

Toni Kasvinen

ARINAPOLTTOISEN KUUMAVESIKATTILAN HYÖTYSUHTEEN
MÄÄRITTÄMINEN JA PARANTAMINEN

Energia- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma
2020

ARINAPOLTTOISEN KUUMAVESIKATTILAN HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITTÄMINEN JA PARANTAMINEN

Toni Kasvinen
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Energia- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma
Maaliskuu 2020
Ohjaaja: Petri Lähde
Sivumäärä: 53
Liitteitä: 0

Asiasanat: hyötysuhde, emissiot, arinapoltto, kaukolämpö

Opinnäytetyön tavoite oli määrittää toimeksiannetun Pori Energia Oy:n omistaman Porin Reposaaressa hakekattilan hyötysuhde. Laitoksella oltiin havaittu heikkoa palamista jo laitoksen koeajon aikoihin. Laitoksella suoritettiin paljon yleistä seuranta, jotta laitoksesta saatiin kokonaisvaltainen kuva toimivuuden kannalta.

Reposaaressa hakekattilalle oltiin toteutettu neljä aikaisempaa savukaasumittausta, joita käytettiin vertailuna uusimman mittauksen arvoihin. Reposaaressa hakekattilalla suoritettiin savukaasumittaus opinnäytetyön tekijän toimesta, jolla saatiin uutta tarkkaa ja haluttua käyntitietoa jäännöshapen ja palamattomien kaasujen suhteesta. Jäännöshapen koeajon avulla saatiin määritettyä suurempi laskennallinen sekä havaittiin selkeä tarve hiilimonoksidin mittaukselle. Uudella jäännöshapen ajomallilla saavutettiin korkeamman hyötysuhteen kanssa huomattavasti pienempi päästömäärä. Kattilaan lisätyn uuden sekundääripuhaltimen toiminta todettiin savukaasumittauksen yhteydessä onnistuneeksi.

GRATE FIRING HOT WATER BOILER EFFICIENCY MEASUREMENT AND EFFICIENCY IMPROVEMENT

Kasvinen Toni

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Energy and Environmental Engineering

March 2020

Supervisor: Lähde Petri

Number of pages: 53

Appendices: 0

Keywords: efficiency, emissions, grate firing, district heating

The purpose of this thesis was to measure the efficiency of Pori Energia's district heating power plant which is located in Pori Reposaari. There had been observations of imperfect burning during the process since the power plant started production. A lot of general monitoring was carried out at the power plant to acquire comprehensive data of the functionality of the power plant.

Flue gasses were measured earlier four times. The data from the previous measurements were compared to the new flue gas measurement. New flue gas measurement was carried out by the author of this thesis. By that new information new precise and desired operating data was given by ratio of residual oxygen and unburnt gasses. It was noticed to have carbon monoxide measurement to adjust air volume. With new residual oxygen ratio higher efficiency and lower emissions was achieved. Also new secondary air blower operation was found to be successful assembly.

SISÄLLYS

1	PORI ENERGIA	6
2	JOHDANTO.....	7
3	POLTTOLAITEKONSTRUKTIO.....	8
3.1	Kattilalaitos	8
3.2	Polttoaineen syöttö kattilaan	9
3.2.1	Varastosta laitoksen sisälle.....	9
3.2.2	Syöttöruuvi	9
3.3	Ilmansyöttö kattilaan.....	10
3.3.1	Primääri-ilma	10
3.3.2	Sekundääri-ilma.....	11
3.3.3	Tertiääri-ilma	11
3.4	Palaminen.....	12
3.4.1	Tulipesän paineen ja kattilaveden lämpötilan säätö	13
3.5	Tuhkanpoisto.....	13
4	HAVAINNOT KENTÄLLÄ.....	13
4.1	Ensimmäinen kenttäkiertäminen 25.9.2019.....	14
4.2	Toinen kenttäkiertäminen 16.12.2019	15
4.3	Savukaasumittauksen aikana tehdyt kenttähavainnot 17.12.2019.....	15
4.4	Kolmas kenttäkiertäminen 4.2.2019	16
5	POLTTOAINE	18
6	SAVUKAASUMITTAUKSET VUOSINA 2008 - 2009	19
6.1	Savukaasumittaus 7.2.2008.....	21
6.1.1	Päätelmät 7.2.2008 mittauksesta	23
6.2	Savukaasumittaus 25.03.2008.....	23
6.2.1	Päätelmät 25.3.2008 mittauksista	25
6.3	Savukaasumittaus 15.01.2009.....	26
6.3.1	Päätelmät 15.1.2009 mittauksista	28
6.4	Savukaasumittaus 05.02.2009.....	28
6.4.1	Päätelmät 5.2.2009 mittauksista	31
7	UUSI SAVUKAASUMITTAUS 17.12.2019	32
7.1.1	Päätelmät 17.12.2019 mittauksesta	37
8	HYÖTYSUHDE.....	39
8.1	Suora menetelmä.....	39
8.2	Savukaasun määrä.....	41

8.3	Epäsuora menetelmä savukaasun ja palamattomien kaasujen häviön laskemiseen.....	45
8.3.1	Palamattomat kaasut.....	45
8.3.2	Savukaasu	48
8.4	Jäännöshapen kasvattaminen hyötysuhteen kasvattamiseksi.....	50
8.4.1	Palamattomat kaasut:.....	50
8.4.2	Savukaasu	51
8.4.3	Ajomallien vertailu.....	51
9	LOPPUPÄÄTELMÄT	51
	LÄHTEET.....	54
	LIITTEET	

1 PORI ENERGIA

Pori Energia on Satakunnan alueella vaikuttava energiayhtiö, jolla on pitkät perinteet alueella. Historiallisen alkunsa yhtiö on saanut vuonna 1898 perustetusta sähkölaitoksesta jonka tehtävänä oli tuottaa kaupungin valaistukseen tarvittavaa sähköä. Nykyisessä muodossaan yhtiö on alkanut toimimaan vuonna 2006 kun Porin Lämpövoima Oy ja Pori Energia -liikelaitos yhdistettiin. Pori Energialla on vakinaista henkilökuntaa 206 kappaletta.

Yhtiöllä on laaja toiminta-alue, sillä se hallitsee ja toimii mm. sähkön-, prosessihöyryn, kaukolämmöntuotannossa Kaanaan, Aittaluodon sekä Harjavallan voimalaitoksilla. Lisäksi tuotannon hallintaan kuuluu pienet erillistuotantolaitokset ja erinäiset tekniset palvelut. Tämä opinnäytetyö tehdään Pori Energialle Reposaaaren itsenäisessä kaukolämpöverkossa toimivasta 1,5 Megawatin hakekäyttöisestä kuumavesikattilasta. (Pori Energia www-sivut 2019.)

2 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on Reposaaressa olevan lämpölaitoksen hakekattila. Kattilassa on havaittu heikohkoa hyötysuhdetta jo alkujaan, kun se on otettu käyttöön vuonna 2008. Kattilasta on tehty neljä savukaasumittausta vuosina 2008 – 2009 joita käytetään vertailupohjana. Kattilalla suoritettiin koeajoja eri jäännöshapen määrillä ja määritettiin kokeellisesti korkeampaa hyötysuhdetta takaava ajomalli. Kattilan merkittävämpiä käyntiarvoja kerättiin, jotta saatiin selkeämpi kuva kattilan toiminnasta.

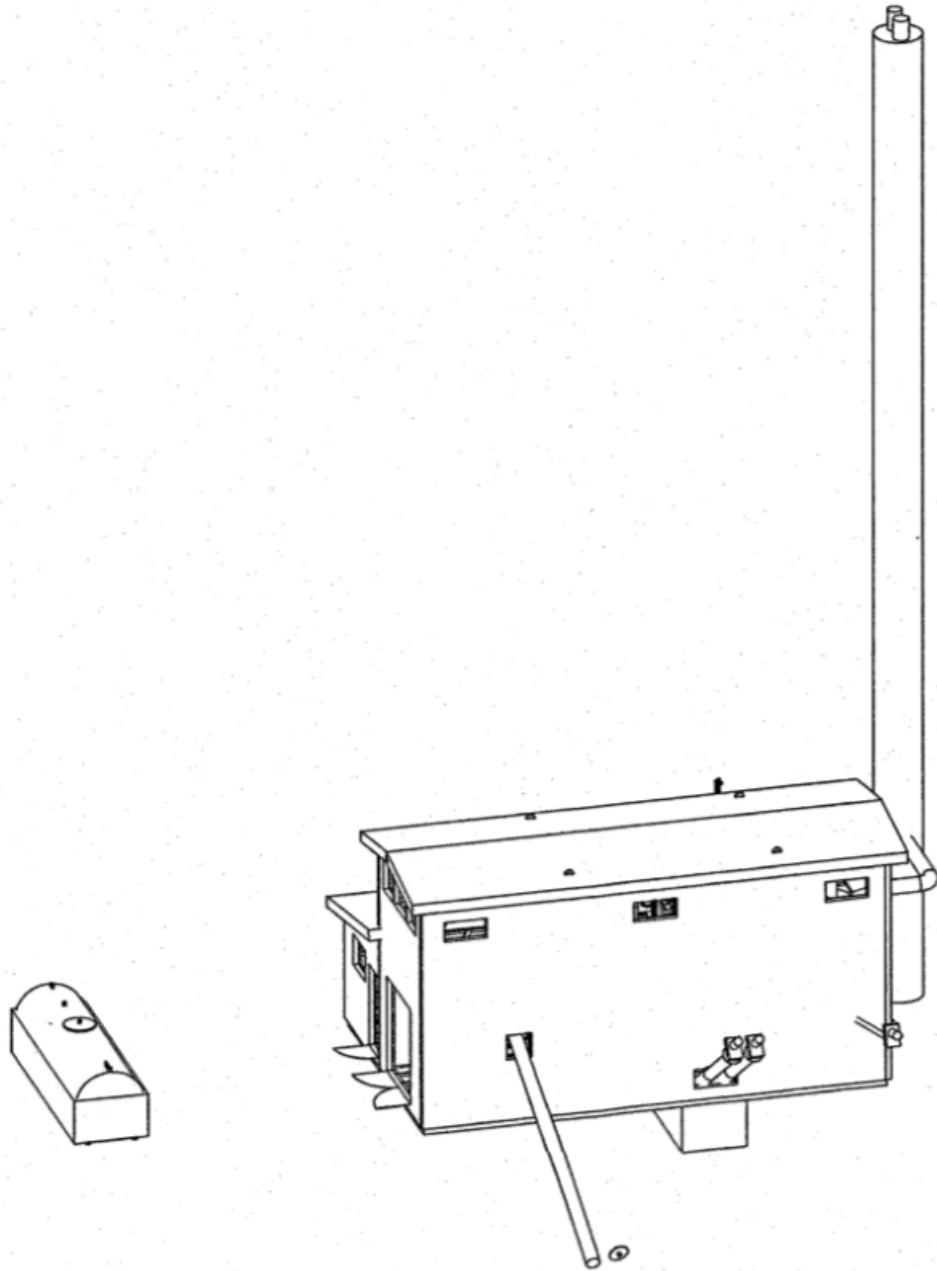
Hyötysuhdelaskennassa sovellettiin DIN 1942- standardia. Hyötysuhde laskettiin suoralla tehoksi saadulla menetelmällä, sekä häviöiden kautta epäsuoran menetelmällä.

Lämpölaitoksella on kaksi sarjaan kytkettyä kuumavesikattilaa kaukolämpöveden lämmittämistä varten. Ensimmäisenä sarjassa on hakekattila, jälkimmäisenä varmistamassa riittävän tehon tai kun hakekattilan minimiteho on liian suuri tarvittavaan tehoon nähden. Laitoksen tuottama lämpö kuluu Reposaaressa olevaan kaukolämpöverkkoon, sinänsä yksittäisiä suuria kuluttajia ei ole.

3 POLTTOLAITEKONSTRUKTIO

3.1 Kattilalaitos

Käsitellään työn kannalta tärkeimmät komponentit, kuten palamisosa, kattilaan syötettävän ilman ja polttoaineen syöttö. Työn kannalta vähemmän merkitsevät osat rajataan pois tai esitellään lyhyesti. Käydään läpi kattilalaitoksen toimintaperiaate.



Kuva 1. Reposaaren lämpölaite

3.2 Polttoaineen syöttö kattilaan

3.2.1 Varastosta laitoksen sisälle

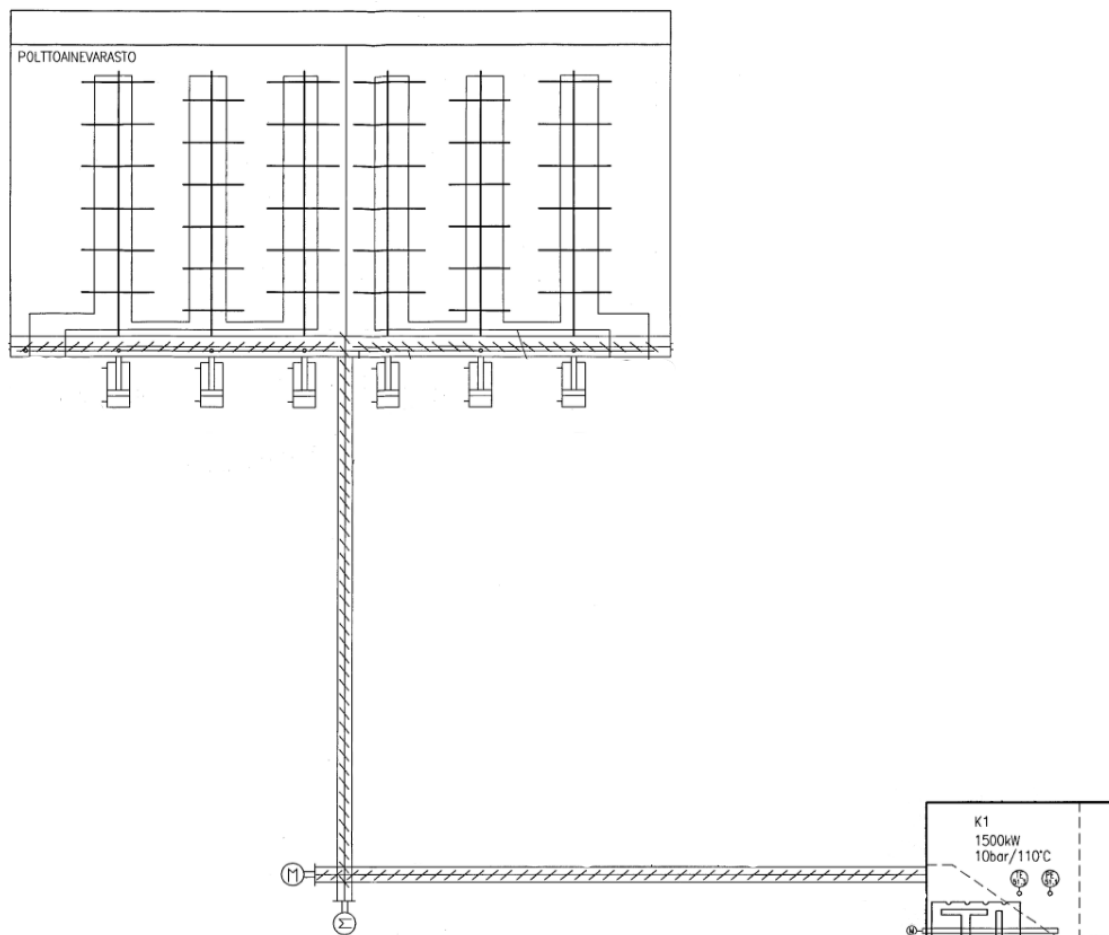
Polttoaineen syöttö alkaa kattilalaitoksen viereisestä polttoainevarastosta. Varasto täytetään traktorilla noin kahden metrin kasalle. Hydraulikka toiminen tankopurkain kerrää polttoainetta varastosta polttoaineenkeruukouruun, kourussa kaksi tosiaan vastakkain olevaa kokoojaruuvia työntää polttoaineen nostoruuville. Nostoruuvi syöttää kourun keskeltä tulevan polttoaineen varastorakennuksen puolelta kattilahuoneen puolelle pudottaen sen syöttöruuville. Nostoruuvi pyörii nopeammalla vauhdilla kuin sille syöttävät kokoojaruuvit, jotta polttoainetukoksilta vältyttäisiin.

Nostoruuvin päässä on valosilmäpari joka ohjaa tankopurkaimen käynnistymistä. Nostoruuvin alapäässä on myös valosilmäpari joka aktivoituessaan pysäyttää kokoojaruuvit, näin estäen nostoruuvin tukkeutumisen.

Kuvassa 2 on käsitelty polttoaineen syöttö. Kuvassa näkyy koko polttoaineen syöttö, pois lukien polttoaineen syöttöä tasaava suppilo ennen syöttöruuvia.

3.2.2 Syöttöruuvi

Taajuusmuuttajalla ohjattu syöttöruuvi tunkee polttoaineen keskelle arinan yläpäättä, josta arinan portaiden liike lähtee sitä levittämään. Kattilalta vaadittu kattilaveden lämpötila ohjaa syöttöruuvin pyörintänopeutta. Syöttöruuvin pyörintänopeus ohjaa sitä ennen olevien kokooja- ja nostoruuvien pyörimisnopeutta. Ennen polttoaineen putoamista syöttöruuville on polttoaineen syöttöä tasaava suppilo.



Kuva 2. Polttoaineen syötön periaatekuva

3.3 Ilmansyöttö kattilaan

3.3.1 Primääri-ilma

Primääri-ilma syötetään suoraan syöttöruuvien alapuolelta arinan alle. Kuvassa 3 puhaltimen paikka on havainnoitu numerolla seitsemän. Arinan portaissa olevat ilmareiät jakavat ilman tasaisesti polttoainemattoon. Ensiö-ilman syötöstä vastaa vain yksi puhallin. Sääto määräytyy pesään syötetyn polttoaineen määrän mukaan. Primääri-ilmaan voitaisiin myös sekoittaa laitoksella kiertokaasua mutta kiertokaasupuhallin on poistettu sen huonon toiminnan johdosta. Primääri-ilman tärkein tehtävä on saada pesään syötetty polttoaine kuivumaan ja kaasuuntumaan.

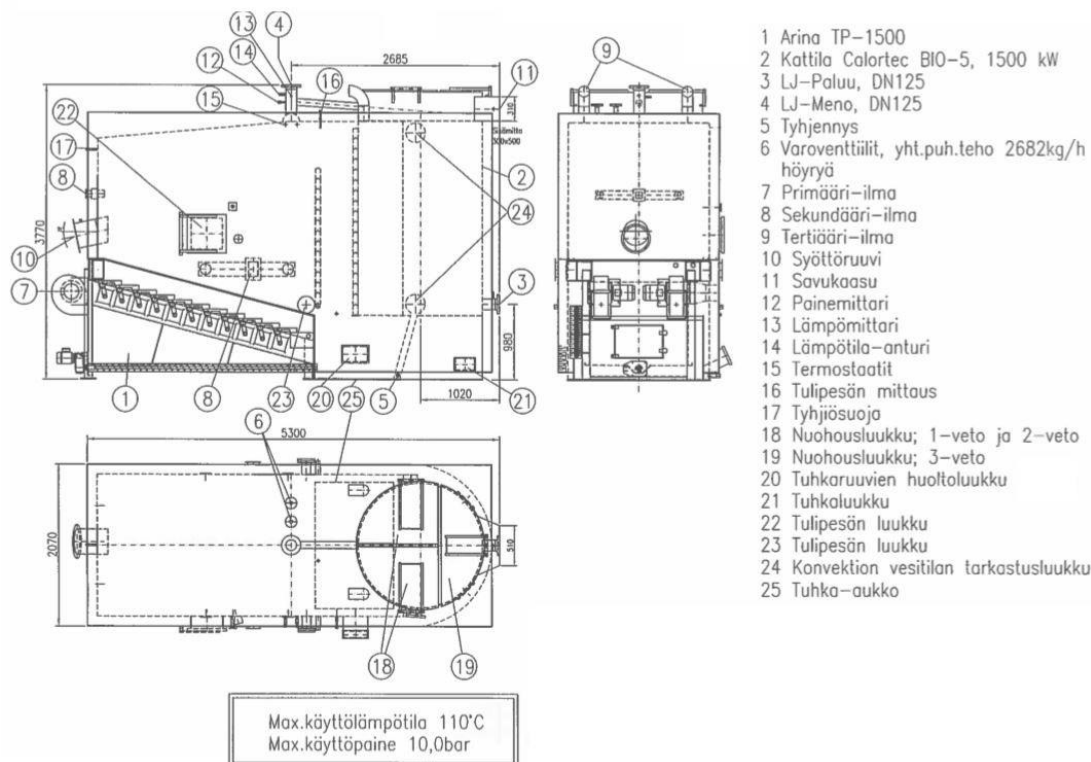
3.3.2 Sekundääri-ilma

Syöttö tapahtuu kahdella puhaltimella, jotka ovat sijoitettu toisiaan vastakkain. Puhallimet sijaitsevat arinasta katsottuna noin metrin korkeudessa ja ovat hieman jälkeen arinan puolivälin. Kuvassa 3 puhaltimien paikka on havainnoitu numerolla kahdeksan, joka sijaitsee arinan päällä. Kattilan seinämuuraukseen on tehty reiät jotka levittävät sekundääri-ilman pedin päälle. Sekundääri-ilma säätyy savukaasuvirran jäännöshapen pitoisuuden mukaan.

Sekundääri-ilman tehtävä on toimia palamisilmana polttoaineesta kaasuuntuneille kaasuille.

3.3.3 Tertiääri-ilma

Alkuperäiset kaksi puhallinta on otettu pois käytöstä kokonaan laitoksen luovutuksen koeajojen aikana ja jälkikäteen korvattu yhdellä. Puhallin sijaitsee arinan alkupäässä noin puolentoista metrin korkeudella arinan ylätasosta katsoen. Kuvassa 3 puhaltimen paikka on ilmoitettu numerolla kahdeksan, joka sijaitsee syöttöruuvien päällä. Puhallus on suunnattu putken avulla puhaltamaan pedin päälle. Puhallin toimii käytännössä kolmantena sekundääripuhaltimena. Muutos on tehty talvella 2019, silloin havaittiin sekundääripuhaltimien tuoton rajoittavan kattilan maksimikuormaa.



Kuva 3. Kattilan läpileikkaus

3.4 Palaminen

Kun polttoaine on kuivunut ja kaasuuntunut primääri-ilman vaikutuksesta arinan päälle puhallettu sekundääri-ilma mahdollistaa kaasujen syttymisen. Nämä kyseiset palokaasut lähtevät nousemaan ylöspäin kattilassa. Tulipesän holvikivet muodostavat arinan ylle kuumat olosuhteet sekä toimivat lämmön varaajina. Holvikivien jälkeen palokaasujen matka jatkuu kattilan ylempään osaan, josta se liikkuu kuumakanavaan. Kuumakanava koostuu nimensä mukaan kuumasta kivivälistä, jossa palokaasujen lopullinen palaminen täytyisi viimeistään tapahtua. Tertiääri-ilma on juurikin suunnattu kuumakanavaan, mahdollistamaan lopullinen palaminen tämä kylläkin on muutettu jälkepäin ja tertiääri-ilma puhaltaa pedin päälle.

Lopulta palokaasut saavuttavat kattilan konvektio-osan, jossa kaasujen lämmöntalteenotto tapahtuu. Konvektio-osa on toteutettu pystysuorilla tuubiputkilla. Savukaasu kulkee tuubien sisällä ja kattilavesi ulkona.

3.4.1 Tulipesän paineen ja kattilaveden lämpötilan säätö

Kattilaveden haluttua lämpötilaa ohjataan polttoaineen syötöllä kattilaveden lämpötila-antureiden antaman tiedon mukaan. Kattilaveden lämpötilaa mitataan ennen ja jälkeen kattilan yhteensä kahdesta pisteestä. Lähtevä lämpötila määrää polttoainesyötön määrän.

Tulipesän paineen mittausta sijaitsee tulipesän katossa lähellä kuumakanavaa. Kattilan tulipesän alipainetta säätää savukaasupuhallin, joka saa ohjauksensa tulipesän paineen mittauksesta. Säätö tapahtuu savukaasupuhaltimen kierroslukua muuttamalla.

3.5 Tuhkanpoisto

Kattilassa syntyy pohja sekä-että lentotuhkaa. Arinan pohjatuhka sekä ensimmäisessä vedossa syntyvä tuhka putoaa arinan liikkeen johdosta arinan päässä olevaan tuhkalaatikkoon. Toisen ja kolmannen konvektio-osaan muodostunut lentotuhka on poistettava käsin työkalulla, kattilan päällä sijaitsevista nuohousyhteistä. Lopullinen lentotuhkan poisto tapahtuu multisyklonissa, joka painovoimaisesti erottaa tuhkahiukkaset savukaasusta. Multisyklonin keräämä tuhka putoaa sen alla olevalle tuhkaruuville. Myös arinan portaiden välistä putoava tuhka puhdistetaan käsin kolaamalla.

Tuhkanpoistosta tuhkakonttiin vastaa kaksi ruuvia. Ensimmäinen tuhkalaatikon ruuvi kerää arinan jälkeisestä tuhkalaatikosta tuhkan, toinen tuhkaruuvi kuljettaa multisyklonista putoavan tuhkan.

Nuohousta suoritetaan noin kerran kuussa tai mikäli savukaasun loppulämpö on noussut yli 50 astetta normaalista 120-180 celsiusasteen välistä.

4 HAVAINNOT KENTÄLLÄ

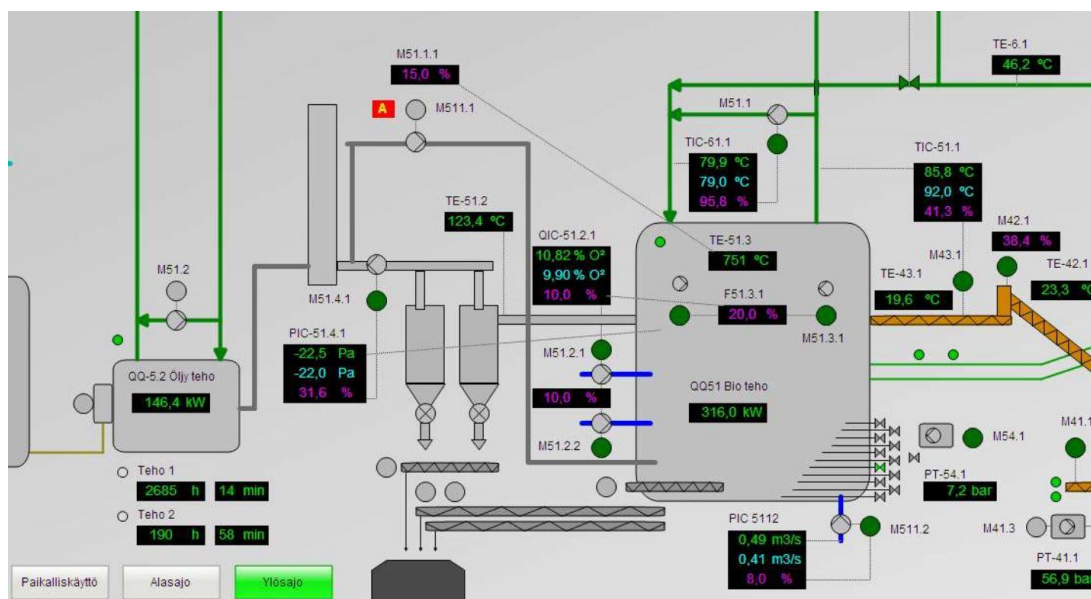
Laitoksella pyrittiin käymään useasti, jotta kattilan toiminnasta saataisiin käytännön havaintoja pelkän mittausdatan tueksi. Kattilalaitos kuuluu Pori Energian kaukolämpöyksikön piiriin mutta, myös paikallinen Meri-Porin Talohuolto-yhtiö käy tarkastuskäynneillä laitoksella. Meri-Porin talohuoltoa haastateltiin 16.12.2019 ja käytiin läpi heidän havainnointia kattilan yleisestä toiminnasta ja kunnosta.

4.1 Ensimmäinen kenttäkierros 25.9.2019

Laitoksella käytiin automaatioteknikko Teppo Nissilän kanssa. Nissilän kanssa käytiin läpi kattilan perussäätöpiirit, mittapisteiden paikat. Erityisiä huomioita kattilan toiminnasta: Käytöstä poistettu kiertokaasupuhallin, poistettu toiminnasta jo aiemmin pedin kannalta huonon toiminnan vuoksi.

Polttaminen hakekattilassa tapahtuu suurella yli-ilmalla. Kuorman ollessa 316kW jäännöshapen mitattu arvo ennen sykloneita oli 10,98%, asetuksena 9,90%. Jäännöshapen säädin ja kattilan tuottama lämpöteho kuvattu kuvassa 4. Nissilä kertoo, että kattila on tarkoituksella säädetty palamaan joka kuormalla yli-ilman kanssa jotta savukaasupäästöt eivät vaeltaisi.

(Nissilä henkilökohtainen tiedonanto 25.9.2019)



Kuva 4. Reposaaren hakekattilan yleisnäyttö 25.9 kello 10:29

Hakekattilan teho 316kW

Arinan liikettä ja polttoainematon tasaisuutta tarkkailtiin hieman miesluukku raottaen. Syöttöruuvilta tuleva polttoaine lähtee jakautumaan tasaisesti arinan liikkeestä. Kaasujen syttyminen tapahtuu puolivälissä arinaa. Polttoainetta tarkkailtiin nostavalta ruuvilta, ei mitään merkittävää huomioitavaa.

Kattilassa havaittiin myös ilmapuotoja sokkelin ja kattilan liitoskohdassa. Ilmaa pääsee vuotamaan tuhkalaatikkoon noin 40 senttimetrin pituisesta railosta kattilan seinän ja sokkelin välillä. Lisäksi tuhkaruuvien läpiviennin tiiviste on pettänyt kokonaan ja ilmaa pääsee vuotamaan myös sitä kautta tuhkalaatikkoon.

4.2 Toinen kenttäkierros 16.12.2019

Laitoksella käytiin valmistelemassa tulevia savukaasumittauksia sekä tarkkailtiin laitoksen yleiskuntoa. Samassa haastateltiin Meri-Porin talohuollon työntekijää, Hän kommentoi kattilan pysyvän vakaasti päällä ja että palaminen arinalla tapahtuu hallitusti. Sen hetkistä polttoainetta moitittiin erityisen kosteaksi. Ei kommentointia muualta prosessista.

Tarkastettiin tuhkakontin sisältö, hienojakoista ja tumman harmaata. Huomioitu että tuhkansiirtoruuvien läpivienttiä oli tiivistetty uretaanilla, sekä kattilan ja sokkelin välissä sijaitsevaan ilmapuotokohtaan oltiin laitettu bitumimattoa, tämä kylläkin oli jo osittain revennyt liimauskohdasta. Polttoainetta tarkasteltu silmämääräisesti, ei suuria havaittavia poikkeuksia partikkelikoossa, silmämääräisesti kosteampaa kun aikaisemmillä kerroilla.

4.3 Savukaasumittauksen aikana tehdyt kenttähavainnot 17.12.2019

Kerättiin 20 litraa polttoainetta, josta määritettiin kosteus. Kerääminen suoritettu nostavalta ruuvilta, jotta se olisi mahdollisimman edustava kattilaan syötettävästä polttoaineesta. Polttoainenäytteet toimitettiin Kaanaaseen Pori Energian käyttämään laboratorioon.

Savukaasumittausten aikana huomattu sekundääripuhaltimien poikkeuksellisen huono imu imuilmalla puolella. Pudotettaessa tertiääripuhallin pois ajosta sekundääripuhaltimien ohjaus nousi lähtötilanteen 33 prosentista noin 95 prosenttiin kuorman ollessa vakaa ja teholtaan 650kW.

Pudotettaessa jäännöshapen asetusta 9,8%:sta 8%:iin piipusta tuli tummaa savua rajusti jo asetuksen pudottua prosenttiyksikön.

4.4 Kolmas kenttäkiertos 4.2.2019

Selvitettiin polttoaineen massavirta syöttöruuvien eri pyörintänopeuksilla, jotta hyötysuhdelaskelmat pystytään toteuttamaan. Kattilaan syötetystä polttoaineesta ei ole tarkkaa mittausta, joten arvot polttoaineen syötöstä määritettiin käsin. Kaukolämpöasentaja Ville Kosunen avusti mittauksissa.

Mittaus toteutettiin kokoojaruuvien jälkeisestä syöttökaukalosta, josta nostoruuvi kuljettaa polttoaineen eteenpäin. Syöttöruuville annettiin kiinteä ohjausarvo. Syöttöruuvi ohjaa muiden kuljettimien nopeutta, joten muut kuljettimet, mukaan lukien kokoojaruuvien pyörimisnopeus pysyi vakiona. Toinen kokoojaruuveista pysäytettiin ja kokonaiskuorma siirrettiin yhdelle kokoojaruuville, jotta kaikki kaukaloön putoava polttoaine saataisiin kerättyä näyteastiaan. Näyteastia polttoaineen kanssa punnittiin ja lukema kirjattiin ylös.

Pesään syötetty polttoainemäärä mitattiin syöttöruuvien nopeuksilla 50% ja 70%. Mittauksia otettiin molemmista nopeuksista kuusi kappaletta ja niistä laskettiin keskiarvo. Polttoaineen kosteus saapuneesta kuormasta mitattuna 30,2%.

$$m_{pa} = \frac{m_{kok} - m}{t}$$

m_{pa} = Polttoaineen massavirta (g/s)

m_{kok} = Näytteen kokonaispaino (g)

m = Näyteastia (g)

t = keräysaika (s)

Pesäruuvi 50% mittauksien kokonaispaino ja mitattu aika

m_{kok}	t	m	m_{pa}
2872g	22s	Näyteastia 1275g	72,59 g/s
2974g	22s		77,23 g/s
2907g	22s		74,18 g/s
2978g	22,5		75,69 g/s
3403g	22s		94,58 g/s
2708g	22s		65,14 g/s
		Keskiarvo	76,57g/s
			0,07675 kg/s

Pesäruuvi 70% mittauksien kokonaispaino ja mitattu aika

m_{kok}	t	m	m_{pa}
3437g	21,5s	Näyteastia 1275g	100,56 g/s
4062g	21,5s		129,63 g/s
3535g	22s		102,73 g/s
4219g	22s		133,68 g/s
3709g	21,5s		113,21 g/s
3790g	22,5s		111,78 g/s
		Keskiarvo	115,26 g/s
			0,1153 kg/s

Taulukko 1. Pesään syötetyn polttoaineen määrä

5 POLTTOAINE

Laitokselle tuotuja polttoainekuormia taulukoitiin, jotta saataisiin historiaa polttoainekuormien tasapuolisuudesta. Tiedot kuormista kerättiin Pori Energian käyttämästä Once-toimitusketjun hallintajärjestelmästä. Polttoaineen kosteus määritettiin Pori Energian käyttämässä laboratorioissa. Näytteenottajana toimi polttoainekuorman kuljettaja.

Suuri polttoaineen kosteuden tai polttoaineen laadun heittely aiheuttaa palamisprosessin huojuntaa. Laitokselle tuodaan vain yhtä polttoainelaatua, tässä tapauksessa kokopuuhaketta. Polttoaineen kosteus on melko tasaista muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Lyhyesti voidaan todeta, että laitokselle tuotu polttoaine on melko tasaista kosteuden puolesta. Kenttäkierroksilla polttoaineen silmämääräistä palakokoa pyrittiin seuraamaan ja siinä ei huomattu merkittäviä eroja.

Päivä- määrä	Kuljetusliike	Aine	Vuoka (g)	Märkä (g)	Kuiva (g)	Kosteus (%)
08.07.2019	-	Kokopuuhake	30,98	530,50	404,92	25,1
16.07.2019	-	Kokopuuhake	30,91	408,84	307,60	26,8
09.10.2019	-	Kokopuuhake	31,28	653,57	479,01	28,1
07.10.2019	-	Kokopuuhake	30,51	431,06	348,88	20,5
18.10.2019	-	Kokopuuhake	30,59	409,30	310,18	26,2
25.10.2019	-	Kokopuuhake	30,74	506,90	328,24	37,5
04.11.2019	-	Kokopuuhake	31,00	495,16	329,28	35,7
08.11.2019	-	Kokopuuhake	30,59	431,02	304,68	31,6
12.11.2019	-	Kokopuuhake	31,15	405,12	322,62	22,1
14.11.2019	-	Kokopuuhake	30,28	450,00	287,17	38,8
18.11.2019	-	Kokopuuhake	31,00	522,16	376,29	29,7
20.11.2019	-	Kokopuuhake	30,40	566,81	338,52	42,6
24.11.2019	-	Kokopuuhake	31,06	643,84	448,98	31,8
26.11.2019	-	Kokopuuhake	30,77	524,43	443,38	16,4
29.11.2019	-	Kokopuuhake	30,84	519,92	395,50	25,4
03.12.2019	-	Kokopuuhake	31,27	519,57	387,04	27,1
09.12.2019	-	Kokopuuhake	31,05	719,84	431,38	41,9
13.12.2019	-	Kokopuuhake	30,72	437,58	296,83	34,6
18.12.2019	-	Kokopuuhake	31,96	441,71	314,14	31,1
23.12.2019	-	Kokopuuhake	30,44	366,87	245,40	36,1
27.12.2019	-	Kokopuuhake	30,67	678,40	516,02	25,1
03.01.2020	-	Kokopuuhake	30,94	637,07	456,89	29,7
05.01.2020	-	Kokopuuhake	30,09	399,38	312,28	23,6
08.01.2020	-	Kokopuuhake	30,80	668,17	473,56	30,5
14.01.2020	-	Kokopuuhake	30,40	396,72	285,70	30,3
13.01.2020	-	Kokopuuhake	31,04	391,94	283,63	30,0
17.01.2020	-	Kokopuuhake	30,67	707,57	477,24	34,0
21.01.2020	-	Kokopuuhake	30,37	620,82	374,72	41,7
					KA	30,5

Taulukko 2. Pori Energia Once-toimitusketjun hallintajärjestelmän taulukko Reposaa-
ren hakekattilalle tuodusta polttoaineesta.

6 SAVUKAASUMITTAUKSET VUOSINA 2008 - 2009

Kattilalle on tehty neljä erillistä savukaasumittauksta vuosina 2008-2009. Kaikki mit-
tauokset on suorittanut Satakunnan ammattikorkeakoulun prosessitekniikan laborato-
rio. Mittauksissa on sovellettu EN 13284-1 standardin määräyksiä. ”Yhteiden sijoitus
ei vastannut standardin EN 13284-1 asettamia vaatimuksia häiriöttömien etäisyyksien

suhteen.” (Pori Energia Oy Reposaaaren 1,5MW hakekattilan päästömittaukset 07.02.2008, sivu 1) Esitetyt kuvaajat on luonut opinnäytetyöntekijä Kasvinen.

Mittalaitteisto pysyi samana kaikissa neljässä savukaasumittauksessa. ”Kiintoainepitoisuus ja lämpötila määritettiin Gravimat SHC 502 mittausjärjestelmällä. Savukaasujen O₂-pitoisuudet mitattiin paramagneettisuuteen perustavalla mittausjärjestelmällä Servomex 570-analysaattorilla. Muut kaasukomponentit mitattiin Gasmex Dx-4000 FTIR-laitteistolla.” (Pori Energia Oy Reposaaaren 1,5MW hakekattilan päästömittaukset 07.02.2008, sivu 1)

Epävarmuudet laskettiin pölyhiukkasista, koska niissä on monta muuttujaa. Itse kaasumittauksissa virheet määräytyvät laitteen tarkkuuden mukaan. FTIR-kaasuanalysaattorin virhe +-2% mittausalueesta.

Mittausalueet Gasmex Dx-4000:

CO₂ on 0-20%

CO 0 – 8000 ppm

C₂H₆ ja C₂H₄ sekä CH₄ 0-100 ppm

NO_x 0 – 1000 ppm

TOC 0-1500 ppm

Huomioitavaa on, että tertiäripuhaltimet eivät ole olleet käytössä ja niille suunnitelluilla alkuperäisillä paikoillaan. Kolmanneksi sekundäripuhaltimeksi asetettu puhallin ei ole vielä tuolloin ollut käytössä. Kiertokaasupuhallin on ollut käytössä mittausten aikana. Tarkkoja mittaushetkien käyntiarvoja ei ole kirjattu ylös.

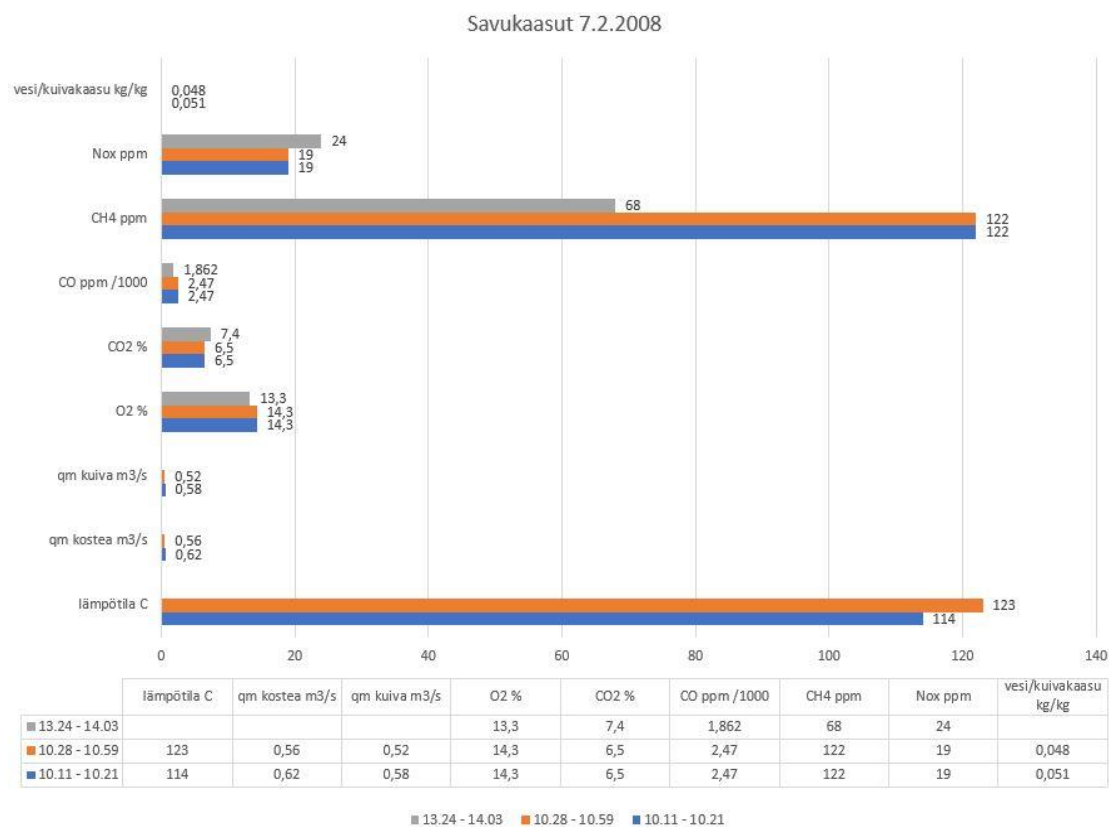
6.1 Savukaasumittaus 7.2.2008

Ensimmäinen ja toinen mittaus tehtiin savukaasusyklonin jälkeen. Kolmas mittaus mitattiin ennen savukaasusyklonia. Polttoaineena 100% puupelletti, kosteus tuntematon. Kattilan tehon ilmoitetaan olleen 575 – 595kW välillä.

Mittaustulosten epävarmuudet:

± 5,5-5,6% kiintoaine

± 22,1-22,9% tilavuusvirta ja kokonaispäästö

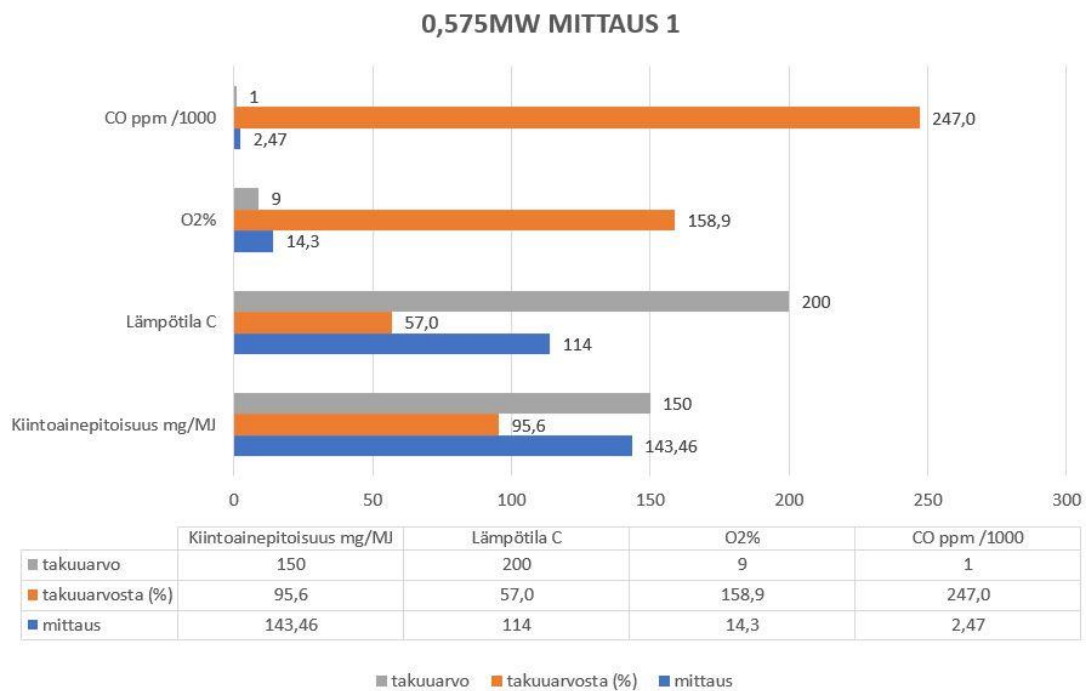


Kuva 5. Savukaasut 7.2.2008

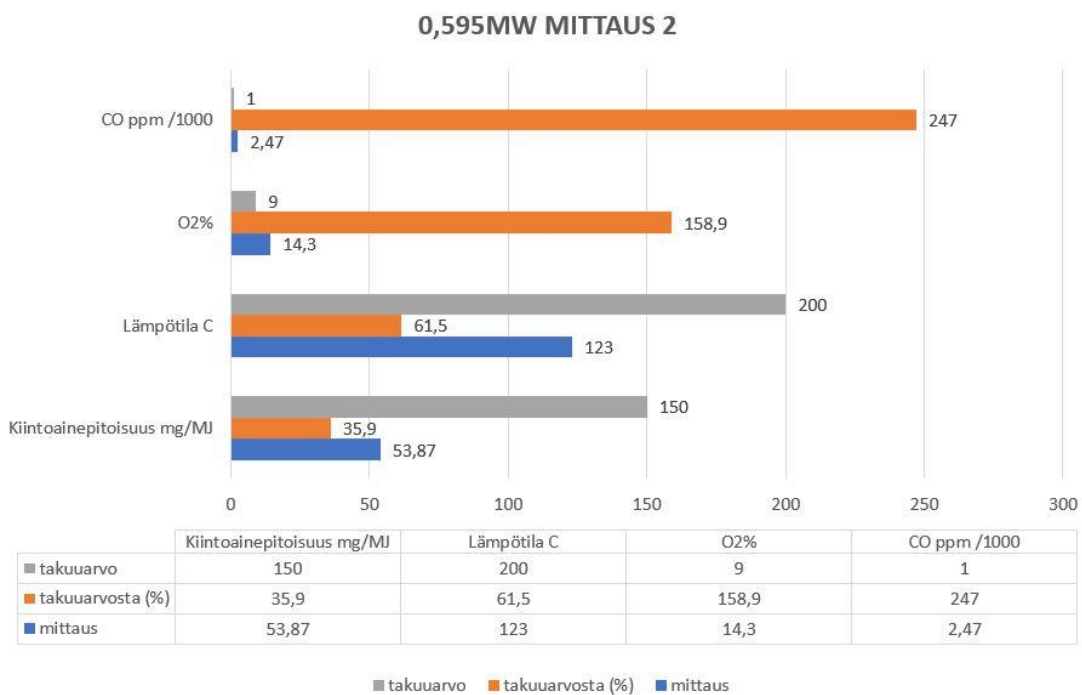
Mittaus 1 kello 10.11 – 10.21. Keskeytettiin toimintahäiriön vuoksi

Mittaus 2 kello 10.28 – 10.59.

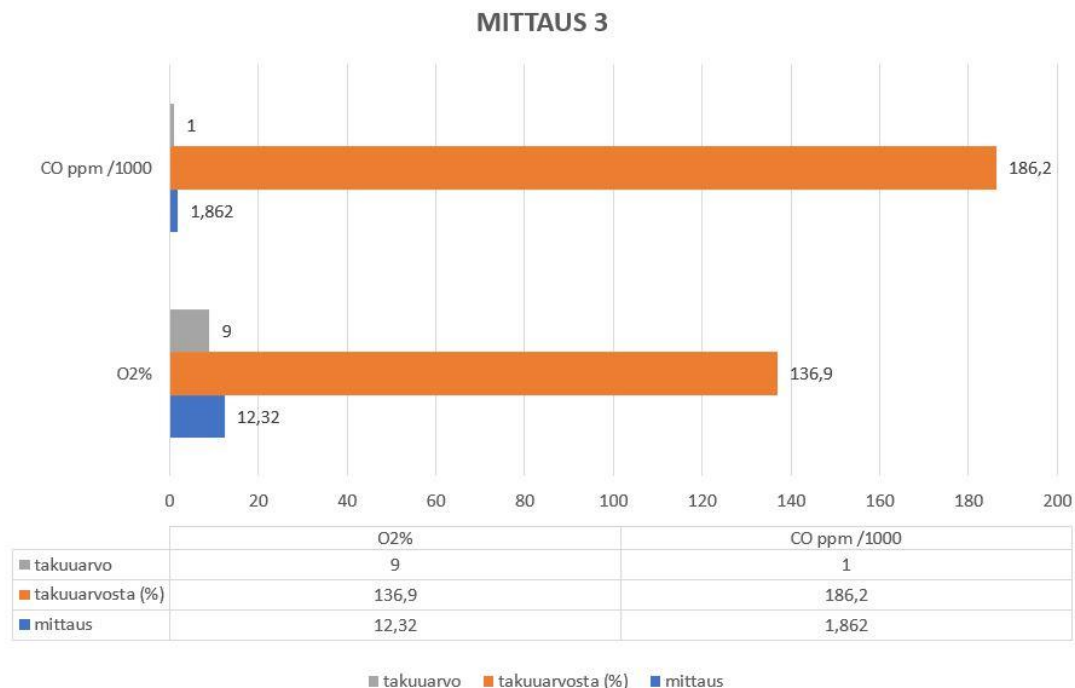
Mittaus 3 kello 13.24 – 14.03.



Kuva 6. Vertailu tunnettuihin arvoihin 7.2.2008



Kuva 7. Vertailu tunnettuihin arvoihin 7.2.2008



Kuva 8. Hiilimonoksidin ja hapen suhde 7.2.2008

6.1.1 Päätelemät 7.2.2008 mittauksesta

Jäännöshappi todella korkealla, Häkä korkealla. Viittaa ilmansyötön olleen korkealla mutta se ei saavuta optimaalista kohtaa yhtyä palamisprosessiin. Polttoaineena hyvä laatuinen pelletti saattaa aiheuttaa vinoumaa palamisilman syötössä. Kuivalla polttoaineella sekundääri-ilman syöttöä pitäisi lisätä primäärin pienentyessä samalla. (Puttonen henkilökohtainen tiedonanto 14.1.2020)

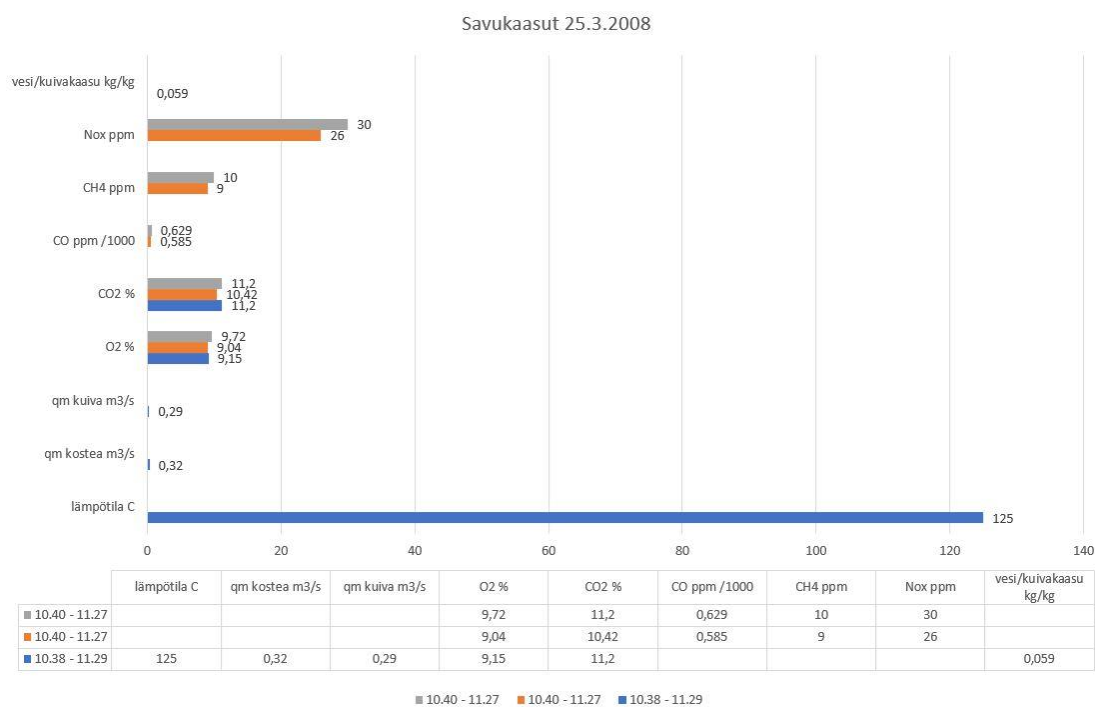
6.2 Savukaasumittaus 25.03.2008

Kaikki mittaukset tehtiin savukaasusyklonin jälkeisestä kanavasta. Polttoaineena puubriketin ja tikkuhakkeen 60/40 seosta, kosteus tuntematon. Kattilan tehoksi ilmoitettu mittauksien aikana 568kW.

Mittaustulosten epävarmuudet:

± 5,5-5,6% kiintoaine

± 22,1-22,9% tilavuusvirta ja kokonaispäästö

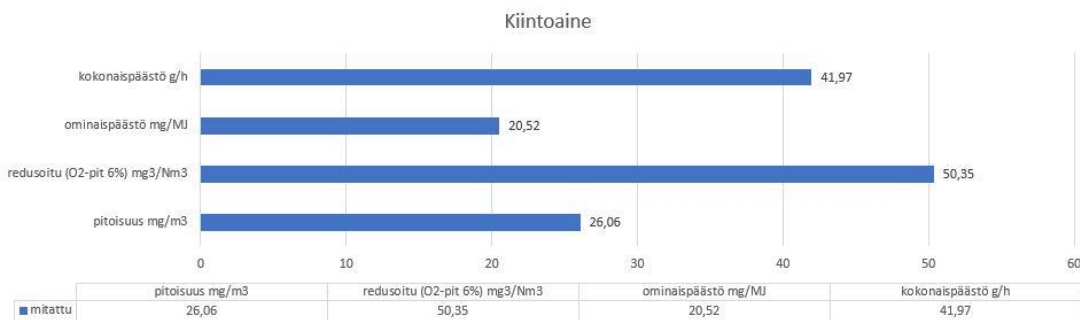


Kuva 9. Savukaasut 25.3.2008

Mittaus 1 Kello 10.40 – 11.27 FTIR kuiva kaasu

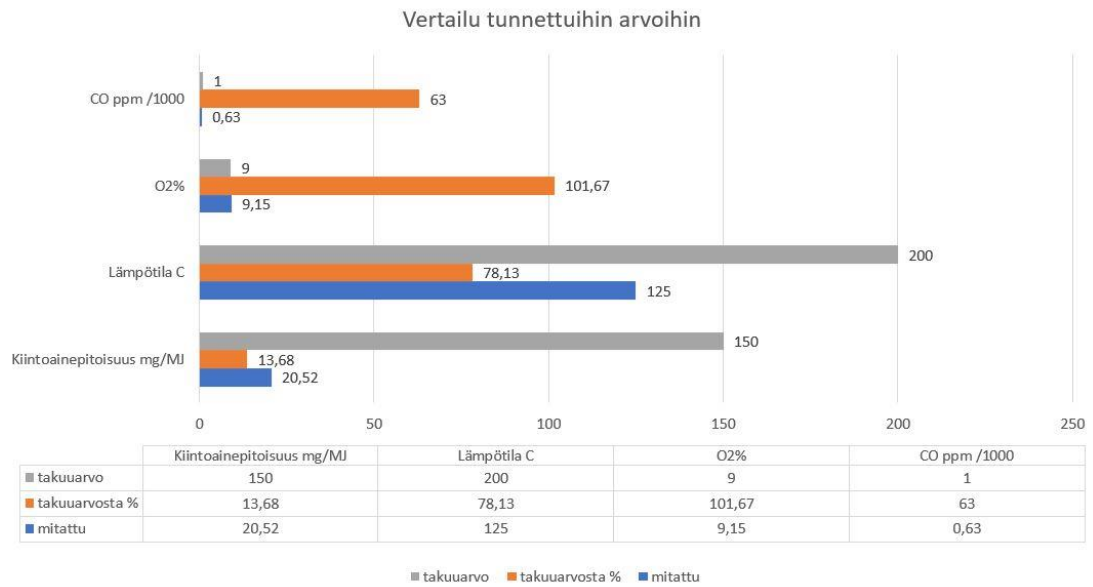
Mittaus 2 Kello 10.40 – 11.27 FTIR kostea kaasu

Mittaus 3 Kello 10.38 – 11.29 Servomex 570



Kuva 10 Kiintoaine 25.3.2008

Mitattu Servomex 570-mittausanalysaattorilla, aikavälillä 10.38-11.29



Kuva 11. Vertailu tunnettuihin arvoihin 25.3.2008

6.2.1 Päätelmät 25.3.2008 mittauksista

Kattilan päästöt ovat kerrassaan linjassa raja-arvojen kanssa, kun happi on ollut korotettuna yli raja-arvonsa. Huomioitavaa on myös kiintoainepitoisuuden erityisen vähäiset arvot jäännöshapen ollessa yli takuarvon. Polttoaineen muutos kosteammaksi vaikuttanut merkittävästi päästöihin.

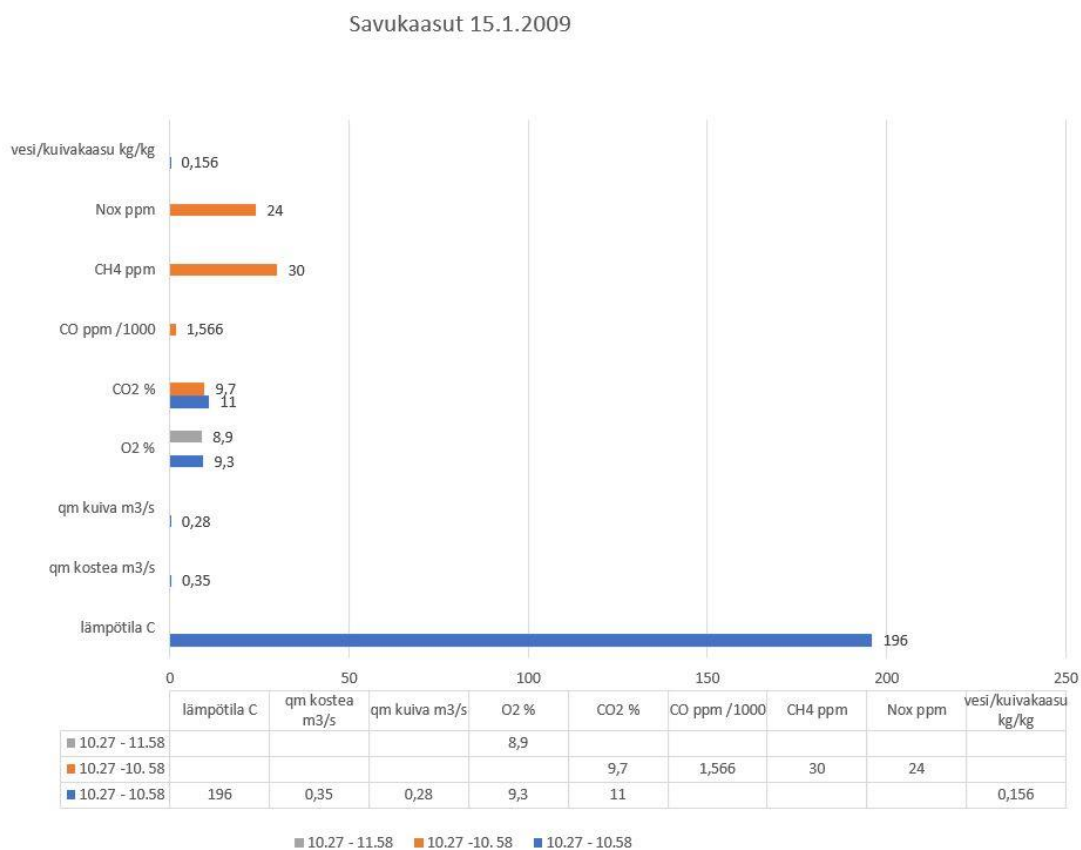
6.3 Savukaasumittaus 15.01.2009

Kaikki mittaukset tehtiin savukaasusyklonin jälkeisestä kanavasta. Kattilan tehoksi ilmoitettu 0,92MW. Polttoaineen koostumus 100% metsähake, kosteus tuntematon.

Mittaustulosten epävarmuudet:

± 4,6% kiintoaine

± 10,4% tilavuusvirta ja kokonaispäästö

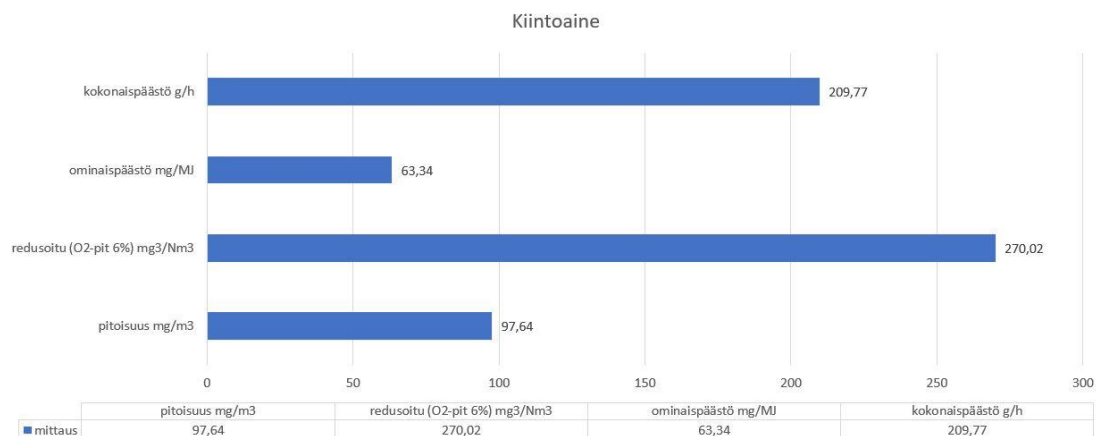


Kuva 12. Savukaasut 15.01.2009

Mittaus 1 kello 10.27 – 11.58 FTIR kuiva kaasu

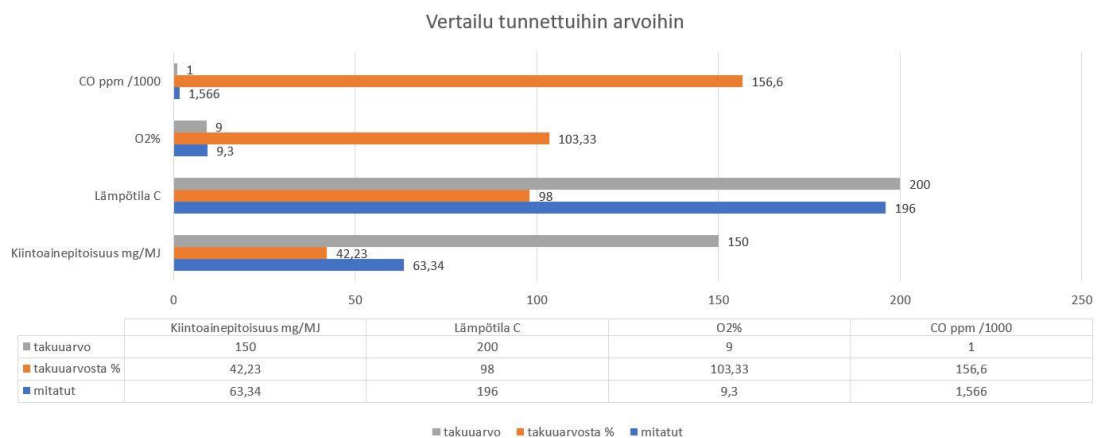
Mittaus 2 kello 10.27 – 10.58 FTIR kostea kaasu

Mittaus 3 kello 10.27 – 10.58 Servomex 570



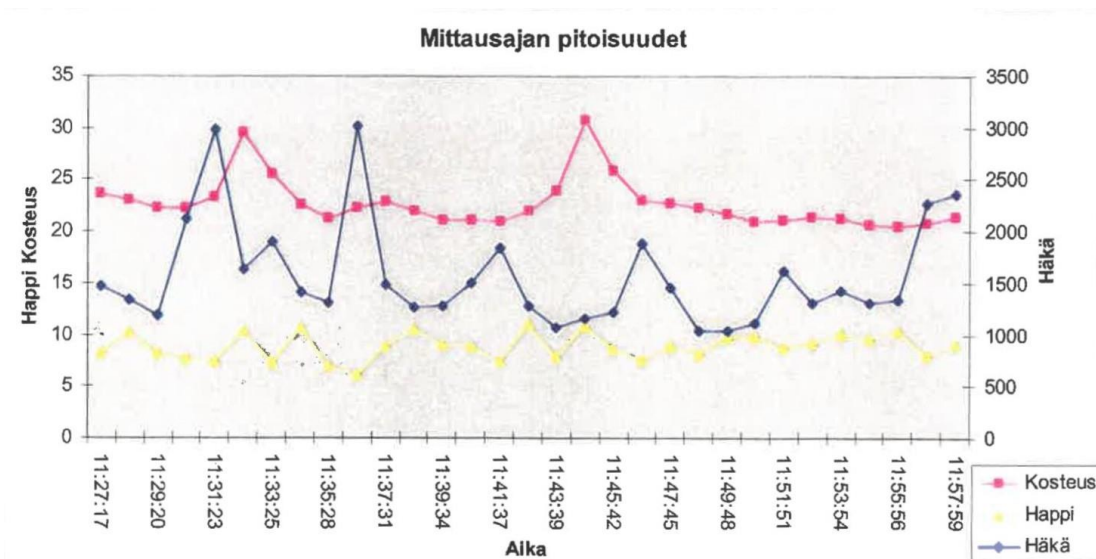
Kuva 13. Kiintoaine 15.01.2009

Mitattu Servomex 570-mittausanalysointorilla, aikavälillä 10.27 – 10.58



Kuva 14. Vertailu tunnettuihin arvoihin 15.01.2009

Kiintoainepitoisuus pysyy raja-arvossa, jäännöshapen ja hään ylittäessä takuuarvot.



Kuva 15. Jäännöshapen ja hiilimonoksidin suhde, jäännöshapen asetusta muutettaessa 15.01.2009

Kattilaan syötettävää ilmamäärää säädettiin mittauksen aikana. Tarkempia ajoarvoja ei ole dokumentoitu.

6.3.1 Päätelmät 15.1.2009 mittauksista

Edustava mittaus polttoaineen ollessa nykyistä vastaava metsähake. Ilmansyöttöä säädettyäessä on todennäköisesti säädetty sekundääri- ja tertiäripuhaltimien yhteistä ohjausta jäännöshapen kautta. Häkä nousee rajusti asetuksen pudotessa. Häkä ei silti saavuta tavoitearvoaan missään vaiheessa. Voidaan päteellä korkeasta jäännöshapesta ja samalla korkeista olevista häkä- ja kiintoainetasoista olevan ongelmia palamisilman syötössä. Pedillä oleva polttoaine ei pääse palamaan kunnolla ja aiheuttaa kiintoaine- sekä häkäpitoisuutta savukaasuissa.

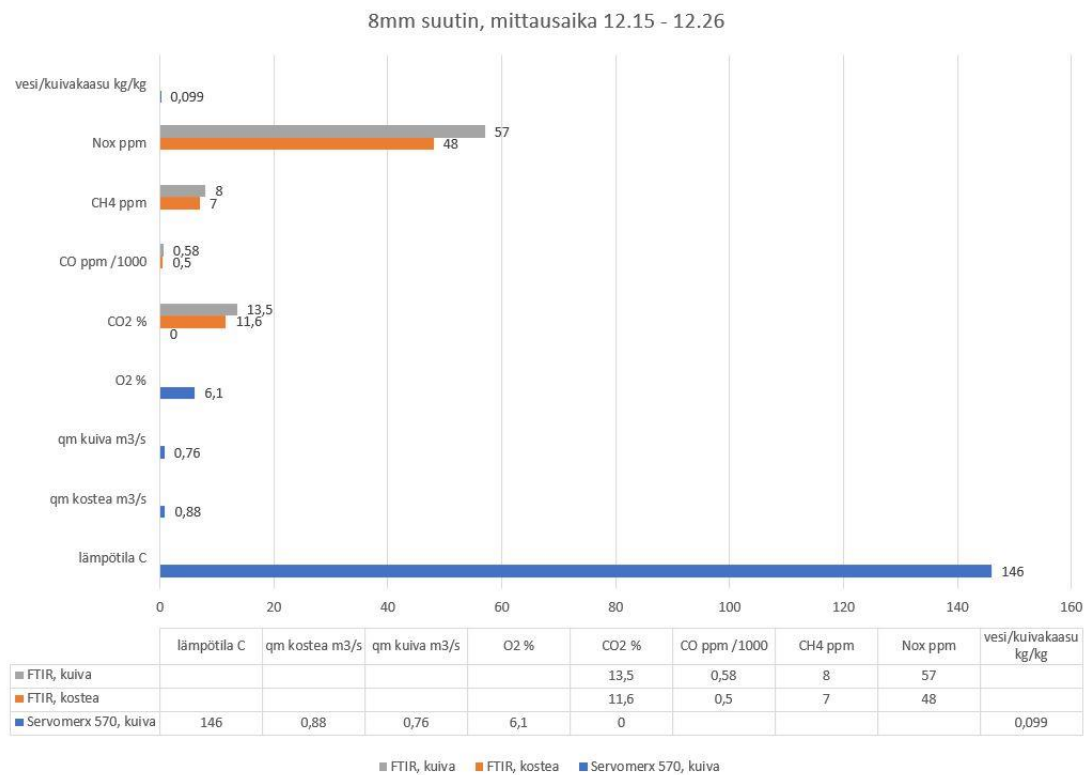
6.4 Savukaasumittaus 05.02.2009

Kaikki mittaukset tehtiin savukaasukanavasta syklonin jälkeen. Polttoaineena mittausaikana käytettiin 1:1 suhteessa metsähakkeen ja pelletin sekoitusta. Polttoaineen kosteus 37%. Kattilan tehoksi ilmoitettu 1532kW ensimmäisen ja toisen mittauksen aikana. Kolmas mittaus toteutettu osateholla 720kW.

Mittaustulosten epävarmuudet:

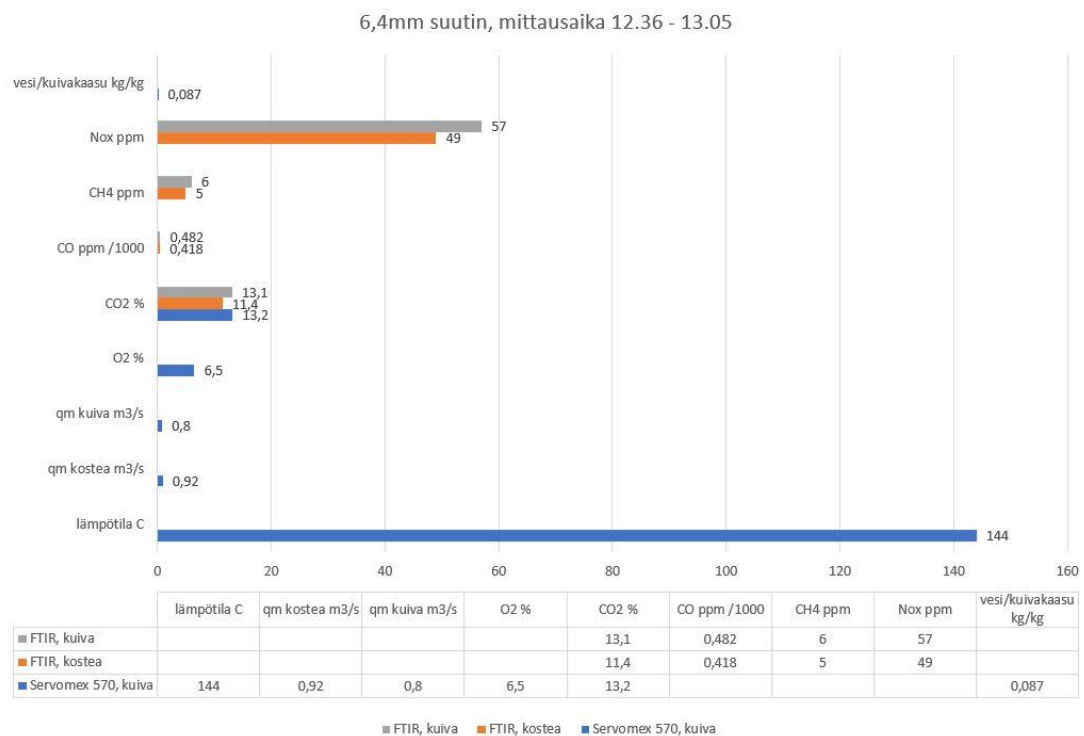
± 2,3 – 2,8% kiintoaine

± 3,7 – 3,9% tilavuusvirta ja kokonaispäästö



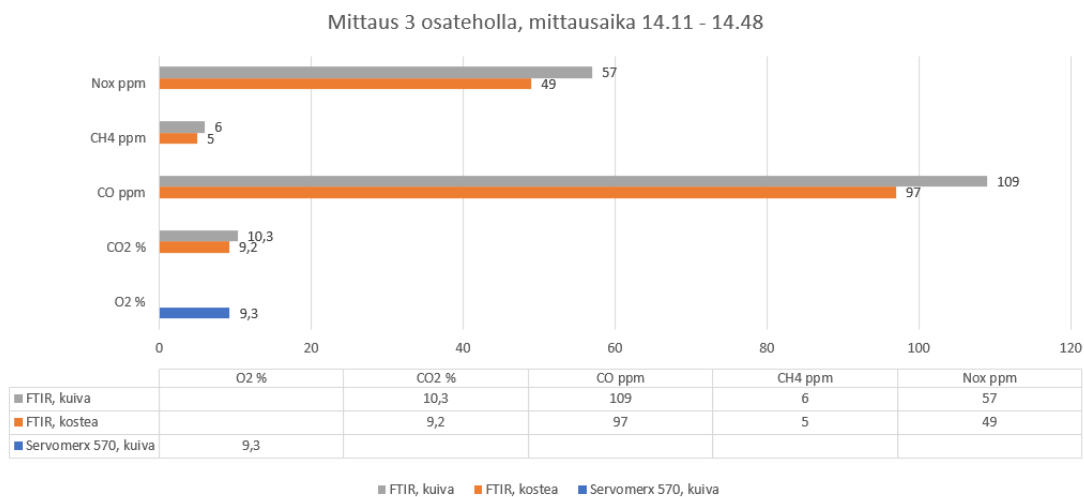
Kuva 16. Savukaasut 1 05.02.2009

Mittaus päättynyt suuttimen tukkeutumiseen. Kattilan teho 1532 kW

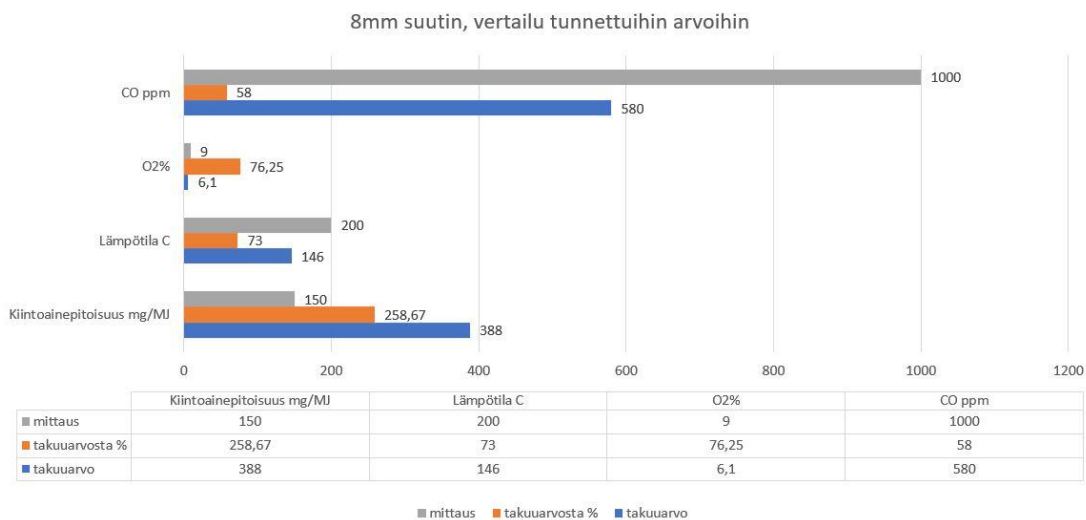


Kuva 17. Savukaasut 2 05.02.2009.

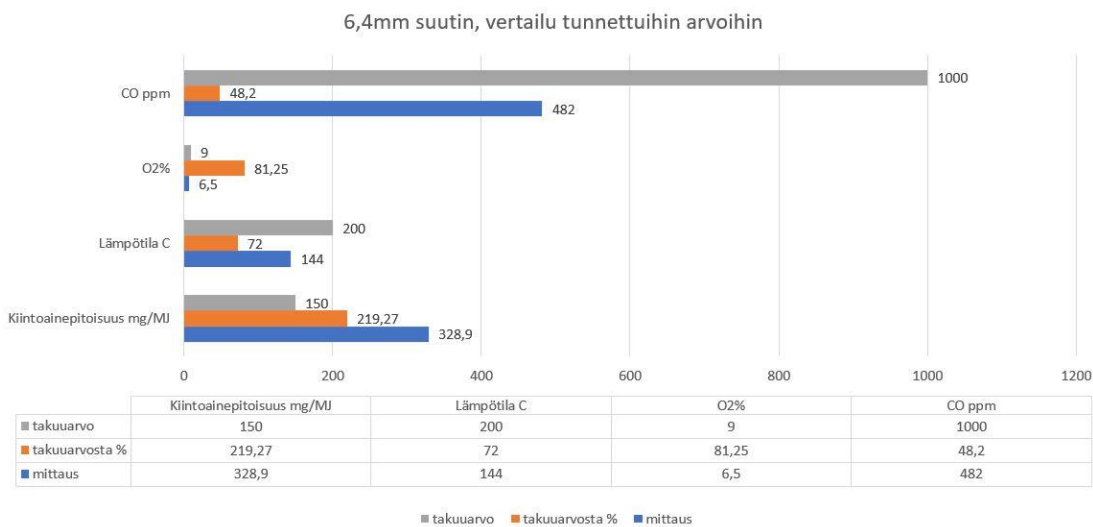
Mittaus päättynyt suuttimen tukkeutumiseen. Kattilan teho 1532 kW.



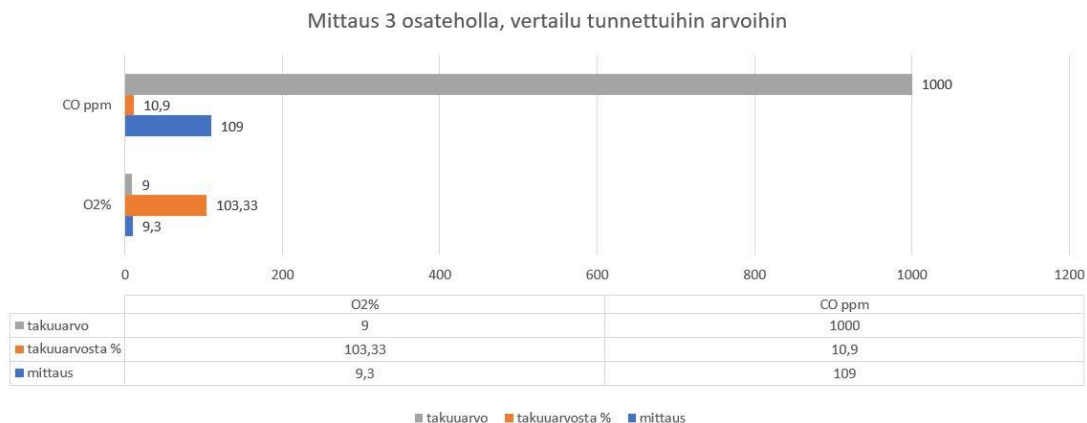
Kuva 18. Osateholla mittaus 05.02.2009. Kattilan teho 720 kW.



Kuva 19. Vertailu tunnettuihin arvoihin. 8mm suutin 05.02.2009.



Kuva 20. Vertailu tunnettuihin arvoihin, 6,4mm suutin 05.02.2009.



Kuva 21. Vertailu tunnettuihin arvoihin, osateholla mittaus 05.02.2009.

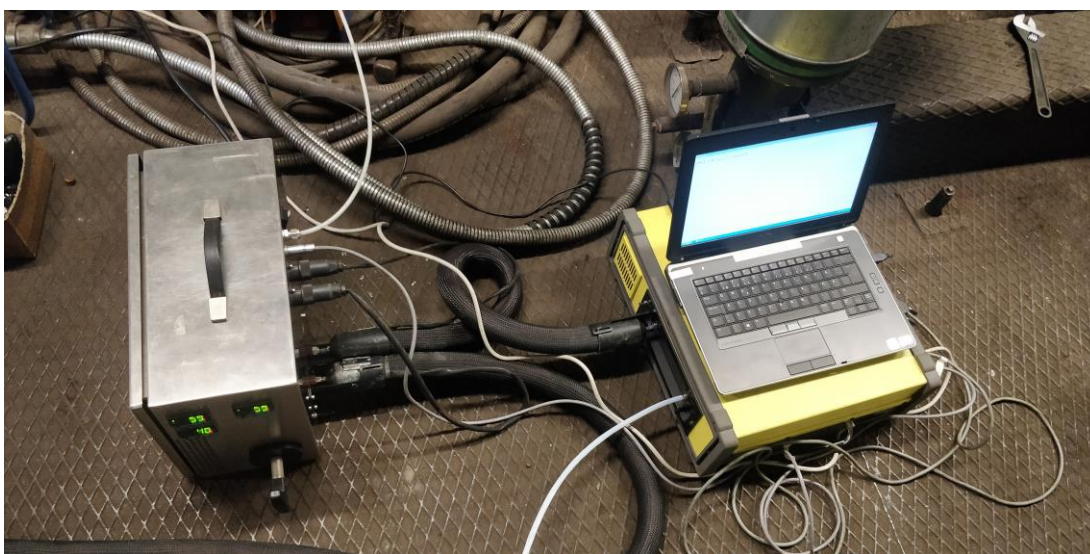
6.4.1 Päätelmät 5.2.2009 mittauksista

Jäännöshappi täydellä teholla ajettaessa näyttänyt melko pientä arvoa, häikä pysynyt kurissa sen sijaan kiintoainepäästöt nousseet rajusti. Osateholla päästöt pysyneet hyvin kurissa. Osateholla huomioitavaa on lähes samankaltainen polttoainekoostumus kuin mittauksessa 25.3.2008 jolloin saatiin myös tyydyttäviä arvoja pelletin ja metsähakkeen seoksella.

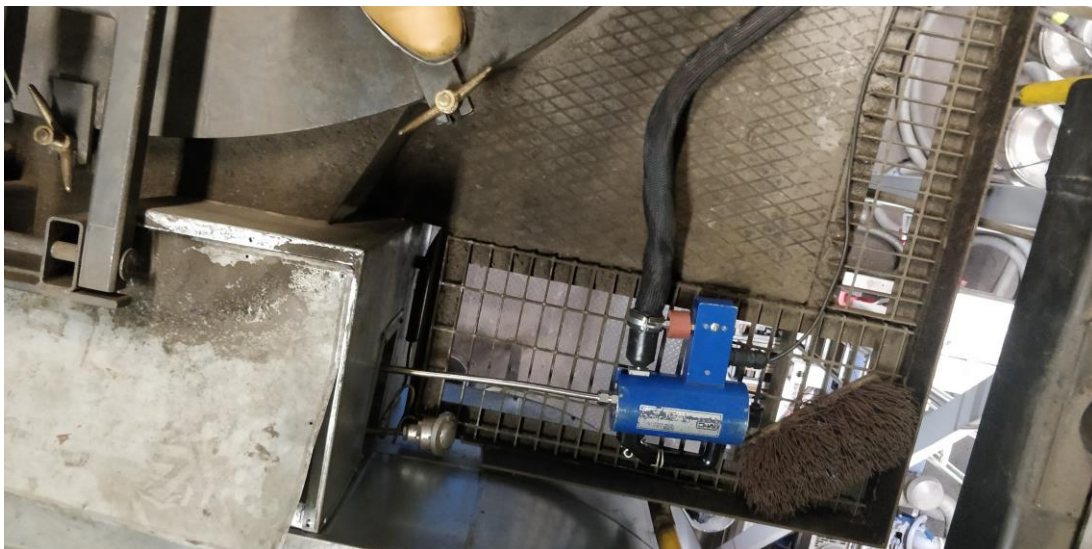
7 UUSI SAVUKAASUMITTAUS 17.12.2019

Savukaasumittaukseen käytettiin samaa Gaset Dx-4000 FTIR-mittalaitteistoa kun Satakunnan ammattikorkeakoulun tekemissä savukaasumittauksissa vuosina 2008-2009. Poikkeavasti aiemmista mittauksista kaikki kaasukomponentit määritettiin FTIR-laitteistolla, eikä tarkkaa kiintoainepitoisuustasoa mitattu. Laitteiston käyttäjänä toimi itse opinnäytetyön tekijä Kasvinen. Mittaussondi sijoitettiin juuri ennen multi-syklonia vievään kanavaan, kanavan keskelle. Huomioitavaa on, että mittauksen tarkkuuteen mittalaitteen lisäksi vaikuttivat kattilan tuhkanpoisto-osan ilmapuodot.

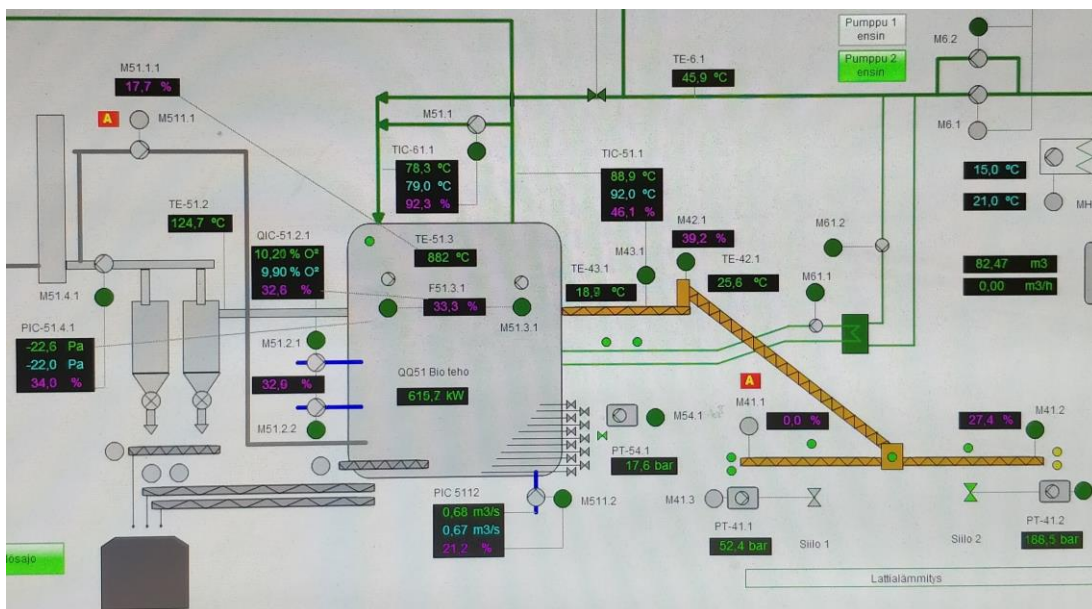
Mittaus toteutettiin kolmessa eri osassa. Kaksi ensimmäistä toteutettiin normaaleilla ajoarvoilla ja mittalaitteisto kalibroitiin sekä puhallettiin typpikaasulla mittauksen välissä. Mittaussondi tarkastettiin aina mittauksen välissä. Kolmannen mittauksen aikana kattilan jäännöshapetta pudotettiin 9,9% asetuksesta portaittain 8%:iin asti. Tämän jälkeen jäännöshapetta alettiin nostamaan yli normaalin käytössä olevan asetuksen 11%:iin asti. Kuvissa 25 - 31 on kuvattu data viidestä eri mittapisteestä. Nämä mittapisteet ovat edellä mainitut kohdat. Kattilan kuorma vaihteli mittauksen aikana 603-668kW välillä. Polttoaineena toimi pelkästään kokopuuhake. Kokoojaruuveilta kerätyn polttoaineen kosteudeksi määritettiin 31,1 prosenttia. Polttoaineen laatu pysyi silmämääräisesti tasaisena koko savukaasumittauksen ajan.



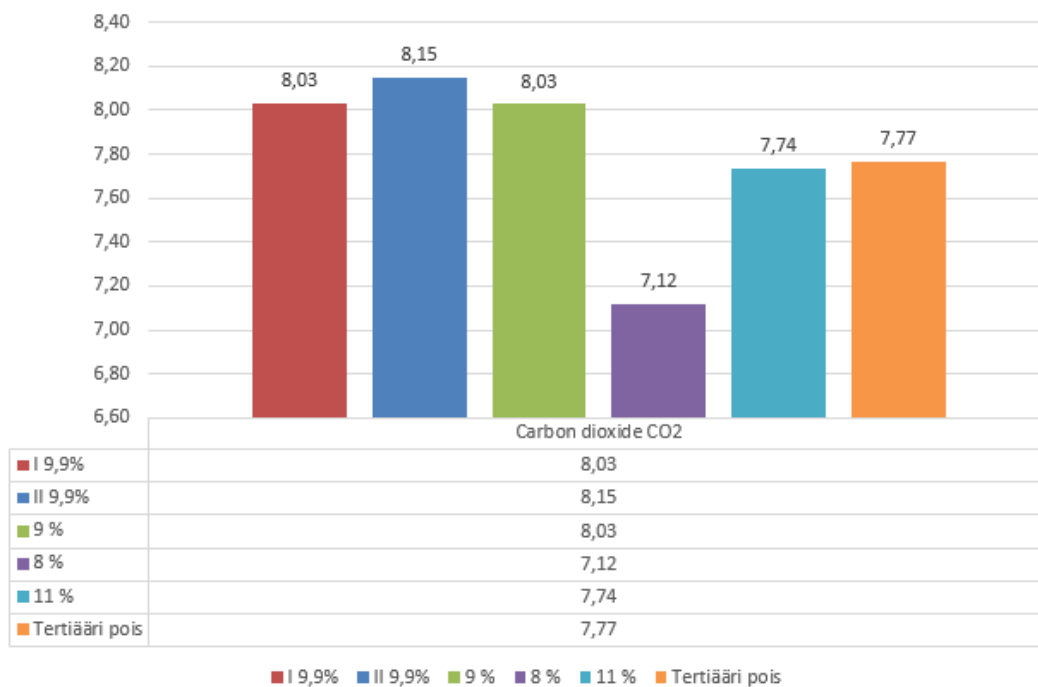
Kuva 22. FTIR-mittalaitteisto koottuna.



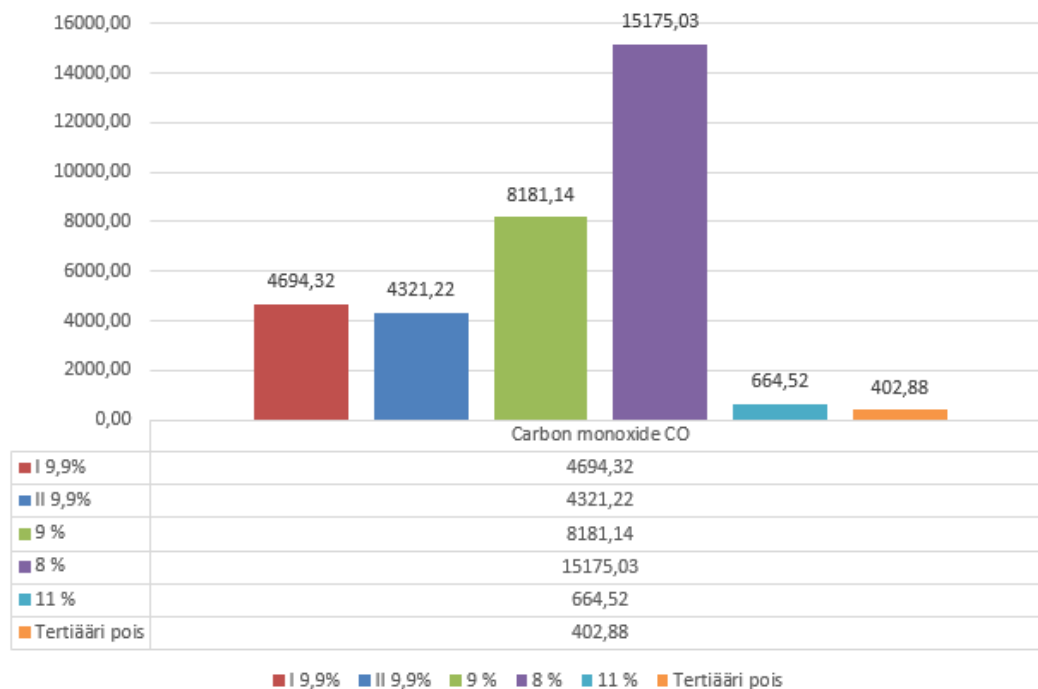
Kuva 23. Mittaussondi asetettuna paikalleen ennen multisyklonia.



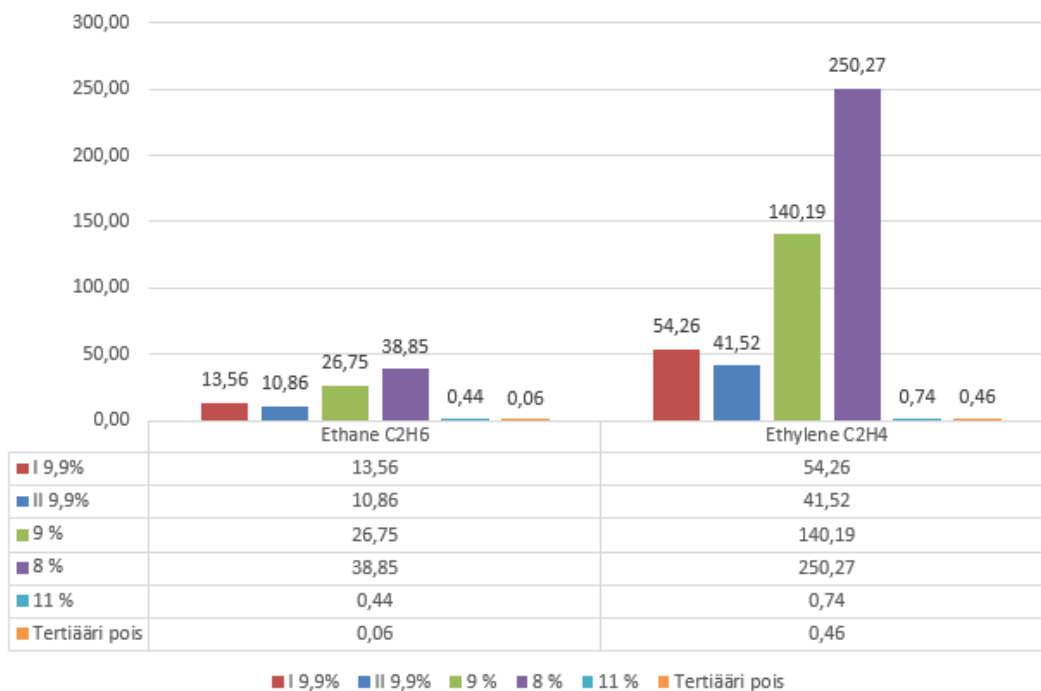
Kuva 24. Lähtötilanne mittausten alkaessa kello 10:28. Kattilan teho 615kW.



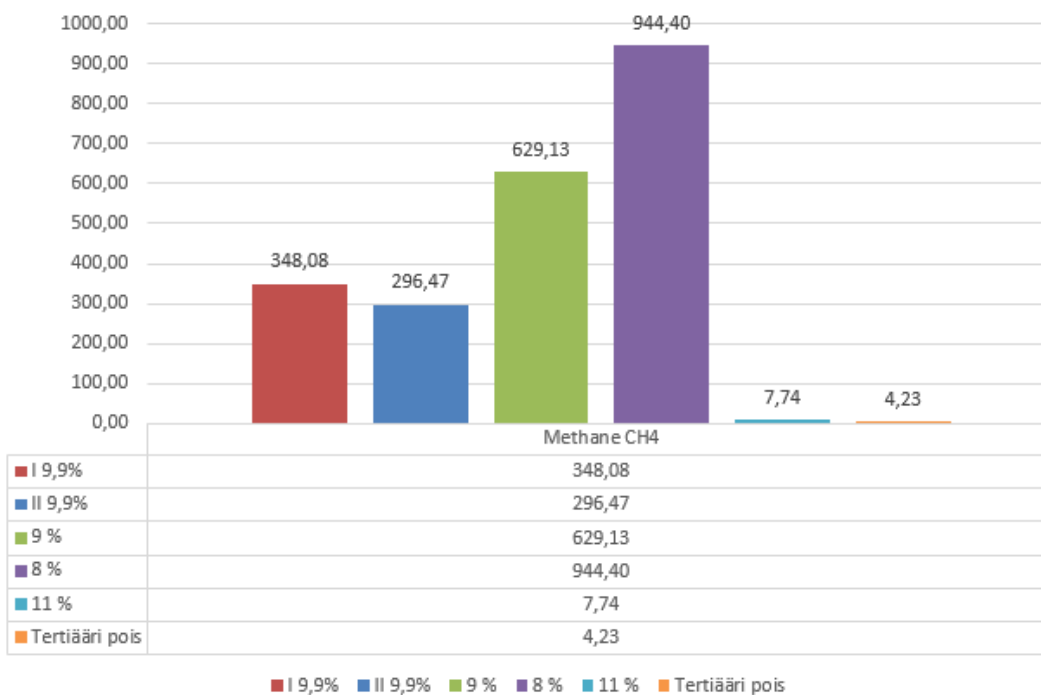
Kuva 25. Hiilidioksidipäästön tilavuusprosentit kuivista savukaasuista. Yksikkönä tilavuusprosentti kuivasta savukaasuvirrasta.



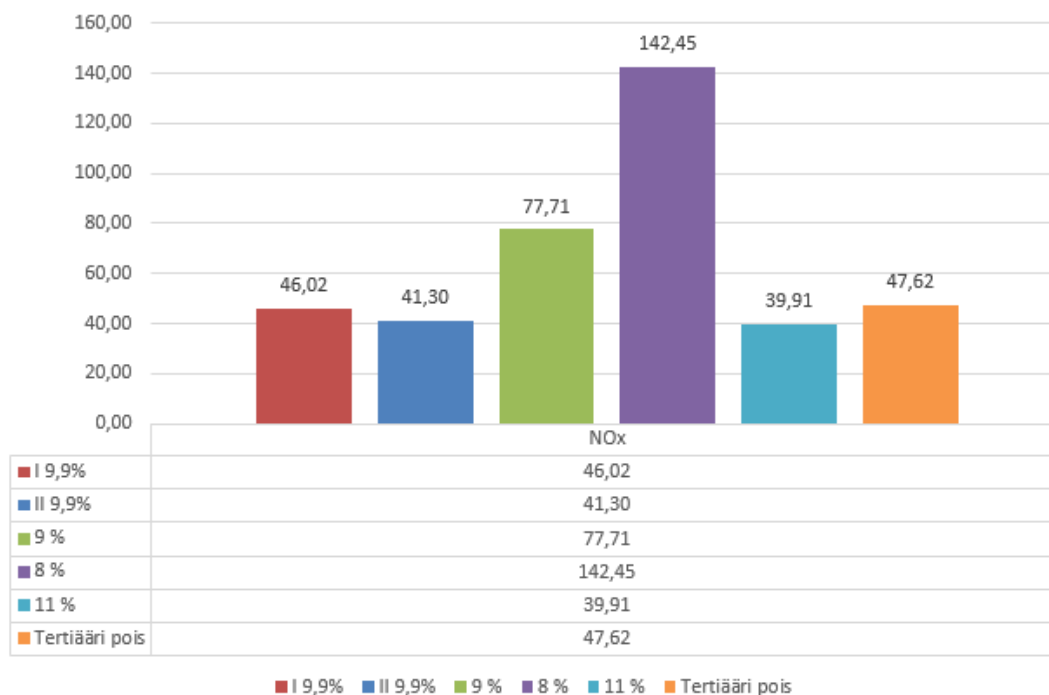
Kuva 26. Hiilimonoksidipäästön tilavuusprosentit kuivista savukaasuista, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta.



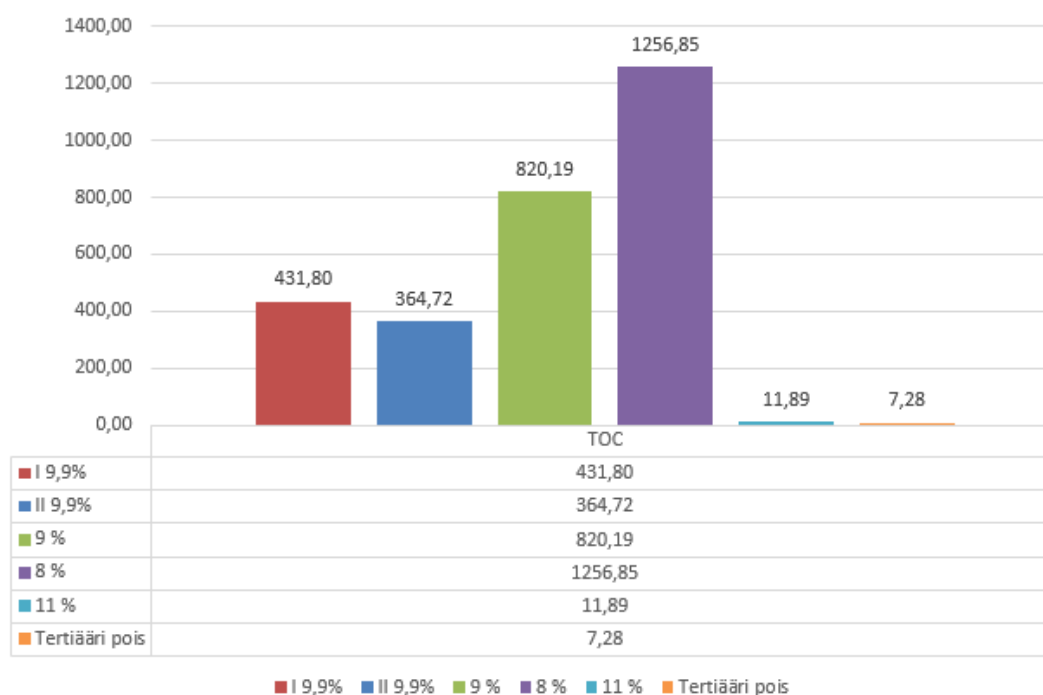
Kuva 27. Etaani- ja etyleenipäästöjen tilavuusprosentit kuivista savukaasuista, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta.



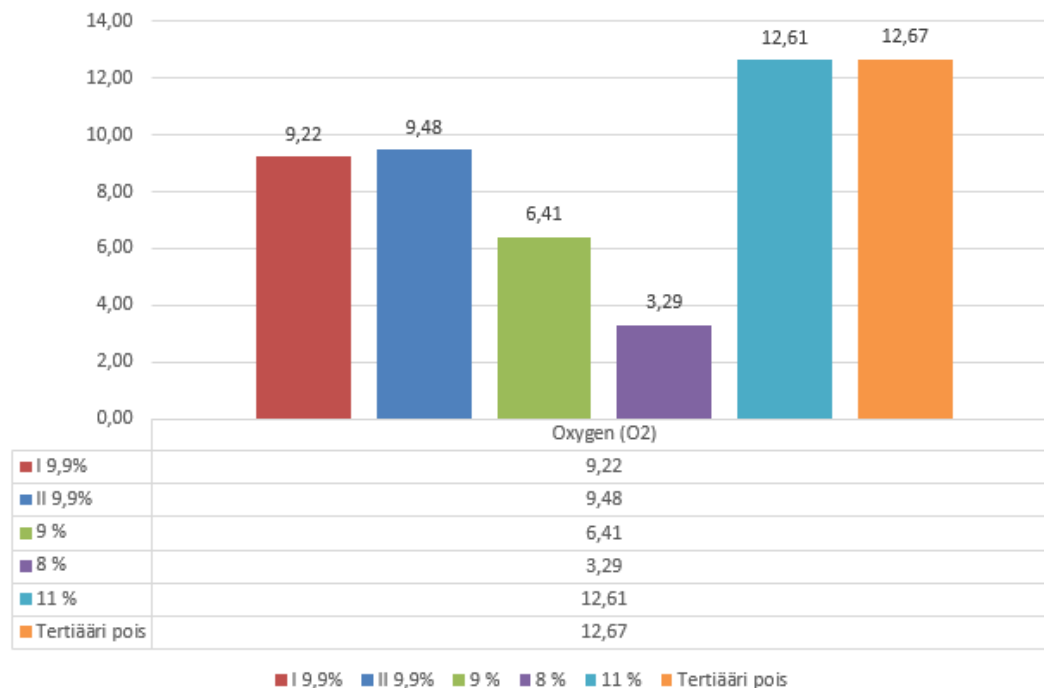
Kuva 28. Metaanipäästön tilavuusprosentit, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta.



Kuva 29. Typen oksidien päästön tilavuusprosentit, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta.



Kuva 30. Orgaanisen kokonaishiilen päästön tilavuusprosentit, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta.



Kuva 31. Jäännöshapen tilavuusprosentit. Yksikkönä tilavuusprosentti kuivasta kuivasta savukaasuvirrasta.

7.1.1 Päätelmät 17.12.2019 mittauksesta

Ajettaessa kattilalle asetettua nykytasolla hyväksi havaittua lähes 10% jäännöshappitasoa, päästöt ovat järjestään korkealla. Hiilimonoksidi on yli nelinkertaisesti 1000ppm tavoitearvonsa. Huomattavan koholla ovat myös metaani, etaani, etyleeni, näille päästöille ei ole määritelty kattilavalmistajan ohelta tavoitearvoa, mutta verrattuna metaanin päästömäärää aikaisempiin mittauksiin vuosina 2008-2009 voidaan todeta sen olevan rajusti koholla. Etaani- ja etyleenipäästöt vahvistavat tätä tulkintaa. Orgaanisen kokonaishiilen päästö asettuu edellä mainittujen kaasukomponenttien tavoitin korkealle. Orgaanisen kokonaishiilen päästö on ilmoitettu yksikössä ppm, yksikköä ei muunneta vastaamaan muita mittauksia, koska Servomex 570-laitteiston mitattamia kaasutyyppäjä ei tunneta orgaanisen kokonaishiilen osalta. Jäännöshapen mitattu arvo vastaa lähes sille annettua ajoarvoa.

Kun jäännöshapen asetusarvoa lähdetään pudottamaan ensin yhdeksään prosenttiin ja lopulta kahdeksaan prosenttiin alkavat hiilimonoksidi, etaani, etyleeni, metaani, typen oksidit ja orgaanisen kokonaishiilen päästöarvot nousta lähes lineaarisesti. Edellä mainitut päästöt kertovat palamisen rajusta heikkenemisestä. Päästö aiheuttaa hyötysuhteen alenemista, mutta myös tahrii kattilan lämmönsiirtopintaa ja aiheuttaa tiheämpää

nuohouksen tarvetta. Hiilidioksidipäästö pienenee palamisen heiketessä. Jäännöshappi ei tavoita arvoaan mittauskohdassa.

Kolmanneksi sekundääripuhaltimeksi asetettu puhallin, joka on asetettu arinan päälle, osallistuu yllättävän hyvin palotapahtumaan, sillä pudotettaessa puhallin pois ja siirryttäessä pelkälle sekundääripuhallin ajolle, mittauksessa näkyy vain hienoinen piikki alaspäin häkä metaani, etaani sekä etyleeni päästössä. Huomioitavaa on sekundääripuhalmien suuri ohjaus, 95% kuorman ollessa vain 650kW.

8 HYÖTYSUHDE

Hyötysuhdelaskennassa sovelletaan saksalaista DIN 1942 -standardia. Menetelmiä kattilan hyötysuhteen määrittämiseen on kaksi: suora ja epäsuora. Suorassa menetelmässä kattilasta saatavaa tehoa verrataan sisään tuotuun energiaan. Epäsuorassa menetelmässä kattilan hyötysuhde lasketaan häviöiden kautta.

Lasketaan kattilan kokonaishyötysuhde suoralla menetelmällä ja tarkastellaan epätäydellisen palamisen ja jäännöshapen vaikutusta hyötysuhteeseen. Laskennan arvoina käytetään 17.12.2019 savukaasumittauksesta saatuja tuloksia ja kerättyjä arvoja. Laskenta on suoritettu käyttäen Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Työssä esitettyjen lukujen desimaaleja on lyhennetty työn helppolukuisuuden vuoksi.

8.1 Suora menetelmä

Käytetyt arvot perustuvat savukaasumittauksen aikana mitattuihin ja kerättyihin arvoihin. Mittaus ajankohdaksi valittiin 17.12.2019 kello 10:35 – 11:39 jolloin kattila oli normaalissa ja vakaassa ajotilanteessa. Ajoarvoja ei muutettu ja kattilan kuorma pysyi melko vakaana. Kattilan kaukolämpöteho liikkui välillä 603-668kW ja syöttöruuvin pyörimisnopeus välillä 46,1 – 51,4%. Ajoarvoja tarkkailtiin ja niistä otettiin lukemat neljä kertaa ylös, näistä otettiin keskiarvo, jonka perusteella laskenta voitiin suorittaa.

KL-teho (kW)	Syöttöruuvin ohjaus (%)	kello
615,7	46,1	10:35
668,4	47,2	10:51
611,1	49,7	11:23
603	51,4	11:39
KA 624,55	KA 48,6	

Taulukko 3. Kattilan tuottaman tehon ja syöttöruuvin ohjauksen keskiarvo

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

η = Kattilasta saatava hyötysuhde

Q_{out} = Kattilasta käyttöön saatu energia

Q_{in} = Kattilaan tuotu energiamäärä

(Huhtinen, J., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 1997, 92)

$$Q_{in} = m_{pa} * c_{pa} * \frac{1000kJ}{MJ}$$

m_{pa} = polttoaineen tilavuusvirta * tiheys (kg/s)

c_{pa} = polttoaineen alempi tehollinen lämpöarvo

(E. Alakangas, M. Hurskainen, J. Laatikainen-Luntama, J. Korhonen. 2016, 29).

Polttoaineen tilavuusvirta määritettiin kokeellisesti pyörittämällä syöttöruuvia manuaalisesti ja syötetty polttoaineen määrä mitattiin. Mittausta sovelletaan savukaasumittausten aikana kerättyihin syöttöruuvien pyörimisnopeuksiin, jotta pesään syötetty polttoaineen määrä voidaan arvioida.

Syöttöruuvien pyöriessä 50% ohjausarvolla polttoainevirta pesään oli 0,07657 kg/s. Polttoaineen kosteus saapuneesta kuormasta mitattuna oli 30,2%. Ottaen huomioon savukaasumittauksen aikana mitatun polttoaineen kosteuden ja syöttöruuvien pyörintänopeuden, arvioidaan pesään syötetyn polttoaineen määräksi 0,07442 kg/s. Tehollinen lämpöarvo keskiarvona kokopuuhakkeelle 19,2MJ/kg (Alakangas ym. 2016, 64).

Alempi tehollinen lämpöarvo määritettiin yhtälön mukaan

$$Q = \left(\frac{19,2MJ}{kg} * 0,698kg \right) - \left(\frac{2,443MJ}{kg} * 0,302kg \right) = \frac{12,66MJ}{kg}$$

$$Q_{out} = m * c_p * \Delta T$$

m = kaukolämpöveden massavirta

c_p = Veden ominaislämpökapasiteetti

ΔT = Lähtevän ja tulevan kaukolämpöveden erotus

(Huhtinen ym. 1997, 94)

Laitoksella on järjestetty mittaus kattiloiden tuottamasta kaukolämpötehosta. Mittaus on biokattilalla toteutettu tulevasta ja lähtevästä kaukolämpölinjasta. Lähtevään linjaan on sijoitettu myös virtausmittaus. Automatiikka laskee tuotettua kaukolämpötehoa jatkuvasti. Laskennassa käytetään tätä arvoa. Kaukolämpöteho eli hyödyksi saatu teho oli tällöin 624,55kW.

Kattilan hyötysuhteeksi saadaan kerätyillä arvoilla.

$$\eta = \frac{0,62455MW}{0,94248MW} = 66,27\%$$

Alla esitetyn taulukon mukaan voidaan todeta, että suoralla menetelmällä laskettu hyötysuhde korreloi mitatun liukuvan hyötysuhteen kanssa. Alla oleva taulukko perustuu laitokselle tuotuihin kuormiin ja kuukauden aikana tuotettuun tehoon.

		2020					
		syys	loka	marras	joulu	tammi	helmi
Puu	MWh	124,02	644,75	711,81	685,68	752,56	794,94
Turve	MWh	0	0	0	0	0	0
Öljy	MWh	108,88	102,82	21,17	10,08	9,072	5,04
Sähkö	MWh	0	0	0	0	0	0
Yhteensä	MWh	232,90	747,57	732,98	695,76	761,63	799,98
Tuotettu energia	MWh	217,1	388,7	628,5	485,2	469,8	463,4
Hyötysuhde	%	93,2 %	52,0 %	85,7 %	69,7 %	61,7 %	57,9 %
Hyötysuhde liukuva 12 kk	%	68,7 %	66,1 %	69,6 %	70,0 %	68,5 %	67,8 %

Taulukko 4. Liukuva hyötysuhde

8.2 Savukaasun määrä

Epäsuoran laskennan kautta keskitytään selvittämään jäännöshapen asetuksen vaikutusta hyötysuhteeseen. Verrataan silloista normaalia tilaa sekä savukaasumittausten aikana kasvatetulla jäännöshapella ollutta ajotilannetta. Lasketaan syntyvien savukaasujen määrä, jotta laskentaan tarvittavat arvot saadaan. Pesään syötetyn polttoaineen

massa oli 74,42g/s ja polttoaineen kosteus oli mittaushetkellä 31,1%. Vähennetään veden osuus pesään syötetyn polttoaineen kokonaismassasta.

$$74,42g - (74,42 * 0,311)g = 51,28g$$

Alla esitetyssä taulukossa kerrotaan pesään syötetyn täydellisen kuivan polttoaineen koostumus.

	C	H ₂	N ₂	O ₂	
P-%*	50	6	2	42	
g	25,6377	3,0765	1,0255	21,5357	
g/mol**	12,01	2,016	28,02	32	
mol	2,1347	1,5261	0,0366	0,6730	
	C+O ₂ = CO ₂	2H ₂ +O ₂ = 2 H ₂ O	N ₂	O ₂	
mol O ₂	2,1347	0,7630	0,0000	-0,6730	2,2247

Polttoaineen alkuainekoostumus p-% kuiva-aineessa, puu, yleensä.

Taulukko 5. Kuivan polttoaineen koostumus

*(Alakangas ym. 2016, 56)

** (Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S. Öistämö, J. 2016, 186-187)

Taulukossa on laskettu polttoaineen sisältämien yhdisteiden ainemäärät ja kuvattu reaktioyhtälöt palamisessa. Viimeisellä rivillä on laskettu yhteen stoikiometriseen palamiseen tarvittava hapen ainemäärä ja vähennetty siitä polttoaineen sisältämä hapen ainemäärä. Stoikiometriseen palamiseen tarvitaan näin ollen happea 2,2247 mol. Muutetaan hapen ainemäärä vastaamaan stoikiometristä ilman ainemäärää kertomalla se typen ja hapen suhteella.

$$V_{stök.ilma} = 4,76 * V_{O_2}$$

(Huhtinen ym 1997, 76)

Stoikiometriseen palamiseen tarvittavan ilman ainemääräksi saadaan 10,5897 mol. Tarvittavan ilman massa saadaan laskemalla ilman moolipaino ja kertomalla se ilman ainemäärällä. Ilman moolipaino 29 g/mol. Stoikiometriseksi ilman massaksi saadaan 307,1 grammaa.

$$10,5897 \text{ mol} * \frac{29 \text{ g}}{\text{mol}} = 307,1 \text{ g}$$

(Huhtinen ym 1997, 76)

Palamisilman tilavuus lasketaan NTP-olosuhteissa, jonka mukaan lämpötila on 20°C ja paine on 293,15K. Kerrotaan palamisilman ainemäärä 10,5897 mol moolitilavuudella 22,41 l/mol. Tilavuudeksi saadaan 237,3158 litraa.

$$10,5897 \text{ mol} * \frac{22,41 \text{ l}}{\text{mol}} = 237,3158 \text{ l}$$

(Huhtinen ym 1997, 76)

Lasketaan palamisilman todellinen tarve ilmakertoimella. Selvitetään ensin ilmakerroin mitatun jäännöshapen keskiarvosta. Asetettu jäännöshapen ohjaus oli mittaushetkellä 9,9%, mutta toteutunut jäännöshapen keskiarvo oli 9,22%. Käytetään mitattua arvoa laskentaan. Mitatuksi ilmakertoimeksi saadaan 1,786. Lasketaan ilmakerroin lausekkeella:

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_{2\text{mitattu}}}$$

(Huhtinen ym 1997, 76)

Kattilan palamisilma otetaan kattilahuoneesta 1,5 metrin korkeudelta. Erillistä ilman esilämmitystä ei ole käytössä ja jokainen puhallin imee pesään työntämänsä palamisilman omasta imuaukostaan, erillisiä kanavia ei ole. Mitattu lämpötila kattilahuoneessa oli 25°C. Lasketaan palamisilman todellinen tilavuus ilman lämpötilan mukaan verrattuna NTP-olosuhteisiin, eli normaaliin paineeseen 101 325Pa ja lämpötilaan 293,15K. Tulokseksi saadaan 241,6598 litraa. Käytetty yhtälö:

$$237,3158l * \left(\frac{273,15K + 5K}{273,15K} \right) = 241,6598l$$

(Niemi 2019)

Lasketaan muodostuvien hiilidioksidin, vesihöyryn sekä palamisilman mukana tulevan typen määrä. Huomioidaan vesihöyryn osalta polttoaineen mukana tuleva vesimäärä ja lisätään se kokonaismäärään. Lisätään palamisilman mukana tulevaan typen määrään polttoaineen sisältämä typpi. Tilavuuden laskemiseen käytetään samaa ideaalikaasun vakiota tilanyhtälöä 22,41l/mol kuin aiemminkin.

	CO ²	H ² O	N ²
mol	2,1347	1,5261	0,0366
g/mol	44,0100	18,0160	28,0200
g	93,9479	27,4934	1,0255
litraa	47,8385	34,1988	0,8202

	lisätään PA mukana tuleva veden määrä	lisätään ilman mukana tuleva N
g	23,1446	234,3871
g/mol	18,0160	28,0200
mol	1,2847	8,3650
litraa	28,7895	187,4595
g	yht. 50,6380	235,4126
mol	yht. 2,8107	8,4016
litraa	yht. 62,9883	188,2797

Taulukko 6. Polttoaineen reaktiotuotteet

Stoikiometrinen savukaasun määrä saadaan, kun kaikki ainemäärät summataan yhteen. Lasketaan yhteen hiilidioksidin, vesihöyryn ja typen ainemäärä. Olosuhteina NTP, todellinen määrä todetaan myöhemmässä laskentavaiheessa.

g	379,9986
mol	13,3470
litraa	299,1065

Lisätään savukaasun stoikiometriseen ainemäärään tulipesään syötettävän ilman todellinen ainemäärä ja vähennetään siitä stoikiometriseen palamiseen tarvittava ilman ainemäärä. Saadaan savukaasun todellinen ainemäärä, jonka kautta voidaan laskea savukaasun todellinen tilavuus ja massa.

$$n_{tod\cdot savuk} = \left(\begin{array}{l} 13,3470mol \\ +18,9134mol \end{array} \right) - 10,5897mol = 21,6707mol$$

Tilavuuden arvo lasketaan piipussa mitatun savukaasun lämmön kautta. Mitatun savukaasun lämpötilan keskiarvo oli 129,375°C. Verrataan NTP-olosuhteita mitattuun lämpöön. Ainemäärä kerrotaan ideaalikaasun tilanyhtälön vakiolla 21,41l/mol.

$$\left(21,6707mol * \frac{21,41l}{mol} \right) * \left(\frac{273,15K + 129,375K}{273,15K} \right) = 715,6607l$$

Savukaasun todellinen massa saadaan lisäämällä stoikiometrisen savukaasun massaan syötetty palamisilman massa ja vähentämällä stoikiometrisessä palamisessa syötettävä ilman massa

$$379,9986g + 548,4900g - 307,1021g = 621,3865g$$

8.3 Epäsuora menetelmä savukaasun ja palamattomien kaasujen häviön laskemiseen

8.3.1 Palamattomat kaasut

$$q_{CO} = (1 - q_p) * \left(\frac{x_{CO} * H_{CO} * m_{sk}}{m_p * H_u} \right)$$

q_{CO}	= hiilimonoksidin aiheuttama häviö
q_p	= polttoainemäärän osuus joka ei muodostaa savukaasuja
x_{CO}	= hiilimonoksidi pitoisuus kuivissa savukaasuissa (kg CO/m ³ sk)
H_{CO}	= Hiilimonoksidin lämpöarvo (10 MJ/kg CO)
m_{sk} / m_p	= kuiva savukaasuvirta (m ³ sk/kg pa)

H_u = polttoaineen alempi tehollinen lämpöarvo

(Huhtinen ym 1997, 96)

Polttoainemääräksi joka ei muodosta savukaasuja arvoksi määritettiin yksi prosentti polttoaineen osuudesta. Polttoaine sisältää vain hieman kuorta ja pedistä poistettava tuhkan on hyvin hienoajakoista.

Hiilimonoksidin pitoisuus savukaasuista saadaan mittaustulosten hiilimonoksidin ppm-määrän ja kuivien savukaasujen määrän mukaan. Hiilimonoksidin ppm-yksikkö muokataan laskennan vaatimaan arvoon yksikön muunnoksella.

$$\frac{C_{mg}}{m^3} = C_{ppm} * \frac{M}{22,41}$$

C_{mg/m^3} = pitoisuus yksikössä mg/m^3

C_{ppm} = pitoisuus yksikössä ppm

M = yhdisteen moolimassa

Hiilimonoksidin ppm-arvon keskiarvo normaali ajolla oli 4508ppm. Yhdisteen moolimassa 28,01 g/mol. Yksikkömuunnoksen tulokseksi saadaan 5634,21 mg/m^3 . Kiloina 0,005634 kg/m^3 . Hiilimonoksidin lämpöarvona käytetään 10,7 MJ/kg (höyrykattilatekniikka s105). Kuivaksi savukaasuvirraksi määritettiin aiemmin esitetyn savukaasulaskennan mukaan 0,5286 kuutiometriä kuivaa savukaasua sekunnissa. Polttoainevirta 0,0774 kg/s ja polttoaineen alempi lämpöarvo 12,66 MJ/kg. Näillä arvoilla hiilimonoksidin aiheuttamaksi häviöksi saadaan laskettua 3,35%.

Lasketaan standardin SFS 5624 mukainen kosteuskerroin kaavalla. Kosteuskertoimeksi saadaan 1,0609

$$k = \frac{H_{u(kuiva)}}{H_{u(kuiva)} - u * l}$$

k = kosteuskerroin

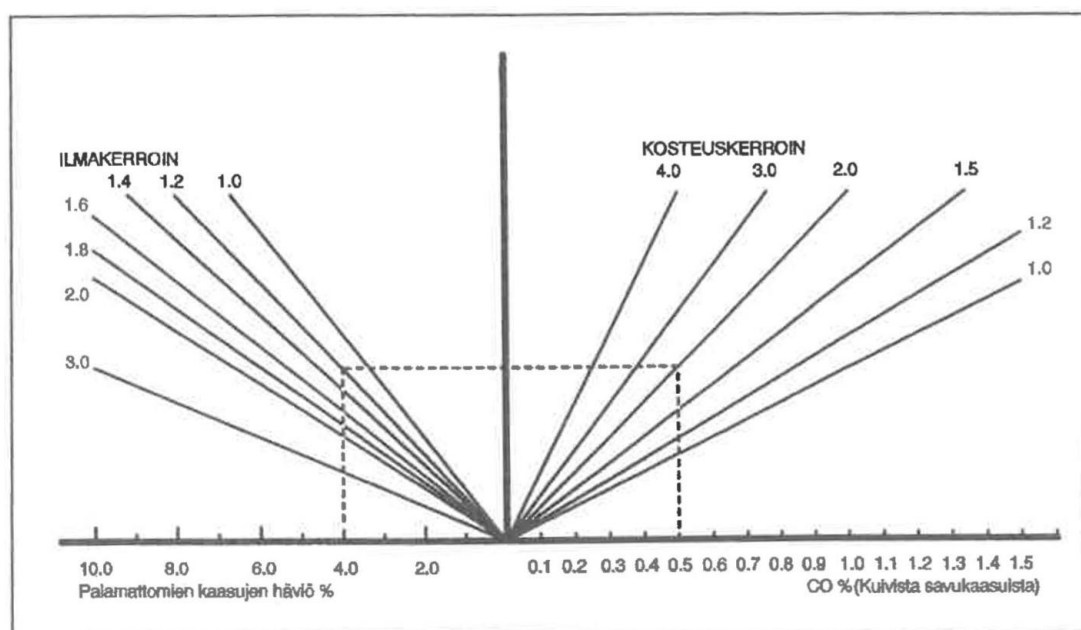
$H_{u(\text{kuiva})}$ = kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo 19,2MJ/kg

u = veden ja kuivan polttoaineen suhde 0,4514

l = veden höyrystymislämpö 25C, 2,443MJ/kg

(Huhtinen ym 1997, 97)

Tulkitaan alla esitetystä nomogrammista palamattomien kaasujen häviö. Hiilimonoksidin osuus kuivista savukaasuista oli 4508 ppm joka vastaa 0,45 prosenttia. Kosteuskerroin 1,0609 sekä ilmakerroin oli 1,786. Häviö asettuu lähelle kolmea prosenttia.



Kuva 32. Palamattomien kaasujen nomogrammi (Huhtinen ym 1997, 97)

8.3.2 Savukaasu

$$Q_{sk} = (1 - q_p) * \left(\frac{m_{sk} * c_p * \Delta T}{m_{pa} * H_u} \right)$$

- q_{sk} = savukaasun aiheuttama termien häviö
 q_p = polttoainemäärä joka muodostaa savukaasuja (kg/s)
 m_{sk} = savukaasun massavirta (kg/s)
 c_p = savukaasun ominaislämpö (MJ/kgK)
 ΔT = Savukaasun loppulämmön ja vertailuarvon (25°C) erotus
 m_{pa} = Polttoainemäärä kattilaan (kg/s)
 H_u = polttoaineen alempi tehollinen lämpöarvo (MJ/kgK)

(Huhtinen ym 1997, 96)

Polttoainemäärä joka jättää muodostamatta savukaasuja tulkittiin aiemmin olevan yhden prosentin, käytetään samaa arvoa. Savukaasun massavirta on kostean savukaasun massavirta, tässä tapauksessa 0,6214 kg/s. Savukaasun ominaislämpö laskettiin interpoloimalla taulukon arvot vastaamaan mitattua savukaasun lämpötilaa. Pienimmät pitoisuudet jätettiin pois laskennasta. Tulokseksi saatiin 1,110KJ/kgK.

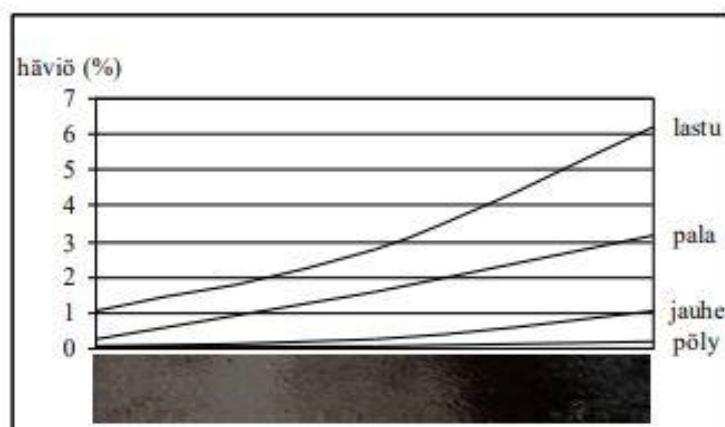
	%	osuus	100°C	200°C	129,375°C		
H ² O	10,800	0,108	1,867	1,888	1,873	0,202	
O ²	9,220	0,092	0,925	0,934	0,928	0,086	
CO ²	7,960	0,080	0,871	0,917	0,885	0,070	
N ²	72,020	0,720	1,043	1,047	1,044	0,752	
					yht.	1,110	kJ/kgK

(Huhtinen ym 1997, 89)

Taulukko 7. Savukaasun ominaislämpö interpoloimalla

Mitattu savukaasun lämpötilan keskiarvo oli mittaushetkellä 129,4°C vertailuarvona käytetään 25°C. Polttoainemäärä pesään 0,0774 kg/s ja polttoaineen alempi lämpöarvo 12,66 MJ/kg. Näillä arvoilla saadaan savukaasuhäviöksi 7,57%.

Lisäksi kattilan hyötysuhdetta laskettaessa pitää ottaa huomioon tuhkan aiheuttama terminen häviö. Tämä arvioitiin silmämääräisesti toistuvasta pohjatuhkan seurannasta. Tuhka oli hyvin hienoa ja pölymäistä. Häviön suuruuden arviointiin käytettiin alla olevaa taulukkoa. Kattilan säteilyhäviötä ei oteta huomioon laskennassa.



Kuva 33 Tuhkan aiheuttama häviö. (Lundgren 2014, 6)

Epäsuoran menetelmän kautta määritetty kokonaishyötysuhde saadaan vähentämällä häviöt tuodusta energiasta, tässä tapauksessa luvusta yksi josta vähennetään häviöiden prosentuaaliset lukuarvot.

$$\eta = 1 - q_{CO} - q_{sk} - q_{tuhka}$$

Laskennassa ei otettu huomioon kattilan säteilyhäviötä ja tuhkan aiheuttama terminen häviö arvioitiin tuhkan laadusta olevan yhden prosentin hyötysuhteesta. Huomioitavaa on, että laskenta ei kerro tarkkaa palamattomien kaasujen häviötä ja eri yhdisteitä esiintyi savukaasumittauksissa havaittavia määriä. Lisäksi kattilan tuhkatilan ilmavuo- to aiheuttaa virhettä laskennan kannalta.

$$\eta = 1 - 0,0335 - 0,0757 - 0,01 = 88,09\%$$

Tulos poikkeaa selvästi suoran menetelmän tuloksesta, mutta edellä mainitut kohteet heikentävät laskennan tarkkuutta. Kattilan kaukolämpötehon mittausta aiheuttaa myös oman muuttujansa. On merkittävämpää kiinnittää huomiota epäsuoran menetelmän kautta laskettujen jäännöshapen ajomallien eroon.

8.4 Jäännöshapen kasvattaminen hyötysuhteen kasvattamiseksi

Laskennassa käytetään samoja savukaasun määriä mitä savukaasun määrän laskennassa, mutta korjattuna muuttuneella mitatulla jäännöshapella 12,67%. Jäännöshapesta laskettu ilmakerroin on tällöin 2,53. Arvioidaan hyötysuhteen kasvattamista verraten nykyistä ja korkeamman jäännöshapen ajomallia hyötysuhteen kannalta. Verrataan laskettuja arvoja epäsuoran menetelmän kautta normaalissa ajotilassa saatuihin arvoihin.

8.4.1 Palamattomat kaasut:

$$q_{CO} = (1 - q_p) * \left(\frac{x_{CO} * H_{CO} * m_{sk}}{m_p * H_u} \right)$$

Hiilimonoksidin aiheuttaman häviön lausekkeen arvot muuttuvat hiilimonoksidin pitoisuuden ja kuivan savukaasuvirran osalta. Hiilimonoksidin mitatun pitoisuuden keskiarvo 403ppm. Lasketaan hiilimonoksidin pitoisuus kuivissa savukaasuissa yhtälön vaatimaan arvoon samalla lausekkeella kuin aiemmin esitettyssä palamattomien kaasujen laskennassa. Tulokseksi saadaan 503,56mg/m³, kiloina 0,000504kg/m³. Ilmakerroimen muuttuessa 2,53 savukaasun määrä kasvaa. Kuivan savukaasun laskettu määrän uuden ilmakerroimen kautta on 0,699m³. Palamattomien kaasujen häviöksi saadaan 0,396%.

8.4.2 Savukaasu

$$Q_{sk} = (1 - q_p) * \left(\frac{m_{sk} * c_p * \Delta T}{m_{pa} * H_u} \right)$$

Savukaasun massavirran määrä muuttuu ilmaylimäärän kasvaessa. Laskettu savukaasun massavirta 0,621 kg/s. Savukaasun häviön tulokseksi saadaan 7,566%.

8.4.3 Ajomallien vertailu

Kokonaishyötysuhde korkeammalla jäännöshapen ajomallilla saadaan, kun vähennetään palamattomien kaasujen, savukaasun ja tuhkan aiheuttamat häviöt. Tuhkan häviö pidetään samana, yhdessä prosentissa.

$$\eta = 1 - 0,00396 - 0,07566 - 0,01 = 91,04\%$$

Verrattuna ajomallien laskettuja hyötysuhteita keskenään, korkeammalla jäännöshapen asetuksella saadaan parempi hyötysuhde laskennan kannalta. Alemman jäännöshapen laskennallinen hyötysuhde on 88,09% kun taas korkeamman jäännöshapen asetuksella laskennalliseksi hyötysuhteeksi saatiin 91,04%. Erotukseksi saadaan 2,95% korkeampi hyötysuhde korkealla jäännöshapella ajettaessa.

9 LOPPUPÄÄTELMÄT

Kattilan hyötysuhteen arviointi osoittautui haastavaksi, sillä työssä jouduttiin paljon arvioimaan ja määrittämään laskentaan tarvittavia mittauksia. Suoran ja epäsuoran hyötysuhteen suuri laskettu ero tosin aiheutuu osittain arvioiduista arvoista, mutta myös tuotetun kaukolämpötehon mittaus olisi ehdottomasti syytä tarkistaa tulevaisuu-

nessa. Merkittävämpää on epäsuoran laskennan kautta keskittyä jäännöshapen ajomallien laskettuun hyötysuhteeseen. Suoran menetelmän hyötysuhde korreloi hyvin liukuvan hyötysuhteen kanssa, mutta on huomioitavaa, että hyödyksi saatu teho lasketaan molemmissa kaukolämpötehon mittauksen kautta.

Jäännöshapen asetusta on järkevä kasvattaa, sillä heikko palamisprosessi laskee hyötysuhdetta enemmän, sekä aiheuttaa muita tarpeettomia kuluja nuohouksessa sekä-että kattilan lämmönsiirtopintojen kulumisessa. Ideaalitulanteessa savukaasukanavaan tarvitaan hiilimonoksidin määrämittaus, jonka avulla jäännöshapen voisi asettaa kohdilleen. Koska kyseessä on miehittämätön laitos olisi järkevää toteuttaa hiilimonoksidin mittauksesta myötä kytkentä jäännöshapen ohjaukseen. Mikäli hiilimonoksidipäästö alkaisi kasvaa, lisääisivät sekundääripuhaltimet ohjaustaan. Savukaasumittauksen perusteella tavoiteltava hiilimonoksidin päästö asettuisi 400ppm kohdalle. Tällöin saavutetaan korkeampi hyötysuhde sekä päästöttömämpi palaminen.

Hiilimonoksidipäästö indikoi hyvin syntyviä päästöjä kuten mittauksissa mitattuja metaania, sekä muita ei toivottuja kaasukomponentteja. Hiilimonoksidin mittaus savukaasusta mahdollistaisi myös ajon optimoinnin helpommin, varsinkin mikäli polttoaineen laatu muuttuu. Tällä hetkellä on mahdotonta saada kattila optimaaliseen palotilanteeseen ilman käsin tehtävää savukaasumittauksia. Käsin ajo ilman luotettavaa mitausta hiilimonoksiditasosta johtaa samankaltaiseen tilanteeseen, kun mittaushetkellä 17.12.2019. Mikään ei indikoi suuresta häikäpäästöistä, mutta sopivaa jäännöshapen arvoa on vaikea asettaa koska ei tiedetä milloin ilmaa virtaa turhan paljon kattilaan, alentaen hyötysuhdetta.

Mikäli hiilimonoksidin mittauksia ei päätetä investoida, on silti kannattavaa kasvattaa nykyistä jäännöshapen asetusta, sillä polttoaineen partikkelikoko ja kosteus ovat pysyneet historiatietojen mukaan samana. Mikäli polttoaine muuttuu rajusti uusi jäännöshapen asetusta tulisi määrittää uudelleen savukaasumittauksen avulla.

Huomioitavaa jäännöshapen asetuksen kasvatuksessa on sekundääripuhaltimien tuoton nousu. Tämä rajoittaa kattilalla ajettavaa maksimikuormaa. Kolmas sekundääripuhallin joka on asetettu syöttöruuvien päälle, osallistuu hyvin palamisprosessiin ja tämän myötä nostaa kattilalla ajettavaa maksimikuormaa, kun ajetaan korkealla jäännöshapella. Alkuperäisten sekundääripuhaltimien rajoittava ominaisuus havaittiin 17.12.2019 tehdyn savukaasumittauksen ohessa, kun kolmas sekundääripuhallin pu-

dotettiin pois ajosta. Tällöin alkuperäisten puhaltimien ohjaus nousi lähelle maksimiohjausta. Kolmatta sekundääripuhaltimen asennusta ja suuntausta voidaan pitää savukaasumittauksen aikana saadusta datasta hyvin onnistuneena.

Tertiääripuhaltimien kokeilu kuumakanavassa niiden suunnittelussa pisteessä olisi toivottavaa, mikäli ne olisivat vielä toiminnassa tai mahdollista asentaa uudelleen. Kattilan käyttöönotossa tertiääripuhaltimet on poistettu niissä todetun ongelmaisuuden vuoksi. Tämä prosessiin vaikuttavuus tulisi todeta savukaasumittauksen kautta. Aikaisempaan tarkkaa mittausdataa tertiääripuhaltimien toiminnasta ei ollut saatavilla.

Petilämpö kattilassa on hyvällä tasolla ja se mahdollistaa tarpeeksi kuumien olosuhteiden syntymisen, jossa syttyvät kaasut voivat palaa. Kattilaan syötettävä polttoaine on melko tasaista historiaseurannan mukaan. Parhaimmat käyntiarvot savukaasumittauksista tulkiten, on saatu pelletin ja hakkeen yhteisseoksella. Mikäli pelletin markkinahinta sallii, olisi hyvä suorittaa koeajoa pelletin ja puun seoksella.

Kaasujen viipymäaikaa olisi mahdollista kasvattaa muokkaamalla kaasun virtausta kuumakanavaan. Asentamalla lisää muurauksen holvia ennen kuumakanavaan pääsyä vaikeuttaisi kaasun suoraa virtausta kuumakanavaan ja se joutuisi kauemmin viipymään tulipesässä.

Tuhkatilan ja kattilan välinen ilmavuoto tulisi saada tukittua, vaikkakin se on osoittautunut hankalaksi. Railosta virtaava ryöstöilma aiheuttaa hallitsematonta ilmavirtaa ei toivotulle alueelle tulipesään. Savukaasupuhaltimen imun määrä vahvistaa ryöstöilman määrää.

Polttoaineen syöttö kattilaan on hallittua ja polttoaine jakaantuu tasaisesti arinalle. Suuria läpipuhalluksia arinasta ei ole havaittavissa. Arinan liike on tasainen.

LÄHTEET

Pori Energian www-sivut 2019. Viitattu 24.10.2019. <https://www.porienergia.fi/Tieto/Yritys/Historiaa/#.Xme3sagzaUl>

Pori Energia Oy Reposaaren 1,5MW hakekattilan päästömittaukset 07.02.2008. Pori Energia M-files dokumenttivarasto. Viitattu 27.11.2019.

Huhtinen, J., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 1997.

Höyrykattilatekniikka. 2. tarkistettu painos. Helsinki: Edita

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen J. 2016.

Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT

Puttonen M. 2020. Elinkeinonharjoittaja, ABC-Automation. Pori. Henkilökohtainen tiedonanto 14.1.2020

Nissilä T. 2019. Automaatioteknikko, Pori Energia. Pori. Henkilökohtainen tiedonanto 25.9.2019

DIN 1942. Acceptance testing of steam generators. 1994.

Lundgren J. 2014. Kiinteän polttoaineiden kattiloiden päästömittauksia. Huittinen Metalli ja LVI Lundgren Oy. Viitattu 27.1.2020. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusituva_energia/bioenergia/tehokkaasti_puulla/biokattiloiden_paastomittauksia_ja_opinnaytetyon_aiheita

M. Mäkelä, L. Soininen, S. Tuomola, J. Öistämö. 2016. Tekniikan kaavasto. 16. painos. Tampere: Tammertekniikka / AMK -kustannus Oy.

Niemi, T. 2019. Polttotekniikan palamislaskut. Luento Satakunnan ammattikorkeakoulun energia- ja ympäristötekniikan polttotekniikan kurssilla. 27.2.2019.

Kuvat:

Kuva 1 Reposaaaren lämpölaitos 2007. Pori Energia M-Files dokumenttivarasto

Kuva 2 Polttoineen syötön periaate kuva 2007. Pori Energia M-Files dokumenttivarasto

Kuva 3 Kattilan läpileikkaus 2007. Pori Energia M-Files dokumenttivarasto

Kuva 4 Reposaaaren hakekattilan yleisnäyttö 25.9 kello 10:29. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 5 Savukaasut 7.2.2008. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 6 Vertailu tunnettuihin arvoihin 7.2.2008. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 7 Vertailu tunnettuihin arvoihin 7.2.2008. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 8 Hiilimonoksidin ja hapen suhde 7.2.2008. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 9 Savukaasut 25.3.2008. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 10 Kiintoaine 25.3.2008. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 11 Vertailu tunnettuihin arvoihin 25.3.2008. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 12 Savukaasut 15.01.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 13 Kiintoaine 15.01.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 14 Vertailu tunnettuihin arvoihin 15.01.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 15 Jäännöshapen ja hiilimonoksidin suhde, jäännöshapen asetusta muutettaessa 15.01.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 16 Savukaasut 1 05.02.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 17 Savukaasut 2 05.02.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 18 Osateholla mittaus 05.02.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 19 Vertailu tunnettuihin arvoihin. 8mm suutin 05.02.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 20 Vertailu tunnettuihin arvoihin, 6,4mm suutin 05.02.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 21 Vertailu tunnettuihin arvoihin, osateholla mittaus 05.02.2009. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 22 FTIR-mittalaitteisto koottuna. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 23 Mittaussondi asetettuna paikalleen ennen multisyklonia. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 24 Lähtötilanne mittausten alkaessa kello 10:28. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 25 Hiilidioksidipäästön tilavuusprosentit kuivista savukaasuista. Yksikkönä tilavuusprosentti kuivasta savukaasuvirrasta. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 26 Hiilimonoksidipäästön tilavuusprosentit kuivista savukaasuista, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 27 Etaani- ja etyleenipäästöjen tilavuusprosentit kuivista savukaasuista, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 28 Metaanipäästön tilavuusprosentit, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 29 Typen oksidien päästön tilavuusprosentit, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 30 Orgaanisen kokonaishiilen päästön tilavuusprosentit, yksikössä ppm kuivasta savukaasuvirrasta. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 31 Jäännöshapen tilavuusprosentit. Yksikkönä tilavuusprosentti kuivasta kuivasta savukaasuvirrasta. Kuva: Toni Kasvinen

Kuva 32 Palamattomien kaasujen nomogrammi. Huhtinen, J., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 1997. Höyrykattilatekniikka. sivu 97. Viitattu 5.3.2020

Kuva 33 Tuhkan aiheuttama häviö. Motiva www-sivut. 2020. Viitattu 5.3.2020

https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tehokkaasti_puulla/biokattiloiden_paastomittauksia_ja_opinnaytetyon_aiheita

Taulukot:

Taulukko 1. Pesään syötetyn polttoaineen määrä. Taulukko: Toni Kasvinen

Taulukko 2. Pori Energia Once-toimitusketjun hallintajärjestelmän taulukko Reposaa-ren hakekattilalle tuodusta polttoaineesta. Pori Energia M-files dokumenttivarasto

Taulukko 3. Kattilan tuottaman tehon ja syöttöruuvin ohjauksen keskiarvo. Taulukko Toni Kasvinen

Taulukko 4. Liukuva hyötysuhde. Pori Energia M-files dokumenttivarasto

Taulukko 5. Kuivan polttoaineen koostumus. Taulukko: Toni Kasvinen

Taulukko 6. Polttoaineen reaktiotuotteet. Taulukko: Toni Kasvinen

Taulukko 7. Savukaasun ominaislämpö interpoloimalla. Taulukko: Toni Kasvinen