

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikan suuntautumisvaihtoehto
Jesse Valkila

Opinnäytetyö

Lisäaineiden syöttö savukaasukanavaan Uuden syöttötavan tutkiminen

Työn ohjaaja Anne Ojala
Työn tilaaja Metso Power, valvojana Hannu Similä
Tampere 6/2011

Tekijä Jesse Valkila
Työn nimi Lisäaineiden syöttö savukaasukanavaan – Uuden syöttötavan tutkiminen
Sivumäärä 58 + 10
Valmistumisaika 6/2011
Työn ohjaaja Anne Ojala
Työn tilaaja Metso Power, valvojana Hannu Similä

Tiivistelmä

Voimantuotannon polttoprosesseissa syntyy aina savukaasuja, jotka sisältävät ympäristölle haitallisia aineita. Polttoaineiden, polttoprosessin ja puhdistustekniikoiden kehittymisen myötä savukaasujen haitta-ainepitoisuuksia on saatu merkittävästi vähentymään. Ilmanpäästöjen raja-arvojen tiukentuessa on kuitenkin kehitettävä jatkuvasti parempia ratkaisuja, joilla ilmanpäästöt saataisiin mahdollisimman alhaisiksi.

Tämä opinnäytetyö on tehty Metso Power Oy:n Environmental Systems osastolle. Työn tarkoituksena oli kehittää uutta lisäaineiden syöttötapaa savukaasukanavaan ennen letkusuodattimia. Lisäaineiden avulla kaasumaiset epäpuhtaudet saadaan erotettua savukaasuista letkusuodattimilla. Savukaasujen puhdistuksessa savukaasut jaetaan tyypillisesti usealle eri letkusuodattimelle ja lisäaineet tulisi syöttää savukaasukanavaan siten, että jokaiselle letkusuodattimelle päätyisi yhtä paljon lisäaineita.

Työn alussa on käsitelty mm. savukaasujen koostumusta, erilaisia savukaasujen puhdistusmenetelmiä sekä savukaasujen sekaan syötettävien lisäaineiden merkitystä. Lisäksi on esitelty nykyinen ja uusi lisäaineen syöttötapa, jolla lisäaineet pyritään jakamaan mahdollisimman tasaisesti eri letkusuodattimille.

Työn loppuosiossa käsitellään uuden lisäainesyöttötavan testaamiseksi rakennetun kylmämallin toimintaa, kylmämallilla suoritettuja testauksia, testauksissa käytettyjä mittalaitteita sekä mittauksista saatuja tuloksia.

Writer: Jesse Valkila
Thesis: Developing a new method for feeding additives in flue gas duct
Pages: 58 + 10
Graduation time: 6/2011
Thesis Supervisor: Anne Ojala
Co-operating Company: Metso Power, supervisor Hannu Similä

Abstract

In power generation combustion processes is always generated flue gases which contain substances that are harmful for the environment. By development of fuels, combustion process and purification techniques of flue gases, the concentration of harmful substances in flue gases has been lowered substantially. Still limiting values for air pollutants are becoming stricter all the time and new solutions for reducing the emergence of air pollutants are needed.

This final thesis is done for Environmental Systems department of Metso Power Oy. The aim of this thesis was to develop a new method for feeding additives in flue gas duct before bag filters. The use of additives makes it possible to use bag filters to remove gaseous impurities from combustion gases. In purification of flue gases the gases are typically distributed for several separate bag filters. The additives should be fed in a way that as much additive ends up in every bag filter.

This thesis begins with overviews of composition of flue gases, different purification methods of flue gases and the function of different additives. In addition there is also presented the current and the new method for evenly distributing additives in bag filters.

The rest of the thesis concentrates on the operation of the pilot model of the new method, the test that were conducted with it and the results of the tests. Also measuring devices that were used in test are introduced.

Keywords flue gas, bag filter, additives, lime, activated carbon

Esipuhe

Opinnäytetyön tekeminen on ollut pitkä ja haastava projekti. Työ on ollut kuitenkin erittäin mielenkiintoinen ja opettanut monia uusia asioita mm. savukaasujen puhdistuksesta, koejärjestelyiden suunnittelusta ja toteuttamisesta sekä selkeän raportin luomisesta.

Työtä on ollut myös mukava tehdä, sillä työilmapiiri on ollut erittäin hyvää ja apua on saanut aina sitä tarvittaessa. Haluankin kiittää vielä kaikkia niitä, jotka ovat olleet tukena työn eri vaiheissa. Erityisesti haluan kiittää työn valvojana toiminutta Hannu Similää, erittäin kannustavasta asenteesta ja erinomaisesta opastuksesta kaikissa työn eri vaiheissa sekä avusta selkeän opinnäytetyön kirjoittamiseen. Lisäksi kiitokset kuuluvat myös opinnäytetyön ohjaajalleni Anne Ojalalle.

Tampereella kesäkuussa 2011

Jesse Valkila

Sisällysluettelo

1	Johdanto	7
2	Yritysesittely, Metso Power Oy	8
3	Savukaasut	9
4	Savukaasujen puhdistaminen	10
4.1	Sähkösuodatin	10
4.2	Savukaasupesuri	11
4.3	Letkusuodatin	11
4.3.1	Lisäaineet	12
4.4	Ilmapäästöjen valvonta ja rajoitukset	14
5	Lisäaineiden syöttö	15
5.1	Nykyinen syöttötapa	16
5.2	Uusi syöttötapa	17
5.2.1	Edut	19
5.2.2	Lahti Energia Oy	19
6	Kylmämalli	20
6.1	Lisäaineen syöttö sekoituskappaleelle	21
6.1.1	Lisäaineen syöttö	22
6.1.2	Lisäaineen syötön tarkastelu	23
6.1.3	Lisäaineen kuljetus syöttimeltä sekoituskappaleelle	23
6.2	Lisäaineen sekoittuminen ja jakautuminen neljään sektoriin	25
6.3	Mittaukset kanavista	26
6.4	Lisäaineen erottaminen sähkösuodattimella	27
7	Sekoituskappaleet	28
7.1	Sekoituskappale 1:	28
7.2	Sekoituskappale 2	29
7.3	Sekoituskappale 3	29
7.4	Sekoituskappale 4	30
7.5	Sekoituskappale 5	30
8	Virtausmallinnus	31
8.1	Sekoituskappale 1	31

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikan suuntautumisvaihtoehto

8.2	Sekoituskappale 2.....	32
8.3	Sekoituskappale 3.....	32
8.4	Muut sekoituskappalevariaatiot.....	33
9	Mittalaitteet.....	35
9.1	Dust Monitor.....	35
9.2	SICK Gravimat.....	37
9.2.1	Isokineettinen näytteenotto.....	38
9.2.2	Pölynkeräin.....	39
10	Mittaukset.....	41
10.1	Alkutoimenpiteet.....	41
10.2	Dust Monitorin kalibrointi.....	42
10.3	Sekoituskappaleiden koeajot.....	46
10.3.1	Sekoituskappaleiden koeajon kuvaus.....	46
10.4	Mittaustulosten tallentaminen.....	47
10.4.1	Mittauspöytäkirja.....	48
11	Mittaustulokset.....	49
12	Mittaustulosten analysointi.....	50
12.1	Signaalien muuttaminen pölypitoisuuksiksi.....	51
12.2	Mittaustuloksiin vaikuttavia asioita.....	52
12.3	SICK Gravimat – mittaukset, tulokset ja analysointi.....	54
13	Jatkotoimenpiteet.....	56
14	Lähteet.....	57
15	Liitteet.....	59

1 Johdanto

Voimakattiloiden palamisprosessissa syntyvän savukaasun puhdistamiseen on erilaisia menetelmiä. Tiukentuvien päästömääräysten myötä erityisesti letkusuodinten käyttö on yleistynyt voimakkaasti osana puhdistusprosessia.

Savukaasujen puhdistuksessa savukaasut jaetaan tyypillisesti usealle eri letkusuodattimelle. Ennen letkusuodattimia savukaasujen sekaan syötetään tavallisesti lisäaineita kuten esimerkiksi kalkkia, bikarbonaattia ja aktiivihiiltä. Savukaasujen kaasumaiset epäpuhtaudet reagoivat lisäaineiden kanssa muodostaen kiinteitä yhdisteitä tai adsorboitumalla lisäaineiden pinnalle, jolloin epäpuhtaudet saadaan puhdistettua letkusuodattimissa.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ja kehittää uutta lisäaineen syöttötapaa Metso Power Oy:n Messukylän koelaitokselle rakennetun kylmämallin avulla. Kylmämallikokeissa lisäaineet syötettiin erilaisten sekoituskappaleiden avulla jaetun savukaasukanavan keskelle. Tarkoituksena oli löytää sellainen sekoituskappale, jolla lisäaineet saadaan jakautumaan mahdollisimman tasaisesti kaikkiin savukaasukanavan osiin.

2 Yritysesittely, Metso Power Oy

Metso on kansainvälinen teknologiakonserni, jonka erikoisosaamista ovat teknologia- ja palveluratkaisut kaivos-, maarakennus-, voimantuotanto-, öljy-, kaasu-, kierrätys- sekä massa- ja paperiteollisuudelle. Metso työllistää noin 28 500 työntekijää yli 50 maassa. Metson liikevaihto vuonna 2010 oli 5,5 miljardia euroa. (*www.metso.fi*)

Metso Power Oy vastaa Metso-konsernin kattilaliiketoiminnasta toimittaen kattilalaitoksia sellu- ja paperiteollisuudelle sekä voimantuottajille. Metso on yksi maailman johtavista ympäristöystävällisten poltto- ja talteenottoratkaisujen toimittajista, jonka tuotteita ovat sooda- ja voimakattilat, haihduttamot, ympäristöjärjestelmät sekä Service-palvelut. Metso Power työllistää noin 1800 henkeä, joista puolet työskentelee Suomessa. Yrityksen muut toimipaikat sijaitsevat Ruotsissa, Yhdysvalloissa ja Brasiliassa. Metso Powerin päämarkkina-alueet ovat Eurooppa, Skandinavia, Etelä- ja Pohjois-Amerikka sekä Kaakkois-Aasia. (*www.metso.fi*)

Metso Powerin Environmental Systems – osasto suunnittelee laitteita savukaasujen puhdistukseen ja lämmön talteenottoon sekä selluteollisuuden hajukaasujen talteenottoon ja kemikaalitaseen hallintaan. Lisäksi osaston osaamiseen kuuluvat voima- ja sellukattiloiden polttimet sekä laivojen savukaasupesurit. (*www.metso.fi*)

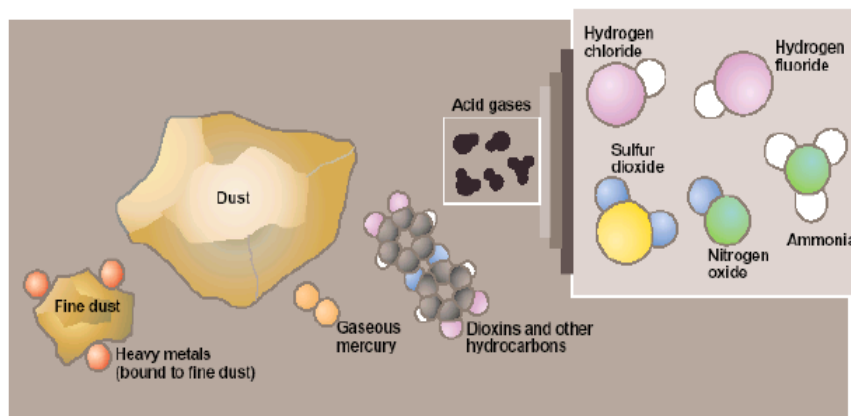
3 Savukaasut

Savukaasut ovat polttoprosesseissa syntyviä kaasuja. Puhtaan palamisen kaasumaisia tuotteita ovat pääasiassa hiilidioksidi ja vesihöyry. Palamisprosessissa syntyy yleensä kuitenkin myös terveydelle ja ympäristölle haitallisia yhdisteitä, kuten rikkidioksidia (SO_2), typen oksideita (NO_x) sekä aromaattisia hiilivetyjä. (*Jussila, diaesitys*)

Savukaasujen koostumukseen ja erityisesti haitallisuuteen vaikuttaa se mitä polttoainetta käytetään; hiiltä, öljyä, maakaasua, biopolttoainetta, yhteiskuntajätettä tai jotakin muuta polttoainetta. Yleisimpiä haitallisia yhdisteitä savukaasuissa ovat:

- Kiintoainehiukkaset
- Rikkidioksidi, SO_2
- Typen oksidit, NO_x
- Suolahappo, HCl
- Vetyfluoridi, HF
- Raskasmetallit
- Dioksiinit ja furaanit
- Orgaaninen kokonaishiili, TOC

(*Jussila, diaesitys*)



Kuvio 1: Savukaasun epäpuhtauksia (*Jussila, diaesitys*)

Savukaasujen päästöihin voidaan vaikuttaa ehkäisemällä epäpuhtauksien syntymistä, poistamalla niitä suoraan palamisprosessissa sekä puhdistamalla savukaasuista.

Teollisuudessa ja energiatuotannossa savukaasut on puhdistettava lähes poikkeuksetta, ennen ympäristöön päästämistä.

4 Savukaasujen puhdistaminen

Savukaasut tulee puhdistaa ennen ympäristöön päästämistä, sillä savukaasut sisältävät terveydelle ja ympäristölle haitallisia aineita.

Esimerkiksi rikkidioksidi ja typenoksidit muodostavat ilmakehässä happamia sateita, happamoittavat maaperää, aiheuttavat rehevöitymistä, sekä saattavat aiheuttaa ihmisille astmaa ja muita keuhkosairauksia. Vastaavasti savukaasujen kiintoainehiukkaset huonontavat ilmanlaatua ja voivat aiheuttaa ihmisille keuhkosairauksia. Hiukkasiin voi olla myös kiinnittyneenä raskasmetalleja, jotka ovat haitallisia ihmisen terveydelle.

Raskasmetallit voivat kerääntyä ihmisten kehoon ja nostaa veren raskasmetallipitoisuutta.

(Uusitalo 2009, 20-24)

Savukaasujen puhdistamiseen on olemassa useita erilaisia laitteita, kuten esimerkiksi sähkösuodatin, savukaasupesuri ja letkusuodatin. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia lisääaineiden syöttöä savukaasuihin ennen letkusuodattimia. Tämän vuoksi letkusuodattimen toimintaperiaate, on käsitelty tarkemmin kuin muut savukaasujen puhdistusmenetelmät.

4.1 Sähkösuodatin

Sähkösuodattimissa pölyhiukkaset varataan sähkökentässä, minkä jälkeen hiukkaset erottuvat keräyselektrodeille, joilta pöly ravistetaan tai huuhdotaan vedellä pois.

Sähkösuodattimella saavutetaan suuri erotuskyky, sillä voidaan käsitellä korkeitakin pölypitoisuuksia ja sen avulla saadaan myös pienet hiukkaset (0,1 μm) kerättyä talteen.

Sähkösuodattimella voidaan puhdistaa myös märkiä pisaroita, räjähtäviä kaasuja tai hehkuvia hiukkasia sisältäviä kaasuja. *(Raunemaa 2005, 19-22)*

4.2 Savukaasupesuri

Savukaasupesureissa savukaasu pestään runsasta nestemäärää käyttäen siten, että aineensiirto tapahtuu kaasufaasista nestefaasiin. Syöttämällä pesuriin veden lisäksi sopivia kemikaaleja saadaan hiukkasten lisäksi myös happamia kaasukomponentteja absorboitua savukaasuista. (*Jalovaara, Aho, Hietamäki ja Hyytiä 2003, 62 – 63*)

Savukaasupesuri ei ole yhtä tehokas hiukkasten erotin kuin esimerkiksi sähkösuodatin tai letkusuodatin. Pesurin avulla saadaan erotettua tehokkaasti isot ja takertuvat hiukkaset, mutta pieniä alle 1 µm:n hiukkasia ei juurikaan saada erotettua. Pesuri ei myöskään sovellu suurten pölypitoisuuksien erottamiseen.

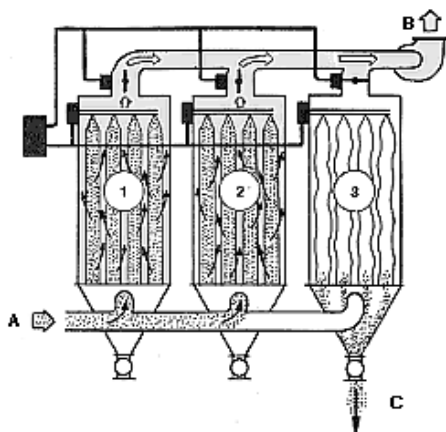
4.3 Letkusuodatin

Letkusuodattimissa kiintoaineiden erottaminen tapahtuu suodatinkankaan avulla, joka on yleisesti valmistettu luonnonkuidusta, tai synteettisistä, lasi-, mineraali- tai metallikuiduista. Savukaasut johdetaan letkujen ulkopinnalle. Puhdistettavan kaasun kulkiessa puhtaan suodatinkankaan läpi hiukkaset takertuvat kuituihin.

Suodatustapahtuman edetessä kankaan pinnalle ja kuitujen väliin muodostuu pölykerros, mikä parantaa suodattimen erotusastetta, mutta lisää samalla suodattimen aiheuttamaa painehäviötä. (*Hämälä, Laine ja Vesa 1992, 87 – 90*)

Suodattimet puhdistetaan aika ajoin kohdistamalla paineilmapulssi suodatinletkun sisälle. Paineisku aikaansaa suodatinletkua alaspäin etenevän shokkiaallon, jolloin pöly irtoaa letkun pinnalta ja putoaa letkujen alapuolella olevaan pölysäiliöön. (*Kulmala, Heinonen, Riipinen, Säämänen ja Welling 2004*)

Polttolaitoksissa savukaasujen puhdistus tapahtuu tyypillisesti useassa letkusuodatinmodulissa, jolloin voimalaitoksen käytön aikana yksittäisiä moduleita voidaan ottaa pois käytöstä huollon ajaksi ajamatta koko prosessia alas. Savukaasut pyritään jakamaan kaikkiin letkusuodatinmoduleihin tasaisesti. Periaatekuva savukaasujen puhdistamisesta letkusuotimien avulla on esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2: Savukaasujen puhdistaminen letkusuodattimilla

1, 2 ja 3. Letkusuodatinmodulit

A. Puhdistettava kaasu sisään

B. Puhdistettu kaasu ulos

C. Pölynpoisto

(Alkuperäinen kuva: Pihkala 1998, 63. Kuvaa muokannut: Jesse Valkila)

4.3.1 Lisäaineet

Savukaasujen sekaan voidaan syöttää lisäaineita kaasumaisten epäpuhtauksien sitomiseksi.

Lisäaineina savukaasujen puhdistuksessa käytetään laitoksesta riippuen yleensä

kalsiumhydroksidia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), bikarbonaattia (H_2CO_3) tai aktiivihiiltä. (Jussila, diaesitys)

Kalsiumhydroksidi

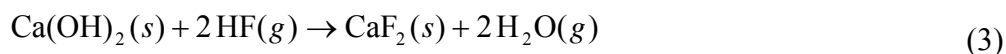
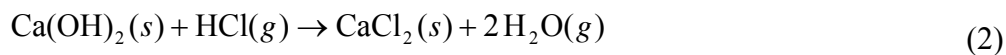
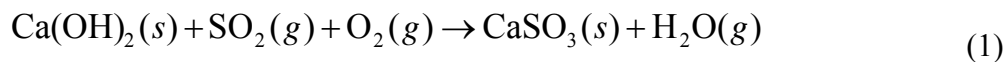
Kalsiumhydroksidi reagoi savukaasuissa olevan rikkidioksidin (SO_2) kanssa muodostaen

kalsiumsulfiittia (CaSO_3). Vastaavasti suolahapon (HCl) kanssa kalsiumhydroksidi

muodostaa kalsiumkloridia (CaCl) ja vetyfluoridin (HF) kanssa fluoriittia (CaF_2). Kaikissa

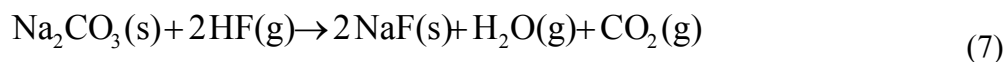
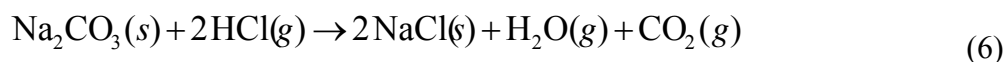
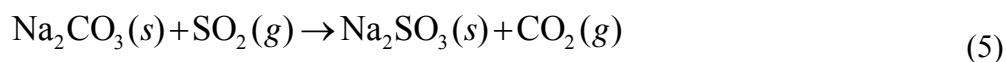
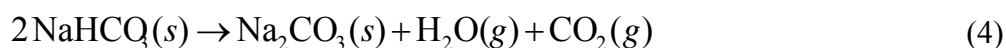
reaktioissa muodostuu sivutuotteena vettä. Reaktiot on esitetty yhtälöissä 1, 2 ja 3.

(Jussila, diaesitys)



Bikarbonaatti

Natriumbikarbonaatti (NaHCO_3) hajoaa kuumentuessaan natriumkarbonaatiksi (Na_2CO_3), joka reagoi savukaasuissa olevan rikkidioksidin kanssa muodostaen natriumsulfiittia (Na_2SO_3). Vastaavasti suolahapon kanssa natriumkarbonaatti muodostaa natriumkloridia (NaCl) ja vetyfluoridin kanssa natriumfluoridia (NaF). Reaktioissa syntyy sivutuotteina vettä ja hiilidioksidia. Reaktiot on esitetty yhtälöissä 4, 5, 6 ja 7. (*Jussila, diaesitys*)



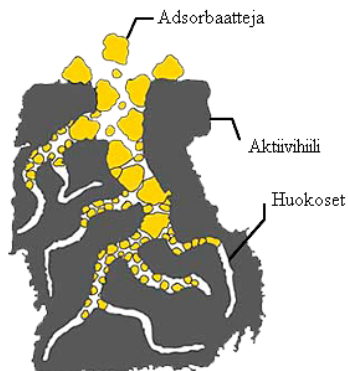
Molemmat lisäaineet sekä kalsiumhydroksidi että natriumbikarbonaatti reagoivat samojen kaasumaisten epäpuhtauksien kanssa. Tämän vuoksi lisäaineena käytetään tavallisesti vain toista näistä lisäaineista. Kalsiumhydroksidi toimii lisäaineena paremmin kylmemmissä ($<150\text{ }^\circ\text{C}$) ja kosteammassa savukaasuissa, kun taas bikarbonaatti toimii parhaiten kuumemmissa savukaasuissa ($>150\text{ }^\circ\text{C}$). (*Jussila, diaesitys*)

Aktiivihiili

Aktiivihiilen käyttö lisäaineena perustuu sen kykyyn adsorboida itseensä savukaasuista mm. raskasmetalleja, dioksiineja ja furaaneja. Adsorptiolla tarkoitetaan aineensiirtoprosessia, jossa kaasui- tai nestekomponentit erotetaan toisistaan saattamalla ne kosketuksiin jonkin kiinteän aineen pinnan kanssa. (*Pihkala 1998, 108 - 110*)

Adsorptio perustuu kiinteiden aineiden (adsorbenttien) kykyyn ottaa pinnalleen (adsorboida) kaasuja ja nesteitä (adsorbaatteja) fysikaalisten koheesivoimien vaikutuksesta tai kemiallisten reaktioiden, kemisorption seurauksena. Adsorbenttien suuri

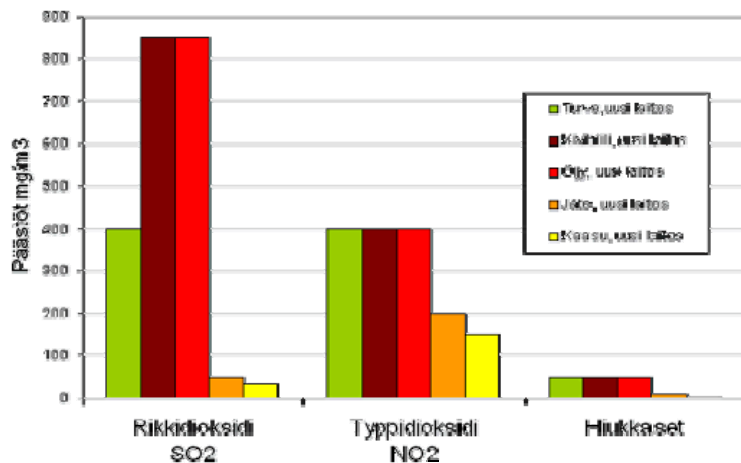
adsorptio kyky perustuu niiden mikrohuokosten rakenteen aiheuttamaan suureen ominaispinta-alaan (pinta-ala/kg ainetta). (Pihkala 1998, 108 - 110)



Kuvio 3: Adsorptio aktiivihiihen huokosiin (<http://www.mehtachemicals.com/>)

4.4 Ilmapäästöjen valvonta ja rajoitukset

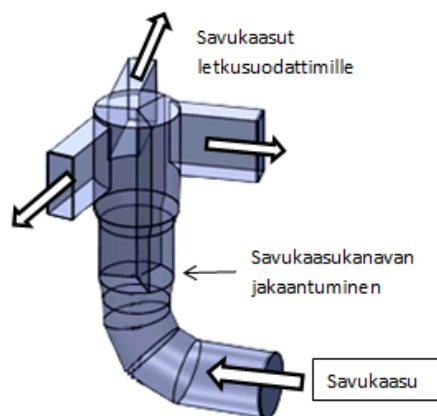
Savukaasujen puhdistusta valvotaan mittaamalla jatkuvatoimisilla mittareilla, ilmaan pääsevien päästöjen pitoisuuksia. Polttolaitosten ilmaan pääseville päästöille on ympäristölainsäädännössä määritelty raja-arvot, joita laitokset eivät saa ylittää. Raja-arvoissa ilmoitetaan suurin sallittu määrä, joka voidaan päästää ilmaan tietyn ajan kuluessa. Raja-arvot määritellään massan osuutena savukaasujen tilavuudesta, mg/m^3 . Kuviossa 4 on esitetty erityyppisten voimalaitosten ilmapäästöjen raja-arvotasoja vuonna 2006. (www.jly.fi)



Kuvio 4: Ilmapäästöjen raja-arvotasoja erityyppisissä voimalaitoksissa, 2006 (www.jly.fi)

5 Lisäaineiden syöttö

Polttolaitoksissa savukaasujen puhdistus tapahtuu tyypillisesti useassa letkusuodatinmodulissa. Savukaasut jaetaan letkusuodattimille jakamalla savukaasukanava useaan yhtä suureen osaan (kuvio 5).



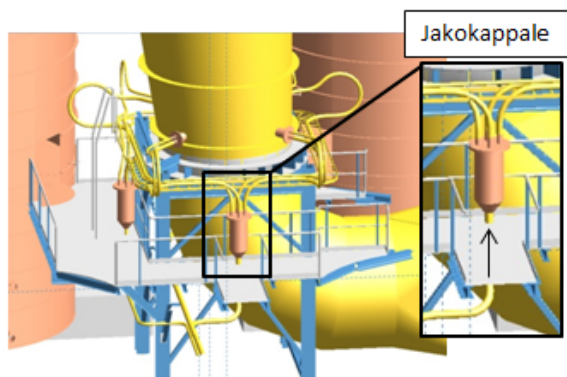
Kuvio 5: Savukaasun jakautumien letkusuodatinmoduleille

Savukaasujen puhdistuksessa käytettävät lisäaineet pyritään syöttämään siten, että jokaiseen savukaasukanavan osaan päätyisi yhtä paljon lisäaineita.

5.1 Nykyinen syöttötapa

Nykyisellä lisäaineen syöttöjärjestelmällä lisäaineet syötetään jaetun savukaasukanavan jokaiseen osaan erikseen.

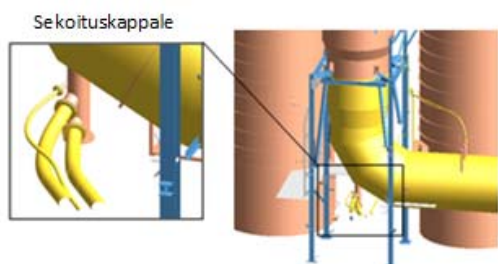
Lisäaineet syötetään ensiksi savukaasukanavan ulkopuolella olevaan jakokappaleeseen. Jokaiselle lisäaineelle on oma jakokappaleensa. Jakokappaleissa lisäaineet jaetaan yhtä moneen osaan kuin savukaasukanava on jaettu. Jakokappaleelta lisäaineet ohjataan jokaiseen savukaasukanavan osaan erillisillä syöttöletkuilla. Tämä syöttötapa on esitetty kuviossa 6.



Kuvio 6: Nykyinen lisäaineen syöttöjärjestelmä.

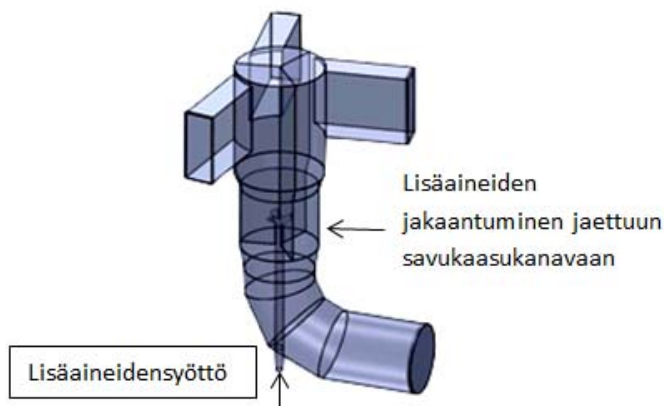
5.2 Uusi syöttötapa

Uudella syöttötavalla lisäaineiden jako tehdään savukaasukanavan sisällä. Lisäaineet syötetään pystysuoraan putkeen, sekoituskappaleen kautta (kuvio 9).

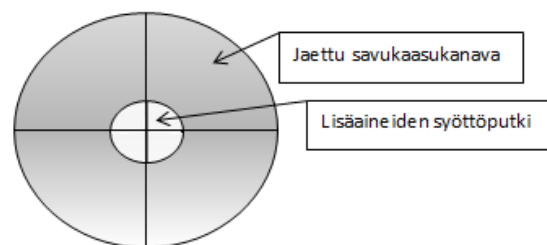


Kuvio 9: Lisäaineiden syöttö sekoituskappaleelle

Sekoituskappaleelta lisäaineet ohjataan pystysuoralla putkella keskelle savukaasukanavan jaettua osaa, jolloin lisäaineet jakautuvat putken päästä jokaiseen savukaasukanavan osaan. Sekoituskappaleella lisäaineet on tarkoitus saada levittäytymään tasaisesti ylöspäin menevään putkeen, jotta lisäaineet jakautuisivat putken päässä mahdollisimman tasaisesti kaikkiin savukaasukanavan osiin.



Kuvio 10: Uusi lisäaineen syöttöjärjestelmä

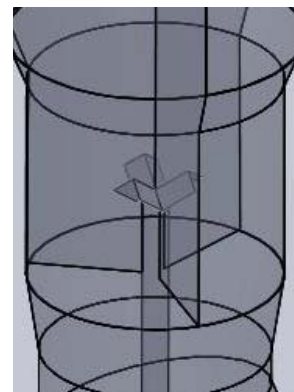


Kuvio 11: Lisäaineiden jakautuminen

Rikkihapon syntymisen ehkäisy

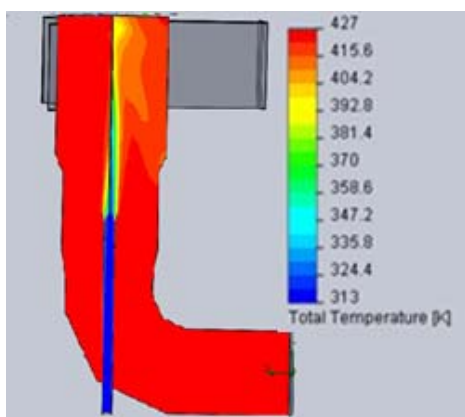
Savukaasun lämpötila on noin 140 – 160 °C ja lisäaineiden kantoilman lämpötila noin 30 – 50 °C. Kun lisäaineet syötetään savukaasukanavan keskelle, voi savukaasukanavan lämpötila laskea joissain kohdissa sen verran, että savukaasussa olevat rikkidioksidit ja rikkitrioksidit alkavat muodostamaan tiivistyneen veden kanssa rikkihappoa. Rikkihappoa alkaa tyypillisesti muodostua noin 120 – 130 °C lämpötilassa. Mikäli rikkihappoa pääsee syntymään aiheuttaa se korroosiota kanaviston seinämiin.

Rikkihapon syntymisen ehkäisemiseksi lisäaineiden kylmä ilmavirta hajotetaan syöttöputken päästä keskeemmälle savukaasukanavaan. Ilmavirran hajottaminen tehdään kuvion 12 mukaisilla kulmaraudoilla.

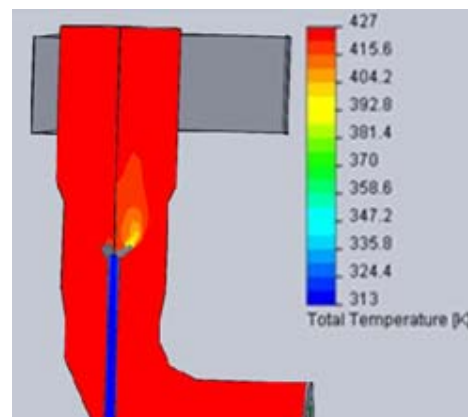


Kuvio 12: Kulmaraudat

Tehtyjen lämpötilaprofiilimallinnusten mukaan tällä hajoitustavalla lämpötilat saadaan paremmin tasoittumaan keskenään ja kylmiä kohtia, joissa rikkihappoa voisi muodostua. Kuvat lämpötilaprofiileista, ilman kulmarautoja ja kulmarautojen kanssa on esitetty kuvioissa 13 ja 14.



Kuvio 13: Lämpötilaprofiili ilman kulmarautoja



Kuvio 14: Lämpötilaprofiili kulmarautojen kanssa

5.2.1 Edut

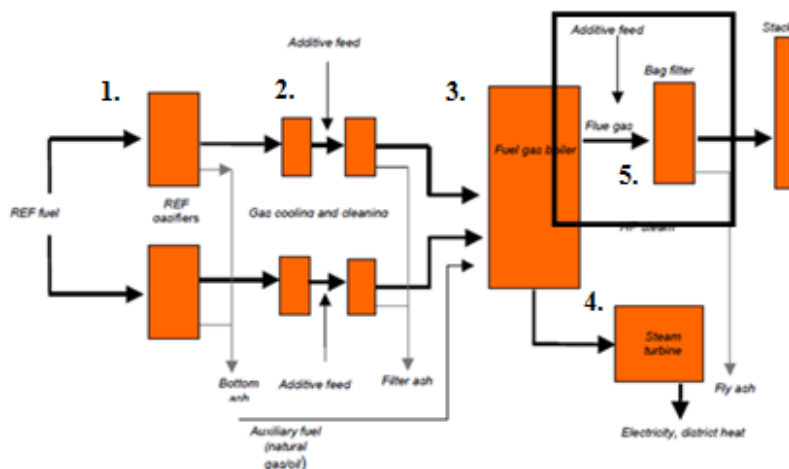
Uudella syöttötavalla lisäaineiden syöttöletkuja tarvitaan huomattavasti vähemmän, eikä syöttökohtaan tarvitse rakentaa erillisiä kulkutasoja. Tällöin materiaali ja asennuskustannuksia saadaan karsittua huomattavasti. Lisäksi lisäaineiden tukkeutumisongelmien uskotaan vähenevän lyhyempien syöttöletkujen avulla.

5.2.2 Lahti Energia Oy

Lahteen on valmistumassa maailman ensimmäinen kaasutusteknologialla toimiva energiajätevoimalaitos. Valmistuttuaan voimalaitos käyttää polttoaineenaan energiajätteestä valmistettua kierrätyspolttoainetta 250 000 tonnia vuodessa. Prosessissa ei tarvita muita polttoaineita. Laitoksen teho on 160 MW ja se tuottaa sähköä 50 MW ja kaukolämpöä 90 MW. (Lahti Energia, *www-sivu*)

Energiavoimalaitoksen toiminta

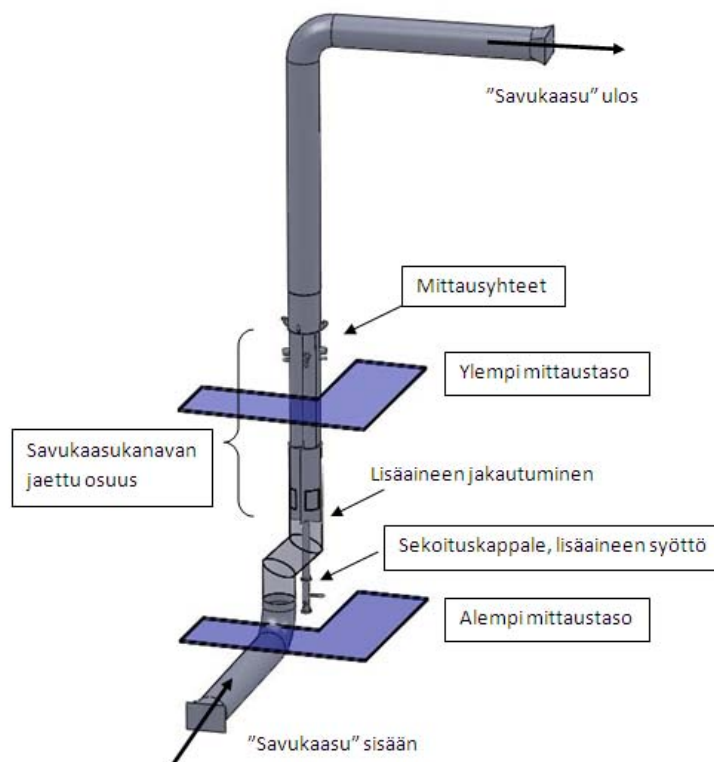
Energiavoimalaitoksen toiminta on kuvattu kuvion 15 prosessikaaviossa: Kaasuttimessa jäte muutetaan poltettavaksi kaasuksi (1.). Kaasuttimesta muodostunut kaasu jäähdytetään ja puhdistetaan (2.). Puhdistuksen jälkeen kaasu poltetaan tehokkaassa kaasukattilassa (3.), jotta siitä saadaan höyryä höyryturbiinia varten (4.). Kaasun poltossa syntyneet savukaasut puhdistetaan letkusuodattimien avulla (5.). Lisäaineen syöttö savukaasukanavaan ennen letkusuodattimia toteutetaan uuden lisäaineiden syöttötavan mukaisesti. (Metso Oyj:n *lehdistötiedote*)



Kuvio 15: Lahteen valmistuvan energiajätevoimalaitoksen prosessikaavio (Nieminen 2006)

6 Kylmämalli

Uutta lisäaineen syöttötapaa testattiin Metso Powerin koelaitokselle rakennetulla kylmämallilla (kuvio 16). Kylmämallilla tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä, että savukaasukanavassa virtasi savukaasujen sijasta ainoastaan ilmaa. Kylmämalli oli myös mittasuhteiltaan hieman pienempi, kuin todellisuudessa. Savukaasukanavan halkaisija oli noin 0,4 m. Voimalaitoksissa savukaasukanavan halkaisija on noin 2 – 4 m.



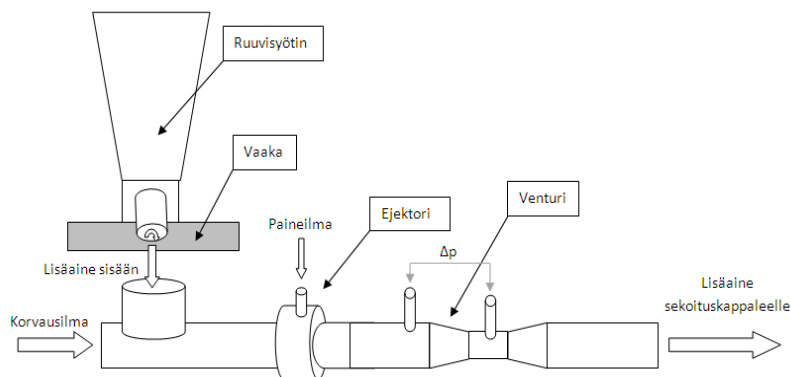
Kuvio 16: Kylmämalli

Kylmämallissa lisäaineet syötettiin savukaasukanavaan, joka oli jaettu neljään yhtä suureen osaan. Kylmämallilla oli tarkoitus testata kokeellisesti sitä, kuinka hyvin lisäaineet jakautuvat savukaasukanavan neljään osaan, käyttäen erilaisia sekoituskappaleita. Erilaisia sekoituskappaleita kokeissa oli yhteensä viisi. Lisäaineiden jakautumista todennettiin mittaamalla pölypitoisuuksia kustakin savukaasukanavan osasta.

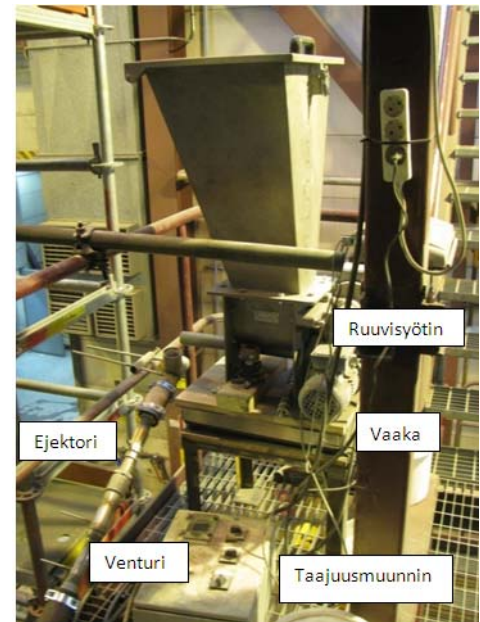
6.1 Lisäaineen syöttö sekoituskappaleelle

Lisäaineena kylmämallilla tehtävissä kokeissa käytettiin kalsiumhydroksidia eli kalkkia. Toisena lisäaineena oli alun perin tarkoitus käyttää aktiivihiiltä. Aktiivihiiltä päätettiin kuitenkin olla käyttämättä työturvallisuuden vuoksi, sillä ilmaan sekoittuneena pölynä aktiivihiili on räjähdysvaarallinen.

Lisäaineen jakautumisen tutkimisen kannalta oli tärkeää, että kalkki saatiin syötettyä sujuvasti sekoituskappaleelle ja sieltä savukaasukanavaan. Kalkin syöttö ja siirto sekoituskappaleelle tapahtui kuvioiden 17 ja 19 mukaisella laitteistolla.



Kuvio 17: Piirros lisäaineen syötöstä sekoituskappaleelle



Kuvio 19: Valokuva lisäaineen syötöstä sekoituskappaleelle

6.1.1 Lisäaineen syöttö

Kalkin syötössä käytettiin WAM - MBF ruuvisyötintä. Syöttimen rungon yläosassa on vaakasuorassa pyörivä hämmennin ja sen alla rungon pohjalla pyörivä syöttöruuvi.

Hämmennin pitää materiaalin siilossa koko ajan liikkeessä ja ehkäisee materiaalin holvaantumista. Holvaantumisella tarkoitetaan sitä, että siilossa oleva materiaali tiivistyy siten, että se ei pääse valumaan alas syöttöruuville asti ja syöttö tyrehtyy.

Hämmennin oli kalkin syötössä erittäin oleellinen osa, sillä ilman hämmennintä kalkki holvaantui hetkessä siiloon ja syöttö tyrehtyi. Hämmennin toimi normaalisti, kalkin syötössä ei ollut ongelmia.



Kuvio 20: WAM – ruuvisyötin



Kuvio 21: Hämmennin siilon sisällä

Aktiivihiilen syötölle oli varattu myös samankaltainen ruuvisyötin. Syöttimessä ei tosin ollut hämmennintä vaan ainoastaan syöttöruuvi. Syötintä ei kuitenkaan tarvittu, koska työturvallisuuden vuoksi aktiivihiiltä ei käytetty kylmämallikokeissa.

Ruuvisyöttimen syöttönopeutta pystyttiin säätämään muuttamalla syöttöruuvien pyörimisnopeutta taajuusmuuntimen avulla. Syöttimen syöttökapasiteetti riippui hyvin paljon siitä, minkälaisia syöttöruuvia käytettiin. Ruuvilla, jota käytettiin kylmämallikokeissa, syöttökapasiteetti oli 0 – 50 kg/h.

6.1.2 Lisäaineen syötön tarkastelu

Kalkin syötön nopeutta ja syötön tasaisuutta tarkkailtiin KERN - ITB mallisella tasovaa'alla. Ruuvisyötin oli asetettu tasovaa'an päälle, jolloin vaaka punnitsi jatkuvatoimisesti syöttimen ja sen sisältämän kalkin massaa. Vaaka oli liitetty tietokoneeseen, jolle tallentui vaa'an lukemat kahden sekunnin välein. Tallennetuista vaa'an lukemista saatiin muodostettua kalkin kulumiselle kuvaaja ajan funktiona sekä pystyttiin laskemaan kalkin syöttönopeuksia eri mittausväleillä. Mittaustuloksista pystyttiin myös varmistamaan, että kalkin syöttö on ollut tasaista halutulla aikavälillä.

Syötön tasaisuus oli erittäin tärkeä tekijä mittauksia ajatellen. Pölypitoisuuksien määrittäminen tehtiin yhdestä kanavasta kerrallaan, joten olosuhteiden tuli pysyä mahdollisimman samana niin kauan, kunnes kaikista kanavista oltiin saatu mittaukset tehtyä.



Kuvio 22: Kern tasovaaka

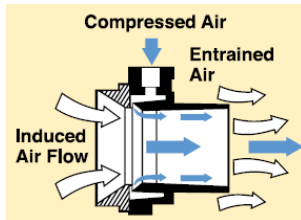
6.1.3 Lisäaineen kuljetus syöttimeltä sekoituskappaleelle

Ruuvisyöttimeltä kalkki tippui putkeen, josta se siirrettiin ejektorin avulla sekoituskappaleelle ja sieltä kanavistoon. Mittaamalla paine-ero venturista pystyttiin laskemaan putkessa kulkevan ilmavirtauksen nopeus ja virtausnopeutta pystyttiin säätämään ejektorin avulla.

6.1.3.1 Ejektorin toimintaperiaate:

Ejektoriin syötetään paineilmaa rengasmaiseen kammioon, jossa ilma kuristetaan ja ohjataan suurella nopeudella ejektorin reunoilta eteenpäin. Tällöin ejektorin keskelle syntyy alipaineinen alue, joka pyrkii normalisoitumaan imien ejektorin perältä korvausilmaa.

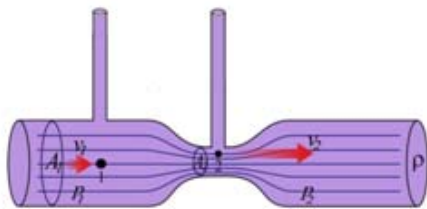
Korvausilma liittyy syötetyn paineilman virtaukseen ja virtaus vahvistuu. Virtauksen suuruutta pystyy säätämään, muuttamalla ejektorin kuristusta.



Kuvio 23: Ejektorin toimintaperiaatekuva

6.1.3.2 Venturi:

Lisäaineen kantoilman nopeus mitattiin kuvion 24 mukaisen venturin avulla.



Kuvio 24: Venturi

Venturissa ilma kulkee kavennetun putken läpi, jolloin virtausnopeus kasvaa ja fluidin aiheuttama paine pienenee. Kun venturista mitataan paine-ero mittauspisteiden 1 (ennen kavennusta) ja 2 (kavennuksen kohdalta) väliltä, voidaan tilavuusvirtaus Q (m^3/s) laskea kaavan 8 mukaan.

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}} = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\frac{A_2^2}{A_1^2} - 1 \right)}} \quad (8)$$

jossa:

Q = Tilavuusvirtaus, m^3/s

A = Poikkileikkaus pinta-ala, m^2

$\Delta p = (p_1 - p_2)$ = paine-ero, Pa

ρ = Ilman tiheys, kg/m^3

Paine-ero venturista mitattiin DP Measurementin valmistaman mikromanometrin avulla (kuvio 25).

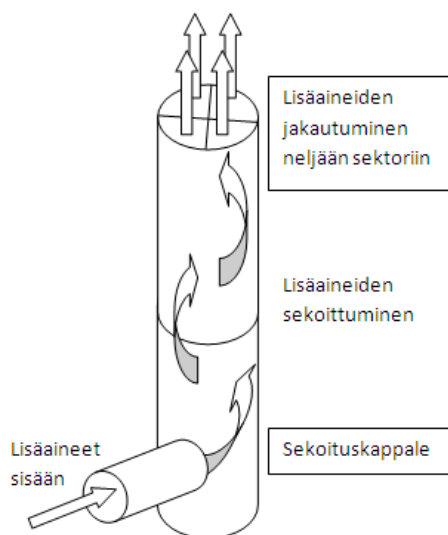


Kuvio 25: DPM – mikromanometri

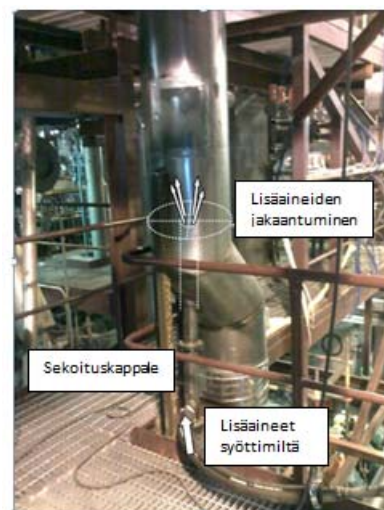
6.2 Lisäaineen sekoittuminen ja jakautuminen neljään sektoriin

Syöttimiltä lisäaineet tulevat kantoilman mukana sekoituskappaleelle. Sekoituskappaleessa lisäaineet on tarkoitus saada sekoittumaan mahdollisimman tasaiseksi virtaukseksi ylöspäin savukaasukanavaan menevään sekoitusputkeen.

Savukaasukanavaan tuleva sekoitusputkenpää on asennettu keskelle savukaasukanavan jaettua osaa, jolloin lisäaineet jakautuvat myös savukaasukanavan eri osiin. Tavoitteena on saada lisäaineet kulkemaan niin tasaisesti sekoitusputkessa, että jokaiseen savukaasukanavan osaan päätyisi yhtä paljon lisäaineita.



Kuvio 26: Piirros lisäaineen sekoittumisesta



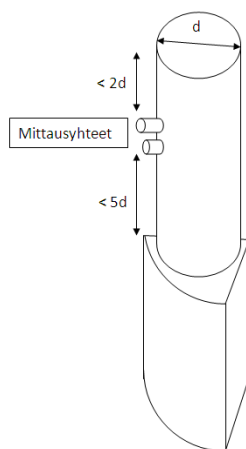
Kuvio 27: Valokuva lisäaineen sekoittumisesta ja jakaantumisesta

6.3 Mittaukset kanavista

Lisäaineiden jakaantumisen todentamiseksi, tehtiin pölypitoisuusmittauksia kustakin jaetun savukaasukanavan osasta. Pölypitoisuuksien määrittämiseksi käytettiin jatkuvatoimista päästömittaria Dust Monitor:ia, sekä näytettä keräävää mittauslaitetta SICK Gravimat:ia. Mittalaitteet on käsitelty erikseen luvussa 9. Mittaukset kanavista pyrittiin tekemään kaikkien mittausstandardien mukaisesti, jotta tuloksista saataisiin mahdollisimman luotettavia.

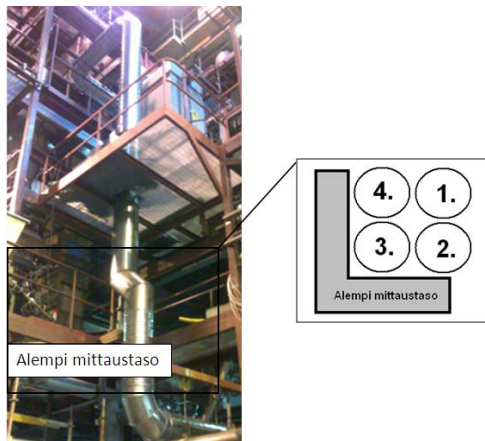
Mittauksia varten kylmämallin jaettujen savukaasukanavien muoto muutettiin pyöreiksi kanaviksi (Kuvion 28 mukaisesti). Kaikkiin kanaviin tehtiin yhteet sekä Dust Monitorille että SICK Gravimatille, joilla suoritettiin pölymittauksia kanavista. Yhteiden päihin asennettiin camlock-liittimet, jolloin yhteet oli helppo avata ja sulkea.

Mittausyhteet kanaviin sijoitettiin standardien mukaisesti. Standardien mukaan häiriötöntä etäisyyttä ennen mittausyhteitä tulee olla vähintään viisi kertaa virtauskanavan hydraulinen halkaisija ja mittausyhteiden jälkeen vähintään kaksi kertaa hydraulinen halkaisija. Häiriöttömällä etäisyydellä tarkoitetaan matkaa, jolla virtaukseen ei synny muutoksia esim. kanaviston mutkien, kavennusten, levennysten tai esteiden takia. Pyöreässä kanavassa hydraulinen halkaisija on sama kuin kanavan halkaisija. (Kuvio 28). (VTT Prosessit 2006, 6)



Kuvio 28: Mittausyhteiden sijoittaminen

Jaetut savukaasukanavat numeroitiin ykkösestä neloseen. Numerointi tehtiin kuvion 29 mukaisesti.



Kuvio 29: Kanavien numerointi

6.4 Lisäaineen erottaminen sähkösuodattimella

Kylmämallissa jonkin matkaa mittausyhteiden jälkeen savukaasukanavan jaettu osuus päättyi ja kanavat yhdistyivät jälleen yhdeksi yhtenäiseksi savukaasukanavaksi. Kanaviston ilmavirta ja ilmavirtaan syötetty kalkki ohjattiin savukaasukanavia pitkin sähkösuodattimelle. Sähkösuodattimella kalkki erottui ilmavirrasta, jonka jälkeen puhdas ilma voitiin ohjata piipun kautta ulos.

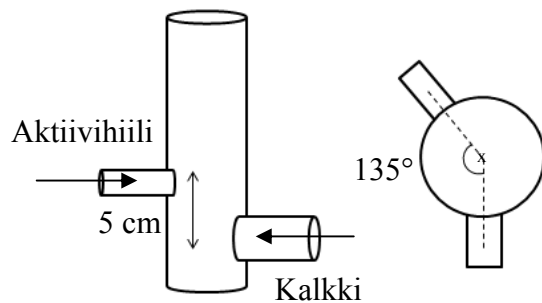
7 Sekoituskappaleet

Kylmämallilla suoritettavissa testeissä oli tarkoitus selvittää minkälaisella sekoituskappaleella lisäaineet jakautuvat parhaiten jaetun savukaasukanavan kaikkiin osiin. Testeissä käytettiin yhteensä viittä erilaista sekoituskappaletta.

Vaikka suoritettavissa testeissä käytettiinkin ainoastaan kalkkia lisäaineena, oli kaikki sekoituskappaleet suunniteltu kahden lisäaineen; aktiivihiilen ja kalkin syöttöön. Testeissä kummankin lisäaineen syöttöletkut kiinnitettiin sekoituskappaleisiin kiinni, mutta aktiivihiilen syöttöletkusta puhallettiin sekoituskappaleelle ainoastaan ilmaa.

7.1 *Sekoituskappale 1:*

Sekoituskappaleessa on kaksi erillistä lisäaineen sisääntuloa. Alemmasta putkesta syötetään kalkkia ja noin 5 cm ylempänä olevasta putkesta aktiivihiiltä. Molemmat syöttöputket on liitetty kohtisuoraan ylöspäin savukaasukanavaan menevään putkeen ja ne on keskitetty putken keskelle.



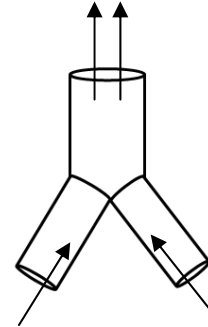
Kuvio 30 : Sekoituskappale 1:n luonnos



Kuvio 31: Sekoituskappale 1

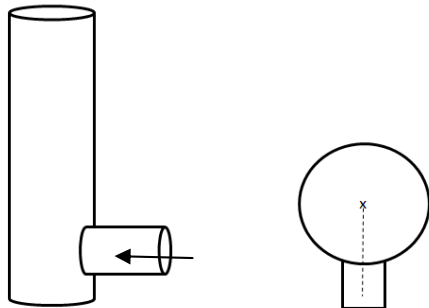
7.2 Sekoituskappale 2

Molemmat lisäaineet syötetään sekoituskappaleeseen samasta kohdasta. Lisäaineet on yhdistetty tätä ennen yhteen Y:n muotoisella kappaleella (kuvio 32).



Kuvio 32: Y-kappale

Syöttö on liitetty kohtisuoraan ylös lähtevään putkeen ja kohdistettu sen keskipisteeseen.



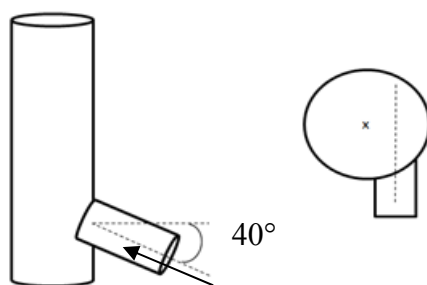
Kuvio 33: Sekoituskappale 2:n luonnos



Kuvio 34: Sekoituskappale 2

7.3 Sekoituskappale 3

Kuten sekoituskappaleessa kaksi, lisäaineet on yhdistetty aikaisemmin Y:n muotoisella kappaleella ja ne syötetään sekoituskappaleeseen samasta kohdasta. Syöttöputki on kallistettu noin 40° ylöspäin, sekä syöttö on kohdistettu hieman epäkeskeisesti ylöspäin menevään putkeen.



Kuvio 35: Sekoituskappale 3:n luonnos



Kuvio 36: Sekoituskappaleesta 3

7.4 Sekoituskappale 4

SolidWorks ohjelman avulla tehdyissä lisäaineiden sekoittumisen virtausmallinuksissa, sekoittuminen vaikutti olevan tehokkaampaa, kun syöttöputki teki noin 90° mutkan ennen liittymistä ylöspäin menevään putkeen. (Tehdyt virtausmallinnukset on käsitelty luvussa 8.)

Tätä yritettiin käytännössä kokeilla muokkaamalla sekoituskappale 2:sta. Sekoituskappale 4 on muuten samanlainen kuin sekoituskappale 2, mutta syöttöputki on väännetty noin 90° mutkalle ennen sen liittymistä ylöspäin menevään putkeen.



Kuvio 37: Sekoituskappale 4

7.5 Sekoituskappale 5

Samaa ideaa kuin edellisessä kappaleessa, testattiin myös muokkaamalla sekoituskappale 3:sta. Sekoituskappale 5 on muuten samanlainen kuin sekoituskappale 3, mutta syöttöputkea on väännetty hieman mutkalle ennen sen liittymistä ylöspäin menevään putkeen.



Kuvio 38: Sekoituskappale 5

8 Virtausmallinnus

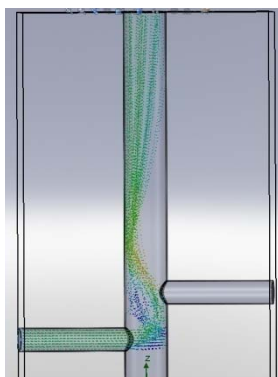
Ennen kuin sekoituskappaleita päästiin kokeilemaan käytännössä kylmämallikokeiden avulla, mallinnettiin kappaleista 3D-kuvat ja tehtiin virtausmallinnuksia lisäaineiden sekoittumisesta kappaleissa SolidWorks-ohjelman avulla.

Virtausmallinnukset tehtiin sekoituskappaleille 1, 2 ja 3, jotka oltiin tilattu ennakkoon kylmämallikokeita varten. Näiden kappaleiden lisäksi SolidWorks:llä tehtiin useita muita sekoituskappalevariaatioita ja testattiin niiden toimivuutta virtausmallinnusten avulla.

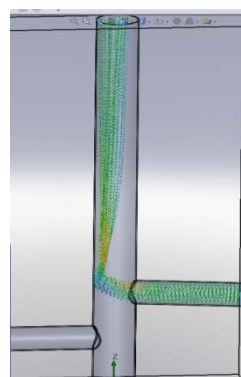
8.1 Sekoituskappale 1

Kappaleessa 1 lisäaineensyötöt törmäävät syöttökohdasta suoraan vastakkaiseen seinämään, jolloin osa liike-energiasta kuluu törmäykseen ja hiukkasten vauhti heikkenee. Kalkin lähtiessä ylöspäin toinen lisäaineensyöttö painaa lisäainevirtaa jälleen seinämälle ja virtausnopeus kasvaa kantoilmojen yhdistyessä.

Sekoituskappaleen alkupäässä lisäaineet kulkevat putken seinämällä, mutta putken yläpäässä tilanne näyttäisi kuitenkin korjaantuvan, lisäaineiden levittäytyessä hieman tasaisemmin joka puolelle putkea. Lisäaineiden virtausmallinnukset kappaleessa 1 on esitetty kuvioissa 39 ja 40.



Kuvio 39: Kalkin virtausmallinnus

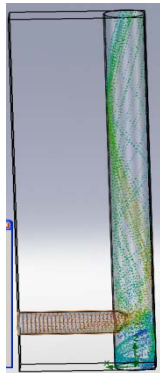


Kuvio 40: Aktiivihiilin virtausmallinnus

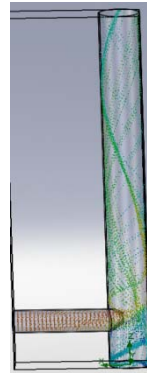
8.2 *Sekoituskappale 2*

Kappaleessa 2 lisäaineet on yhdistetty aikaisemmin yhteen Y:n muotoisella kappaleella (kuvio 32), jolloin nopeus jolla lisäaineet tulevat pystyputkeen on suurempi kuin kappaleessa 1, jossa kummatkin lisäaineet syötettiin erikseen.

Lisäaineet näyttäisivät jakaantuvan melko hyvin joka puolelle sekoitusputkea, mutta virtaus näyttäisi menevän hieman pyörremäisesti putken reunoilla. Lisäaineiden virtausmallinnukset kappaleessa 2 on esitetty kuvioissa 41 ja 42.



Kuvio 41: Kalkin virtausmallinnus

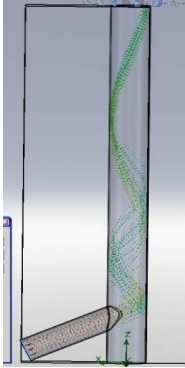


Kuvio 42: Aktiivivihiilen virtausmallinnus

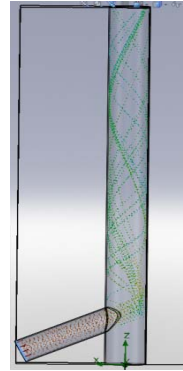
8.3 *Sekoituskappale 3*

Kappaleessa kolme syöttö suunnattiin hieman ylöspäin, sekä kohdistettiin hieman epäkeskeisesti ylöspäin menevään sekoitusputkeen. Tällä tavoin lisäaineen syötössä ei tapahdu niin voimakasta törmäystä sekoitusputken seinämälle kuin kohtisuorassa syötössä. Syöttö tulee kappaleeseen sulavasti ja ehkäisee täten todennäköisesti myös hieman kappaleen kulumista.

Mallinnusten mukaan molemmat lisäaineet näyttäisivät lähtevän jonkinlaiseen pyörimisliikkeeseen, ylöspäin menevässä putkessa. Pyörimisliike näyttäisi kuitenkin olevan sen verran hidasta, että lisäaineet kulkevat narumaisesti samaa reittiä ylöspäin, eivätkä levittäydy tasaisesti joka puolelle putkea. Lisäaineiden virtausmallinnukset kappaleessa 3 on esitetty kuvioissa 43 ja 44.



Kuvio 43: Kalkin virtausmallinnus



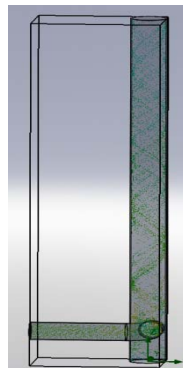
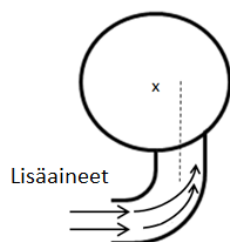
Kuvio 44: Aktiivihiilen virtausmallinnus

8.4 Muut sekoituskappalevariaatiot

Projektiin hankittujen sekoituskappaleiden lisäksi mallinnettiin myös muun mallisia sekoituskappaleita sekä ideoita sekoituskappaleisiin, joilla lisäaineet saataisiin sekoittumaan mahdollisimman hyvin ylöspäin lähtevään sekoitusputkeen.

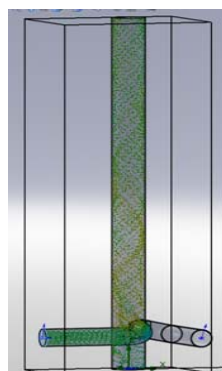
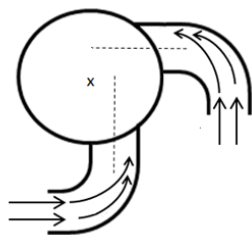
Sekoituskappaleista tehtiin erilaisia variaatioita, joissa mm. syöttöputkien kulmaa ja paikkaa vaihdeltiin, kappaleiden sisään lisättiin virtausta ohjaavia esteitä, sekä kappaleeseen syötettiin lisäaineiden lisäksi pelkkää ilmaa eri kulmista. Kaikista erilaisista variaatioista, yksi tapa näytti virtausmallinnusten mukaan parantavan selkeästi lisäaineiden jakaantumista.

Idea jolla lisäaineet saatiin jakaantumaan parhaiten, oli tehdä noin 90° kulma syöttöputkeen sekä kohdistaa syöttö hieman epäkeskeisesti ylöspäin lähtevään sekoitusputkeen. Tällä tavalla lisäaineet painautuivat mutkassa ulkoseinämälle ja syöttö sekoitusputkeen tapahtui lähes tangentialisesti. Tämän seurauksena lisäaineet lähtivät nopeaan kiertoliikkeeseen ja hajosivat joka puolelle putkea (mallinnus esitetty kuviossa 45).



Kuvio 44: 90° kulma lisäaineiden syöttöön Kuvio 45: Lisäaineiden sekoittuminen

Kun samaa ideaa noudattaen vielä lisäaineet syötettiin kummatkin erikseen, samalta tasolta, 90° kulmassa toisiinsa nähden sekä muutaman asteen ylöspäin kallistettuina, saatiin pyörimisliike voimistumaan entisestään ja lisäaineet jakautumaan putkeen erittäin hyvän näköisesti (mallinnus esitetty kuviossa 47).



Kuvio 46: Kaksi 90° syöttöä

Kuvio 47: Lisäaineiden sekoittuminen

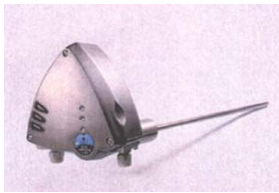
Syöttöputken taivuttamista mutkalle kokeiltiin kylmämalli kokeissa käytännössä, sekoituskappaleilla 4 ja 5. Kappaleet muokattiin sekoituskappaleista 2 ja 3, kun mittaukset kyseisillä kappaleilla oltiin saatu suoritettua.

9 Mittalaitteet

Lisäaineiden jakautumisen todentamiseksi oli suoritettava pölypitoisuuden määrittäksiä jokaisesta kanavasta koeajojen eri vaiheissa. Pääasiassa kaikki mittaukset suoritettiin käyttämällä tribosähköistä pölymittaria, Dust Monitor S304. Mittausjakson loppupuolella tehtiin myös muutama pölypitoisuuden määrittä SICK Gravimat SHC502 mittalaitteella.

9.1 Dust Monitor

Dust Monitor on Sintroll Oy:n valmistama jatkuvatoiminen päästömittari, joka mittaa hiukkasten määrää kaasussa. Sen toiminta perustuu tribosähköiseen ilmiöön, eli varauksen syntymiseen mitattavien hiukkasten ja anturisauvan vuorovaikutuksessa. Dust Monitor soveltuu mittalaitteeksi pölymittauksiin, joissa hiukkasten partikkelikoot ovat vähintään 0,3 µm ja pölypitoisuus mitattavassa kanavassa on 0,1 mg/m³ – 1 kg/m³. (*Dust Monitor - manuaali*)



Kuvio 48: Dust Monitor

Dust Monitorin liittäminen kanavaan

Dust Monitor tulee asettaa kanavaan siten, että laitteen teräksinen anturisauva on kanavan sisällä kohtisuorassa kanavan virtausta vastaan (kuvio 49). Anturisauvan pituudesta vähintään 1/3 tulisi olla kanavan sisällä ja kanavassa olevan anturin pituus tulisi olla 1/3 – 2/3 kanavan halkaisijasta. (*Dust Monitor - manuaali*)



Kuvio 49: Dust Monitor S304

Hiukkasmittauksen periaate

Kun varattu hiukkaspattikkeli osuu tai kulkee kanavaan asetetun anturisauvan läheltä, se luovuttaa osan varauksestaan tai indusoi sauvaan virtaa. Anturisauvaan syntyneen sähköisen signaalin Dust Monitor muuttaa standardisignaaliksi 4 - 20 mA.

Standardisignaali voidaan lähettää Dust Monitorilta eteenpäin mm. dataloggereille, jolloin mittaustulokset saadaan kerättyä talteen. Mittauksista ulos saatava signaali on suoraan verrannollinen putkessa kulkevaan pölymäärään. (*Dust Monitor - manuaali*)

Dust Monitorin kalibrointi

Dust Monitorin mittausalueen määrittämiseksi laite on kalibroitava. Kalibroinnin aikana laite kerää tietoa mittauspisteen hiukkaspitoisuudesta noin puolen tunnin ajan. Kalibroinnin aikana hiukkasten virtausmäärän tulee olla vakio. Kun kalibrointi on päättynyt, laite asettautuu näyttämään kyseiselle hiukkaspitoisuudelle käyttäjän asettamaa ulostulo signaalia 4 – 20 mA väliltä. Ulostulosignaali säädetään prosentuaalisesti (1 – 100%) mittausalueesta. Asetettu ulostulosignaali (I_U) saadaan laskettua kaavan 9 avulla. (*Dust Monitor - manuaali*)

$$I_U = 4mA + x \cdot (20mA - 4mA) \quad (9)$$

jossa:

I_U = ulostulosignaali kalibroinnissa käytetylle hiukkaspitoisuudelle (mA)

x = asetettu prosenttiluku (1 – 100%)

Esimerkiksi jos asetuksiin asetetaan 20%, kalibroinnissa käytetty hiukkaspitoisuus asettautuu näyttämään 7,2 mA. Lasku on esitetty alapuolelle.

$$I_U = 4mA + 20\% \cdot (20mA - 4mA)$$

$$I_U = 7,2mA$$

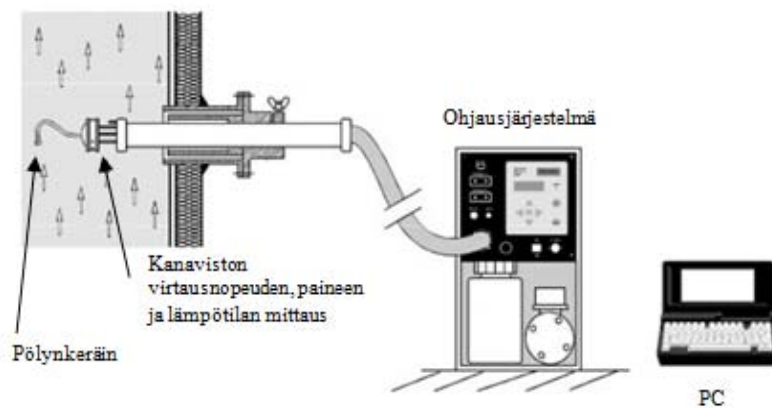
9.2 SICK Gravimat

SICK Gravimat on näytettä keräävä mittauslaite. Mittalaitteella kerätään isokineettisesti pölyvirrasta näyte, sondin päähän asetettavalle keräimelle. Keräimeen jääneen, näytteen massan avulla saadaan määriteltyä kanavassa virtaavan kaasun pölypitoisuus.



Kuvio 50: SICK Gravimat

Mittaukset SICK Gravimatilla suoritetaan kuvion 51 mukaisesti:

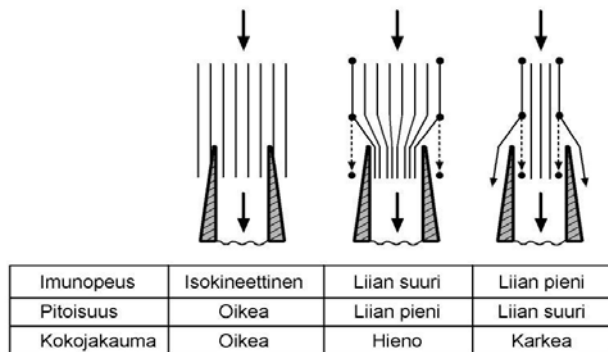


Kuvio 51: SICK Gravimat:lla mittaaminen

Sondin päähän asennetaan mittauksiin sopiva pölynkeräin, johon kaasussa olevia hiukkasia kerätään mittauksen aikana. Sondin päässä ennen pölynkeräintä on paine- ja lämpötilanturit, joilla saadaan mitattua kanavassa virtaavan kaasun virtausnopeus, paine ja lämpötila. SICK Gravimatin ohjausjärjestelmä ohjaa isokineettistä näytteenottoa ja tallentaa saadut mittaustulokset. Ohjausjärjestelmään voidaan kytkeä helposti myös tietokone, jonka avulla voidaan hallita mittauksia, valvoa mittausten etenemistä jne. Sondi asetetaan kanavaan kuvion 51 mukaisesti siten, että keräimen suuaukko on päinvastaiseen suuntaan kuin kanaviston virtaus. (*Sick Gravimat – manuaali*)

9.2.1 Isokineettinen näytteenotto

Isokineettisellä näytteenotolla tarkoitetaan sitä, että kaasun virtanopeus on yhtä suuri suuttimessa kuin suuttimen kohdalla kanavassa. Näytteenoton ollessa isokineettistä, saadaan kanavasta kerättyä edustava näyte. Poikkeaminen isokineettisestä näytteenotosta vaikuttaa hiukkaspitoisuuteen, kuvion 52 mukaisesti. (VTT Prosessit 2006, 19 – 20)



Kuvio 52: Isokineettisen näytteenoton vaikutus hiukkaspitoisuuteen (VTT Prosessit 2006, 20)

Mikäli imunopeus on suurempi kuin kaasun nopeus kanavassa, näytekaasuvirta kerää pienimmät hiukkaset näytteeseen suutinta suuremmalta alalta ja isommat hiukkaset, jotka määräävät hiukkasfaasin massan, kulkee hitausvoimiensa vuoksi suuttimen ohi. Tällöin kanavan pitoisuudeksi saadaan todellista pienempi pitoisuus ja hiukkasten kokojakauma näytteessä on liian hienoa. (VTT Prosessit 2006, 20)

Jos vastaavasti näytteenoton kaasuvirtaus on liian pieni, kulkeutuu pienimmät hiukkaset suuttimen ohi ja näytevirtaan kuulumattomat isommat hiukkaset virtaavat näytesuodattimelle. Tällöin kanavan pitoisuudeksi saadaan liian suuri pitoisuus ja hiukkasten kokojakauma näytteessä on liian karkeaa. (VTT Prosessit 2006, 20)

Samanaikainen ja eriaikainen isokineettinen näytteenotto

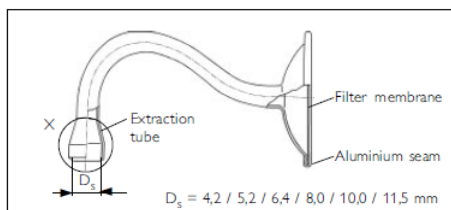
SICK Gravimat:lla isokineettinen näytteenotto voidaan suorittaa käyttäen joko samanaikaista tai eriaikaista isokineettistä näytteenottoa:

Samanaikaisessa isokineettisessä näytteenotossa sekä näytteenotto, että kanavan virtausnopeuden, paineen ja lämpötilan mittaus tapahtuvat yhtäaikaaisesti. Tällöin SICK Gravimatin ohjausjärjestelmä pitää jatkuvasti huolen siitä, että näytteen imunopeus on yhtä suuri kuin kanavasta mitatun kaasun nopeus. (*Sick Gravimat – manuaali*)

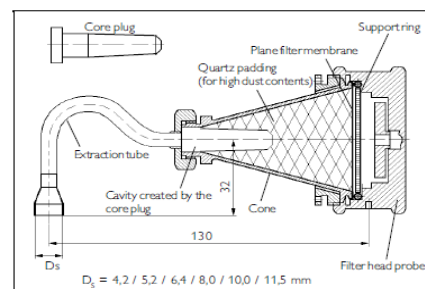
Eriaikaisessa isokineettisessä näytteenotossa näytteenotto ja kanavan virtausnopeuden, paineen ja lämpötilan mittaus tehdään erikseen. Eriaikaista isokineettistä näytteenottoa voidaan käyttää esimerkiksi silloin kuin kanavan koon vuoksi näytteenottoa ja virtausmittausta ei mahduta tekemään yhtä aikaa kanavasta. Tällöin kanavan virtausnopeus, paine- ja lämpötilamittaus tehdään ennen näytteen keräämistä. Näytteenoton aikana SICK Gravimatin ohjausjärjestelmä pitää jatkuvasti huolen siitä, että näytteenotto tapahtuu aikaisemmin määritetyllä virtausnopeudella. (*Sick Gravimat – manuaali*)

9.2.2 Pölynkeräin

Sopiva pölynkeräin mittausta varten valitaan kanavassa olevan pölypitoisuuden ja virtausnopeuden mukaan. Keräimiä on kahdenlaisia, LC- ja HC-pölynkeräimiä (Kuviot 53 ja 54). LC-keräimet on tarkoitettu pienemmille pölypitoisuuksille (0,1 – 200 mg/m³) ja HC-keräimet suuremmille pölypitoisuuksille (50 – 50 000 mg/m³). (*Sick Gravimat – manuaali*)



Kuvio 53: LC-pölynkeräin
(*Sick Gravimat – manuaali*)



Kuvio 54: HC pölynkeräin
(*Sick Gravimat – manuaali*)

Kumpaakin keräinmallia on kuudella erikokoisella suuttimen halkaisijalla. Mittaukseen sopiva suuttimen koko valitaan mitattavan kanavan virtausnopeuden perusteella. Kun kanaviston virtausnopeus tunnetaan, valitaan sopiva suuttimen halkaisija (extraction – Ø) taulukosta 1. Sopiva suuttimen koko valitaan taulukosta, tummennetulta alueelta. Esimerkiksi, jos virtausnopeus kanavassa on 25 m/s, niin mittauksissa tulee käyttää suutinta, jonka halkaisija on 4,2 mm tai 5,2 mm. (*Sick Gravimat – manuaali*)

Taulukko 1: Suuttimen valinta virtausnopeuden mukaan (*Sick Gravimat – manuaali*)

Extraction-Ø in mm	Gas velocity in the duct in m/s								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
4.2	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	1.99	2.24
5.2	0.38	0.76	1.15	1.53	1.91	2.29	2.67	3.06	3.44
6.4	0.58	1.16	1.74	2.32	2.89	3.47	4.05	4.63	5.21
8.0	0.90	1.80	2.71	3.62	4.52	5.43	6.33	7.24	8.14
10.0	1.41	2.83	4.24	5.65	7.07	8.48	9.90	11.31	12.72
11.5	1.87	3.74	5.61	7.48	9.35	11.22	13.09	14.96	16.83

10 Mittaukset

10.1 Alkutoimenpiteet

Mittaukset aloitettiin käynnistämällä puhaltimet ja säätämällä savukaasukanavan virtausnopeus ja paine halutuksi. Savukaasukanavan päävirtaus säädettiin kahden puhaltimen (heittokaasu- ja primääripuhallin) avulla. Heittokaasupuhallin oli prosessin loppupäässä, sähkösuotimen jälkeen ja primääripuhallin prosessin alkupäässä. Heittokaasupuhaltimella säädettiin kanaviston paine ja primääripuhaltimella kanaviston virtausnopeus halutuksi. Puhaltimia ohjattiin automaatiojärjestelmän avulla. Sähkösuodatin käynnistettiin myös puhaltimien käynnistyksen yhteydessä.

Kun kanaviston virtausnopeudet ja paineet oltiin saatu halutuksi, liitettiin ejektorit paineilmaverkkoon ja säädettiin lisäaineiden kantoilmojen virtausnopeudet halutuksi ejektorin ja sen perässä olevan venturin avulla.

Kun savukaasukanavan virtausnopeus ja lisäaineiden kantoilmat oltiin saatu halutuksi, mitattiin virtausnopeudet jaetun savukaasukanavan jokaisesta osasta. Virtausnopeuksien selvittämiseksi, mitattiin dynaaminen paine jokaisesta kanavasta pitot-putken avulla. Virtausnopeudet saatiin laskettua kaavan 10 mukaan.

$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \quad (10)$$

jossa v = virtausnopeus, m/s

p_d = dynaaminen paine, Pa

ρ = ilman tiheys, kg/m³

Kun kaikki edellä mainitut asiat oli saatu tehtyä, sekä ruuvisyöttimen siilo oli täytetty kalkilla, voitiin aloittaa varsinaiset mittaukset tai Dust Monitorin kalibrointi.

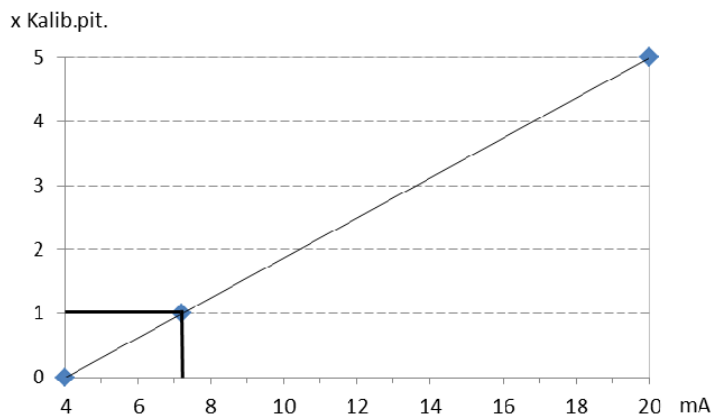
10.2 Dust Monitorin kalibrointi

Niin kuin jo kappaleessa 9.1 mainittiin, Dust Monitor tuli kalibroida ennen varsinaisia mittauksia, jotta laitteen mitta-asteikko saatiin mittauksia varten sopivaksi.

Kalibroinnin aikana pölypitoisuus tuli pitää mahdollisimman tasaisena. Tämän vuoksi kalkkia ei syötetty normaalisti sekoituskappaleen kautta kanavistoon, vaan lisäaineen syöttöletku vietiin savukaasukanavan sisään siten, että lisäaineen syöttö tapahtui ainoastaan kanavaan, jossa kalibrointi suoritettiin. Kun kalkkia syötettiin ainoastaan yhteen kanavista, voitiin pölypitoisuuden olettaa olevan tasaista kalibroinnin aikana, mikäli kalkin syöttö pysyi vakiona. Kalkin syötön perusteella voitiin myös laskea, mikä kanavan pölypitoisuus oli kalibroinnin aikana.

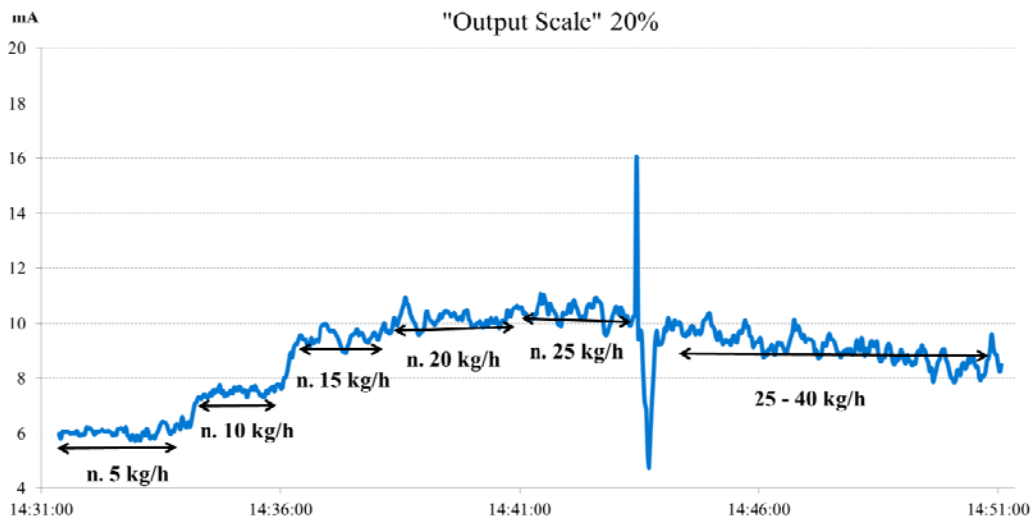
”Output Scale 20 % ”

Ensimmäisissä kalibroineissa ulostulosignaaliiksi asetettiin 20 % mitta-asteikosta (4 – 20 mA), jolloin laite asettautui kalibroinnin jälkeen näyttämään kalibroinnissa käytetylle pitoisuudelle noin 7,2 mA signaalia. Kalibroinnin jälkeen pölypitoisuuden ollessa nolla, Dust Monitorin tuli näyttää 4 mA signaalia ja pölypitoisuus ollessa viisi kertaa suurempi kuin kalibroinnissa käytetty pitoisuus, Dust Monitorin tuli näyttää 20 mA signaalia. Kalibroinnin jälkeinen Dust Monitorin mitta-alue kokonaisuudessaan tuli olla kuvion 55 mukainen. Kuviossa 55 X-akselilla on Dust Monitorin antama signaali ja Y-akselilla kanavan pölypitoisuus verrattuna kalibroinnissa käytettyyn pitoisuuteen.



Kuvio 55: Dust Monitorin kalibrointi 7,2 mA signaaliin

Dust Monitor ei kuitenkaan toiminut kalibroinnin jälkeen, niin kuin sen olisi pitänyt toimia. Kalibroinnin jälkeen Dust Monitor näytti kalibroinnissa käytetylle pölypitoisuudelle noin 7,2 mA signaalia, niin kuin pitikin. Myös kun lisääineen syöttö lopetettiin, signaali laski 4 mA. Ongelmaksi muodostui kuitenkin se, että kun pölypitoisuuksia lähdettiin kasvattamaan kalkin syöttömäärää nostamalla, ei Dust Monitorin signaali kasvanut tasaisesti kalkin syötön kasvaessa. Kuviossa 56 on esitetty kalibroinnin jälkeisen testauksen mittauskäyrä.



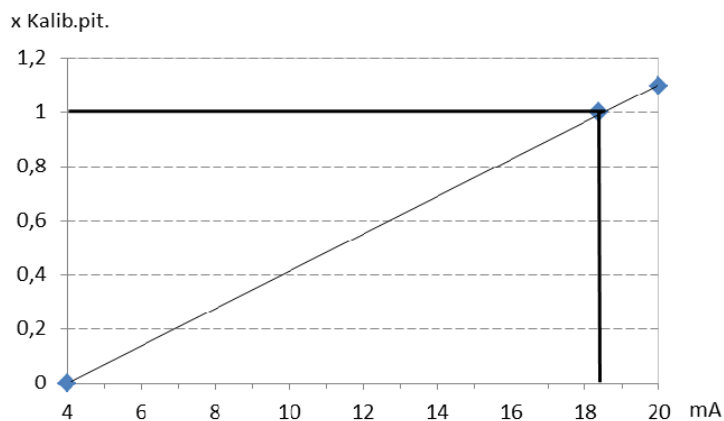
Kuvio 56: Kalibroinnin jälkeisen testauksen mittauskäyrä

Dust Monitor oli kalibroitu, siten että kalibroinnin aikana kalkin syöttö oli n. 10 kg/h. Mittauskäyrästä nähdään, että tällä syöttönopeudella signaali oli hyvin lähellä kalibroinnissa asetettua ulostulo signaalia (7,2 mA). Kun syöttöä tästä nostettiin tai laskettiin 5 kg/h, nähtiin signaalissa selkeä muutos. Mutta kun kalkin syöttöä kasvatettiin enemmän, ei signaalin nousu ollut enää yhtä selkeätä ja kalkin syötön noustessa yli 25 kg/h lähti saatu signaali jopa laskuun.

”Output Scale 90 % ”

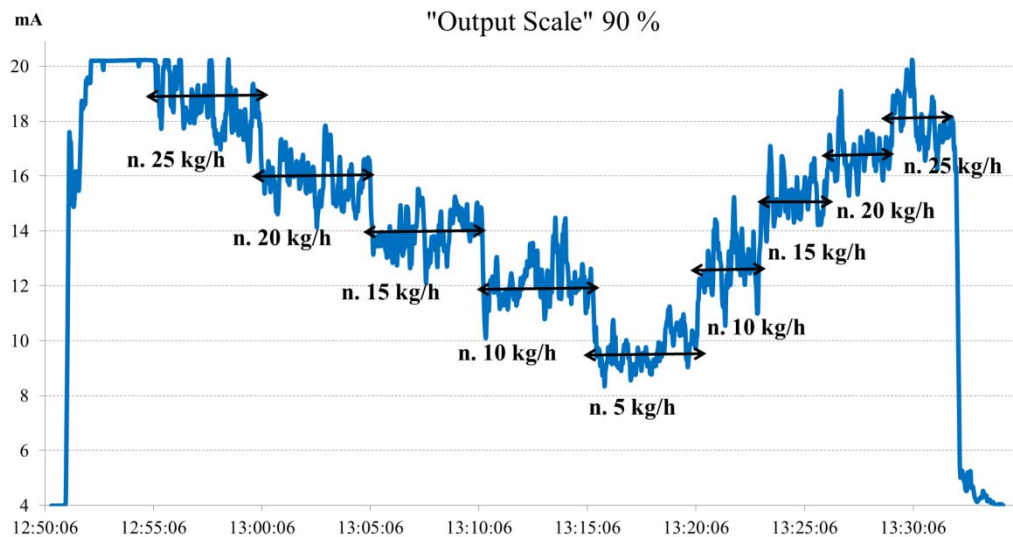
Kalibrointi tehtiin uudestaan siten, että kalibroinnissa käytettiin suurempaa pölypitoisuutta ja kalibroinnin jälkeinen ulostulosignaali vaihdettiin mitta-asteikon yläpäähän. Kalibroinnin ulostulo signaaliksi asetettiin 90 % mitta-asteikosta (4 – 20 mA), jolloin kalibroinnissa käytetty pitoisuus asettautui näyttämään noin 18,4 mA signaalia.

Kalibroinnin jälkeen pölypitoisuuden ollessa nolla, Dust Monitorin tuli näyttää 4 mA signaalia ja pölypitoisuus ollessa 1,1 kertaa suurempi kuin kalibroinnissa käytetty pitoisuus, Dust Monitorin tuli näyttää 20 mA signaalia. Kalibroinnin jälkeinen Dust Monitorin mittausalue kokonaisuudessaan tuli olla kuvion 57 mukainen. Kuviossa 57 X-akselilla on Dust Monitorin antama signaali ja Y-akselilla kanavan pölypitoisuus verrattuna kalibroinnissa käytettyyn pitoisuuteen.



Kuvio 57: Dust Monitorin kalibrointi 18,4 mA signaaliin

Kun kalibroitiin suoritettiin tällä tavalla, saatiin Dust Monitor toimimaan selkeästi paremmin. Kuviossa 58 on esitetty, kalibroinnin jälkeisen testauksen mittauskäyrä.



Kuvio 58: Kalibroinnin jälkeisen testauksen mittauskäyrä

Dust Monitor oli kalibroitu siten että kalibroinnin aikana kalkin syöttö oli n. 25 kg/h. Kalibroinnin jälkeisessä testauksessa kalkin syöttönopeudella 25 kg/h, saatiin noin 18,4 mA signaalia, niin kuin kalibroinnissa oli asetettukin. Kun syöttöä lähdettiin laskemaan 5 kg/h välein, näkyi jokaisella syötön muutoksella selkeä muutos myös Dust Monitorin antamassa signaalissa. Kun kalkin syöttö oltiin laskettu 5 kg/h asti, lähdettiin syöttönopeutta vastaavasti lisäämään vähitellen. Kun syöttömääriä nostettiin, palautuivat signaalit suurinpiirtein samoihin arvoihin, mitä oltiin saatu syöttömääriä vähennettäessä.

Tällä tavoin kalibroimalla Dust Monitor näytti toimivan huomattavasti paremmin kuin ”Output Scale:n” ollessa 20 %. Jatkossa kaikki kalibroinnit suoritettiin käyttäen ”Output Scale 90 %” mukaista kalibrointia.

Signaalien kasvaminen

Dust Monitorin toimivuutta testattaessa havaittiin, että kalibrointi ei pysynyt kohdallaan enää useamman päivän päästä. Mittaustuloksien havaittiin olevan muutaman päivän päästä hieman suurempia kuin heti kalibroinnin jälkeen. Tämän vuoksi Dust Monitor kalibroidiin uudelleen vähintään viikon välein. Sekoituskappaleiden mittauksiin merkittiin myös aina, koska Dust Monitorin viimeisin kalibrointi oli suoritettu.

10.3 Sekoituskappaleiden koeajot

Lisäaineiden jakaantumista jokaisella kappaleessa 7 esitetyllä sekoituskappaleella testattiin käytännössä kylmämallikokeiden avulla. Kunkin sekoituskappaleen toimintaa testattiin yksi kerrallaan.

Sekoituskappaleiden toiminnan testaus tapahtui syöttämällä sekoituskappaleen kautta kalkkia savukaasukanavaan ja mittaamalla pölypitoisuudet kustakin neljästä kanavasta. Pölypitoisuusmittauksilla oli tarkoitus selvittää levittäytyykö kalkki sekoituskappaleen avulla tasaisesti jokaiseen neljään kanavaan vai päätyykö osaan kanavista enemmän kalkkia kuin toisiin.

Pölypitoisuus mittauksissa käytettiin kappaleessa 9 esitettyjä mittalaitteita; Tribosähköistä pölymittari Dust Monitoria, sekä näytettä keräävää SICK Gravimatia. Pääosin mittalaitteena oli Dust Monitor, jota käytettiin kaikissa sekoituskappaleiden toimivuuksien mittauksissa. SICK Gravimatia ehdittiin ajan puutteen vuoksi vain kokeilemaan muutamalla mittauksella varsinaisten koeajojen jälkeen.

10.3.1 Sekoituskappaleiden koeajon kuvaus

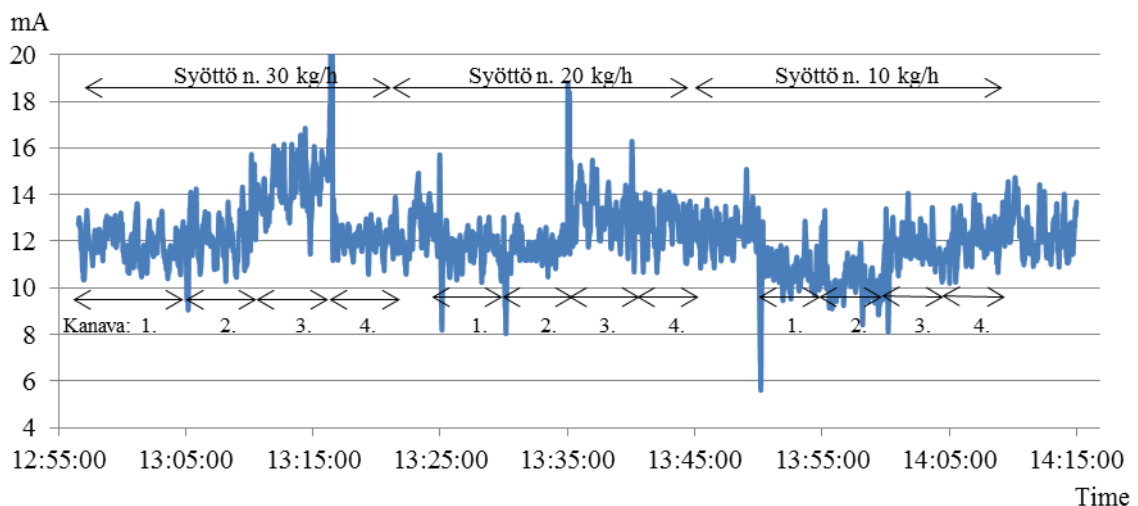
Mittaukset aloitettiin syöttämällä kalkkia 30 kg/h nopeudella. Syöttö pidettiin vakiona niin kauan, kun hiukkaspitoisuusmittaukset oli saatu suoritettua, jokaisesta kanavasta. Hiukkaspitoisuutta mitattiin Dust Monitorin avulla ja mittaukset suoritettiin yhdestä kanavasta kerrallaan. Yhdestä kanavasta hiukkaspitoisuutta mitattiin noin 5 minuutin ajan, jonka jälkeen siirryttiin seuraavaan. Kun kaikista neljästä kanavasta oli mittaukset suoritettu, laskettiin kalkin syöttönopeus 20 kg/h ja mitattiin jälleen hiukkaspitoisuutta jokaisesta kanavasta 5 minuutin ajan. Tämän jälkeen syöttönopeus laskettiin vastaavasti 10 kg/h ja suoritettiin hiukkasmittaukset kanavista.

Kun mittaukset oltiin suoritettu kaikilla kolmella syöttönopeudella, nostettiin kalkin syöttönopeus jälleen 30 kg/h ja tehtiin kaikki vaiheet kertaalleen uudestaan mittaustulosten varmentamiseksi.

10.4 Mittaustulosten tallentaminen

Kaikki Dust Monitorin mitaamat signaalit tallennettiin dataloggerille. Dataloggeri oli yhteydessä tietokoneeseen, jonka avulla pystyttiin mm. aloittamaan ja lopettamaan tiedonkerääminen, määrittämään tallennuksen tiheys, sekä tarkastelemaan mitattuja arvoja. Kaikissa tehdyissä mittauksissa Dust Monitorin lukemat tallennettiin dataloggerille kahden sekunnin välein.

Mittausten aikana Dust Monitorin mittauksista saatiin kuvion 59 mukaista mittauskäyrää. Kuvion 59 mittauskäyrä on kuva erään sekoituskappaleen mittauksista. Mittauksen eri vaiheet (mistä kanavassa mittaus on kulloinkin suoritettu ja mikä on ollut kalkin syöttömäärä kullakin hetkellä) on lisätty kuvioon, selventämään mittauksen etenemistä.



Kuvio 59: Dust Monitorin antamaa mittauskäyrä

10.4.1 Mittauspöytäkirja

Kaikista sekoituskappaleiden mittauksista oli tärkeä laatia myös selkeät mittauspöytäkirjat. Mittauspöytäkirjoihin merkittiin kaikki tunnetut tiedot kyseisestä mittauksesta, sekä muutokset ja havainnot, mitä tehtiin mittauksien aikana. Mittauspöytäkirjasta tuli löytyä ainakin seuraavat asiat:

- Päivämäärä, milloin mittaus on suoritettu
- Mikä sekoituskappale on ollut käytössä
- Koska viimeisin kalibrointi on suoritettu
 - Mikä on ollut kalibroinnissa käytetty pölypitoisuus
 - Mikä oli Dust Monitoriin asetettu Output Scale, eli kalibroinnista saatavan ulostulosignaalin asetus
- Savukaasukanavan virtausnopeus ja paine
- Pitot-putken avulla mitatut paine-erot, kustakin savukaasukanavan jaetusta osasta
- Ventureista mitatut paine-erot, lisäaineiden kantoilmojen virtausnopeuksien määrittämiseksi
- Mittauksien kaikki vaiheet
 - Kalkin syöttömäärän muutokset
 - Dust Monitorin vaihdot eri kanaviin
 - Kalkin lisäykset ruuvisyöttimen siiloon
- Kellonajat kaikista muutoksista

Mittauksien jälkeen mittauksista kerättyä dataa lähdettiin purkamaan mittauspöytäkirjan avulla. Mittauspöytäkirjan avulla nähtiin mm, milloin Dust Monitor oli ollut missäkin kanavassa, jolloin eri kanavista mitatut signaalit pystyttiin erottamaan toisistaan. Samoin mittauspöytäkirjan avulla pystyttiin dataa käsitellessä ottamaan huomioon kaikki muutkin muutokset ja havainnot, mitä oli tehty mittauksien aikana.

11 Mittaustulokset

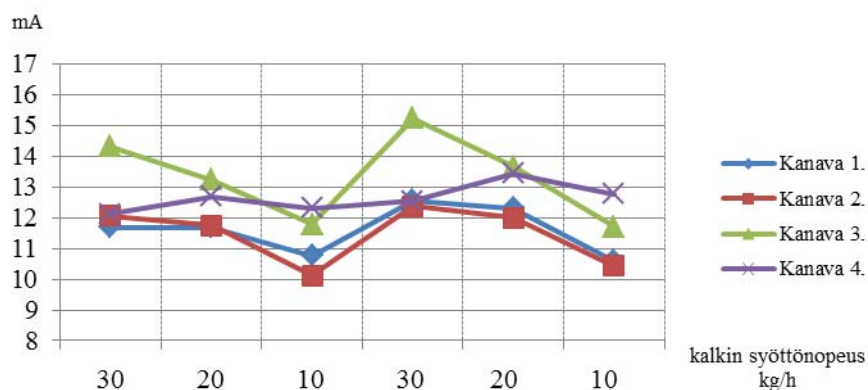
Kaikkien sekoituskappaleiden testauksien tulokset on esitetty liitteissä 1 – 8. Suoritettujen mittausten tuloksiin on kerätty perustiedot mittauksista, taulukot mittaustuloksista sekä kuvat kanavista mitattujen signaalien keskiarvoista.

Perustietoihin on kirjattu, minkä sekoituskappaleen mittaustuloksista on kyse, monesko mittausta se on kappaleelle ja päivämäärä milloin kyseinen mittausta on suoritettu.

Kalibroinnista on kirjattu viimeisin kalibrointi päivämäärä, kalibroinnissa käytetty pölypitoisuus ja Dust Monitoriin asetettu Output Scale. Lisäksi perustietoihin on kirjattu savukaasukanavan virtausnopeus ja paine, sekä laskettu käytettyjen lisäaineen kantoilmojen virtausnopeudet ja virtausnopeudet kaikista neljästä kanavasta.

Varsinaisista mittaustuloksista laadittiin taulukot, joihin on laskettu kussakin vaiheessa käytetyt lisäaineiden syöttömäärät ja eri mittaustapahtumien, Dust Monitorilla mitattujen signaalien keskiarvot ja keskihajonnat. Keskihajonnat on laskettu kuvaamaan, kuinka paljon signaali on mittauksen aikana keskimäärin vaihdellut lasketusta keskiarvosta.

Lisäksi lasketuista signaalien keskiarvoista muodostettiin kuvion 60 mukainen kuva, josta nähdään eri kanavien signaalien muutokset syöttömäärää muutettaessa, sekä kanavien keskeiset erot kullakin hetkellä.



Kuvio 60: Esimerkkikuva, mittauksista saatujen signaalien keskiarvoista

12 Mittaustulosten analysointi

Kun mittaustuloksia lähdetään tarkastelemaan havaitaan helposti, että lähes kaikkien mittauksien tulokset näyttävät jokseenkin samanlaisilta. Kaikissa mittauksissa, kanavasta kolme on mitattu hieman korkeampaa signaalia, kuin muista kanavista. Lisäksi kaikissa mittaustuloksissa kanavien 1 ja 2 signaalit ovat melko lähellä toisiaan.

Kanavan neljä mittaustulokset kuitenkin hieman vaihtelevat, riippuen siitä mikä sekoituskappale on ollut käytössä. Sekoituskappaleilla 1, 2 ja 4 kanavasta neljä on saatu toiseksi suurimmat signaalit ja sekoituskappaleilla 3 ja 5 kanavasta neljä on saatu kaikista pienimmät signaalit.

Sekoituskappale 3, mittaus 1

Hieman muista poikkeava tulos on saatu sekoituskappaleen 3 ensimmäisestä mittauksesta. (Liite 5) Myös kyseisessä mittauksessa kanavasta kolme on mitattu suurempi signaali kuin muista kanavista. Erona muihin mittauksiin on kuitenkin, että kanavan kolme signaali on huomattavasti suurempi kuin muiden kanavien signaalit.

Mittausten päätyttyä havaittiin, että sekoituskappaleen vaihdon yhteydessä kylmämalliin oli päässyt muovin palanen, joka oli jäänyt kiinni kohtaan missä kalkki jakaantuu savukaasukanavan eri osiin. Muovin palanen oli ilmeisesti ollut jakokohdassa siten, että se oli ohjannut suurimman osan lisäaineesta kanavaan kolme ja estänyt lisäaineen pääsyä kanaviin 1, 2 ja 4.

Kun muovinpalanen poistettiin ja sekoituskappaleelle kolme tehtiin uusi mittaus, tasoittuivat kanavien välisten signaalien erot ja mittaustuloksista saatiin hyvin samankaltaiset tulokset kuin muillakin sekoituskappaleilla.

12.1 Signaalien muuttaminen pölypitoisuudeksi

Kaikissa mittauksissa Dust Monitorin asetukset pidettiin samoina ja kaikki kalibroinnit pyrittiin suorittamaan samassa pölypitoisuudessa. Dust Monitorin Output Scale:ksi oltiin valittu 90 % ja kaikissa kalibroinnissa käytetty pölypitoisuus oli noin $6,7 \text{ g/m}^3$.

Kalibrointien jälkeen Dust Monitorin antamat signaalit tuli tällöin vastaata taulukossa 2 esitettyjä pitoisuuksia.

Taulukko 2: Dust Monitorin signaaleita (mA) vastaavat pitoisuudet (g/m^3)

mA	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
g/m^3	0,0	0,5	0,9	1,4	1,9	2,3	2,8	3,3	3,7	4,2	4,7	5,1	5,6	6,0	6,5	7,0	7,4

Valitettavasti Dust Monitor ei edelleenkään toiminut, niin kuin sen olisi pitänyt toimia. Ongelmana oli, että suurilla pölypitoisuuksilla mittaustulokset jäivät liian pieniksi ja pienillä pölypitoisuuksilla vastaavasti liian suuriksi. Tämän vuoksi liitteissä 1 –8 esitettyihin mittaustuloksiin ei mitattuja signaaleja lähdetty muuttamaan pölypitoisuudeksi, vaan tuloksissa tarkasteltiin ainoastaan eri kanavista mitattujen signaalien eroja.

Liitteisiin 9 ja 10 on kuitenkin kaikkien tulosten signaalit muutettu pölypitoisuudeksi olettaen, että Dust Monitor olisi toiminut teorian mukaisesti. Liitteisiin on laskettu myös, saman lisäaineen syöttömäärän aikana eri kanavista mitattujen pitoisuuksien summa sekä teoreettinen pölypitoisuus, joka kanavista olisi pitänyt saada yhteensä. Teoreettiset pölypitoisuudet saatiin laskettua kaavan 11 avulla.

$$x = \frac{\dot{m}}{A \cdot v} \quad (11)$$

,jossa x on pölypitoisuus, g/m^3

\dot{m} = kalkin syöttönopeus, g/s

A = savukaasukanavan poikkipinta-ala, m^2

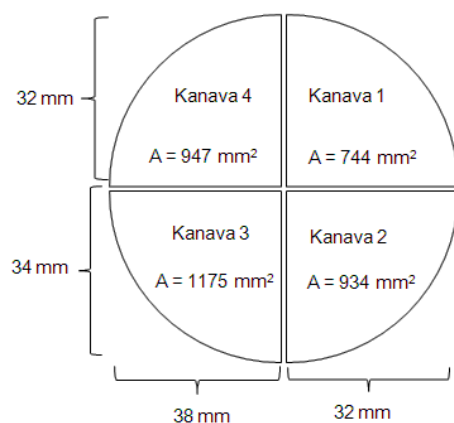
v = savukaasukanavan virtausnopeus, m/s

Liitteisiin 9 ja 10 lasketuista pitoisuuksista nähdään myös selkeästi se, että Dust Monitor ei toiminut täysin toivotusti. Lisäaineen syötön ollessa noin 30 kg/h mittauksista saatiin pienemmät pölypitoisuuslukemat kuin teoriassa olisi pitänyt saada. Vastaavasti lisäaineen syötön ollessa noin 10 kg/h mittauksista saatiin suuremmat pölypitoisuuslukemat kuin olisi teoriassa pitänyt saada. Lisäaineen syötön ollessa 20 kg/h mittaustulokset olivat lähes yhtä suuret kuin teoriassa olisi kuulunutkin olla. Liitteisiin laskettiin vielä mittaustulosten ja teorian mukaisten pölypitoisuuksien erot.

12.2 Mittaustuloksiin vaikuttavia asioita

Jakokohta

Mittausten jälkeen tarkistettiin, oliko sekoitusputki asennettu varmasti keskelle savukaasukanavan jaettua osaa siten, että putken pää jakautuu tasaisesti neljään yhtäsuureen osaan. Kun asia tarkistettiin havaittiin, että sekoitusputki ei ollut aivan täsmällisesti keskelle jakokohtaa, vaan poikkesi siitä muutamalla millillä. Tämä pieni poikkeama kuitenkin vaikutti merkittävästi jakokohdan pinta-aloihin. Jakokohdan mitat ja pinta-alat on esitetty kuviossa 61.



Kuvio 61: Sekoitusputken jakaantuminen

Kanavaan kolme päätyvän, sekoitusputken sektorin pinta-ala oli selkeästi kaikista suurin. Tämä oli todennäköisesti suurin syy siihen, miksi kalkkia päätyi kanavaan kolme

enemmän, kuin muihin kanaviin. Kanaviin 2 ja 4 päätyvien, sektorien pinta-alat olivat lähes yhtä suuret ja kanavaan 1 päätyvän sektorin pinta-ala selkeästi kaikista pienin.

Virtausnopeus

Aina ennen varsinaisten mittausten aloittamista mitattiin kanavissa kulkevien ilmavirtausten virtausnopeudet. Virtausnopeudet kaikissa kanavissa eivät olleet keskenään aivan yhtä suuria. Kanavassa kolme virtausnopeus oli tavallisesti noin. 0,5 – 1 m/s suurempi, kuin muissa kanavissa. Tämä voi ainakin osittain vaikuttaa siihen, miksi kalkkia päätyi enemmän juuri kolmoskanavaan.

Lisäainenden sekoittuminen

Koska kaikilla sekoituskappaleilla saatiin hyvin samankaltaisia mittaustuloksia, on myös mahdollista ettei sekoituskappaleen valinnalla ollut juurikaan merkitystä lisäaineiden jakautumiseen.

Sekoituskappaleen jälkeen lisäaineet kulkivat suoraan ylöspäin noin metrin verran, ennen jakaantumista savukaasukanavan eri osiin. On mahdollista, että tällä matkalla eri sekoituskappaleiden aikaansaamat lisäaineiden virtaukset ehtivät tasoittumaan siten, että lisäaineiden virtaus jakaantumiskohdassa oli aina samanlaista, kaikilla sekoituskappaleilla.

12.3 SICK Gravimat – mittaukset, tulokset ja analysointi

Varsinaisten mittausten jälkeen kokeiltiin näytettä keräävän SICK Gravimatin toimivuutta pölypitoisuuksien määrittämisessä. Ajan puutteen vuoksi tällä mittalaitteella ei ehditty tekemään kuin kaksi mittausta. Mittaukset tehtiin käyttäen sekoituskappaletta 4 ja näytteet kerättiin kanavista 1 ja 3.

Mittausten suorittaminen

Mittaukset kanavista tehtiin käyttäen eriaikaista isokineettistä näytteenottoa (katso luku 9.2.1), sillä kanavien koon vuoksi näytteenottoa ja kanavan virtausmittausta ei mahduttu suorittamaan yhtä aikaa. Näytteenotto kanavista suoritettiin yhdestä pisteestä, kanavan keskeltä. Kummastakin kanavasta näytettä kerättiin 10 minuutin ajan ja lisäaineen syöttö näytteenoton aikana oli noin 20 kg/h.

Näytteiden keräämisessä käytettiin LC-pölynkeräimiä, joiden suuttimien halkaisijat olivat 6,4 mm. Ennen näytteiden keräämistä keräimien pohjalle asetettiin suodatinpaperit ja “tyhjien” keräimien painot punnittiin. Kun näytteet oltiin kerätty kanavista, punnittiin keräimet uudestaan ns. “täytettynä”.

Imetyn ilman ja keräimelle jääneen kalkin avulla, saatiin laskettua kanavan pölypitoisuus. Laskut voitiin suorittaa kätevästi SICK Gravimatin mittausohjelman avulla. Ohjelmaan syötettiin mittauksen tiedot, mm. mitä pölynkeräintä käytettiin, keräimen paino ennen ja jälkeen mittausta ja kanavan poikkipinta-ala, jonka jälkeen ohjelma laski mitatun kanavan pölypitoisuuden.

Tulokset

Kanavasta 1 keräimelle saatiin kerättyä noin 460 mg kalkkia, jolloin kanavan pölypitoisuudeksi saatiin 1,3 g/m³. Vastaavasti kanavasta 3 keräimeen saatiin kerättyä noin 1800 mg kalkkia, jolloin pölypitoisuudeksi saatiin 5,8 g/m³.

Tulos oli ainakin siinä mielessä odotuksien mukainen, että kanavan 3 pölypitoisuudeksi saatiin myös tällä tavoin suurempi pitoisuus, kuin kanavaan 1. Näiden mittausten

perusteella tosin kanavien välisten pitoisuuksien ero oli suurempi, kuin mitä Dust Monitorilla suoritetuista mittauksista olisi ehkä osannut olettaa. Kanavasta 3 mitattiin jopa yli neljä kertaa isompi pitoisuus kuin kanavasta 1. Kanavista olisi kuitenkin pitänyt suorittaa useampia mittauksia, jotta mittaustuloksia olisi voinut pitää luotettavina.

13 Jatkotoimenpiteet

Suoritetuilla testeillä ei voitu vielä todeta, mikä sekoituskappaleista olisi paras vaihtoehto, eli millä sekoituskappaleista lisäaineet jakautuvat parhaiten savukaasukanavan eri osiin. Tämän selvittämiseksi on tehtävä vielä lisää testejä.

Mikäli mittauksia jatketaan, tulee ainakin savukaasukanavaan tuleva sekoitusputki asentaa uudestaan. Sekoitusputki tulee kohdistaa savukaasukanavaan siten, että putkenpää tulee täsmälleen keskelle jaettua savukaasukanavaa, jolloin lisäaineiden jakaantumisen pinta-alat kaikkiin kanaviin olisivat yhtä suuret.

Lisäksi pölypitoisuuksien määrittämisessä kannattaa jatkossa käyttää mielummin SICK Gravimatia, tai jotakin muuta mittalaitetta kuin Dust Monitoria. Dust Monitor ei jostain syystä toiminut mittauksissa niin kuin sen olisi pitänyt toimia ja tämän vuoksi sillä ei saatu kovin hyviä ja luotettavia tuloksia. SICK Gravimatilla ei ehditty mittaamaan kuin kaksi mittausta, mutta niiden mittaustulosten perusteella kyseinen mittalaite tuntui paremmalta ja luotettavammalta vaihtoehdolta pölypitoisuuksien määrittämiseen kuin Dust Monitor.

14 Lähteet

Dust Monitor – manuaali. (Dust Monitorin esite saatavissa:

<http://www.sintrol.com/files/sintrol/productfiled/713file1Upload.pdf>)

Hämälä Sirpa, Laine Jouko ja Vesa Paula 1992. Ilmansuojelutekniikka. Tammertekniikka. Jyväskylä

Jalovaara Jukka, Aho Juha, Hietämäki Eljas ja Hyytiä Hille 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. [online] [viitattu: 20.5.2011]

<http://www.environment.fi/default.asp?contentid=304709&lan=fi>

Jätelaitosyhdistys. [www-sivu]. [viitattu: 30.5.2011] Saatavissa:

<http://www.jly.fi/>

Kulmala Ilpo, Heinonen Kimmo, Riipinen Hannu, Säämänen Arto ja Welling Irma 2004. Tietoverkko pölyntorjunnan avuksi. Tampere. [online] [viitattu: 22.5.2011]

<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/index.htm>

Lahti Energia. [www-sivu]. [viitattu: 15.5.2011] Saatavissa:

<http://www.lahtienergia.fi/lahti-energia/ajankohtaista/lahti-energian-pioneeritoiminta-jaetteiden-kaasutuksessa-jatkuu-uuden-vihreaen-voimalaitoksen-peruskivi-muurattiin-3.9.2010>

Mehtachemicals [www-sivu]. [viitattu 20.5.2011] Saatavissa:

<http://www.mehtachemicals.com/>

Metso. [www-sivu]. [viitattu: 14.4.2011] Saatavissa:

http://www.metso.com/fi/corporation/about_fin.nsf/WebWID/WTB-041026-2256F-55957?OpenDocument

Metso Oyj:n lehdistötiedote 26.11.2009. Metso toimittaa uutta ympäristöystävällistä jätekaasutusteknologiaa Lahti Energia Oy:lle. [online] [viitattu: 15.5.2011] Saatavissa: <http://www.metso.com/news/newsdocuments.nsf/Web3NewsDoc/4C72E87F6CC4F447C225767A0036FB61?OpenDocument&ch=ChMetsoWebFin&id=4C72E87F6CC4F447C225767A0036FB61&>

Metso Power. Diaesitys. Jussila Jukka. Lisäaineiden käyttö savukaasujen puhdistuksessa. 15.10.2010

Nieminen Nieminen 2006. Jätteenpolton uudet tekniikat. [online] [viitattu: 20.5.2011] http://www.vtt.fi/liitetiedostot/muut/191012006_jatteenpolton_uudet_tekniikat.pdf

Pihkala Juhani 1998. Prosessiteknikan yksikköprosessit. Opetushallitus. Helsinki.

Raunemaa Taisto 2005. Pienhiukkaspäästöt ja vähentämismahdollisuudet Suomessa. [online] [viitattu: 20.5.2011] Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/ymparisto/energiantuotannonja-siirronmuutymparistovaikutukset/muutilmanpaastot>

Sick Gravimat – manuaali.

Uusitalo Antti 2009. Soodakattiloiden päästöt ilmaan. Kandidaatintyö. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Energiatekniikka. Lappeenranta. [online] [viitattu: 18.5.2011] <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/45438/nbnfi-fe200906081596.pdf?sequence=3>

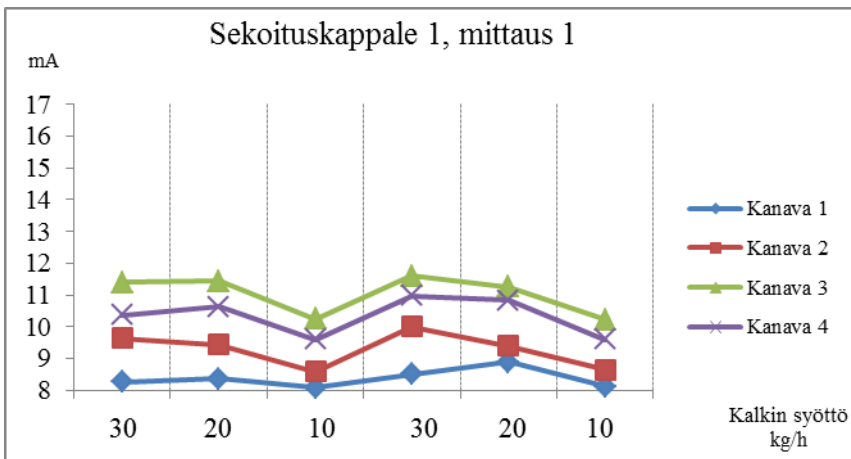
VTT Prosessit 2007. Päästömittausten käsikirja, Osa 1: Päästömittaustekniikan perusteet. [online] [viitattu: 20.5.2011] Saatavissa: <http://www.isy.fi/kasikirja.html>

15 Liitteet

Liite 1: Sekoituskappale 1, mittaus 1. - tulokset

Sekoituskappale 1	Mittaus 1.
Mittaukset suoritettu:	13.1.2011
Kalibrointi suoritettu:	13.1.2011
Kalibroinnissa käytetty pitoisuus:	6,7 g/m ³
Output Scale:	90 %
Savukaasukanavan virtausnopeus:	10,2 m/s
Savukaasukanavan paine:	-1,5 kPa
Kalkin kantoilman nopeus:	21,5 m/s
Aktiivihiiilen kantoilman nopeus:	23 m/s
1.kanavan virtausnopeus:	20,2 m/s
2.kanavan virtausnopeus:	21,0 m/s
3.kanavan virtausnopeus:	21,0 m/s
4.kanavan virtausnopeus:	19,8 m/s

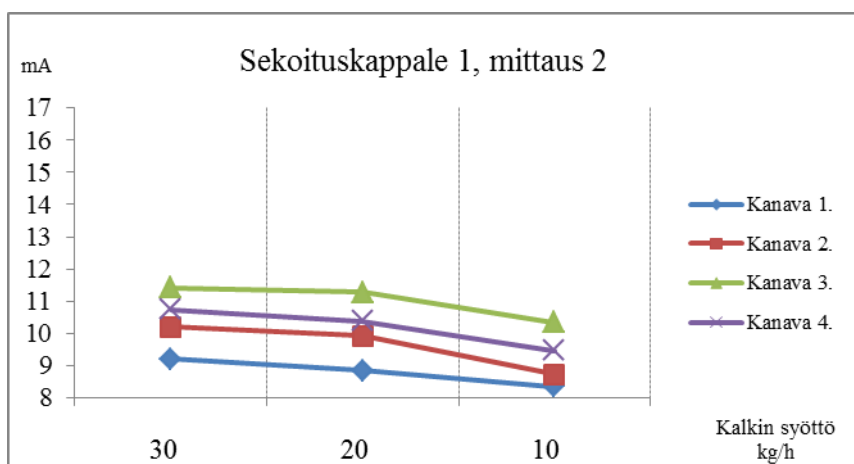
Kanavista mitattujen signaalien keskiarvot (\bar{k}_a), sekä keskihajonnat (σ)									
Mittaus järjestys	Syöttö kg/h	Kanava 1		Kanava 2		Kanava 3		Kanava 4	
		\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)
1	29,0	8,3	0,3	9,6	0,6	11,4	0,7	10,4	0,6
2	19,7	8,4	0,4	9,4	0,5	11,4	0,7	10,6	0,5
3	10,1	8,1	0,4	8,6	0,5	10,3	0,7	9,6	0,4
4	29,0	8,5	0,4	10,0	0,5	11,6	0,7	11,0	0,5
5	19,8	8,9	0,4	9,4	0,5	11,2	0,6	10,8	0,6
6	10,1	8,1	0,4	8,7	0,4	10,2	0,5	9,6	0,5



Liite 2: Sekoituskappale 1, mittaus 2. - tulokset

Sekoituskappale 1	Mittaus 2.
Mittaukset suoritettu:	14.1.2011
Kalibrointi suoritettu:	13.1.2011
Kalibroinnissa käytetty pitoisuus:	6,7 g/m ³
Output Scale:	90 %
Savukaasukanavan virtausnopeus:	10,4 m/s
Savukaasukanavan paine:	-1,5 kPa
Kalkin kantoilman nopeus:	21,5 m/s
Aktiivihiiilen kantoilman nopeus:	23 m/s
1.kanavan virtausnopeus:	20,2 m/s
2.kanavan virtausnopeus:	21,0 m/s
3.kanavan virtausnopeus:	21,0 m/s
4.kanavan virtausnopeus:	19,8 m/s

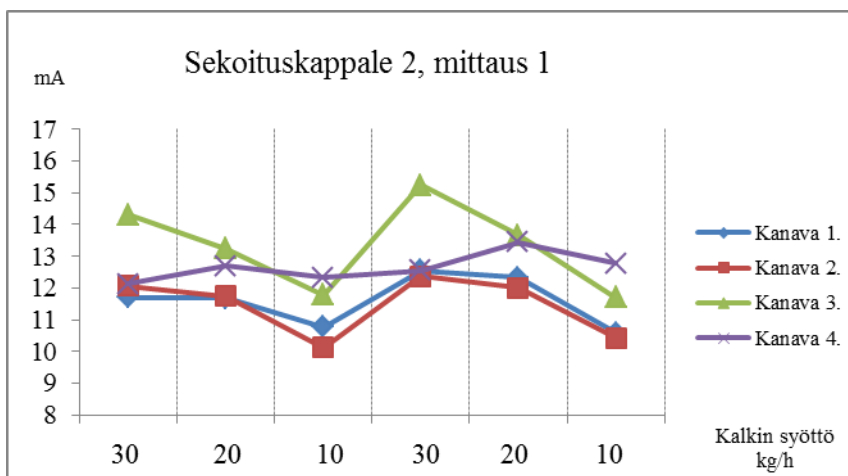
Kanavista mitattujen signaalien keskiarvot (\bar{k}_a), sekä keskihajonnat (σ)									
Mittaus järjestys	Syöttö	Kanava 1		Kanava 2		Kanava 3		Kanava 4	
	kg/h	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)
1	28,7	9,2	0,4	10,2	0,6	11,4	0,7	10,7	0,6
2	19,9	8,9	0,4	9,9	0,5	11,3	0,6	10,4	0,6
3	10,3	8,4	0,4	8,7	0,5	10,3	0,6	9,5	0,4



Liite 3: Sekoituskappale 2, mittaus 1. - tulokset

Sekoituskappale 2	Mittaus 1.
Mittaukset suoritettu:	20.1.2011
Kalibrointi suoritettu:	20.1.2011
Kalibroinnissa käytetty pitoisuus:	6,7 g/m ³
Output Scale:	90 %
Savukaasukanavan virtausnopeus:	10,4 m/s
Savukaasukanavan paine:	-1,5 kPa
Kalkin kantoilman nopeus:	21,5 m/s
Aktiivihiiilen kantoilman nopeus:	23 m/s
1.kanavan virtausnopeus:	21,0 m/s
2.kanavan virtausnopeus:	21,6 m/s
3.kanavan virtausnopeus:	22,0 m/s
4.kanavan virtausnopeus:	20,6 m/s

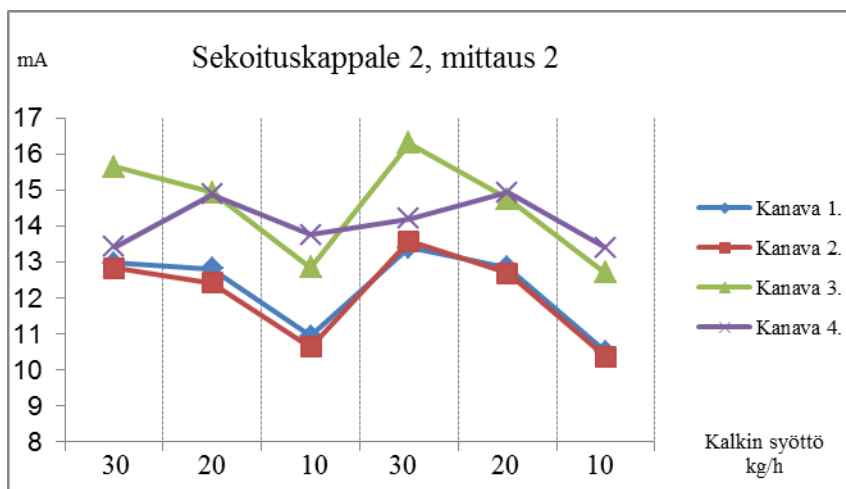
Kanavista mitattujen signaalien keskiarvot (\bar{k}_a), sekä keskihajonnat (σ)									
Mittaus järjestys	Syöttö kg/h	Kanava 1		Kanava 2		Kanava 3		Kanava 4	
		\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)
1	29,1	11,7	0,7	12,1	0,9	14,3	1,1	12,1	0,6
2	19,7	11,7	0,6	11,7	0,5	13,2	1,0	12,7	0,8
3	10,2	10,8	0,6	10,1	0,7	11,8	0,7	12,3	0,8
4	28,9	12,6	0,7	12,4	0,7	15,2	0,9	12,5	0,7
5	19,6	12,3	0,6	12,0	0,8	13,7	0,9	13,4	0,9
6	10,2	10,6	0,7	10,4	0,6	11,7	0,8	12,8	0,8



Liite 4: Sekoituskappale 2, mittaus 2. - tulokset

Sekoituskappale 2	Mittaus 2.
Mittaukset suoritettu:	21.1.2011
Kalibrointi suoritettu:	20.1.2011
Kalibroinnissa käytetty pitoisuus:	6,7 g/m ³
Output Scale:	90 %
Savukaasukanavan virtausnopeus:	10,5 m/s
Savukaasukanavan paine:	-1,5 kPa
Kalkin kantoilman nopeus:	21,5 m/s
Aktiivihiilen kantoilman nopeus:	23 m/s
1.kanavan virtausnopeus:	21,2 m/s
2.kanavan virtausnopeus:	22,0 m/s
3.kanavan virtausnopeus:	22,4 m/s
4.kanavan virtausnopeus:	21,2 m/s

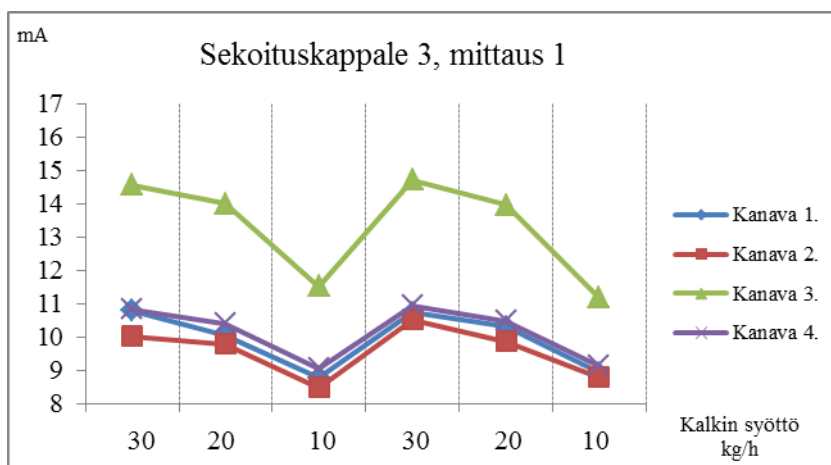
Kanavista mitattujen signaalien keskiarvot (\bar{ka}), sekä keskihajonnat (σ)									
Mittaus järjestys	Syöttö kg/h	Kanava 1		Kanava 2		Kanava 3		Kanava 4	
		\bar{ka} (mA)	σ (mA)	\bar{ka} (mA)	σ (mA)	\bar{ka} (mA)	σ (mA)	\bar{ka} (mA)	σ (mA)
1	28,4	13,0	1,0	12,8	1,0	15,7	1,3	13,4	0,7
2	19,7	12,8	0,7	12,4	0,8	14,9	1,0	14,9	0,7
3	9,9	11,0	0,6	10,6	0,6	12,9	0,9	13,8	0,8
4	28,7	13,4	0,8	13,6	0,9	16,3	1,1	14,2	0,9
5	19,9	12,8	0,6	12,7	0,6	14,8	1,0	14,9	0,9
6	9,2	10,5	0,5	10,4	0,5	12,7	0,7	13,4	0,8



Liite 5: Sekoituskappale 3, mittaus 1. - tulokset

Sekoituskappale 3	Mittaus 1.
Mittaukset suoritettu:	27.1.2011
Kalibrointi suoritettu:	27.1.2011
Kalibroinnissa käytetty pitoisuus:	6,7 g/m ³
Output Scale:	90 %
Savukaasukanavan virtausnopeus:	10,5 m/s
Savukaasukanavan paine:	-1,5 kPa
Kalkin kantoilman nopeus:	21,5 m/s
Aktiivihiiilen kantoilman nopeus:	23 m/s
1.kanavan virtausnopeus:	21,2 m/s
2.kanavan virtausnopeus:	21,8 m/s
3.kanavan virtausnopeus:	22,7 m/s
4.kanavan virtausnopeus:	20,8 m/s
HUOM: Jakokohta osittain tukkeutunut kanavassa olevan tiivisteiden palasen vuoksi.	

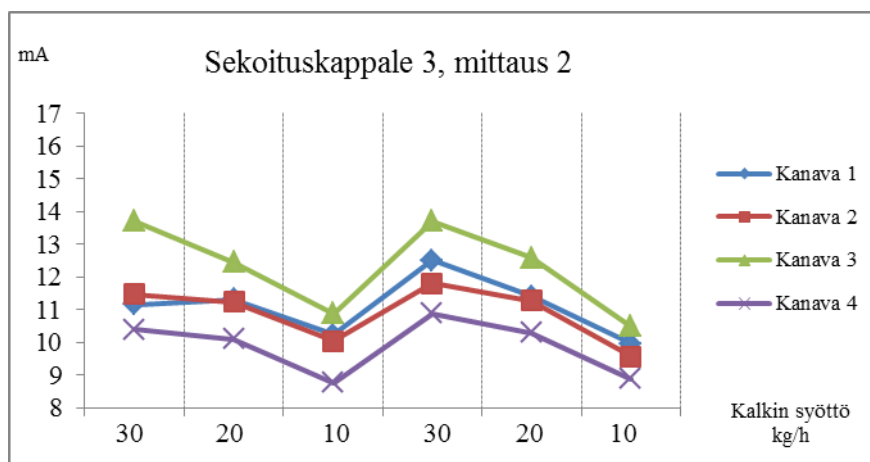
Kanavista mitattujen signaalien keskiarvot (\bar{k}_a), sekä keskihajonnat (σ)									
Mittaus järjestys	Syöttö kg/h	Kanava 1		Kanava 2		Kanava 3		Kanava 4	
		\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)
1	27,8	10,8	0,5	10,0	0,5	14,6	1,0	10,8	0,6
2	19,1	10,0	0,6	9,8	0,6	14,0	0,8	10,4	0,5
3	9,7	8,8	0,6	8,5	0,5	11,5	0,9	9,1	0,4
4	27,7	10,7	0,5	10,5	0,5	14,7	0,9	11,0	0,7
5	18,8	10,3	0,5	9,9	0,4	14,0	1,0	10,5	0,5
6	9,4	8,9	0,4	8,8	0,4	11,2	0,7	9,1	0,5



Liite 6: Sekoituskappale 3, mittaus 2. - tulokset

Sekoituskappale 3	Mittaus 2.
Mittaukset suoritettu:	28.1.2011
Kalibrointi suoritettu:	27.1.2011
Kalibroinnissa käytetty pitoisuus:	6,7 g/m ³
Output Scale:	90 %
Savukaasukanavan virtausnopeus:	10,4 m/s
Savukaasukanavan paine:	-1,5 kPa
Kalkin kantoilman nopeus:	21,5 m/s
Aktiivihiiilen kantoilman nopeus:	23 m/s
1.kanavan virtausnopeus:	21,2 m/s
2.kanavan virtausnopeus:	21,8 m/s
3.kanavan virtausnopeus:	22,4 m/s
4.kanavan virtausnopeus:	20,8 m/s

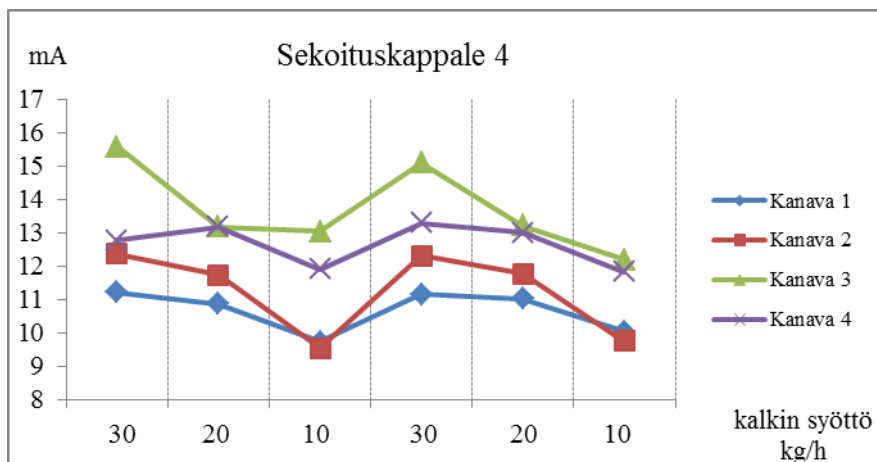
Kanavista mitattujen signaalien keskiarvot (\bar{k}_a), sekä keskihajonnat (σ)									
Mittaus järjestys	Syöttö	Kanava 1		Kanava 2		Kanava 3		Kanava 4	
	kg/h	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)	\bar{k}_a (mA)	σ (mA)
1	28,2	11,2	0,5	11,5	0,9	13,7	0,9	10,4	0,5
2	19,3	11,3	0,6	11,2	0,5	12,5	0,8	10,1	0,6
3	9,9	10,2	0,7	10,1	0,5	10,9	0,6	8,8	0,4
4	28,6	12,5	0,6	11,8	0,7	13,7	0,8	10,9	0,6
5	19,3	11,4	0,6	11,3	0,6	12,6	0,7	10,3	0,7
6	10,2	10,0	0,5	9,6	0,6	10,5	0,7	8,9	0,6



Liite 7: Sekoituskappale 4 - tulokset

Sekoituskappale 4	Mittaus 1.
Mittaukset suoritettu:	23.2.2011
Kalibrointi suoritettu:	21.2.2011
Kalibroinnissa käytetty pitoisuus:	6,5 g/m ³
Output Scale:	90 %
Savukaasukanavan virtausnopeus:	10,3 m/s
Savukaasukanavan paine:	-1,5 kPa
Kalkin kantoilman nopeus:	21,5 m/s
Aktiivihiilen kantoilman nopeus:	24 m/s
1.kanavan virtausnopeus:	21,8 m/s
2.kanavan virtausnopeus:	22,2 m/s
3.kanavan virtausnopeus:	22,7 m/s
4.kanavan virtausnopeus:	21,6 m/s

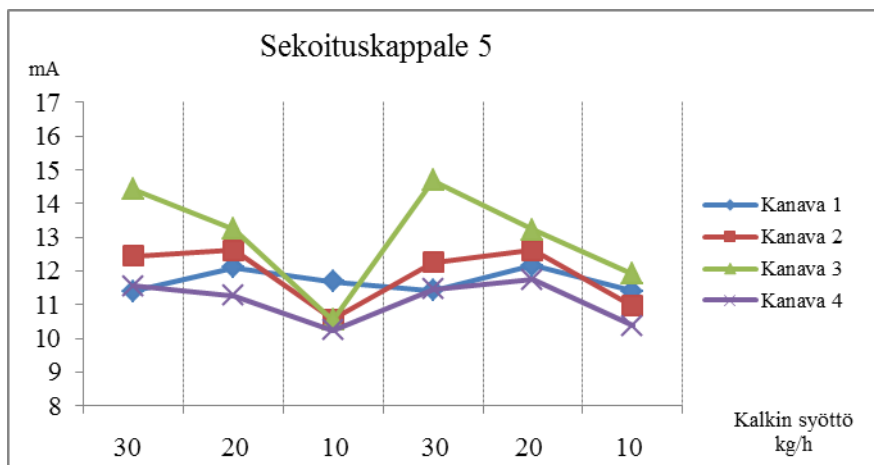
Kanavista mitattujen signaalien keskiarvot (ka), sekä keskihajonnat (σ)									
Mittaus järjestys	Syöttö kg/h	Kanava 1		Kanava 2		Kanava 3		Kanava 4	
		ka (mA)	σ (mA)	ka (mA)	σ (mA)	ka (mA)	σ (mA)	ka (mA)	σ (mA)
1	27,8	11,2	0,7	12,4	0,7	15,6	1,0	12,8	0,8
2	18,7	10,9	0,5	11,7	0,6	13,2	0,7	13,2	0,7
3	9,5	9,7	0,5	9,5	0,4	13,0	0,8	11,9	0,6
4	27,9	11,2	0,6	12,3	0,6	15,1	0,8	13,3	0,7
5	18,9	11,0	0,5	11,8	0,6	13,2	0,7	13,0	0,8
6	9,6	10,0	0,4	9,7	0,4	12,2	0,9	11,8	0,7



Liite 8: Sekoituskappale 5 - tulokset

Sekoituskappale 5	Mittaus 1.
Mittaukset suoritettu:	23.2.2011
Kalibrointi suoritettu:	21.2.2011
Kalibroinnissa käytetty pitoisuus:	6,5 g/m ³
Output Scale:	90 %
Savukaasukanavan virtausnopeus:	10,3 m/s
Savukaasukanavan paine:	-1,5 kPa
Kalkin kantoilman nopeus:	21 m/s
Aktiivihiiilen kantoilman nopeus:	24 m/s
1.kanavan virtausnopeus:	21,8 m/s
2.kanavan virtausnopeus:	21,8 m/s
3.kanavan virtausnopeus:	22,0 m/s
4.kanavan virtausnopeus:	20,6 m/s

Kanavista mitattujen signaalien keskiarvot (ka), sekä keskihajonnat (σ)									
Mittaus järjestys	Syöttö	Kanava 1		Kanava 2		Kanava 3		Kanava 4	
	kg/h	ka (mA)	σ (mA)	ka (mA)	σ (mA)	ka (mA)	σ (mA)	ka (mA)	σ (mA)
1	27,7	11,4	0,5	12,4	0,8	14,4	0,8	11,6	0,7
2	19,0	12,1	0,7	12,6	0,8	13,2	0,9	11,3	0,6
3	9,4	11,7	0,6	10,6	0,6	10,5	0,6	10,2	0,5
4	28,5	11,4	0,8	12,3	1,0	14,7	0,9	11,5	1,0
5	18,4	12,2	0,7	12,6	0,7	13,2	0,9	11,7	0,5
6	9,5	11,4	0,6	11,0	0,7	11,9	0,8	10,4	0,5



Liite 9: Mittauksista saadut signaalit muutettuina pölypitoisuuksiksi (g/m³) (1/2)

Syöttö	Sekoitinkappale 1, mittaus 1: Lisäaine pitoisuudet g/m ³						
kg/h	Kanava 1	Kanava 2	Kanava 3	Kanava 4	Σ Mittaukset	Σ Teoria	Σ _t - Σ _m
29,0	2,0	2,6	3,4	3,0	11,0	19,8	8,8
19,7	2,0	2,5	3,5	3,1	11,1	13,5	2,4
10,1	1,9	2,1	2,9	2,6	9,5	6,9	-2,7
29,0	2,1	2,8	3,5	3,2	11,7	19,8	8,2
19,8	2,3	2,5	3,4	3,2	11,3	13,5	2,2
10,1	1,9	2,2	2,9	2,6	9,6	6,9	-2,7

Syöttö	Sekoitinkappale 1, mittaus 2: Lisäaine pitoisuudet g/m ³						
kg/h	Kanava 1	Kanava 2	Kanava 3	Kanava 4	Σ Mittaukset	Σ Teoria	Σ _t - Σ _m
28,7	2,4	2,9	3,4	3,1	11,9	19,6	7,7
19,9	2,3	2,8	3,4	3,0	11,4	13,6	2,2
10,3	2,0	2,2	2,9	2,5	9,7	7,0	-2,7

Syöttö	Sekoitinkappale 2, mittaus 1: Lisäaine pitoisuudet g/m ³						
kg/h	Kanava 1	Kanava 2	Kanava 3	Kanava 4	Σ Mittaukset	Σ Teoria	Σ _t - Σ _m
29,1	3,6	3,7	4,8	3,8	15,9	19,9	4,0
19,7	3,6	3,6	4,3	4,0	15,5	13,5	-2,0
10,2	3,1	2,9	3,6	3,9	13,5	7,0	-6,5
28,9	4,0	3,9	5,2	4,0	17,1	19,7	2,6
19,6	3,9	3,7	4,5	4,4	16,5	13,4	-3,1
10,2	3,1	3,0	3,6	4,1	13,7	7,0	-6,8

Syöttö	Sekoitinkappale 2, mittaus 2: Lisäaine pitoisuudet g/m ³						
kg/h	Kanava 1	Kanava 2	Kanava 3	Kanava 4	Σ Mittaukset	Σ Teoria	Σ _t - Σ _m
28,4	4,2	4,1	5,4	4,4	18,1	19,4	1,3
19,7	4,1	3,9	5,1	5,1	18,2	13,4	-4,8
9,9	3,2	3,1	4,1	4,5	15,0	6,8	-8,2
28,7	4,4	4,5	5,7	4,8	19,3	19,6	0,3
19,9	4,1	4,0	5,0	5,1	18,3	13,6	-4,6
9,2	3,0	3,0	4,1	4,4	14,4	6,3	-8,1

Liite 10: Mittauksista saadut signaalit muutettuina pölypitoisuuksiksi (g/m³) (2/2)

Syöttö	Sekoitinkappale 3, mittaus 1: Lisäaine pitoisuudet g/m ³						
kg/h	Kanava 1	Kanava 2	Kanava 3	Kanava 4	Σ Mittaukset	Σ Teoria	$\frac{\sum_t - \sum_m}{\sum_m}$
27,8	3,2	2,8	4,9	3,2	14,1	19,0	4,9
19,1	2,8	2,7	4,7	3,0	13,1	13,1	-0,1
9,7	2,2	2,1	3,5	2,4	10,2	6,7	-3,5
27,7	3,1	3,0	5,0	3,2	14,4	19,0	4,6
18,8	2,9	2,7	4,6	3,0	13,3	12,9	-0,5
9,4	2,3	2,2	3,3	2,4	10,3	6,4	-3,9

Syöttö	Sekoitinkappale 3, mittaus 2: Lisäaine pitoisuudet g/m ³						
kg/h	Kanava 1	Kanava 2	Kanava 3	Kanava 4	Σ Mittaukset	Σ Teoria	$\frac{\sum_t - \sum_m}{\sum_m}$
28,2	3,3	3,5	4,5	3,0	14,3	19,3	5,0
19,3	3,4	3,4	3,9	2,8	13,6	13,2	-0,4
9,9	2,9	2,8	3,2	2,2	11,1	6,8	-4,4
28,6	4,0	3,6	4,5	3,2	15,3	19,6	4,3
19,3	3,5	3,4	4,0	2,9	13,8	13,2	-0,6
10,2	2,8	2,6	3,0	2,3	10,7	7,0	-3,7

Syöttö	Sekoitinkappale 4: Lisäaine pitoisuudet g/m ³						
kg/h	Kanava 1	Kanava 2	Kanava 3	Kanava 4	Σ Mittaukset	Σ Teoria	$\frac{\sum_t - \sum_m}{\sum_m}$
27,8	3,3	3,8	5,2	4,0	16,2	19,0	2,7
18,7	3,1	3,5	4,1	4,1	14,9	12,8	-2,1
9,5	2,6	2,5	4,1	3,6	12,7	6,5	-6,2
27,9	3,2	3,7	5,0	4,2	16,2	19,1	2,9
18,9	3,2	3,5	4,2	4,1	14,9	12,9	-1,9
9,6	2,7	2,6	3,7	3,5	12,5	6,5	-6,0

Syöttö	Sekoitinkappale 5: Lisäaine pitoisuudet g/m ³						
kg/h	Kanava 1	Kanava 2	Kanava 3	Kanava 4	Σ Mittaukset	Σ Teoria	$\frac{\sum_t - \sum_m}{\sum_m}$
27,7	3,3	3,8	4,7	3,4	15,3	18,9	3,7
19,0	3,7	3,9	4,2	3,3	15,0	13,0	-2,0
9,4	3,5	3,0	3,0	2,8	12,2	6,4	-5,8
28,5	3,3	3,7	4,8	3,4	15,3	19,5	4,2
18,4	3,7	3,9	4,2	3,5	15,2	12,6	-2,7
9,5	3,3	3,1	3,6	2,9	12,9	6,5	-6,4

