

Sami Rantalainen

Sähkösuodattimen suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Automaatiotekniikka
Opinnäytetyö
12.03.2012

Tekijä Otsikko	Sami Rantalainen Sähkösuodattimen suunnittelu
Sivumäärä Aika	37 sivua 12.03.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaajat	Tekninen johtaja Pekka Päiviö, ECP Group Oy Lehtori Markku Lavi
<p>Tämän insinööriyön yhtenä tarkoituksena oli selvittää, mitkä pääperiaatteet vaikuttavat uuden sähkösuodattimen mallintamiseen. Insinööriyö tehtiin ECP Group Oy:n palveluksessa.</p> <p>Insinööriyön tavoitteena oli tarkastella sähkösuodattimen suunnittelun lähtökohtia, kuten suodattimen komponentteja sekä huoltoa ja optimointia. Insinööriyön tärkeänä osana tehtiin myös sähkösuodattimen painonlaskentaohjelma, joka laskee suodattimen osien painon.</p> <p>Insinööriyössä selvitettiin tärkeimmät sähkösuodattimen mallinnuksessa käytetyt kaavat sekä suodattimen erotusasteeseen vaikuttavia tekijöitä. Sähkösuodattimen suunnittelu on vaativaa ja hyvän erotusasteeltaan hyvän suodattimen tekeminen vaatii asiantuntemusta. Tässä insinööriyössä tehtiin tarjouslaskennan apuvälineeksi ohjelma, joka laskee sähkösuodattimen osien kokonaispainon. Ohjelma kykenee laskemaan suodattimen painon $\pm 2\%$:n tarkkuudella. Ohjelma on luovutettu vain työn tilaajan käyttöön.</p> <p>Insinööriyössä käsitellään myös sähkösuodattimen huoltoa ja tarkastusta kuluvien osien kannalta ja selvennetään ennakkohuollon tarpeellisuutta. Sähkösuodattimen tarkastus ja huolto on erittäin tärkeää sen toimintavarmuuden säilyttämisen kannalta. Ennakoimattomat prosessien alasajot, jotka johtuvat sähkösuodattimen menemisestä epäkuntoon, ovat kalliita, mutta oikealla ennakkohuoltosuunnitelmalla sähkösuodattimen on kustannustehokas vaihtoehto teollisuuden pienhiukkassuodatukseen.</p>	
Avainsanat	Sähkösuodatin, ilmansuojelu, hiukkaspäästöt

Author Title	Sami Rantalainen Designing of an electrostatic precipitator
Number of Pages Date	37 pages 12th March 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Technology
Specialisation option	Machine Automation
Instructors	Pekka Päiviö, Technical Director ECP Group Oy Markku Lavi, Senior Lecturer
<p>The aim of this bachelor's thesis was to examine which are the main principles of modeling a new electrostatic precipitator. The thesis project was launched as a research for ECP Group Ltd. As a part of this bachelor's thesis was a program, the electrostatic precipitator weight calculation program that calculates the weight of the electrostatic precipitator elements.</p> <p>This thesis investigated the most important formulas in modelling of an electrostatic precipitator, as well as filter efficiency factors were taken account. Electrostatic precipitator design is very demanding, and to reach highest efficiency possible expertise is also required. In this thesis project there were also made a calculation program, which calculates the electrostatic precipitator parts and gives the total weight of the electrostatic precipitator. The program is able to calculate the weight of the precipitator within + - 2% accuracy. The calculation program was handed over for the company use only.</p> <p>The main purpose of this thesis was to examine electrostatic precipitator design and components. It also examines the inspections, maintenance and some electrostatic precipitator optimization. Electrostatic precipitator inspection and maintenance is very important to the preservation of precipitator air purification reliability. Unforeseen process shutdowns due to an electrostatic precipitator failure are expensive, but the right preventive maintenance plan will reduce unwanted shutdowns. Electrostatic precipitator is a cost-effective alternative for the industry small particle cleaning systems.</p>	
Keywords	Electrostatic precipitator, emission control, particle emissions

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sähkösuodatin	2
2.1	Teollisuuden hiukkaspäästöt	2
2.2	Sähkösuodattimen historiaa	3
2.3	Sähkösuodattimen suunnittelun lähtökohdat	3
2.4	Erityyppisiä suodattimia	5
2.4.1	Syklonit	6
2.4.2	Törmäyssuodattimet	8
3	Sähkösuodattimen rakenne	10
3.1	Levymäisen sähkösuodattimen rakenne	10
3.1.1	Erotuskammio	10
3.1.2	Purkauselektrodit	11
3.1.3	Keräyselektrodit	12
3.1.4	Ravistuslaitteisto	13
3.1.5	Tuhkan keruu ja kuljetus	15
3.1.6	Sähköjärjestelmä	17
3.1.7	Esivarauslaitteisto	17
4	Sähkösuodattimen toimintaperiaate	18
4.1	Koronapurkaukset	18
4.1.1	Positiivinen korona	19
4.1.2	Negatiivinen korona	19
4.2	Hiukkasten varautuminen	20
4.2.1	Kenttävarautuminen	21
4.2.2	Diffuusiovarautuminen	23
4.2.3	Hiukkasten kulkeutuminen	24
4.2.4	Sähkösuodattimen erotusasteen parantaminen	24
4.3	Sähkösuodattimen tehokkuus	25
4.3.1	Sähkösuodattimen erotuspinta-ala	26
4.4	Savukaasujen ominaisuudet	27
4.4.1	Virtausnopeus	27
4.4.2	Virtausjakauma	27

4.4.3	Tuhkan resistiivisyys	27
5	Sähkösuodattimen kunnossapito	28
5.1	Pitkäaikainen suunnitelma kunnossapitoon	28
5.1.1	Kunnossapitosuunnitelma	29
5.1.2	Sähkösuodattimen tarkistus	29
5.1.3	Sähkösuodattimen kunnossapito	30
5.2	Sähkösuodattimen kunnossapidon ongelmakohtia	31
6	Tulevaisuuden näkymiä	32
7	Loppupäätelmät	33
	Lähteet	34
	Liitteet	
	Liite 1. Sähkösuodattimen painonlaskentaohjelma (vain työn tilaajan käyttöön)	

Lyhenteet, käsitteet ja määritelmät

E_p	sähkökenttä hiukkasen lähellä
E_1	kentän aiheuttama sähkökenttä
E_2	hiukkasen aiheuttama sähkökenttä
E_c	tasainen sähkökenttä
θ	tarkastuspisteen ja sähkökentän välinen kulma
Q	hiukkasen varaus
q	saturaatio varaus
ϵ_0	vapaa tilavuus permittivisyys
e	elektroninen varaus
T	Absoluuttinen lämpötila
K	Boltzmannin vakio
r	hiukkasen säde
d	hiukkasen halkaisija
Q_s	kyllästysvaraus
ϵ	dielektrisyysvakio
F	liikettä vastustava voima
μ_g	kaasun viskositeetti
η	sähkösuodattimen erotusaste
w	hiukkasten keskimääräinen nopeus savukaasun poikki elektrodille
A	sähkösuodattimen tehollinen erotuspinta-ala
\dot{V}	savukaasujen tilavuusvirtaus
k	Matts-Ohnfeldt-kerroin
W	hiukkasen kulkeutumisnopeus
E	sähkökenttä
d	hiukkasen ympärysmitta
μ	viskositeetti
t	aika
m	hiukkasen massa
Q_E	hiukkaseen vaikuttava sähköinen voima
$3 \pi d \eta$	jarruttava viskoosinen voima

1 Johdanto

Kiitän Ecp Groupin Pekka Päiviötä ja Pekka Vähäkuopusta mahdollisuudesta tehdä tämä insinööriyö. Insinööriyö tehtiin, koska suunnittelijoiden käyttöön tarvittiin ohjelma, joka laskee sähkösuodattimen kaikkien komponenttien painon riittävällä tarkkuudella. Tärkeintä oli saada lasketuksi suodattimen teräsrakenteiden paino hyvällä tarkkuudella. Lisäksi insinööriyössä selvitettiin tärkeimmät sähkösuodattimen mallinnuksessa käytetyt kaavat sekä suodattimen erotusasteeseen vaikuttavia tekijöitä.

Sähkösuodatin on laite, jolla erotetaan prosessien pölypitoinen savukaasu. Sähkösuodattimessa savukaasu johdetaan maadoitettujen kokoojalevyjen ja suurjänniteyksikköön yhdistettyjen emissioelektrodien väliin. Emissioelektrodit varataan negatiivisella tasavirtajännitteellä, joka on nykyisin 50–110 kV:n luokkaa. Käytetty jännite riippuu prosessista, käytetystä polttoaineesta ja kokoojalevyjen etäisyydestä. Käytetty emissiojännite riippuu myös suodattimen kenttien lukumäärästä. Usein monikenttäisessä suodattimessa emissiojännitettä nostetaan kun hiukkaskoko pienenee; tällöin ensimmäisessä kentässä voi olla 50 kV ja viimeisessä 80 kV emissiojännite. Sähkösuodattimia käytetään maailmalla paljon niiden edullisien käyttökustannusten ja hyvän puhdistustehokkuuden vuoksi. Tarvittava sähkösuodatin täytyy suunnitella kyseiseen käyttötarpeeseen omanlaiseksi kokonaisuudekseen. Sähkösuodattimien suunnittelussa pitää tietää hyvin tarkkaan, mihin prosessiin suodatinta ollaan tuomassa, koska kattilatyyppi ja polttolämpötila vaikuttavat suuresti hiukkasjakaumaan sekä siten suodattimen konstruktion. Sähkösuodattimilla pystytään nykyisin suodattamaan kaasusta hyvin myös todella pieniä partikkeleita koska ohjausjärjestelmät ja hiukkasen kulkeutuminen suodattimessa tunnetaan hyvin.

2 Sähkösuodatin

2.1 Teollisuuden hiukkaspäästöt

Teollisuuden hiukkaspäästöihin ruvettiin kiinnittämään enemmän huomiota 1900-luvun alkupuolella. Teollisuus eli voimakasta kasvukautta 1950-luvulla, jolloin ruvettiin kiinnittämään huomiota ihmisten keuhkosairauksiin ja niiden yhteys raskaasti teollistuneissa kaupungeissa jäljitettiin pikkuhiljaa ilman epäpuhtauksiin. 1970-luvun alun energiakriisi oli yksi käännekohta nykyiselle ympäristöpolitiikalle. Uudet ohjausjärjestelmät ovat kasvattaneet sähkösuodattimen hyötysuhdetta ja nostaneet sen erotustarkkuuden korkealle. Sähkösuodatinta käytetään myös ottamaan talteen raaka-aineita erilaisissa prosesseissa: sulatoissa, paperin ja öljynjalostuksessa. Monikenttäiset suodattimet kykenevät erottamaan jopa yli 99 % kaasun pienhiukkasista.

Nykyisin on jo tutkimuksissa todettu että hiukkaspäästöt aiheuttavat keuhko- ja hengityselin sairauksia. Kun pienhiukkasten koko on alle 1 μm , ne ovat tutkitusti kaikkein haitallisimpia terveydelle. Alle 1 μm :n hiukkaset pääsevät suun ja keuhkojen puolustusjärjestelmän läpi, ja niihin mahdollisesti kiinnittyneet virukset ja bakteerit pääsevät siten niiden avulla syvemmälle elimistöön. Virukset ovat kooltaan muutamasta kymmenestä muutamaan sataan nanometriin, ja siten niitä voi olla pienhiukkasessa kiinnittyneenä paljonkin. Bakteerit ovat kooltaan sadoista nanometreistä kymmeneen mikrometriin, joten niitäkin voi olla kiinnittyneenä pienhiukkasiin. Muutamaa mikrometriä pienemmät hiukkaset pääsevät tunkeutumaan keuhkorakkuloihin asti. Pienhiukkasten vaikutusta on ruvettu tutkimaan, koska niillä on huomattu olevan kuolleisuuteen ja tiettyjen tautien leviämiseen selvä yhteys. Pidempiaikaisia tutkimustuloksia pienhiukkasten terveysvaikutuksista ei ole vielä olemassa, mutta tutkimusta tehdään jatkuvasti. [1.]

Savukaasujen puhdistus onkin varsin tärkeää luonnon ja ihmisten kannalta. Puhdistusmenetelmiä käytetään toistensa tukena, sykloneja ja läpivirtaussuodattimia käytetäänkin usein esierottimina ennen varsinaista sähkösuodatinta. Sähkösuodattimen tukena voi olla myös esimerkiksi pussisuodatin tai märkäsuodatin. Käyttökohde eli prosessi, johon suodattimet asennetaan, määrittelee myös esierottimen tarpeen. Monissa tapauksissa esierotinta ei tarvita, kun tuhkamäärät pysyvät sopivina suodattimen toimintaa

ajatellen. Kun materiaali tai tuhkavirta on todella paljon tai sähkösuodattimesta tulisi erittäin suuri, niin tällöin tehokkaan esierottimen käyttöönotto on perusteltua.

Teollisuuden prosesseissa käytetään myös kuitusuodattimia, kun kaasumäärät ovat pieniä. Hiukkasen keräytyminen kuitusuodattimeen riippuu kuitujen paksuudesta, kuitukerroksien määrästä ja kerrosten välisten aukkojen suuruudesta. Kuitusuodatin vaatii sen rakenteen takia suuremmissa kokoonpanoissa esierottimen, joka poistaa suurimmat hiukkaset. Pussisuodattimet tukkeutuvat helposti jos ne suunnitellaan liian pienelle hiukkaskuormitukselle. Sähkösuodattimen hiukkaseen vaikuttava voima vaikuttaa vain hiukkaseen ja siten poikkeaa Jaroslav Böhmin mukaan muista suodatintyypeistä [2, s. 20]. Sähkösuodattimen toiminta pitää olla hyvin säädettyä, että suodatin kykenee toimimaan parhaalla mahdollisella tavalla.

2.2 Sähkösuodattimen historiaa

Sähkösuodatin on melko vanha keksintö, koronapurkausta on tutkittu jo 1800-luvulta lähtien. Sähkösuodattimien ensimmäisiä sovellutuksia oli rikkihappopisaroiden kerääminen. 1920-luvun puolivälissä Deutch kehitti ehkä tärkeimmän sähkösuodattimen hyötysuhdetta kuvaavan yhtälön. Hänen jälkeensä monet muut ovat johtaneet sähkösuodattimien mallintamisen kaavoja, ja nykyisin tunnetaan kaikki sähkösuodattimissa tapahtuvat reaktiot yhtälöineen. Kun päästiin 1960-luvulle, päästövaatimukset kiristyivät niin kivihiilivoimalaitoksissa kuin muussakin teollisuudessa. Tuolloin Deutshin kehittämää yhtälöä tutkittiin uudelleen ja sitä muokattiin Mattsin ja Ohnfeldtin toimesta. Siitä seurasi muokattu Deutshin kaava, jota kutsutaan muokatuksi Deutshin yhtälöksi. Nykyisellään sähkösuodattimien suunnittelussa tarvitaan paljon monimutkaisia kaavoja joita voi tutkia Kenneth Parkerin ja Norman Plakin kokoamasta manuaalista [3, s. 1–5, 1–6].

2.3 Sähkösuodattimen suunnittelun lähtökohdat

Sähkösuodattimen periaatteet tunnetaan jo hyvin. Suodattimen toimintaa on tutkittu laboratorioissa ja laitoksissa. Saatujen tulosten ja teoreettisten kaavojen perusteella kyetään nykyisin suunnittelemaan sopiva suodatin lähes mihin tahansa prosessiin. Nykyisin tunnetaan teoreettisesti hiukkasten varautuminen ja niiden kerääntyminen, kaa-

sun virtaus ja lentotuhkan resistiivisyys. On olemassa ohjelmia, joilla voidaan jopa mallintaa hiukkasen dynamiikka kaasuvirtauksessa, mutta nämä ohjelmat ovat usein kalliita ja vaativat tehokkaat tietokoneet toimiakseen kunnolla. Sähkösuodattimien suunnitteluun on olemassa paljon apuvälineitä, ja eri laitoksilla on kehitetty monenlaisia ohjelmia sähkösuodattimien toiminnan mallintamiseen. Aivan yksinkertaisen suodattimen laskemiseen voi riittää kymmenen yhtälöä. Mitä enemmän suodattimelle asetetaan vaatimuksia, sitä enemmän tarvitaan yhtälöitä suodattimen laskemisessa. Nämä sähkösuodattimen mitoitusyhtälöt ovat miltei joka lähteessä hieman erilaisia ja painotukset erilaisia; pääpiirteittäin yhtälöt ovat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia.

Käytännössä ennen 1970-lukua suodattimen mitoitus on ollut hankalaa ilman kokeellista tietoa, mutta nykyisin suodattimista on kerätty paljon tietoa joka perusteella voidaan suodatinta mitoittaa prosessiin sopivaksi. Jokainen sähkösuodatinta on kuitenkin tehtävä tiettyyn prosessiin, ja tietylle polttoaineelle sopivaksi. Juuri tästä syystä on ollut haasteellista ottaa huomioon suodattimessa vaikuttavia olosuhteita. Suunnittelu ei ole kuitenkaan aina niin suoraviivaista kuin se voisi olla, kun kaikkia muuttujia ei ole helppo huomioida suodatinta suunniteltaessa. Kokemusperäinen tieto auttaa paljon suunniteltaessa uutta sähkösuodatinta.

Yksi sähkösuodatintutkimuksen osa-alueista on sen sähköjärjestelmän kehittäminen. 1960-luvulta tähän päivään on sähkösuodattimien sähköinen säätöjärjestelmä kehittynyt huomasti, mutta aikaisemmin säätöä ei käytännössä ollut. Nykyiset säätöjärjestelmät kykenevät tekemään nopeita muutoksia prosessiin, ja siten hyötysuhdetta saadaan nostettua, jos vanha säätöjärjestelmä korvataan uudella. Sähkösuodattimen modernisointeja tehdään jatkuvasti, mutta aina pelkkä sähköjärjestelmän uusiminen ei yksistään riitä.

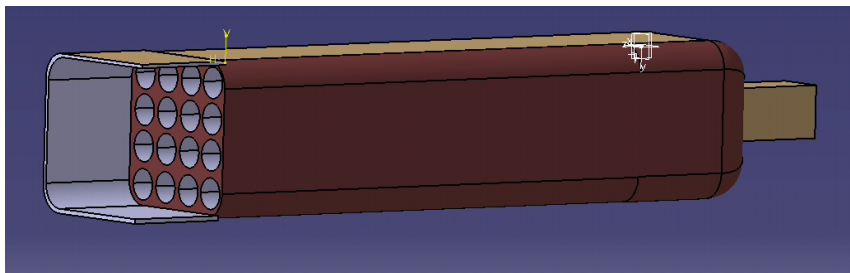
Sähkösuodattimen sähköiseen toimintaan ja suodattimen erotuskykyyn vaikuttaa erittäin paljon koronapurkaus. Koronapurkaus on juuri se seikka, jolla kaasussa olevat partikkelit varataan ja siten saadaan kiinnyttämään suodattimen keräyslevyille. Emissioelektrodeihin johdettu negatiivinen (>50 kV) tasajännite, jonka muoto on säätöjärjestelmällä tarkoin ohjattu, aikaansaa kaasussa koronapurkauksen emissioelektrodin ja keräyslevyn välille. Tällöin ilmassa olevat partikkelit saavat varauksen ja rupeavat liikkumaan kohti keräyslevyjä. [2, s. 62–64.]

Koronapurkaukseen liittyviä asioita tutkitaan jatkuvasti. Koronapurkauksen käyttäytymisen laskemiseksi on kehitetty matemaattisia malleja. Malleilla voidaan laskea sähkökenttä lanka-levyrakenteiselle sähkösuodattimelle. [2, s. 75.] Nykyisin voidaan mallintaa jopa yksittäisen hiukkasen varautuminen suodattimessa mallinnohjelmalla.

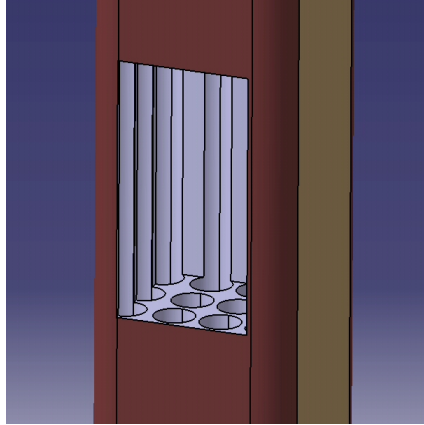
Jos partikkeleiden kokojakauma kasvaa selvästi mentäessä alle 1 μm :n, niin perinteinen sähkösuodatin ei enää ole optimialueella. Näiden todella pienten hiukkasten eroteluun on ennen käytetty märkiä sähkösuodattimia. Märkäsähkösuodatin kykenee erittäin korkeaan erottelukykyyyn ja sillä saadaan pienhiukkasista talteen jopa 99,9 %. Nykyisin pystytään sähkösuodattimen toimintaa säätämällä ja modernisoimalla saamaan talteen myös todella pieniäkin hiukkasia. Sähkösuodattimiin on sen pitkän kehityskaaren aikana kehitelty monenlaisia suodattimen erotuskykyä parantavia esivaraus- ja agglomeroitijärjestelmiä. Savukaasuun voidaan myös suihkuttaa nestettä, joka parantaa hiukkasten varautumiskykyä. Sähkösuodattimista pyritään tekemään mahdollisimman kompakteja ja kustannustehokkaita, ilman että niiden erotusaste alenisi. Näiden vaatimusten ja suodattimien raaka-aineiden hintojen noustessa suunnittelijoiden pitää pystyä kehittämään jatkuvasti tehokkaampia suodattimia.

2.4 Erityyppisiä suodattimia

Sähkösuodattimia on tehty monenlaisia, mutta suurimpana osa-alueena ovat perinteiset sähkösuodattimet. Sähkösuodattimia voi olla myös märkätyyppisiä pesurisuodattimia tai kovassa lämpötilassa, jopa yli 300 °C:ssa toimivia sähkösuodattimia. Märkäpesurisuodatin toimii hyvin kun pitää erottaa happosumua kaasuista, tai kun halutaan kerätä savukaasusta alle 1 μm :n hiukkasia. Kuvissa 1 ja 2 on esitelty putkimallinen sähkösuodatin. Se ei ole saavuttanut suurta suosiota ongelmallisen rakenteensa vuoksi. Putkisuodatinta on hankala huoltaa ja tarkastaa, koska putkien sisälle ei pääse.



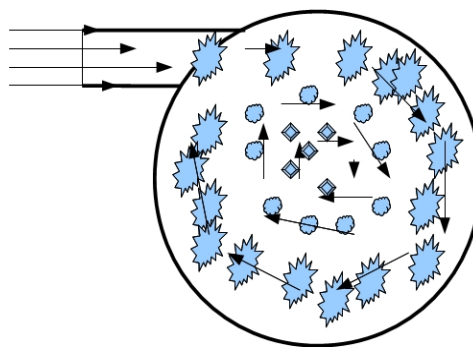
Kuva 1. Putkimallinen sähkösuodatin käännettynä vaakatasoon.



Kuva 2. Putkisuodattimen kenttä leikattuna.

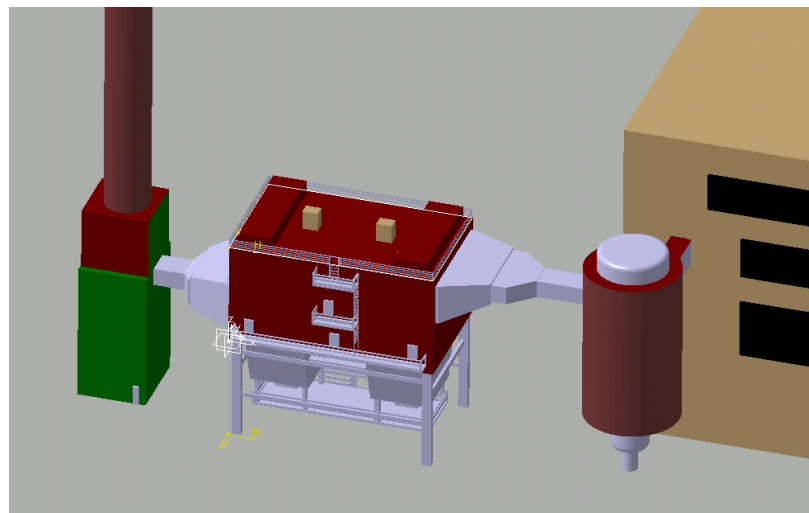
2.4.1 Syklonit

Syklonien tärkein erotustekijä on keskipakovoima, syklonit luokitellaan niiden rakenteesta riippuen joko vastavirta- tai läpivirtaussykloneihin. Lisäksi voidaan kytkeä useita sykloneita rinnan ja sarjaan, jolloin kyseessä on multisykloni. Syklonien koot voivat vaihdella muutamasta sentistä useisiin metreihin. Syklonit keräävät hyvin isompia partikkeleita, mutta ne eivät ole Theodore Louisin mukaan pienemmillä partikkeleilla yhtä tehokkaita kuin sähkösuodattimet. [4, s. 361.] Kuvassa 3 havainnollistetaan partikkelien erotustapahtumaa syklonissa. Pienet partikkelit pysyvät syklonin keskiosassa, ja suuremmat partikkelit siirtyvät reunoille, jossa ne erottuvat savukaasusta. Pieniin, alle $1\ \mu\text{m}$:n hiukkasiin vaikuttava inertiaalinen voima on sykloneissa niin pieni, että ne eivät erotu kaasuvirrasta.



Kuva 3. Partikkelijakauma ja kaasun virtaus syklonissa

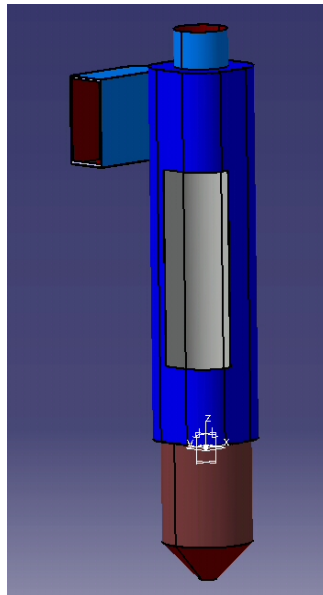
Käytetyin syklonirakenne on tangentiaaliseen kaasun virtaukseen perustuva vastavirtasykloni. Siinä syklonin varsinainen runko on pystysuorassa asennossa. Tangentiaalisen virtauksen lisäksi vastavirtasyklonissa voidaan käyttää aksiaalista kaasun sisääntuloa, jolloin pyörivä liike kaasulle saadaan aikaan ohjaussiivillä puhdistamattoman kaasun tuloyhteessä. Läpivirtausyklarissa, jota käytetään yleensä vaakasuorassa asennossa, kaasun poistoyhde on yleensä vastakkaisessa päässä kaasun tuloyhteeseen nähden. Syklonien sisäänvirtaus voi olla myös aksiaalinen tai laitteella toteutettu, peruseriaate on kaikissa sykloneissa sama. Joskus voidaan saavuttaa parempi erottelukyky kun ruiskutetaan vettä kaasun sekaan. [4, s. 362.] Kuvassa 4 käytetään sykklonia esierottimena, jossa suurimmat partikkelit kerätään ennen sähkösuodatinta, jolloin sähkösuodatin voidaan optimoida paremmin pienhiukkasille.



Kuva 4. Sykloni esisuodattimena ennen sähkösuodatinta

Syklonissa hiukkasten erotus perustuu tangentiaalisen virtauksen aiheuttamaan spiraalinmuotoiseen pyörteeseen. Keskipakovoiman vaikutuksesta hiukkaset lentävät syklonin seinämille ja lopulta putoavat keräyssäiliöön. Puhdistunut kaasuvirtaus puolestaan imeetään syklonin keskeltä, ylhäältä tai päältä. [4, s. 362–363.] Syklonien erotusaste paranee hiukkaskoon ja tiheyden kasvaessa, kaasun nopeuden ja syklonin rungon pituuden suurentuessa. Kaasun tekemät kierrokset syklonissa parantavat erotusastetta. Syklonien erotusaste heikkenee, jos syklonin halkaisijaa ulosmenoputken halkaisijaa, sekä kaasun sisääntuloyhteen pinta-alaa suurennetaan. Erotusasteen parantuessa yleensä painehäviö kasvaa, ja myös siksi syklonien suunnittelu on aina kompromissi, jossa pienimpien hiukkasten erotuskyky on alentunut. [4, s. 363–367.]

Syklonien etuina on niiden yksinkertainen rakenne, ja ne voidaan rakentaa monenlaisista materiaaleista, sillä niin metallit kuin keraamisetkin syklonit ovat kestäviä ja pitkäikäisiä. Sykloneissa on aina suurehko painehäviö ja huono pienten partikkelien erotuskyky. Pienissä multisykloneissa, jotka koostuvat nipusta pieniä sykloneita, on usein hyvä suurten partikkelien erotuskyky. Suuremmissa yksiköissä pienten hiukkasten erotuskyky on vaatimaton niiden olemattoman pienen massan vuoksi. Sykloneita voidaan myös asentaa sarjaan, jolloin ensimmäinen kerää suuret hiukkaset ja jälkimmäinen kerää pienempiä hiukkasia. Sarjakytkennässä erotusastetta saadaan nostettua huomattavasti, mutta painehäviöt kasvavat myös. [4, s. 363–365.] Kuvassa 5 esitellään sykloni, joka on keskeltä leikattu auki. Kuvasta näkee, että sykloni on käytännössä vain putki.



Kuva 5. Sykloni leikattuna.

2.4.2 Törmäyssuodattimet

Törmäyssuodattimissa hiukkasten erottaminen perustuu hiukkasten suodatukseen savukaasuvirrasta. Suodattimissa käytetään erilaisia materiaaleja ja konstruktioita, esimerkiksi kuitupatjoja, tiiviitä patjoja, kudottuja kankaita ja keraamisia materiaaleja. Voimalaitoksissa käytetään yleisimmin pussisuodattimia, joita kutsutaan letkusuodattimiksi. Letkusuodattimissa on yleensä letkuja monta rinnakkain. Letkusuodattimissa letkun halkaisijan kasvattaminen vaikuttaa suodatustehoon alentavasti, joten siksi käy-

tetään useita pienempiä letkuja, jotka on yhdistetty yhdeksi suuremmaksi kokonaisuudeksi. Suodatustehokkuudeksi saadaan Theodore Louisin mukaan heti yli 99 %. [4, s. 503–506.]

Törmäyssuodattimien käyttö on yleistynyt tapauksissa, joissa päästörajoitukset ovat erityisen tiukat, tai jos erotettavan pölyn ominaisuuksien vuoksi sähkösuodattimesta tulisi kallis. Uusien ohjausjärjestelmien ja paremman suunnittelun avulla sähkösuodattimiakin voidaan käyttää hankalissa tilanteissa hyvällä erotusasteella. Letkusuodattimissa likainen kaasu johdetaan suodattavan materiaalin lävitse, jolloin kiinteät partikkelit jäävät letkun sisäpinnalle. Perustapauksessa suodatinmateriaali on kudottua tai huopamaista kuitua. Pienet hiukkaset tarttuvat kuituun suoralla pidätyksellä, diffuusiolla, sähköstaattisella vetovoimalla ja gravitaatiolaskeutumisella. Käytön aikana suodattimen pinnalle muodostuu pölykerros, joka on puhdistettava tietyin väliajoin. [4, s. 505.] Puhdistaminen voidaan suorittaa Theodore Louisin kokoamilla tavoilla [4, s. 505]:

- Pulssisuihkusuodatus, jossa suodatin puhdistetaan paineilmaimpulssin avulla.
- Vastavirtapuhdistus, jossa suodatin huuhdellaan vastavirtaan suunnatun puhtaan virtauksen avulla. Tämä menetelmä soveltuu erityisesti lasikuitukankaille, koska ne eivät kestä ravistelua.
- Ravistuspuhdistus, jossa letkusuodatin ravistellaan automaattisesti tietyin väliajoin tai kun paine-ero kasvaa liian suureksi. Tämä on yleinen puhdistustapa varsinkin suuremmille letkusuodattimille.
- Äänipuhdistus, jossa suodatin puhdistetaan ultra- tai infraäänin avulla. Infraääni on tehokas, kun se yhdistetään toiseen menetelmään, esimerkiksi vastavirtapuhdistukseen. Ääninuohoimia on monenlaisia, ja suodattimen koon mukaan valitaan käyttötarkoitukseen sopiva nuohoin.

Letkusuodattimissa käytettävät materiaalit tulee valita siten, että ne kestävät kaasun lämpötilaa ja kemiallisia ominaisuuksia. Materiaaleina letkusuodattimille voidaan käyttää luonnonkuituja tai keinokuituja. Savukaasujen lämpötila määrää käytettävän materiaalin. Jos savukaasujen lämpötila on yli 250 °C, joudutaan käyttämään keraamisia tai lasikuituisia suodattimia. Keraamisilla letkusuodattimilla voidaan päästä jopa 99,99 % erotusasteeseen. [4, s. 509.]

3 Sähkösuodattimen rakenne

3.1 Levymäisen sähkösuodattimen rakenne

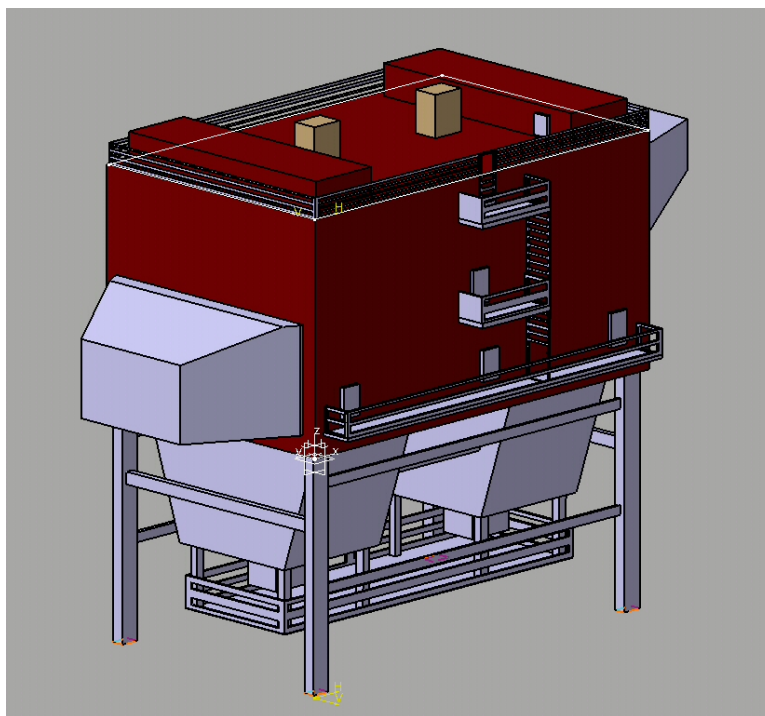
Suodattimen rakenteen määrittelee suodatettavan kaasun määrä, kaasun lämpötila, partikkelien sähköiset ominaisuudet, ja suodatettavien partikkelien kokojakauma. Suodattimet voivat olla myös yksi- tai kaksiasteisia. Yksiasteisessa suodattimessa hiukkaset varataan ja kerätään samalla alueella, samassa kentässä. Kaksiasteisissa suodattimissa varaus ja keräys suoritetaan peräkkäisissä asteissa. Savukaasusuodattimet ovat rakenteeltaan yleisesti yksiasteisia, jolloin suodattimesta saadaan rakennettua kompaktimpi ja kustannustehokkaampi kokonaisuus.

3.1.1 Erotuskammio

Erotuskammio on sähkösuodattimen perusta, ja se valmistetaan teräslevystä hitsaamalla. Kammion tulee olla kaasutiivis. Kammio voidaan myös valmistaa myös ruostumattomasta teräksestä, betonista, tiilestä tai vaikka tulenkestävästä teräksestä. Materiaalivalintaan vaikuttaa kaasun koostumus, kaasun korroosiovaikutus ja kaasujen lämpötila. Erotuskammio rakennetaan siten, ettei sen ulkopuolelle tule yleensä paljoa epätasaisuuksia ja sen eristys on siten helposti tehtävissä. Kaikki erotuskammion tukirakenteet sijaitsevat kammion sisällä. Kantavat rakenteet tehdään putkipalkeista ja lisäjäykisteet yleensä I- ja L- profiileista. Suodattimen seinämän paksuus vaihtelee myös prosessin mukaan ja on yleensä 4–10 mm:n paksuinen. Tutkittuani paljon eri teräslaatuja ja Rautaruukin suunnittelijan opasta terästuotteista valitsisin putkipalkiksi käytettäväksi S355 teräksen [5, s. 149]. Lujemmilla teräslaaduilla saavutetaan painonsäästöä tukirakenteissa.

Erotuskammion sisällä ovat sähkösuodattimen komponentit eli purkauselektrodit, keräyselectrodit, ravistuslaitteisto. Erotuskammiossa on ensimmäisen kentän etupuolella kaasunjakolevystö, joka koostuu joko reikälevystä tai vastaavanlaisesta virtausta tasaavasta verkostosta. Usein myös viimeisen kentän jälkeen on kaasunjakolevystö, joka varmistaa kaasujen tasaisen jakautumisen viimeisessä kentässä ja täten optimoi hyötysuhteen. Ainoastaan ravistinakseliä käyttömootorit ja suurjännite muuntajat sijait-

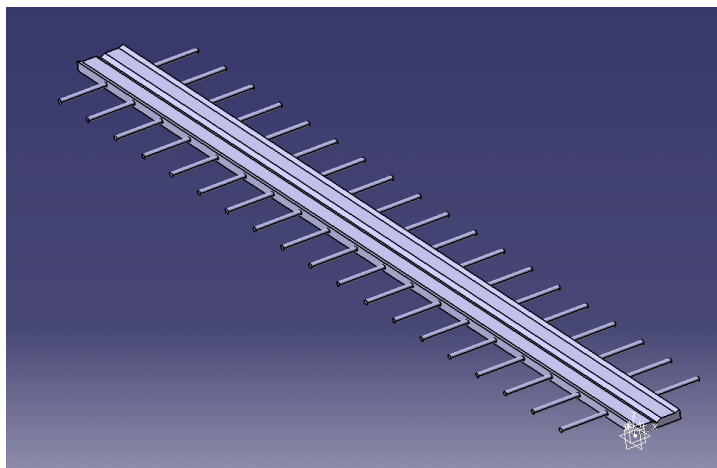
sevat erotuskammion ulkopuolella. Kuvassa 6 näemme valmiin levymallisen sähkösuodattimen; suodattimen katolla on kaksi muuntajaa, kaksi ravistuslaitteistotilaa.



Kuva 6. Levymallinen sähkösuodatin.

3.1.2 Purkauselektrodit

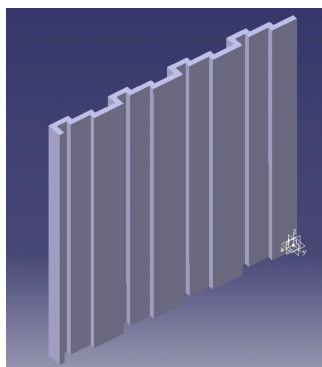
Sähkösuodattimen toiminnan edellytys on purkauselektrodi, joka toimii koronalähteenä ja varaa kaasussa olevat hiukkaset. Purkauselektrodit sijaitsevat keräyslevyjen keskellä, jonne ne kiinnitetään joustavasti kannatinpalkkeihin. Purkauselektrodeja on monenlaisia, mutta Suomessa yksi käytetyin on jousimallinen emissioelektrodi joka on helppo asentaa paikoilleen. Jousimallinen rakenne tosin on joskus epäedullinen jos emissioelektrodi menee poikki ajon aikana. Tällöin kenttä saattaa ajautua oikosulkuun ja emissioelektrodi pitää poistaa kentästä, jotta ajoa voidaan jatkaa. Purkauselektrodien kestävämmällä materiaalilla voidaan lisätä elektrodien kestoikää ja vähentää niiden rikoontumisesta aiheutuvia vikatiloja. Kuvassa 7 on emissioelektrodi, jossa emissioelektrodin muotoilulla pyritään saamaan mahdollisimman paljon pinta-alaa katettua suhteessa keräyslevyyn.



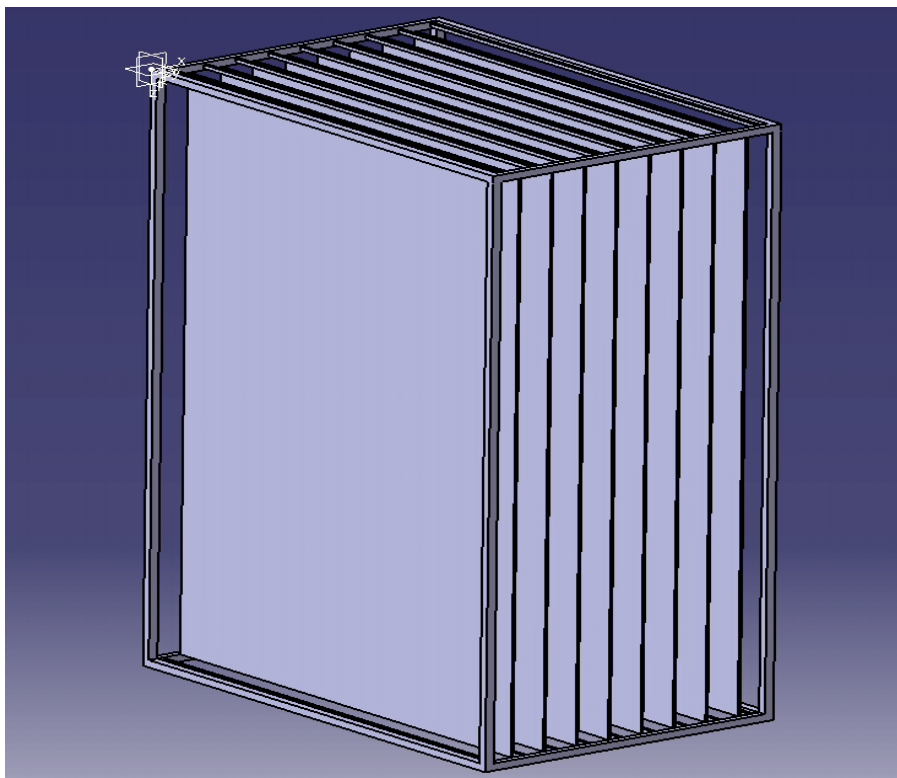
Kuva 7. Levymallinen emissioelektrodi.

3.1.3 Keräyselektrodit

Keräyselektrodit tai keräyslevyt ovat suodattimen kehikoihin asennettuja yksittäisiä, noin 50 cm leveitä teräslevyjä jotka yhdistettyinä toisiinsa muodostavat tarvittavan erotuspinta-alan. Vaatimukset keräyslevyille ovat selkeitä. Niissä ei saa olla teräviä kulmia läpilyöntien estämiseksi ja niiden tulee kestää jatkuvat ravistelut. Keräyselektrodit ovat usein profiloituja ja siten pöly pysyy niissä paremmin ja ne kestävät paremmin jäykkyytensä ansiosta. [3, s. 4–6.] Erilaisia profiloiteja näkee lähes kaikissa sähkösuodatinta käsittelevissä kirjoissa. Rakenne on yleensä myös sellainen, ettei asennusvaiheessa hitsausta tarvita. Jokaista purkauselektrodia kohden on yksi erotuslevy, erotuslevyjen molemmat puolet käytetään hyväksi [2, s. 274–275]. Kuvassa 8 näkyy hyvin erotuslevyn muotoiltu profiili, ja kuvassa 9 on keräyslevykehikko ja keräyslevyt.



Kuva 8. Erotuslevyprofiili



Kuva 9. Keräyslevyt ja keräyslevykehikko.

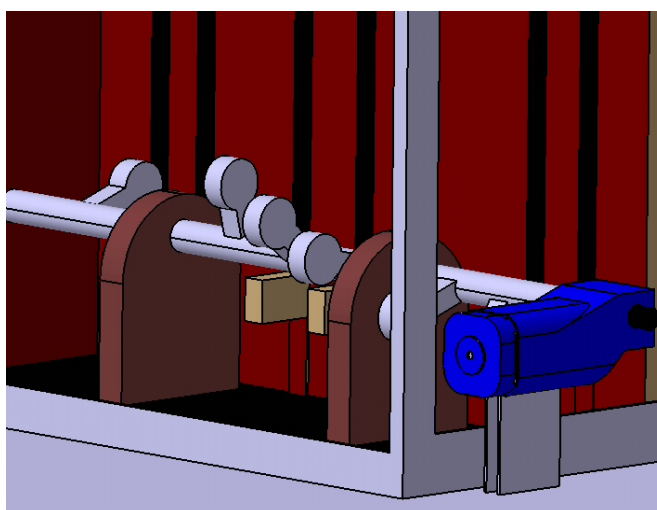
3.1.4 Ravistuslaitteisto

Jotta sähkösuodatin pysyisi hyvällä toiminnallisella alueella, pitää purkaus- ja keräys-elektrodeja ravistella määrätyn väliajoin. Jos pölyn annettaisiin kerääntyä levyille ilman ravistusta, ei kestäisi kauaakaan, kun koronapurkaus estyisi ja vastakorona ilmiö pölyttäisi jo kerättyä pölyä irti emissiolangasta ja levyistä. [4, s. 401–403.] Tällainen tilanne jossa ravistuslaitteisto ei toimi tai tuhkakuljetin ei toimi saattaa aiheuttaa sen, että kentät ajautuvat oikosulkuun. Ravistusjärjestys mietitään tarkoin, jotta vältetään turhilta ravistuksilta, jotka huonontavat suodattimen puhdistustehoja.

Ravistuksessa käytetään mekaanisia, sähkömagneettisia tärstimä tai paineilmatärstimä. Mekaaniset ravistimet ovat kaikkein yleisimpiä. Sekä purkaus että keräys-elektrodeilla on omat ravistuslaitteensa, ja ne on jaksotettu siten, että ravistushäviöt ovat mahdollisimman pieniä. Purkauselektrodien ravistusvasarat sijaitsevat yleensä lankojen puolivälissä eli kaksikerroksisen elektrodijärjestelmän puolivälissä. Ravistuslaitteistoja pyörittää perinteinen sähkömoottori, joka sijaitsee suodattimen ulkopuolella, ja se on eristetty korkeajännitteestä. Lankaravistuksen käyttövoima välitetään yleensä katolla

olevalta moottorilta pitkillä akseleilla ja tappipyörillä varsinaiselle ravistinakselille. [2, s. 280–281.] Levyravistuksen käyttömoottori on yleensä yhteydessä ravistinakseliin eristimen välityksellä, ja sen huolto on helpompaa kuin lankaravistuksen. Myös uudempia tapoja suorittaa lankaravistus on käytössä, ja niiden akselirakenteet ovat helpompia huoltaa. Joissain tapauksissa asennetaan ravistus myös verholevylle; tällöin pöly on jo erittäin hankalaa tai asiakas vaatii myös verhoravistuksen.

Ravistus asennetaan siis kaikille osille joihin pölyä saattaa kertyä. Näin tehdään siksi, että suodattimeen väärään paikkaan kerääntyvä pöly aiheuttaa virtausjakaumamuutoksia ja turbulენტtista virtausta. Suodattimen suunnittelussa onkin hyvä ottaa huomioon mahdolliset pölykerääjät ja suunnitella rakenne sellaiseksi että suodatin itsessään estäisi pölykerrostumien syntymisen. Aina tämä ei ole 100-prosenttisesti mahdollista, ja silloin tuleekin varmistua siitä, ettei pölyä pääse kerääntymään liikaa, jolloin suodattimen puhdistuskyky saattaa alentua. Ravistuksen tarve vaihtelee puhdistettavan kaasun ominaisuuksien mukaan. Ennen ravistusajat määriteltiin kokemuksella läpilyöntien tiheyden, ja pölykerroksen paksuuden mukaan. Nykyisin ravistusvasaroiden ohjauksen hoitaa usein suodattimen säätöjärjestelmä, joka laskee kaikkien arvojen perusteella suodattimelle parhaimman mahdollisen ravistustiheyden. Kentän ravistuslaitteistoa sen akselia suoraan käyttävä sähkömoottori näkyvät kuvassa 10 seuraavalla sivulla. Mitä vähemmän tapahtuu turhaa ravistelua, sitä parempi on suodattimen hyötysuhde.

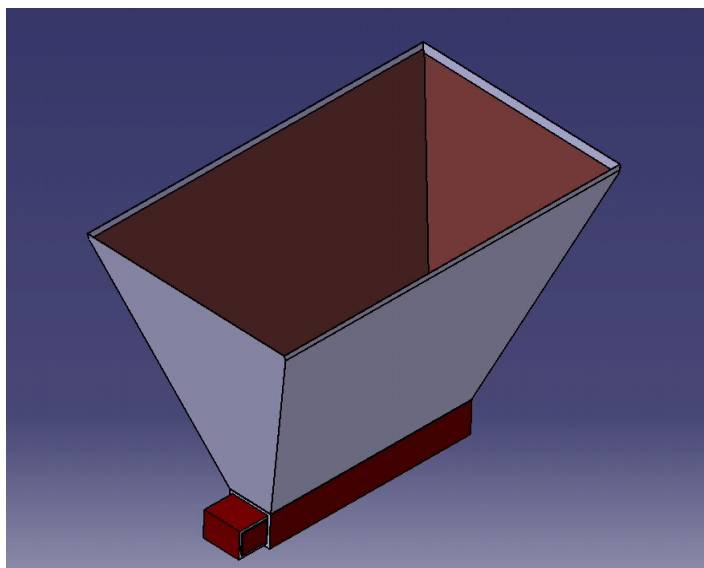


Kuva 10. Kentän ravistuslaitteisto ja sitä käyttävä sähkömoottori.

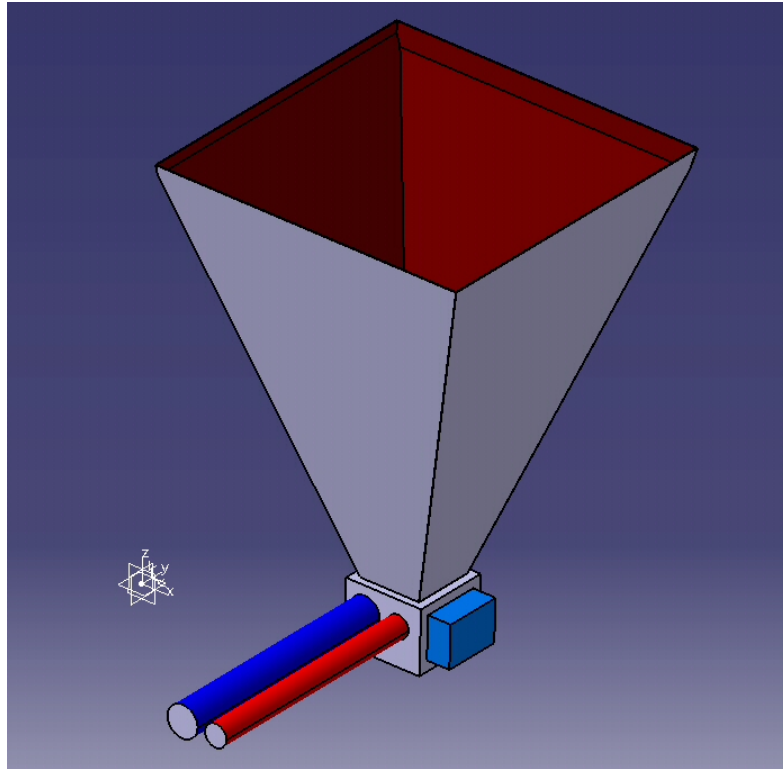
3.1.5 Tuhkan keruu ja kuljetus

Kun hiukkaset on kerätty levyille ja ravistetaan levyiltä pois, tuhka kerätään suodattimen alla sijaitseviin pohjasuppiloihin, joita on suodattimen jokaista kenttää kohden yleensä yksi. Jos kenttä on todella pitkä, niin pohjasuppiloita voi olla kaksikin kappaletta. Pohjasuppilo on yleensä pyramidin mallinen suppilo, ja se on eristetty koko matkaltaan. Jos tuhkan ominaisuudet ovat sellaiset, että se paakkuuntuu, tai sitä ei voida muuten kerätä normaalilla pohjasuppilolla, käytetään myös tasapohjaisia kerääjiä. Suodattimen pohjasuppilot voidaan tarvittaessa varustaa ravistimilla. Suppiloissa on eristyksen lisäksi usein myös lämmitys, joka estää kondenssin aiheuttaman korroosion ja vähentää tuhkan paakkuuntumista.

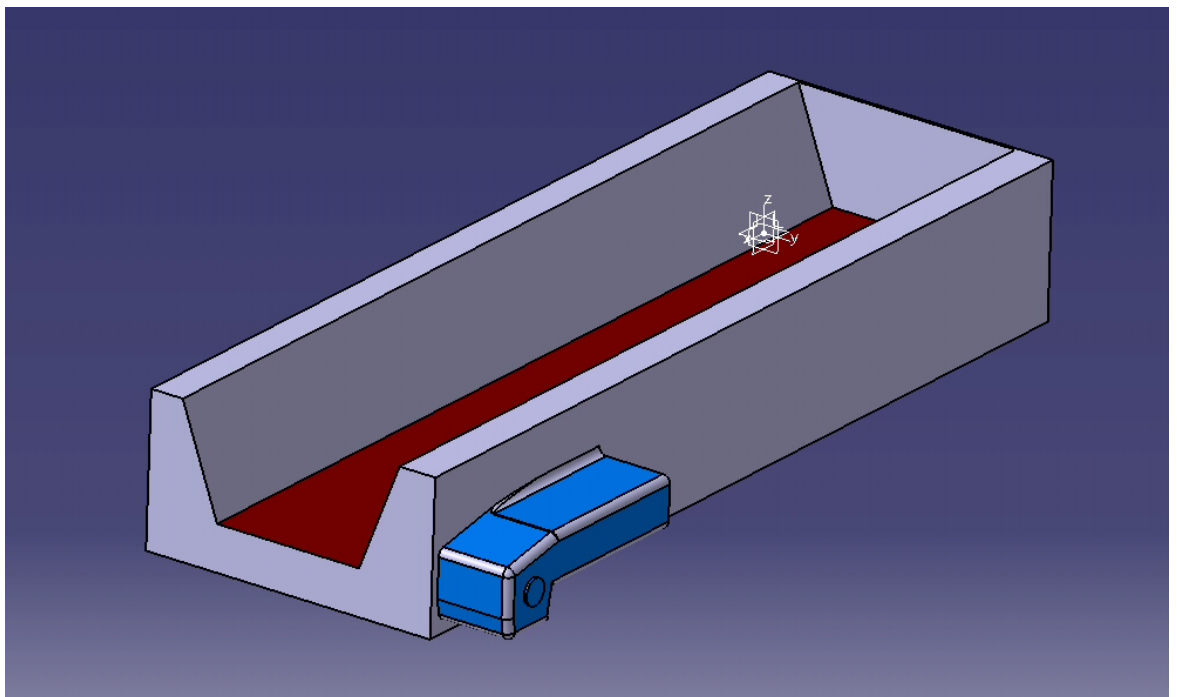
Suppilosta tuhka ajetaan pois joko kuljettimella tai pneumaattisella kuljettimella. Pneumaattinen lähetin asettaa kovia vaatimuksia lähetyspotkistolle. Putkiston kulma-kohtia on hyvä vahvistaa, koska tuhka on kuin hiekkapuhallusta putken sisällä. Jos käytetään pneumaattisia lähettämiä, valitsisin tällaiseen tarkoitukseen erikoisteräksen Ruukin Raex 400– putken, jonka kulutuskestävyys kolminkertainen normaaliin S355:een verrattuna [6]. Leijukattiloista lähtee myös leijupetihiekkaa tuhkan mukana suodattimeen, jolloin tuhkan koostumus on erittäin kuluttavaa. Erilaisia suppilotyyppejä on esitelty seuraavissa kuvissa 11–13: ensin laahamallisella kuljettimella varustettu pohjasuppilo kuvassa 11, sitten paineilmalähettimellä varustettu pohjasuppilo kuvassa 12 ja lopuksi laaha kuvassa 13.



Kuva 11. Sähkösuodattimen pohjasuppilo, jossa laahamallinen kuljetin.



Kuva 12. Sähkösuodattimen pohjasuppilo, jossa paineilmalähetin.



Kuva 13. Sähkösuodattimen pohjasuppilon laahakuljetin.

3.1.6 Sähköjärjestelmä

Sähkösuodattimen toiminnan kannalta tärkein sähkölaite on korkeajännitemuuntaja tasasuuntaajineen ja ohjausjärjestelmineen. Koska sähkösuodatin vaatii toimiakseen korkean miinusmerkkisen tasajännitteen, yleensä n. 25–110 kV, sen muuntajat ovat yleensä olleet melko kookkaita. Nykytekniikalla on muuntajien kokoa saatu pienennettyä. Muuntajan jälkeen tasasuuntaajissa jännite tasataan ja saatua jännitettä ohjataan säätöjärjestelmällä. Säätöjärjestelmä pyrkii nostamaan emissioelektronien jännitteen mahdollisimman korkeaksi, ilman että emissioelektronissa tapahtuu läpilyöntejä. Pyritään siis mahdollisimman korkeaan läpilyöntitasoon. Nykyisin uusilla säätöjärjestelmillä saavutetaan kustannussäästöjä ja saadaan parannettua suodattimen erotuskykyä. Sähkösuodattimen säätöjärjestelmiä on monella valmistajalla, ja niissä on paljon parametreja, joilla voidaan säätää suodattimen toimintaa. Pelkästään niihin perehtyminen vaatisi toisen insinööriyön, joten tässä työssä niitä ei käsitellä.

Kenttien lukumäärä määrittelee muuntajien tarpeen, mutta myös toisiovirran suuruus vaikuttaa muuntajien määrään. Erotuspinta-alan kasvaessa täytyy muuntaja/tasasuuntaajien lukumäärää kasvattaa, koska virtatiheyden (mA/m^2) erotuspinoilla on pysyttävä riittävänä. [3, s. 3–5; 3, s. 3–15.] Muuntajat sijoitetaan yleisesti suodattimen katolle, millä minimoidaan korkeajännitteisten kaapelien pituus. Muuntaja-tasasuuntaajien hyötysuhteesta riippuu paljolti sähkösuodattimen energiatehokkuus.

3.1.7 Esivarauslaitteisto

Sähkösuodattimen poistotehokkuus alle $1 \mu\text{m}$:n hiukkasten puhdistamisessa on vain n. 85 %. Pienhiukkasten poistamisen ongelmat tulevat esiin erityisesti jätteen- ja sekapoltoista, jossa raskasmetallit rikastuvat polttoprosessin seurauksena juuri alle $1 \mu\text{m}$:n hiukkasiin. Olennaista suodatustehossa pienhiukkasille on niiden tehokkaaseen varaukseen tarvittava hiukkasten viipymäaika suuren varaustiheyden alueella. Nämä vaatimukset aiheuttavat ristiriidan sähkösuodattimen suurten hiukkasten ($10\text{--}100 \mu\text{m}$) suodatustehon vaatimuksen kanssa, koska tämä edellyttää suuria kentän voimakkuuksia. Suuret kentänvoimakkuudet yhdessä suuren varaustiheyden kanssa johtavat suuriin sähkötehoihin. Edelleen voidaan todeta, että suuri viipymäajan vaatimus johtaa suu-

reen laitekokoon. Kaikki nämä seikat vaikuttavat dramaattisesti suodattimen lopulliseen hintaan. [7, s. 417– 425.]

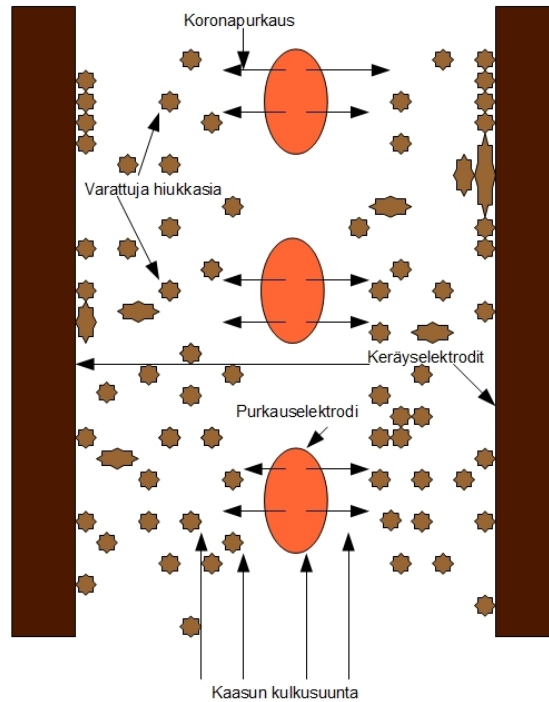
Pienhiukkasten varautumisen tehostamista voidaan periaatteessa nostaa käyttämällä erilaisia esivarausteistoja. Niissä hiukkaset pyritään varaamaan koronapurkauksen avulla hiukkasia keräämättä ennen niiden syöttämistä perinteiseen sähkösuodattimeen. Menetelmä muistuttaa kaksivaiheista sähkösuodatusta, jossa hiukkasten varaaminen ja suodattaminen on erotettu toisistaan. Esivaraajat voidaan paremmin suunnitella nimenomaan pienten hiukkasten tehokkaaseen varaamiseen kuin yksivaiheiset sähkösuodattimet. Esivarausteistoja on käytetty lähinnä vanhojen sähkösuodattimien erotuskyvyn nostamiseen. Uusiin suodattimiin niitä ei yleensä ole tarpeen asentaa, koska ne on alun perin suunniteltu toimimaan paremmin myös pienhiukkasilla.

4 Sähkösuodattimen toimintaperiaate

4.1 Koronapurkaukset

Sähkösuodattimien toiminta perustuu ionien muodostamiseen ja ioneilla varataan hiukkaset. Nykyisissä suodattimissa tehdään ionisoituminen negatiivisen koronapurkauksen avulla. Koronapurkaus on stabiili itsensä ylläpitävä sähköpurkaus purkauselektrodin ja keräyselektrodin välillä. Koronapurkaus on mahdollinen epähomogeenisessä sähkökentässä; tällainen on sähkösuodattimessa purkaus- ja keräyselektrodin välillä. [4, s. 402–403.]

Lähellä purkauselektrodia sähkökenttä ylittää kaasun sähköisen kestävyuden ja kaasu ionisoituu. Kaasussa olevat vapaat elektronit saavat tällöin suuren kineettisen energian. Juuri kineettisen energian avulla elektronit pystyvät irrottamaan elektroneja neutraaleista kaasumolekyyleistä. Näin neutraalit kaasumolekyylit ionisoituvat. Sähkökentän vaikutus alkaa kiihdyttää myös näitä uusia elektroneja. Uudet elektronit ionisoivat edelleen uusia kaasumolekyylejä. Aivan langan lähialueella syntyy varauksenkuljettajia. Tällöin alkaa elektrodien välisellä sähkökentällä kulkea sähkövirta. Jännitteen kasvaessa myös virta kasvaa [3, s. 1–3; 3, s. 1–4]. Hiukkasen varautumistapahtuma sähkösuodattimessa on esitetty seuraavassa kuvassa, kuva 14 Hiukkasen varautuminen:



Kuva 14. Hiukkasen varautuminen

4.1.1 Positiivinen korona

Korona-purkaus syntyy kahden eri kaarevuussäteisen elektrodin välille. Positiivisessa koronassa purkauselektrodi on positiivisessa jännitteessä ja levy on maadoitettu nollatasoon. Lankaa kohti kulkevat elektronit aiheuttavat langan lähellä elektronivyöryjä. Tällöin syntyy elektroneja ja positiivisia ioneja. Elektronit kerääntyvät langalle ja elektronien välillä on positiivisten ionien aiheuttama tilavaraus. Tilavaraus toimii virrankuljettimena. Heikkenevässä sähkökentässä ionit liikkuvat ja synnyttävät vähän ionisoivia törmäyksiä. Ionit saavat kentästä pienen kineettisen energian. Katodiin osuessaan ionit irrottavat siitä vähän elektroneja. Positiiviset ionit kuljettavat suurimman osan koronapurkauksen ulkopuolella olevan tilan sähkövirrasta. [4, s. 400–403.]

4.1.2 Negatiivinen korona

Negatiivisen koronan periaate poikkeaa positiivisesta koronasta siten, että purkauselektroni on korkeassa negatiivisessa jännitteessä. Negatiivisella koronalla saavutetaan

korkeampi jännite kuin vastaavalla positiivisella koronalla. Langan lähellä olevat vapaat elektronit liikkuvat langasta pois päin. Samalla ne tuottavat positiivisia ioneja ja vapaita elektroneja. Positiiviset ionit lähtevät kohti purkauslankaa ja vapaat elektronit kohti keräyslevyä langasta pois päin. Törmätessään purkuselektrodiin ionit synnyttävät jälleen uusia elektroneja. Uudet elektronit ovat purkauksen jatkumisen kannalta välttämättömiä. [4, s. 400–402.]

Keräyselektrodia kohti kulkevat negatiiviset elektronit kiinnittyvät neutraaleihin kaasumolekyyleihin. Niiden kiinnittyessään kaasumolekyylisiin syntyy negatiivisia ioneja. Negatiiviset ionit kulkevat kohti keräyselektrodia, kuitenkin hitaammin kuin vapaat elektronit. Tällöin on elektrodien välissä negatiivisten ionien muodostama tilavaraus. Juuri tilavaraus toimii tässäkin tapauksessa virrankuljettimena. Negatiivinen koronapurkaus on yleisin käytössä oleva purkaustyyppi, koska sillä saadaan hyötysuhdetta kasvatettua verrattuna positiiviseen koronapurkaukseen. [4, s. 402–404.]

Pieneen hiukkaseen ($<1 \mu\text{m}$) absorboituu hyvin usein kymmeniä ioneja. Absorboituminen pysähtyy, kun hiukkasen kokonaisvaraus saavuttaa asteen, jolloin ionien tarttuminen hiukkasen pinnalle estyy. Suuremmille hiukkasille ($>10 \mu\text{m}$) voi vastaava määrä olla kymmeniä tuhansia hiukkasia. Tästä johtuen suuremmilla hiukkasilla on paljon suuremmat sähköiset voimat. Kaasussa on välttämättä oltava elektronegatiivisia molekyylejä negatiivisen koronan kannalta, koska vain niihin voivat elektronit kiinnittyä. Näin syntyneiden negatiivisten ionien pieni liikkuvuus tasaa koronapurkausta ja pitää aktiivisen purkausalueen aivan langan lähellä. Varauksen kuljettajina olisivat muuten vapaat elektronit, ellei elektronien kiinnittymistä tapahtuisi. Elektronien sähköinen liikkuvuus on kuitenkin liian suuri. Silloin ei saataisi stabiilia koronapurkausta vaan ainoastaan läpilyöntejä. [4, s. 400–404.]

4.2 Hiukkasten varautuminen

Hiukkasen täytyy saada sähkövaraus, sillä ainoastaan tällöin sähkökenttä pystyy vaikuttamaan siihen. Hiukkaseen vaikuttava voima on suoraan verrannollinen hiukkasen varaukseen ja sähkökenttään [4, s. 400].

Hiukkasen varautumisaluetta on purkauselektrodin ulkolaidasta keräyselektrodille. Hiukkaset varautuvat ionien tai elektronien iskeytyessä niiden pintaan. Lähellä hiukkasen pintaa oleva ioni pysyy tiukasti kiinni hiukkasessa. Tämä johtuu nk. peilivarauksesta. Peilivarauksella tarkoitetaan varauksen hiukkaseen aiheuttamaa varauskentän muutosta. Peilivaraus syntyy ionin lähestyessä johtavaa pintaa. Muutoksen suuruus on sama kuin lähestyvä varaus, mutta vastakkaismerkkinen. Muutos sijaitsee yhtä paljon pinnan alapuolella kuin varaus on sen yläpuolella. Pinnan varautuminen estyy siihen kertyneiden ionien muodostaessa suuren varauksen. Suuri vastus pyrkii estämään lisäionien kiinnittymisen. [4, s. 401.]

Hiukkasten varautuminen tapahtuu kahdella tavalla, kenttä- tai diffuusiovarautumisella. Kenttävarautumisessa koronapurkauksessa syntyneet ionit kulkeutuvat sähkökentän avulla hiukkasen pinnalle. Diffuusiovarautumisessa koronapurkauksen ionit kulkeutuvat hiukkasten luo kineettisen energian avulla. Molemmat varautumismuodot vaikuttavat kaikissa hiukkasten kokoluokissa. Diffuusiovarautuminen on merkittävämpi alle 0,3 μm :in hiukkasille ja yli 1–2 μm :in hiukkasille kenttävarautuminen on dominoivampi. Näiden kokoluokkien välillä vallitsevat Theodore Louisin mukaan [4, s. 401] molemmat varautumismuodot ja eritoten 0,3–1 μm :in hiukkasille tämä päteeikin hyvin. Varautumismekanismit tunnetaan teoreettisesti hyvin, ja myös muita partikkelin varausmekanismeja on olemassa.

4.2.1 Kenttävarautuminen

Kenttävarautumista tarkasteltaessa tehdään yleensä seuraavat viisi oletusta [3, s. 2-6; 3, s. 2-9]:

1. Hiukkaset ovat pyöreitä
2. Yhden hiukkasen kenttä ei vaikuta kenttään muiden hiukkasten lähellä.
3. Hiukkanen ja ioni ovat vakio sähkökentässä
4. Hiukkasten välinen etäisyys on suuri verrattuna hiukkasten kokoon
5. Ionien keskimääräinen vapaa matka on lyhyt verrattuna hiukkasten kokoon

Kenttävarautuminen on samanmerkkisten ionien aiheuttamaa varautumista hiukkasten ja ionien ollessa voimakkaassa sähkökentässä. Ioni kulkee sähkökentässä kenttäviivoja pitkin. Nopeassa liikkeessä se voi törmätä hiukkasen pintaan säännöllisesti. Varautumaton hiukkanen joutuessaan homogeeniseen sähkökenttään vääristää kenttää. Sähkökentän vääristymä riippuu hiukkasen dielektrisyysvakiosta ja varauksesta. Suurempi dielektrisyysvakio aiheuttaa aina suuremman vääristymän sähkökentässä. Ionit törmäävät hiukkaseen sähkökentän ja hiukkasen leikkauspisteessä. Kaikki ionit törmäävät hiukkasen pintaan ja luovuttavat varauksensa hiukkaselle. Tällöin ovat ionit vaeltaneet hiukkaseen osuvan sähkökentän aluetta pitkin. Varautumisnopeus heikkenee hiukkasen saadessa jonkin verran varausta. Tällöin alkaa hiukkanen hylkiä sitä kohti tulevia ioneja. Kohti tulevilla ioneilla on sama varaus kuin hiukkasillakin. [2, s. 105–112.]

Lopulta hiukkasen varaus saavuttaa tietyn arvon. Tällöin sähkökenttä ei enää osu hiukkaseen. Kun hiukkasen varaus on saavuttanut suurimman arvonsa, sitä kutsutaan saturaatiovaraukseksi.

Johtavan hiukkasen joutuessa sähkökenttään vaikuttaa sen läheisyydessä sähkökenttä E_p . Sähkökenttä muodostuu kahdesta osasta. (1) Kentän itsensä johtavaan kappaleeseen aiheuttama sähkökentästä E_1 . (2) Hiukkasen varauksen aiheuttamasta sähkökentästä E_2 . E_1 on positiivinen ja E_2 negatiivinen [2, s. 105–112].

$$E_p = E_1 + E_2 = 3E_c \cos\theta - (q / 4 \pi \epsilon_0 r^2) \quad (1)$$

E_p = sähkökenttä hiukkasen lähellä

E_1 = kentän aiheuttama sähkökenttä

E_2 = hiukkasen aiheuttama sähkökenttä

E_c = tasainen sähkökenttä

θ = tarkastuspisteen ja sähkökentän välinen kulma

q = hiukkasen varaus

ϵ_0 = vapaa tilavuus permiittivisyys

r = hiukkasen säde

Hiukkasen varautuminen jatkuu, kunnes sen varaus saavuttaa saturaatio varauksen q . Kylläisessä varaustilanteessa E on yhtä suuri kuin E_2 ja $\cos\theta = 1$ (hiukkasen varauksen

kasvaessa θ lähestyy nollaa). Tällöin saturaatio varaukseksi saadaan seuraava määrittely. [3, s. 2-3; 3, s. 2-5.]

$$q = 3 n \epsilon_0 d^2 E \quad (2)$$

q = saturaatio varaus

ϵ_0 = vapaa tilavuus permittivisyys

d = hiukkasen halkaisija

E = sähkökenttä

Kaikki hiukkaset eivät saavuta saturaatiovarausta, vaan varautuvat sähkökentän vaikutuksesta vain osittain. Diffuusiovaraukselle pätee tällöin yksinkertaistettu kaava [3, s. 2-3; 3, s. 2-4.]:

$$Q = \frac{1}{2} d K T / e^2 \quad (3)$$

Q = diffuusiovaraus

d = hiukkasen halkaisija

K = Boltzmannin vakio

T = absoluuttinen lämpötila

e = elektroninen varaus

Nykyisin myös pienten hiukkasten varautuminen voidaan mallintaa varsin hyvällä tarkkuudella kun mallinnusohjelmat ja tietokoneiden laskentateho on kasvanut räjähdysmäisesti.

4.2.2 Diffuusiovarautuminen

Kaasussa olevat ionit ovat samanlaisessa lämpöliikkeessä kuin kaasumolekyylit. Yleensä kaasumolekyylit noudattavat kineettisen kaasuteorian lakeja. Diffuusiovarautuminen johtuu kineettisestä lämpöenergiasta, ja ionien lämpöliike aiheuttaa niiden jatkuvan diffuusioliikkeen kaasun läpi. Tällöin ionit voivat törmätä kaasussa oleviin kiinteisiin ja nestemäisiin aineisiin. Törmättyään hiukkaseen ioni kiinnittyy siihen peilivarauksen avulla. Lämpöenergia voittaa jo pinnalla olevien ionien aiheuttaman vastustavan voiman. Diffuusiovaraus on riippumaton sähkökentän voimakkuudesta, mutta sähkökentällä voidaan tehostaa hiukkasen varautumista. [4, s. 409.]

4.2.3 Hiukkasten kulkeutuminen

Negatiivisesti varautuneet hiukkaset liikkuvat sähkökenttää pitkin kohti keräyselektrodeja. Hiukkasen liikkumista sähkökentässä kutsutaan kulkeutumisnopeudeksi. Hiukkasen liikettä vastustava voima on sähköisten, kaasun viskositeetin ja hiukkasten inertiaalisten voimien yhteisvaikutus joka voidaan kuvata seuraavalla kaavalla [3, s. 2-6–2-7]:

$$W = (QE)/(3 \pi d \eta) [1 - \exp \{- 3 \pi d \eta t \} / m] \quad (4)$$

W = hiukkasen kulkeutumisnopeus

Qv = hiukkasen varaus

E = sähkökenttä

d = hiukkasen ympärysmitta

μ = viskositeetti

t = aika

m = hiukkasen massa

QE = hiukkaseen vaikuttava sähköinen voima

$3 \pi d \eta$ = jarruttava viskoosinen voima

Edellisestä lausekkeesta voidaan johtaa kulkeutumisnopeudelle kaava [3, s. 2-7].

$$W = (\epsilon_0 d E^2)/\eta \quad (5)$$

Pienillä hiukkasilla on kulkeutumisnopeus minimissään kun sähkökenttä pysyy vakiona. Pienempien hiukkasten nopeus on suurempi. Tämä johtuu Cunninhamin kertoimen arvosta. Kertoimen arvo kasvaa nopeasti hiukkaskoon pienentyessä. Suurempien hiukkasten nopeus kasvaa suoraan verrannollisesti hiukkasten säteeseen nähden. Sähkövaraus kasvaa hiukkasilla myös suoraan verrannollisesti säteeseen. [3, s. 2-7.]

4.2.4 Sähkösuodattimen erotusasteen parantaminen

Sähkösuodattimen etuina voidaan pitää hyvää erotusastetta myös pienille hiukkasille sekä pientä painehäviötä. Lisäksi sillä voidaan puhdistaa suuria savukaasumääriä ja hyvin toimivalla suodattimella päästään jopa yli 99,9 %:n erotusasteeseen. Hiukkaskoon pienentyessä 0,1–1 μm :iin hiukkasista voi päästä jopa 10 % läpi suodattimesta. Syy siihen on se, että hiukkasten sähköinen liikkuvuus saavuttaa tuolloin minimiarvon.

Hiukkaskokoalueella 0,1–1 µm vaikuttavat niin kenttä– kuin diffuusiovarautuminen. Sähkösuodattimen hyötysuhdetta pystytään parantamaan pulssittamalla jännitteensyöttöä. Tällöin emissioelektrodille syötetään lyhytaikaisia ja korkeajännitteisiä pulsseja, joiden huippuarvo on huomattavasti paljon suurempi kuin normaalisti käytetty jännite. [3, s. 8-2.] Käyttämällä pulssitusta saadaan seuraavia etuja [3, s. 8-2]:

- vastakoronan syntyminen vähenee
- läpilyöntitaso nousee
- hiukkasten parempi varautuminen
- sähkösuodattimen tehontarve laskee

Nykyaikaisissa sähkösuodattimen jännitteensäätöjärjestelmässä on tarkat ohjelmat ja parametrit, joilla voidaan säätää jännitettä läpilyöntien, polttokuormituksen sekä hiukkas- ja savukaasuolosuhteiden muutosten mukaan. Säätöjärjestelmän tarkoituksena on säätää sähkösuodatin toimimaan hyvin lähellä maksimivirtaa kohtuullisella läpilyöntialueella.

Säätöjärjestelmiä uusittiin paljon 1990-luvulla, ja suodattimien toimintaa on pystytty helpottamaan käyttämällä uusia säätöjärjestelmiä, joihin saa ohjelmoitua optimointiparametreja. Suodattimessa koronapurkauksen synnyttämiseen vaadittavan tasajännitteen pulssittamisella on havaittu olevan hiukkasia paremmin varaava vaikutus. Tällä pulssitustekniikalla pystytään ajallisesti säätelemään jännitettä ja siten jännitteen huippuarvoja voidaan nostaa hetkeksi korkeammaksi. Tällöin saadaan suodattimen hyötysuhdetta nostettua ja pienempiä hiukkasia varattua, kuin vanhalla säätöjärjestelmällä jossa ei ole mahdollista muuttaa pulssin muotoa. Uusilla säätöjärjestelmillä on voitu nostaa käyttöjännitettä kymmenillä kilovolteilla läpilyöntien määrän kasvamatta. Vesihöyryllä on havaittu myös olevan hiukkasia sitova vaikutus. Kun vesihöyryä ruiskutetaan savukaasuun, hiukkaset muodostavat helpommin keskenään suurempia kokonaisuuksia. Käytettävän polttoaineen sisältämä kosteus vaikuttaa aina myös suodattimen toimintaan ja tulee ottaa huomioon suodattimia suunniteltaessa.

4.3 Sähkösuodattimen tehokkuus

Puhdistusasteesta ilmenee sähkösuodattimen kyky erottaa hiukkasia kaasuvirrasta. Teoreettinen pölynerotusaste lasketaan usein Deutch–Andersonin yhtälöstä. Tämä yh-

tälö ei kuitenkaan huomioi suodattimissa vallitsevaa tyypillistä tilannetta. Sähkösuodattimissa erotusolosuhteet poikkeavat merkittävästi teoreettisesta olosuhteesta. Laskennallisen mallin hienosäätöön käytetään Matts–Ohnfeldtin kerrointa. Kertoimen arvo on selvitetty kokeellisten tutkimustulosten avulla, mutta se voi antaa vääristyneen käsityksen suodattimen toiminnasta tietyissä olosuhteissa. Seuraavassa yhtälö, jolla voidaan laskea sähkösuodattimen erotusaste. [4, s. 408.]

$$\eta = 1 - e^{-(wA/Q)m} \quad (6)$$

η = Sähkösuodattimen erotusaste

w = hiukkasten keskimääräinen nopeus savukaasun poikki elektrodille

A = sähkösuodattimen tehollinen erotuspinta-ala

\dot{V} = savukaasujen tilavuusvirtaus

m = Matts–Ohnfeldt:n kerroin, vaihtelee 0,4–0,7 välillä.

e = luonnollisen logaritmin kantaluku

4.3.1 Sähkösuodattimen erotuspinta-ala

Sähkösuodattimen erotuspinta-ala on se tehollinen pinta-ala joka tulee kun lasketaan yhteen kaikkien erotuslevyjen pinta-alat, tämä voi olla suuressa suodattimessa esimerkiksi 200 000 neliometriä. Tehollisen erotuspinta-alan kokonaisvaltainen käyttö vaatii sen että suodatin on mitoitettu ja säädetty oikealle prosessille ja että kaasujen virtaus on tasaista. Pelkkä erotuspinta-ala ei kerro suodattimen kokonaiskyvystä puhdistaa hiukkasia, vaan siihen vaikuttavat myös monet muut asiat kuten esimerkiksi peräkkäisten kenttien lukumäärä sekä sivusuhte. Jos suodattimen sivusuhte on alle 1, vähäisetkin muutokset kaasun virtausjakaumassa vaikuttavat suodattimen kokonaiserotusasteeseen. Sivusuhteen ollessa 0,5–2 erotusaste on >99,5 %. Suodattimen suunnittelussa pitäisi sivusuhteen olla aina 1 tai enemmän [4, s. 409]. Suodattimen suunnittelussa pyritään aina suureen erottelukykyyyn jopa pienillä hiukkasilla, alle 1 μm :n kokoisten hiukkasten varautuminen on vaikeampaa ja niihin vaikuttava voima on pieni verrattuna suurempiin partikkeleihin. Suodattimen kentän pituus vaikuttaa suuresti pienempien hiukkasten erottelukykyyyn ja peräkkäisten kenttien lukumäärä parantaa aina erotusastetta [4, s. 409].

4.4 Savukaasujen ominaisuudet

4.4.1 Virtausnopeus

Savukaasukanavissa vaihtelevat kaasujen virtausnopeudet yleensä välillä 14–18 m/s, joskus virtaus voi olla myös päälle 20 m/s. Sähkösuodattimen sisällä kaasut virtaavat 0,5–1,5 m/s, mutta kaasut tulevat melko kovaa vauhtia kaasunjakoverkolle ja vasta verkon jälkeen nopeus pienenee vielä entisestään. Jos kaasut virtaavat liian kovaa suodattimen kentässä, pienimpien hiukkasten erotuskyky laskee nopeuden nousun suhteessa. [3, s. 5-5.] Alle 0,8 m/s nopeuksilla ei ole huomattavaa vaikutusta erotusasteeseen. Liian alhainen nopeus voi haitata suodattimen toimintaa. Kun virtausnopeus kasvaa yli 2 m:iin/s, niin erotusaste laskee, koska hiukkaset tempautuvat takaisin kaasuvirtaan [3, s. 4–20].

4.4.2 Virtausjakauma

Sähkösuodattimen sisällä savukaasujen virtaus pyritään säätämään mahdollisimman tasaiseksi, jotta koko suodattimen erotuspinta saadaan käytettyä hyödyksi. Melko usein uusia ja myös vanhoja sähkösuodattimia pitää säätää, kun virtausjakaumat sähkösuodattimen sisällä ovat väärin ja suodatin ei toimi oikein. Oikein suunniteltu kaasunjakoverkko eli tuloverho on sähkösuodattimen toiminnan kannalta tärkeimpiä komponentteja [2, s. 299–303]. Virtausjakauman oikea säätö vaatii ammattitaitoiset säätäjät, koska suodattimien hienosäätö jälkikäteen on usein melko haasteellista.

4.4.3 Tuhkan resistiivisyys

Lentotuhkan resistiivisyys vaikuttaa sähkösuodattimen toimintaan kahdella eri tavalla. Keräyselektrodilla olevan pölykerroksen resistiivisyyden tulee olla riittävän pieni jotta koronavirta pystyy kulkemaan sen läpi. Se ei kuitenkaan saa olla liian pieni, koska tällöin tuhka hiukkaset saattavat irtoilla keräyslevyiltä ja tempautuvat takaisin savukaasuvirtaan. Pinnan resistiivisyys ei saa olla liian suuri, koska tällöin koronavirta pienenee ja jännitehäviö pölykerroksen yli kasvaa. Mikäli pölykerroksen resistiivisyys kasvaa liian suureksi, aiheutuu pölykerroksessa kipinäintiä (vastakorona ilmiö), jonka seurauksena pölyä irtoaa takaisin savukaasuvirtaan. Tämän ilmiön seurauksena suodattimen hyö-

tysuhde laskee. Jos resistiivisyys on liian suuri, pölykerroksen hiukkaset menettävät varaustaan huonosti ja tulee käyttää tehokkaampaa ravistelua. [4, s. 416.] Resistii-visyysongelmaan pystytään vaikuttamaan ja liian matalaa resistiivisyyttä voidaan kompensoida seuraavilla metodeilla [4, s. 410–412]:

- koronavirran suurentaminen, jolloin hiukkaset varautuvat paremmin.
- keräyselektrodien muotoileminen siten, että hiukkasten tempautuminen savukaasuvirtaan estetään.
- savukaasujen kemiallinen käsittely
- keräyselektrodien puhdistuksen vähentäminen. Pölykerros ei kuitenkaan saa muodostua liian paksuksi.

Mikäli ongelmana on liian korkea resistiivisyys, siihen voi vaikuttaa seuraavasti [4, s. 410–412]:

- keräyselektrodien pitäminen mahdollisimman puhtaana
- savukaasun loppulämpötilan laskeminen
- resistiivisyyden laskeminen lisäaineiden (esimerkiksi vesi tai ammoniakki) avulla

Resistiivisyyteen pystytään vaikuttamaan myös suodattimen säädöllä, polttoaineella ja polttoprosessin säädöllä. Parhaimpia polttoaineita resistiivisyyden kannalta ovat ne jotka palaessaan muodostavat resistiivisyydeltään sähkösuodattimelle sopivia hiukkasia. Tuhkan paras resistiivisyysalue on n. 10^7 – 10^{10} Ωcm [4, s. 411].

5 Sähkösuodattimen kunnossapito

5.1 Pitkäaikainen suunnitelma kunnossapitoon

Sähkösuodattimen osat ovat melko yksinkertaisia ja kestäviä, keveämissä olosuhteissa suodattimen komponentit kestävät paremmin kuin hankaavassa kulutuksessa. Pölyn kuluttavuus, kuten esimerkiksi hiekkaylijäämät savukaasussa aiheuttavat kaikkiin sisäosiin ylimääräistä kuormitusta. Suodattimia tarkistettaessa tutkitaan kaikkien sisäosien kulumat ja kammion sekä luukkujen mahdolliset ruostevauriot sekä tiivistevauriot, jotka aiheuttava pahimmassa tapauksessa myös ulkoilman virtausta suodattimen sisälle ja siten nopeuttavat syöpymistä entisestään. Sähkösuodattimia huolletaan yleensä kerran

tai kaksi vuodessa, ennakkohuoltosuunnitelman mukaisesti. Tällöin tutkitaan myös suodattimen kaikki eristimet ja läpiviennit. Sähkölaitteiden ja korkeajännitemuuntajien tarkastus tehdään yleensä kerran vuodessa.

5.1.1 Kunnossapitosuunnitelma

Kaikille sähkösuodattimille on tehty kunnossapitosuunnitelma niiden käyttöasteen sekä prosessin mukaan. Savukaasujen sisältämät kemialliset ainesosat syövyttävät terästä ja täten suodattimen sisäosat joutuvat usein kovaan kulutukseen. Suodattimien käyttöikä on rajallinen käytettäessä ruostuvia teräslaatuja. Kenttien emissioelektrodeja, ravistusvasaroita ja keräyslevyjä tulisi vaihtaa riittävän ajoissa, ennen kuin suodattimen vikaantumistiheys kasvaa liian suureksi. Usein juuri katkennut emissioelektrodi tai vääntynyt kerääjälevy aiheuttaa kentän oikosulun, ja se tarkoittaa aina, että oikosulussa oleva sähkösuodattimen kenttä ei puhdistu kaasuja vaan kaasut vain virtaavat puhdistamattomina sen lävitse. Näissä tapauksissa, kun kenttä on oikosulussa, joudutaan koko prosessi ajamaan alas ja kunnossapito poistaa katkennut emissioelektrodi kentästä. Nämä alasajot taasen ovat usein kalliita ja monimutkaisia prosesseja. Oikein suunniteltu ennakkohuolto ennakoit mahdolliset vikatilat ajoissa, ja hätäkorjausten määrä vähennee.

5.1.2 Sähkösuodattimen tarkistus

Sähkösuodatinta tarkistaminen voidaan jakaa sähköiseen tarkistukseen ja mekaaniseen tarkistukseen. Sähköiseen säätö- ja ohjausjärjestelmän tarkistukseen kuuluu muuntajan, tasasuuntaajan, säätölaitteiden ja apulaitteiden kuten moottoreiden tarkistukset. Sähköistä tarkistusta tehtäessä voidaan usein myös säätää suodattimen toimintaa energiatehokkaampaan suuntaan. Muuntajien kunnon tarkkailu on myös tärkeää, jotta osataan korjata mahdolliset vuotavat tiivisteet ja tällöin myös tehtäisiin muuntajan rasi-tuskoe. Sähkösuodattimen säädinosa on vastuussa suodattimen oikeanlaisesta toiminnasta, säätimen tehtävänä on valvoa ja ohjata suodattimen toimintaa. Säätimen toiminta ja sen asetusarvot tulisi tarkastaa 2–3 kertaa vuodessa. Sähkösuodattimen apulaitteet tulisi tarkastaa vähintään kerran vuodessa. Suodattimen mekaaniseen tarkistukseen kuuluu sisäosien, luukkujen, kammionseinämien, kerääjälevyjen, emissioelektrodien, ravistuslaitteistojen, kaasunohjausverkon ja levyjen silmämääräinen tarkistus.

Myös pohjasuppiloiden ja tuhkan kuljetussysteemien tarkistus tehdään. Sähkösuodattimen tarkistusta ei voi tehdä kuka tahansa, vaan tarkistuksen tulee tehdä alan ammattilainen. Tarkastuksista tulisi aina tehdä tarkastuspöytäkirjat, joihin merkitään kaikki suodattimen osa-alueet. Usein tehdään erilliset pöytäkirjat sähköisille ja mekaanisille tarkastuksille. [8, s. 4.]

5.1.3 Sähkösuodattimen kunnossapito

Sähkösuodattimen kunnossapito on usein pölyistä puuhaa, ja pelkkä tarkistuksenkin suorittaminen vaatii harjaantunutta silmää jotta kaikki mahdolliset vauriokohteet tulevat nähtyksi. Aloitettaessa korjausprosessia on tehty kartoitus, mitä tarvitsee korjata. Suodattimien sisäosien kuluneet osat vaihdetaan uusiin, usein työ vaatii polttoleikkausta tai kulmahiomakoneella leikkaamista. Kuluvia suodattimien osia ovat ravistusvasarat, vasaroiden vastinkappaleet. Vanhojen osien poistamien uusien tieltä on tehtävä tarkoin ja mitään palasia tai muuta ylimääräistä ei saisi pudota tuhkasuppiloihin, koska ne saattavat rikkoa tuhkan kuljettimen. Erityistä tarkkuutta vaaditaan siis suodatintöissä. Suodattimen sisällä on usein lämmintä, vaikka prosessi olisikin ollut jo päivän alhaalla. Suodatintyössä kunnolliset suojarusteet, haalari, hengitys- sekä silmäsuojaimet ovat pakollisia, koska pienhiukkaset ovat ihmiselle vaarallisia.

Varaosien saatavuus riippuu varaosan yleisyydestä, ja jokaisen laitoksen tulisi pitää riittävästi kuluvia varaosia varastoissaan tarvittavien huoltotöiden mahdollistamiseksi. Tietenkään ei voida odottaa, että jokaista kenttää varten olisi oma varamuuntaja ja sähkömoottorit jokaiselle apulaitteelle näiden tyyppillisen käyttöiän ollessa kuitenkin melko pitkiä. Suodattimen kentän kannatineristimiä ja niiden lämmitysvastuksia olisi hyvä olla varastossa ainakin muutamia kappaleita. Käyttöakselien laakerointeja vaihdetaan yleensä silloin, kun niitä kuluu, ja samoin akselien läpivientieristeitä on hyvä vaihtaa seisokkien yhteydessä jos ne näyttävät vuotavan. Kaikki kammionseinämien hapettumat tulisi tarvittaessa myös mitata, koska seinälevyjä kannattaa korjata silloin, kun niissä näkyy hapettumia tai muuta kulumaa.

5.2 Sähkösuodattimen kunnossapidon ongelmakohtia

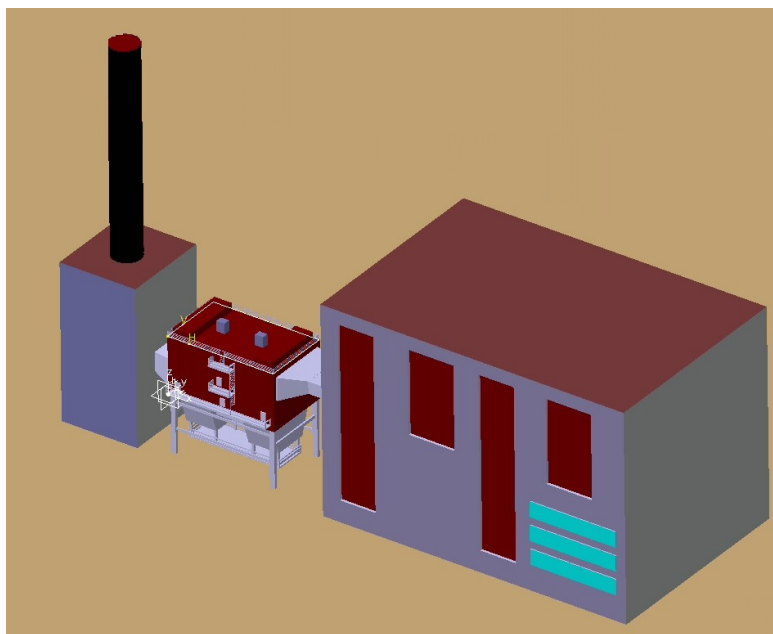
Suodattimet on yleensä aina vuorattu eristeellä ja eristeen päällä on vielä eristettä suojaava peltipinta. Täten on ulkopäin mahdotonta huomata suodattimessa olevia ilma-reaktioita. Suodattimen huoltoluukkujen hapettumatkaan eivät aina oireile kuultavasti, vaan hapettumat näkee ainoastaan, kun suodattimen huoltoluukun avaa. Jos suodattimeen tuleva pöly on herkästi kiinnittyvää ja siten pinnoille kasaantuvaa, suodattimen sisälle syntyy herkästi pölyn kerrostumakohtia.

Suodattimen tuloverhon asema hankalalla pölytyypillä korostuu, tuloverhossa olisi hyvä olla ravistuslaitteisto, joka pitää tuloverhon riittävän auki edesauttaen oikeanlaista kaasujen jakaumaa suodattimessa. Vääränlainen savukaasujen jakauma aiheuttaa suodattimen vääränlaista toimintaa, ja joskus suodatin voi toimia tästä syystä vain toispuoleisesti. Tämänlainen väärä toiminta tarkoittaa sitä, että savukaasut liikkuvat vain suodattimen toisella puolella ja suodattimen komponentteihin tuleva kuormitus vääristyy. Usein vääränlainen kaasunjakauma aiheuttaa oikosulkuja kentissä ja myös emissioelektrodien nopeampaa kulumaa ja jopa ennen aikaista katkeamista. Savukaasujen virtausta valvotaan antureilla, ja prosessitiedot ovat lähes reaaliaikaisia. Suodattimen oikeanlainen säätö ja kaasujen virtausjakauman oikeellisuus on yksi tärkeimpiä takeita sähkösuodattimen oikeaa toimintaa ajatellen. [8, s. 1–2.]

Ruoste on siis yleinen ongelma sähkösuodattimissa, joskus kammioita ja sisäosia joudutaan tekemään ruostumattomasta tai jopa haponkestävästä teräksestä. Haponkestävästä teräksestä tehdyt emissioelektrodit kestävät kuluttavaa pölyä paremmin, ja niiden kalliimpi hinta voi tulla pidemmällä aikavälillä edullisemmaksi, koska kenttähäiriöiden määrät vähenevät. Erotuslevyjärjestelmä on usein melko pitkäikäinen, mutta jos suodatin kuumenee liikaa tuhkasuppilossa palamaan syttyneen pölyn tai polttoylijälämmön takia, levyt voivat vääntyä. Tällöin koko kentän käyttöjännite pienenee tai kenttä voi jopa mennä oikosulkuun. Erotuslevyn korjaaminen ei yleensä kannata, vaan se tulee poistaa suodattimesta. [8, s. 2–3.]

6 Tulevaisuuden näkymiä

Sähkösuodattimia käytetään paljon, koska ne ovat kustannustehokas vaihtoehto suurien kaasumäärien puhdistamiseen. Sähkösuodattimen kestävä peruskonstruktio takaa sen, että ne tulevat olemaan teollisuuden kaasujen pienpartikkelien suodatuksessa mukana vielä pitkään. Niin kauan kuin energiantuotannossa käytetään polttolaitoksia, sähkösuodattimilla tulee olemaan vahva jalansija hyvän erottelukykynsä vuoksi. Paperinvalmistuksessa ja sulatoissa tärkeitä materiaaleja otetaan talteen sähkösuodattimilla uudelleenkäyttöä varten, ja nämä keräysprosessit ovat kannattavia, koska materiaalivirrat ovat suuria. Hyvin suunniteltu ja ennakkohuoltosuunnitelmalla varustettu sähkösuodatin on varsin huoltovapaa laite, ja siksi niitä käytetäänkin ympäri maailmaa erilaisissa prosesseissa. Monikentäisessä sähkösuodattimessa, jossa kenttien lukumäärä on kolme tai enemmän, yhden kentän mennessä oikosulkuun tai muuntajan rikkoutuessa saavutetaan usein vielä yli 95 %:n erotusaste ja ajamista pystytään useissa tilanteissa jatkamaan. Uusia savukaasujen puhdistusmenetelmiä kehitellään, mutta myös sähkösuodattimista saatu tieto kasvaa jatkuvasti ja sähkösuodattimien erotusastetta pystytään parantamaan monilla tavoin. Sähkösuodattimien monipuolisuus ja edulliset käyttökustannukset tekevät sähkösuodattimista helpon valinnan moniin prosesseihin. Kuvassa 15 näkyy sähkösuodatin voimalaitoksen yhteydessä. Varsinkin perinteisissä polttolaitoksissa sähkösuodatin on hyvin erottuva osa voimalaitosta.



Kuva 15. Voimalaitos ja sähkösuodatin.

7 Loppupäätelmät

Tämä insinööri työ oli todella laaja, ja aiheen rajausta piti tarkistaa myös työvaiheen aikana. Sähkösuodattimen mallintamisessa tärkeimpiä pääkohtia on suodattimen esitietojen keruu; suodattimen mallintaminen voidaan aloittaa kun tiedetään riittävästi prosessista, johon suodatinta ollaan tuomassa. Uuden suodattimen suunnittelua aloitettaessa tulee tietää kaasun pienhiukkasjakauma kattilan jälkeen sekä savukaasun lämpötila. Sähkösuodattimen koko määräytyy osaltaan myös savukaasumäärän mukaan. Sähkösuodattimen sivusuhteen tulee olla myös sopiva prosessiin, sen tulee olla välillä 0,5–2. Sähkösuodattimien mitoittamisen yhtälöt ovat kaikkien saatavilla, ja niistä on jokainen laitevalmistaja ottanut käyttöönsä itselleen parhaiten sopivimmat yhtälöt. Tärkeimpiä yhtälöitä sähkösuodatinta mallinnettaessa ovat hiukkasen varautumisen ja kulkeutumisen kaavat sekä erotusasteen laskeminen. Hiukkasilla tulee olla sopiva kulkeutumisnopeus suodattimen kentässä, jotta ne voivat varautua ja siten kiinnittyä keräyslevyihin. Hiukkasten kokojakauman ollessa alle 1 μm , ja jakauman mediaanin keskittyessä alle 0,5 μm :n, paras erotusaste saadaan useampikenttäisellä konstruktiolla.

Sähkösuodattimien säätöjärjestelmillä voidaan hienosäätää suodattimen toimintaa ja siten saadaan tietyllä hiukkaskokoalueella parannettua suodattimen erotusastetta. Myös kattilan ajoparametreja säätämällä voidaan helpottaa suodattimen toimintaa. Sähkösuodattimen tulisi olla mahdollisimman kompakti kokonaisuus, koska silloin sen rakentaminen on kustannustehokkainta. Suodattimien ennakkohuolto on yksi tärkeimpiä seikkoja sähkösuodattimen moitteettoman toiminnan kannalta. Suodattimissa on tiettyjä kulumia osia, joiden kulumiseen on kiinnitettävä huomiota tarkastuksen yhteydessä. Vanhempia suodattimia tulisi tarkastaa tarkemmin, kuten myös vaikeammassa olosuhteissa toimivia sähkösuodattimia.

Sähkösuodattimien suunnittelu on laskentapainotteista, ja siinä käytetään usein apuna monenlaisia mallinnusohjelmia; 3D-mallintamista, lujuuslaskentaa ja Microsoft Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Sähkösuodattimien mallintamiseen, ja erotusasteen laskentaan on olemassa myös laskentaohjelmia, joilla voidaan toimiva suodatin mallintaa todella nopeasti. Esimerkiksi ESPVI 4.0W on ohjelma, jolla voidaan tarkastella sähkösuodattimien kaikkia toimintaan vaikuttavia elementtejä. Ohjelmaa voidaan käyttää myös sähkösuodattimen toiminnan analysointiin ja sen hienosäätämiseen.

Lähteet

- 1 Hiukkastieto. Verkkodokumentti. Hiukkastieto.fi. <<http://www.hiukkastieto.fi/>> Päivitetty 2008-2012. Luettu 12.11.2011
- 2 Jaroslav Böhm. 1982. Electrostatic Precipitators. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- 3 Kenneth, Parker. Norman, Plak. 2004 .Electrostatic Precipitator (ESP) Training Manual. EPA Contract No. 68-C-99-201, Work Assignment 4-30.
- 4 Theodore, Louis. 2008. Air Pollution Control Equipment Calculations. Wiley.
- 5 Rautaruukin terästuotteet, suunnittelijan opas 2000. Silvennoinen, Sakari (toim.) Helsinki: Otava.
- 6 Ruukki. 2011. Verkkodokumentti. Ruukki.fi. <<http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Kulutusterakset/Kulutuksenkestava-Raex-teras/>> Päivitetty 18.11.2011. Luettu 14.12.2011.
- 7 Flagan, R.C., Seinfeld J.H. 1988. Fundamentals of air pollution engineering. Prentice Hall.
- 8 Päiviö, Pekka. Sähkösuodattimen tyypillisimmät viat ja vaurio. Verkkojulkaisu.<<http://www.ecpgroup.fi/esitteet/artikkeli.pdf> > Luettu 10.10.2011

Liite 1.

Sähkösuodattimen painonlaskentaohjelma (vain työn tilaajan käyttöön)

Excel-taulukko

