



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ESISELVITYS SAVUKAASU- JEN PUHDISTAMISESTA

Salmen Metalli Oy

TEKIJÄ: Henri Tiihanoff

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Henri Tiihanoff	
Työn nimi Esiselvitys savukaasujen puhdistamisesta	
Päiväys	18.11.2018
Sivumäärä/Liitteet	28
Ohjaaja(t) Anssi Suhonen, Sami Ipatti ja Henri Salmi	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Salmen Metalli Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda selvitys savukaasujen puhdistamisesta asiakkaan kohteessa. Olennaisena osana työtä oli kattilalaitosten toiminnan ymmärtäminen sekä paneutuminen erilaisten savukaasujen puhdistusmenetelmien ominaispiirteisiin. Tavoitteena oli luoda ehdotelma kohteeseen sopivasta puhdistusmenetelmästä nykytilanne sekä lähitulevaisuuden vaatimukset huomioiden.</p> <p>Kohteen suurimpana ongelmana oli kaukolämpölaitoksen toiminnasta aiheutuvat näkyvät hiukkaspäästöt, jotka otollisten sääolosuhteiden aikana saastuttivat kyseisen lämpölaitoksen lähiympäristön sekä kulkeutuivat tuulen mukana myös läheiselle taajama-alueelle/asutusalueelle.</p> <p>Työn aloitusvaiheessa pidimme yhdessä Konneveden kaukolämpö Oy:n sekä Salmen Metalli Oy:n edustajien kanssa aloituspalaverin, jonka pohjalta aloimme perehtyä ongelmaan ja sen vaatimiin toimenpiteisiin. Aloituspalaverissa tutustuttiin yhdessä asiakkaan kanssa kaukolämpölaitokseen ja sen erityispiirteisiin, kuten sen käyttämään laitteistoon. Työn eteneminen vaati aktiivista tiedonhankintaa ja yhteistyötä muun muassa erinäisten laitevalmistajien kanssa.</p> <p>Jotta soveltuvin savukaasujen puhdistusmenetelmä voitiin arvioida ja valita, suoritettiin omavalvonnallinen päästömittaus. Päästömittauksen jälkeen pidettiin toinen välipalaveri, jossa tuloksista keskusteltiin asiakkaan kanssa. Mittausraportin osoittamien tulosten perusteella pystyttiin rajamaan menetelmiä sekä kartoittamaan ongelman laajuus.</p> <p>Lopputulena tuotettiin raportti, joka tuki asiakasta jatkotoimenpiteissä. Tässä tapauksessa se tarkoitti tietyn puhdistusmenetelmän valintaa. Asiakas oli tyytyväinen raporttiin.</p>	
Avainsanat savukaasu, puhdistusmenetelmä, pienhiukkanen, päästömittaus	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Industrial Engineering and Management			
Author(s) Henri Tiihanoff			
Title of Thesis Prestudy of flue gas purification			
Date	18.11.2018	Pages/Appendices	28
Supervisor(s) Anssi Suhonen, Sami Ipatti and Henri Salmi			
Client Organisation /Partners Salmen Metall Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of the thesis was to provide a study of purification of flue gases in the customer's premises. An essential part of the work was understanding the operation of boiler plants and focusing on the characteristics of various flue gas purification methods. The aim was to create a proposal for a suitable purification method for the site, taking into account the current situation and the requirements of the near future.</p> <p>The main problem with the site was the visible particle emissions due to the operation of the district heating system which, during favorable weather conditions, contaminated the immediate environment of the thermal plant concerned and the wind carried the particles to the nearby urban area.</p> <p>At the start-up phase of the project, we had a start-up meeting with Konneveden kaukolämpö Oy and representatives of Salmen Metall Oy, on the basis of which we began to become familiar with the problem and the measures it requires. At the start-up meeting, the customer was informed about the district heating plant and its special features, such as the equipment it uses. The work progress required active information acquisition and cooperation with, among other things, various equipment manufacturers.</p> <p>In order to evaluate and select the most suitable flue gas purification method, self-monitoring was performed. After the measurements, a second midterm meeting was held where the results were discussed with the customer. Based on the results of the measurement report, it was possible to limit the methods and to measure the extent of the problem.</p> <p>A completed report was finalized to support the customer in the follow-up of the matter. In this case, it meant selecting a particular purification method. The customer was satisfied with the report.</p>			
<p>Keywords flue gas, purification method, fine particle, emission measurement</p>			

ALKULAUSE

Haluan kiittää Konneveden kaukolämpö Oy:tä sekä Salmen Metalli Oy:tä mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta sekä moitteettomasti sujuneesta yhteistyöstä. Opinnäytetyön tekeminen on merkittävästi parantanut tietämystäni savukaasujen puhdistamiseen käytetyistä menetelmistä sekä opettanut huomaamaan raportoinnin tärkeyden sekä järjestelmällisyyden merkityksen. Lisäksi haluan kiittää ohjaavia opettajia työn etenemiseen ja toteutukseen liittyvistä neuvoista. Kiitokset merkittävästä tuesta kuuluvat myös kihlatulleni.

Kuopiossa marraskuussa 2018

Henri Tiihanoff

SISÄLTÖ

ALKULAUSE	4
1 JOHDANTO.....	6
1.1 Lähtötiedot.....	6
1.1.1 Laitteisto	7
1.1.2 Toteuttamisprosessi	9
1.1.3 Muuttujat	10
1.2 Tavoitteet.....	10
1.3 Lyhenteet ja määritelmät.....	10
2 SAVUKAASUJEN PUHDISTAMISESSA KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO.....	12
2.1 Dynaamiset erottimet.....	13
2.1.1 Sedimentaatiokammiot ja lamellierotin	14
2.1.2 Sykloni	14
2.2 Sähkösuodatin	15
2.3 Märkäpesuri.....	16
2.3.1 Venturipesuri	17
2.3.2 Pesutorni	18
2.3.3 Syklonipesuri	19
2.4 Kuitusuodatin	20
3 TOTEUTUS	22
3.1 Toimivuuden arviointi.....	22
3.2 Puhdistustehon todentaminen.....	22
3.3 Kohteessa suoritettut mittaukset.....	23
3.4 Mittaustulosten analysointi ja johtopäätökset.....	23
4 YHTEENVETO	25
LÄHDELUETTELO	27
LIITE 1: ESISELVITYS SAVUKAASUJEN PUHDISTUKSESTA	28
LIITE 2: MITTAUSRAPORTTI.....	28

1 JOHDANTO

Energiantuotantolaitoksien, kuten myös muiden voimalaitoksien, toiminnasta/polttoprosesseista aiheutuu erilaisia vaarattomia sekä haitallisia yhdisteitä sisältäviä savukaasuja. Päästöjen aiheuttamien haittavaikutuksien vähentäminen on ensisijaisen tärkeää sekä luonnon että ihmisten hyvinvoinnin kannalta. Tyypillisimpiä haittavaikutuksia ovat muun muassa hengitysteiden oireet sekä -sairaudet, happamat sateet, ympäristön likaantuminen ja ilmaston lämpeneminen.

Tämä opinnäytetyö tarkastelee savukaasujen puhdistusta pääasiassa näkyvien pienhiukkasten ja niiden aiheuttaman ympäristön sotkeentumisen kannalta.

Tavoitteena on tuottaa esiselvitys Konneveden Kaukolämpö Oy:lle savukaasujen puhdistamiseksi, jossa ilmenee sopivin vaihtoehto savukaasujen puhdistukseen Konneveden Kaukolämpö Oy:n kaukolämpölaitoksella. Esiselvitystyö sisälsi muun muassa tutustumisvierailun kohteeseen, jolla kartoitettiin kohteen tämänhetkinen tila sekä tiivistä yhteistyötä eri laitevalmistajien kanssa. Esiselvityksen tavoitteena on ehdottaa sopivinta menetelmää kohteeseen annettujen vaatimuksien mukaisesti.

Työssä perehdytään energiantuotantolaitoksien pienhiukkaspäästöihin, käydään läpi erilaisia savukaasujen puhdistusmenetelmiä sekä -laitteita yleisellä tasolla sekä luodaan kirjallinen raportti erilaisista puhdistusmenetelmistä ja niiden ominaispiirteistä.

1.1 Lähtötiedot

Konneveden Kaukolämpö Oy tilasi esiselvityksen sopivimmasta savukaasujen puhdistusmenetelmästä kohteessaan, jolla minimoidaan näkyvät hiukkaspäästöt. Esiselvityksen tarpeeseen vaikutti muun muassa toimeksiantajan saamat useat huomautukset näkyvistä ja ympäristöä sotkevista hiukkaspäästöistä, jotka myöhemmin vaikuttivat myös esiselvityksen aikataulun kiristymiseen alkuperäisestä. Konneveden Kaukolämpö Oy:n lämpölaitoksen muutostyössä pyritään tavoittelemaan PIPO-asetuksen määrittämiä vaatimuksia. PIPO-asetus koskee polttoaineteholtaan alle 50MW energiantuotantoyksiköiden ympäristön suojeluvaatimuksia.

Laitteiston ominaisuuksiin liittyvät lähtötiedot ovat peräisin kohteiston käyttö- ja hallintohenkilöstöltä sekä laitevalmistajilta. Näiden tietojen lisäksi edellämainituilta tahoilta saatiin myös tietoja laitteiston käytöstä ja kuormituksista.

Konneveden Kaukolämpö Oy:n lämpölaitoksen tärkeimpänä polttoaineena käytetään palaturvetta, jonka VAPO toimittaa. Kyseistä palaturvetta käyttämällä on mahdollista täyttää PIPO-asetuksen asettamat vaatimukset.

Tällä hetkellä Konneveden Kaukolämpö Oy:lla on käytössä pyöriväärinainen Sermet 1,25MW sekä arinakattila Arimax 1MW. Savukaasujen puhdistukseen käytetään DCS:in (Dust Control Systems)

valmistamia Finn-Cleaner vaakasuuntaisia multisykloneita, jotka ohjaavat savukaasut omien piippujensa kautta ulos.

Oleellisia tietoja puhdistuslaitteiston määrittämisessä ovat muun muassa savukaasujen lämpötilat, jotka ovat noin 120°C Sermetillä ja Arimaxilla noin 260-280°C. Muita päätökseen oleellisesti vaikuttavia tietoja olivat laitosten sijainti toisiinsa nähden (piippujen etäisyys 15m), huoltohistoria ja huoltojen yhteydessä tehdyt havainnot laitteiston toimintakunnosta. Sijainti ja etäisyydet ovat oleellisia erilaisia laitteistovariaatioita pohdittaessa.

Huoltohistoriasta kävi ilmi, että Sermetin sulkusyöttimen välys on liian suuri valmistajan antamiin ohjeisiin nähden. Tämä saattaa aiheuttaa läpipuhallusta ja sitä kautta merkittävää erotuskyvyn heikkenemistä. On myös huomioitava, että tuhkan poiskuljetuslaitteistoa on muokattu alkuperäisestä poikkeavaksi Arimax -kattilan osalta. Kyseiset muutokset on suorittanut laitteiston käyttöhenkilöstö.

1.1.1 Laitteisto

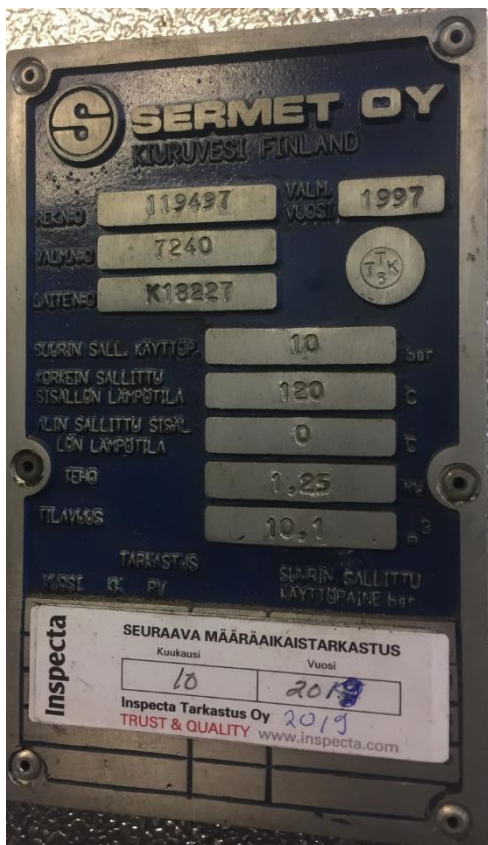
Kaukolämpölaitoksen käyttölaitteiden tyyppikilvet, joista ilmenevät tekniset tiedot:

KPA-Arimax (Kuva 1), jonka savukaasut käsittelee Finn-Cleaner multisykloni (Kuva 3).

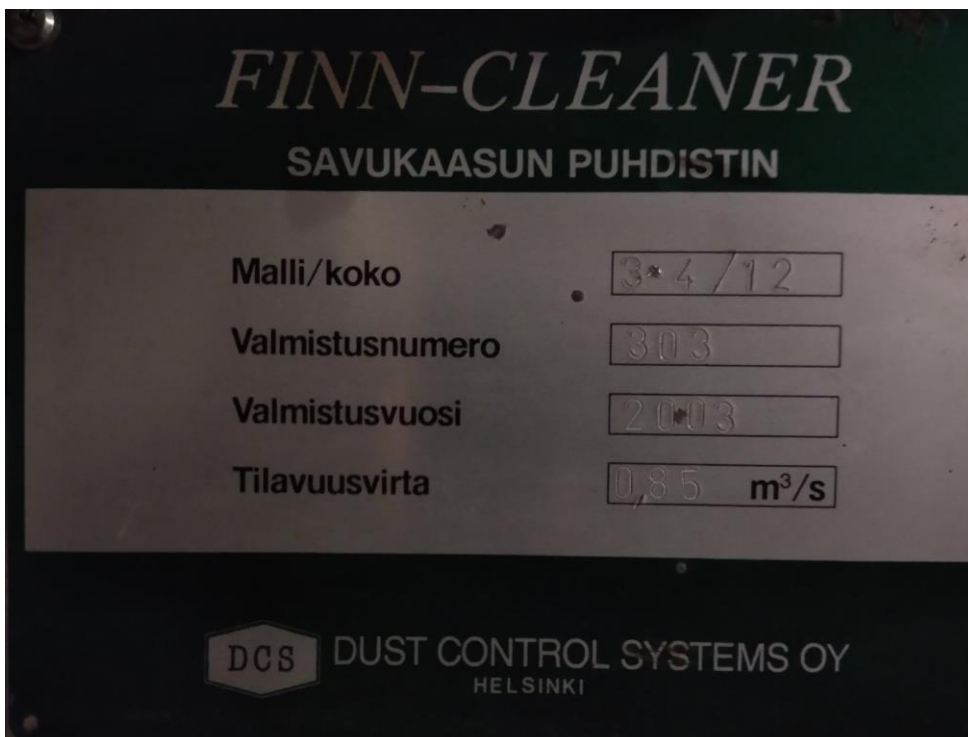
KPA-Sermet (Kuva 2), jonka savukaasut käsittelee Finn-Cleaner multisykloni (Kuva 4).



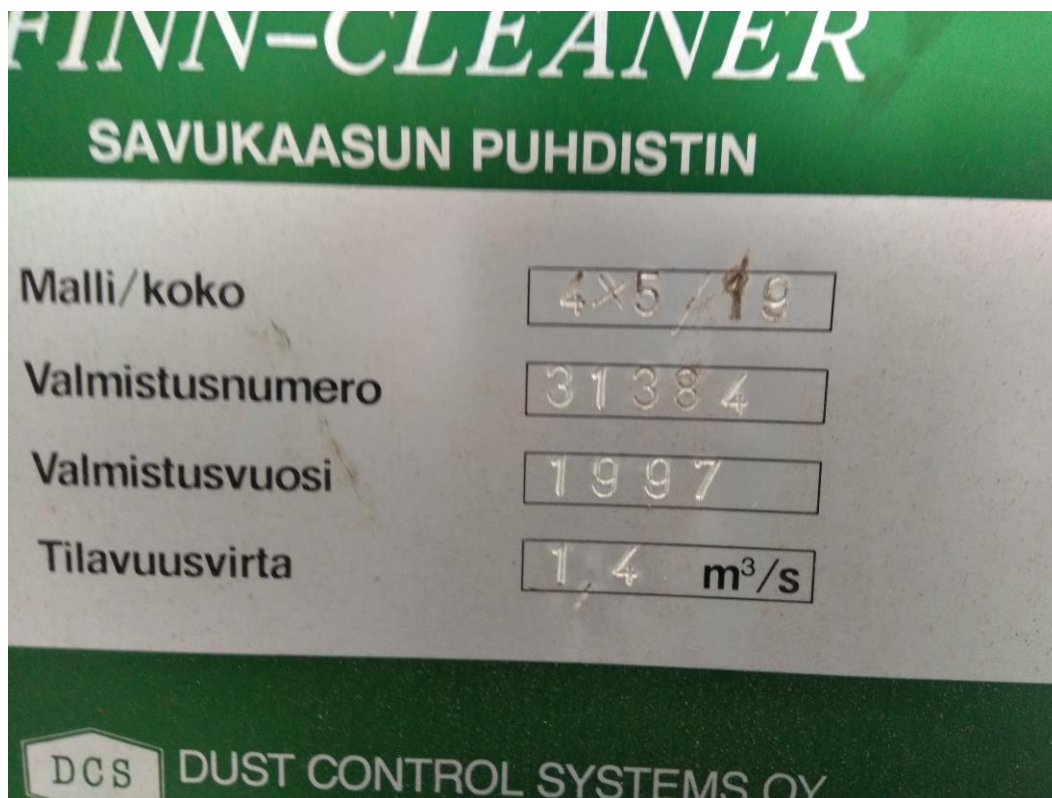
KUVA 1. Arimax-kattilan tyyppikilpi



KUVA 2. Sermet-kattilan tyypikilpi



KUVA 3. Arimax-kattilan jälkeinen multisykloni



KUVA 4. Sermet-kattilan jälkeinen multisykloni

1.1.2 Toteuttamisprosessi

Opinnäytetyötä lähdettiin toteuttamaan tutustumalla Konneveden Kaukolämpö Oy:n ilmoittamaan ongelmaan/esiselvitys pyyntöön. Tutustuminen käsitti muun muassa aiheeseen perehtymistä erilaisista verkkomateriaaleista ja yhteydenotoista laitevalmistajiin sekä vierailuista paikanpäällä Konneveden lämpölaitoksella. Vierailujen aikana kartoitettiin kaukolämpölaitoksen nykyinen kapasiteetti eli laitteistot, niiden toimivuus jne. Ensimmäisessä palaverissa keskusteltiin yhdessä Konneveden Kaukolämpö Oy:n edustajien sekä Salmen Metallin Oy:n edustajan kanssa lähtökohdista sekä tulevista toimista, kuten mahdollisista päästömittauksista.

Esiselvityksen aloittamiseksi perehdyimme perusteellisesti erilaisiin savukaasujen puhdistusmenetelmiin. Tietoa eri menetelmistä kerättiin asianosaavilta tahoilta, kuten laitevalmistajilta. Heiltä saatujen tietojen perusteella sopivien vaihtoehtojen kartoitustyö alkoi.

Hankittujen tietojen perusteella laadittiin asiakirja, johon koottiin kaikkien laitteistojen erityispiirteet. Erityispiirteitä sekä vaatimuksia tarkastellen rajattiin kohteeseen sopivat menetelmät. Prosessin edetessä ja lisäkysymyksien ilmetessä olimme jälleen yhteydessä tarvittaviin asiantuntijatahoihin.

Lopuksi muodostimme dokumentin, jossa oli esitelty kohteeseen mahdollisia laitteistovariaatioita sekä kerrottu niiden ominaispiirteistä. Dokumentissa ilmaistiin myös mielipide sopivimmasta menetelmästä kohteeseen. Tämä dokumentti esiteltiin asiakkaalle toimeksiannon päättyessä.

1.1.3 Muuttujat

Päästöihin vaikuttavia huomioitavia muuttujia ovat esimerkiksi polttoaineen laatu sekä kosteus, jotka vaikuttavat syntyvien savukaasujen koostumukseen, kuormitusilanne, joka vaihtelee vuorokaudenajan, viikonpäivän sekä ulkona vallitsevan lämpötilan mukaan. Palotapahtuman käyttöparametrit vaikuttavat palotapahtuman tehokkuuteen ja sitä kautta hiukkaspäästöjen määrään.

Lisäksi näkyvien päästöjen leviämiseen vaikuttavat sääolosuhteet, kuten ilmanpaine, tuuliolosuhteet ja sade. Myös ongelmatilanteet laitosten toiminnassa voivat aiheuttaa lyhytaikaisia suurentuneita tai normaalista poikkeavia päästöjä.

1.2 Tavoitteet

Tavoitteena löytää toimivin sekä kustannustehokkain menetelmä savukaasujen puhdistamiseksi lain vaatimalle (Taulukko 1) tasolle sekä hiukkaspäästöjen vähentämiseen asiakkaan antamien vaatimusten mukaisesti. Esiselvityksessä on otettava huomioon esimerkiksi asiakkaan laatima budjetti (hankinta- ja käyttökustannukset) sekä käytettävissä olevat tilat.

TAULUKKO 1. Eri asetusten asettamat päästörajat (Kirjavainen, 2017)

Olemissa olevat energiantuotantoyksiköt		Hiukkaset (mg/m ³ N)			NO _x (mg/m ³ N)			SO ₂ (mg/m ³ N)		
		PINO	PIPO	MCP	PINO	PIPO	MCP	PINO	PIPO	MCP
Puu- ja muut kiinteät biopolttoaineet	1≤P≤5 MW	300 (375)	300 (375)	50	450 (500)	450 (500)	450	200	200	200
	5<P≤10 MW	150 (250)	150 (250)	50	450 (500)	450 (500)	450	200	200	200
	10<P≤20 MW	50 (125)	50 (125)	50	450 (500)	450 (500)	450	200	200	200
	P>20 MW	50 (125)	50 (125)	30	450 (500)	450 (500)	450	200	200	200
Turve	1≤P≤5 MW	300 (375)	300 (375)	50	600 (625)	600 (625)	600	500	500	500
	5<P≤10 MW	150 (250)	150 (250)	50	600 (625)	600 (625)	600	500	500	500
	10<P≤20 MW	50 (125)	50 (125)	50	600 (625)	600 (625)	600	500	500	500
	P>20 MW	50 (125)	50 (125)	30	600 (625)	600 (625)	600	500	500	400

(suluissa vara- ja huippukuormakattiloiden päästöarajat)

Uudet energiantuotantoyksiköt		PINO	PIPO	MCP	PINO	PIPO	MCP	PINO	PIPO	MCP
Puu- ja muut kiinteät biopolttoaineet	1≤P≤5 MW	200	200	50	375	375	375	200	200	200
	5<P≤10 MW	50	50	30	375	375	300	200	200	200
	10<P≤20 MW	40	40	30	375	375	300	200	200	200
	P>20 MW	40	40	20	375	375	300	200	200	200
Turve	1≤P≤5 MW	200	200	50	500	500	500	500	500	400
	5<P≤10 MW	50	50	30	500	500	300	500	500	400
	10<P≤20 MW	40	40	30	500	500	300	500	500	400
	P>20 MW	40	40	20	500	500	300	500	500	400

1.3 Lyhenteet ja määritelmät

MW = Megawatti

PIPO-asetus (Pienpolttolaitos-asetus) = PIPO-asetusta sovelletaan kiinteää (esim. palaturve), nestemäistä tai kaasumaista polttoainetta käyttäviin energiantuotantoyksiköihin, joiden polttoaineteho on

vähintään 5 MW mutta alle 50 MW. Samaa asetusta sovelletaan 1-5 MW:n yksiköihin, jos yksikön yhteenlaskettu polttoaineteho on yli 5 MW.

Pohjatuhka = Polttoprosessissa syntyvää jätettä, joka poistetaan tulipesästä alakautta.

Lentotuhka = Polttoprosessissa syntyvää jätettä, joka poistuu palotapahtumasta savukaasujen mukana.

Sulkusyötin = Sulkusyötin poistaa tuhkan suljetusti annoksina siten, etteivät palokaasut pääse virtaamaan tuhkan poistoreitin mukaisesti.

Erotusaste = kuvaa puhdistuslaitteen toiminnan tehokkuutta ja mahdollistaa vertailun eri laitteiden välillä.

KPA-kattila = Kiinteän polttoaineen kattila

2 SAVUKAASUJEN PUHDISTAMISESSA KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO

Teollisuus- ja energiantuotantolaitoiksilla suoritetaan lähes poikkeuksetta savukaasujen puhdistamista. Kiinteiden polttoaineiden savukaasuja puhdistetaan mm. sähkösuodattimilla, erilaisilla pesureilla, kuitusuodattimilla, jälkipolttimilla sekä katalyyttisillä puhdistusmenetelmillä. Päästöjen määrää pienennetään myös mm. korkealla palolämpötilalla sekä palotapahtuman kestolla. Taulukosta 2 ilmenee eri puhdistuslaitteistojen kustannusarvioita sekä arvioita erottelukyvystä. Taulukossa 3 on esiteltyä erilaisten laitteistojen tärkeimmät ominaispiirteet.

TAULUKKO 2. Hiukkaspuhdistuslaitteiden kustannusarvioita ja päästötasoja (SYKE 2003, EU2000, LCP-asetuksen perustelumuiotio, Ympäristökeskus Morenia)

Puhdistuslaite	Polttoaine	Teho MW _{pa}	Investointi €/MW _{pa}	Käyttökust. €/MWh _{pa}	Päästötaso mg/m ³ 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		

TAULUKKO 3. Hiukaspuhdistusmenetelmien ominaispiirteitä (Ohlström;ym., 2005)

Laite	Minimi hiukkas-koko (μm)	Erotusaste (% hiukkas-massasta)	Etuja	Haittoja
Painovoima-erotinkammio	>50	<50	pieni painehäviö, suunnittelun ja huollon yksinkertaisuus	tilaa vievä, huono keräystehokkuus, ei erota pienhiukkasia
Syklonit	5–25	50–90	yksinkertaisuus, vähän lattia-alaa vievä, pieni/kohtuullinen painehäviö, jatkuva kuiva kerättyjen hiukkasten poisto, toimii suurilla pölypitoisuuksilla, poistaa suuret hiukkaset, lämpötilariippumaton	korkeussuunnassa tilaa vievä, pieni keräystehokkuus pienille hiukkasille, herkkä vaihteleville pölykuormille ja virtausnopeuksille
Pesurit:				
Pesutornit	>10	<80	yhäaikaainen kaasumaisten ja hiukasmaisten päästöjen poisto, kyky jäädyttää ja puhdistaa korkealämpötilaiset kosteat savukaasut, korrodoivat kaasut ja sumut voidaan neutralisoida, vähentynyt pölyräjähdysriski, tehokkuutta voidaan vaihdella	korroosio- ja eroosio-ongelmat, lisääntyneet jäteveden käsittelykustannukset, huono keräystehokkuus alle 1 mikrometrin pienhiukkasille, jäätymisongelmat kylmällä ilmalla, savukaasun nostovoiman vähennys piipussa
Syklonipesurit	>2,5	<80		
Törmäyksesurit	>2,5	<80		
Venturipesurit	>0,5	<99		
Sähkösuodatin	<1	95–99+	>99 % tehokkuus saavutettavissa, hyvin pieniä hiukkasia saadaan erotettua, märkä tai kuiva erotus, painehäviöt ja energiantarve pieniä verrattuna muihin tehokkaisiin menetelmiin, vähän liikkuvia osia, vähäinen huollon tarve, toimii korkeissa lämpötiloissa (300–450 °C)	kallis investointi, herkkä vaihteleville pölykuormituksille ja virtausnopeuksille, resistiivisyys aiheuttaa eräiden aineiden kannattamattoman erottamisen, korkeajännite aiheuttaa varotoimenpiteitä, keräystehokkuus voi huonontua vähitellen ja huomaamattomasti
Kangassuodatin (letkusuodatin)	<1	>99	kuiva keräys mahdollista, pienhiukkasten erottaminen mahdollista, korkeat hyötysuhteet, suorituskyvyn heikkeneminen on havaittavissa	herkkyys suodatusnopeudelle, kuumat kaasut jäädytettävä, suhteellisen kosteuden vaikutus (tiivistyminen), kemikaalien vaikutus kuituihin

2.1 Dynaamiset erottimet

Dynaamisien erottimien toiminta perustuu hiukkasiin vaikuttaviin painovoimaan, keskeis- ja hitausvoimiin. Keskeis- ja hitausvoimien toiminta perustuu voimiin, jotka savukaasun kulkusuunnan muutoksessa kohdistuvat hiukkasiin. Hiukkasten pyrkimyksenä on vastustaa suunnanmuutosta, toisinkin savukaasulla, jolloin ne ajautuvat toisistaan erilleen.

Dynaamiset erottimet voidaan jakaa toimintaperiaatteidensa mukaan sedimentaatiokammioihin ja lamellierottimiin (painovoima) tai sykloneihin (keskipakaisvoima). (Ohlström, 1998)

Painovoimalla toimivat dynaamiset erottimet ovat edullisia hankkia ja ylläpitää sekä ne soveltuvat hyvin esierottimiksi ennen muita erotuslaitteita. (Ohlström;ym., 2005)

2.1.1 Sedimentaatiokammiot ja lamellierotin

Sedimentaatiokammio sekä lamellierotin ovat savukaasujen vähäiseen suunnanmuutokseen ja painovoimaan perustuvia erotusmenetelmiä. Useimmiten niitä käytetään esipuhdistimina erottelemaan suurikokoiset ja hehkuvat hiukkaset, jotka haittaisivat savukaasujen puhdistusprosessia myöhemässä vaiheessa. Kuitenkaan varsinaisten pienhiukkasten erotteleminen ei näillä onnistu, joten niiden erottelemiseen tarvitaan tehokkaampia menetelmiä. Dynaamisista erottimista vain syklonierotin on tarpeeksi tehokas erotusasteeltaan pienhiukkasten erottelemiseen. (Ohlström, 1998)

Painovoimaan perustuvissa erotinlaitteissa suurikokoiset hiukkaset painuvat painovoiman seurauksena erotinlaitteen pohjalle. Muu savukaasuvirta jatkaa kulkuaan kammion läpi. Painovoimaerottimien paras erotustehokkuus saavutetaan vain suurikokoisista hiukkasista. 60 µm:n kokoisten hiukkasten erotustehokkuus on 65-100 %, kun taas 10 µm:n kokoisten hiukkasten kohdalla tehokkuus on vain noin 3%. (Nevers, 2000)

2.1.2 Sykloni

Syklonierottimen toiminta perustuu keskipakoisvoimaan (Kuva 5). Jotta syklonisuodattimet toimisivat oikein, tarvitsevat ne sopivan savukaasun tilavuusvirran. Ilman oikeaa savukaasun tilavuusvirtaa syklonin erotusaste on heikko. Sykloneiden etuja ovat muun muassa helpot/yksinkertaiset kytkennät sekä huoltotoimenpiteiden helppo toteuttaminen.

Sykloneiden oma hiukkasten erotusaste ei yleensä ole yksistään riittävä nykylainsäädännölle, mutta ne toimivat hyvin esierottimina muille savukaasujen puhdistuslaitteistoille/menetelmille.

Syklonissa savukaasut saatetaan ohjaussiipien avulla pyöriivään liikkeeseen, mikä aiheuttaa hiukkasia syklonin ulkoreunalle ajavan keskipakoisvoiman. Syklonien seinämiltä hiukkaset liukuvat pohjan aukon kautta keräyssäiliöön.

Toimintaperiaatteeltaan läpivirtaussykloni on muuten vastaava, mutta saavukaasut johdetaan pois vastakkaisesta päästä virtaussuunnan vaihtumatta.

Sykloneista halkaisijaltaan pienimmillä on suurin erotuskyky. Halkaisijat vaihtelevat 10 cm:stä useisiin metreihin. Multisykloniksi kutsutaan ratkaisua, jossa savukaasukanavassa on useampia pienempiä sykloneita rinnakkain. Tällä saavutetaan hyvä erotusteho myös suuremmilla savukaasun tilavuusvirroilla. Multisykloneiden haittapuolena mainittakoon suurehko tukkeutumisriski varsinkin suuren pöly- tai kosteuspitoisilla savukaasuilla. Syklonin hiukkasten erotustehokkuus paranee, kun hiukkas koko ja -tiheys, syklonin rungon pituus ja kaasun kiertämien kierrosten lukumäärä ja kaasun sisäänvirtausnopeus kasvavat sekä seinien sileys lisääntyy. (Ohlström, 1998.)



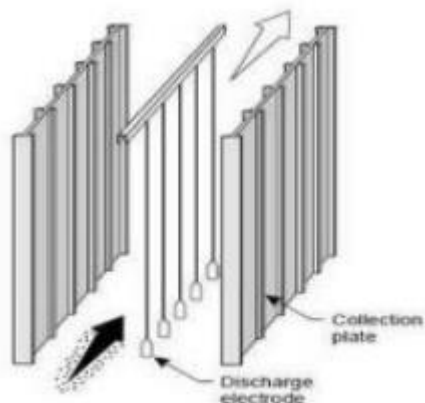
KUVA 5. Syklonierottimen toimintaperiaate (Visakova, 2015)

2.2 Sähkösuodatin

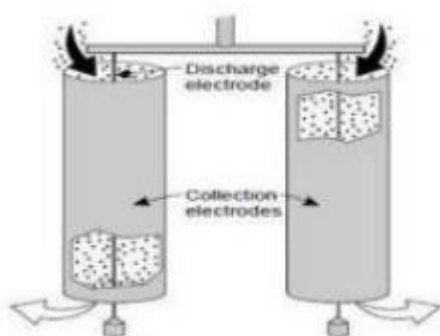
Sähkösuodatin on eniten käytetty hiukkaserotinlaite kiinteitä polttoaineita käyttävissä voimalaitoksissa. Sähkösuodattimet jaotellaan rakenteensa mukaan levyäisiin (Kuva 6) ja putkimaisiin (Kuva 7).

Sähkösuodattimet hyödyntävät sähköstaattisia voimia, joiden avulla kiinteät hiukkaset varataan sähköisesti. Tämä johtaa hiukkasten erottumiseen savukaasuvirrasta. Tästä johtuen sähkösuodattimen erotustehokkuus vaihtelee suuresti hiukkasten sähköisten ominaisuuksien mukaan. Sähkösuodatin vaatii tasaisen tilavuusvirran sekä esierottimen saavuttaakseen hyvän puhdistustehon.

Sähkösuodatin käyttää mekaanista ravistusjärjestelmää pudottaakseen hiukkaset tuhkan kuljetuslaitteistoon. Vuosittaiset huoltotoimenpiteet kohdistuvat muun muassa ravistusjärjestelmän laakereiden tarkastuksiin, lyöntikappaleiden tyssäntymisen tarkasteluun sekä mahdollisiin korjauksiin. Myös muuntajalle ja laitteiston säätimelle on suoritettava säännöllisten huoltojen lisäksi rasiuskokeita. Vertailtavista vaihtoehdoista sähkösuodatin on hankintakustannuksiltaan suurin.



KUVA 6. Levymäinen sähkösuodatin (Visakova, 2015)



KUVA 7. Putkimainen sähkösuodatin (Visakova, 2015)

2.3 Märkäpesuri

Märkäpesurit voidaan jakaa toimintamekanismien perusteella kahteen pääryhmään, jotka ovat venturi- ja törmäyksesurit.

Märkäpesureissa hiukkasten erottelamiseen hyödynnetään nestettä, useimmiten vettä. Märkäerottimien toimintaperiaatteena on hiukkasten joutuminen kosketukseen käytetyn pesunesteen kanssa, joka sitoo hiukkaset itseensä muodostaen lietettä. Puhdistusteho on riippuvainen pisaroiden sekä hiukkasten välisestä nopeuserosta. Suurimmat nopeuserot ja sen myötä parhaimmat erotustehokkuudet saadaan aikaan venturipesureilla, kun taas törmäyksesureilla ei tapahdu savukaasujen virtauksen kiihtymistä.

Märkäpesurit kykenevät käsittelemään korkean lämpötilan ja kosteusprosentin omaavia savukaasuja jäädyttäen niitä samanaikaisesti. Pesurilla voidaan erotella myös korrodoivia kaasuja, sumuja sekä syttyviä ja räjähdysherkkiä pölyjä.

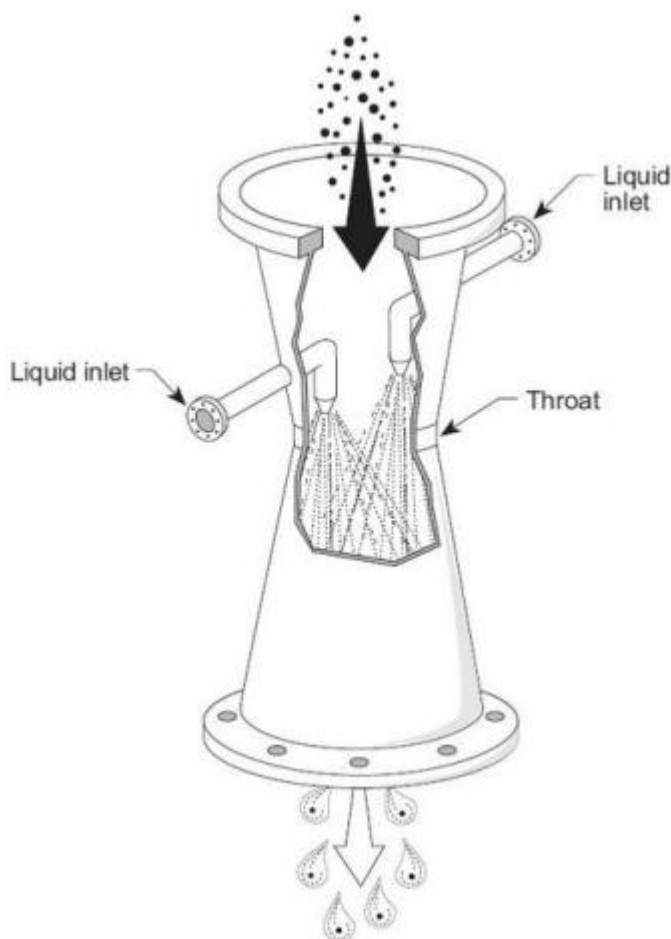
Huomattavin märkäpesureiden ongelma on muodostuva jätevesi sekä jäätymisvaara. Muita huonoja puolia ovat muun muassa eroosio, korrosio sekä suuret painehäviöt. Ne vaativat myös lämpöeristetyin tilan toimiakseen Suomen sääolosuhteissa. Käyttökustannukset koostuvat jätevedenpuhdistamisesta ja lietteen käsittelystä syntyvistä kustannuksista sekä sähköenergiasta ja kemikaaleista.

2.3.1 Venturipesuri

Venturipesurissa (Kuva 8) käytetään matalapaineista vettä/lipeäseosta, jota johdetaan venturin kapeimpaan kohtaan, venturin kurkkuun, jossa on suurin savukaasun virtausnopeus (50-150 m/s). Kiihtyvä virtaus saadaan aikaiseksi suppeneva-laajenevasuuttimen avulla. Savukaasun suurella liikenopeudella vesi pisaroitetaan, jolloin saadaan aikaiseksi veden ja kaasun välinen tehokas törmäysvaikutus. Puhdistettavat hiukkaset jäävät suurempien pisaroiden sisään erottuen lietteeksi. Muodostunut liete käsitellään lietteenpuhdistuslaitteistolla, jonka jälkeen se kierrättyy takaisin pesutapahtumaan. Tämän lietteen käsittelyn yhteydessä lämmönvaihtimella voidaan tallettaa savukaasusta peräisin olevaa hukkalämpöä, joka johdetaan suoraan kaukolämpöverkkoon. Erotustehokkuudeltaan venturipesuri on tehokkain pesurityyppi juuri suuren ilmannopeuden ansiosta. Venturipesureilla on mahdollista saavuttaa jopa 99% erotustehokkuus, kun taas muilla märkäpesureilla erotustehokkuus on noin 80%.

Venturipesureiden useiden hyödyllisten ominaisuuksien johdosta laitteella pystytään tarvittaessa suodattamaan sekä hiukkasmaisia että kaasumaisia epäpuhtauksia samanaikaisesti.

Venturipesurin hyvinä puolina mainittakoon helpot huoltotoimenpiteet johtuen yksinkertaisesta rakenteesta sekä vähäinen tilantarve. Toisaalta venturipesuri tarvitsee runsaasti sähköenergiaa savukaasupuhaltimelle, jotta saavutetaan sopiva savukaasun virtausnopeus. (Cooper;ym., 2002)



KUVA 8. Venturipesuri (Agency, 2006)

2.3.2 Pesutorni

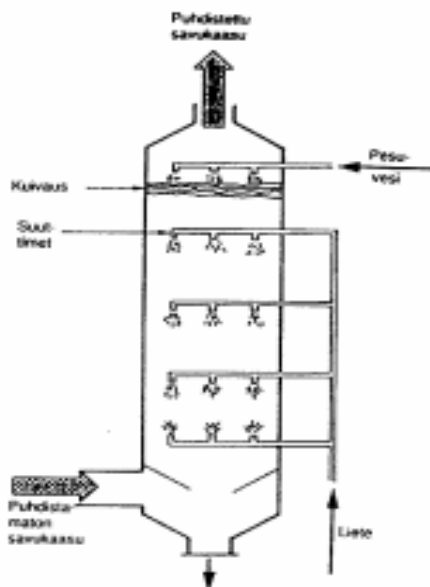
Pesutorni (Kuva 9) on märkäpesureista yksinkertaisin ja se on ns. matalaenergiapesuri. Sen hiukkasten keräystehokkuus on heikompi kuin korkeaenergiapesureiden (esimerkiksi venturipesuri).

Pesutapahtumassa käytettävä pesuneste voidaan ruiskuttaa suuttimien läpi myötä- tai vastavirtaan savukaasun kulkusuuntaan nähden.

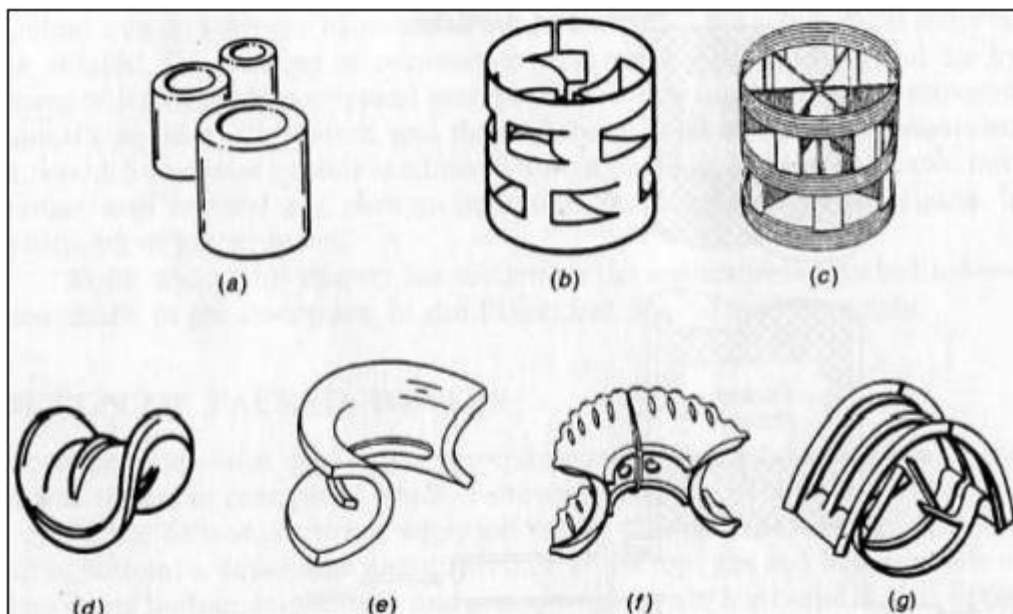
Ruiskutettavat pisarat ovat yleensä 500-1000 μm :n kokoisia ja erotuskyvyltään ne toimivat parhaiten halkaisijaltaan yli 10-25 μm :n kokosiin hiukkasiin. Erotusalueen laajentaminen onnistuu kahteen mikrometriin saakka. Laajentaminen tapahtuu kasvattamalla pesunesteen sumutuspainetta, jolloin pisaroituminen on tehokkaampaa ja pisarakoko pienempi. Pienen pisarakoon sekä mahdollisimman suuren pisaroiden ja hiukkasten välisillä nopeuseroilla saavutetaan suurin keräystehokkuus.

Jotta saataisiin aikaan mahdollisimman hyvä nesteen ja kaasun kosketus, voidaan pesutornin koske-

tuspintaa lisätä erilaisilla tätekappaleilla (Kuva 10), joita ovat esimerkiksi muovikappaleet, keraamiset renkaat sekä aallotetut levykappaleet jne. (Pleym, 1989)



KUVA 9. Pesutorni (Pleym, 1989)



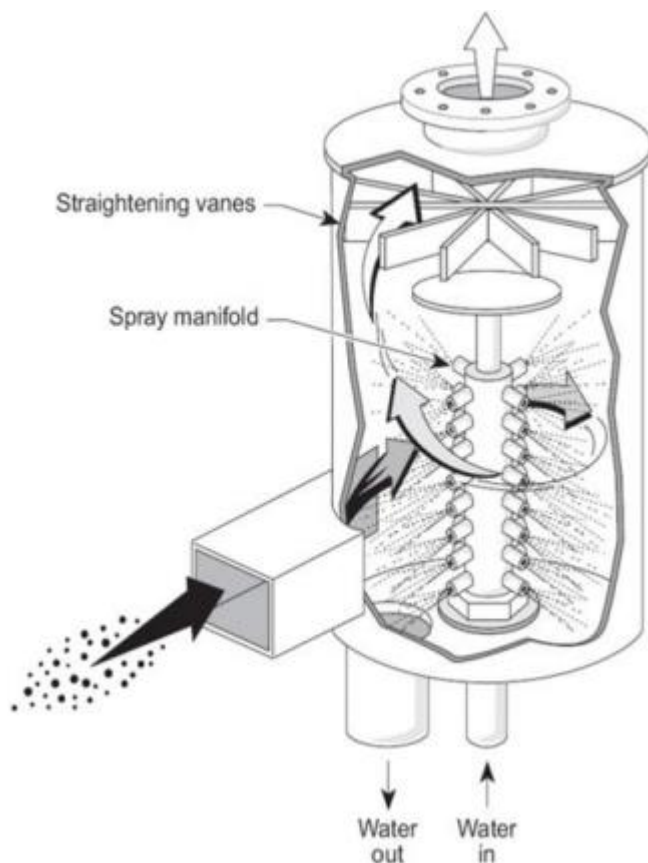
KUVA 10. Pesutorneissa käytettäviä tätekappaleita (McGabe;ym., 1993)

2.3.3 Syklonipesuri

Syklonipesurissa (Kuva 11) puhdistettavat savukaasut saatetaan pyörivään liikkeeseen. Hiukkaset ajautuvat keskipakoisvoiman ja hitausvoimien aiheuttaman virtauksen vaikutuksesta syklonin ulko-reunoille, jolloin hiukkaset törmäävät syklonin seinämiin. Vesisuihkun avulla hiukkaset huuhdellaan

syklonin alaosaan, josta likainen pesuneste johdetaan edelleen keräyssäiliöön.

Puhdistetut savukaasut poistuvat syklonin yläosan keskeltä. Jotta pesurin sisällä olevat suuttimet saadaan pesunesteen virtauksella pyörivään liikkeeseen, tarvitsee syklonipesuri tehokkaan pumpun pesunesteen pumppaamiseen. (Takanen, 2016)



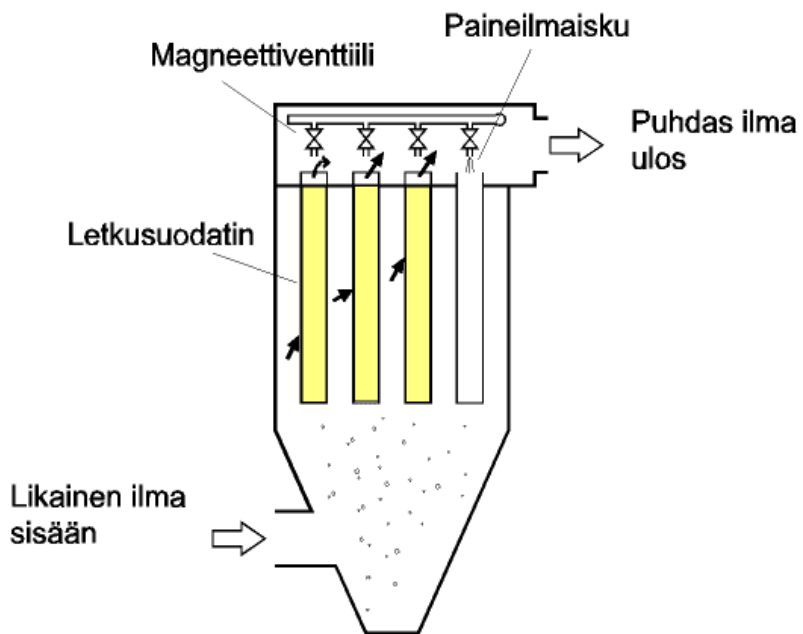
KUVA 11. Syklonipesuri (Agency, 2006)

2.4 Kuitusuodatin

Kuitusuodattimessa (Kuva 12) savukaasut johdetaan erilaisista materiaaleista valmistetun suodatinelementin lävitse. Suodatinelementti on useimmiten muodoltaan putkimainen, jolloin saavutetaan suuri suodatuspinta-ala. Eroteltavat hiukkaset jäävät suodatinmateriaalin pintaan, josta ne poistetaan vastakkaissuuntaisella paineilmapulssilla.

Kuitusuodattimen haittapuolina mainittakoon muita erotusmenetelmiä suuremmat painehäviöt, mikä lisää savukaasupuhaltimien kuormitusta sekä vaatii esierottimen. Suodatinmateriaalista riippuen savukaasun max. lämpötila on n. 220°C-250°C. Vastaavasti kuitusuodattimella saavutetaan erittäin hyvä erotustehokkuus myös pienhiukkasille. Kuitusuodattimella saavutettava erotustehokkuus pienhiukkasille on jopa 99 % ja kokonaiserotustehokkuus on kaikenkokoisille hiukkasille 99,95 %.

Kuitusuodatin tarvitsee liitännöikseen sekä öljyttömän että vedettömän paineilma-kytkennän. Huolto koostuu suodatinmateriaalin vaihdosta noin 2-5 vuoden välein sekä vuosittain tehtävästä nuohouksesta.



KUVA 12. Kuitusuodatin (Kulmala;ym., 2004)

3 TOTEUTUS

Hiukkaspäästöihin voidaan vaikuttaa sekä primäärisin että sekundäärisin menetelmin. Primäärisillä menetelmillä tarkoitetaan polttotekniikoita ja -tapoja sekä polttoaineita. Sekundääriset menetelmät käsittävät savukaasujen puhdistusmenetelmät, joiden avulla vähennetään ilmakehään joutuvia hiukkaspäästöjä.

Hiukkaspäästöjä pyritään hillitsemään ensisijaisesti primäärisin keinoin. Mikäli primääriset keinot eivät tavoita valtioneuvoston (VNa 1065/2017) asettamia raja-arvoja, hyödynnetään sekundäärisiä puhdistusmenetelmiä.

3.1 Toimivuuden arviointi

Vierailun yhteydessä tämänhetkinen tilanne/toimivuus arvioitiin yhdessä sekä Konneveden Kaukolämpö Oy:n että Salmen Metallin edustajien kanssa ja tuolloin nousi esille ajatus puhdistusmenetelmien riittämättömydestä tai laitteiston virheellisestä toiminnasta. Tätä tuki myös useat ympäristön nokeentumista koskevat huomautukset, joita asiakas etenkin talven aikana vastaanotti. Myös silmämääräinen tarkastelu lähiympäristöstä tuki havaintoja.

Puhdistustehon heikkeneminen on kuitenkin vaikea todentaa, koska aikaisempia mittauksia ei oltu tehty sekä silmämääräinen arvio on epätarkka. Myöskin vallitsevat sääolot vaikuttavat huomattavasti silmämääräisen arvioinnin tulokseen.

Jatkotoimenpiteenä päätettiin suorittaa omavalvonnallinen päästömittaus havainnollistamaan kaukolämpölaitoksen päästöjen todellista tilaa.

3.2 Puhdistustehon todentaminen

Tämän opinnäytetyön edetessä todettiin päästömittaus tarpeelliseksi. Päästömittauksella todennettiin tämän hetkisen puhdistuslaitteiston teho (LIITE 2). Mittauksella pyrittiin kohdentamaan ongelma vain toiseen kattilaan, koska silmämääräisen tarkastelun perusteella epäiltiin ongelman aiheutuvan yhdestä kattilasta.

Tämän opinnäytetyön valmistuessa uuden puhdistuslaitteiston asennus on kesken, jonka vuoksi puhdistustehoa ei vielä ole pystytty todentamaan omavalvonnallisella uusintamittauksella.

3.3 Kohteessa suoritettut mittaukset

Kuntalaisten huomautukset sekä yleisöosastokirjoitukset paikallislehdistä näkyvistä hiukkaspäästöistä, jotka sotkevat ympäristön etenkin talvisin johtivat siihen, että kohteessa päädyttiin toteuttamaan selvitystyö laitosten savukaasupäästöihin ja niiden vähentämiseen liittyen. Tämän johdosta päätettiin suorittaa kohteessa omavalvonnallinen päästömittaus. Päästömittauksen suoritti Ramboll Oy, joka laati mittaustuloksista kattavan raportin. Päästömittausraportista käy ilmi minkälaisia päästöjä kaukolämpölaitoksessa on sekä niiden määrät verrattuna normaaleihin/sallittuihin rajoihin. Konneveden Kaukolämpö Oy:lla suoritettiin omavalvonnallinen päästömittaus 4.-5.4.2018 välisenä aikana, jonka toteutti Ramboll Finland Oy.

Mittauksen yhteydessä molemmat kohteen kattiloista mitattiin puolella ja täydellä tehotasolla. Kunkin tehotason mittaustulos muodostuu kolmesta erillisestä mittauksesta, josta on laskettu keskiarvo. Liian korkean hiukkaspitoisuuden vuoksi mittausten kesto jouduttiin lyhentämään. Mittaustuloksissa tai näytteenoton paikkaansapitävydessä ei kuitenkaan arvioitu olevan poikkeavuuksia lyhennetyin mittaustapahtuman johdosta. Toiminnanharjoittajan mukaan Konneveden Kaukolämpö Oy laitos toimi normaalisti suoritettujen mittausten aikana.

Mittauksesta saatujen arvojen mukaan molempien KPA-kattiloiden, molemmilla tehotasoilla hiukkaspitoisuudet ylittivät Valtioneuvoston asetuksen (VNa 1065/2017) raja-arvot toistuvasti.

Arimax kattilan mittaus suoritettiin multisyklonin ja savukaasupuhaltimen jälkeisestä savupiipun pystysuuntaisesta savukaasukanavasta. Mittaustulosten luotettavuuden kannalta mittauspaikka oli hyvä.

Sermet kattilan mittaukset puolestaan suoritettiin sisältä. Mittausyhteitä oli yksi, joka sijaitsee ennen piippua (savukaasupuhaltimen ja piipun välissä) vinossa savukaasukanavassa. Mittauspaikka oli laadun kannalta kohtalainen.

Tarkemmat tiedot päästömittauksesta löytyvät LIITTEESTÄ 2, Mittausraportti.

3.4 Mittaustulosten analysointi ja johtopäätökset

Todettiin että raja-arvot ylittyvät molempien kattiloiden osalta (Taulukko 5), mikä poikkeaa alun silmämääräisestä arviosta päästöjen aiheutuvan vain yhdestä kattilasta. Mittausraportin perusteella voitiin todeta käytössä olevien puhdistusmenetelmien toimimattomuus molempien kattiloiden osalta.

Jatkotoimenpiteenä sopivan puhdistusmenetelmän arvioinnissa oli otettava huomioon molempien kattiloiden puhdistustarve. Esiselvityksessä tuli siis ottaa huomioon yhtenä vaihtoehtona myös molempien kattiloiden kytkeminen yhteen puhdistuslaitteistoon.

TAULUKKO 4. Päästömittauksen tulokset (Ramboll mittausraportti, LIITE 2)

	Hiukkaset (mg/m³n, kuiva), O₂=6 %
Raja-arvo: VNa 1065/2017	300
Arimax, palaturve	
<i>Mitatut tulokset:</i>	
Teho 100 %	
Teho 50 %	
Sermet, palaturve	
<i>Mitatut tulokset:</i>	
Teho 100 %	
Teho 50 %	

Normaalitila (n) on 0 °C, 101,3 kPa, kuivaa kaasua

** = tulos yli akkreditoitun mittausalueen*

4 YHTEENVETO

Arviomme mukaan lähtötilanteen mukaisen puhdistuslaitteiston eli vaakamallisten multisykloneiden kapasiteetti ei huonon erotuskyvyn takia ole riittävä eikä sen kunnostus kannattavaa. Huonon erotuskyvyn lisäksi sykloneiden tukkeutumisriski on suuri osateholla käytettäessä.

Sopivan suodatus/puhdistusmenetelmän löytäminen vaati kattavaa tiedonhankintaa puhdistettavasta pölystä. Olennaista oli tietää pölyn olomuoto, hiukkaskoko sekä pitoisuus. Myös pölyisen ilman ominaispiirteet kuten koostumus, lämpötila sekä kosteus oli selvitettävä.

Tarkasteltavista vaihtoehtoista sähkösuodatin, kuitusuodatin ja savukaasupesuri soveltuisivat kyseiseen kohteeseen riittävän puhdistustehon saavuttamiseksi. Tämän jälkeen on huomioitava hankinta- ja käyttökustannukset sekä asennusvaatimukset. Myös käytettävissä oleva tila sekä laitteistovariaatiot kahden kattilan savukaasujen suodattamiseksi ovat tärkeitä valintakriteerejä.

Kuten esiselvityksestä ilmenee, kohteeseen ei suositeltu savukaasupesuria tai sähkösuodatinta hankinta ja käyttö/ylläpitokustannusten ollessa suuremmat kuitusuodatinratkaisuun nähden. Kohdassa 2 esitettyihin tietoihin viitaten savukaasupesurin sekä sähkösuodattimen ominaispiirteet ja asennus- sekä käyttövaatimukset ovat epäedullisia kuitusuodattimen ominaisuuksia tarkasteltaessa.

Savukaasupesuri tarvitsee toimiakseen esierottimen sekä ympärille joutuisi myös rakentamaan sääsuojauksen, mitkä osaltaan nostavat kustannuksia. Savukaasupesurin arvioitu elinkaari on noin 20-25v.

Lisäkustannuksia tuottaisivat myös lipeän kulutus sekä puhdistuksesta syntyneen lietteen aiheuttama jätevedenpuhdistamon kuormittuminen.

Tässä tapauksessa savukaasupesurin korkeampia kustannuksia ei myöskään voida perustella mahdollisesti talteenotettavalla teholla. Talteenotettavan tehon määrä on pieni koko investointiin nähden.

Vaikka sähkösuodattimen puhdistusteho on riittävä, ei sitä voida suositella kalliin investoinnin vuoksi. Sähkösuodattimen useat epäedulliset ominaispiirteet (korkeajännitteen aiheuttamat vaatimukset sekä korroosio ja eroosio) vaikuttavat olennaisesti valintaan. Sähkösuodattimen herkkyyks vaihteleville savukaasun virtausnopeuksille olisi myös ongelma kyseissä kohteessa.

Esiselvityksen lopputulemana ehdotettiin lähtötilanteen mukaisten Finn-Cleaner vaakamallisten multisykloneiden korvaamista letkusuodattimen ja pystymallisen mono- tai multisyklonin yhdistelmällä. On syytä olettaa, että tämä vaihtoehto on kohteeseen kustannustehokkain sekä sillä on mahdollista päästä tulevaisuudessakin pienpolttolaitoksille asetettuihin päästöjen raja-arvoihin.

Kyseisen laitteiston etuina ovat kohtuulliset huolto- ja käyttökustannukset, erinomainen puhdistus-teho sekä yksinkertaisuus. KPA-kattiloiden sijainti toisiinsa nähden voi myös mahdollistaa sen, että molemmat kattilat liitettäisiin samaan puhdistuslaitteistoon käyttäen savukaasupuhaltimia savukaa-sun tilavuusvirran hallintaan. Savukaasun lämpötiloja voidaan hallita sekoittamalla kattiloiden savu-kaasut keskenään tai tarvittaessa puhaltamalla savukaasujen sekaan raitista/viileää ilmaa. Lopullinen laitteiston toiminnan ja käytön suunnittelu on kuitenkin laitevalmistajalla.

Ehdotuksemme mukaiselle puhdistuslaitteistolle annettu elinkaari on noin 15-25v, riippuen valmista-jasta ja käytöstä. Kokonaiskustannuksiltaan ehdotettu laitteistoratkaisu on kilpailukykyinen muihin menetelmiin verrattuna.

Kohteeseen soveltuvan puhdistusmenetelmän valitsemiseen hyödynnetään asianosaavia tahoja sekä heidän aikaisempia kokemuksiansa savukaasujen puhdistamisesta. Soveltuvan menetelmän valin-nassa apuna voidaan myös käyttää erilaisia koelaitteistoja, joilla eri laitteistoja voidaan testata käy-tännössä. Tuotettuja päästöjä voidaan myös analysoida polttokokeella, josta ilmenee kuinka paljon savukaasu sisältää palamatonta polttoainetta. Tämän jälkeen voidaan savukaasupäästöihin vaikuttaa kohdassa 4. mainituin primäärisin keinoin. Tässä tapauksessa ei ollut mahdollista suorittaa käytän-nön kokeita koelaitteistolla, eikä myöskään polttokoetta, koska työn aikataulu kiristyi huomattavasti alkuperäisestä.

Mahdollisimman pitkän elinkaaren sekä tehokkaan toiminnan kannalta, valmistajan ohjeistusten mu-kaisten määräaikaishuoltojen toteuttaminen sekä yleinen laitteiston kunnon seuraaminen on tär-keää. Näillä toimenpiteillä voidaan saavuttaa huomattavat kustannussäästöt sekä varmistutaan lait-teiston toiminnasta odotetulla tavalla. Säännöllisillä päästömittauksilla voidaan todentaa, että lait-teisto toimii toivotulla tavalla esimerkiksi huolto- tai muutostöiden jälkeen.

LÄHDELUETTELO

- Agency, U.S Environmental Protection. 2006.** U.S Environmental Protection Agency, s.l. : 2006.
- Cooper, C. David ja Alley, F.C. 2002.** *Air Pollution Control*. 2002.
- Flagan, Richard ja Seinfeld, John. 1988.** *Fundamentals of air pollution engineering*. 1988.
- Kirjavainen, Kari. 2017.** *Ajankohtaista ympäristölainsäädännöstä*. s.l. : VTT, 2017.
- Kulmala, Ilpo;ym. 2004.** Tietoverkko pölyntorjunnan avuksi. [Online] 31. 1 2004.
http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/kpl_6_6.htm.
- McGabe, Warren;Smith, Julian ja Harriot, Peter. 1993.** *Unit Operations of Chemical Engineering*. 1993.
- Nevers, Noel De. 2000.** *Air Pollution Control Engineering*. 2000.
- Ohlström, Mikael. 1998.** *Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa*. Espoo : Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1998.
- Ohlström, Mikael;ym. 2005.** *Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa*. Espoo : s.n., 2005.
- Pleym, H. 1989.** *Miljøstudier*. s.l. : NKI Forlaget, 1989.
- Takanen, Pekka. 2016.** *Kuumien poistokaasujen lämmöntalteenotto ja puhdistus*. Ylivieska : s.n., 2016.
- Visakova, Antti. 2015.** *Päästöjen vähentämistekniikat ja niiden sopivuus pienpolttolaitoksiin*. 2015.

LIITE 1: ESISELVITYS SAVUKAASUJEN PUHDISTUKSESTA

LIITE 2: MITTAUSRAPORTTI