

Ejektoriperiaatteella toimivan savukaasupuhaltimen testaus lämpökattilakäytössä

Teemu Löyttinen

Opinnäytetyö

Lokakuu 2016

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Löyttinen, Teemu	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä 30.10.2016
	Sivumäärä 40	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Ejektoriperiaatteella toimivan savukaasupuhaltimen testaus lämpökattilakäytössä		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kari Hytönen ja Kimmo Puolamäki		
Toimeksiantaja(t) Hormel Oy		
Tiivistelmä <p>Savukaasupuhaltimien likaantuminen on ollut huonojen polttoaineiden takia ongelma monissa pienissä lämpölaitoksissa. Ongelman ratkaisuksi on kehitetty ejektoriperiaatteella toimiva savukaasupuhallin. Ejektoripuhaltimen ansiosta savukanavaan ei tarvitse asentaa mekaanisia osia sisältävää puhallinta. Ejektorin tarkoitus on parantaa kattilan käytettävyyttä ja kunnossapitoa.</p> <p>Tavoitteena oli tutkia kuinka ejektorit toimii savukaasupuhaltimena ja kuinka se vaikuttaa savukaasuihin. Ejektoria testattiin kattilantestauslaboratoriossa Jyväskylän ammattikorkeakoulun biotalousinstituutissa. Testit suoritettiin 500 kilowatin lämpökattilalla. Aluksi testattiin ejektorin toimivuutta ja suorituskykyä. Ejektorit todettiin toimivaksi, joten tasaisen ajon testi tehtiin 300 kilowatin teholla ja osatehon testi 100 kilowatin teholla. Lisäksi tehtiin vertailutesti tavanomaisella savukaasupuhaltimella. Testin aikana laitteen toimintaa tarkkailtiin silmämääräisesti ja prosessista kerättiin mittausdataa.</p> <p>Ejektorin todettiin toimivan tarkoituksenmukaisesti. Savukaasuun sekoittui noin 40 % ilmaa ejektorin toiminnan takia, joten savukaasut laimenivat. Savukaasua siis muodostui enemmän, mutta sen happipitoisuus kasvoi ja päästöpitoisuudet laskivat. Ejektorit likaantuivat hieman testien aikana, mutta parempien tulosten saamiseksi tarvittaisiin pitempiaikainen testi. Testien perusteella voidaan todeta, että ejektorin käyttö savukaasupuhaltimena on mahdollista.</p>		
Avainsanat (asiasanat) ejektorit, lämpökattila, savukaasupuhallin, testaus		
Muut tiedot		

Author(s) Löyttinen, Teemu	Type of publication Bachelor's thesis	Date 30.10.2016 Language of publication: Finnish
	Number of pages 40	Permission for web publication: x
Title of publication Testing an ejector flue gas blower in heating boiler use		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Hytönen, Kari and Puolamäki, Kimmo		
Assigned by Hormel Oy		
Abstract <p>Low quality fuels have been causing dirt formation in flue gas blowers in small heating plants. An ejector flue gas blower was developed to solve this problem. Because of the ejector, there is no need to install blowers with mechanical parts in the funnel. The purpose of the ejector is to improve boilers usability and maintenance.</p> <p>The goal was to test how the ejector works as a flue gas blower and how it affects flue gases. The ejector was tested in the boiler-testing laboratory at the Institute of Bioeconomy at JAMK University of Applied Sciences. The tests were made using 500-kilowatt heating boiler. The operability and performance of the ejector was tested first. The ejector was working, so a stable power test was performed with 300 kilowatts and a part power test with 100 kilowatts. Additionally, a comparison test was performed with an ordinary flue gas blower. The operation of the device was monitored during the tests and measurement data was gathered.</p> <p>The ejector was working appropriately during the tests. About 40 % of air was blended in the flue gas because of the operation of the ejector, which diluted the flue gas. As a result, there was more flue gas, but the oxygen percentage increased and the emission percentage decreased. A small amount of dirt collected in the ejector, but for better results, long time tests are needed. Based on the tests, it is possible to use the ejector as a flue gas blower.</p>		
Keywords/tags (subjects) ejector, heating boiler, flue gas blower, testing		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Lämpölaitokset	6
2.1	Lämpölaitoskattilan toimintaperiaate.....	6
2.2	Savukaasupuhaltimen merkitys	9
2.3	Ejektorisuutin	10
3	Palaminen ja savukaasut	11
4	Mittalaitteet	13
4.1.1	Virtausmittaukset	13
4.1.2	Savukaasuanalyysi	15
4.1.3	Painemittaus.....	16
5	Laitteen toiminnan testaus	17
6	Testit kattilantestauslaboratoriossa	19
6.1	Testaussuunnitelma	20
6.2	Savukanavan suunnittelu	21
6.3	Testausjärjestelyt	22
6.4	Mittaukset	24
6.5	Hakkeen kosteuden määrittäminen.....	25
6.6	Testit ejektoripuhaltimella	26
6.6.1	Suorituskyvyn testaus.....	26
6.6.2	Testiajot 300 kW ja 100 kW tehoilla.....	28
6.7	Testit vertailupuhaltimella	28
7	Tulokset	29
7.1	Virtaukset	29
7.2	Savukaasuanalyysit.....	31

8	Suuttimen toiminta-arvot ja puhaltimen mitoitus	33
9	Pohdinta	37
	Lähteet	39

Kuviot

Kuvio 1. Esimerkki lämpölaitoksen kokoonpanosta (Biolämpöopas 2016, 7)	7
Kuvio 2. Esimerkki arinapolttimesta (Poltin 60-650 kW n.d.)	8
Kuvio 3. Kattilan käyttöpaneeli	9
Kuvio 4. Ejektorin toimintaperiaate (Kim ym. 2006, 332).....	10
Kuvio 5. Sivukanavapuhaltimen rakenne (Compressed Air Basics Part 7: Side-Channel 2014).....	11
Kuvio 6 Annubar-putki savukanavaan asennettuna	14
Kuvio 7 Extech HD 350 Paine-ero mittari.....	15
Kuvio 8 JCT JES 301 –savukaasusondi	15
Kuvio 9. Vaisala HMI 31 ilmankosteus- ja lämpömittari	16
Kuvio 10. Järjestelyt laitteen testausta varten.....	17
Kuvio 11. Puhallin ja taajuusmuuttaja	18
Kuvio 12. Vahvistuskerroin eri taajuuksia käytettäessä.....	19
Kuvio 13. Kattilan arvokilpi.....	20
Kuvio 14. Savukanavan piirustus	22
Kuvio 15. Savukanava	23
Kuvio 16. Ohivirtauksen säädin	24
Kuvio 17. Valvomon näkymä	25
Kuvio 18. Polttoaineensyöttö ja palamisilmapuhaltimet.....	27
Kuvio 19. Graafeja valvomon näytöllä	29
Kuvio 20. Pölymittaus 100 kW ennen suutinta	32
Kuvio 21. Syöttöpaineen suhde suuttimen tuottamaan virtaukseen	35
Kuvio 22. Suuttimen tuottama alipaine	35
Kuvio 23. Syöttöilman laskennallinen teho.....	36
Kuvio 24. Vahvistuskerroin.....	37
Kuvio 25. Likaa suuttimessa testien jälkeen	38

Taulukot

Taulukko 1. Mittaustulokset.....	18
Taulukko 2. Hakenäytteistä analysoidut kosteudet eri testipäivinä.....	26
Taulukko 3. Suuttimen ja savukaasujen mittaustietoja	30
Taulukko 4. Savukaasujen koostumukset	31
Taulukko 5. Suuttimen toiminta-arvot.....	34

1 Johdanto

Kattilalaitoksissa on todettu tapauksia, joissa savukaasujen poistoon käytettyjen imurien toiminnassa on ollut häiriöitä. Häiriöiden on todettu johtuvan imurin siipiin tarttuneista epäpuhtauksista, jotka aiheuttavat epätasapainoa, syöpymistä ja tärinästä johtuvaa rikkoutumista. Epäpuhtauksien on todettu tulleen savukaasuihin kattiloissa käytettyjen polttoaineiden epämääräisistä jakeista. Esiintyessään häiriöt ovat aiheuttaneet käyttökeskeytyksiä ja huomattavaa ylimääräistä työtä.

Tavanomainen savukaasupuhallin sijaitsee kattilan savukanavassa ja siksi se joutuu kovalle rasitukselle kuumuuden ja lian takia. Savukaasupuhaltimen likaantuminen johtaa siihen, että laitteita joudutaan puhdistamaan ja huoltamaan enemmän. Tästä seuraa laitoksen ylläpitäjille ylimääräistä työtä ja kustannuksia. Käyttökatkot voivat aiheuttaa suuria taloudellisia menetyksiä, koska silloin joudutaan käyttämään varakattiloita tai –laitoksia. Lisäksi likaisuus voi johtaa savukaasupuhaltimen käyttöiän lyhenemiseen, koska laite joutuu suuremmalle rasitukselle.

Ongelman ratkaisemiseksi syntyi ajatus tutkia mahdollisuutta käyttää savukaasujen siirtoon savukanavaan asennettua suutinta, jonka tarvitsema paineilma synnytetään raittiissa ilmassa toimivalla korkeapainepuhaltimella. Tällaisessa ratkaisussa puhallin toimii ideaalisessa olotilassa, jolloin huollon tarve on olematon. Suutin, jossa ei ole liikkuvia osia on ainoa laite, joka on tekemisissä savukaasujen kanssa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli testata ja tutkia suuttimen toimintaa lämpölaitoskattilakäytössä, koska tällaisesta ratkaisusta ei ole minkäänlaisia ennakkotietoja eikä kokemusta. Suuttimeksi tutkimukseen valikoitui Coanda efektillä toimiva suutin, jolla saatiin pienellä ilmamäärällä ja pienellä paineella synnytettyä savukaasukäytössä tarvittavat alipaine ja kaasumäärä. Puhaltimeksi valittiin ns. sivukanavapuhallin. Tällaiset puhaltimet ovat yleisesti käytössä, niistä on paljon kokemuksia ja ne ovat luotettavia, sekä pitkäikäisiä.

Ensimmäiset testit tehtiin puhtaalla ilmalla. Testissä todettiin laitteiston toimivuus sekä kerättiin ejektorin suorituskykyyn ja käyttöarvoihin liittyviä tuloksia, joista saatiin käsitys, miten laite toimii. Kun laite todettiin toimivaksi, aloitettiin testit Jyväskylän ammattikorkeakoulun biotalousinstituutin kattilantestauslaboratoriossa.

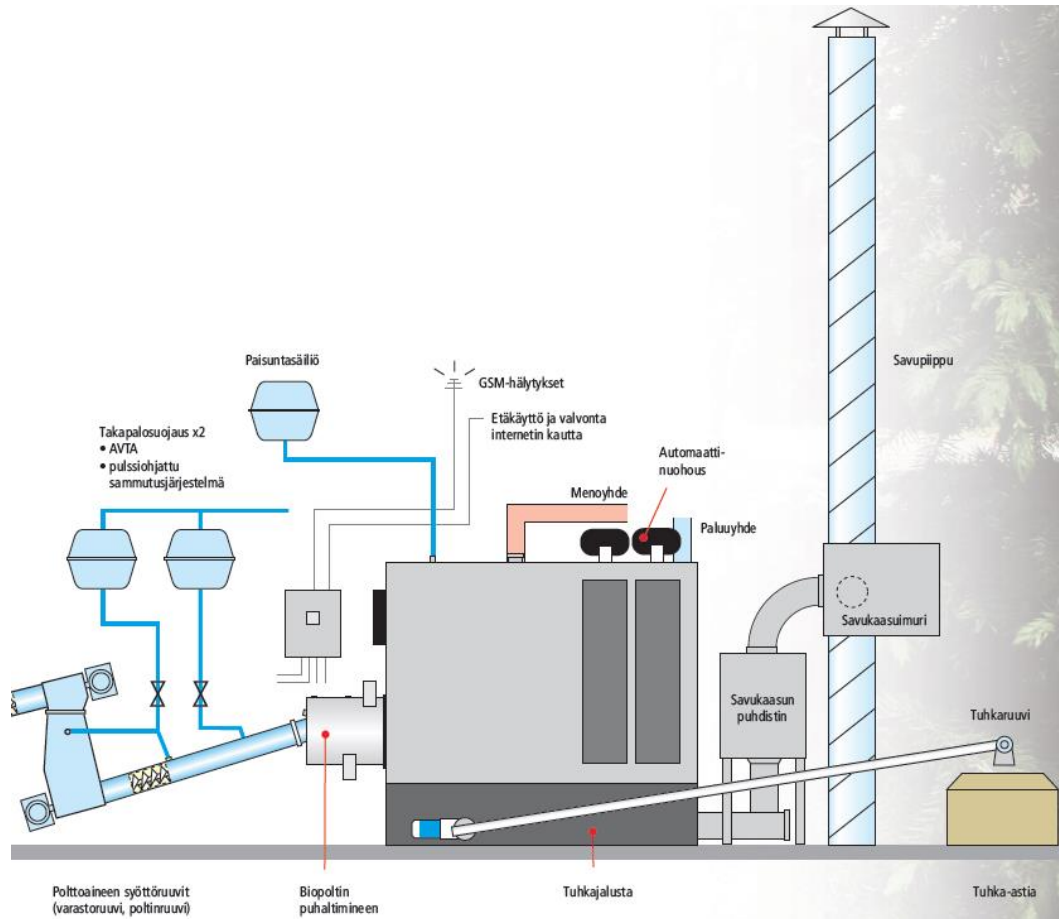
Suutinta testattiin 500 kilowatin kiinteän polttoaineen kattilalla ja polttoaineena oli puuhake. Testeissä tutkittiin ejektorin toimivuutta siten, että kattilaa käytettiin normaalisti ja sen toimintaa tarkkailtiin silmämääräisesti sekä mittausdataa keräämällä. Testin tarkoituksena oli selvittää, toimiiko suutin tavanomaisen savukaasupuhaltimen tavoin ja kuinka se vaikuttaa savukaasuihin. Lisäksi tutkittiin suuttimen likaantumista käytön aikana.

2 Lämpölaitokset

Lämpölaitoksella tarkoitetaan lämpöenergiaa tuottavaa laitosta. Lämpöenergiaa käytetään asuntojen, kiinteistöjen ja käyttöveden lämmitykseen. Lämpölaitosten kokoonpanoissa esiintyy suuria eroja riippuen tehosta, polttoaineesta ja käyttökohteesta. Pienissä kohteissa, kuten omakotitaloissa lämpökattila voidaan sijoittaa pienen lämmönjakohuoneeseen. Suurempi tehoiset kattilat vaativat suuremman tilan ja niille joudutaan rakentamaan erillinen tila. Kattilan lisäksi tulee huomioida myös polttoainevaraston vaatima tila.

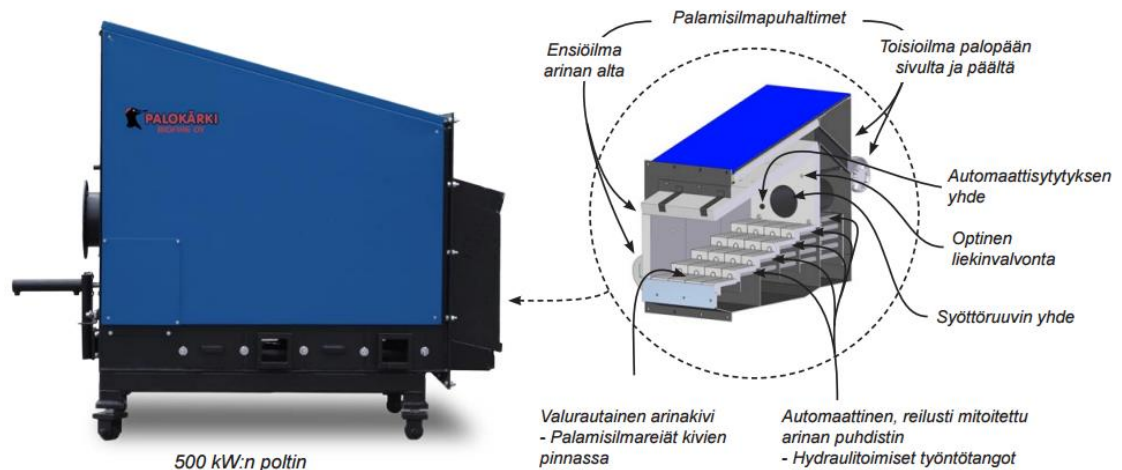
2.1 Lämpölaitoskattilan toimintaperiaate

Lämpölaitoskattiloita valmistetaan monille polttoaineille, mutta tässä työssä keskitytään haketta käyttäviin kiinteän polttoaineen kattiloihin, koska sellaista käytettiin testeissä. Tällaisia kattiloita valmistetaan pienistä, muutaman kymmenen kilowatin kokoluokan kattiloista suurempiin kaukolämpö- tai teollisuuskäytössä toimiviin useiden megawattien tehosiin kattiloihin (Kiinteän polttoaineen lämmityskattiloiden turvallisuus. 2009, 4).



Kuvio 1. Esimerkki lämpölaitoksen kokoonpanosta (Biolämpöopas 2016, 7)

Kuviossa 1 näkyy esimerkki kiinteän polttoaineen laitoksen laitekokoonpanosta. Hake siirretään polttoainevarastosta kattilan polttimelle ruuvikuljettimilla. Ruuvikuljettimet toimivat automaation säätöjen mukaan ja syöttävät haketta kattilan tehontarpeen perusteella. Polttimella hake sytytetään palamaan. Sytytystä varten voi olla erillinen sytytyspoltin tai sitten tuli tehdään käsin. Polttimella on usein vähintään kaksi palamisilmapuhallinta. Primääripuhallin puhaltaa ilmaa hakkeen alapuolelta ja sekundääripuhallin puhaltaa liekin yläosaan tehostaen kaasuuntuneen polttoaineen palamista, kuten kuviossa 2 on esitetty. On myös mahdollista asentaa kaksi poltinta samaan kattilaan, joka kaksinkertaistaa tehon, mutta teho voidaan tarvittaessa myös puolittaa, kun tehon tarve on pieni (Biolämpöopas 2016, 10).

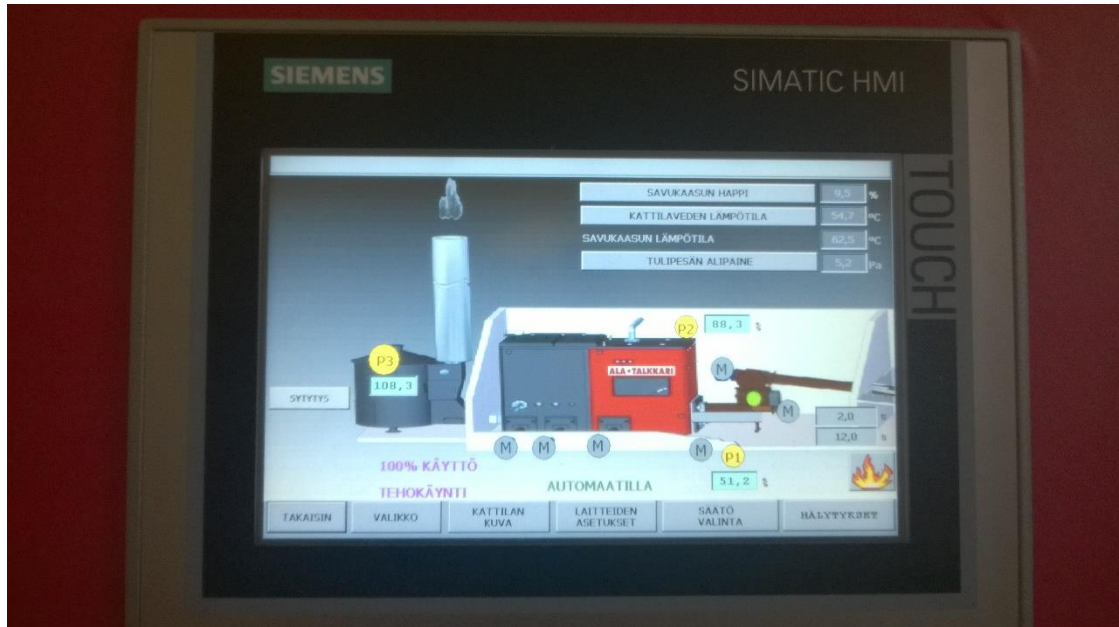


Kuvio 2. Esimerkki arinapolttimesta (Poltin 60-650 kW n.d.)

Palamisen seurauksena syntyy kuumia savukaasuja, jotka ohjautuvat kattilan konvektio-osaan. Kattilavesi kiertää vesiputkissa ja savukaasuista siirtyy lämpöenergiaa veteen. Kattilaveden lämpöenergia siirretään lämmönvaihtimen kautta lämmitysverkon veteen ja jäähtynyt kattilavesi kiertää takaisin kattilaan uudelleen lämmitettäväksi.

Konvektio-osan jälkeen savukaasut puhalletaan savupiipun kautta ulos. Savukanavassa käytetään puhallinta, jotta savukaasut saadaan puhallettua kattilasta ulos. Savukanavassa voi olla myös savukaasun puhdistin, jolla savukaasusta saadaan erotettua lentotuhkaa ja hiukkasia pois. Tuhkan poisto voi olla automaattinen, jolloin kuljetin siirtää tuhkan erilliseen tuhkakonttiin. Joissain tapauksissa kuitenkin tuhka joudutaan poistamaan manuaalisesti.

Nykyisin kattilat toimivat monesti täysin automaattisesti, jolloin laitoksia ei tarvitse miehittää. Kattilan säätöjä voidaan hoitaa etäkäytöillä ja mahdolliset hälytykset saadaan esimerkiksi älylaitteisiin. Kuviossa 3 näkyy kattilan käyttöpaneeli, joka on toteutettu kosketusnäytöllä. Näytöltä voi säätää käyttöarvoja ja seurata kattilan toimintaa.



Kuvio 3. Kattilan käyttöpaneeli

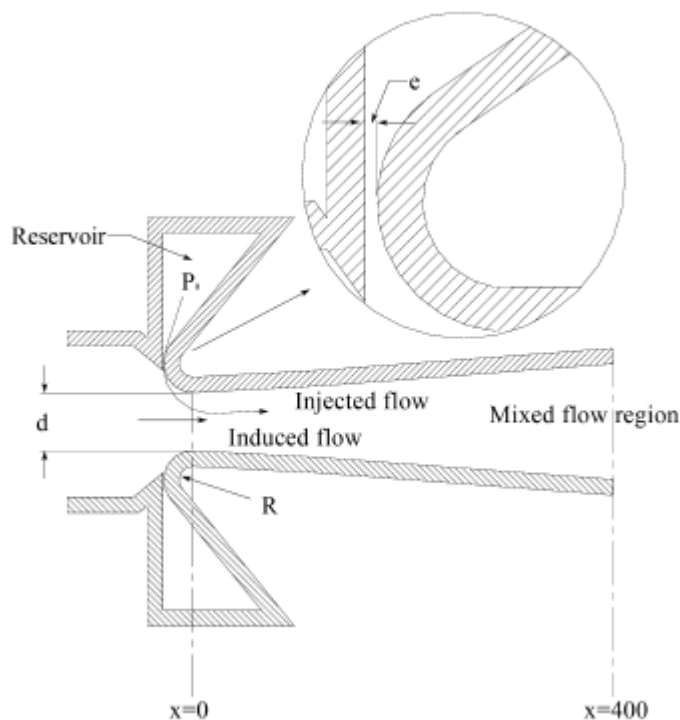
2.2 Savukaasupuhaltimen merkitys

Savukaasupuhallin on lämpölaitosprosessin hallinnan kannalta merkittävä laite. Savukaasupuhallin on savukanavaan sijoitettu laite, jonka tehtävä on imeä savukaasuja kattilasta ja luoda tulipesään alipaine. Tulipesän alipaine edesauttaa palamista ja estää savukaasujen vuotamisen kattilahuoneeseen. Lisäksi puhallin vaikuttaa laitoksen paloturvallisuuteen, koska sillä estetään tulen pääsyn polttoaineensyöttöjärjestelmään (Asennus- ja käyttöohje 2011, 3).

Puhaltimina on käytetty tavallisesti keskipakopuhaltimia. Säättäminen on tapahtunut säätöpellillä, taajuusmuuttajalla tai johtosiipien asentoa säätämällä. Nykyään ei käytetä juurikaan peltiohjausta, koska se aiheuttaa hukkaenergiaa. Sen sijaan taajuusmuuttajakäytöt ovat yleistyneet edullisten hintojen takia. Puhaltimen säätöä ohjataan tulipesän paineen mukaan.

2.3 Ejektorisuutin

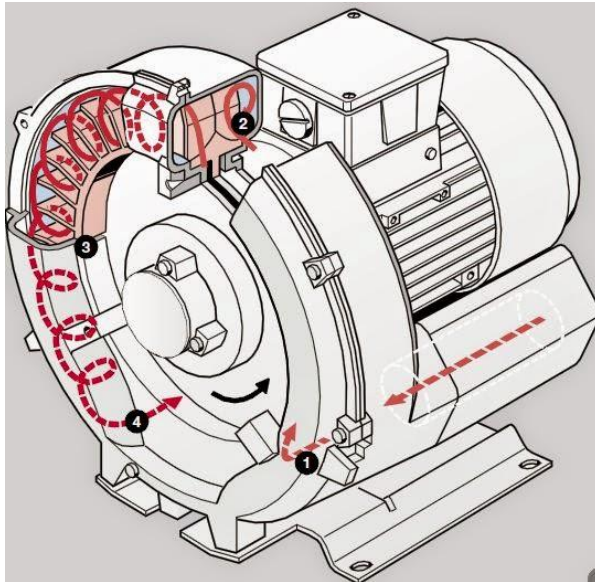
Ejektorisuuttimen toiminta perustuu Coanda-ilmiöön, jolla tarkoitetaan virtauksen pyrkimystä ohjautua pinnan muodon mukaisesti. Coanda-ilmiö on tuttu muun muassa lentokoneen siiven muotoilusta, jossa se osaltaan aiheuttaa siiven nosteen. Kuviossa 4 on esitetty ejektorisuuttimen rakenne. Suutin on sisältä putkimainen kapale, johon syötetään paineilmaa rakoyhteen kautta. Suuttimen sisäseinämä on muotoiltu siten, että syötetty ilmavirta mukailee sen pinnan muotoa. Syötetty ilmavirta siis ohjautuu muotoilun ansiosta kattilasta ulospäin ja suuttimen kurkkuun muodostuu imu, jolloin suutinta voidaan käyttää puhaltimen tavoin. (Kim, Rajesh, Setoguchi & Matsuo 2006, 331-332)



Kuvio 4. Ejektorin toimintaperiaate (Kim ym. 2006, 332)

Ejektorisuutin tarvitsee toimiakseen paineilmaa, joka tuotetaan korkeapainepuhaltimella. Testeissä käytettiin sivukanavapuhallinta. Kuviossa 5 nähdään sivukanavapuhaltimen rakenne. Ilma otetaan laitteen sivusta kanavaan, jossa on puhaltimen juoksupyörä. Juoksupyörän lavat muodostavat sivukanavaan ilmataskuja ja juoksupyörän pyöriessä kaasun nopeus kiihtyy ja se pyörteilee, jolloin sen kineettinen energia kas-

vaa. Energian kasvaessa puhallin muodostaa painetta. Sivukanavapuhaltimille ominaista on, että ne muodostavat korkean imu- ja puhalluspaineen. (Compressed Air Basics Part 7: Side-Channel 2014)



Kuvio 5. Sivukanavapuhaltimen rakenne (Compressed Air Basics Part 7: Side-Channel 2014)

3 Palaminen ja savukaasut

Hakepolton lämpöenergia syntyy palamisreaktion tuotteena. Palamisreaktiolla tarkoitetaan aineen reagoimista hapen kanssa. Lämpölaitoksilla käytettävät polttoaineet koostuvat palavista aineista, joita ovat hiili, vety ja rikki. Polttoaineen lisäksi kattilaan syötetään palamisilmaa, joka sisältää typpeä, happea ja hyvin pienen osan muita kaasuja. Palamisreaktiot vapauttavat lämpöä eli ne ovat eksotermisiä. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 79)

Palamisen seurauksena syntyy lämmön lisäksi savukaasuja, jotka koostuvat reaktioista syntyneistä kaasuista, kattilan yli-ilmasta ja tuhkasta. Hiili on yleisin komponentti polttoaineissa ja sen palaessa syntyy hiilidioksidia (CO_2). Vedyn palamisreaktion seurauksena saadaan vesihöyryä (H_2O). Rikki puolestaan muodostaa palaessaan

riikkioksidia. Savukaasut ovat ympäristölle haitallisia vesihöyryä lukuun ottamatta. Savukaasuihin vaikuttavat myös polttoaineen palamattomat aineet, joita ovat typpi, happi, vesi ja tuhka. Kosteus höyrystyy polttoaineesta ja vähentää näin polttoaineesta hyödyksi saatavaa lämpöä. Savukaasun kosteus puolestaan tehostaa lämmön siirtymistä metalliin. Polttoaineen sisältämä happi puolestaan edistää palamista ja vähentää tarvittavan paloilman määrää. Tuhka joudutaan poistamaan savukaasuista. Savukaasujen puhdistukseen voidaan käyttää sähkösuodatinta, sykklonia, kangas-suodatinta tai savukaasupesuria. (Huhtinen ym. 2000, 83-84)

Edellä mainittujen lisäksi kattilassa muodostuu muita ilmastoille haitallisia yhdisteitä, joita ovat hiilimonoksidi eli häkä (CO), hiilivedyt (CxHy) ja typen oksidit (NOx). Hiilimonoksidin synnyn aiheuttaa epätäydellinen palaminen, jossa ei ole tarpeeksi happea. Sen takia kattilaan tulee ajaa myös ylimääräistä ilmaa, ettei häkää muodostu. Häkää voi muodostua, vaikka kattilaan syötetään yli-ilmaa. Jos kattila kuitenkin toimii muuten hyvin, ovat häkäpitoisuudet kuitenkin vähäisiä ja niistä ei katsota koituvan vahinkoa ympäristölle. Hiilivetyjä voi syntyä, jos polttoaine ja ilma sekoittuvat huonosti tai tulipesässä on matala lämpötila. Siksi juuri pienet biopolttoainekattilat voivat muodostaa hiilivetyjä. Rikkidioksidia sekä rikkitrioksidia syntyy, kun rikki hapettuu. Rikkitrioksidi muodostaa rikkihappoa yhdessä veden kanssa, joten se on ympäristön lisäksi haitallista kattilan rakenteille. Rikkihapon muodostamista voidaan estää pitämällä savukaasujen lämpötila happokastepisteen yläpuolella. (Huhtinen ym. 2000, 91-92)

Palamisilman ja polttoaineen mukana tulipesään kulkeutuvasta tyypestä muodostuu typpimonoksidia, joka voi hapettua edelleen typpidioksidiksi. Näitä päästöjä kutsutaan typenoksidipäästöiksi, jotka happamoittavat ympäristöä. Typenoksidien syntyä voidaan ehkäistä laskemalla kattilan lämpötilaa tai pienentämällä liekin happipitoisuutta. Hiilidioksidi syntyy kaikista polttoaineista ja sitä kutsutaan kasvihuonekaasuksi. Hiilidioksidi päästöjä pyritään rajoittamaan ilmastonlämpenemisen ehkäisyksi. (Huhtinen ym. 2000, 92-94)

4 Mittalaitteet

Työn tavoitteena oli testata suuttimen toimivuutta ja soveltuvuutta savukaasupuhallin käytössä, joten mittalaitteilta ei vaadittu suurta tarkkuutta. Pääasia oli, että saatiin suuntaa antavia tuloksia, joiden pohjalta suuttimen toimintaa arvioitiin.

4.1.1 Virtausmittaukset

Pitot-putki mittaa nesteen tai kaasun nopeutta paikallisesti. Putki on 90 asteen kulmaan taivutettu putki, jonka päässä on kokonaispainetta, eli staattisen ja dynaamisen paineen summaa mittaava reikä. Staattinen paine mitataan virtausta kohtisuoraan olevasta aukosta. Dynaamisen paineen avulla voidaan laskea virtausnopeus. (Pihkala 2004, 78)

Pitot-putken sovelluksena saadaan annubar-putki, jossa on neljä reikää kohtisuorassa virtausta vasten. Tällöin putkeen muodostuu virtauksen keskimääräistä nopeutta vastaava paine. Lisäksi paine mitataan putken takapuolelta. Annubar-putken etuja ovat kohtalainen tarkkuus ja pienet tehohäviöt virtausprofiilin muutoksista huolimatta. Annubar-putkea voidaan käyttää kaasujen höyryjen ja nesteiden virtausmittauksiin. (Pihkala 2004, 78-79)



Kuvio 6 Annubar-putki savukanavaan asennettuna

Kuviossa 6 näkyy savukanavaan asennettu annubar-putki. Sen mittayhteissä on venttiilit, jotka voidaan avata mittauksen ajaksi ja sulkea, kun ei mitata. Jotta pitot- ja annubar-putkilla saadaan mittaustuloksia, tarvitaan kuvion 7 kaltainen paine-ero mittarin. Paine-ero mittari yhdistetään ilmaletkuilla putken yhteisiin. Mittarilla voidaan mitata painetta, virtausnopeutta sekä tilavuusvirtaa. Tilavuusvirran mittaamiseksi tulee mittariin syöttää putken poikkileikkauksen ala.



Kuvio 7 Extech HD 350 Paine-ero mittari

4.1.2 Savukaasuanalyysi

Savukaasumittauksiin oli käytettävissä kannettava Testo 350 savukaasuanalysointilaitteisto ja kuviossa 8 näkyvä savukanavaan asennettu JCT JES 301 -savukaasusondi, joka keräsi tietoa suoraan valvomon tietokoneelle. Sondin paikkaa muutettiin testien aikana suuttimen puolelta toiselle.



Kuvio 8 JCT JES 301 –savukaasusondi

4.1.3 Painemittaus

Suuttimen paineen mittauksissa käytettiin vesiletkumenetelmää. Letkuun laitettiin vettä ja toinen pää kiinnitettiin suuttimen yhteeseen. Kun letkun toinen pää nostettiin korkealle ja jätettiin avoimeksi, voitiin suuttimen paine laskea vedenpintojen eron mukaan kaavalla 1. (Valtanen 2012, 231)

$$p_1 - p_2 = \rho gh \quad (1)$$

missä $p_1 - p_2$ = pintojen välinen paine-ero

ρ = aineen tiheys

g = putoamiskiihtyvyys

h = pintojen välinen ero

Hallin ilman lämpötilaa ja kosteutta, sekä ohivirtausilman lämpötilaa mitattiin kuviossa 9 näkyvällä Vaisala HMI 31 ilmankosteusmittarilla. Ilmankosteuden ja lämpötilan mittaukset suoritettiin, jotta pystyttiin tarkkailemaan olosuhteita testien aikana.



Kuvio 9. Vaisala HMI 31 ilmankosteus- ja lämpömittari

5 Laitteen toiminnan testaus

Suuttimen toimintaa ja ominaisuuksia testattiin ennen kattilaan asentamista puhaltamalla sillä puhdasta ilmaa. Mittaukset olivat epätarkkoja ja niiden tarkoitus oli saada suuntaa-antavia tuloksia suuttimen suorituskyvystä. Suuttimen molemmin puolin asennettiin muoviputket, jotta virtauksia ja paineita saatiin mitattua. Imupuolen putkeen asennettiin mittari virtausnopeudelle. Lisäksi imupuolen alipainetta mitattiin pitot-putki mittauksella. Testaus asetelma näkyy kuviossa 10.



Kuvio 10. Järjestelyt laitteen testausta varten

Paineilma tuotettiin ejektorille kuviossa 11 näkyvällä neljän kilowatin sivukanavapuhaltimella ja puhallinta ohjattiin taajuusmuuttajakäytöllä. Sivukanavapuhaltimille on ominaista luoda suuret imu- ja puhalluspaineet, joten sellainen soveltuu käyttöön hyvin. Valmistajan mukaan testissä käytetty puhallin kykenee tuottamaan 200 mbar paineen ja -200 mbar alipaineen noin 350 m³/h tilavuusvirralla (Opassy 2OP-3AC Part 5. n.d). Puhaltimen imupuolelle asennettiin putki, josta mitattiin ilmanvirtausnopeutta.

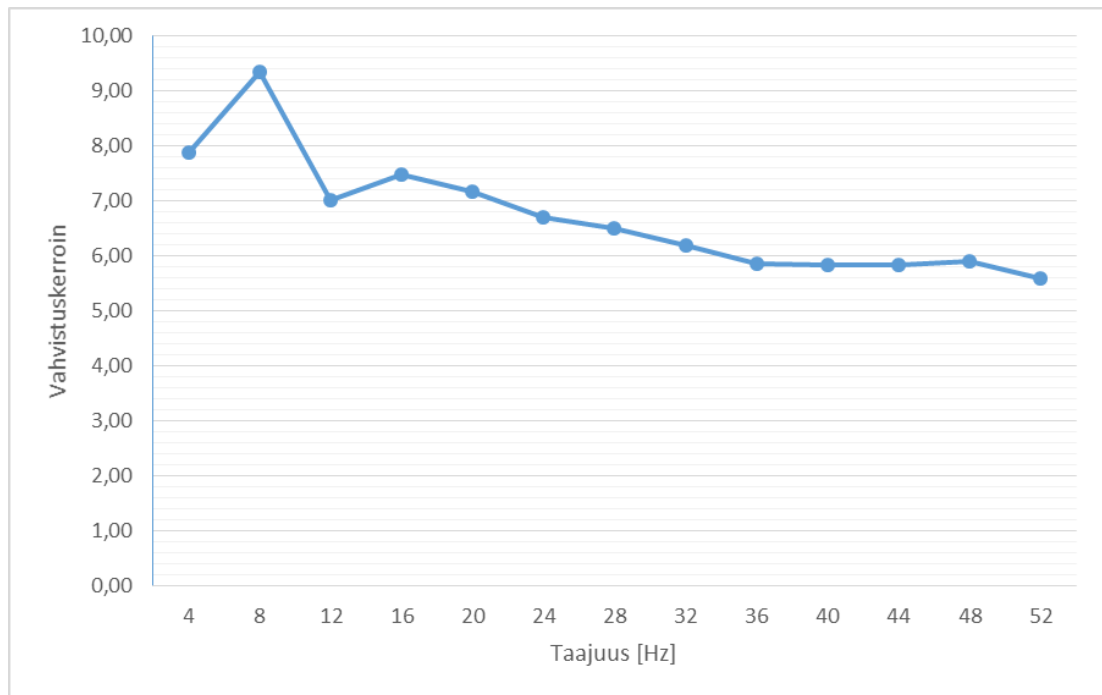


Kuvio 11. Puhallin ja taajuusmuuttaja

Taulukossa 1 on esitetty tilavuusvirrat sekä suuttimeen syötetystä ilmasta, että suuttimen synnyttämän virran imupuolelta. Tilavuusvirrat on laskettu mitattujen virtausnopeuksien ja käytettyjen putkien poikkipinta-alojen mukaan. Vahvistuskertoimella tarkoitetaan suuttimen ja puhaltimen virtauksien suhdetta. Kuviossa 12 on esitetty graafina vahvistuskertoimet puhaltimen eri taajuuksilla. Testissä todettiin, että suuttimen avulla saatiin tarvittava tilavuusvirta ja laiteen testaamista oli mielekästä jatkaa kattilakäytössä.

Taulukko 1. Mittaustulokset

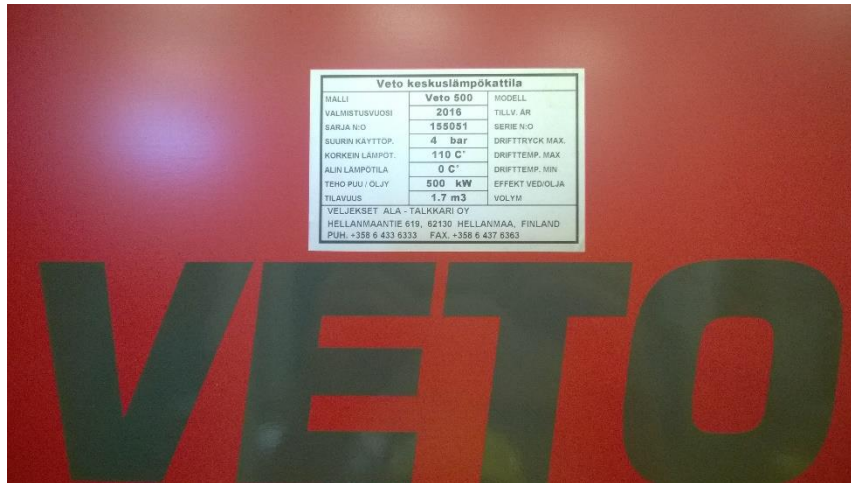
Taajuus [Hz]	Puhallin		Suutin		
	Tilavuusvirta [m ³ /s]	Tilavuusvirta [m ³ /h]	Tilavuusvirta [m ³ /s]	Tilavuusvirta [m ³ /h]	Vahvistuskerroin
4	0,006	21,74	0,048	171,21	7,88
8	0,010	34,78	0,090	325,29	9,35
12	0,019	69,56	0,136	487,94	7,01
16	0,024	86,95	0,181	650,59	7,48
20	0,030	108,69	0,216	778,99	7,17
24	0,039	139,12	0,259	933,08	6,71
28	0,043	156,51	0,283	1018,68	6,51
32	0,051	182,59	0,314	1129,96	6,19
36	0,057	204,33	0,333	1198,45	5,87
40	0,063	226,07	0,366	1318,29	5,83
44	0,068	243,46	0,395	1421,02	5,84
48	0,072	260,85	0,428	1540,86	5,91
52	0,093	334,75	0,521	1874,71	5,60



Kuvio 12. Vahvistuserroin eri taajuuksia käytettäessä

6 Testit kattilantestauslaboratoriossa

Testit kattilakäytössä suoritettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun biotalousinstituutin kattilantestauslaboratoriossa Tarvaalassa. Kattilantestauslaboratorio tarjoaa energia-alan toimijoille monipuolisia testaus- ja mittauspalveluita. Laboratorion kolmella testauspaikalla tutkitaan muun muassa energiabiomassojen polttoa, päästöjen hallintaa ja energiatehokkuutta. Laboratorion pihalla on myös mahdollisuus testata lämpökontteja. (Kattilantestauslaboratorio. n.d.) Testit suoritettiin 500 kilowatin Ala-Talkkari Veto 500 keskuslämpökattilalla, jonka tietoja näkyy kuviossa 13.



Kuvio 13. Kattilan arvokilpi

6.1 Testaussuunnitelma

Testausta varten laadittiin suunnitelma, jossa selvitettiin aikataulut, tehtävät ja mittaukset. Suunnitelman mukaan laitteiston kokoonpanoon ja kylmätestaukseen sekä puhaltimen maksimi suorituskyvyn testaamiseen varattiin aikaa yksi päivä. Aikaisempien pohdintojen ja laitteen suorituskykytestin perusteella päätettiin tehdä varsinaiset mittaukset tasaisella ajolla 300 kilowatin teholla ja 100 kilowatin osateholla. Molemille tehoille varattiin yksi päivä. Lisäksi samoilla tehoilla tehtiin testit vertailupuhaltimella.

Ejektorin kanssa tehdyissä testeissä päätettiin mitata seuraavia arvoja:

- Kattilateho
- Tulipesän paine
- Savukaasun virtaus, -paine ja -lämpötila ennen suutinta
- Savukaasun virtaus, -paine ja -lämpötila suuttimen jälkeen
- Puhaltimen ottoteho
- Puhaltimen virtaus
- Paine suuttimen vaipan yhteestä
- Hallin lämpötila ja kosteusprosentti
- Savukaasun koostumus ennen ja jälkeen suutinta

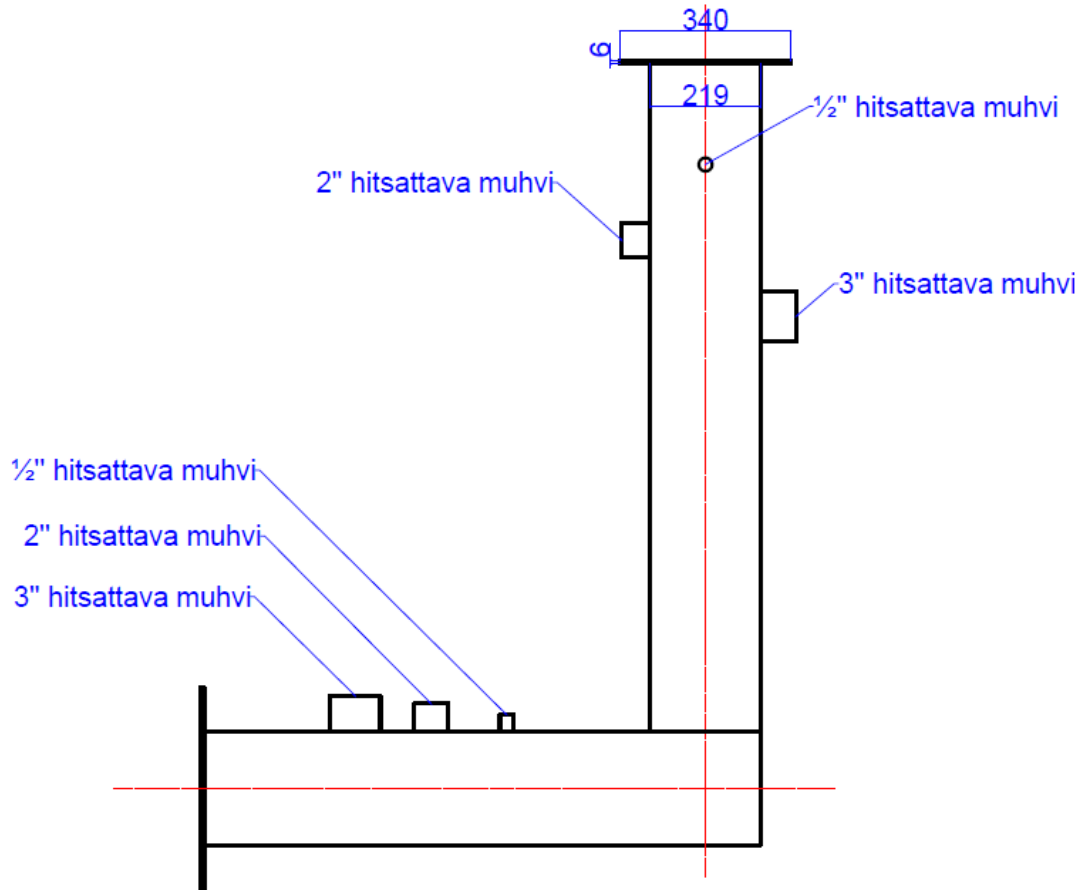
Vertailupuhallintesteissä mittauksia tarvittiin vähemmän, koska savukaasun sekaan ei normaalisti pääse puhdasta ilmaa. Vertailupuhallin oli sijoitettuna savupiipun yläpäässä, joten kaikki mittaukset tehtiin ennen puhallinta. Vertailupuhallin testeissä mitattiin:

- Kattilateho
- Tulipesän paine
- Savukaasun virtaus, -paine ja -lämpötila
- Savukaasupuhaltimen ottoteho
- Hallin lämpötila ja ilmankosteus
- Savukaasun koostumus

6.2 Savukanavan suunnittelu

Testien suorittamista varten suunniteltiin savukanava kattilan ja laboratorion oman savupiipun välille. Suutin haluttiin asentaa mahdollisimman lähelle savupiippua ja kanavaan laitettiin mittayhteitä huomioiden virtaushäiriöt

Savukanavan perusosa on vaakasuunnassa kattilasta lähtevä neliskulmainen kanava, josta lähtee DN 200 putki suoraan ylöspäin. Vaakasuoraan osaan laitettiin kolme hittavaa muhvia mittayhteiksi. Muhvien koot olivat $\frac{1}{2}$ " , 2" ja 3" . Samanlaiset mittayhteet laitettiin myös pystysuoraan putkeen. Kuviossa 14 on savukanavan perusosan pääprojektio. Mittayhteet sijoitettiin lähelle suutinta, koska heti mutkan jälkeen esiintyy todennäköisesti eniten virtaushäiriöitä.

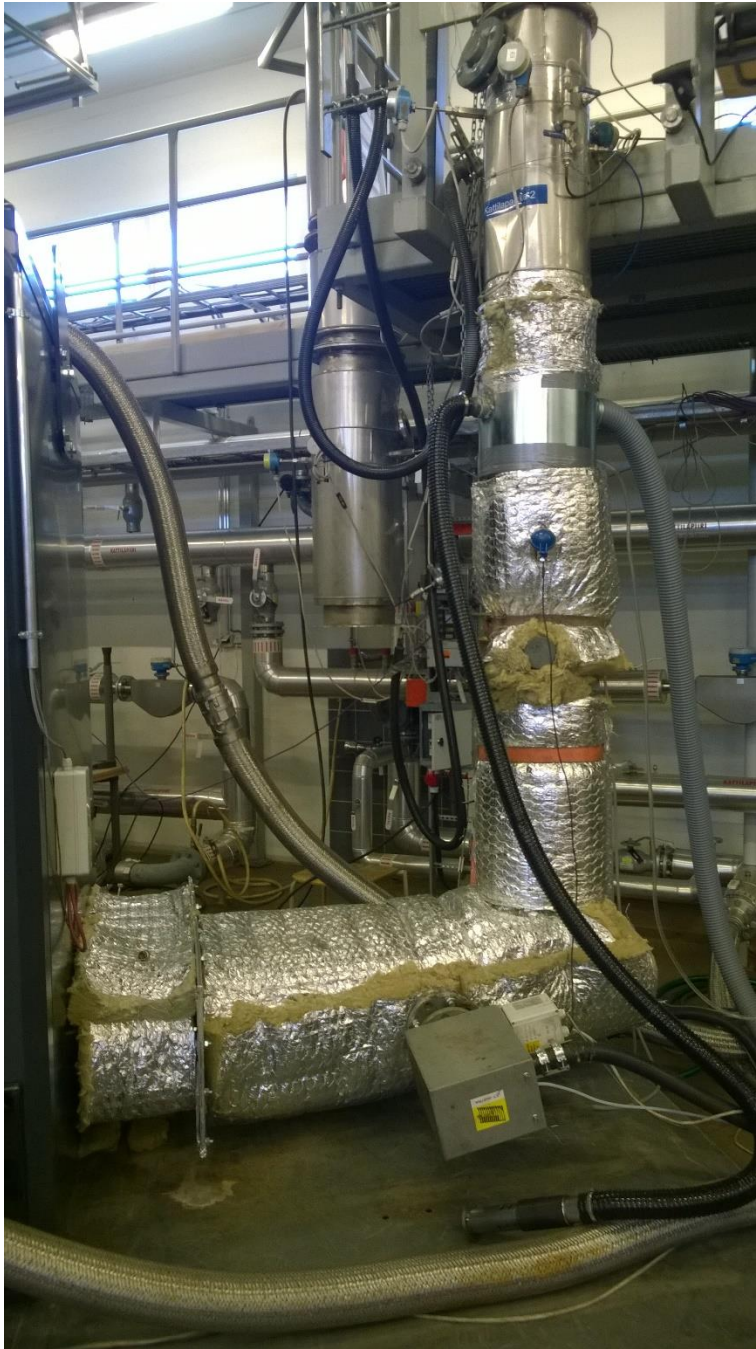


Kuvio 14. Savukanavan piirustus

Lisäksi suunniteltiin holkki, joka asennetaan kanavaan suuttimen tilalle, kun kattilaa ajetaan toisella puhaltimella. Holkki on suuttimen mitoilla tehty putki, jonka päissä on laippakiinnitykset. Suuttimen ja savupiipun laipan välille piti suunnitella vielä sovitte, koska savupiipun laippa oli kuudella pultilla ja suuttimen kiinnitys 8 pultilla. Sovitteen on lyhyt putki, jonka toisessa päässä on suuttimeen sopiva laippa ja toisessa päässä savupiippuun sopiva laippa.

6.3 Testausjärjestelyt

Työt aloitettiin asentamalla savukanava ja ejektorisuutin paikalleen. Mittalaitteiden asennuksen jälkeen savukanava eristettiin. Kuviossa 15 näkyy savukanava mittalaitteineen paikalleen asennettuna ja eristettynä.



Kuvio 15. Savukanava

Suuttimen vaippaan tehtiin ohivirtaus, koska puhallin oli suuttimelle ylimitoitettu. Ohivirtausta säädettiin kuviossa 16 näkyvällä järjestelmällä, jossa oli kaksi päällekkäistä putkea. Sisempi putki tulpattiin ja siinä oli reikiä, joista ilma pääsi virtaamaan ulos. Ulompaa putkea siirtämällä reikiä saatiin tukittua ja avattua tarpeen mukaan. Säädin liitettiin suuttimeen letkulla. Ohivirtaus piti kovaa ääntä puhaltimen ollessa

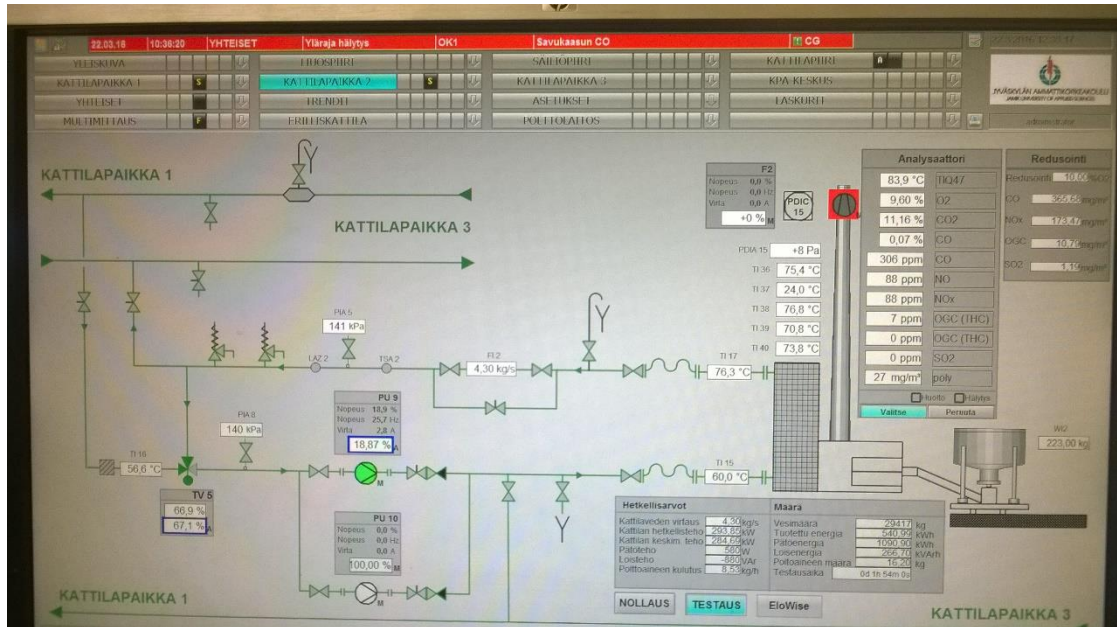
käynnissä, joten säädin laitettiin pahvilaatikkoon testien ajaksi. Ohivirtaus ilman lämpötila saatiin siten mitattua laatikon sisältä. Ohivirtaus säädettiin siten, että puhallin otti 50 herzin taajuudella käytettäessä 4 kilowatin tehon.



Kuvio 16. Ohivirtauksen säädin

6.4 Mittaukset

Mittausdataa kerättiin kuviossa 17 näkyvän laboratorion valvomon tietokoneen kautta. Ruudulta näkee hetkittäiset arvot ja järjestelmä rekisteröi viiden sekunnin välein jokaisen mittauspaikan arvon, jotka saadaan talteen Excel taulukkona. Lisäksi suoritettiin käsimittauksia, koska kaikkia haluttuja tietoja ei saatu valmiiksi paikallaan olleista mittauksista.



Kuvio 17. Valvomon näkymä

Suuttimen ohivirtauksen nopeutta mitattiin pitot-putkella ja savukaasun virtauksia pitot-putkeen perustuvalla annubar-menetelmällä. Puhaltimen ottoteho luettiin taa-juusmuuttajalta ja puhaltimen imuvirtausmittaus toteutettiin samalla tavalla kuin aikaisemmassa testissä.

6.5 Hakkeen kosteuden määrittäminen

Jokaisen testipäivän alussa otettiin käytettävästä hakkeesta näyte, josta hakkeen kosteus analysoitiin. Kosteuden määrittäminen aloitettiin punnitsemalla kaksi alumiini vuokaa. Vuokat täytettiin näytekakkeella ja ne punnittiin täytenä. Näytteitä pidettiin uunissa 105 asteen lämpötilassa noin vuorokausi, jotta niistä haihtuisi kosteus pois. Uunista otetut näytteet punnittiin ja tuloksista laskettiin hakkeen kosteusprosentit.

Massanmuutoksen perusteella näytteiden kosteus laskettiin kaavan 2 avulla.

$$M_{ar} = \frac{(m_e - m_j)}{(m_e - a)} * 100\% \quad (2)$$

missä M_{ar} = märkäpainoa kohti laskettu kosteus

m_e = märän näytteen + näyteastian massa

m_j = kuivatun näytteen + näyteastian massa

a = näyteastian massa

Taulukko 2. Hakenäytteistä analysoidut kosteudet eri testipäivinä

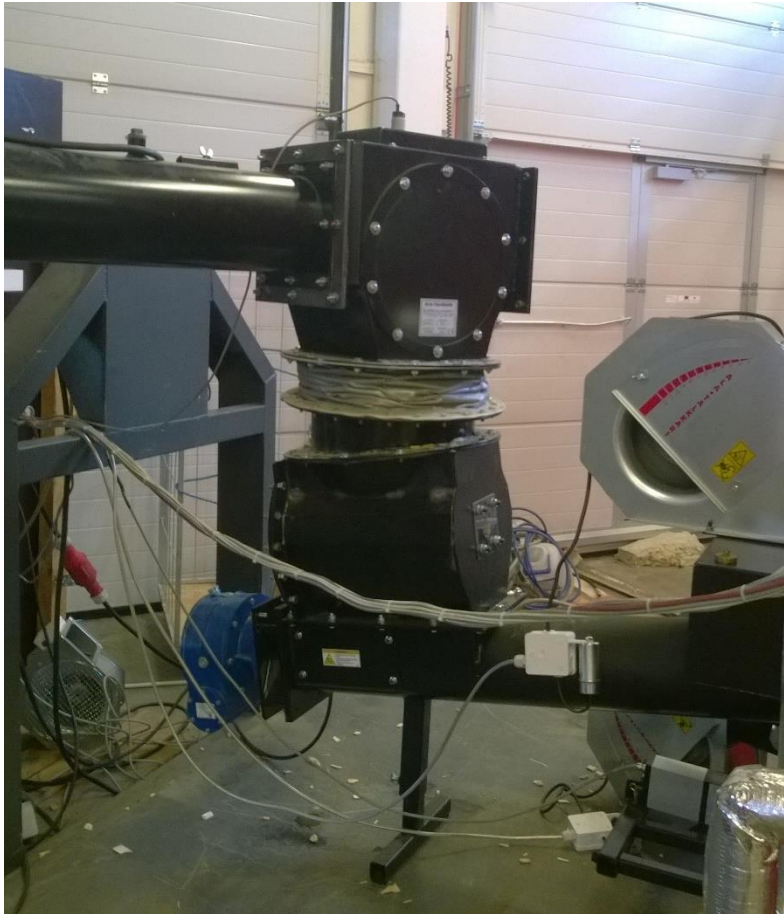
Pvm	21.3.2016	22.3.2016	23.3.2016	30.3.2016
Näyte 1	26,1 %	24,8 %	25,8 %	24,3 %
Näyte 2	24,7 %	25,2 %	23,9 %	25,3 %
Keskiarvo	25,4 %	25,0 %	24,9 %	24,8 %

Taulukossa 2 on jokaiselta päivältä molempien näytteiden kosteusprosentit ja niiden keskiarvot. Kosteudessa ei esiintynyt suuria muutoksia testipäivien välillä, joten voitiin todeta, että hakkeen kosteus ei vaikuttanut tuloksiin testipäivien välillä.

6.6 Testit ejektoripuhaltimella

6.6.1 Suorituskyvyn testaus

Ennen kuin kattilaan sytytettiin tulet, testattiin, että ejektoripuhaltin pystyy tuottamaan tulipesään alipaineen kylmänä. Palamisilmapuhaltimet ja ejektoripuhallin käynnistettiin ja laitteisto todettiin toimivaksi. Kuviossa 19 näkyy kattilan polttoaineensyöttöjärjestelmä, joka oli toteutettu kahdella ruuvikuljettimella. Siiloruuvi työnsi haketta syöttöruuville, joka kuljetti hakkeen edelleen polttimelle. Kuvion oikeassa laidassa näkyy myös palamisilmapuhaltimet.



Kuvio 18. Polttoaineensyöttö ja palamisilmapuhaltimet

Kattilaan sytytettiin tulet ja vesikierron säätöjä alettiin hakea kohdilleen, kun todettiin, että savukaasupuhallin pitää tulipesän alipaineessa. Tavoitteena oli saada vesikierto siten, että kattilavesi on 60 asteista kattilaan mennessä ja 80 asteista kattilasta poistuessa.

Kun kattilaa ajettiin savukaasupuhaltimen rajoissa maksimiteholla, havaittiin merkittävää vaihtelua tulipesän alipaineessa. Tämä johtui palamisilmapuhaltimien automaatiosta, joka ei ollut yhteydessä käsisäätöiseen savukaasupuhaltimeen. Testissä todettiin, että savukaasupuhallin pystyy poistamaan savukaasut, kun kattilateho on hieman yli 300 kilowattia, joten maksimijotesti päätettiin tehdä 300kilowatin teholla. Laitteisto ja mittaukset toimivat kuitenkin siten, että testit tasaisella 300 kilowatin teholla ja 100 kilowatin osateholla päästiin toteuttamaan.

6.6.2 Testiajot 300 kW ja 100 kW tehoilla

Kun ensimmäisessä testissä todettiin ejektorin toimivaksi, voitiin aloittaa testaaminen tasaisella ajolla. Aamulla siiloon laitettiin lisää haketta ja hakkeesta kerättiin kosteusnäyte. Kattilaan sytytettiin tulet ja tehoa alettiin nostaa kohti 300 kilowattia. Testin alussa savukaasuanalyysi tehtiin ennen suutinta. Testiajo sujui ilman ongelmia ja mitausdataa saatiin kerättyä suunnitelman mukaan. Testi toistettiin myös 100 kilowatin teholla ongelmitta.

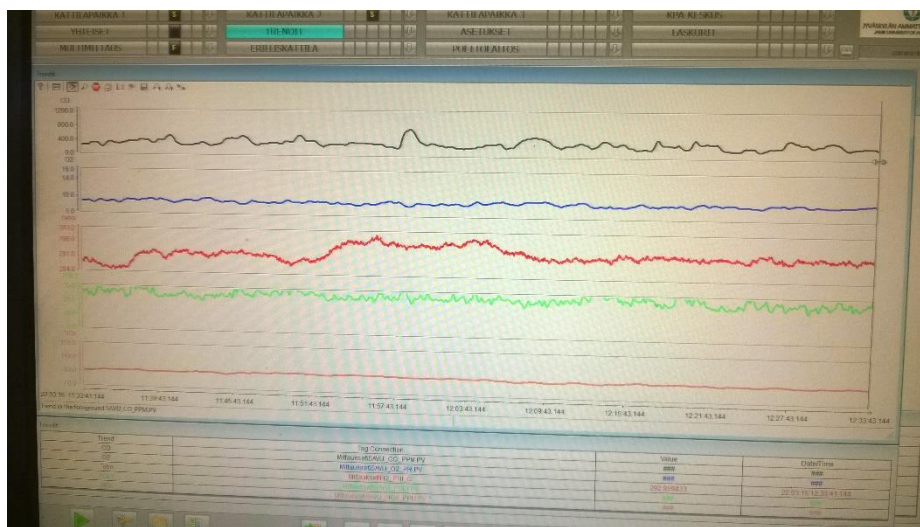
6.7 Testit vertailupuhaltimella

Ejektoripuhallinta haluttiin verrata vastaavassa käytössä tavanomaisempaan ratkaisuun, joten testejä tehtiin myös kattilalaboratorion omalla savukaasupuhaltimella. Vertailupuhaltimena käytettiin savupiipun päähän käännettävää Exodraft RSV400-4-2 keskipakopuhallinta, jonka kapasiteetti on maksimissaan 4200 m³/h (Exodraft RSV. n.d.). Puhallinten keskinäinen vertailu esimerkiksi energiatehokkuuden suhteen oli kuitenkin vaikeaa, koska ejektorisuuttimeen asennettiin ohivirtaus, jota ei näissä testeissä saatu hyötykäyttöön. Testiä varten myös irrotettiin ejektorisuutin savukanavasta ja sen tilalle asennettiin putkesta tehty holkki. Suuttimen irrottamisen jälkeen tarkasteltiin suuttimen sisäpintojen likaantumista.

Vertailupuhallin testissä tarvittiin huomattavasti vähemmän mittauksia. Tässä testissä riitti yksi mittaus savukaasun tilavuusvirralle ja koostumukselle, koska savukaasun sekaan ei sekoittunut ylimääräistä ilmaa. Myös sivukanavapuhaltimen ja ohivirtauksen mittaukset jäivät kokonaan pois. Ottoteho luettiin puhaltimen taajuusmuuttajalta sähkökeskuksesta. Vertailupuhallin testi ehdittiin tekemään yhden päivän aikana. Testissä kattilaa ajettiin noin tunnin mittausjakso sekä 100 kilowatin, että 300 kilowatin tehoilla.

7 Tulokset

Tuloksien tarkasteluun on käytetty raakadatasta kerättyä tietoa noin tunnin mittaiselta jaksolta, jolla ajo on ollut mahdollisimman tasaista. Täysin tasaisella teholla kattilaa ei pystytty ajamaan. Suurimpana syynä lievälle epätasaisuudelle voidaan pitää polttoaineen vaihtelevaa laatua. Mittausjakson keskiarvoja laskemalla saadaan kuitenkin varsin luotettavia tuloksia. Testin aikana ajon tasaisuutta seurattiin kuviossa 19 näkyvällä valvomonäytöllä, joka piirsi reaaliajassa graafit tehon, hapen, hään, pölyn ja typenoksidien mittausarvoille.



Kuvio 19. Graafeja valvomon näytöllä

7.1 Virtaukset

Savukaasuvirtoja mitattiin, jotta saatiin selville kuinka paljon raikasta ilmaa savukaasuun sekoittuu suuttimessa. Käsin mitatuista tuloksista laskettiin keskiarvot ja ne on esitelty taulukossa 3. Ennen testejä povattiin, että kattila muodostaisi savukaasua noin kuutiometrin sekunnissa megawatin kattilatehoa kohden. Tämä oletus on hyvin suuntaa antava, mutta etenkin pienillä tehoilla savukaasun määrä näyttäisi olevan suurempi. Savukaasuvirtojen tarkastelu on oleellinen osa savukaasupuhaltimen mitoitusta. Puhaltimen tehoa tarkasteltaessa on huomioitava, että kaikki teho ei kulu suuttimen käyttöön vaan osa menee ohivirtauksessa hukkaan. Lisäksi ohivirtaus pienentää kokonaishyötysuhdetta. Suuttimen käyttö vaatii ilmavirtojen suhteen perusteella noin 2,6 kW tehon.

Taulukko 3. Suuttimen ja savukaasujen mittaustietoja

		suutin 100 kW	suutin 300 kW	Vertailu 100 kW	Vertailu 300kW
Kattilateho	kW	101,67	303,00	101,65	298,90
Tulipesän alipaine	Pa	-6...-11	3...-14	-4...-7	0...-29
SK virtaus ennen	m/s	4,14	7,78	3,36	8,88
SK virtaus ennen	m ³ /s	0,152	0,285	0,123	0,326
SK paine ennen	Pa	-8,11	-28,83	-20,8	-102,7
SK lämpötila ennen	°C	72,57	84,40	71,7	88,78
SK virtaus jälkeen	m/s	5,77	10,97		
SK virtaus jälkeen	m ³ /s	0,211	0,402		
SK paine jälkeen	Pa	15,84	57,13		
SK lämpötila jälkeen	°C	61	74		
Puhaltimen kokonais- teho	kW	0,60	3,90	0,12	0,67
Virtaus suuttimeen	m ³ /s	0,061	0,114		
Suutin paine	mm	290,00	1046,67		
Suutin paine	Pa	2839	10246		
Ohivirtaus	m ³ /s	0,039	0,076		
Ohivirtaus lämpötila	°C	28,01	42,70		

Suuttimen takia savukaasun määrä kasvaa, koska savukaasun sekoittuu puhdasta il-
maa. Ennen ja jälkeen suutinta mitatuista arvoista voidaan laskea kuinka paljon savu-
kaasun määrä lisääntyy.

Savukaasun määrän lisäys prosentteina:

$$\frac{0,211 - 0,152}{0,152} = 38,8\%$$

$$\frac{0,402 - 0,285}{0,285} = 41,1\%$$

Suutin lisäsi siis savukaasun määrä noin 40 %. Savukaasun määrä tulee ottaa huomi-
oon savukanavan mitoituksessa. Tämän lisäksi savukaasuun lämpötila laski noin kym-
menellä asteella. Savukaasun lämpötila suuttimen jälkeen on mitattu neljästä koh-
dasta ja niistä on laskettu keskiarvo. Virtausmäärien muutoksella ei ole käytännössä
merkitystä kattilan ajon kannalta.

7.2 Savukaasuanalyysit

Taulukko 4. Savukaasujen koostumukset

300 kW ennen	Teho	O ₂	CO ₂	CO	Nox	Pöly	Hiilivety	SO ₂
Virtaus 0,285 m ³ /s	kW	%	%	ppm	ppm	mg/m ³	ppm	ppm
Keskiarvo	296,6	9,04	11,55	328,28	90,32	27,88	6,87	0,43
Minimi	291	7,61	10,64	186,4	85,21	20,11	3,47	0,43
Maksimi	305,3	9,98	12,91	592,4	96,99	37,35	13,88	0,51

300 kW jälkeen	Teho	O ₂	CO ₂	CO	Nox	Pöly	Hiilivety	SO ₂
Virtaus 0,402 m ³ /s	kW	%	%	ppm	ppm	mg/m ³	ppm	ppm
Keskiarvo	311,2	10,87	9,73	261,22	85,57	29,57	4,95	0,43
Minimi	297,3	9,54	8,18	127,06	72,58	15,05	2,6	0,36
Maksimi	323,6	12,55	10,98	437,72	91,58	40,37	9,26	0,43

300 kW vertailu	Teho	O ₂	CO ₂	CO	Nox	Pöly	Hiilivety	SO ₂
Virtaus 0,326 m ³ /s	kW	%	%	ppm	ppm	mg/m ³	ppm	ppm
Keskiarvo	299,8	11,65	8,92	227,86	88,39	30,57	3,67	0,7
Minimi	291,4	10,48	7,8	154,94	81,74	19,84	2,03	0,43
Maksimi	308,4	12,87	10,01	337,33	95,91	47,44	6,67	1,37

100 kW ennen	Teho	O ₂	CO ₂	CO	Nox	Pöly	Hiilivety	SO ₂
Virtaus 0,152 m ³ /s	kW	%	%	ppm	ppm	mg/m ³	ppm	ppm
Keskiarvo	106	13,3	7,45	1134,87	54,01	17,95	83,99	0,74
Minimi	103,6	12,54	6,71	734,53	8,31	12,37	44,65	0,65
Maksimi	108,1	14,15	8,1	1621,84	60,04	35	143,4	0,8

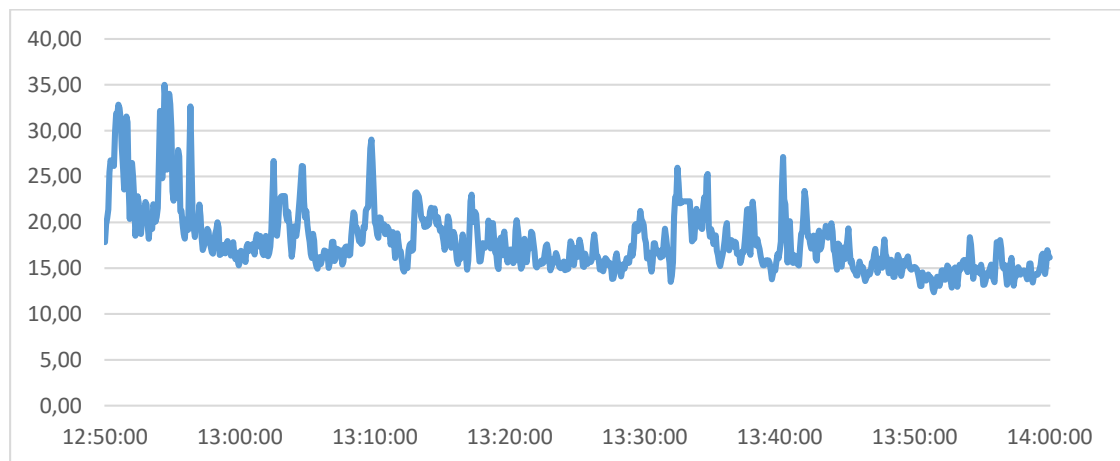
100 kW jälkeen	Teho	O ₂	CO ₂	CO	Nox	Pöly	Hiilivety	SO ₂
Virtaus 0,211 m ³ /s	kW	%	%	ppm	ppm	mg/m ³	ppm	ppm
Keskiarvo	100,9	14,78	6,13	984,67	45,37	34,98	84,59	0,83
Minimi	96,93	13,97	5,65	684,49	39,93	13,89	49,91	0,65
Maksimi	104	15,37	6,81	1455,35	50,64	98,95	153,2	0,94

100 kW vertailu	Teho	O ₂	CO ₂	CO	Nox	Pöly	Hiilivety	SO ₂
Virtaus 0,123 m ³ /s	kW	%	%	ppm	ppm	mg/m ³	ppm	ppm
Keskiarvo	101,7	13,27	7,37	919,76	57,43	499,4	87,26	0,77
Minimi	98,44	12,47	6,73	553,33	51,79	494,75	48,71	0,65
Maksimi	104	14,02	8,06	1474,13	66	499,42	166,06	0,87

Taulukossa 4 on esitetty mittausdatan perusteella lasketut keskiarvot savukaasun siällön pitoisuuksille. Arvot on mitattu ennen suutinta, suuttimen jälkeen ja vertailupuhaltimella sekä 100 kilowatin, että 300 kilowatin tehoilla. Tuloksia tarkkaillessa on

syitä huomata, että suutinta ennen ja jälkeen tehdyt mittaukset eivät ole tehty samanaikaisesti, koska savukaasua analysoitiin vain yhdellä mittauksella ja mittaussonda jouduttiin siirtämään kesken ajon. Pölymäärää tarkasteltaessa on huomioitava, että mittaus lukee myös vesihiukkaset pölyksi. Näin ollen varsinaisen pölyn määrää on mahdoton sanoa. Suuttimen kautta ei kuitenkaan tule lisää pölyä savukaasuun, koska suuttimeen syötetään puhdasta ilmaa.

Mittauksissa esiintyvät epätasaisuudet johtuvat palamisen tasaisuuden vaihtelusta ja arinan liikkeistä. Testin loppua kohden kattilan toiminta tasapainottuu. Kuviossa 20 näkyy esimerkkinä, kuinka mitta-arvot voivat vaihdella pölymittauksessa yhden mittauksen aikana.



Kuvio 20. Pölymittaus 100 kW ennen suutinta

Testit osoittavat, että suuttimen vaikutuksesta savukaasu laimenee, koska savukanaavaan lisätään puhdasta ilmaa. Ilma koostuu pääasiassa typestä ja hapestä, joten savukaasun happipitoisuus nousee, mutta pääsääntöisesti muiden aineiden pitoisuudet laskevat. Ilman sekoittuminen savukaasun sekaan ei aiheuta ongelmia, kuten esimerkiksi pölyhiukkasten syttymistä, koska lämpötilat pysyvät matalalla. Testin perusteella ei ilmene syytä, joka estäisi suuttimen käytön savukaasun poistossa.

100 kilowatin vertailupuhallin testissä pölymittaus näyttää mittausalueen maksimilukemia. Tämä johtuu siitä, että savukaasun kosteudesta peräisin oleva vesi aiheuttaa mittarin oikosulun. Samana päivänä mitatussa 300 kW testissä mittari toimi normaalisti ja tulokset vaikuttavat järkevältä.

8 Suuttimen toiminta-arvot ja puhaltimen mitoitus

Suutin vaatii toimiakseen melko korkean paineen, joten sivukanavapuhallin on hyvä valinta puhaltimeksi. Puhaltimen valinnan kannalta on huomioitava teho sekä paineen ja virtauksen tuotto. Suutinta testattiin vielä uudestaan puhtaalla ilmalla, jotta suuttimen toiminnasta ja syöttöilman tuottamisen vaatimuksista saatiin tarkempia mittaustuloksia. Uudessa testissä huomioitiin muun muassa suuttimeen syötetyn ilmanpaineen vaikutus virtaukseen. Kun ilmanpaine kasvaa, ilma puristuu kasaan. Testissä mitataan vain ilmavirtauksen nopeutta, joten todellinen ilmamäärä on mittausta suurempi paineen kasvaessa. Lisäksi arvioitiin kuinka tehokas puhallin tarvitaan tuottamaan paineilma suuttimelle. Puhallin lämmittää syötettävää ilmaa käynnissä ollessaan. Lämpötilan muutoksen vaikutukset kuitenkin arvioitiin niin pieneksi, että niitä ei huomioitu laskuissa.

Paineen vaikutus syötetyn ilman määrään voidaan laskea ideaalikaasun tilanyhtälöllä, kun lämpötilan vähäistä muutosta ei oteta huomioon. Tällöin kaasun paineen ja tilavuuden tulo pysyy vakiona ja ilmantilavuusvirta normaali-ilmanpaineessa voidaan laskea kaavalla 3.

$$p_{atm}V_1 = p_2V_2 \quad (3)$$

missä p_{atm} = normaali ilmanpaine

V_1 = tilavuusvirta normaali ilmanpaineessa

p_2 = suuttimen syöttöpaine

V_2 = mitattu syöttöilman tilavuusvirta

Puhaltimen tehontarvetta arvioitiin laskemalla syöttöilman paineen ja tilavuusvirran tuottamiseen vaadittava teho. Tuloksia tarkasteltaessa täytyy ottaa huomioon, että se on teoreettinen ja siinä ei ole otettu huomioon puhaltimen ja putkistojen tehohäviöitä. Tehon laskemiseen käytettiin kaavaa 4.

$$P = V\Delta p \quad (4)$$

missä P = teho

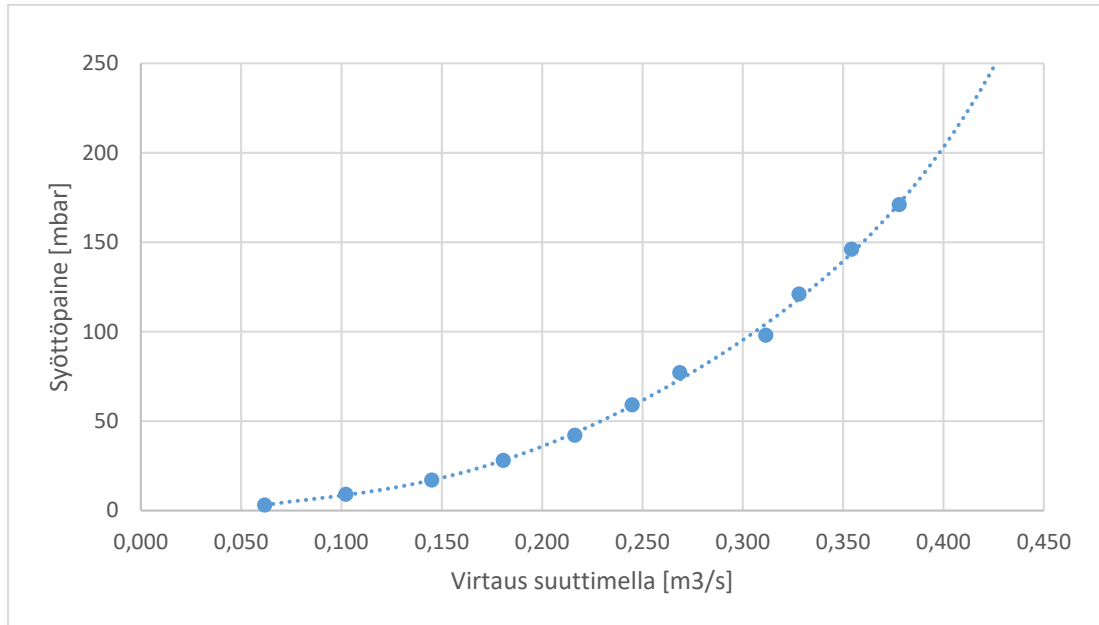
V = tilavuusvirta normaali ilmanpaineessa

Δp = tuotettu paine

Taulukko 5. Suuttimen toiminta-arvot

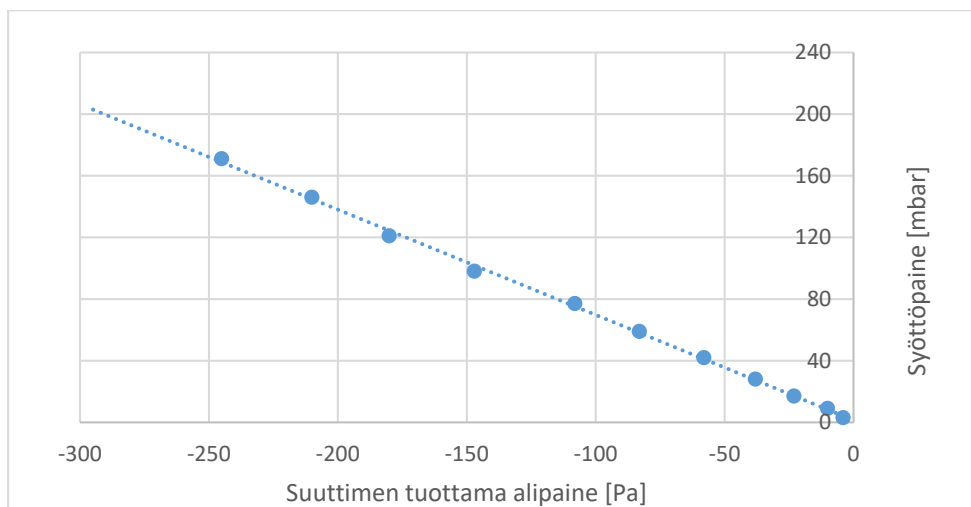
Puhallin				Suutin			
paine	tilavuus- virta	paine korjaus	laskettu teho	ali- paine	tilavuus- virta	paine	vahvistus- kerroin
[mbar]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[kW]	[Pa]	[m ³ /s]	[Pa]	
3	0,008	0,008	0,003	-4	0,062	1	7,29
9	0,013	0,013	0,012	-10	0,102	7	7,63
17	0,019	0,020	0,033	-23	0,145	14	7,38
28	0,025	0,026	0,073	-38	0,181	25	6,93
42	0,029	0,030	0,127	-58	0,216	34	7,17
59	0,035	0,037	0,219	-83	0,245	48	6,61
77	0,041	0,044	0,340	-108	0,269	64	6,08
98	0,047	0,052	0,506	-147	0,312	80	6,03
121	0,052	0,058	0,703	-180	0,328	105	5,64
146	0,056	0,064	0,928	-210	0,354	125	5,57
171	0,058	0,068	1,159	-245	0,378	148	5,58

Taulukossa 5 on esitetty mitattu puhaltimen tuottaman syöttöilman paine. Suuttimen synnyttämä virtausnopeus mitattiin imupuolelta ja painetta mitattiin suuttimen molemmiin puolin. Saaduista arvoista laskettiin syöttöilmalle tilavuusvirta ottaen huomioon paineenkorotus sekä laskennallinen tehon tarve paineilman aikaansaamiseksi. Suuttimen tuottama tilavuusvirta laskettiin virtausnopeudesta. Lisäksi laskettiin vahvistuskerroin, joka on suuttimen tuottaman imun ja syöttöilman suhde.



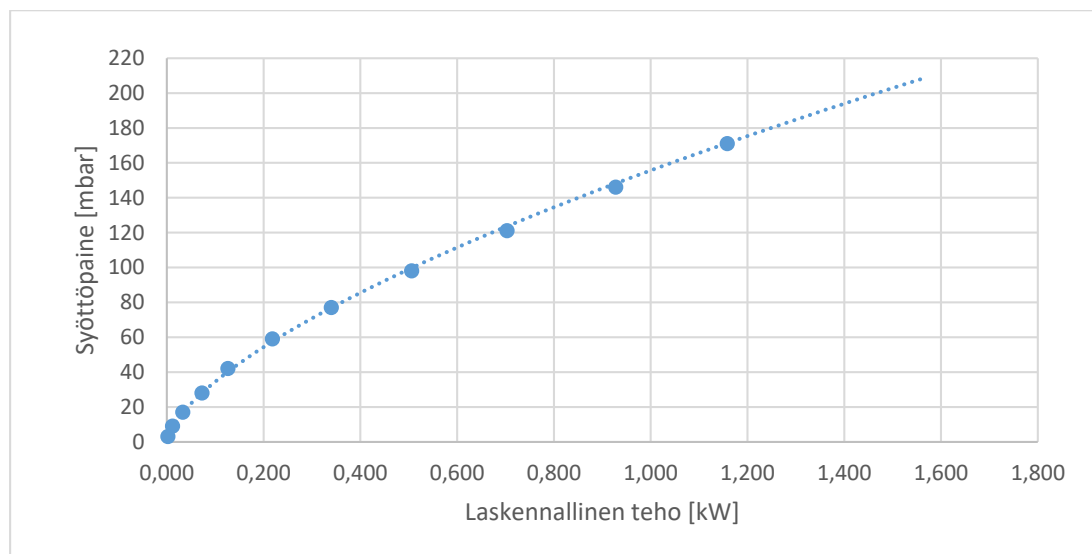
Kuvio 21. Syöttöpaineen suhde suuttimen tuottamaan virtaukseen

Kuviossa 21 on esitetty syöttöpaineen vaikutusta suuttimen tuottamaan virtaukseen. Kuvaajan muoto muistuttaa eksponentiaalisesti nousevaa käyrää. Siis virtauksen suurenemisen suhde paineen nostoon hidastuu ja näin ollen ei ole syytä kasvattaa painetta kohtuuttoman suureksi. Kun syöttöpaine on 200 mbar, saavutetaan noin 0,4 m³/s suuruinen virtaus ja noin -290 Pa alipaine. Tuotettu alipaine on esitetty kuviossa 22 ja se käyttäytyy syöttöpaineeseen nähden lineaarisesti. Savukanavaan täytyy asentaa useampia rinnakkaisia suuttimia, jos on tarvetta suuremmille virtauksille.



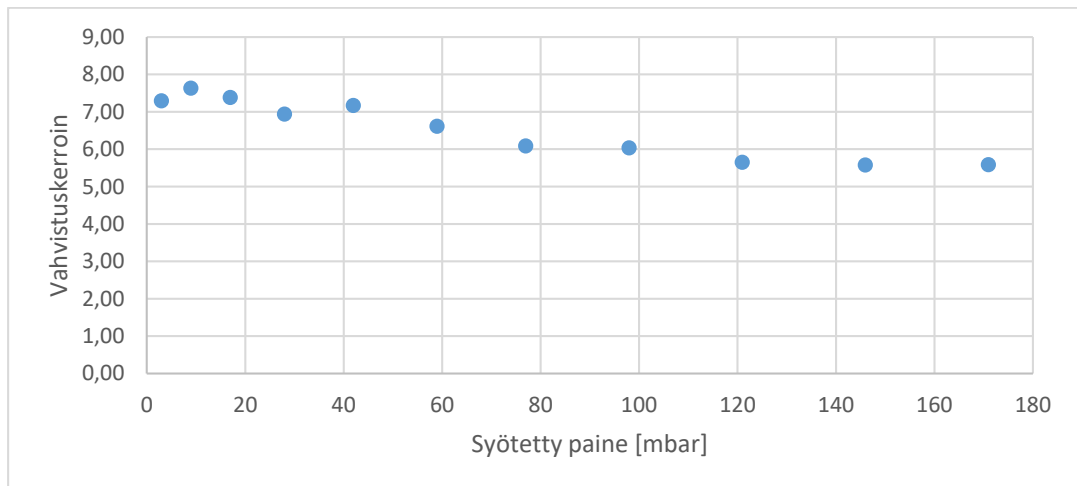
Kuvio 22. Suuttimen tuottama alipaine

Kuviossa 23 on esitetty syöttöpaineen ja laskennallisen tehon suhteen käyrä. Käyrältä luettuna 200 mbar tuotto vaatii noin 1,5 kW tehon. Jos puhaltimen teho lasketaan käyttäen kokonaishyötysuhdetta 0,7 saadaan puhaltimen ottotehoksi 2,15 kW. Testissä käytetyn puhallinvalmistajan katalogista löytyy eräs 2,2 kW puhallin, tuottaa 210 mbar paineen ja maksimissaan 320 m³/h virtauksen, joten tulos vaikuttaa uskottavalta. Käyrää tarkasteltaessa on syytä huomata, että teoriassa pienien paineiden tuottamiseen ei tarvita paljoakaan tehoa. Todellisuudessa kuitenkin syöttöilman tuottamiseen vaadittava teho on puhaltimen toiminnan takia suurempi. Esimerkiksi testeissä käytetty 4 kilowatin puhallin ei toimi alle 0,4 kilowatin teholla, vaikka se taajuusmuuttajalla säädetään käymään kuinka hiljaisilla kierroksilla.



Kuvio 23. Syöttöilman laskennallinen teho

Syöttöilman ja suuttimen imuvirtauksen suhde eli vahvistuskerroin on esitetty syöttöilman eri paineilla kuviossa 24. Kuvioista huomataan, että vahvistuskerroin on pienillä paineilla korkea ja alkaa laskea painetta nostaessa. Vahvistus on kuitenkin suurilakin paineilla noin 5,5-kertainen, joka on hyvä tulos.



Kuvio 24. Vahvistuskerroin

9 Pohdinta

Testien perusteella näyttäisi, että ejektoripuhallin toimii savukaasupuhallinkäytössä pienen kokoluokan lämpökattiloissa. Testeissä käytettiin 4 kilowatin sivukanavapuhallinta, joka oli näissä testeissä käytetylle suuttimelle ylimitoitettu. Yksi vaihtoehto olisi kuitenkin käyttää useaa rinnakkain asennettua suutinta savukanavassa, jolloin päästäisiin parempaan suorituskykyyn. Yhdellä suuttimella voidaan saavuttaa 0,4 m³/s virtaus, kun käytetään syötössä 200 mbar painetta. Tällöin suutin luo -290 Pa alipaineen.

Ejektoripuhaltimen etuna savukanavaan asetettavan puhaltimeen verrattuna on myös huoltovapaus. Puhallin ei käytännössä vaadi huoltoa, koska se ei joudu tekemisiin lian ja kuumuuden kanssa. Ainut kuluva osa on laakeri, joka kuitenkin kestää todella pitkiä käyttöaikoja. Myös käyttökatkot lyhenevät, koska savukanavan puhdistus helpottuu.

Testien aikana suutin oli kattilakäytössä viikon ajan 6-8 tuntia päivässä. Kuviossa 25 näkyy, että testien aikana suuttimen sisäpintaan muodostui hyvin ohut kerros likaa. Testissä käytetty polttoaine oli puhdasta ja hyvälaatuista puuhaketta. Likaantumiseen näissä olosuhteissa vaikutti myös se, että 500 kilowatin tehoista kattilaa ajettiin maksimitehoon nähden pienellä 100 kilowatin teholla. Pienellä teholla ajaminen ai-

heuttaa palamiseen epäpuhtauksia, jolloin likaa muodostuu enemmän. Ei ole järkevää käyttää kattilaa niin pienellä teholla, vaikka käytännössä niin joudutaan tekemään. Testin perusteella voidaan sanoa, että likaantuminen on sen verran vähäistä, että siitä ei synny ongelmia. Likaantumista voidaan tarvittaessa ennaltaehkäistä pinnoittamalla suutin, jos käytössä ilmenee ongelmia. Pinnoitus on valmistusteknisesti hyvin toteutettavissa.



Kuvio 25. Likaa suuttimessa testien jälkeen

Testien perusteella voidaan sanoa, että ejektorisuutin vaikuttaa hyvältä ratkaisulta lämpökattilakäyttöön ja tekniikkaa kannattaa viedä eteenpäin. Jatkossa voisi tehdä esimerkiksi pitkäaikaisen testin pienempitehoisella jatkuvassa käytössä olevalla kattilalla. Pitkäaikainen testi olisi hyvä suorittaa haastavissa olosuhteissa, käyttäen huonomopilaatuista haketta ja vaihtelevaa ajoa. Tällöin selviää, miten suutin toimii vaikeissa olosuhteissa, joissa sitä todellisuudessa käytetään. Lisäksi useamman suuttimen rinnakkaista ajoa on järkevää pohtia ja tutkia.

Lähteet

Asennus- ja käyttöohje. 2011. Ariterm Oy:n savukaasupuhaltimien asennus- ja käyttöohje. Viitattu 4.12.2016.

http://files.ariterm.fi/Bio/Muut/Puhaltimet%20ja%20puhdistimet/Savukaasupuhallin%20TH_080211.pdf

Biolämpöopas. 2016. Ariterm Oy:n opas biolämmitys ratkaisuista. Viitattu 25.2.2016.

<http://www.ariterm.fi/app/uploads/2014/02/Biol%C3%A4mp%C3%B6opas.pdf>

Compressed Air Basics Part 7: Side-Channel. 2014. Artikkelin air compressor works – sivustolla. Viitattu 4.5.2016.

<http://www.aircompressorworks.com/blog/index.php?mode=post&id=23>

Exodraft RSV. n.d. Savukaasuimurin tuotetietoja laitevalmistajan sivuilla. Viitattu

<http://exodraft.fi/tuotteet-ja-jarjestelmat/tuotteet/savukaasuimurit/rsv/>

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uudistettu painos. Helsinki: Edita. Opetushallitus.

Kattilantestauslaboratorio. n.d. Kattilantestauslaboratorion esittely JAMK:n sivuilla.

Viitattu 2.4.2016. <http://www.jamk.fi/fi/Palvelut/Testaus-ja-analysointi/Kattilantestauslaboratorio/>

Kiinteän polttoaineen lämmityskattiloiden turvallisuus. 2009. Turvatekniikan keskuksen opas. Viitattu 3.5.2016.

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_opaat/Kattilaopas.pdf

Kim H. D., Rajesh, G., Setoguchi, T. & Matsuo, S. 2006. Optimization of a Coanda Ejector. Journal of Thermal Science, 15, 2, 331-336. Viitattu 12.12.2015

Opassy 2OP-3AC Part 5. n.d. Opassy puhallin katalogi. Viitattu 5.2.2016.

<http://cnopassy.com/product/html/?47.html>

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka 2. uudistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.

Poltin 60-650 kW. n.d. Esite arinapolttimista. Viitattu 4.5.2016.

<http://www.biofire.fi/poltin-60-650-kw>

Valtanen, E. 2012. Tekniikan taulukkokirja. 19. painos. Mikkeli: Genesis-Kirjat.