:llä saatua tulosta.



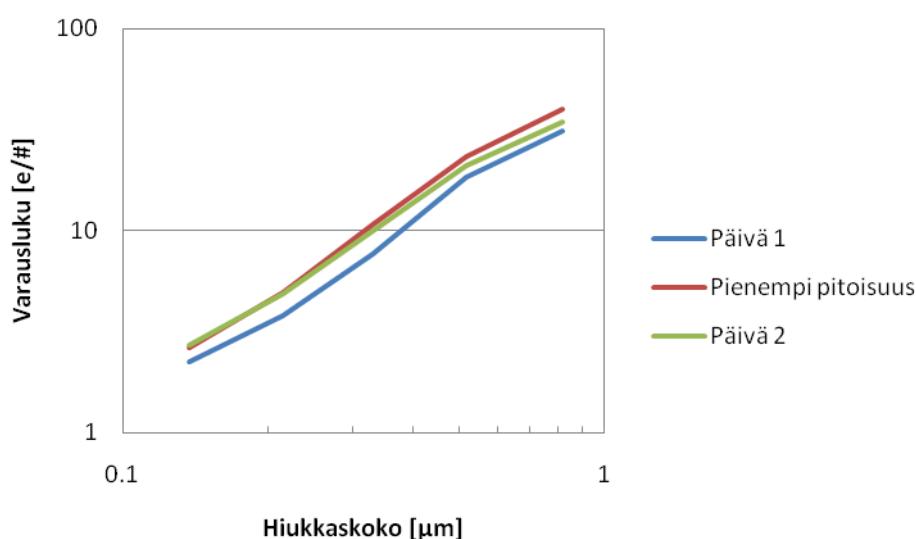
Kuva 33. Hiukkaskokojakauma SMPS:llä mitattuna ennen ja jälkeen suodattimen.

Kuvaan 34 on piirretty hiukkaskokojakauma ensimmäisenä ja toisena päivänä sekä pienemmällä savukaasun hiukkaspitoisuudella puhallusvaraajien ollessa päällä. Tästä nähdään, että varauslukujen laskemiseen käytetyissä hiukkaspitoisuuksissa ensimmäinen ja toinen päivä ovat lähellä toisiaan. Sen sijaan pienemmällä pitoisuudella silloinkin, kun puhallusvaraajat ovat käytössä, on hiukkaspitoisuus luonnollisesti huomattavasti edellä mainittuja matalampi.



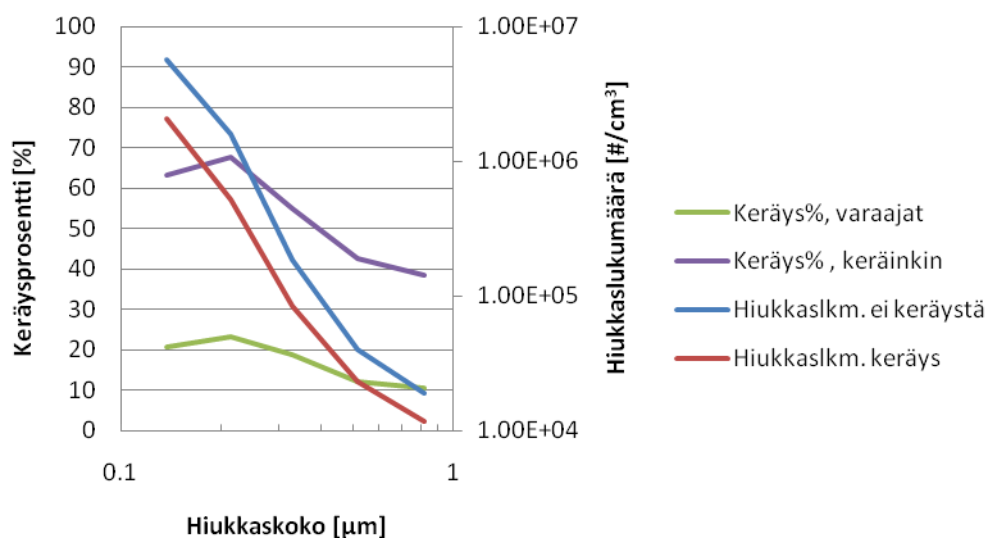
Kuva 34. Hiukkaskokojakauma ensimmäisenä ja toisena päivänä sekä pienemmällä savukaasun hiukkaspitoisuudella puhallusvaraajien ollessa päällä.

Kuvaan 35 on piirretty puhallusvaraajien yhdelle hiukkaselle aikaansaama keskimääräinen varausluku ensimmäisenä ja toisena mittauspäivänä sekä pienemmällä pitoisuudella. Kuvasta nähdään, että toisen päivän mittauksessa saadut varausluvut ovat vain niukasti huonommat kuin ensimmäisenä päivänä pienemmällä pitoisuudella mitatut varausluvut. Tämä johtuu siitä, että vaikka hiukkaspitoisuus on toisena päivänä korkeampi kuin ensimmäisen päivän pienemmällä pitoisuudella mitattaessa, niin myös varaajien määrää on lisätty yhdellä. Kun näitä varauslukuja verrataan *Mittaus 1*:ssä saatuihin varauslukuihin, huomataan, että ne ovat selvästi korkeammat. Ensimmäisenä päivänä mitatut varausluvut ovat näistä matalimmat ja nekin ovat hiukkaskoosta riippuen yli 10 – 70% korkeammat kuin 13. tammikuuta mitatut, jotka taas ovat *Mittaus 1*:ssä saaduista varausluvuista korkeimmat.



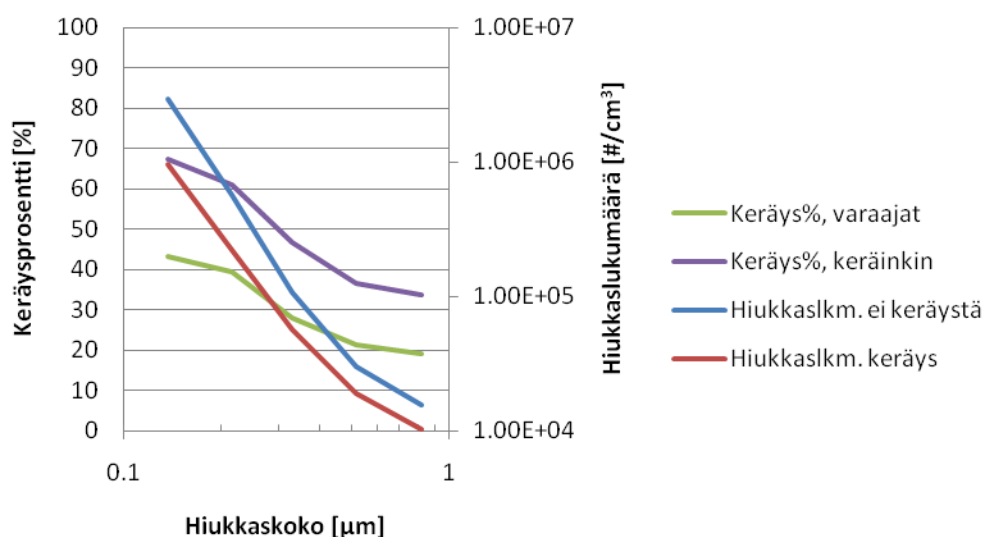
Kuva 35. Puhallusvaraajien aikaansaama keskimääräinen varausluku hiukkaskoon funktiona kahtena eri mittauspäivänä sekä pienemmällä hiukkaspitoisuudella.

Kuvaan 36 on piirretty ensimmäisenä päivänä mitattu hiukkaskokojakauma ilman keräystä ja keräyksen ollessa päällä sekä tilavarauksen ja keräimen tuottamat keräysprosentit hiukkaskoon funktiona. Kuvasta 36 nähdään, että parhaimmillaan keräystehokkuus on 0,2 µm:n kokoisilla hiukkasilla ollen lähes 70%. Keräystehokkuus 0,14 µm hiukkasillakin on ihan kohtuullinen (vähän yli 60%), mutta jostain syystä isommilla hiukkasilla keräystehokkuus painuu noin 40%:iin. Tämä eroaa *Mittaus 1*:ssä saaduista tuloksista, missä keräystehokkuus parani hiukkaskoon kasvaessa. Yhtenä syynä tähän voi olla se, että hiukkaset ovat koostumukseltaan ja varmasti myös rakenteeltaan erilaisia. Kokonaiskeräysprosentiksi pelkillä puhallusvaraajilla saatiin hiukkaskokovälillä 0,14-0,82 µm 21,0% ja keräimen ollessa päällä 63,8%. Keräystehokkuus ei yltänyt siis *Mittaus 1*:ssä saatujen tulosten tasolle.



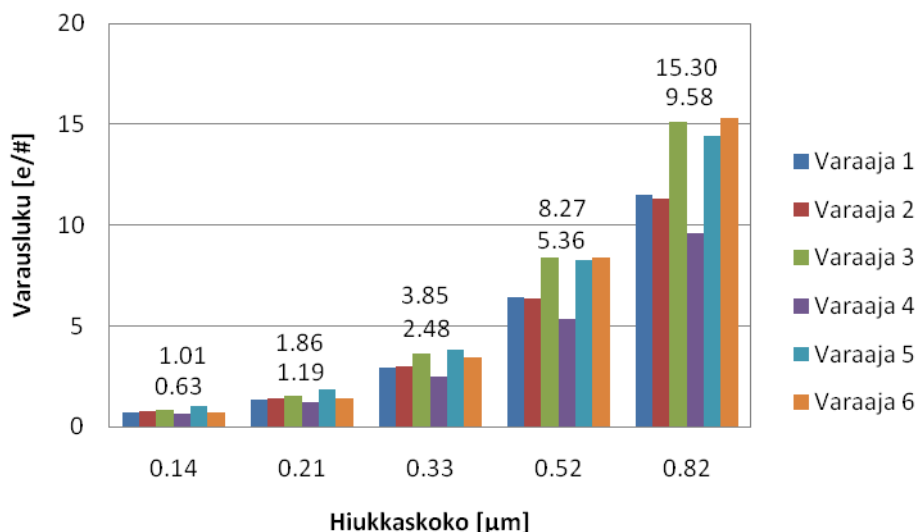
Kuva 36. Ensimmäisenä päivänä mitatut hiukkaskokojakaumat ilman keräintä ja keräimen ollessa päällä sekä varaajien ja keräimen prosentuaalinen vaikutus hiukkaspitoisuuteen.

Kuva 37 on vastaava kuva kuin 36, mutta toisen mittauspäivän tuloksista. Savukaasun hiukkaspitoisuus oli toisena päivänä hieman matalampi, mutta hiukkaskokojakaumat olivat muodoltaan aivan vastaavat ensimmäisen päivän kanssa. Jostain syystä toisena päivänä sekä puhallusvaraajien että keräimen aikaansaama keräystehokkuus oli parhaimmillaan $0,14 \mu\text{m}$:n kokoisilla hiukkasilla. Puhallusvaraajien aikaansaama keräystehokkuus hiukkaskokovälillä $0,14\text{-}0,82 \mu\text{m}$ oli selvästi ensimmäistä päivää parempi ollen 41,9%, mutta keräimen kanssa saatu keräystehokkuus oli vain hiukan ensimmäistä päivää parempi ollen 65,3%.



Kuva 37. Toisena päivänä mitatut hiukkaskokojakaumat ilman keräintä ja keräimen ollessa päällä sekä varaajien ja keräimen prosentuaalinen vaikutus hiukkaspitoisuuteen.

Kuvaan 38 on piirretty jokaisen käytössä olleiden puhallusvaraajien yksinään yhdelle hiukkaselle aikaansaama keskimääräinen alkeisvarausluku hiukkaskoottain. Lisäksi kuvaan on jokaisen hiukkaskoon kohdalle laitettu näkyviin pienin ja suurin varausluku. Puhallusvaraajat olivat putkessa aerosolin virtaussuuntaan nähden siten, että varaaja 1 oli varaajista ensimmäisenä ja varaaja 6 viimeisenä.



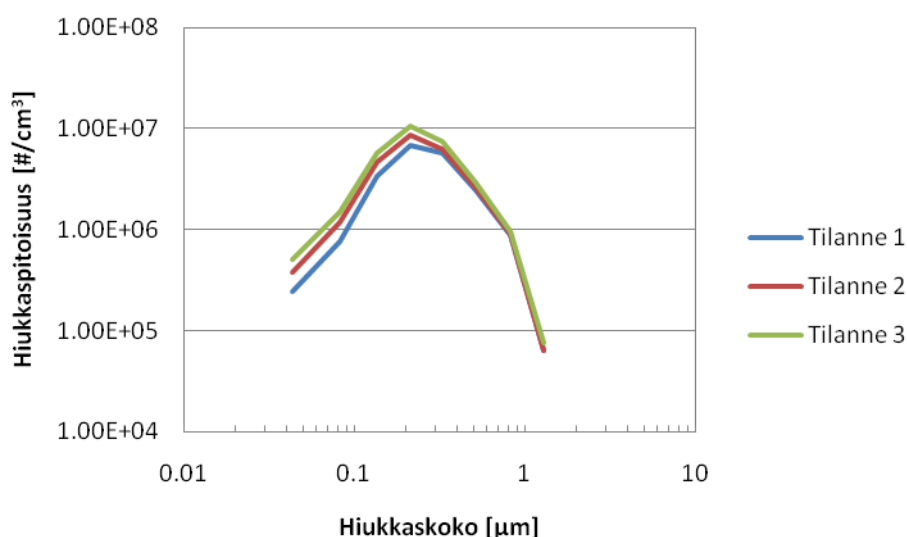
Kuva 38. Jokaisen puhallusvaraajan yksinään yhdelle hiukkaselle aikaansaama keskimääräinen varausluku hiukkaskoottain. Numerot kertovat jokaisen hiukkaskoon pienimmän ja suurimman varausluvun.

Kuvasta 38 on nähtävissä, että varaajien varaustehokkuuden välillä on selviä eroja. Matalin varausluku on jokaisella hiukkaskoolla 35-37% pienempi kuin korkein. Kuvasta nähdään, että varaajat 1 ja 2 tuottavat toisiinsa verrattuna hyvin samansuuruiset varausluvut. Varaajat 3, 5 ja 6 saavat aikaan näitä varaajia jonkin verran tai selvästi korkeampia varauslukuja. Erityisesti varaaja 5 tuottaa jokaisella hiukkaskoolla hyvän varausluvun suhteessa muihin varaajiin. Varaaja 4, joka sijainnillisesti on putkessa varaajien 3 ja 5 välissä on selvästi heikoin. Tämä varaajien eroavaisuus ei siis selittyne ainakaan pelkästään sijainnilla, vaan varaajien välillä on eroja varaustehokkuudessa, vaikka ne on valmistettu samalla tavalla.

8.4. Mittaus 3: Mittaukset prototyypikeräimellä TTY:n laboratoriossa

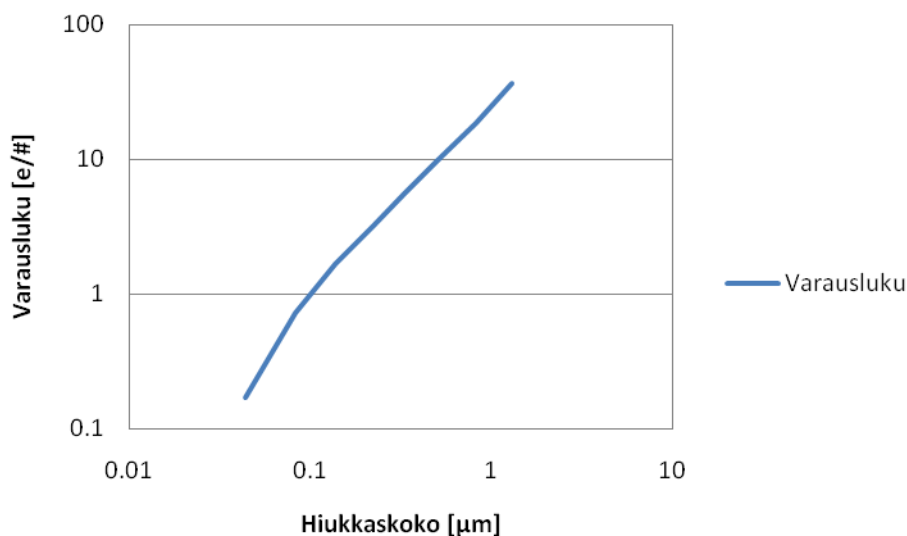
Huhtikuun 2011 alussa tehtiin mittauksia prototyypikeräimellä, joka oli teetetty fysiikan laitoksen työpajalla. Mittaukset suoritettiin kokonaisuudessaan yhden päivän aikana ja hiukkasgenerointi tehtiin samalla laitteella kuin *Mittaus 1*:ssäkin. Kuvaan 39 on piirretty hiukkaskokojakauma kolmessa eri tilanteessa päivän aikana. Kuvasta

nähdään, että hiukkaskokojakauman muoto on samanlainen kuin *Mittaus 1*:ssäkin, mikä on oletettavaakin, kun hiukkasgeneraattorina käytettiin samaa laitetta. Tilanteet ovat ajallisessa järjestyksessä eli tilanne 3 on mitattu myöhemmin päivällä kuin tilanne 1. Kuvasta nähdään, että generoinnin tuottamaa hiukkaspitoisuutta nostettiin hieman päivän aikana. Alla olevan kuvan tilanteissa hiukkasgeneroinnin tuottama kokonaishiukkaspitoisuus oli keskiarvallisesti noin $2,5 \cdot 10^7$ #/cm³. 0,14 – 0,82 µm:n kokoisten hiukkasten pitoisuus puolestaan oli noin $2,3 \cdot 10^7$ #/cm³ (*Mittaus 1*:ssä $6,4 \cdot 10^6$ #/cm³ ja *Mittaus 2*:ssa $7,5 \cdot 10^6$ #/cm³ ja $5,9 \cdot 10^6$ #/cm³). Hiukkaslukumäärät kuutiosentissä kaasua olivat siis näissä mittauksissa lähes kertaluokkaa korkeammat kuin kahdessa aiemmin esitellyssä mittauksessa.



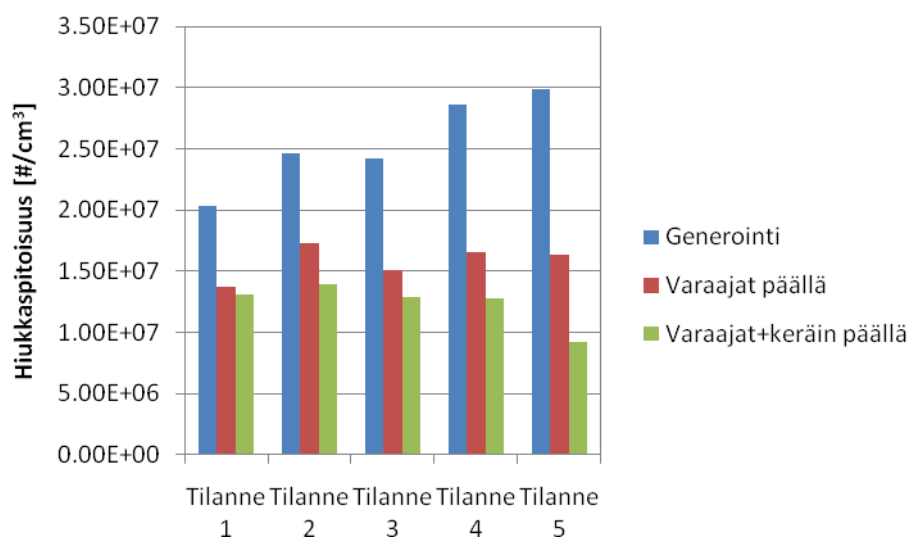
Kuva 39. Generoinnin tuottama hiukkaskokojakauma eri mittaustilanteissa saman päivän aikana.

Kuvaan 40 on piirretty tyypillinen päivän aikana mittauksissa saatu varausluku hiukkasen koon funktiona. Kuvasta nähdään, että varausluku kasvaa hiukkasen koon kasvaessa, kuten on nähty aiemmissakin varauslukukuvissa. Kun tässä mittauksessa saatuja varauslukuja verrataan *Mittaus 1*:ssä ja *Mittaus 2*:ssa tehtyihin mittauksiin, niin havaitaan, että varausluvut ovat samaa luokkaa kuin *Mittaus 1*:ssä saadut. Näissä mittauksissa on käytetty kolmea puhallusvaraajaa, kun taas *Mittaus 1*:ssä käytettiin kuutta puhallusvaraajaa. Näissä mittauksissa kuitenkin keräimen läpi imetty kokonaiskaasumäärä oli noin 20 litraa sekunnissa, kun *Mittaus 1*:ssä se oli noin 120 l/s. Vaikka näissä mittauksissa hiukkaspitoisuus oli suurempi kuin *Mittaus 1*:ssä, niin kokonaishiukkaslukumäärä, joka sekunnissa kulki puhallusvaraajan ohi oli näissä mittauksissa noin $1,7 \cdot 10^{11}$ kappaletta ja *Mittaus 1*:ssä noin $1,4 \cdot 10^{11}$ kappaletta. Siispä yhden varaajan kohtaama varattavien hiukkasten kokonaislukumäärä ei ollut näissä mittauksissa juuri *Mittaus 1*:ssä ollutta suurempi. Tämä selittää sen miksi varausluvut ovat suurin piirtein yhtä hyviä, vaikka varaajia on ollut käytössä vähemmän.



Kuva 40. Yhden hiukkasen keskimääräinen varaus hiukkasen koon funktiona.

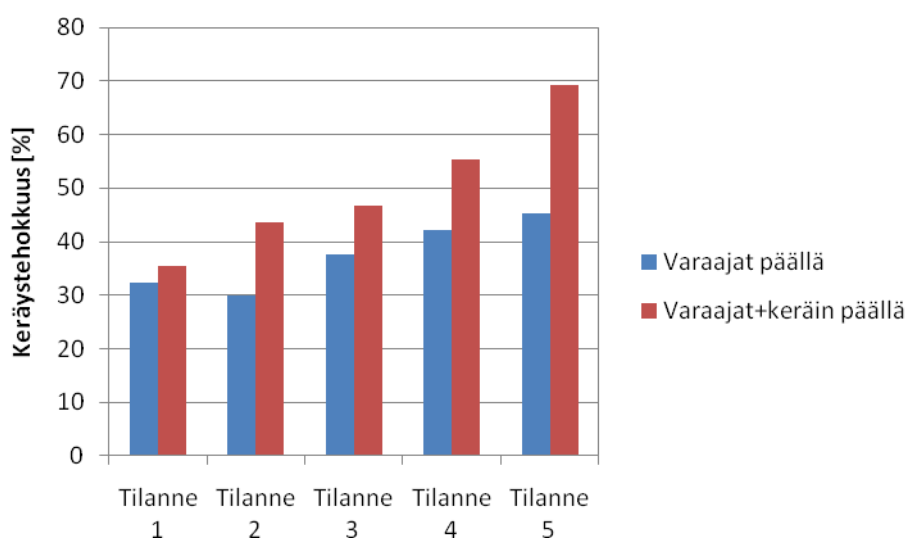
Kuvaan 41 on piirretty hiukkaslukumääräpitoisuus päivän aikana suoritettujen mittausten eri vaiheissa. Kuvassa on hiukkasgeneroinnin tuottama hiukkaspitoisuus, hiukkaspitoisuus varaajien ollessa päällä sekä myös keräimen ollessa päällä. Tilanteet ovat jälleen aikajärjestyksessä, joten kuvasta nähdään, että hiukkasgeneroinnin hiukkastuottoa lisättiin ensimmäisestä tilanteesta viimeiseen verrattuna noin kolmanneksella.



Kuva 41. Hiukkaslukumääräpitoisuus mittausten eri vaiheissa generoinnin, varaajien sekä varaajien ja keräimen ollessa päällä.

Kuvaan 42 on piirretty edellisen kuvan tilanteista lasketut keräysprosentit varaajien ollessa päällä sekä varaajien ja keräimen ollessa päällä. Kuvasta nähdään, että varaajien aiheuttama keräysprosentti nousee reilusta kolmestakymmenestä reiluun neljäänkymmeneen prosenttiin. Huomattavasti merkittävämpi nousu

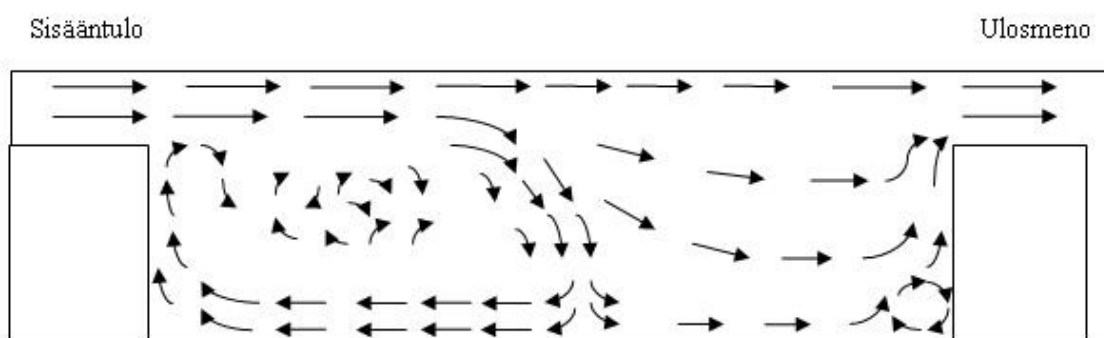
keräystehokkuuteen saadaan keräimenkin ollessa päällä. Tällöin keräysprosentti nousee ensimmäisen tilanteen 35 prosentista viimeisen tilanteen lähes 70 prosenttiin samaan aikaan, kun kasvatettiin hiukkasgeneroinnin tuottamaa hiukkaspitoisuutta. Tämä vaikutus saatiin aikaan tilanteiden välissä tehdyillä muutoksilla keräystilanteeseen. Ensimmäisen ja toisen tilanteen välissä pienennettiin keräyslevyn matka keräimen kattoon kymmenestä senttimetristä seitsemään senttimetriin. Toisen ja kolmannen tilanteen välissä tiivistettiin keräimen saumat. Kolmannen ja neljännen tilanteen välissä laskettiin virtausnopeutta. Neljännen ja viidennen tilanteen välissä laskettiin virtausnopeutta vielä hieman lisää ja pinnoitettiin keräyslevy lakalla. Näissä mittauksissa ei päästy aivan niin hyvään keräystehokkuuteen, kuin *Mittaus 1*:ssä, mutta keräimen erilaisuuden ja erityisesti pienemmän keräyspinta-alan huomioon ottaen suhteellisen hyvään tulokseen kuitenkin. Jos keräyspinta-alaa verrataan savukaasun tilavuusvirtaukseen, niin näissä mittauksissa käytetty tilavuusvirtaus oli noin 6 kertaa ja keräyspinta-ala noin 75 kertaa pienempi kuin *Mittaus 1*:ssä. Ehkä keräyspinta-alaakin parempi vertailukohta on kuitenkin hiukkasten viipymäaika keräysosiossa. Näissä mittauksissa viipymäaika oli noin 2 sekuntia ja *Mittaus 1*:ssä 3 sekuntia, joten silläkin perusteella prototyypikeräin on laskennallisesti noin kolmanneksen verran huonommassa tilanteessa suodatuksen kannalta. Näistä vertailusta nähdään, että saavutettu keräystehokkuus oli olosuhteisiin nähden varsin hyvä.



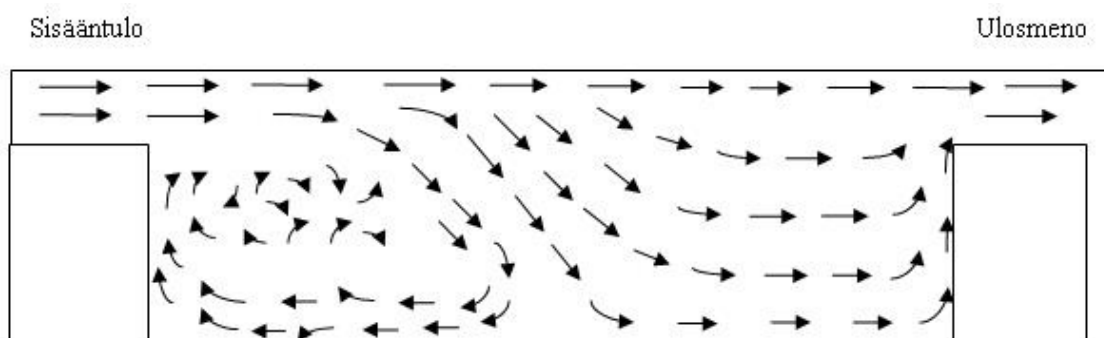
Kuva 42. Varaajien sekä varaajien ja keräimen tuottama keräysprosentti mittauksen eri vaiheissa.

Kuviin 43 ja 44 on piirretty poikkileikkauskuvat savukaasun virtausprofiilista prototyypikeräimessä, kun kaasun virtausnopeus virtauksen ohjaimien välissä on keskimäärin 3,0 ja 0,6 m/s. Kuvissa nuolten pituudet kertovat virtauksen nopeudesta siten, että mitä pidempi nuoli, niin sitä suurempi on virtausnopeus sillä kohdalla. Tärkeimmät kuvista nähtävissä olevat havainnot ovat keräimeen syntyvä takaisinpäin kääntyvä virtaus sekä virtausprofiilin pysyminen pääpiirteiltään samanlaisena

virtausnopeuden muutoksesta huolimatta. Suuremmalla virtausnopeudella virtaus kulkee kuitenkin pidemmän matkaa keräimen katon tuntumassa kuin hitaammalla ja pienempi osa kokoajan eteenpäin virtaavasta kaasusta painuu keräimen pohjan lähelle. Takaisinpäin lähtevä virtaus myös syntyy hitaammalla virtauksella ~25-30 senttimetriä aikaisemmin kuin nopeammalla virtauksella. Lisäksi on mainittava, että pienemmällä virtausnopeudella pyörteilyä ja sekoittumista oli suurempaa virtausnopeutta huomattavasti enemmän ja virtaukseen syntyi pyörteitä myös keräimen sivuttaissuunnassa. Erityisesti takaisinpäin kulkeva virtaus pyörteili pienemmällä virtausnopeudella runsaasti sekä pysty- että sivusuunnassa sen erittäin hitaasta virtausnopeudesta johtuen.

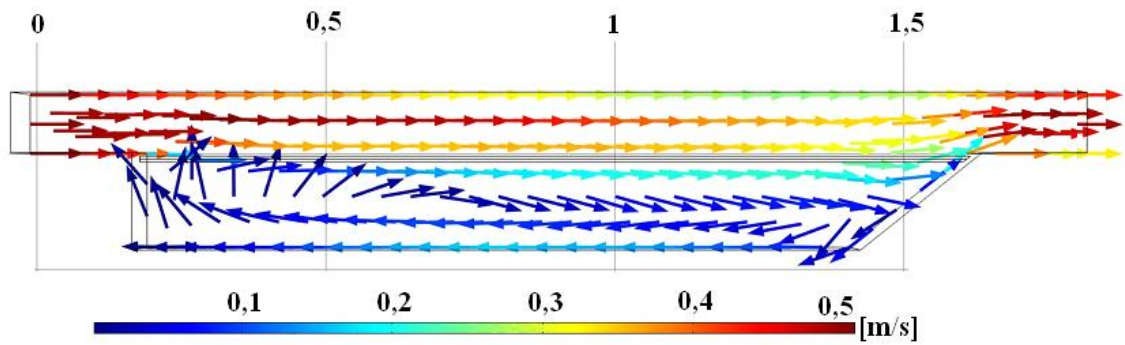


Kuva 43. Poikkileikkauskuva savukaasun virtausprofiilista prototyypikeräimessä 3,0 m/s:n virtausnopeudella.



Kuva 44. Poikkileikkauskuva savukaasun virtausprofiilista prototyypikeräimessä 0,6 m/s:n virtausnopeudella.

Kuvassa 45 on Comsol-ohjelmalla laskettu tietokonesimulaatiokuva savukaasuvirtauksesta prototyypikeräimessä. Kuvassa virtauksen nopeuden kertoo nuolen väri. Kuvasta havaitaan, että simulaation perusteella nopein virtaus on sisääntulossa ja ulosmenossa virtausohjaimien kohdalla ja hitain virtaus vähän keräimen pohjan yläpuolella. Simulaation perusteella keräimeen muodostuu hidas takaisinvirtaus ja suurin osa kaasusta pysyy virtausohjaimien tason yläpuolella.



Kuva 45. Savukaasuvirtauksen simulaatiokuva prototyyppikeräimelle. [Tekijä: Anssi Arfman]

Kun kuvaa 45 verrataan kuviin 43 ja 44, niin huomataan, että erona simulaatiokuvan ja todellista virtauskäyttäytymistä kuvaavien kuvien välillä on se, että todellisessa tilanteessa takaisinvirtaus keräimen pohjalla ei kulje koko keräimen matkalla. Lisäksi eroa on ulosmenon virtausohjaimen jyrkkyydessä, mikä saa virtauksen nousemaan simulaatiokuvassa loivemmin. Muilta osin kuvat vastaavat erittäin hyvin toisiaan.

9. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä suoritetuissa puhallusvaraajan toimintaa selvittäneissä mittauksissa havaittiin, että puhallusvaraajan ionituotto parantui koko mittausalueella sekä painetta että jännitettä kasvatettaessa. Havaittiin myös, että paras ionituoton hyötysuhde koronavirtaan verrattaessa saadaan, kun puhallusvaraajaan syötettävän ilman ylipaine on yli kolme baria. Tutkittaessa puhallusvaraajan toimintaa sen puhaltaessa savukaasuvirtaukseen havaittiin sen imevän savukaasua sisäänsä ja likaantuvan. Likaantumista pyrittiin estämään suuttimen tulpan reikää muuttamalla, mutta vaikka reiän pienentäminen hidastikin likaantumista, niin sitä ei millään reiän muodolla saatu täysin loppumaan. Likaantuminen saatiin loppumaan täysin puhallusvaraajan suppiloon koronaneulan viereen poratulla lisäreiällä, mutta tämän ratkaisun ongelmaksi muodostui noin 40 prosentilla lisääntynyt tilavuusvirtaus. Käytännössä puhallusvaraajan käyttöpaineen ja –jännitteen sekä lisäreiän järkevyyden ratkaisevat kuhunkin sovellukseen käytettävissä olevat kompressorit ja jännitelähteet sekä niiden hinnat.

Mittaus I:ssä hiukkaskenerointi tuotti pitoisuudeltaan luokkaa $7 \cdot 10^6$ hiukkasta/cm³ olleen hiukkaskokojakauman, jonka huippu oli 0,2-0,3 mikrometrin välillä. Puhallusvaraajien aikaansaamaa hiukkasten varautumista kuvaa keskimääräinen varausluku. Se oli 0,044-1,3 mikrometrin kokoisille hiukkasille 0,3-34,5 alkeisvarausta/hiukkanen nousten likipitään lineaarisesti hiukkasen koon kasvaessa. Varausluvun yhteydessä on muistettava, että kaikkein parhaiten varautuneet hiukkaset olivat jo tilavarauksen vuoksi keräytyneet ennen ELPI:ä. Keräystehokkuusmittauksessa havaittiinkin pelkkien puhallusvaraajien aiheuttavan hiukkasista noin neljäsosan keräytymisen. Keräimen jännitettä kasvatettaessa päästiin parhaimmillaan hiukan yli 80 prosentin keräystehokkuuteen. Tämä ei ole voimalaitosten sähkösuodattimiin verrattaessa korkea keräystehokkuus, mutta laitteen kompaktin koon huomioon ottaen erittäin hyvä tulos. Jännitteen kasvattaminen neljästä kuuteen kilovolttiin ei tuonut enää keräystehokkuuteen kuin alle neljän prosenttiyksikön parannuksen, joten keräystehokkuuden pysyminen hyvänä ei vaadi maksimijännitteen käyttämistä. Keräystehokkuus mittauksissa nähtiin myös, että parhaiten varautuivat ja keräytyivät suurimmat yli mikrometrin kokoiset hiukkaset ja huonoiten pienet alle 0,1 mikrometrin kokoiset hiukkaset. Tämä on siinä mielessä yllättävää, että puhallusvaraaja varaa hiukkasia diffuusiovarautumisella ja sen aikaansaama sähköinen liikkuvuus pitäisi olla parhaimmillaan pienillä alle 0,1 mikrometrin kokoisilla hiukkasilla. Yksi selittävä tekijä huonoon keräystehokkuuteen pienillä hiukkasilla voi olla mahdollinen koronapurkaus keräyslevyjen etuosassa, jonka seurauksena pienet suuren sähköisen liikkuvuuden omaavat hiukkaset olisivat keräyslevylle tullessaan neutraloituneet ja tempautuneet

takaisin savukaasuvirtaukseen. Mahdollisen koronapurkauksen olemassaolon ja syyn selvittäminen vaatisivat jatkotutkimuksia.

Mittaus 2:ssa suodatetut hiukkaset syntyivät laivanmoottorissa ja hiukkaskokojakauma oli muodoltaan jonkin verran erilainen kuin *Mittaus 1*:ssä. Mittauksessa olleiden ongelmien vuoksi tulosten laskennassa käytettiin vain kooltaan välillä 0,1-1,0 mikrometriä olleiden hiukkasten pitoisuuksia. Puhallusvaraajien sijoitteluun *Mittaus 1*:n jälkeen tehdyillä muutoksilla saatiin niiden tuottamaa keskimääräistä varaustilaa nostettua hiukkaskoosta riippuen jopa 70 prosenttia. Tämän muutoksen vaikutusta keräystehokkuuteen ei kuitenkaan mittauksessa olleiden ongelmien vuoksi ole mahdollista arvioida. Vaikutuksen selvittämiseksi tarvittaisiin ehkä uusi laboratorioissa suoritettu mittaus Suula-keräimellä. Lisäksi puhallusvaraajien välillä niiden varaustehokkuudessa havaittiin näissä mittauksissa olevan jopa lähes 40 prosentin eroja, mikä on yllättävää siinä mielessä, että puhallusvaraajat oli valmistettu teollisesti samoilla mitoilla. Todennäköisesti tämä tulos kertoo siitä, että pienetkin muutokset puhallusvaraajan mitoissa aiheuttavat suuria muutoksia siitä ulos saatavaan ionipitoisuuteen. *Mittaus 2*:ssa suoritetuissa keräystehokkuusmittauksissa saadut kokonaiskeräystehokkuudet olivat noin 60 prosentin luokkaa, mikä on huomattavasti alempi kuin *Mittaus 1*:ssä saatu keräystehokkuus. Tämä voi kuitenkin johtua mittauksessa olleista ongelmista. Lisäksi *Mittaus 2*:ssa saatu keräystehokkuus hiukkaskoon funktiona oli ristiriidassa *Mittaus 1*:n tuloksen kanssa, sillä keräystehokkuus ei noussut, vaan laski hiukkaskoon kasvaessa. Ero oli erittäin merkittävä, sillä *Mittaus 1*:ssä esimerkiksi 0,82 mikrometrin kokoisten hiukkasten keräystehokkuudeksi saatiin yli 80 prosenttia ja *Mittaus 2*:ssa alle 40 prosenttia. Tämän eron varmentamiseksi ja mahdollisesti selvittämiseksi tarvittaisiin uusi paremmin suunnitellulla laimennuksella suoritettu kenttämittaus.

Mittaus 3:ssa käytettiin hiukkasgenerointiin samaa laitetta kuin *Mittaus 1*:ssä ja se tuotti pitoisuudeltaan luokkaa $2,5 \cdot 10^7$ hiukkasta/cm³ olleen hiukkaskokojakauman, jonka huippu oli 0,2-0,3 mikrometrin välillä. Hiukkaspitoisuuden erosta huolimatta yhden puhallusvaraajan kohtaama kokonaishiukkaspitoisuus ja myös saavutettu varaustilavuus oli samaa luokkaa kuin *Mittaus 1*:ssä. Kokonaiskeräystehokkuudeksi prototyypikeräimellä saatiin parhaimmillaan noin 70 prosenttia, mikä oli erittäin hyvä tulos, kun otetaan huomioon keräimen vaatimaton keräyspinta-ala ja hiukkasten viipymäaika keräyslevyn lähettyvillä. On huomattava, että prototyypikeräintä pystyttäisiin lyhentämään tässä työssä olleesta pituudesta huomattavasti ilman, että keräysosio lyhenisi tai keräystehokkuus heikkenisi. Pidemmälle kehitettäessä keräyslevy kannattaisi vaihtaa pystysuunnassa olevaksi, jotta puhdistaminen olisi hoidettavissa helpommin.

Tässä työssä tehdyistä mittauksista onnistuivat hyvin kaikki muut paitsi Wärtsilän tehtaalla suoritettu *Mittaus 2*. Mahdollisissa myöhemmin tulevilla kenttämittauksissa onkin kiinnitettävä huomiota siihen, että laimennus hoidetaan ennen suodatinta riittävän kaukana, jotta hiukkaskokojakauma on ehtinyt stabilisoitua. Työssä tehdyt mittaukset tuottivat paljon kokeellista ja käytännöllistä tietoa puhallusvaraajien ja

sähkösuodattimen toiminnasta ja mitoituksesta. Työn aikana kävi ilmeiseksi, että puhallusvaraajien perään sijoitettava keräysosio on suunniteltava ja mitoitettava erikseen jokaiseen käytännön sovelluskohteeseen, vaikka kokonaisuuden perusajatus voidaankin pitää samana. Jos työn aikana laboratoriossa suodattimelle mitatut keräystehokkuudet pystytään siirtämään todelliseen tilanteeseen, niin tuloksena on varteenotettava pienhiukkassuodatin. Tämä vaatisi kuitenkin sitä, että keräimeen liittyvää suunnittelua ja mittauksia pitäisi pystyä edelleen jatkamaan.

LÄHTEET

1. Fuchs, N. A. The Mechanics of Aerosols. Oxford 1964, Pergamon Press. 408 p.
2. Talka, I. Pienpolton hiukkasten sähköinen suodattaminen. Pro Gradu –tutkielma. Jyväskylä 2006. Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos. 82 s.
3. Kittelson, D. Engines and Nanoparticles: A Review. Journal of Aerosol Science 29 (1998) 5/6, pp. 575-588.
4. Tissari, J., et al. Puun pienpolton pienhiukkaspäästöt. Loppuraportti (PIPO). Kuopio 2005. Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja.
5. Hirvelä, M. Hiukkasten varautuminen teollisissa sähkövaraajissa. Diplomityö. Tampere 2009. Tampereen teknillinen yliopisto. 72 s. + 6 liitesivua
6. Hinds, W. Aerosol Technology: properties, behavior and measure of airborne particles, USA 1999, John Wiley & Sons, Inc. 483 p.
7. Baron, P. A. & Willeke, K. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. 2nd edition. USA 2001. John Wiley & Sons. 1144 p.
8. Asmi, A. Ulkoilman pienhiukkaspitoisuuden vaikutus sisäilman pitoisuuksiin. Pro gradu –tutkielma. Helsinki 2000. Helsingin yliopisto. 80 s.
9. Rönkkö, T., Virtanen, A., Vaaraslahti, K., Keskinen, J., Pirjola, L. & Lappi, M. Effect of dilution conditions and driving parameters on nucleation mode particles in diesel exhaust: Laboratory and on-road study. Atmospheric Environment 40 (2006) 2893–2901.
10. Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N. Atmospheric chemistry and physics - From air pollution to climate change. New York. 1998. John Wiley & Sons Inc.
11. Ålander, T. Palamishiukkasten orgaanisen ja epäorgaanisen hiilen analyysi. Licensiaattitutkimus. Kuopio 2000. Kuopion yliopisto, ympäristötieteiden laitos. Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja. 145 s.

12. Zevenhoven, C.A.P. Particle Charging and Granular Bed Filtration for High Temperature Application. Ph.D. Thesis. Delft University Press 1992. Delft University of Technology. 288 p.
13. Millikan, R.A. The Isolation of an ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Law. *Physical Review* 32(1911)4, pp. 349-397.
14. Parker, K.R. Applied Electrostatic Precipitation. UK 1997. Blackie Academic & Professional. 519 p.
15. White, H.J. Industrial electrostatic precipitation. USA 1963. Addison-Wesley publishing Company inc. 375 s.
16. Cochet, R. Lois de Charges des Fines Particules (submicronique) Etudes Théoretiques-Contrôles Récents Spectre de Particules. Colloque International – La Physique des Forces Electrostatiques et Leurs Applications. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris 1961.
17. Wiedensohler, A. An Approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Size Range. *Journal of Aerosol Science* 19(1988)3, pp. 387-389.
18. Lawless, P.A. Particle charging bounds, symmetry relations, and an analytic charging rate model for the continuum regime, *Journal of Aerosol Science* 27(1996)2 pp. 191-215.
19. Fisk, W.J., Spencer D.T., Grimsrud F.J., Pedersen B. & Sextro R. Indoor Air Quality Control Techniques. USA 1987. Noyes Data Corporation. 245 p.
20. Karjalainen, K. ESP:n varaajan suunnittelu pienpoltoon. Diplomityö. Tampere 2010. Tampereen teknillinen yliopisto. 87 s.
21. Kleefsman, W.A. & van Gulijk, C. Robust method to compare aerosol charges. *Journal of Aerosol Science* 39(2008)1. pp. 1-9.
22. Liu, B.Y.H. & Pui, D.Y.H. Aerosol Charging and Neutralization and Electrostatic Discharge in Clean rooms. *The Journal of Environmental Sciences*, March/April 1987. pp. 42-46.
23. Lehtimäki, M. Electrostatic Precipitators Fundamentals, Industrial Ventilation Design Guide Book. 2000. VTT Automation.

24. Bazelyan, E.M. & Raizer, Y.P. Spark discharge. Boca Raton 1998. CRC Press. 294 s.
25. Loeb, L.B. & Meek, J.M. The mechanism of the electric spark. Stanford University press 1941.
26. Oglesby, S. Jr. & Nichols, G.B. Electrostatic Precipitation. USA 1978. Marcel Dekker, Inc. 483 p.
27. Shames, I.H. Mechanics of fluids. 3rd, international edition. New York 1992. McGraw-Hill. 858 s.
28. Strauss W. Industrial Gas Cleaning: The Principles and Practise of the Control of Gaseous and Particulate Emissions. Oxford 1975. Pergamon Press. 621 p.
29. Hautanen, J. Sähkösuodattimet voimalaitoksilla, erityisesti rikinpoiston yhteydessä. Lisensiaattityö. Tampere 1991. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Raportti 5-91. 194 s.
30. Choi, D.H. Experimental study of ash layer rapping and re-entrainment from the collector plates of a laboratory-scale electrostatic precipitator. Ph.D. Thesis. USA 1991. Stanford University.
31. Grady, B. & Nichols, S. Jr. The Significance of the Particle Charging Time in Electrostatic Precipitation. Birmingham, Alabama, USA 1970.
32. Domingo, J., Häkkinen, P., Kallioniemi, V. & Kääriäinen, J. Exhaust gas boiler fouling and soot removal investigation in HFO diesel engine plants. Espoo 2002, Helsinki University of Technology. Ship Laboratory. Report M-268. 103 p. + appendices 23 p.
33. Moisio, M. Palamisaerosolien kokojakaumien mittaaminen sähköisellä alipaineimpaktorilla. Lisensiaattityö. Tampere 1997. Tampereen teknillinen korkeakoulu.
34. Kemenade, E. Aerosol and Particle Transport in Biomass Furnaces. Eindhoven University of Technology. Thermo Fluids Engineering [WWW] [Viitattu 22.8.2011] Saatavilla: http://www.ieabcc.nl/meetings/task32_Graz_aerosols/09_Kemenade.pdf
35. Thun, R. & Korhonen, M. SIHTI 2, Energia- ja ympäristöteknologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1998, Projektiesittelyt. Espoo 1999. VTT Symposium 191. 487 s.

36. Keskinen, J., Pietarinen, K. & Lehtimäki, M. Electrical low pressure impactor. *Journal of Aerosol Science* 23 (1992) 353-360.
37. Virtanen, A. Physical Characterization of Diesel Soot Particles. Väitöskirja. Tampere 2004. Tampereen teknillinen yliopisto. 63 s.
38. Marjamäki, M., Keskinen, J., Chen, D. & Pui, D.Y.H. Performance Evaluation of the Electrical Low-Pressure Impactor (ELPI). *Journal of Aerosol Science* 31(1999)2. pp. 249-261.