

# **Biopolttolaitoksen sähkösuodattimen toiminnan optimointi**

Vili Korhonen

Opinnäytetyö

Toukokuu 2018

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä Korhonen, Vili	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2018
	Sivumäärä 50	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Biopolttolaitoksen sähkösuodattimen toiminnan optimointi</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaajat Kari Hytönen, Marjukka Nuutinen		
Toimeksiantaja ECP Group Oy		
Tiivistelmä <p>Tutkimus tarkastelee biopolttolaitoksen sähkösuodattimen toimintaa ja sen optimoinnin mahdollisuuksia. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä ilmansuojeluun ja ympäristötekniikkaan erikoistuneen ECP Group Oy:n kanssa.</p> <p>Opinnäytetyön tutkimuskohteena oli kaksi Jyväskylän Energia Oy:n Rauhalahden energia- tuotantolaitoksen savukaasua puhdistavaa sähkösuodatinta. Tutkimuksen tarkoituksena oli optimoida sähkösuodattimen erotuskenttiin syötettävien sähkövirtojen suuruudet. Lisäksi työn tavoitteena oli tutkia, kuinka sähkösuodattimeen syötettävän sähkövirran suuruuden muuttaminen vaikuttaa suodattimen hiukkaspäästöön ja onko sähkövirran optimoinnilla vaikutusta voimalaitoksen energiansäätöön.</p> <p>Tutkimusaineisto kerättiin Rauhalahden voimalaitoksen toiminnan aikana. Tutkimusaineisto koostui voimalaitoksen prosessiarvoista, sähkösuodattimen jälkeisestä hiukkaspitoisuudesta sekä erotuskentissä käytetyn sähkövirran suuruudesta ja jännitteestä. Aineiston perusteella tehtiin kuvia, jotka havainnollistavat virran suuruuden vaikutusta hiukkaspäästöön.</p> <p>Kehittämistutkimuksen lopputuloksena syntyi mittaustietoon perustuvat tulokset sähkövirran muutoksen vaikutuksesta sähkösuodattimen hiukkaspäästöön. Opinnäytetyön toimeksiantaja tulee jatkossa käyttämään tutkimustuloksia sähkösuodattimien suunnittelussa. Lisäksi Jyväskylän Energia Oy:llä on mahdollisuus hyödyntää tutkimustuloksia toiminnassaan ja saada siten käyttöönsä mahdollisimman energiatehokas ajomalli suodattimilleen.</p>		
Avainsanat Sähkösuodatin, biopolttolaitos, savukaasu, hiukkaspäästöt		
Muut tiedot ( <u>salassa pidettävät liitteet</u> ) Osa kappaleista 7–9 ja liitteet 1–4 sisältävät yrityksen liikesalaisuuksiin liittyvää tietoa. Nämä kappaleet ja liitteet ovat jouduttu poistamaan perustuen lakiin (621/1999) 24§ kohdat 17 ja 20 yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika kymmenen (10) vuotta. Salassapito päättyy 2028.		

Author Korhonen, Vili	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2018 Language of publication: Finnish
	Number of pages 50	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Optimizing an electrostatic precipitator of a biomass powerplant</b>		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisors Hytönen, Kari; Nuutinen, Marjukka		
Assigned by ECP Group Ltd		
Abstract  <p>The thesis examines the operation and optimization possibilities of an electrostatic precipitator. Thesis was made in cooperation with ECP Group Ltd, which specializes in environmental technology.</p> <p>The subjects of the study were two Jyväskylä Energy Group owned electrostatic precipitators that clean the flue gas of Rauhalahhti power plant. The target of the study was to optimize the amount of electricity current into the electrical fields of the electrostatic precipitator. Moreover, the goals of the study were to investigate if changing the amount of the current affects the particulate emissions of the precipitator and if optimization affects the energy savings of the power plant.</p> <p>The research data was collected when Rauhalahhti power plant was in use. It includes data of the process values of the power plant, the particulate content after precipitator, the current of the collecting fields and the value of the voltage. Charts were made about how currents affect the particulate content according to the research data.</p> <p>The outcome of the development study included the material on how the current affects the particulate emissions based on the measured data. The assignor of the thesis will use the results when designing the precipitators in the future. Jyväskylä Energy Group can benefit from the results and use them by changing the current level and receive the most energy-efficient way to use the precipitator.</p>		
Keywords Electrostatic precipitator, biomass power plant, flue gas, particulate emissions		
Miscellaneous Some parts of chapters 7–9 and attachments 1–4 includes information on business secrets. The chapters and the attachments have been removed based on the legal clauses (621/1999) 24§ sections 17 and 20. The confidentiality period is ten (10) years. The confidentiality period ends 2028.		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Tutkimusasetelma .....</b>	<b>6</b>
2.1	Opinnäytetyön tavoite ja rajaus.....	6
2.2	Tutkimusongelma .....	6
2.3	Tutkimusotteen esittely .....	7
2.4	Tutkimuskohde ja toimeksiantaja .....	8
2.5	Aineistonkeruu- ja analyysimenetelmät .....	8
<b>3</b>	<b>Voimalaitoksella käytettävät polttoaineet .....</b>	<b>9</b>
3.1	Puupolttoaineet.....	10
3.2	Turve.....	10
3.3	Kivihiili.....	11
3.4	Polttoöljy .....	12
<b>4</b>	<b>Palaminen, polttotapa ja hiukkasten muodostuminen .....</b>	<b>12</b>
4.1	Palaminen.....	12
4.2	Leijukerros poltto .....	14
4.3	Hiukkasten muodostuminen .....	15
<b>5</b>	<b>Savukaasu .....</b>	<b>16</b>
5.1	Hiukkasten erottaminen savukaasusta .....	16
5.2	Sähkösuodatin .....	18
5.2.1	Suodatinlaite yleisesti.....	18
5.2.2	Rakenne ja toiminta.....	19
5.2.3	Suunnittelu ja mitoitus .....	23
5.3	Letkusuodatin .....	25
5.4	Savukaasupesuri .....	26

	2
5.5 Syklonisuodatin .....	26
<b>6 Hiukkaspitoisuuden mittaaminen .....</b>	<b>28</b>
<b>7 Rauhalahden sähkösuodattimet .....</b>	<b>30</b>
<b>8 Sähkösuodattimen sähkönsäädön ja hiukkaspäästöjen optimointi .....</b>	<b>33</b>
8.1 Tutkimusaineiston kerääminen .....	33
8.2 1-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	35
8.3 2-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	36
8.4 3-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	37
8.5 4-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	38
8.6 5-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	39
8.7 6-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	40
<b>9 Tutkimustulokset (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....</b>	<b>41</b>
<b>10 Johtopäätökset.....</b>	<b>42</b>
<b>11 Pohdinta.....</b>	<b>43</b>
<b>Lähteet .....</b>	<b>45</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>47</b>
Liite 1. Mittauspöytäkirja (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	47
Liite 2. Savukaasupesurin jälkeiset savukaasuarvot 1.3.2018 (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti).....	48
Liite 3. Esimerkkilaskelma (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti).....	49
Liite 4. Sähkösuodattimien tuhkalähttimet (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	50

## Kuviot

Kuvio 1. Kerrosleijukattila (BFB) ja kiertoleijukattila (CFB) .....	14
Kuvio 2. Sähkösuodattimen yleinen toimintaympäristö.....	19
Kuvio 3. Sähkösuodattimen toimintaperiaate .....	20
Kuvio 4. Hiukkasten erottaminen peräkkäisissä erotuskentissä .....	22
Kuvio 5. Tyypillinen virta/jännite -kuvaaja kolmekenttäiselle sähkösuodattimelle ....	22
Kuvio 6. Vastavirtasyklonin toimintaperiaate .....	27
Kuvio 7. DURAG D-R 320 -hiukkaspitoisuusmittari .....	29
Kuvio 8. Rauhalahden sähkösuodattimen 3D-malli .....	30
Kuvio 9. Micro-Kraft 3-ohjainyksikkö .....	31
Kuvio 10. Sähkösuodattimen paikallislogiikan näyttö (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	32
Kuvio 11. Sähkösuodattimien erotuskenttien sijainnit Rauhalahden voimalaitoksella .....	34
Kuvio 12. 1-kentän pöly/virta -kuvaaja .....	35
Kuvio 13. 1-kentän trendikäyrät.....	36
Kuvio 14. 2-kentän pöly/virta -kuvaaja .....	36
Kuvio 15. 2-kentän trendikäyrät.....	37
Kuvio 16. 3-kentän pöly/virta -kuvaaja .....	37
Kuvio 17. 3-kentän trendikäyrät.....	38
Kuvio 18. 4-kentän pöly/virta -kuvaaja .....	38
Kuvio 19. 4-kentän trendikäyrät.....	39
Kuvio 20. 5-kentän pöly/virta -kuvaaja .....	39
Kuvio 21. 5-kentän trendikäyrät.....	40
Kuvio 22. 6-kentän pöly/virta -kuvaaja .....	40
Kuvio 23. 6-kentän trendikäyrät.....	41
Kuvio 24. Suodattimien ensimmäisten erotuskenttien pöly/virta -kuvaaja .....	41
Kuvio 25. Suodattimien keskimmäisten erotuskenttien pöly/virta -kuvaaja.....	42
Kuvio 26. Suodattimien viimeisten erotuskenttien pöly/virta -kuvaaja .....	42

**Taulukot**

Taulukko 1. Hiukkastenerotuslaitteiden ominaisuuksien ja kustannuksien vertailutaulukko .....	17
Taulukko 2. Rauhalahden sähkösuodattimen prosessiarvot (Salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	31
Taulukko 3. Lähtö- ja prosessiarvot 1.3.2018 klo 6.25 (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti) .....	33

# 1 Johdanto

Ilmansuojelun tavoitteena on ennaltaehkäistä ja lievittää muun muassa liikenteestä, teollisuudesta sekä energiantuotannosta syntyvien epäpuhtauksien päätyä ympäristöön. Energiantuotannossa syntyviä haitallisia päästöjä ovat esimerkiksi typen oksidi-, rikkidioksidi- ja hiukkaspäästöt, joiden vähentämistä varten Euroopan Unionin on laatinut direktiivejä. EU-direktiivien pohjalta Suomen valtioneuvosto on asettanut energiantuotantolaitoksille päästöraja-arvot, jotka määräytyvät käyttöajan ja tuotantolaitoksen polttoainetehon mukaan. (Ilmansuojelu 2015.)

Asetettuihin päästöraja-arvoihin pääsemiseksi tuotantolaitokset tarvitsevat palamisen yhteydessä syntyvää savukaasua varten puhdistuslaitteen tai laiteyhdistelmiä. Hiukkaspäästöjen vähentämiseen käytettävistä laitteista sähkösuodatin on yleistynyt laajojen käyttömahdollisuuksien ja hyvän hiukkasten erotusasteen takia (Parker 2007, 1).

Sähkösuodattimiin erikoistunut opinnäytetyön toimeksiantaja ECP Group Oy halusi selvittää, kuinka yrityksen toimittamien suodattimien sisällä olevien erotuskenttien virta-arvojen muutos vaikuttaa hiukkasten erotuskykyyn savukaasusta.

Opinnäytetyön tehtävänä oli tarkastella sähkösuodattimen optimointimahdollisuuksia ja optimoinnin vaikutusta hiukkaspäästöön. Tutkimuksen aineistona on Jyväskylän Energia Oy:n Rauhalahden voimalaitoksella maaliskuussa 2018 kerätty prosessi- ja mittausdata.

## 2 Tutkimusasetelma

### 2.1 Opinnäytetyön tavoite ja raja

Opinnäytetyön päätavoitteena oli optimoida Jyväskylän Energian Rauhalahden voimalaitoksella olevien savukaasua puhdistavien sähkösuodattimien toimintaa. Tavoitteena oli selvittää kahden rinnakkaisen sähkösuodattimen sähkökenttien optimaaliset virta-arvot jokaiseen erotuskenttään sopivaksi. Suodattimien optimoinnin lisäksi tarkasteltiin, kuinka virta-arvojen muuttaminen vaikuttaa suodattimen pölyn erotuskykyyn, ja onko sähkökenttien virta-arvojen optimoinnilla vaikutusta asiakkaan energiankulutukseen.

Opinnäytetyön toimeksiantaja ECP Group Oy halusi tämän tutkimuksen avulla saada tietoa siitä, kuinka erisuuruiset sähkövirrat vaikuttavat sähkösuodattimen kykyyn erotella pölyä savukaasusta. Toimeksiantaja hyödyntää tutkimuksesta saatua tietoa suodattimien jatkosuunnittelussa.

Opinnäytetyö rajattiin koskemaan Rauhalahden voimalaitoksen kolmikenttäisten sähkösuodattimien virta-arvoja. Tutkimusta ei laajennettu optimoimaan muita sähkösuodattimen säätömahdollisuuksia, joten niihin tämä tutkimus ei ota kantaa.

### 2.2 Tutkimusongelma

ECP Group Oy:n toimittamat sähkösuodattimet toimivat Rauhalahden voimalaitoksella ympäristöministeriön asettamiin hiukkaspäästöjen raja-arvoihin nähden erittäin hyvin. Hyvän pölyn erotusasteen ansiosta pelkät sähkösuodattimet riittäisivät voimalaitokselle määrätyn hiukkaspäästörajan ( $20 \text{ mg/Nm}^3$ ) alittamiseen. Sähkösuodattimien lisäksi Jyväskylän Energia on rakennuttanut voimalaitokselle savukaasun puhdistamista varten myös savukaasupesurin, jonka ansiosta laitoksen tuottaman savukaasun hiukkaspitoisuus laskee suodattimien jälkeen entisestään.

Savukaasujen hiukkaspitoisuuden vähentäminen ei ole kustannustehokasta, koska laitos alittaa asetetun raja-arvon reilusti. Hiukkasten erottaminen sähkösuodattimella tapahtuu korkeajännitteisellä sähköisellä varauksella. Sähköisen varauksen tuottamiseksi tarvitaan energiaa, joka aiheuttaa sähkön käytöstä syntyviä kustannuksia.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli löytää sähkösuodattimeen riittävät virta-arvot, jotta asetetun hiukkaspäästörajan alle päästäisiin kuormittamatta savukaasupesuria liikaa. Tämän opinnäytetyön avulla pyritään optimoimaan sähkösuodattimen toiminta ja sähkönkulutus.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

- Minkälaisia muutoksia pölyn erotuksessa tapahtuu, kun muutetaan suodattimen kenttien virta-arvoja?
- Minkälainen vaikutus pölynerotuskykyyn on, jos yksi kolmesta kentästä on pois käytöstä?
- Miten suodattimen optimointi vaikuttaa sähkönkulutukseen?

### 2.3 Tutkimusotteen esittely

Tutkimusmenetelmät voidaan jakaa viiteen erilaiseen menetelmään. Kaikki ne lähestyvät tutkimusongelmaa eri tavalla. Tutkimusmenetelmiä ovat laadullinen, määrällinen, case-, kehittämis- ja toimintatutkimus. Jokainen menetelmistä soveltuu omalla tapaa tiettyihin tilanteisiin ja joskus jokin valittu menetelmä voi johtaa toiseen menetelmään tutkimuksen edetessä. (Kananen 2013, 22.)

Tätä opinnäytetyötä ajatellen sopivimmaksi tutkimusmenetelmäksi valikoitui kehittämistutkimus. Kehittämistutkimuksessa tutkimusongelma muutetaan usein kehityskohteeksi, jolloin ongelmaa pyritään pienentämään tai poistamaan kokonaan. Tutkimusongelmaan tai -kysymykseen vastauksen etsiminen edellyttää syiden löytämistä ja niiden keinojen valitsemista, joilla ongelmaa lähdetään poistamaan. Pelkkä ongelman poistaminen tai tutkimuskysymykseen vastaaminen ei kehittämistutkimuksessa riitä, vaan ratkaisun lisäksi vaaditaan toimintaa, joka lopulta johtaa muutokseen. Kehittämistutkimuksen avulla löydettyjä käyttökelpoisia ratkaisuja usein testataan myös käytännössä toimivuuden varmistamiseksi. (Kananen 2013, 15.)

Tässä opinnäytetyössä kehittämistutkimuksella oli tarkoitus vastata tutkimuskysymyksiin teorian ja käytännön vuorovaikutuksen avulla. Tietoperustaan perehtymisellä pohjustettiin käytännössä toteutettua aineistojen keruuta ja teoretiedon soveltamista.

## 2.4 Tutkimuskohde ja toimeksiantaja

Jyväskylän Energian Rauhalahden voimalaitoksella on kaksi rinnakkain olevaa kolmi-kenttäistä sähkösuodatinta, jotka puhdistavat voimalaitoksella syntyvää savukaasua hiukkasista. Tutkimuskohteeksi valikoitui juuri Rauhalahden voimalaitos, koska siellä on opinnäytetyön toimeksiantajan vuonna 2015 toimittamat sähkösuodattimet sekä molempien suodattimien poistopuolella olevat hiukkaspitoisuusmittaukset. Hiukkas-mittauksilla pystyttiin seuraamaan, kuinka suodattimeen tehtävät virta-arvojen muu-tokset vaikuttavat sen pölyn erotuskykyyn.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi ympäristötekniikkaan erikoistunut ECP Group Oy. Vuonna 2002 perustettu yritys tarjoaa laajan valikoiman ympäristötekniikkaan kuuluvia tuotteita ja palveluja. Suomen johtavana sähkösuodattimien valmistajana yritys tarjoaa uusien sähkösuodattimien lisäksi huoltoa ja varaosia sekä konsultointia savukaasunpuhdistukseen liittyen. Asiakkaina ovat esimerkiksi lämpöä ja sähköä tuottavat yritykset kuten Andritz, Fortum ja Vapo. (ECP Group Oy n.d.)

Yhteistyökumppanina opinnäytetyötä varten toimi Jyväskylän Energia Oy (myöhem-min JE), jonka omistamalla tuotantolaitoksella tutkimusta varten tarvittavat savukaa-sun hiukkaspitoisuusmittaukset suoritettiin. JE on Jyväskylän kaupungin omistama yhtiö, jonka päätuotteina ovat sähkö, lämpö ja talousvesi. (Jyväskylän Energia Oy n.d.) JE:n suurimmat sähkön ja kaukolämmön yhteistuotantolaitokset ovat Keljonlah-den ja Rauhalahden laitokset. Molempien yhteistuotantolaitosten pääpolttoaineina käytetään biopolttoainetta ja turvetta sekä tukipolttoaineena öljyä ja kivihiiltä. Tar-vittavat hiukkaspitoisuusmittaukset suoritettiin Jyväskylän Energian Rauhalahden voi-malaitoksella, joka käyttää lämmön ja sähkön yhteistuotannossa biopolttoaineen ja turpeen 50/50-polttoaineseosta. (JE tuotantolaitokset n.d.)

## 2.5 Aineistonkeruu- ja analyysimenetelmät

Tutkimusaineisto kerättiin 1.3.2018 Jyväskylän Energian Rauhalahden voimalaitoksen rinnakkaisten sähkösuodattimien poistupuolen hiukkaspitoisuusmittauksilla. Savu-kaasukanavassa olevat hiukkasmittaukset kertovat, kuinka paljon pienhiukkasia savu-kaasussa on jäljellä suodattimen jälkeen. Sähkösuodattimen emissiolankoihin syötet-

täviä virta-arvoja muutettiin jännitemuuntajien ohjauspaneelista. Hiukkaspitoisuusmittareiden avulla pystyttiin seuraamaan, kuinka suodattimeen tehdyt virta-arvojen muutokset vaikuttivat suodattimen pölyn erotuskykyyn.

Mittauksia varten tehtiin erillinen mittauspöytäkirja, johon merkittiin

- kostean savukaasun määrä sekä lämpötila
- kattilan polttoaineteho
- suodattimien jälkeiset pölypitoisuudet
- sekä sähkökenttien virta- ja jännitearvot.

Voimalaitoksen valvomosta saatiin Metso DNA -automaatiojärjestelmän tallentamat prosessimittausten trendikäyrät lisämateriaaliksi aineiston analysoimista varten. Trendikäyrät ovat mittauksien historiatietojen mukaan piirrettyjä kuvioita, jotka helpottavat prosessissa syntyvien muutosten seuranta ja analysointia.

Mittausaineisto kerättiin voimalaitoksen käydessä mahdollisimman suurella kuormalla, jotta savukaasujen virtaus pysyisi mahdollisimman tasaisena mittauksien aikana mittauslaadun parantamiseksi. Aineiston keräämistä hankaloitti se, ettei kattilan teho kestänyt aivan samalla tasolla läpi mittauksen. Kattilatehon muutokseen vaikutti ulkolämpötilan nouseminen, joka johti kaukolämpöverkon lämmön tarpeen vähenemiseen.

Virta-arvojen sekä pölypitoisuuden muutosten mukaan tehtiin Microsoft Excelillä kuvioita, joista ilmenee, kuinka kyseisen kentän virta-arvojen muutokset vaikuttavat suodattimen pölyn erotuskykyyn. Mittaustiedon ja kuvioiden avulla analysoitiin sähkönsäädön muutoksen vaikutuksia hiukkaspäästöön. Nämä kuviot ja mittaustiedot ovat nähtävissä opinnäytetyöntyön luvussa sähkösuodattimen sähkönsäädön ja hiukkaspäästöjen optimointi.

### **3 Voimalaitoksella käytettävät polttoaineet**

Jyväskylän Energian Rauhalahden voimalaitoksella käytetään normaalissa tilanteessa energiantuotantoon turvetta ja biomassaa suhteella 50/50. Poikkeavissa tilanteissa, kuten käynnistyksen aikana, tukipolttoaineena käytetään polttoöljyä ja varapolttoaineena laitoksella on kivihiltä. (Mäkinen 2018.)

Seuraavissa luvuissa kerrotaan laitoksella käytettävien polttoaineiden sisällöstä ja ominaisuuksista.

### 3.1 Puupolttoaineet

Kasvien yhteyttämisprosessissa syntyy biomassaa. Metsät sitovat ilmakehässä olevaa hiilidioksidia sekä auringon energiaa kemialliseksi energiaksi. Hapetusreaktiossa biomassaa hajoaa hiili- ja vetysidosten katketessa. Reaktion yhteydessä vapautuu energiaa, joka voidaan suljetussa ympäristössä hyödyntää esimerkiksi sähkön ja lämmön tuotantoon. Puusta voimalaitosten polttoaineeksi kelpaavat kaikki osat. Korkean lämpötilan omaavissa tulipesissä palaa rankahakkeen lisäksi kantoja ja oksiakin. Energiantuotantoa varten biomassaa haketetaan yhtenäisemmäksi partikkelikooksi, jotta polttoaineen palaminen tulipesässä olisi tasaista. Biomassa on uusiutuvaa polttoainetta, sillä polttamisen tuloksena syntynyt hiilidioksidi sitoutuu uudelleen kasveihin eikä biomassan palamisesta näin ollen synny ilmakehää kuormittavia hiilidioksidipäästöjä. (Alakangas, Hurskainen, Korhonen & Laatikainen-Luntama 2016, 54.)

Hiili, vety ja happi muodostavat pääasiassa puun alkuainekoostumuksen, eivätkä eri puulajit eroa toisistaan suuresti alkuainekoostumukseltaan. Polttoaineessa oleva energiasisältö riippuu hiili- ja vety-yhdisteisiin sitoutuneesta auringon energiasta. Mitä enemmän polttoaineessa on hiiltä ja vetyä, sitä suurempi on energiasisältö. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo puuaineksessa on 18–20 MJ/kg. Lämpöarvo vaihtelee hiukan puulajin sekä puun eri osien välillä. Muihin kiinteisiin polttoaineisiin verrattuna puun lämpöarvo on pieni, mikä osaltaan vaikuttaa puun poltto- ja käsittelylaitteisiin sekä varastoinnin tarpeeseen. Poltettavan puun tuhkapitoisuus on 0.3–3 %, riippuen polttoaineen iästä, lajista sekä puun osasta. (Alakangas ym. 2016, 56, 59 & 63.)

### 3.2 Turve

Turvetta syntyy suokasvien hitaan maatumisen yhteydessä. Hapen puutteen ja runsaan vesipitoisuuden takia suokasvien jäänteet eivät pääse hajoamaan kunnolla, mikä johtaa turvekerrostuman jatkuvaan kasvamiseen. Bioperäistä, hitaasti uusiutuvaa turvetta ei lasketa uusiutuvaksi energianlähteeksi vaan fossiiliseksi polttoaineeksi

pitkäkestoisen syntyprosessin takia (Geologian tutkimuskeskus n.d.). Turvesoilta jo osittain kuivunut pintakerros kerätään talteen aumoihin ja turve on valmista polttoainetta jo sellaisenaan jyrshinturpeena. Jyrshinturve voidaan myös käsitellä ja puristaa esimerkiksi palaturpeeksi tai pelletiksi polttamista varten. (Alakangas ym. 2016, 119.)

Turpeen koostumuksesta yli 50 % on hiiltä, ja maatumisen jatkuessa hiilipitoisuus kasvaa. Hiilen lisäksi turpeesta suuri osa, noin 20 %, on happea ja loppuosa koostuu tyypeästä, vedystä sekä rikistä (Alakangas ym. 2006, 119 & 124). Turpeen polttamisen yhteydessä syntyy rikkidioksidia, joka voi aiheuttaa korroosiota kattilan lämmönsiirtopinnoilla happokastepisteen alittuessa. Tuhkapitoisuus turpeen kuiva-aineesta, eli aineesta, josta vesi on jo haihtunut pois, on 5 %. Epäorgaanisen aineen määrään vaikuttavat kerrostumisen aikaiset olosuhteet. (Leinonen 2010, 77.)

Turpeen kuiva-aineen teholliseen lämpöarvoon vaikuttavat turvelaji, tuhka- ja hiilipitoisuus sekä maatumisaste. Haihtuvien aineiden vähäisyyden takia turpeen tehollinen lämpöarvo on korkeampi kuin puun. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo turpeella on noin 19–22,6 MJ/kg. (Alakangas, ym. 2016, 121.)

### 3.3 Kivihiili

Kivihiili on sedimenttikiveä, joka on syntynyt osittain hajonneesta orgaanisesta aineksesta, vedestä sekä lukuisista mineraaleista. Maakerrosten alapuolelle jäänyt turve muuttuu ajan kuluessa kivihiileksi. Siihen tarvitaan lämpötilan sekä paineen vaikutuksesta johtuvia fysikaalisia ja kemiallisia prosesseja. Mitä pidemmälle prosessit paineen ja lämpötilan alla etenevät, sitä suuremmaksi kivihiilen hiilipitoisuus sekä lämpöarvo kasvavat. Lämpöarvon ja hiilipitoisuuden kasvun lisäksi kivihiili muuttuu ajan myötä väriltään tummemmaksi ja rakenteeltaan kovemmaksi. Koska hiili tarvitsee syntyäkseen kymmeniä miljoonia vuosia, se ei lukeudu uusiutuviin vaan fossiilisiin polttoaineisiin. Suomeen tuodaan kivihiiltä pääsääntöisesti Puolasta ja Venäjältä. (Alakangas ym. 2016, 169.)

Kivihiilessä on alkuaineista eniten hiiltä (60–70 %). Loppuosa kivihiilestä on tyypeä, vetyä ja rikkiä. Alkuaineiden määrään vaikuttaa kivihiilen ikä ja sijainti, jossa hiili on louhittu. Kivihiilen tuhkapitoisuus on kotimaisiin polttoaineisiin nähden melko suuri, n. 4–25 % kuiva-aineesta. Tuhkapitoisuuden määrään vaikuttavat samat tekijät kuin

alkuaineiden määrään. Kivihiilen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on noin 25–27 MJ/kg. (Alakangas ym. 2016, 173.)

### 3.4 Polttoöljy

Polttoöljyn raaka-aineena käytettävä öljy on muodostunut miljoonien vuosien aikana orgaanisista aineksista, kuten kasveista. Maaperässä vallitsevan korkean lämmön sekä paineen vaikutuksesta muodostunut öljy on varastoitunut Maan kallioperässä oleviin taskuihin. Öljyn muodostuminen vie 10 miljoonaa vuotta, ja siksi öljy laskeaan fossiiliseksi polttoaineeksi. (Geologian tutkimuskeskus n.d.)

Raakaöljy täytyy jalostaa petrokemiallisessa teollisuusprosessissa, ennen kuin öljyä voidaan käyttää voimalaitosten polttoaineena. Voimalaitoksilla yleisesti vara- ja tuki-polttoaineena käytettävät polttoöljyt jaetaan käyttöominaisuuksien mukaan raskaaseen ja kevyeen polttoöljyyn. (Alakangas ym. 2016, 180.)

Korkean hiili- ja vetypitoisuuden lisäksi polttoöljyssä on myös merkittävä määrä rikkiä, minkä takia öljyn polttamisesta syntyy haitallisia rikkidioksidipäästöjä. Muihin energianlähteisiin nähden öljyn tuhkapitoisuus on matala (0.03 %), mutta sillä on huomattavasti korkeampi lämpöarvo (n. 41 MJ/kg) kuin esimerkiksi kivihiilellä. (Alakangas ym. 2016, 181.)

## 4 Palaminen, polttotapa ja hiukkasten muodostuminen

### 4.1 Palaminen

Aineen kemiallista yhtymistä happeen kutsutaan palamiseksi. Polttoaineen palamisreaktiossa hapen (O) kanssa reagoivia alkuaineita ovat hiili (C), vety (H), rikki (S) sekä typpi (N). Eri polttoaineet sisältävät eri määrän alkuaineita, jotka reagoivat hapen kanssa. Tästä johtuu eroavaisuudet lämpöarvoissa eri polttoaineiden välillä. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 79). Palamisreaktiot ovat pääosin läm-

pöä vapauttavia eli eksotermisiä reaktioita. Eksotermisten reaktioiden lisäksi palamiseen kuuluu hapen reaktio typen kanssa, jota kutsutaan endotermiseksi, lämpöä kulluttavaksi reaktioksi. (Kiinteän biopolttoaineen palaminen 2010.)

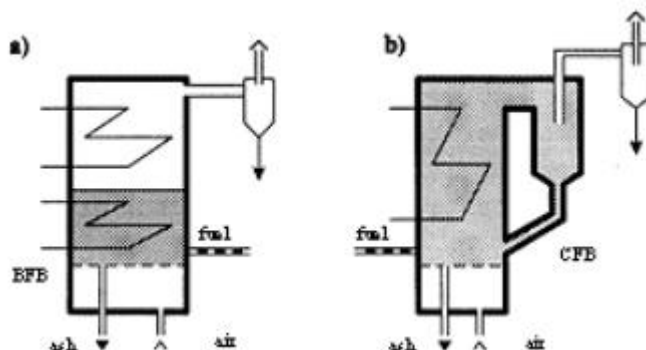
Palamisnopeuteen vaikuttaa oleellisesti polttoaineen lämmönsiirto, aineensiirto sekä kemiallinen reaktionopeus. Yleensä jokin näistä ilmiöistä toimii myös palamisnopeutta rajoittavana tekijänä. (Alakangas, Erkkilä & Oravainen 2008, 41.) Lisäksi palamiseen vaikuttavia tekijöitä ovat alkuainekoostumus, sekä kosteus- ja tuhkapitoisuus (Kiinteän polttoaineen palaminen 2010). Kiinteän polttoaineen palamisvaiheet voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: kaasuuntuminen, haihtuvien aineiden palaminen sekä jäännöshiilen palaminen. Ensimmäisessä vaiheessa eli kaasuuntumisessa poistuu polttoaineen sisältämä kosteus sekä haihtuvat aineet, kuten typpi (N). Toisessa vaiheessa polttoaineen sisältämät kaasuuntuvat komponentit eli haihtuvat aineet syttyvät palamaan ja viimeinenkin kosteus polttoaineesta poistuu. Kolmannessa eli viimeisessä palamisen vaiheessa jäljellä oleva jäännöshiili syttyy, palaen ympäristöäkin korkeammassa lämpötilassa. (Huhtinen ym. 2000, 83.)

Polttoaineen hiilivetyjen täydellisessä palamisessa tuotetaan vain vettä ( $H_2O$ ) sekä hiilidioksidia ( $CO_2$ ). Eri yhdisteiden reagoiessa hapen kanssa syntyy niistä myös muita oksideja. Esimerkiksi hiilestä (C) ja hapesta (O) muodostuu täydellisen palamisen lopputuotteena hiilidioksidia ( $CO_2$ ), mutta jos happea ei ole riittävästi, niin hiilestä muodostuu vaarallista häkää (CO). Typpi (N) palaessaan muodostaa hapen kanssa palamistuotteena typpimonoksidia (NO) tai typpidioksidia ( $NO_2$ ). Näitä yhdisteitä kutsutaan typen oksideiksi tai  $NO_x$ -päästöiksi. Rikki (S) palaessaan muuttuu rikkidioksidiksi ( $SO_2$ ), josta osa voi vielä hapettua rikkiatrioksidiksi ( $SO_3$ ). Rikkiatrioksidista voi savukaasussa olevan veden kanssa muodostua vielä rikkihappoa, joka voi vaurioittaa kattilan lämmönsiirtopintoja. (Huhtinen ym. 2000, 83–84.) Rikkihapon muodostumisen kohtaa kutsutaan happokastepisteeksi. Happokastepiste on riippuvainen savukaasun kosteudesta sekä rikkiatrioksidipitoisuudesta, jotka vaihtelevat käytettävän polttoaineen mukaan. Suurin rikkiatrioksidipitoisuus syntyy poltettaessa turvetta, jolloin savukaasun lämpötila tulisi pitää yli  $140\text{ }^\circ\text{C}$  esimerkiksi sähkösuodattimen ja savupiipun syöpmisen estämiseksi. (Ympäristöministeriö 2012, 18.)

## 4.2 Leijukerros poltto

Voimalaitosten yleinen kiinteiden polttoaineiden polttotapa on leijukerros poltto. Leijukerros poltto on ollut yksi tärkeimpiä kiinteiden polttoaineiden polttotekniikoita 1970-luvulta lähtien. Leijukerros poltossa polttoaine syötetään tulipesään yhden tai useamman pudotusputken kautta, jonka jälkeen polttoaine palaa leijuvaan hiekkapatjan seassa. Pienimmät polttoainepartikkelit palavat nopeasti jo hiekkapetin yläpuolella ja suuremmat partikkelit kulkeutuvat hiekan sekaan petiin, jossa ne kuivuvat ja kaasuuntuvat syttyen palamaan. Hiekkapatjaa leijutetaan patjan alapuolella olevista leijutusaukista tulevan palamis- eli primääri-ilman avulla. Hiekkakerroksesta, leijutusaukista sekä kattilan muurauksista syntyvä suuri lämpökapasiteetti mahdollistaa myös kosteiden polttoaineiden, kuten puunkuoren ja metsätähdehakkeen käyttämisen energianlähteenä. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 36.)

Leijukerroskattilat voidaan jakaa kerrosleijukattiloihin sekä kiertoleiju- eli kiertopetikattiloihin (ks. kuvio 1). Periaatteellinen ero kattiloiden välillä on primääri-ilman syöttöllä säädettävästä hiekkapetin leijutusnopeudesta. Leijuva hiekka muodostaa 0,4–0,8 metriä korkean, selkeästi erotettavan, hiekkakerroksen kerrosleijukattilan pohjalle. Hienompaa hiekkaa käyttävässä kiertopetikattilassa hiekka poistuu savukaasuvirran mukana tulipesästä suuremman leijutusnopeuden ansiosta. Tulipesään hiekka palautetaan syklonin kautta, jossa hiekka ja savukaasu erottuvat toisistaan. (Huhtinen ym. 2013, 36–37.)



Kuvio 1. Kerrosleijukattila (BFB) ja kiertoleijukattila (CFB) (IFRF Combustion Handbook 2001)

Kiinteitä polttoaineita poltettaessa jää palamattomasta materiaalista jäljelle epäorganista ainetta eli tuhkaa. Karkea osa tuhkasta eli pohjatuhka jää leijukerros-poltossa petihiekan sekaan ja poistuu tulipesästä hiekan seassa pohjasuppiloiden kautta. Hienompi osa tuhkasta eli lentotuhka kulkeutuu savukaasun mukana tulipesästä pois. Savukaasu puhdistetaan lentotuhkasta esimerkiksi sähkösuodattimella pienhiukkaspäästöjen vähentämiseksi. (Huhtinen ym. 2016, 37.)

### 4.3 Hiukkasten muodostuminen

Palamisen yhteydessä syntyvän savukaasun sekaan sekoittuu polttoaineen palamisesta jäljelle jäänyttä hienoa tuhkaa sekä palamatonta polttoainetta. Tuhka ja palamaton polttoaine muodostavat savukaasuvirtaan hiukkasia, jotka ympäristöön pääs-tessä muodostavat haitallisen hiukkaspäästön. Hiukkasten muodostumiseen ja mää-rään vaikuttaa suuresti käytetty polttoaine ja sen laatu, polttotapa sekä polttoproses-sin hallinta. (Leinonen 2010, 77) Yleisimpien polttoaineiden poltosta syntyvät pienhiukkaset koostuvat mm. alkuainehiilestä, orgaanisista yhdisteistä, metalleista sekä hiukkasiin sekoittuneesta vedestä. Aerodynaamisen halkaisijan perusteella hiukkaset voidaan jakaa karkeisiin hiukkasiin sekä pienhiukkasiin. Hiukkaset, joiden halkaisija on 2,5–10 µm, kuuluvat karkeisiin hiukkasiin, ja halkaisijaltaan alle 2,5 µm ovat pienhiukkasia. (Raiko, Kirvelä, Tolvanen & Pääkkönen n.d., 209 & 210.)

Polttotapa on yksi hiukkaspitoisuuteen vaikuttavista tekijöistä. Esimerkiksi hiukkaspitoisuus on yleensä aina korkeampi leijukerros-poltossa kuin arinapoltossa, koska suurin osa (80–100 %) palamisen yhteydessä syntyneestä tuhkasta lähtee lentotuhkana savukaasujen mukana kattilasta. Lisäksi epätäydellinen palaminen lisää lentotuhkan määrää, koska polttoaine ei ehdi polttoteknisistä syistä palamaan loppuun vaan siir-tyy savukaasuvirran mukana pois kattilasta. (Maaskola 2002, 26–27.)

Polttoprosessissa syntyvän lentotuhkan määrää pyritään pitämään mahdollisimman matalana hiukkaspäästöjen sekä myös lämpöpintojen likaantumisen takia. Lämpöpintojen likaantuminen vähentää savukaasussa olevan lämmön siirtymistä jäähdyttävään ainevirtaan, joka näin ollen pienentää laitoksen hyötysuhdetta kasvattaen polttoaineen kulutusta. (Huhtinen ym. 2000, 209.)

## 5 Savukaasu

Energiantuotantolaitosten polttoprosessien yhteydessä syntyy savukaasua. Savukaasu on kaasuseos, joka koostuu polttoaineen palamisreaktion reaktiotuotteista sekä palamisilman ja polttoaineen reagoimattomista aineista. Kaasuseos sisältää tyypillisesti hiilidioksidia, hiilimonoksidia, vesihöyryä, rikkidioksidia sekä typenoksideja. Osa näistä kaasuyhdisteistä on haitallisia ihmisille sekä ympäristölle, minkä takia savukaasusta syntyviä päästöjä on tärkeä vähentää. (Raiko ym. n.d., 214.)

Terveydelle ja ympäristölle haitallisten päästöjen vähentämistä määrittelee myös lainsäädäntö. Valtioneuvosto on asettanut suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamista varten niin sanotun SUPO-asetuksen. EU:n teollisuuspäästädirektiiviä vastaava SUPO-asetus määrittää yli 50 MW kokoisilla laitoksilla syntyviin päästöihin raja-arvot ja mittausveloitteet, jotka koskevat rikkidioksidia ( $\text{SO}_2$ ), typen oksideja ( $\text{NO}_x$ ) sekä hiukkasia. (Pöyry Oy 2016, 5–6.) Asetuksen mukaisiin raja-arvoihin pääsemiseksi polttolaitokset tarvitsevat savukaasun puhdistamista varten puhdistuslaitteen tai eri puhdistuslaitteiden yhdistelmiä. Tässä työssä keskityttiin hiukkasten erottamiseen savukaasusta sekä hiukkaspäästöille määrättyihin raja-arvoihin, joten typen oksideja ja rikkidioksidia koskevat raja-arvot sekä puhdistusmenetelmät on jätetty vähemmälle.

### 5.1 Hiukkasten erottaminen savukaasusta

Lämpö- ja voimalaitosten on huolehdittava, että savukaasujen pienhiukkaspäästöt kestävät valtioneuvoston asettamien hiukkasraja-arvojen sisällä. Jokaisen laitoksen päästörajat määräytyvät polttoainetehon mukaan. Suomessa suurten (>50 megawatin) polttolaitosten hiukkaspäästöt jaetaan kolmeen luokkaan. Polttoaineteholtaan alimmassa luokassa olevien laitoksien, eli laitoksien joiden teho on 50–100 MW on päästävä hiukkaspäästöissä alle  $30 \text{ mg/Nm}^3$  rajan alle. Keskimmäisen luokan laitosten (100–300 MW) on päästävä hiukkaspäästöissä alle  $20 \text{ mg/Nm}^3$  rajan. Suurimmat (>300 MW) laitokset noudattavat samaa hiukkasrajaa kuin keskiluokan laitokset. Raja-arvot kertovat, kuinka paljon hiukkasia saa olla normaalipaineessa olevaa savukaasukuutiometriä kohden ( $\text{mg/Nm}^3$ ). (Pöyry Oy 2016, 6.)

Polttoprosessissa syntyviin hiukkaspäästöihin pystytään vaikuttamaan osittain myös polttoteknisin keinoin, mutta käytännössä määrättyihin päästörajoihin ei päästä pelkkien polttoprosessin säätöjen avulla varsinkaan suurempien laitoksien kohdalla. Päästörajojen tavoittamiseksi täytyy savukaasu puhdistaa lentotuhkasta hiukkasten erotuslaitteella. Erotuslaitteen valintaan vaikuttavat muun muassa hiukkasten konsentraatio savukaasuvirrassa, toimintaolosuhteet sekä savukaasun puhtauden vaatimustaso erotuslaitteen jälkeen. Lopullinen erotuslaitteiston valinta tehdään usein investointi- ja käyttökustannuksia ajatellen. Erotuslaitteesta muodostuva painehäviö sekä tehon- ja huollontarve ovat esimerkkejä käyttökustannuksiin vaikuttavista tekijöistä. (Maaskola 2002, 38–39.) Taulukkoon 1 on koottu yleisimpien hiukkasten erotuslaitteiden kustannusarvioita, painehäviöitä sekä mahdollisia hiukkaspäästötasoja.

Taulukko 1. Hiukkastenerotuslaitteiden ominaisuuksien ja kustannuksien vertailutaulukko (Ympäristöministeriö 2012, 21)

Puhdistuslaite	Polttoaine	Teho MW <sub>pa</sub>	Investointi €/MW <sub>pa</sub>	Käyttökust. €/MWh <sub>pa</sub>	Päästötaso mg/m <sup>3</sup> n	Painehäviö mbar
Sähkösuodatin	kaikki	alle 5	40 000	ei tietoa	15–50	2–3
	kaikki	5–50	20 000	0,1		
	kaikki	50–150	15 000	ei tietoa		
	kiinteä ja lipeä	> 150	10 000	ei tietoa		
	neste	> 150	7 000	ei tietoa		
Kuitusuodatin	kaikki	5–50	18 000	0,3	5–25	10–20
	kiinteä	> 150	13 000	0,2		
	neste	> 150	10 000	ei tietoa		
Pesuri + LTO	kaikki	5–50	35 000	0,3	50–500	10–15
Pesuri	kaikki	5–300	60 000	0,5	50–500	10–15
	kaikki	300–1 000	80 000	0,3		
	kaikki	yli 1 000	40 000	ei tietoa		
Sykloni / multi-sykloni	kaikki	alle 5	6 000	ei tietoa	20–1500	10–20
	kaikki	5–50	1 600	0,1		

Hiukkasia sisältävä savukaasuvirta johdetaan savukaasukanavasta hiukkasten erotuslaitteeseen, jossa hiukkasiin vaikutetaan ulkoisella voimalla. Ulkoinen voima aiheuttaa hiukkasten eroamisen savukaasuvirrasta. Savukaasua puhdistavan erottimen erotuskyky ilmaistaan usein erotusasteena. Erotusasteella kuvataan, kuinka paljon laite

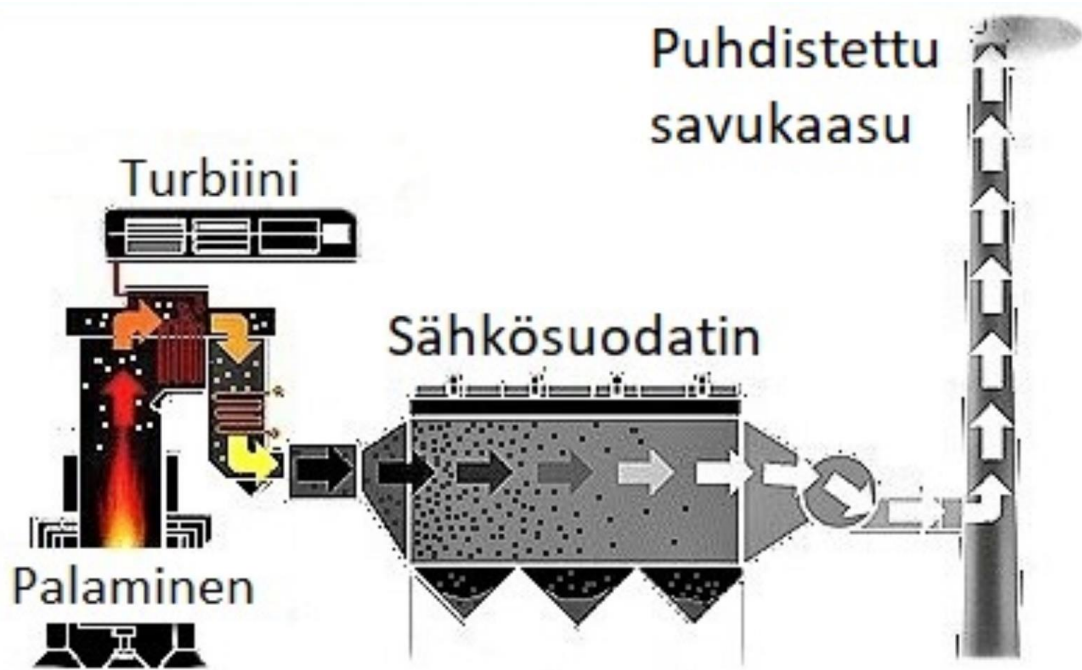
pystyy poistamaan hiukkasia savukaasuvirrasta, toisin sanoen erotettujen hiukkasten määrän suhde laitteeseen tulevien hiukkasten määrään. (Maaskola 2002, 39.)

Seuraavaksi käsitellään yleisimpien savukaasun puhdistuslaitteiden rakennetta, toimintaa sekä ominaisuuksia. Tarkastelussa keskitytään sähkösuodattimen rakenteeseen ja toimintaan, minkä takia muut savukaasun puhdistusmenetelmät ovat vähemmällä huomiolla.

## 5.2 Sähkösuodatin

### 5.2.1 Suodatinlaite yleisesti

Lähes vuosisadan ajan sähkösuodatin on ollut yksi sopivimmista laitteista teollisuudessa syntyvien suurten savukaasumäärien puhdistamiseen hiukkasista. Maailman laajuisesti sähkösuodatin on yleistynyt savukaasun puhdistuksessa tiukentuvien hiukaspäästö määräysten takia. Ideaaliseksi hiukkasten erotuslaitteeksi sähkösuodattimesta tekee sen laajat käyttömahdollisuudet, korkea hyötysuhde, lämpötilan kesto, pieni painehäviö, pitkä käyttöikä, matalat kunnossapitokustannukset sekä korkea erotusaste monen kokoisille hiukkaspartikkeleille. Laajojen käyttömahdollisuuksien takia sähkösuodatinta käytetään eri teollisuuden aloilla kuten sähkö- ja lämmöntuotannossa keräämään lentotuhkaa savukaasuvirrasta (ks. kuvio 2). Hiukkasten erottaminen savukaasusta tapahtuu varaamalla hiukkaset korkealla, jopa 100 kV:n suuruisella negatiivisella tasajännitteellä, jonka vaikutuksesta hiukkaset kulkeutuvat ja kerääntyvät maadoitetuille keräyslevyille. Keräyslevyiltä tuhka ravistetaan suodattimen alaosissa olevaan pohjasuppiloon, jottei levyille kertyisi liian paksua tuhkakerrosta laskemaan keräystekhoa. (Parker 2007, 1–3.)



Kuvio 2. Sähkösuodattimen yleinen toimintaympäristö (KPJB Company n.d.)

Oikein mitoitettulla ja prosessiin optimoidulla sähkösuodattimella päästään jopa 99,9% suuruiseen erotustehokkuuteen kokonaisuudessaan suhteutettuna. Sähkösuodattimen heikkoutena ovat erittäin pienten, alle 1  $\mu\text{m}$  pienhiukkaspartikkeleiden erottaminen ja resistiivisyyden vaihtelusta aiheutuvat erotusasteen muutokset. (Ohlström, Tsupari, Lehtilä & Rinnemaa 2005, 29.)

### 5.2.2 Rakenne ja toiminta

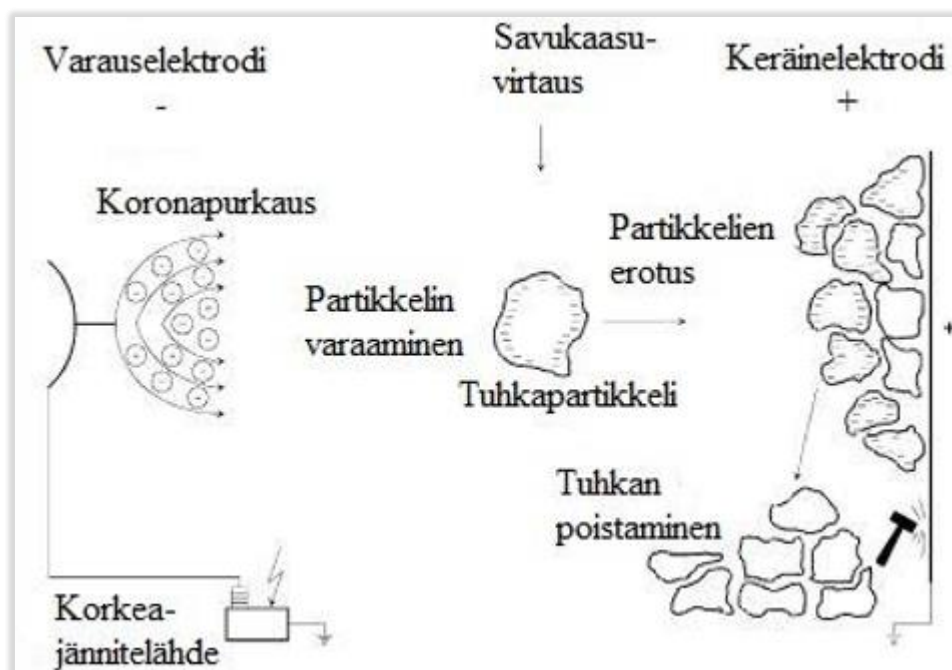
Sähkösuodatin koostuu monista tarkkaan suunnitelluista osista, joiden yhteisvaikutuksella on suuri merkitys suodattimen toimintaan. Suodattimen pääkomponentteja ovat tulo- ja poistosuppilot, savukaasuverhot, erotuskammio, pohjasuppilot, emissiolangat, keräyslevyt, eristimet, jännitemuuntajat sekä ravistimet. (Porle, Francis & Bradburn 2005, 55 – 62.)

Pölypitoinen savukaasu tulee savukaasukanavasta noin 9–15 m/s nopeudella sähkösuodattimen tulosuppiloon. Kartiomainen tulosuppilo jo itsessään jakaa suodattimeen tulevaa savukaasua suuremmalle pinta-alalle, mutta usein tulosuppiloihin on asennettuna reikälevyistä muodostuva savukaasuverho, joka levittää savukaasuvirtausta entisestään tasaisemmaksi virtaukseksi erotuskammioon. Tuloverhon jälkeen

savukaasun nopeus laskee erotuskammiossa noin 0,75–1,5 m/s nopeuteen. (Porle ym. 2005, 56.)

Sähkösuodattimen erotuskammiossa hiukkaset erotetaan savukaasusta sähköisen varauksen avulla. Emissiolankoihin eli emissioelektroneihin syötetään muuntajan kautta korkeajännitteinen sähkövirta. Sähkövirta aiheuttaa jännite-eron emissiolankojen sekä maadoitettujen keräyslevyjen välille, joka johtaa lankojen ja levyjen välille syntyvään voimakkaaseen sähkökenttään. Lankamainen emissioelektroni ja tasomainen keräyslevy eli keräinelektrodi ovat hyvä yhdistelmä riittävän voimakkaan sähkökentän aikaansaamiseksi. Sähkökentän saavuttaessa riittävän voimakkuuden alkaa emissiolankojen pinnalla tasainen, itseään ylläpitävä koronapurkaus. (Maaskola 2002, 44–45.)

Koronapurkausalueella tapahtuu ionisaatioreaktio, jolloin koronapurkauksessa syntyneet negatiiviset elektronit ja positiiviset ionit kulkevat eri suuntiin (ks. kuvio 3).



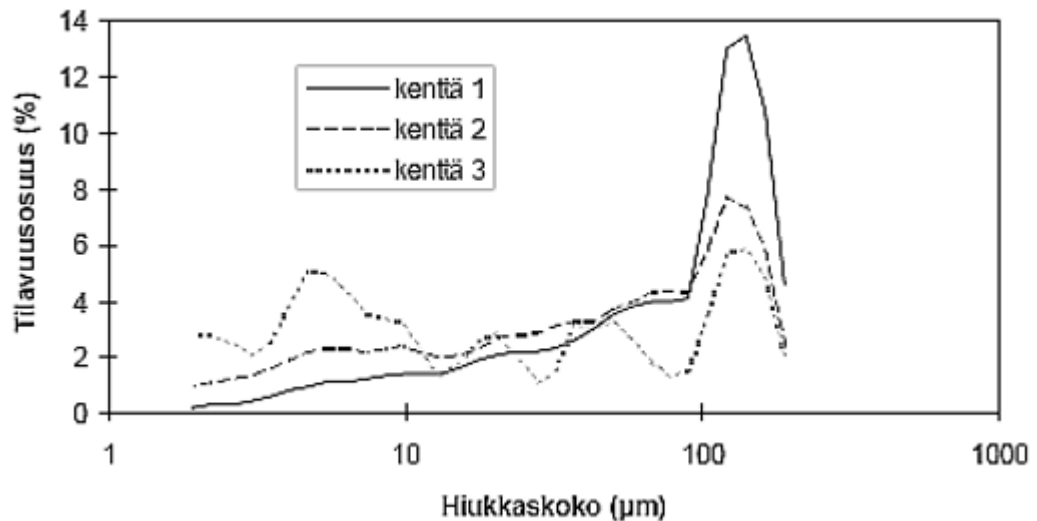
Kuvio 3. Sähkösuodattimen toimintaperiaate (Pessa 2016, 29)

Emissiolankojen tuottamassa koronapurkauksessa syntyvä negatiivinen ionivirta törmää ja kiinnittyy negatiivisesti varautuneisiin hiukkasiin. Negatiivisesti varautuneet

hiukkaset kulkeutuvat tarttuen kiinni positiiviseen keräyslevyyn ja positiiviset ionit kiinnittyvät emissiolankaan. Varautuneista hiukkasista noin 80–90 % kulkeutuu keräyslevyille ja noin 10–20 % kiinnittyy emissiolankoihin. (Ohlström ym. 2005, 21.)

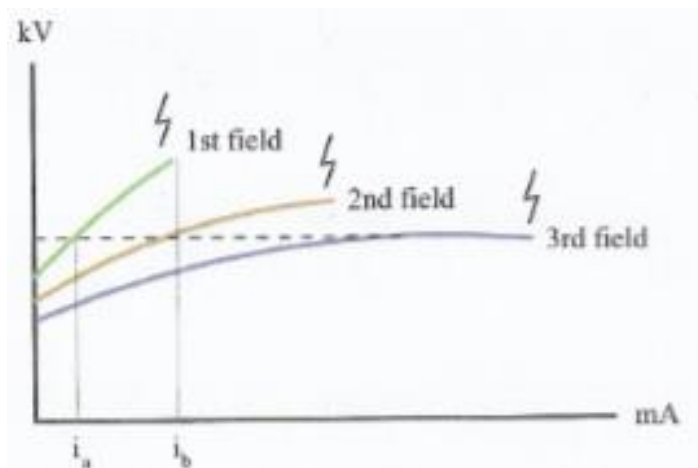
Keräyslevyihin ja emissiolankoihin tarttunut lentotuhka täytyy määrääjain poistaa, jottei suodattimen keräystehokkuus heikkene. Tuhkakerroksen kasvaessa liian paksuksi saattaa syntyä myös riski langan ja levyn väliseen oikosulkuun. Hyötysuhteen laskemisen sekä oikosulun välttämiseksi täytyy tuhka karistaa mekaanisten ravistimien avulla suodatinkammion alapuolella oleviin pohjasuppiloihin. Mekaaninen ravistus tapahtuu metallisten vasaroiden avulla. Suodatinkammiossa oleviin ravistusakseleihin on kiinnitetty vasaroita, jotka iskevät lanka- ja levyrivien päädyissä oleviin alasimiin. Alasimiin vasaran heilahtamisesta kohdistuva voima saa aikaan tärinän, joka irrottaa keräyspinnoille kasaantuneen tuhkan. Tuhkan uudelleen kulkeutumista savukaasun mukana pyritään estämään ravistussekvenssien oikealla ajoittamisella, jotta kasaantuneen tuhkan massa on riittävä pohjasuppiloon tippumiseen saakka. (Porle ym. 2005, 61–63.)

Sähkösuodattimien erotuslevyille kertyvä hiukkasmassa vähenee eksponentiaalisesti erotuslevyjen etäisyyden suhteessa savukaasuvirtauksen suuntaan nähden. Suodattimen alkuosat erottavat suurimman osan savukaasussa olevista karkeista ja suurista hiukkasista, koska ne varautuvat helpommin kuin pienemmät hiukkaset ja niiden vaellusnopeus erotuslevyjä kohti on suuri. Savukaasun pienemmät hiukkaset kulkeutuvat usein suodatinkammiossa pidemmälle, koska niiden sähköinen varaaminen koronapurkauksen avulla on vaikeampaa. (Talka 2006, 55.) Pienhiukkasten pinnalle voi absorboitua kymmeniä ioneja, ennen kuin niiden varaus on riittävä hiukkasen kulkeutumiseen erotuslevylle (Maaskola 2002, 45).



Kuvio 4. Hiukkasten erottaminen peräkkäisissä erotuskentissä (Thun & Korhonen 1999, 415)

Kuviossa 4 on erään kolmekenttäisen sähkösuodattimen hiukkaskokojakauma. Kuvioista käy ilmi, kuinka suurimmat hiukkaset erottuvat enimmäkseen jo ensimmäisessä kentässä. Kuvion 4 mukaisen sähkösuodattimen koko tuhkamäärästä noin 90 % erottui ensimmäisessä kentässä, 9 % toisessa kentässä ja 1 % viimeisessä kentässä. (Thun ym. 1999, 416.)



Kuvio 5. Tyypillinen virta/jännite -kuvaaja kolmekenttäiselle sähkösuodattimelle (Porle ym. 2005, 22)

Sähkösuodattimeen syötettävä teho ( $\text{mA} \cdot \text{kV}$ ) määräytyy usein läpilyönnin mukaan. Läpilyönti syntyy, kun koronapurkauksen voima kasvaa liian suureksi ja sähkökentän virta johtuu vastakkaiseen potentiaaliin. Ensimmäisiin kenttiin tullessa enemmän sähkövirtaa johtavia hiukkasia on ensimmäisiin kenttiin syötettävä sähkövirta matalammalla tasolla syntyvän läpilyönnin takia verrattuna taaempiin erotuskenttiin (ks. kuvio 5). Suodattimen kenttään syötettävä teho pidetään usein mahdollisimman lähellä läpilyöntijännitettä korkean erotusasteen saavuttamiseksi. Erotuskentän sähkönsyöttöä varten korkeajännitemuuntaja valitaan usein teholtaan noin  $4 - 20 \text{ W/m}^2$ , jotta muuntaja on riittävä myös pieniin prosessin muutoksiin. (Porle ym. 2005, 19–20.)

### 5.2.3 Suunnittelu ja mitoitus

Sähkösuodattimien mitoittaminen ja suunnittelu perustuu pääosin teoreettiseen ja kokemusperäiseen tietoon. Ennen mitoittamisen aloittamista on perehdyttävä moniin mitoitukseen vaikuttaviin seikkoihin, jotta saadaan valmistettua prosessiin soveltuva suodatin oikeaan toimintaympäristöön. Suodattimen kokoa suunniteltaessa on huomioitava:

- savukaasun sisältö ja määrä,
- kuormituksen ja lämpötilan vaihtelu,
- hiukkaspitoisuus,
- vaadittu hiukkaspäästötaso,
- suodattimen sijainti ja tarvittava fyysinen tila laitosalueella.

Tärkein tekijä, joka on ympäristösyistä otettava huomioon suodattimen suunnittelussa ja mitoittamisessa, on vaadittu hiukkaspäästötaso. Hiukkaspäästötaso on otettava huomioon jokaista mitoitusparametria, kuten suodatinkammion tilavuutta ja erotuspinta-alaa suunniteltaessa. (Porle ym. 2005, 8.)

Suodattimien mitoittaminen perustuu 1920-luvulla kehitettyyn Deutch – Anderson -yhtälöön, joka kertoo suodattimen erotusasteen. Yhtälö keskittyy varautuneen pölyhiukkasen ominaisvaellusnopeuteen ( $w$ ), joka kertoo varatun hiukkasen nopeuden kohti keräyslevyjä. Ominaisvaellusnopeutta määritettäessä on otettava huomioon muun muassa savukaasun lämpötila ja seossuhde sekä hiukkasten koko ja muoto. Alkuperäinen Deutch – Anderson -yhtälö ei ottanut huomioon hiukkaskoon eikä savukaasun pölypitoisuuden vaihtelua, joten kaavaan lisättiin vakio arvo ( $k$ ). Matts ja

Ohnfeldt muokkasivat vuonna 1963 erotusasteen kaavan muotoon (Porle ym. 2005, 11 & 15.):

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{w_k A}{Q}\right)^k} \quad (1)$$

jossa  $\eta$ = suodattimen erotusaste

$e$ = luonnollinen logaritmi

$A$ = suodattimen keräyspinta ala ( $m^2$ )

$w_k$ = ominaisvaellusnopeus (m/s)

$Q$ = savukaasun tilavuusvirta ( $m^3/s$ )

$k$ = vakio arvo väliltä 0.5–1.0

Sähkösuodattimien mitoittamisen haasteena on osata valita oikea ominaisvaellusnopeus, joka on yksi tärkeimmistä suodattimen kokoon vaikuttavista tekijöistä. Vaellusnopeuden valintaa vaikeuttaa se, että nopeutta ei pystytä määrittämään käytännössä vaan ainoastaan teoreettisesti laskemalla. Teoreettisesti laskemalla määritettyä ominaisvaellusnopeutta pienentämällä saadaan suodattimen mitoittamiselle lisättyä turvamarginaalia toimivuuden varmistamiseksi. (Porle ym. 2005, 15.)

Mitoituksessa huomioon otettavia tekijöitä ovat edellä mainittujen lisäksi muun muassa savukaasun seassa olevan lentotuhkan resistiivisyys, tuotantolaitoksen vuotuinen käyttöaika sekä suodattimessa olevien erotuskenttien lukumäärä. (Maaskola 2002, 44.)

Lentotuhkan resistiivisyys eli sähkönjohtavuuden käänteissuure vaikuttaa hiukkasten varaamiseen ja näin ollen erotuskykyyn sekä tehon tarpeeseen. Tuhkan resistiivisyys vaihtelee käytettävien polttoainneiden ainekoostumuksien mukaan. Resisttiivisyysalue olisi optimaalisimmillaan  $10^8 - 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ , jolloin koronavirta pystyy kulkemaan pölykerroksen läpi ja erotusaste olisi suurimmillaan. Lentotuhkan matala resistiivisyys johtaa keräyslevyihin tarttuneiden hiukkasten takaisin tempautumiseen savukaasuvirtaan. Matalaa resistiivisyystasoa voidaan kompensoida esimerkiksi kasvattamalla koronvirtaa ja vähentämällä keräyslevyjen puhdistamista. Korkea resistiivisyys taas johtaa pölykerroksessa olevien hiukkasten tarttumisen keräyspintaan niin voimakkaasti, että joudutaan lisäämään ravistuskertoja. (Maaskola 2002, 46 – 48.)

Sähkösuodatin voi koostua yhdestä tai useammasta erotuskentästä riippuen suodattimen käyttötarkoituksesta, puhdistettavan savukaasun koostumuksesta ja määrästä sekä vaaditusta hiukkaspäästötasosta. Yksi erotuskenttä koostuu yleisesti yhdestä muuntajasta, ravistimista, emissiolangoista sekä keräyslevyistä. Sähkösuodattimien pitkään (yli 8000h) kestävä yhtäjaksoisen ajoajan toimintavarmuuden lisäämiseksi suodattimet suunnitellaan usein monikenttäisiksi. Toimintavarmuuden kasvattamisen lisäksi useampi erotuskenttä lisää ravistuksen seurauksena savukaasuvirtaan taikaisin tempautuneiden hiukkasten uudelleen erottamista ja antaa lisää säätömahdollisuuksia savukaasun tuotannon vaihteluun. (Maaskola 2002, 44 & Porle ym. 2005, 3 & 14.)

### 5.3 Letkusuodatin

Letkusuodattimen toiminta perustuu savukaasun johtamiseen kuitumaisen kankaan läpi. Savukaasun pöly ja hiukkaset erottuvat savukaasusta letkun pinnalle, muodostaen pölykerroksen. Lentotuhkasta muodostunut pölykerros poistetaan letkun pinnalta esimerkiksi mekaanisesti ravistamalla, paineilmalla tai vastavirtaperiaatteella. Puhdistaminen tehdään suodattimen tukkiutumisen estämiseksi sekä painehäviön pienentämiseksi. (Huhtinen ym. 2000, 253.)

Suodatinkankaasta tehdään tavallisesti pitkä, ontto sylinterimäinen putki, jonka lävitse savukaasu virtaa. Letkusuodattimien kankaan materiaali valitaan prosessin mukaan. Materiaaleina käytetään muun muassa puuvillaa, nylonia, lasikuitua ja teflonia. Määräävänä tekijänä materiaalille on usein lämpötila, sillä esimerkiksi puuvilla ei kestä korkeaa lämpötilaa lasikuidun tavoin. Letkusuodattimilla päästään jopa 100 % erotusasteeseen, mutta keskimääräinen päästötaso suodattimilla normaalisti on noin 5–25 mg//Nm<sup>3</sup>. (Ohlström ym. 2005, 25.)

Letkusuodattimien vahvuudeksi voidaan lukea korkea erotuskyky monen kokoisille hiukkaspartikkeleille, ja sen matalia investointikustannuksia pesuriin ja sähkösuodattimeen verrattuna. Kyseisen savukaasun suodatusmenetelmän heikkouksina ovat suhteellisen korkeat käyttö- ja huoltokustannukset sekä huono korkean lämpötilan kesto (pl. keraamiset materiaalit). (Ohlström ym. 2005, 29; Maaskola 2002, 59.)

## 5.4 Savukaasupesuri

Savukaasupesurit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: rikinpoisto- ja lämmöntalteenottopesureihin sekä hiukkasten poistamiseen tarkoitettuihin pesureihin. Pesureiden toimintaperiaate perustuu savukaasuvirran sekaan ruiskutettavasta nesteestä, joka tarttuu virran mukana kulkeutuviin hiukkasiin. Ruiskutettava neste hajotetaan pieniksi pisaroiksi suuttimien avulla, jotta nesteelle tulisi mahdollisimman paljon tarttumapinta-alaa sekä tehokas kosketus pisaroiden ja pölyhiukkasten välille. Nesteestä sekä pölystä muodostuneet pisarat erotetaan toisistaan pisaranerotuksessa ja pölyseen nesteeseen sitoutunut lämpöenergia otetaan talteen kaukolämpöveden lämmittämistä varten. (Huhtinen ym. 2000, 255; Ohlström ym. 2005, 26.)

Savukaasun peseminen nesteen avulla mahdollistaa myös hiukkasten poiston lisäksi liukenevien kaasujen samanaikaisen puhdistamisen. Savukaasupesureita käytetäänkin yleisimmin rikkipäästöjen vähentämiseen esimerkiksi turvetta polttavilla laitoksilla. Savukaasupesurilla päästään pienhiukkasissa 80–99 %:n erotusasteeseen ja noin 50–150 mg/ Nm<sup>3</sup> päästötasoon. Korkean päästötason takia pesureita ennen on usein toinen savukaasun hiukkaspitoisuutta alentava menetelmä. (Ohlström ym. 2005, 27; Ympäristöministeriö 2012, 22.)

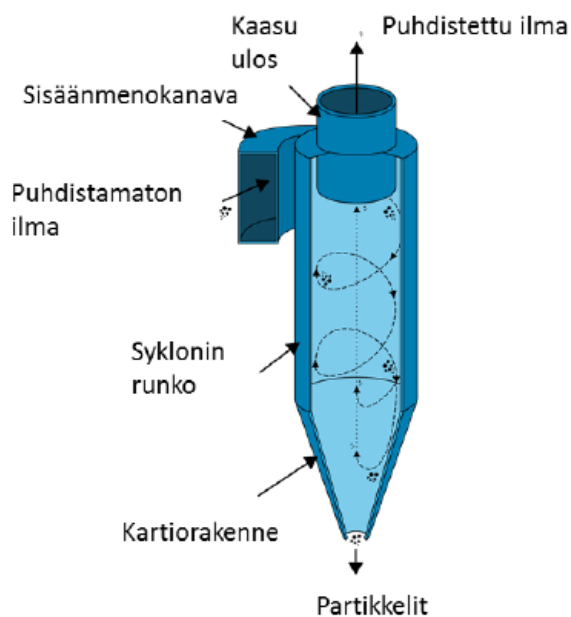
Savukaasupesureiden eduksi voidaan laskea hiukas- ja kaasupäästöjen yhtäaikaista poistamista. Lisäksi etuina ovat puhdistustehon säätö sekä kyky laskea savukaasun lämpötilaa nostaten laitoksen hyötysuhdetta. Heikkoutena pesureille ovat lisääntyvät jätevedenpuhdistuskulut sekä matala keräystehokkuus alle 1 µm:n hiukkasille. (Ohlström ym. 2005, 28.)

## 5.5 Syklonisuodatin

Sykloneiksi kutsutaan erotuslaitteita, joiden toiminta perustuu keskipakovoimaan. Hietaus- sekä keskipakovoima aikaansaavat sen, että savukaasun hiukkaset ajautuvat virtauksen ulkoreunalle törmäten suodattimen seinämiin ja tippuen pohjalla olevaan keräyssäiliöön. Puhdistunut savukaasu imetään suodattimen keskiosasta pois. Syklo-

nisuodattimien erotusastetta voidaan parantaa kytkemällä useampia suodattimia rinnan tai sarjaan, jolloin suodatinkokonaisuutta kutsutaan multisykloniksi. (Ohlström ym. 2005, 18–20.)

Syklonisuodattimet voidaan luokitella niiden rakenteen mukaan läpivirtaus- ja vastavirtasykloneihin. Läpivirtausyklonit ovat usein vaaka-asennossa ja niiden savukaasun tulo- ja menopuolet ovat yleensä vastakkaisissa päissä suodatinta. Savukaasuvirtaukseen saadaan pyörivä, spiraalimainen liike aikaiseksi ohjaussiipien avulla, joka tehostaa suodattimen hiukkasten erotuskykyä. Vastavirtaukseen perustuvassa syklonisuodattimessa suodattimen runko on pystyasennossa ja sen tulo- sekä menopuolet ovat suodattimen samassa päädyssä. Tulopuoli voi olla joko tangentiaalisesti tai aksiaalisesti suodattimeen nähden. Tangentiaalinen virtaus ei tarvitse avukseen ohjaussiipiä spiraalimaisen virtauksen aikaansaamiseksi aksiaalisen sisääntulon tavoin, koska virtaus ohjautuu suoraan kulkemaan suodattimen seinämää pitkin. (Maaskola 2002, 53–54.)



Kuvio 6. Vastavirtasyklonin toimintaperiaate (Raiko ym. n.d., 233)

Syklonisuodattimen erotusaste on parhaimmillaan suurille hiukkasille, mutta hiukkas-  
ten pienentyessä hiukkasten erotusaste pienenee radikaalisti. Hiukkaskoon ollessa

halkaisijaltaan yli 0.5 µm voidaan yhdellä syklonilla päästä 50–97 %:n suuruiseen erotusasteeseen. Erotusasteen nostamiseksi kannattaa sykcloneiden määrää lisätä. (Huh-tinen ym. 2000, 253.)

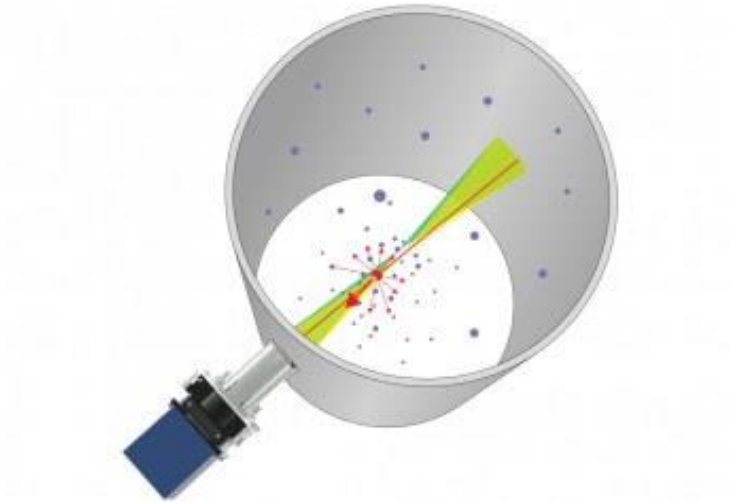
Suodattimien etuina voidaan pitää yksinkertaisuutta, edullisuutta sekä riippumatto-muutta lämpötilan muutoksista. Syklonisuodattimen heikkouksia ovat matala erotus-aste pienille hiukkasille sekä tukkeutumisvaara kosteilla savukaasuilla. (Ohlström ym. 2005, 28.)

## 6 Hiukkaspitoisuuden mittaaminen

Ympäristön suojelulaki vaatii vähintään 50 MW tuotantolaitosten seuraamaan tuo-tannon yhteydessä syntyviä päästöjä, kuten rikkidioksidi- ja hiukkaspäästöjä. Valtio-neuvoston asetuksen nro. 96/2013 mukaan savukaasun hiukkaspitoisuuksia on mitat-tava jatkuvasti polttoaineteholtaan vähintään 100 megawatin energiantuotantoyksi-köissä sekä tuotantoyksiköiden on tarkastettava mittausjärjestelmien luotettavuus ja tulosten taso vähintään kerran vuodessa. (Asetus 96/2013, Liite 3.)

Jyväskylän Energian Rauhalahden voimalaitoksella on hiukkaspitoisuusmittauksia prosessin kolmessa kohdassa. Kaksi sähkösuodattimien jälkeen ja kolmas savukaasu-pesurin jälkeen ennen savupiippua. Viimeisimmän pitoisuusmittauksen mittaaman tiedon mukaan hiukkaspäästölukemat kirjataan voimalaitoksen vuosiraporttiin. (Mä-kinen 2018.)

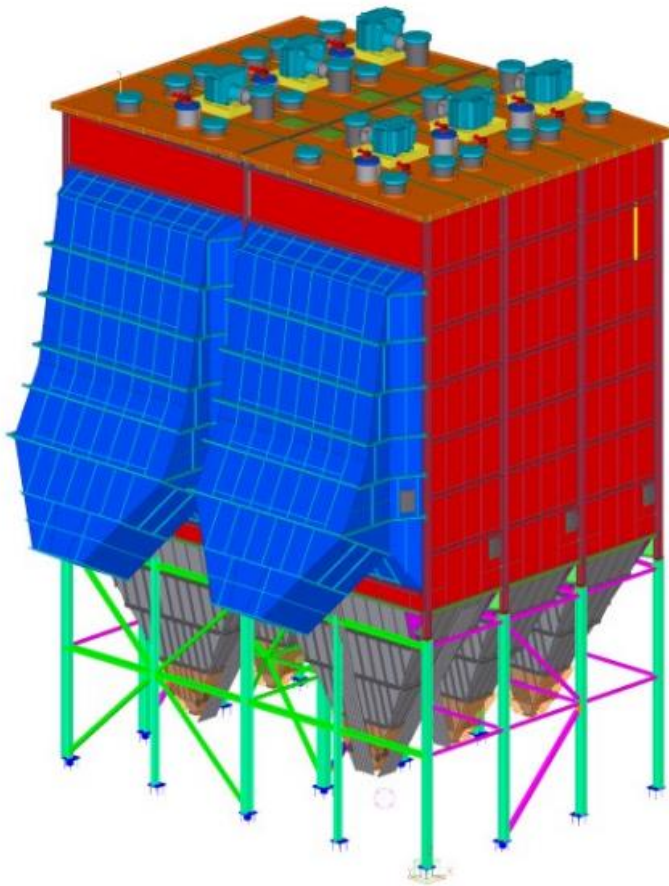
Rauhalahden voimalaitoksen sähkösuodattimien jälkeinen hiukkaspitoisuus mitataan savukaasukanavasta DURAG D-R 320 -mittalaitteella. Molemmille suodattimille on omat mittalaitteet, joiden avulla voidaan jatkuvasti seurata kummankin suodattimen jälkeistä savukaasun hiukkaspitoisuutta. (Mäkinen 2018.) D-R 320 -mittalaitteen toi-minta perustuu laservalon takaisinsirontaan hiukkasten pinnalta (ks. kuvio 7). Jatku-vatoiminen hiukkaspitoisuusmittari ei tarvitse mittaamiseen erillistä valoansaa, vaan laitteessa on automaattisesti muuttuva taustavalon kompensointi. Mittalaite sovel-tuu hiukkaspitoisuuden mittaukseen esimerkiksi voimalaitoksille ja sementtitehtaille. (DURAG Group n.d.)



Kuvio 7. DURAG D-R 320 -hiukkaspitoisuusmittari (DURAG Group n.d.)

## 7 Rauhalahden sähkösuodattimet

Rauhalahden voimalaitoksella on kaksi rinnakkaista sähkösuodatinta, jotka molemmat koostuvat kolmesta erotuskentästä. Rinnakkaiset sähkösuodattimet sijaitsevat saman suodatinkammion sisällä ilman erillistä väliseinää. (ECP Group Oy 2018) Rauhalahden sähkösuodattimen 3D-malli on nähtävissä kuviossa 8.

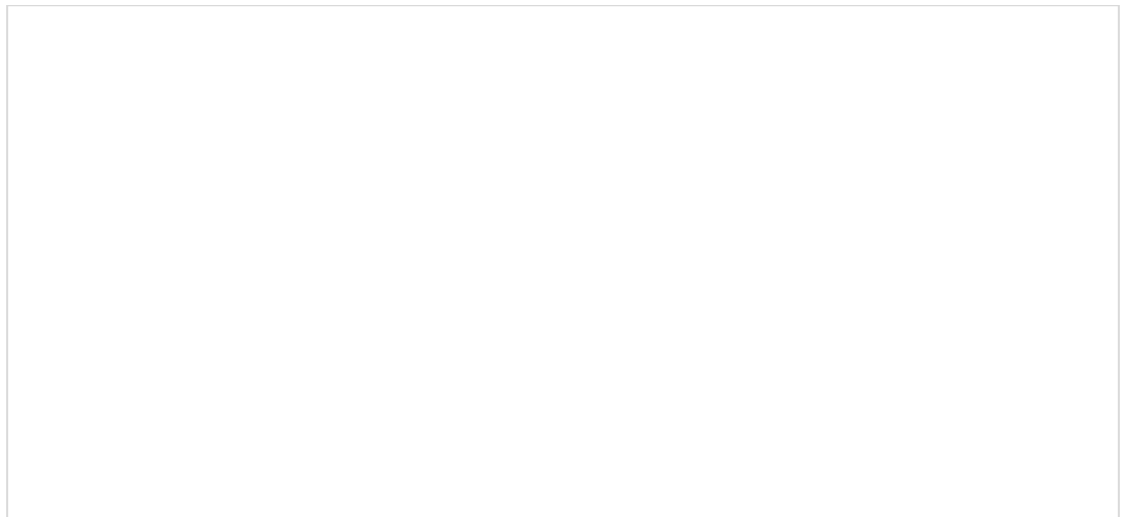


Kuvio 8. Rauhalahden sähkösuodattimen 3D-malli (ECP Group Oy 2018)



Sähkönsyötön ja katkaisemisen lisäksi ohjainyksikön kautta voidaan muuttaa virran ja jännitteen suuruutta. Lisäksi ohjainyksikön avulla pystytään valvomaan ja kontrolloimaan mahdollisesti käytön aikana syntyviä vastakorona- ja läpilyönti-ilmiöitä sekä asettamaan halutut ravistussekvenssit. (Kraft Powercon 2013, 3–8.)

Micro-Kraft 3 -ohjainyksiköiden tiedot menevät sähkösuodattimen paikallislogiikkaan. Paikallislogiikka (ks. kuvio 10) on ohjelmoitu Siemens SIMATIC-ohjelmalla, johon on kerätty kaikki suodattimen mittauksista tuleva tieto ravistuksen käynnistymisestä hiukkaspitoisuuteen. (ECP Group Oy 2018)



Kuvio 10. Sähkösuodattimen paikallislogiikan näyttö (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

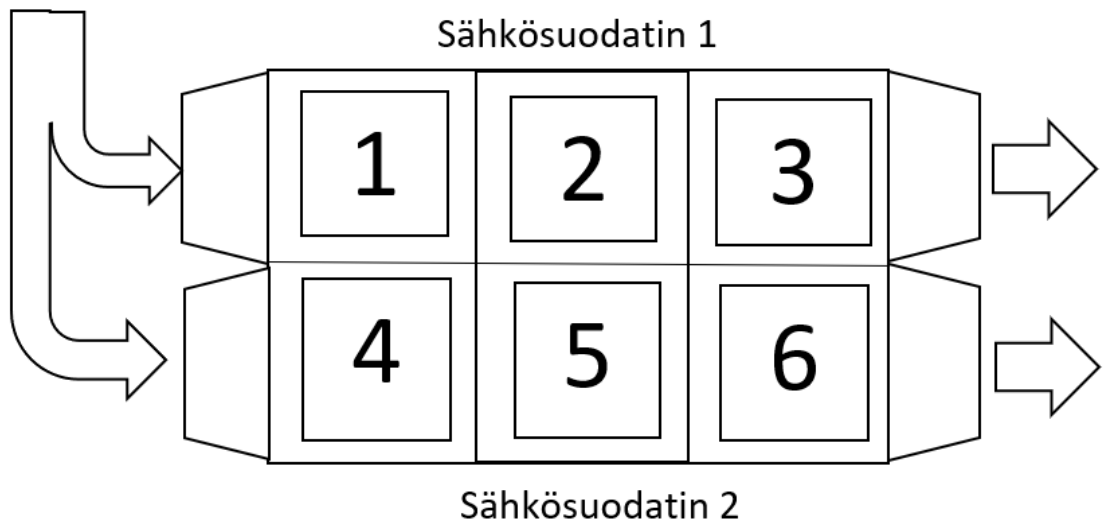
## 8 Sähkösuodattimen sähkönsäädön ja hiukkaspäästöjen optimointi

### 8.1 Tutkimusaineiston kerääminen

Rauhalahden sähkösuodattimien erotuskenttien virta-arvot on asetettu pysyviksi, eivätkä ne automaattisesti suurene tai pienene esimerkiksi kattilatehon tai hiukkaspäästöjen muutosten mukaan. Ennen sähkösuodattimen virta-arvojen muuttamista kerättiin lähtötilanteen arvot paikallislogiikan näytöltä. Suodattimien 1 ja 2 toisiovirtojen asetusarvot, suodattimien jälkeinen hiukkaspitoisuus sekä prosessiarvot ovat taulukossa 3.

Taulukko 3. Lähtö- ja prosessiarvot 1.3.2018 klo 6.25 (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)


Mittauksen ja säädön aikana operoitavien erotuskenttien virta-arvot käytiin läpi 100 mA:n välein 0 mA:sta virran huippuarvoon tai läpilyöntiin saakka. Operoinnin ulkopuolella olevat kentät jätettiin asetusarvoihin operoitavien kenttien virta-arvojen säätöjen ajaksi. Operoitujen kenttien koko virta-alueen läpikäymisen jälkeen arvot palautettiin asetusarvoihin ja siirryttiin operoimaan seuraavia rinnakkaisia kenttiä. Sähkösuodattimien kenttien sijainnit ovat nähtävissä kuviossa 11.



Kuvio 11. Sähkösuodattimien erotuskenttien sijainnit Rauhalahden voimalaitoksella

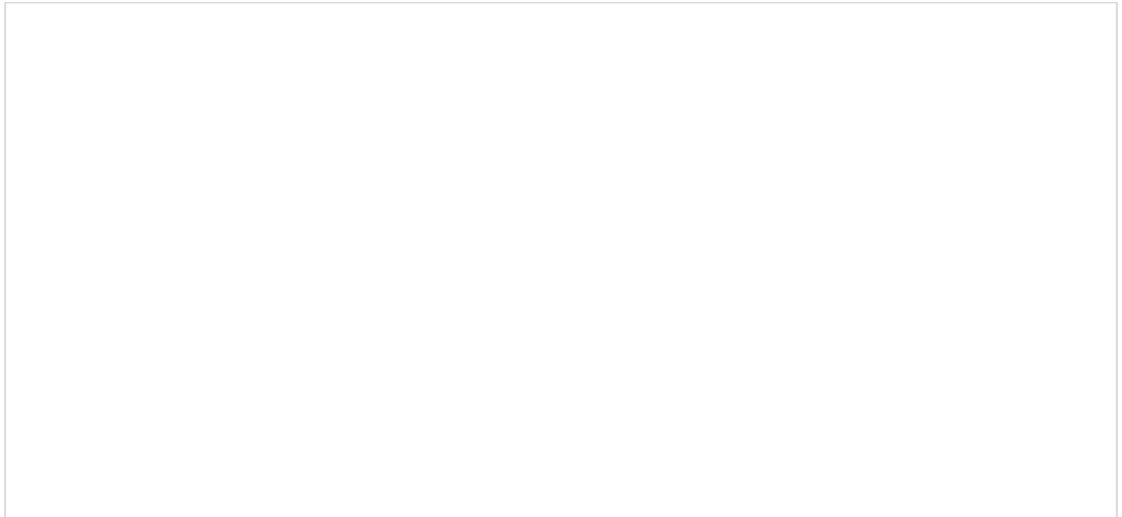
Sähkösuodattimien operoiminen aloitettiin viimeisistä kentistä (3 ja 6), joiden jälkeen siirryttiin rinnakkaiset kentät kerrallaan kohti suodattimen ensimmäisiä kenttiä. Jokaisen kentän operoiminen alkoi asettamalla operoitavan kentän korkeajännitemuuntajaa ohjaava Micro-Kraft -ohjainyksikkö etäkäytöltä paikalliskäytölle, jotta päästiin säätämään emissiolankoihin syötettäviä virta-arvoja. Virta-arvomuutoksen jälkeen annettiin hiukkaspitoisuusarvon tasaantua. Tasaantumisen lisäksi seurattiin paikallisnäytöltä (ks. kuvio 10, s. 32) ravistusmoottoreiden käyntitietoa, etteivät ravistukset olleet päällä juuri ennen pölyarvon kirjaamista mittauspöytäkirjaan (ks. liite 1). Ravistukset olisivat voineet vaikuttaa oleellisesti pölyarvon kasvamiseen sekä mitauslaadun alenemiseen. Toisiovirran ja hiukkaspitoisuuden muutosten mukaan tehtiin kuvaajia selkeyttämään kenttien virta-arvojen muutoksen vaikutuksesta hiukkaspitoisuuteen.

Operoitavien kenttien virta-arvot muutettiin asetusarvoista aluksi 100 mA:iin, minkä jälkeen säätäminen toistettiin 100 mA:n välein aina huippuarvoon tai läpilyöntiin saakka. Huippuarvon löytymisen jälkeen kokeiltiin, kuinka pölypitoisuus muuttuu erotuskentän ollessa kokonaan pois käytöstä. Voimalaitoksen turvalukitusten takia voitiin ottaa vain yksi kenttä pois käytöstä kerrallaan, minkä johdosta kyseinen vaihe

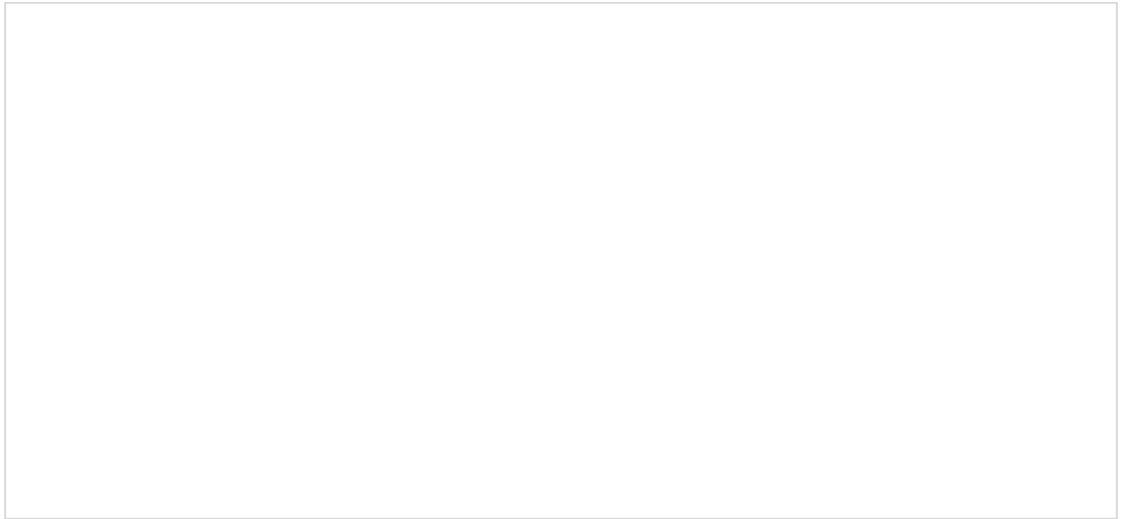
piti tehdä porrastetusti rinnakkaisten kenttien säätämisen välillä. Hiukkaspitoisuusmittarin mittausalue on 0–30 mg/Nm<sup>3</sup>, joten yli 30 mg/Nm<sup>3</sup>:n päästölukemiin työ ei ota kantaa.

Kaikissa kenttien trendikäyräkuvioissa näkyy toisiovirran lisäksi kattilateho sekä hiukkaspitoisuus. Kattilateho on jokaisessa trendikuviossa piirtyneenä oranssilla ja hiukkaspitoisuus ensimmäisen suodattimen kenttien trendeissä sinisenä ja toisen suodattimen trendeissä vaaleanpunaisena. Toisiovirta-arvon piirtämän käyrän tunnistaa porrasmaisuudesta 100 mA:n välein tapahtuvien sähkövirran nostamisien takia.

## 8.2 1-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

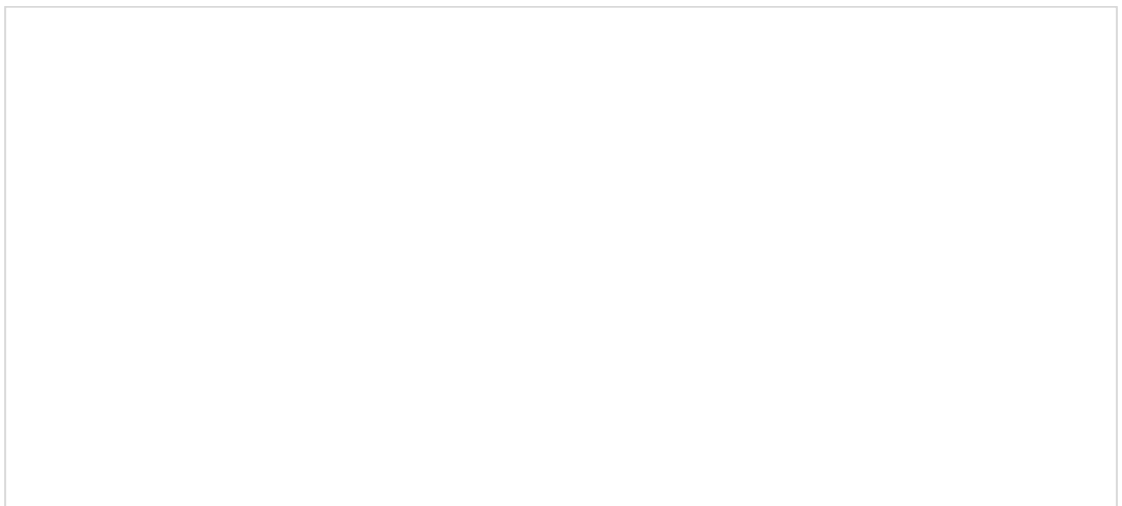


Kuvio 12. 1-kentän pöly/virta -kuvaaja

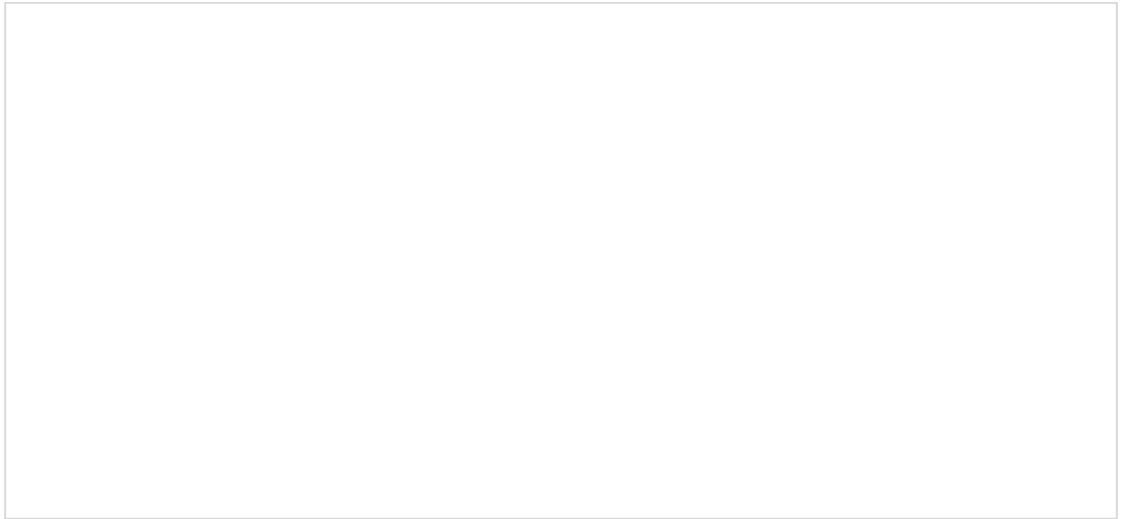


Kuvio 13. 1-kentän trendikäyrät

### 8.3 2-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

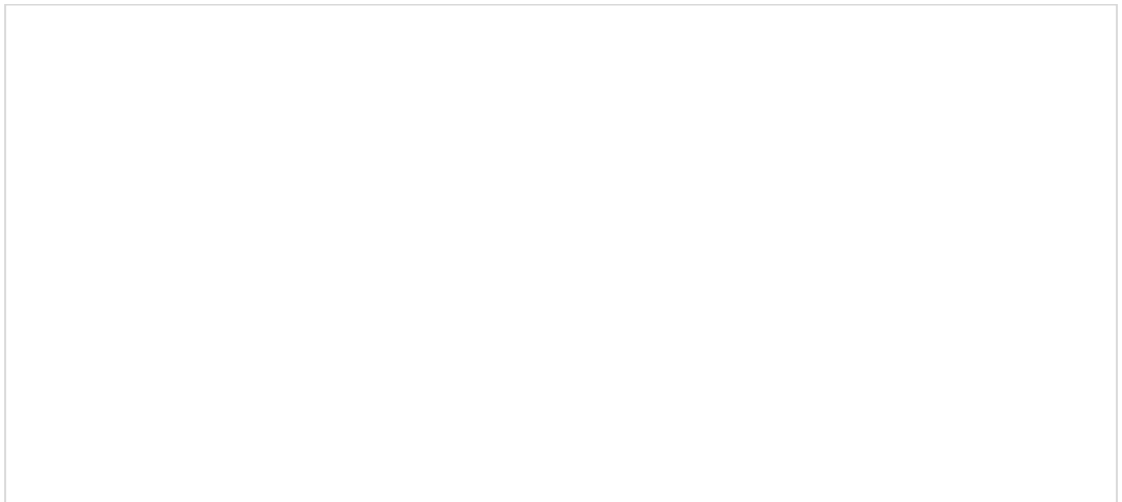


Kuvio 14. 2-kentän pöly/virta -kuvaaja

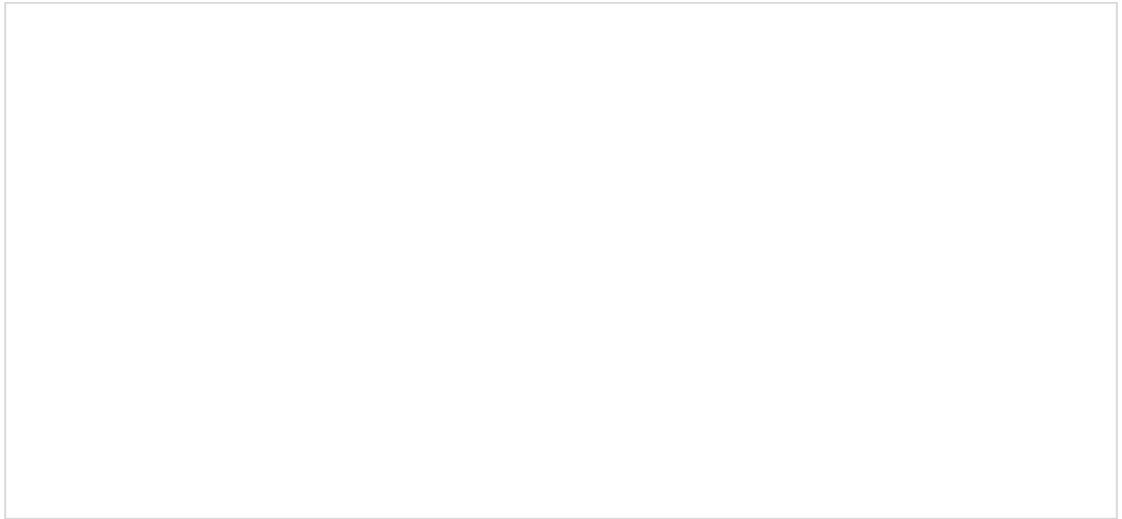


Kuvio 15. 2-kentän trendikäyrät

#### 8.4 3-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

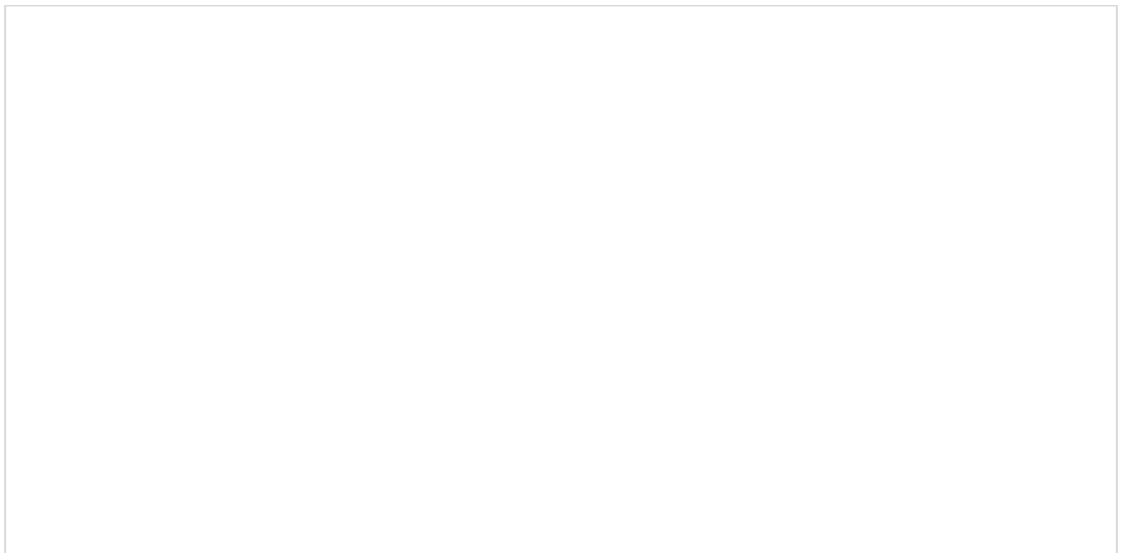


Kuvio 16. 3-kentän pöly/virta -kuvaaja

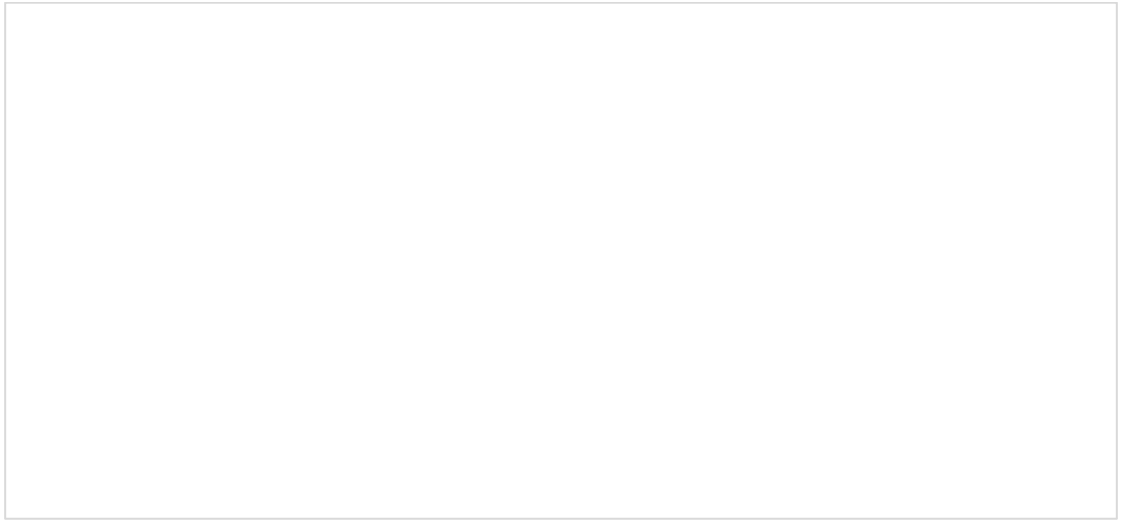


Kuvio 17. 3-kentän trendikäyrät

#### 8.5 4-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

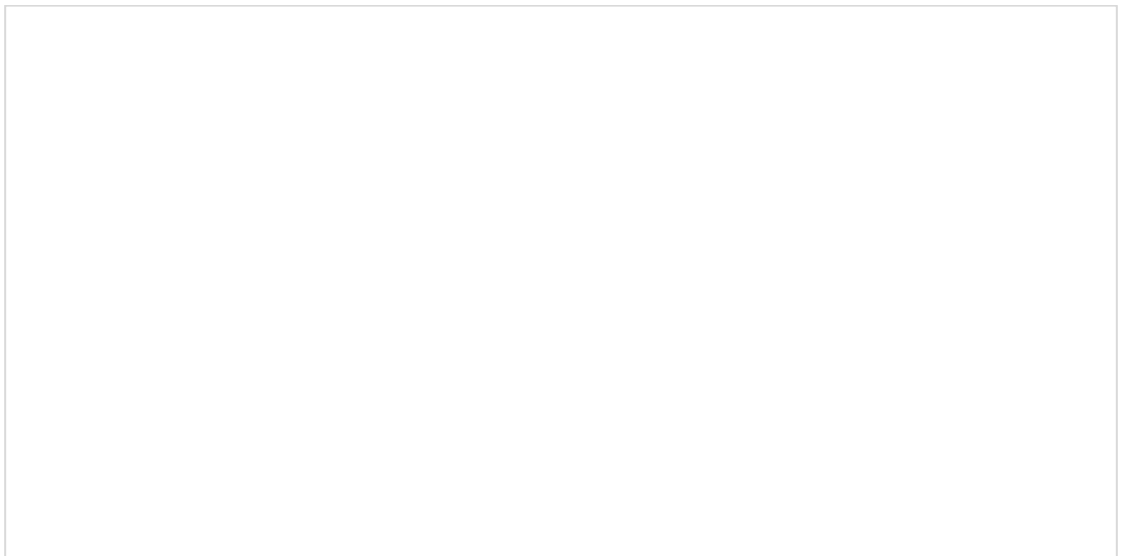


Kuvio 18. 4-kentän pöly/virta -kuvaaja

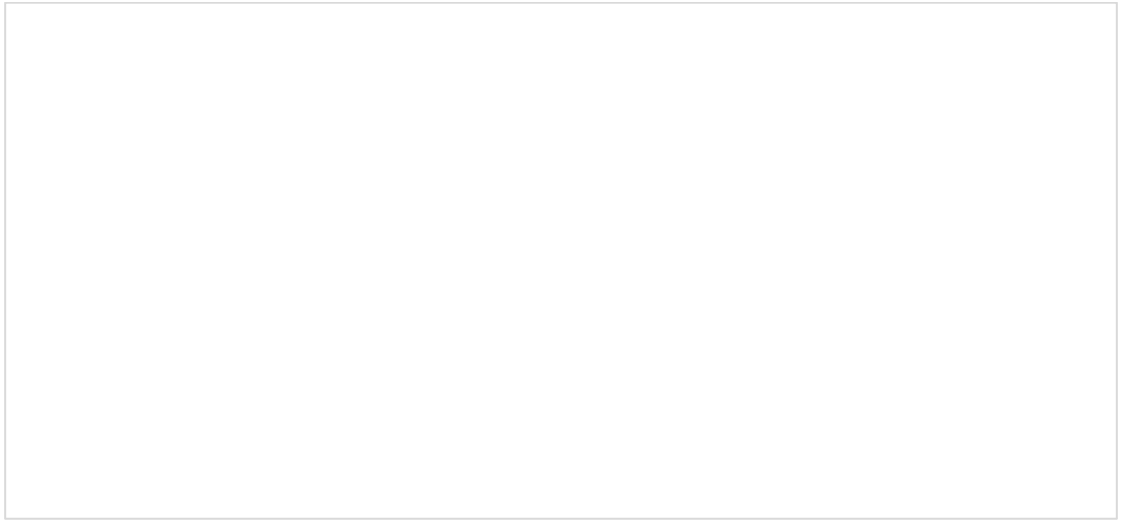


Kuvio 19. 4-kentän trendikäyrät

#### 8.6 5-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

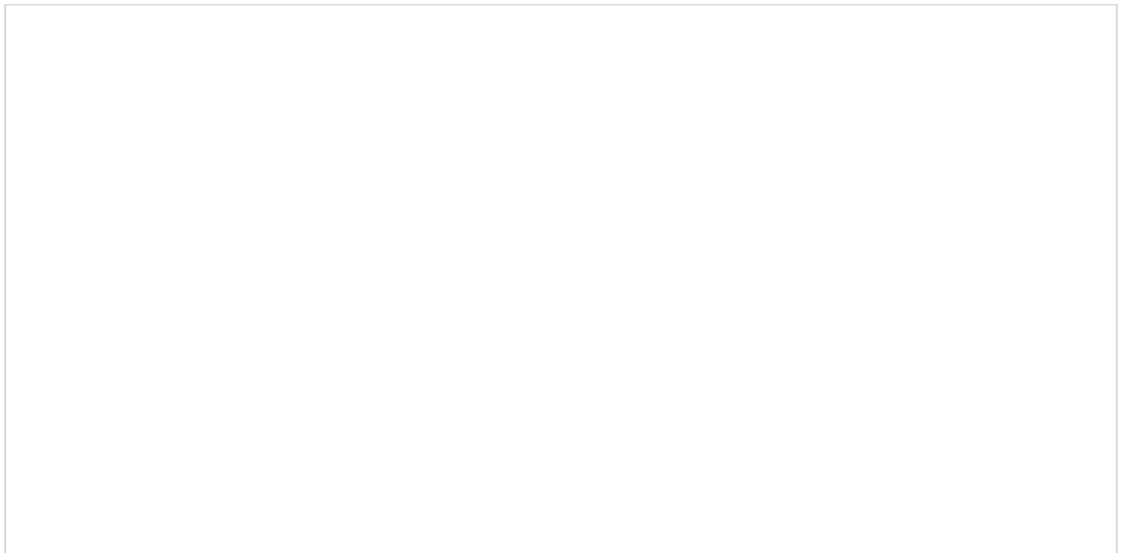


Kuvio 20. 5-kentän pöly/virta -kuvaaja

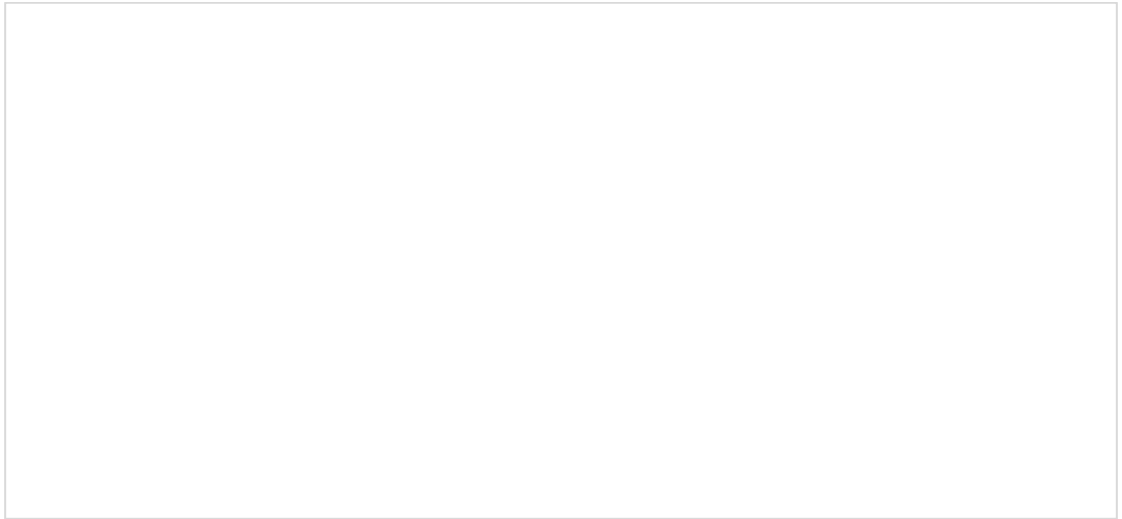


Kuvio 21. 5-kentän trendikäyrät

### 8.7 6-kenttä (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

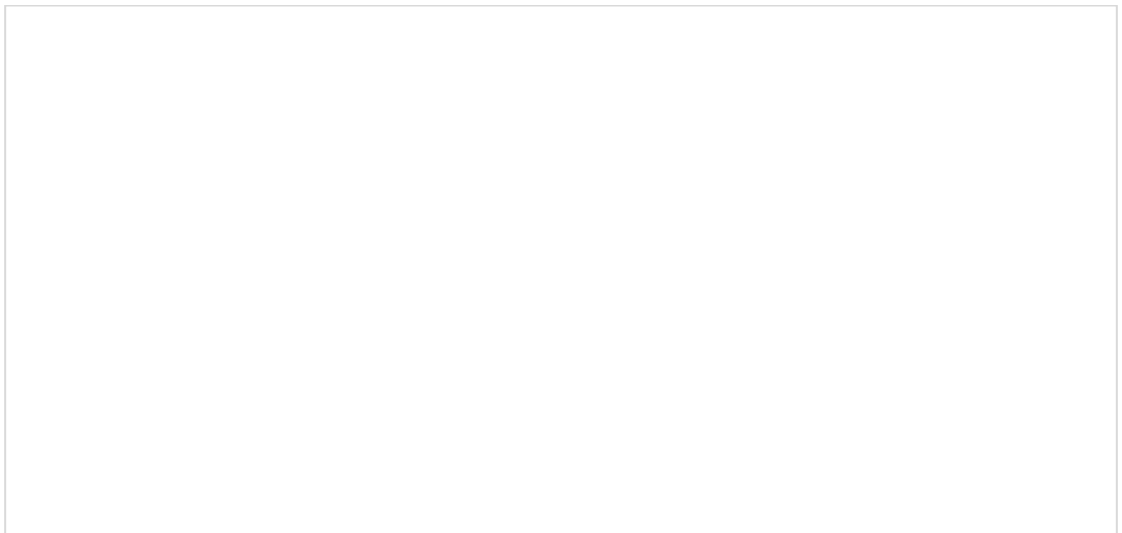


Kuvio 22. 6-kentän pöly/virta -kuvaaja

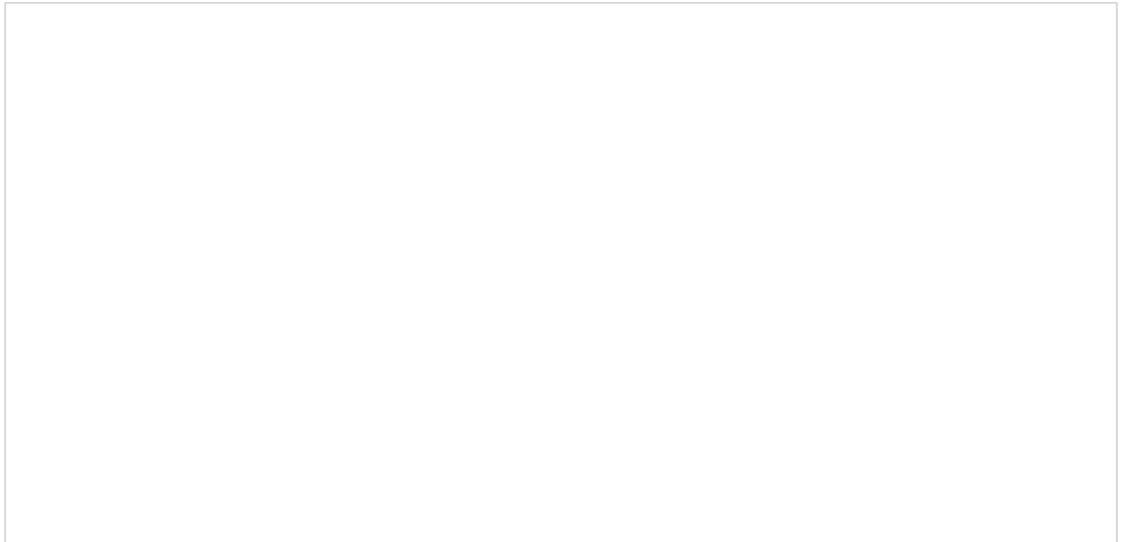


Kuvio 23. 6-kentän trendikäyrät

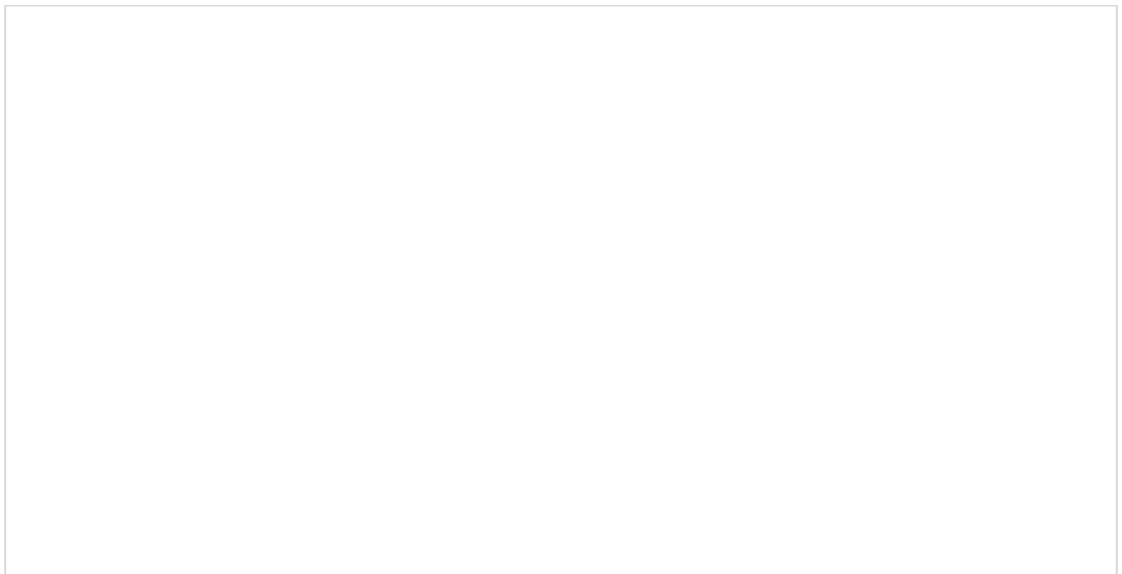
## 9 Tutkimustulokset (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)



Kuvio 24. Suodattimien ensimmäisten erotuskenttien pöly/virta -kuvaaja



Kuvio 25. Suodattimien keskimmäisten erotuskenttien pöly/virta -kuvaaja



Kuvio 26. Suodattimien viimeisten erotuskenttien pöly/virta -kuvaaja

## 10 Johtopäätökset

Tutkimuksen avulla saatiin vastaukset toimeksiantajan kanssa yhdessä pohdittuihin tutkimuskysymyksiin. Opinnäytetyön tutkimuskysymyksiä olivat, kuinka virta-arvojen muuttaminen vaikuttaa suodattimen pölyn erotuskykyyn, onko sähkökenttien

virta-arvojen optimoinnilla vaikutusta asiakkaan energiansäästöön sekä kuinka yhden kentän käytöstä pois kytkeminen vaikuttaa suodattimen hiukkaspäästöön.

Tulosten perusteella Rauhalahden sähkösuodattimilla päästään tarpeen vaatiessa erittäin matalaan päästötasoon. Suodattimet toimivat teoriaosassa kerrotun mukaisesti. Ensimmäisillä erotuskentillä vaikutetaan hiukkaspäästöön kaikkein eniten. Suodattimen alkuosat erottavat suurimman osan savukaasussa olevista karkeista ja suurista hiukkasista ja jälkimmäiset kentät poistavat jäljellä olevia pienimpiä hiukkasia.

## 11 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli optimoida Jyväskylän Energian Rauhalahden voimalaitoksella olevien sähkösuodattimien toimintaa. Tarkoituksena oli mittausten avulla selvittää kahden rinnakkaisen sähkösuodattimen sähkökenttien optimaaliset virta-arvot jokaiseen kenttään sopivaksi.

Opinnäytetyölle määritettyyn tavoitteeseen päästiin ja tutkimuksen lopputuloksena syntyi mittaustietoon perustuvat tulokset sähkövirran muutoksen vaikutuksesta hiukkaspäästöön. Tutkimustulosten perusteella sähkösuodattimien sähkövirtojen optimoiminen toisi merkittävää rahallista säästöä Jyväskylän Energialle. Ilmansuojeluun ja ympäristötekniikkaan erikoistunut opinnäytetyön toimeksiantaja ECP Group Oy tulee jatkossa hyödyntämään tutkimustuloksia uusien sähkösuodattimien suunnittelussa. Lisäksi Jyväskylän Energia Oy:llä on mahdollisuus hyödyntää tutkimustuloksia toiminnassaan ja saada siten käyttöönsä mahdollisimman energiatehokas ajomalli suodattimilleen.

Kattilatehon suuruuden vaihtelu mittauksen ja säädön aikana voi vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Tulosten luotettavuutta lisäisi myös mittausten toistaminen toisena mittauspäivänä, jolloin saatuja tuloksia voitaisiin verrata keskenään. Tämä voisi tasoitaa kattilatehon muutoksen mahdollista vaikutusta tuloksiin.

Jatkoehdotuksena olisi, että pohjasuppiloiden lentotuhkasta otettaisiin näytteet, joiden sisältämä hiukkaskoko määritettäisiin. Hiukkaskokojakauman avulla voitaisiin

tutkia, kuinka partikkelikooltaan erikokoiset hiukkaset jakautuvat suodattimien suppiloihin. Tämä antaisi lisätietoa suodattimiin syötettävän virran suuruuden asettamiseen.

## Lähteet

- A 31.1.2013/96. Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan vähintään 50 megawatin polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta. Viitattu 5.3.2018.  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130096>
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Viitattu 17.1.2018 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>
- D-R 320. N.d. Dust Monitor for smallest to medium concentrations. N.d. DURAG Group. Viitattu 5.3.2018.  
[https://www.durag.com/fileadmin/files/Products/Measuring\\_Monitoring/Dust\\_Monitoring/D-R\\_320/Downloads/bro\\_dr320\\_en.pdf](https://www.durag.com/fileadmin/files/Products/Measuring_Monitoring/Dust_Monitoring/D-R_320/Downloads/bro_dr320_en.pdf)
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki. Edita.
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen S. 2013. Voimalaitostekniikka. Helsinki. Opetushallitus.
- Ilmansuojelu. 2015. Ympäristöministeriö. Viitattu 21.3.2018.  
[http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmansuojelu](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Ilmansuojelu)
- JE-yhtiöt. N.d. Jyväskylän Energia Oy. Viitattu 21.2.2018.  
<http://www.jyvaskylanenergia.fi/je-yhtiöt>
- Kananen, J. 2013. Case tutkimus opinnäytetyönä. Jyväskylä. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja nro 143.
- Kiinteän biopolttoaineen palaminen. 2010. Uutinen Metsäalan ammattilehden www-sivuilla 14.12.2010. Viitattu 21.1.2018.  
<https://www.ammattilehti.fi/uutiset.html?a15700=1959>
- Kovacs, J. & Roberts, P. 2001. Combustion Handbook. IFHR. Viitattu 17.1.2018.  
<http://www.handbook.ifrf.net/handbook/cf.html?id=87>
- Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012. Ympäristöministeriö. Viitattu 6.2.2018.  
<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BC1EA01A4-C78E-4152-A601-3AE51323EDEB%7D/119826>
- LCP BREF-kustannusvaikutukset biomassaa ja turvetta käyttäville polttolaitoksille. 2016. Energiateollisuus ry & Metsäteollisuus ry. Viitattu 30.1.2018.  
[https://energia.fi/files/1126/LCP\\_BREF-kustannustarkastelu\\_Bio\\_ ja\\_turvekattilat\\_final.pdf](https://energia.fi/files/1126/LCP_BREF-kustannustarkastelu_Bio_ ja_turvekattilat_final.pdf)
- Leinonen, A. 2010. Turpeen tuotanto ja käyttö. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Viitattu 19.1.2018. [www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2550.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2550.pdf)
- Maaskola, T. 2002. Puun ja turpeen sekapolton vaikutus leijukerroskattilan hiukkaspäästöihin. Diplomityö. Yliopisto. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, energiatekniikan osasto. Viitattu 30.1.2018.

<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/35019/nbnfi-fe20021410.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Micro-Kraft 3 -ohjainyksikön tekninen erittely. 2013. Kraft Powercon.

Mäkinen, T. 2018. Prosessi- ja kehitysmestari. Jyväskylän Energia Oy. Haastattelu 28.2.2018.

Ohlström, M., Tsupari, E., Lehtilä, A. & Raunemaa, T. 2005. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Espoo. Viitattu 31.1.2018. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2300.pdf>

Parker, K. 2007. Electrical Operation Of Electrostatic Precipitators. London. The Institution of Engineering and Technology.

Pessa, M. 2016. Suurten polttolaitosten savukaasujen puhdistusmenetelmät. Kandidaatintyö. Yliopisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Viitattu 22.2.2018. [http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/122833/Kandidaatintyo\\_Pessa\\_Matias.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/122833/Kandidaatintyo_Pessa_Matias.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Porle, K., Francis, S.L. & Bradburn, K.M. 2005. Electrostatic Precipitators for industrial applications. Bryssel. REHVA - Federation of Heating and Air-conditioning Assosiations.

Rabbe, T. & Korhonen, M. 1999. Energia- ja ympäristötekniologia. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Espoo. Viitattu 22.3.2018. [www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/1999/S191.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/1999/S191.pdf)

Raiko, R., Kirvelä, K., Tolvanen, H. & Pääkkönen, A. N.d. Energiatekniikan perusteet. Voimalaitos ja polttotekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 6.3.2018. <https://tuppu.fi/wp-content/uploads/2017/02/Energiatekniikan-perusteet.pdf>

Sisäinen tiedonanto. 2018. ECP Group Oy. 28.2.2018.

Sähkösuodatin. N.d. KPJB Company. Viitattu 13.4.2018. <http://www.kpjb.co.id/knowledge-corner/electrostatic-precipitator-esp/>

Sähkösuodattimen käyttö- ja huoltoohjeet. N.d. ECP Group Oy. Jyväskylä. Rauhalahden voimalaitos.

Talka, I. 2006. Pienpoltto hiukkasten sähköinen suodattaminen. Pro gradu-tutkielma. Yliopisto. Jyväskylän yliopisto. Viitattu 22.3.2018. [https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/8192/URN\\_NBN\\_fi\\_jyu-200693.pdf?sequence=1](https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/8192/URN_NBN_fi_jyu-200693.pdf?sequence=1)

Tietoa meistä. N.d. ECP Group Oy. Viitattu 22.1.2018. <https://ecpgroup.eu/about/>

Tuotantolaitokset. N.d. Jyväskylän Energia Oy. Viitattu 22.2.2018. <http://www.jyvaskylanenergia.fi/lampo/kaukolammon-tuotanto/energiantuotantolaitokset>

Turve raaka-aineena. N.d. Geologian tutkimuskeskuksen verkkojulkaisu. Viitattu 19.1.2018. <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/turve/>

Öljy, kaasu ja kivihiili. N.d. Geologian tutkimuskeskuksen verkkojulkaisu. Viitattu 21.1.2018. <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/oljy/>

## Liitteet

Liite 1. Mittauspöytäkirja (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

Liite 2. Savukaasupesurin jälkeiset savukaasuarvot 1.3.2018 (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

Liite 3. Esimerkkilaskelma (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)

Liite 4. Sähkösuodattimien tuhkalähettimet (salattu salassapitosopimuksen mukaisesti)