



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

Suomen Soodakattilayhdistys ry

Minuuttisondi-projekti

**Åbo Akademi
Niklas Vähä-Savo**

25.9.2009

Raportti 5b/2009

16A0913-E0104



Minuuttisondi-projekti

Tiivistelmä

Mustalipeän poltossa syntyy hiukkasia jotka tarttuvat savukaasujen virtaukseen ja muodostavat kerrostumia tulistimien ja konvektioputkien pinnalle. Näitä hiukkasia kutsutaan carry-over hiukkasiksi. Mittausmenetelmiä joita käytetään carry-over määrän mittaamiseen ja arviointiin ovat joko liian kalliita, epätarkkoja tai työläitä.

Tämän lopputyön tarkoitus oli kehittää mittausmenetelmä jossa käytetään jäähdyttämätöntä sondia jolla pystytään helposti arvioimaan hetkellinen carry-over määrä. Oletettiin hiukkasten osumatiheydellä ja määrällä olevan yhteys hetkelliseen carry-over määrään. Sondeina käytettiin 2 m pitkiä haponkestäviä teräspuita. Jäähdyttämätön sondi (kutsutaan minuuttisondiksi) kalibroitiin käytetyn jäähdytetyn sondimenetelmän kanssa, jotta olisi mahdollista laskea carry-over määrä muodossa g/Nm^3 . Sopivat mittausajat vaihtelevat 10 ja 30 s välillä riippuen carry-over määrästä. Minuuttisondit kuvattiin ja osa kuvista analysoitiin ImageJ nimisellä ohjelmalla. ImageJ-ohjelmalla sai selville sondin pinnalle tarttuneiden osumien peittävyysasteen. Oletettiin että kaikki hiukkaset tarttuvat sondiin ja että päällekkäisiä osumia ei esiinny, mutta kun osumien peittävyysaste alkaa lähentyä 50 % alkaa myös päällekkäisten osumien määrä kasvamaan. Tämä projekti on myös raportoitu diplomityönä Process Chemistry Center, Åbo Akademi (Epäorgaanisen kemian laboratorio). Diplomityön otsikkoon on ”Utveckling och användning av en korttidssond vid mätning av överbäring i sodapannor” ja työn teki Niklas Vähä-Savo. Diplomityötä valvoi Professori Mikko Hupa ja TkD Patrik Yrjas.

Johdanto

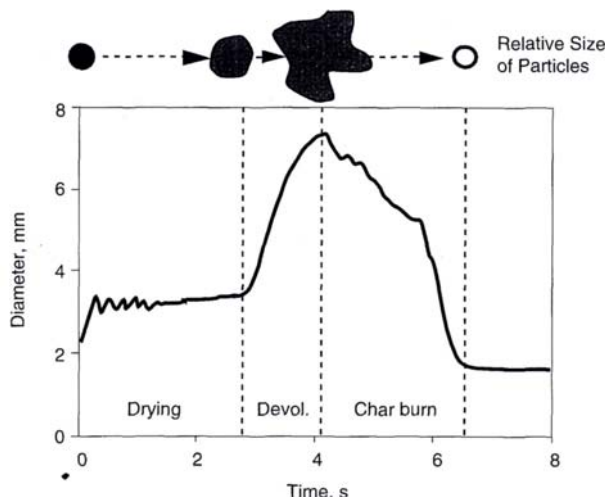
Kemiallisessa paperimassan valmistuksessa keitetään puuhake keittokemikaalien kanssa. Keittokemikaalia kutsutaan valkolipeäksi ja se kostuu natriumhydroksidista ja natriumsulfidista [1]. Keiton aikana noin 90 % ligniinistä, 60 % hemiselluloosasta ja 15 % selluloosasta liukenee keittokemikaaliin. Käytettyä keittokemikaalia kutsutaan keiton jälkeen mustalipeäksi. Mustalipeä sisältää käytetyn keittokemikaalin lisäksi puusta liuenneita orgaanisijayhdisteitä, sekä muita prosessiin kuulumattomia epäorgaanisia yhdisteitä jotka ovat peräisin puusta, käytetystä prosessivedestä tai käytetyistä laitteista [2]. Keiton jälkeen mustalipeä ja selluloosa eritellään. Keiton jälkeen mustalipeän kuiva-ainemäärä 12–20 % [3].

Mustalipeästä valmistetaan valkolipeää, jotta sitä voidaan käyttää uudelleen keittokemikaalina, kemikaalien talteenotossa. Kemikaalien talteenotto perustuu monesta yksiköstä joilla jokaisella on oma tehtävänsä valkolipeän valmistuksessa. Soodakattilan tehtävä on polttaa pois orgaaniset yhdisteet mustalipeästä. Ennen kuin mustalipeä voidaan polttaa, väkevöitetään se haihduttamalla vettä pois. Mustalipeän kuiva-ainemäärä ennen polttoa tarvitsee olla vähintään 60 %. Ennen ruiskutusta soodakattilaan sekoitetaan mustalipeään lentotuhkaa esilämmittimistä sekä tuhkaa sähkösuotimesta. Mustalipeä ruiskutetaan soodakattilaan lipeäruiskuilla joita voi olla yksi kappale yhdellä seinällä tai useampi kappale jokaisella seinällä ja jopa eri tasoilla.

Mustalipeän palaminen ja carry-over hiukkasten muodostuminen

Lipeäruisku muodostaa mustalipeästä laajan verhomaisen alan joka rikkoutuu erikokoisiksi mustalipeäpisaroiksi. Hupa et al. [4] tutkivat mustalipeän kolmea eri polttovaihetta: kuivuminen, pyrolyysi ja koksipalaminen. Kuivumisen aikana mustalipeäpisanan halkaisija kasvaa hieman ja

kuivumisvaiheen lopussa pisaran lämpötila on noin 200 °C. Jo kuivumisvaiheen lopussa helposti haihtuvat kaasut alkavat haihtua. Pyrolyysin aikana mustalipeäpisara paisuu huomattavasti ja palaa näkyvällä liekillä kun helposti haihtuvat kaasut palavat. Mustalipeäpisaran lämpötila nousee noin 800 °C pyrolyysin aikana. Koksipalamisen aikana mustalipeäpisara kutistuu ja lämpötila nousee yli 1000 °C. Koksipalamisen jälkeen on mustalipeäpisarasta jäljellä epäorgaaninen sulapisara.



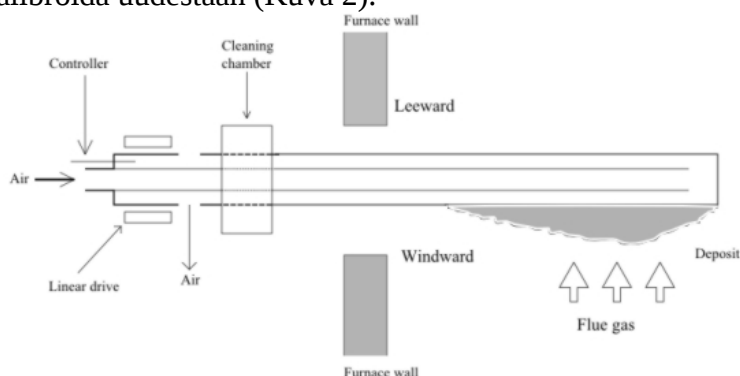
Kuva 1. Mustalipeäpisaran (kuiva-ainemäärän 60 %) eri palamisvaiheet 800 °C ilmassa [4].

Mustalipeäpisaran koko vaikuttaa se missä palamisvaiheessa pisarat yltää kekkoon. Isot pisarat voivat jo kuivumisvaiheessa yltää kekkoon kun taas pienet pisarat voivat yltää kekkoon sulassa muodossa. Mustalipeäpisarat, varsinkin pienet, voivat tarttua savukaasujenvirtaukseen (kutsutaan carry-over hiukkasiksi) ja muodostavat kerrostumia lämmönjohtimien pinnoille [5]. Etummaisten tulistimien pinnoille muodostuu 10–15 mm paksuisia kerrostumia. Kerrostumat eivät kasva paksummiksi koska savukaasujen lämpötila etummaisten tulistimien kohdalla on niin korkea, että kerrostumien pinnat alkavat sulaa ja valuvat pois. Savukaasujen lämpötila takimmaisten tulistimien ja kovektioputkien kohdalla on laskenut niin paljon että kerrostumat voivat kasvaa niin kauan kunnes alue tukkeutuu. Kerrostumat poistetaan lämmönjohtimien pinnoilta puhaltamalla korkeapaineista vesihöyryä lämmönjohtimien pinnoille (tätä kutsutaan nuohoamiseksi).

Carry-over määrän mittaaminen/arviointi

Carry-over määrä voidaan arvioida monella eri tavalla mutta tarkka mittaaminen on sitäkin hankalampaa. Teollisuudessa carry-over määrän arvioidaan prosessidatasta joka antaa tietoa kerrostumien paksuuksista lämmönjohtimien pinnoilla. Kerrostumien paksuus voidaan arvioida esimerkiksi mittaamalla savukaasujen lämpötila ennen tulistimia ja tulistimien jälkeen. Lämpötilan nousu tulistimien jälkeen voi viitata siihen että tulistimien pinnoille on muodostunut kerrostumia, joka toimii eristävänä kerroksena. Savukaasujen lämpötilaa on vaikea mitata koska yleensä mittauspisteitä on liian vähän. Paine-eron kasvu ennen tulistimia ja tulistimien jälkeen antaa myös tietoa kerrostumien kasvusta. Paine johtuu savukaasujen virtaustilavuudesta joka taas johtuu mm. ruiskutettavan lipeän määrästä, lipeän kuiva-aine määrästä ja käytettävän polttoilman määrästä. Yleensä paine-ero saavuttaa tietyn vakaan eron ja vasta kun tulistin alue tukkeentuu paine-ero kasvaa suureksi. Yksinkertaisin ja tehokkain menetelmä on mitata tulistimissa muodostuvan tulistetun höyryn lämpötila ja kuinka paljon tulistettuun höyryyn lisätään vettä jotta höyrynlämpötila ja höyrynvirtaus olisivat tasaiset [6,7].

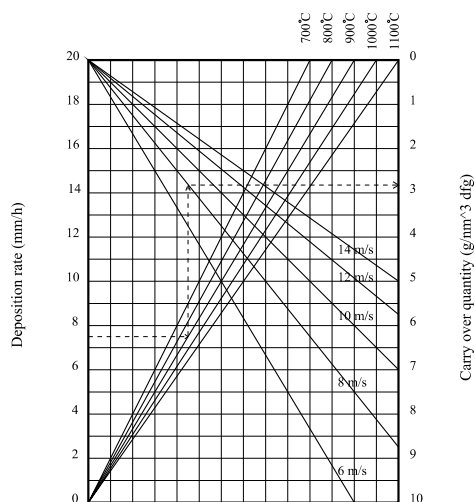
Reeve et al. [8] valmistivat Sootprobe™ sondin jolla on mahdollista arvioida kerrostumien kasvunopeuden lämmönjohtimien pinnoilla. Sootprobe™ on ilmajähdytteinen sondi jonka sisällä on antureita jotka mittaavat lämmönjohtavuutta. Sondin tuulipuolelle muodostuu carry-over kerrostumia kun taas sondin suojapuoli pysyy suhteellisen puhtaana. Carry-over kerrostumat heikentävät lämmönjohtavuutta. Suurempi ero suoja- ja tuulipuolen lämmönjohtavuudessa tarkoittaa paksumpaa kerrostumaa. Sondi on yleensä kalibroitu niin että tietty ero lämmönjohtavuudessa vastaa tiettyä kerrostumapaksuutta. Sondi tarvitsee puhdistaa tietyin aikavälein ja myös kalibroida uudestaan (Kuva 2).



Kuva 2. Sootprobe™.

Infrapunakameroita voidaan myös käyttää kerrostumien paksuuksien ja carry-over määrän arvioimiseen. Esimerkiksi niin sanottua kipinä-kameraa käytetään carry-over määrän arviointiin. Kamera rekisteröi hiukkaset jotka lentävät sen linssin ohi. Ongelma on että kamera havaitsee vain hiukkaset joiden lämpötila on korkeampi kuin taustasäteilyn, joka tarkoittaa sitä että kamera ei rekisteröi kaikkia hiukkasia. Infrapunakamerat tarvitsevat myös jäähdytystä jotta ne toimivat ja linssin pitää pysyä puhtaana [9]. Koska infrapunakameroiden koot pienenevät on tutkittu myös mahdollisuutta asentaa infrapunakameran nuohoimiin, näin saataisiin kunnon kuvaa kerrostumista lämmönjohtimien pinnalta ja nähtäisiin nuohouksen toimivuus [10]. Tulevaisuudessa kun kuvien analysointiohjelmat paranevat on mahdollista infrapunakameran kuvista saada selville kerrostumien paksuudet.

Ilmajähdytteinen sondi toimii samalla periaatteella kuin sootprobe™, mutta kerrostuman paksuus mitataan manuaalisesti, joka tekee ilmajähdytteisestä sondista työläämmän menetelmän carry-over määrän mittaamiseen kun sootprobe™. Ilmajähdytteisen sondin pinnalta mitataan kerrostuman kasvunopeus muodossa mm/h [11]. Kerrostuman kasvunopeudesta on mahdollista laskea carry-overin pitoisuus, muodossa g/Nm³, joko polttiainen-analyysillä tai Backman et al.[12] suunnitteleamalla monogrammilla (Kuva 3). Monogrammin käytössä tarvitaan tosin arvio savukaasujen lämpötilasta ja savukaasujen nopeudesta.



Kuva 3. Monogrammi carry-over pitoisuuden arviointiin.

Kokeellinen suoritus

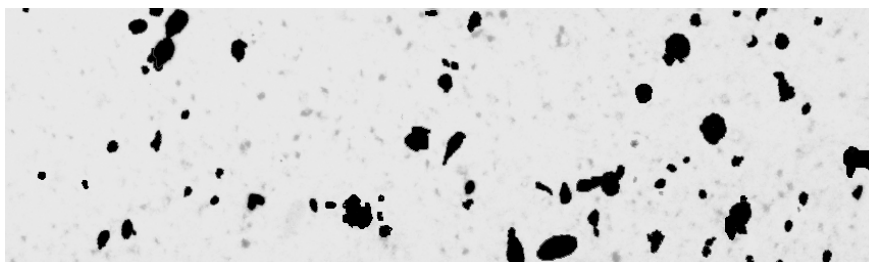
Projektin tavoite oli kalibroida ilmajäähdytetty sondi jäädyttämättömän minuuttisondin kanssa. Tarkoituksena oli että tulevaisuudessa minuuttisondin pintaa verrattaisiin valmistettuun kuvasarjaan ja tämän perusteella voidaan carry-over määrä arvioida. Mittaukset suoritettiin siten että yhden ilmajäähdytetyn sondimittauksen aikana suoritettiin neljä kpl minuuttisondimittauksia. Mittauksissa käytettiin 20 s mittausaikaa minuuttisondille ja ilmajäähdytteisellä sondilla mittausaika vaihteli 15–40 min. Minuuttisondi mittaukset suoritettiin siten että ensimmäinen sondi työnnettiin kattilan sisälle samanaikaisesti kuin ilmajäähdytetty sondi, kaksi sondia tasaisin väliajoin ilmajäähdytetyn sondin mittauksen aikana ja viimeinen minuuttisondi juuri ennen kuin ilmajäähdytetty sondi otettiin pois. Sondit olivat mahdollisimman lähellä toisiaan mittauksen aikana, jotta saatiin luotettavia kalibrointi tuloksia. Mittausten jälkeen minuuttisondit valokuvattiin Pentax K-10 kameralla jossa oli Pentax DA 1:4(22) ED-AL objektiivi. Minuuttisondit kuvattiin myös 5 x 3 cm raamin kanssa, jotta saatiin pixeli/mm suhde selville. Tasaiset sarjat (4 kpl minuuttisondia) analysoitiin kuvananalysointi ohjelmalla.

Mittaukset suoritettiin kolmessa soodakattilassa syksyllä 2008 ja keväällä 2009. Tarkoituksena oli että olisi kolme erityyppistä kattilaa joissa carry-over määrä vaihtelee sekä kattilaa ajettaisiin eri ajomallien mukaan jotta saataisiin mahdollisimman paljon vaihtelua carry-over määrään. Mutta maailmantalouden huonojen ennusteiden takia tehtailla oli tuotantorajoituksia ja kattiloita ajettiin pienellä kapasiteetilla.

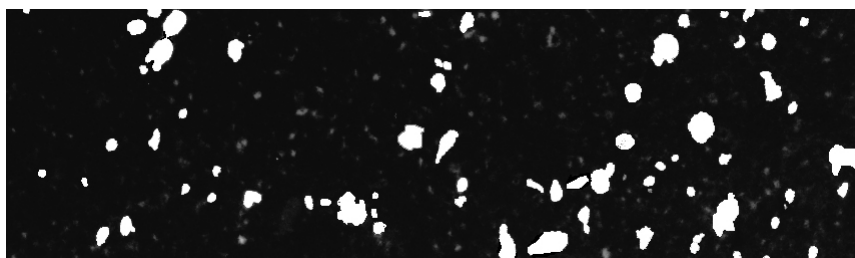
Valokuvat analysoitiin ImageJ nimisellä ohjelmalla, jotta osumien peittävyysaste saatiin selville. ImageJ-ohjelma pystyy analysoimaan vain musta-valkoisia kuvia, jouduttiin käyttämään toista kuvankäsittelyohjelmaa jotta kuvat saataisiin musta-valkoisiksi. 5 x 3 cm alue leikattiin pienemmäksi, 3 x 1cm, jotta analysointi sujuisi nopeammin. Kuvasta ensimmäiseksi muutettiin kontrastia, että osumat erottuisivat paremmin taustasta. Kuvan taustaväri oli yleensä harmaansävyinen mikä aiheutti että, osumat joiden väri oli lähellä taustan väriä, katosivat. Nämä osumat jouduttiin käsittelemään yksitellen (Kuvat 5-7).



Kuva 5. 3 x 1 cm:n analyysialue.

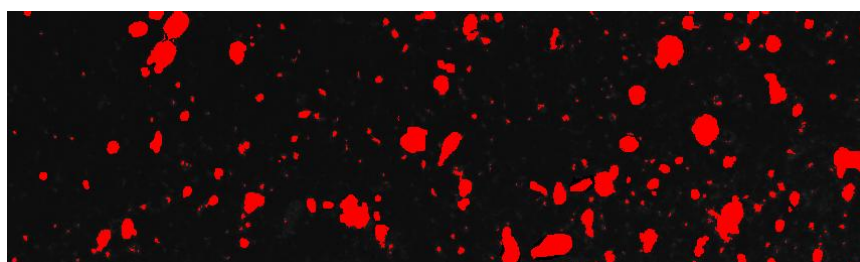


Kuva 6. Analyysialueen kontrasti ja kirkkaus säädetty sekä osa osumista käsitelty.



Kuva 7. Kuva väriskaala käännetty, jotta analysointi olisi helpompaa.

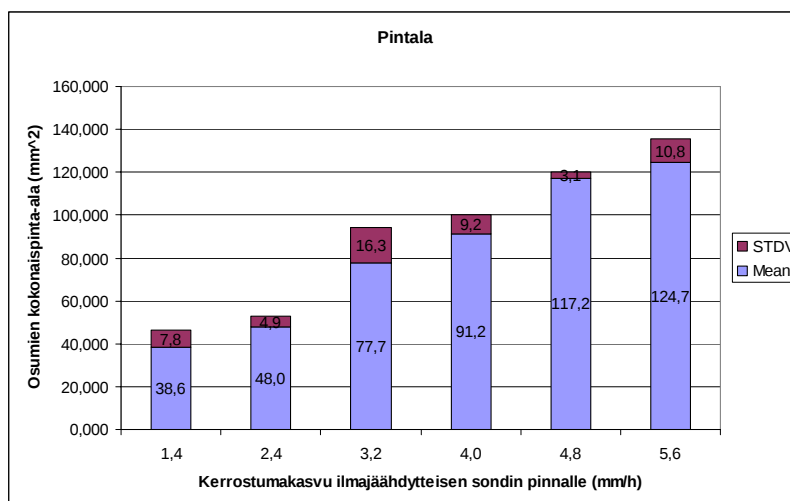
ImageJ:llä voi valita mitkä alueet ovat osumia ja mitkä taustaa sekä voi myös syöttää ohjelmalle pixel/mm suhteen niin on mahdollista saada selvälle yksittäisen osuman pinta-ala sekä ympärysmitta. Näissä kuva-analyyseissä käytettiin reunaehtoä että pienempiä osumia kuin 0,02 mm² ei analysoitu, koska yksittäiset pixelit ovat taustakohinaa (Kuva 8).



Kuva 8. Punaiset alueet analysoitu ImageJ:llä.

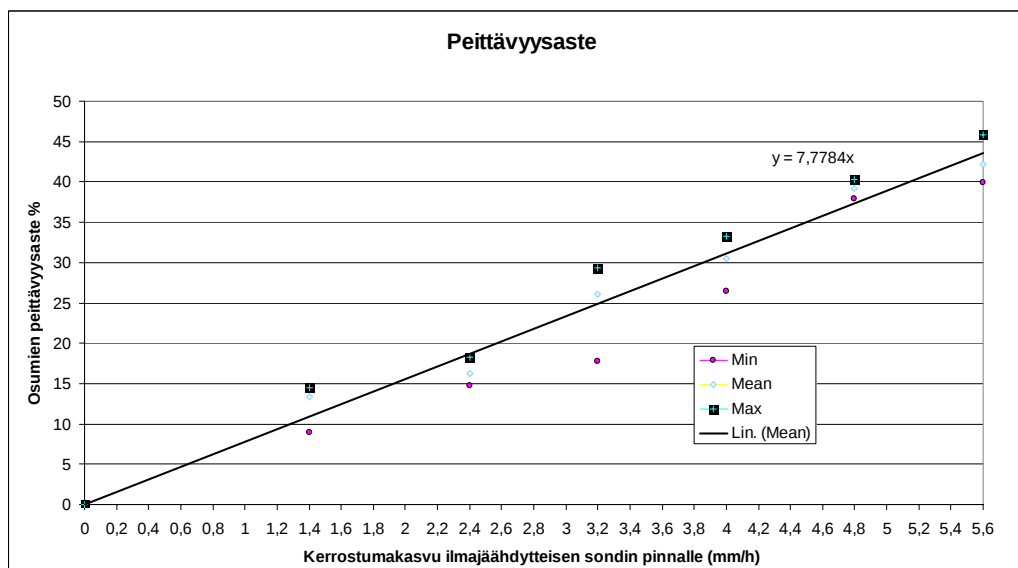
Tulokset

Visuaalisella tarkistuksella valittiin tasaiset sarjat ja ne analysoitiin ImageJ-ohjelmalla. Oletettiin että kaikki osumat tarttuvat minuuttisondin pinnalle, päällekkäisiä osumia ei esiinny ja että savukaasujen virtaus ja carry-over määrän on tasainen sillä alueella jossa mittaukset suoritettiin. Minuuttisondit jotka vastaavat 1,4 mm/h, 2,4 mm/h, 3,2 mm/h, 4,0 mm/h, 4,8 mm/h ja 5,6 mm/h analysoitiin.



Kuva 9. Kaikkien osumien pinta-alan keskiarvo ja keskihajonta.

Kuvasta 9 huomaa että kun carry-over määrä kasvaa, kasvaa myös osumien kokonaispinta-ala. Keskihajonta suurus tarkoittaa kuinka paljon carry-over määrä vaihtelee lyhyessä ajassa (10-40min). Osumien pinta-ala laskettiin peittävyysasteeksi (tämä oli mahdollista koska analyysi-alueen ala oli 300 mm²).



Kuva 10. Osumien peittävyysaste.

Kuvan 10 lisättiin trendiviiva joka seuraa peittävyysasteen keskiarvoa. Trendiviivan avulla pystytään arvioimaan carry-over määrä minuuttisondin ulkonäön perusteella. Mittauksissa käytettiin



20 s mittausaikaa, joilla kuva 10 on saatu aikaiseksi. Mutta koska osumien määrällä ja mittausajalla on lineaarinen yhteys, voidaan kuva 10 käyttää myös muilla mittausajoilla kuin 20 s. Seuraavalla kaavalla voidaan laskea eri minuuttisondin mittausajoille kuinka suurta kerrostumakasvua minuuttisondin ulkonäkö vastaa:

$$\text{kerrostumakasoitus}[\text{mm/h}] = \frac{\text{peittävyysaste}[\%]}{7,7784} \cdot \frac{20\text{s}}{\text{mittausaika}[\text{s}]}$$

Carry-over määrä laskettiin myös muotoon g/Nm^3 , ilmajäähdytteisen sondin kerrostumakasvusta. Koska carry-over pitoisuuden muotoon g/Nm^3 laskemisessa tarvitaan kerrostuman tilavuus, voidaan minuuttisondin peittävyysasteesta laskea myös carry-over pitoisuus jos osumille pystytään arvioimaan paksuus. Carry-over pitoisuuden laskemisessa sondien tulosten perusteella oletettiin seuraavanlainen prosessidata:

Taulukko 1: Oletettu prosessidata

	määrä	yksikkö
Lutinsprutning	30	l/s
Kuiva-aine määrä	80,4	%
Lipeän tiheys	1,4326	kg/dm^3
O ₂ savukaasuissa	2,28	vol-%
Lipeän koostumus		
C	38,2	paino-%
H	3,4	paino-%
O	31,1	paino-%
N	0,1	paino-%
S	5,2	paino-%
Na	19,8	paino-%
K	1,9	paino-%
Cl	0,1	paino-%
Loput	0,2	paino-%
carry-overin tiheys	2600	kg/m^3
Pinta-ala nokan kohdalla	6,5m x 12,5m=81,25	m^2

Oletettiin että savukaasut koostuu ainoastaan CO₂, O₂, N₂ ja H₂O sekä ylimääräinen polttoilma koostuu ainoastaan 20 % O₂ ja 80 % N₂. Sula koostuu K(kalium), Cl(kloori), NaCO₃ (natriumkarbonaatti) ja N₂S (natriumsulfidi). Oletettiin että natrium reagoi kaiken sulfidin kanssa että muodostuu natriumsulfidia, loput natriumista reagoi hiilen ja hapen kanssa muodostaen natriumkarbonaattia. Polttoilmamäärä lasketaan kuinka paljon happea tarvitaan natriumkarbonaattiin, hiilidioksidiin, veteen sekä kuinka paljon happea on jäljellä savukaasuissa. Kun savukaasujen virtaus kmol/s muodossa on tiedossa, on mahdollista laskea kaasujen yleisen tilayhtälön (NTP oloissa) avulla savukaasujen virtaus m^3/s .

Koska kerrostumankasvunopeus on muodossa mm/h ja kun oletetaan että koko nokan alueella on yhtä suuri kerrostumanopeus, saadaan kerrostumakasvunopeus muotoon tilavuus/aikayksikkö. Kun tiedetään carry-overin tiheys, voidaan laskea carry-over määrä paino/aikayksikkö muotoon. Tämä kun jaetaan savukaasujen virtauksen kanssa, saadaan carry-over pitoisuus g/Nm^3 .

Minuuttisondin peittävyysasteen perustella carry-over pitoisuuden laskemisessa oletettiin että nokan-alue peittyy peittävyysasteen verran osumista ja osumille arvioitiin keskipaksuus. Näin saatiin tilavuus/aika yksikkömuotoon minuuttisondin peittävyysaste. Sen jälkeen laskettiin carry-over pitoisuus samalla proseduurilla kuin ilmajäähdytteisen sondin kanssa. Verrattaessa carry-over pitoisuutta, joka laskettiin minuuttisondilla sekä ilmajäähdytteisellä sondilla, oli mahdollista iteroida minuuttisondin osumille keskipaksuus. Osumien keskipaksuudeksi saatiin 0,0714 mm.

Kalibrointi kuvasarja:

Kalibrointi kuvasarjaa valmistaessa käytettiin kuvia joiden peittävyysaste on lähellä kuva 10:n trendiviivaa. Samaa prosessidataa kun taulukko 10:ssa käytettiin sekä samoja oletuksia lipeänpoltosta. Lipeän ruiskutusmäärää vaihdeltiin 15 – 50 l/s ja lämpötila asetettiin 900 °C.



Kuva 11. Kuvan peittävyysaste 10 %.

Taulukko 2. Carry-over pitoisuus laskettu kuva 11 peittävyysasteen perusteella (10 %) joka vastaa 1,2 mm/h kasvua ilmajähdytteisen sondin pinnalle

Lämpötila (Celsius)	Lipeäruiskutus (l/s)								g/Nm ³
	15	20	25	30	35	40	45	50	
900	1,0	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	



Kuva 12. Kuvan peittävyysaste 20 %.

Taulukko 3. Carry-over pitoisuus laskettu kuva 12 peittävyysasteen perusteella (20 %) joka vastaa 2,4 mm/h kasvua ilmajähdytteisen sondin pinnalle

Lämpötila (Celsius)	Lipeäruiskutus (l/s)								g/Nm ³
	15	20	25	30	35	40	45	50	
900	1,9	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	



Kuva 13. Kuvan peittävyysaste 33 %.

Taulukko 4. Carry-over pitoisuus laskettu kuva 13 peittävyysasteen perusteella (33 %) joka vastaa 3,7 mm/h kasvua ilmajäähdytteisen sondin pinnalle

Lämpötila (Celsius)	Lipeäruiskutus (l/s)								g/Nm ³
	15	20	25	30	35	40	45	50	
900	3,0	2,3	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	



Kuva 14. Kuvan peittävyysaste 33 %.

Taulukko 5. Carry-over pitoisuus laskettu kuva 14 peittävyysasteen perusteella (33 %) joka vastaa 4,2 mm/h kasvua ilmajäähdytteisen sondin pinnalle

Lämpötila (Celsius)	Lipeäruiskutus (l/s)								g/Nm ³
	15	20	25	30	35	40	45	50	
900	3,4	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	



Kuva 15. Kuvan peittävyysaste 38 %.

Taulukko 6. Carry-over pitoisuus laskettu kuva 15 peittävyysasteen perusteella (38 %) joka vastaa 4,8 mm/h kasvua ilmajäähdytteisen sondin pinnalle

Lämpötila (Celsius)	Lipeäruiskutus (l/s)								g/Nm ³
	15	20	25	30	35	40	45	50	
900	4,0	3,0	2,4	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	



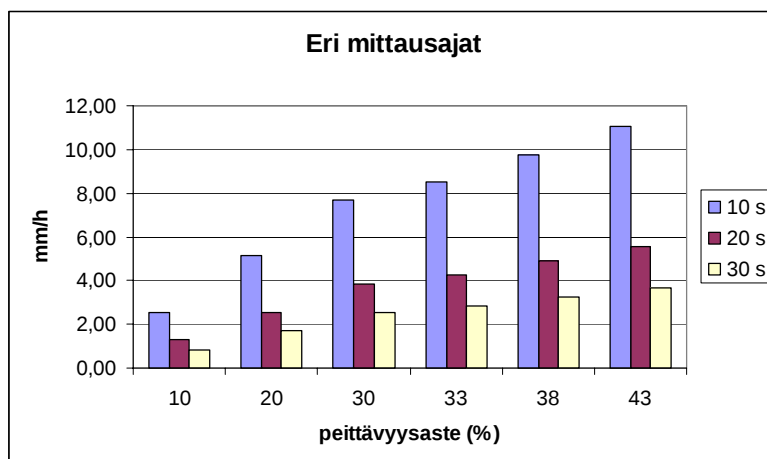
Kuva 16. Kuvan peittävyysaste 43%.

Taulukko 7. Carry-over pitoisuus laskettu kuva 16 peittävyysasteen perusteella (43 %) joka vastaa 5,5 mm/h kasvua ilmajäähdytteisen sondin pinnalle

Lämpötila (Celsius)	Lipeäruiskutus (l/s)								g/Nm ³
	15	20	25	30	35	40	45	50	
900	4,5	3,4	2,7	2,3	1,9	1,7	1,5	1,4	

Loppupäätelmä

Minuuttisondi on hyvä ja nopea menetelmä carry-over määrän arviointiin. Onnistuttiin valmistamaan kalibrointikuvasarja minuuttisondille jotta on mahdollista arvioida (saada selville) kerrostumakasvunopeus ja myös mahdollista laskea carry-over pitoisuus g/Nm^3 , minuuttisondin ulkonäön perusteella, mutta siihen tarvitsee arvioida osuille keskipaksuus. Mittausaikaa on mahdollista vaihdella 10 s ja 30 s välillä, soodakattilan carry-over määrästä riippuen. Pidempää kun 30 s mittausaikaa ei suositella koska savukaasujen korkealämpötila saattaa aiheuttaa että osumat sulavat ja sondin pintaa ei voida analysoida. Käyttämällä kuvasarjaa ja vaihtelemalla mittausaikaa 10, 20 tai 30 s voidaan seuraavanlaisia kerrostumakasvuja havaita.



Kuva 16. Eri mittausajat ja niiden kerrostumakasvut.

Käytännössä pystytään nykyisellä minuuttisondin kalibrointikuvasarjan avulla havaitsemaan kerrostumakasvunopeutta joka vaihtelee noin 1 mm/h aina noin 11 mm/h (Kuva 16).

Minuuttisondi kuvista on myös mahdollista saada arvokasta tietoa osumien kokojakaumasta, niin kauan kun päällekkäisiä osumia ei esiinny. Kun peittävyysaste nousee yli 45 % alkaa päällekkäisten osumien määrä kasvamaan mikä vaikeuttaa huomattavasti kuvien analysointia. Kuvien analysointi on aikaa vievää ja koska ImageJ-ohjelma ymmärtää vain mustavalkoisia kuvia joudutaan kuvia käsittelemään kuvankäsittelyohjelmalla. Ongelma kuvankäsittelyssä on että osa osumista katoaa ja osumien koko saattaa vaihdella alkuperäisestä. Minuuttisondilla saadaan hetkellinen carry-over määrä, kun taas ilmajähdytteisellä sondilla saadaan pidemmän aikavälin keskiarvo. Useamman sondin käytöllä saisi tarkempaa tietoa peittävyysasteen vaihtelusta yhden ilmajähdytteisen sondimittauksen aikana, käytännössä monen sondin käyttö on työlästä. Myös paremmalla kuvananalysointi ohjelmalla saisi tarkempia tuloksia osumien peittävyysasteesta, mutta kuinka hyvin kalliit kaupalliset ohjelmat toimivat on eri asia koska tausta ei aina ole täysin saman sävyinen ja osa osumista on lähellä taustan väriä, tämä luultavasti häiritsee kaupallisia ohjelmia.

Viitteet

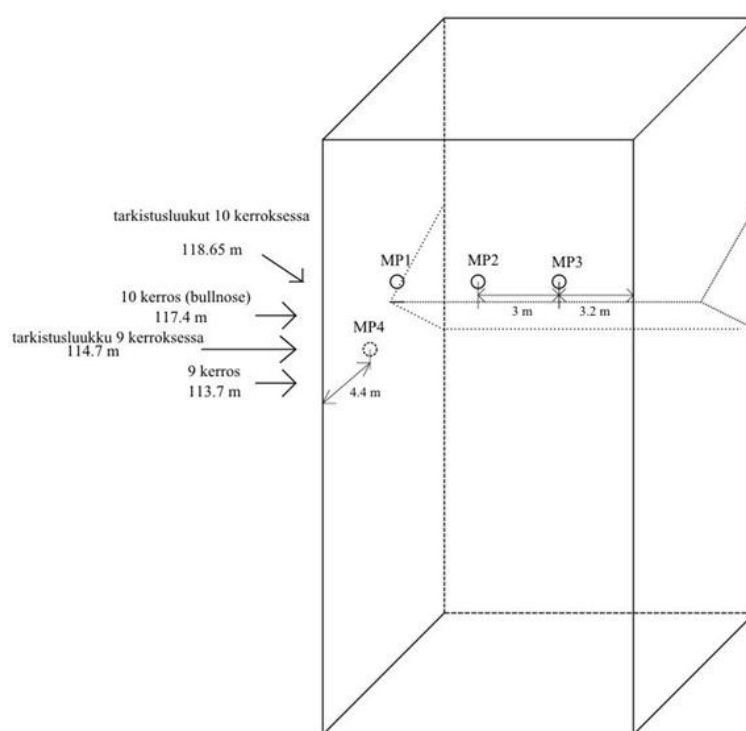
1. Kovasin K: Cooking, The Heart of Pulp Manufacturing, Kurs i aktuell fiberteknologi 11.12.2007
2. Stenius P, editor. Papermaking Science and Technology: Book 3, Forest Products Chemistry. Jyväskylä: Gummerus 2000



3. Gullichsen Jn, Fogelholm C-J, editors: Papermaking Science and Technology: Book 6B, Chemical Pulping. Jyväskylä: Gummerus 2000
4. Hupa M, Solin P, Hyöty P: Combustion behaviour of black liquor droplets, Journal of pulp and paper science vol 13. no 2 March 1987.
5. Frederick W.J, Noopila T, Hupa M: Swelling of spent pulping liquor droplets during combustion.
6. Vakkilainen E K: Kraft Recovery Boilers – Principles and practice: Suomen Soodakattilayhdistys r.y. 2005
7. Tran H.N, Thompson S.L, Pryke D.C, Reeve D.W: On-line measurement of fireside deposit accumulation in kraft recovery boilers.
8. Tran H.N, D.C Pryke D.C, D.W Reeve D.W: Control of fireside deposit formation in kraft recovery units: Pulp & Paper Canada 87:12 (1986)
9. Brisco B, Nichol M, Blackwell B, Brevis K, MacCallum: Application of modern recovery boiler instrumentation. International Chemical Recovery Conference 1989
10. I&I Final Technical Report DE-FG36-01GO11038 System for detection and control of deposition in kraft recovery boilers and monitoring glass furnaces.
<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/816034-d1fwNR/native/816034.doc>
11. Konttinen J, Veijonen T-P, Hupa M: The share of carry-over droplet residues at the furnace exit – probe measurement in nine recovery boilers
12. Backman R, Skrifvars B-J, Hupa M, Siistonen P, Mäntyniemi J: Flue gas chemistry in recovery boilers with high levels of chlorine and potassium. International Chemical Recovery Conference 1995

Mittaukset UPM-Kymmene Kymin tehtailla

12-13.5.2009 suoritettiin mittauksia Kymin tehtailla jossa varmennettiin minuuttisondin toimivuus carry-over määrä arvioivana välineenä. Mittauksia suoritettiin nokan tasolla (kolmesta tarkistusluukusta) ja 3,7 m nokan tason alapuolella yhdestä tarkistusluukusta. Varmennusmittaukset suoritettiin mittaamalla minuuttisondilla ja ilmajäähdysteisellä sondilla samanaikaisesti samasta tarkistusluukusta. Ilmajäähdysteis sondin mittausaika oli 15 min jonka aikana suoritettiin 4 kpl 10 s tai 20 s, carry-over määrästä riippuen, minuuttisondi mittauksia. Carry-over määrän vaihtelua eri kohdilla soodakattilaa tutkittiin suorittamalla minuuttisondi mittaukset kaikista neljästä tarkistusluukusta mahdollisimman samanaikaisesti. Soodakattilan kuorma oli ensimmäisen mittauspäivänä 3000 tonnia päivässä (kuiva-ainepitoisuus 100%) ja toisena mittauspäivänä 4500 tonnia päivässä.



Kuva 17. Mittauspaikat Kymin tehtailla.

Minuuttisondit valokuvattiin ja osa kuvista analysoitiin samalla tavalla kuin ”Kokeellinen suoritus” osiossa mainitaan jotta saatiin selville osumien peittävyysaste. Loput minuuttisondikuvista verrattiin kalibrointikuvasarjaan (osio ”Kalibrointikuvasarja”) jotta saatiin selville osumien peittävyysaste.

Tulokset

Minuuttisondin peittävyys asteesta sekä ilmajäähdysteisen sondin kerrostuma kasvusta laskettiin carry-over määrä muodossa g/Nm^3 ja kuinka suuri osa mustalipeän epäorgaanisesta määrästä muodostaa carry-overia. Oletettiin että polttoilma koostumus on 80 % N_2 ja 20 % O_2 . Savukaasut koostuu ainoastaan O_2 , N_2 , H_2O sekä CO_2 . Oletettiin myös kaikki rikki (S) reagoi ja muodostaa



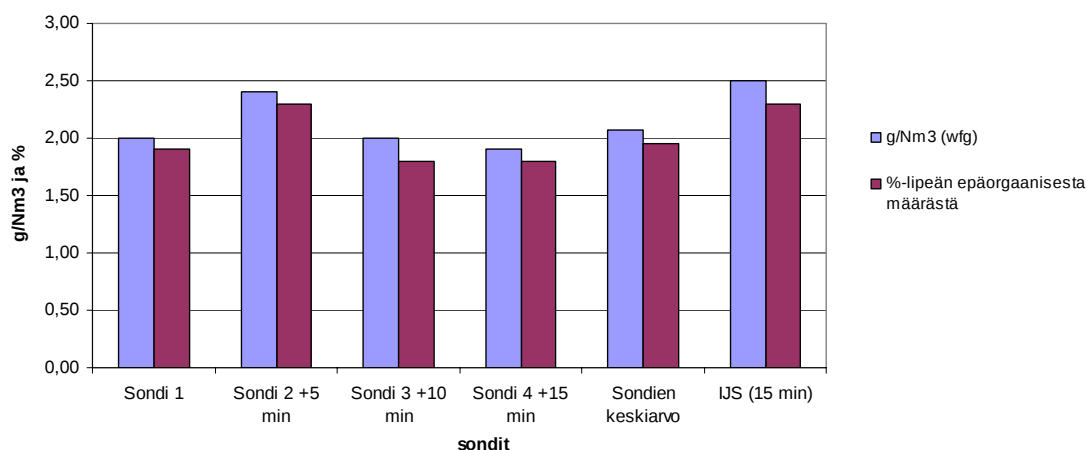
Na_2SO_4 ja loput natriumista (Na) reagoi karbonaatin (CO_3) kanssa muodostaen Na_2CO_3 . Lipeän koostumus ja tiheys sekä carry-overin tiheys oletettiin olevan seuraavanlainen:

Taulukko 8. Lipeän koostumus ja tiheys sekä carry-overin tiheys

Lipeän koostumus		
C	38,2	paino-%
H	3,4	paino-%
O	31,1	paino-%
N	0,1	paino-%
S	5,2	paino-%
Na	19,8	paino-%
K	1,9	paino-%
Cl	0,1	paino-%
Rest	0,2	paino-%
Lipeän tiheys	1,4834	kg/dm ³
carry-overin tiheys	2600	kg/m ³
Pinta-ala nokan kohdalla	98	m ²

Carry-over määrä laskettiin samalla tavalla kuin ”Tulokset” osiossa. Kuvissa 18- 25 nähdään carry-over muodossa g/Nm^3 sekä kuinka suuri osa mustalipeän epäorgaanisesta määrästä muodostaa carry-overia laskettuna ilmajäähdytteisen sondin (IJS) kerrostumak kasvunopeudesta ja minuuttisondin partikkeliosumien peittävyysasteesta. Samanaikaiset mittaukset suoritettiin keskimmaisessa tarkistusluukussa (MP2 kuvassa 17). Mittauksen aloituskellonaika näkyy kaavion otsikosta. Ensimmäinen minuuttisondi mittausta suoritettiin juuri ennen kuin ilmajäähdytteisen sondin mittausta alkoi. Kaksi kappaletta minuuttisondimittausta suoritettiin samanaikaisesti ilmajäähdytteisen sondimittauksen kanssa. Viimeinen minuuttisondimittaus suoritettiin heti sen jälkeen kun ilmajäähdytteinen sondi oli otettu pois.

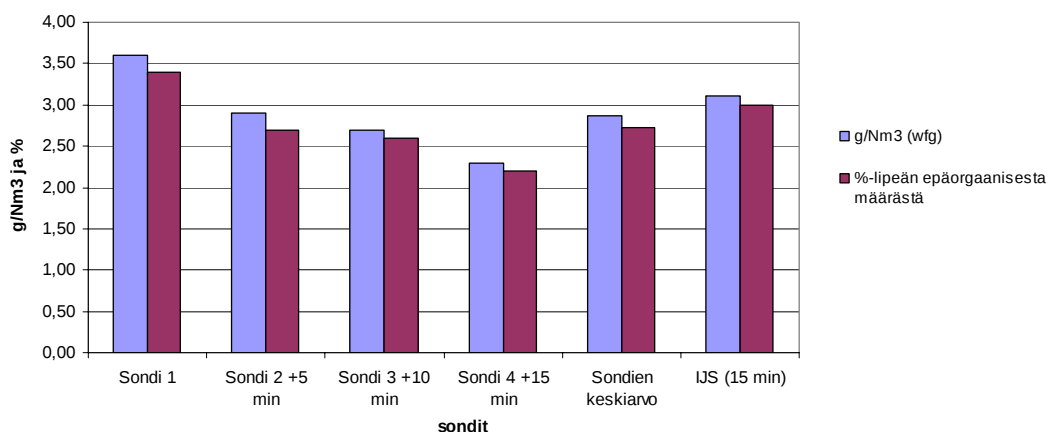
Kalibrointimittaus 12.5.09 12:25



Kuva 18. Samanaikainen mittaus minuuttisondilla ja ilmajäähdytteisellä sondilla.

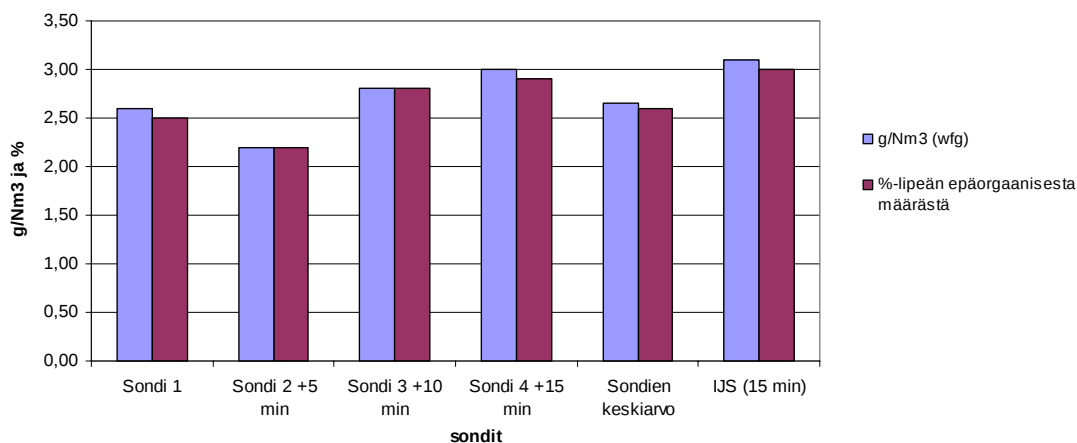


Kalibroitimittaus 12.5.09 13:00



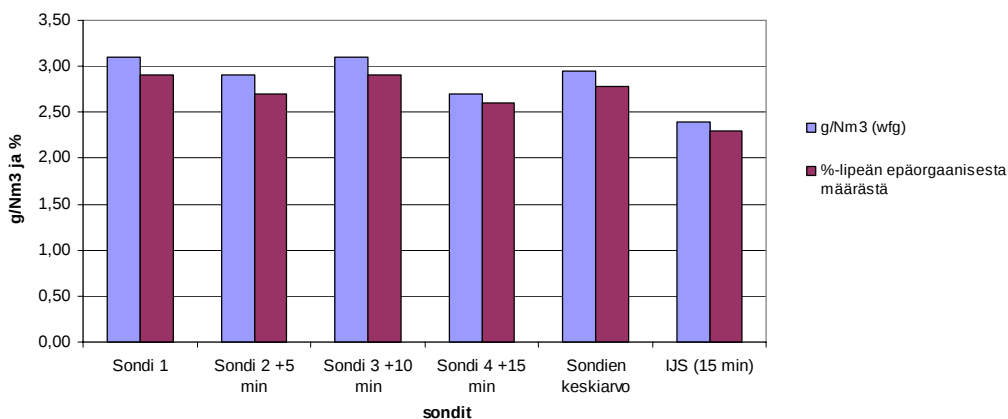
Kuva 19. Samanaikainen mittaus minuuttisondilla ja ilmajähdytteisellä sondilla.

Kalibroitimittaus 12.5.09 13:39



Kuva 20. Samanaikainen mittaus minuuttisondilla ja ilmajähdytteisellä sondilla.

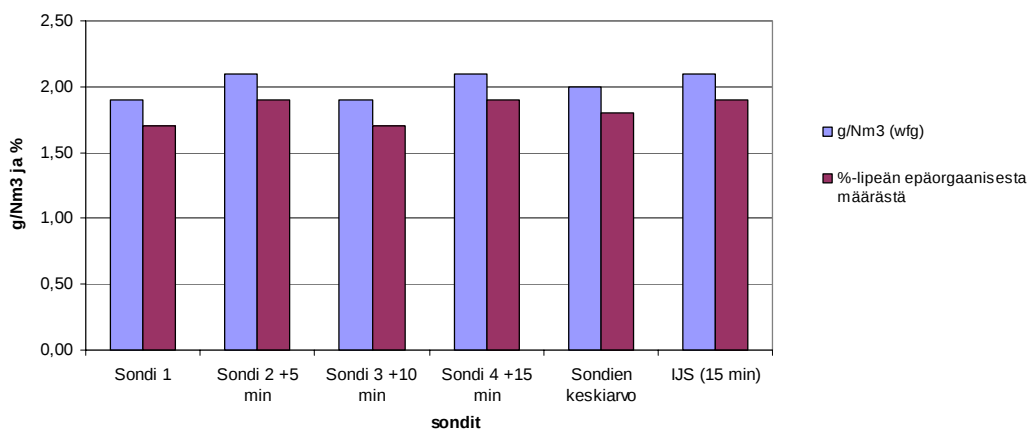
Kalibroitimittaus 12.5.09 15:36



Kuva 21. Samanaikainen mittaus minuuttisondilla ja ilmajähdytteisellä sondilla.

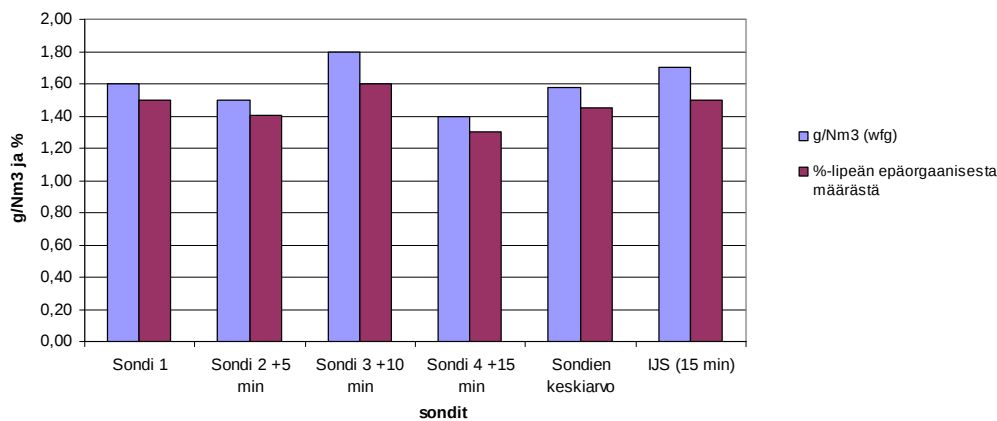


Kalibroitimittaus 13.5.09 13:13



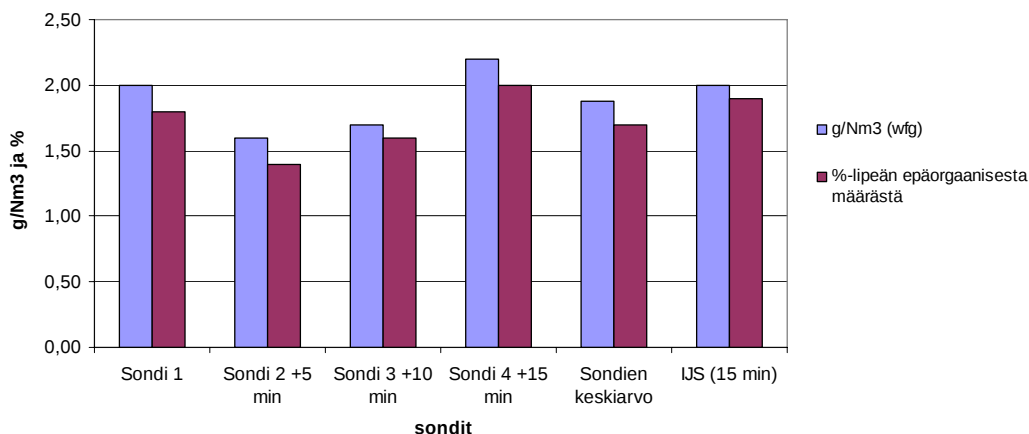
Kuva 22. Samanaikainen mittaus minuuttisondilla ja ilmajähdytteisellä sondilla.

Kalibroitimittaus 13.5.09 14:54

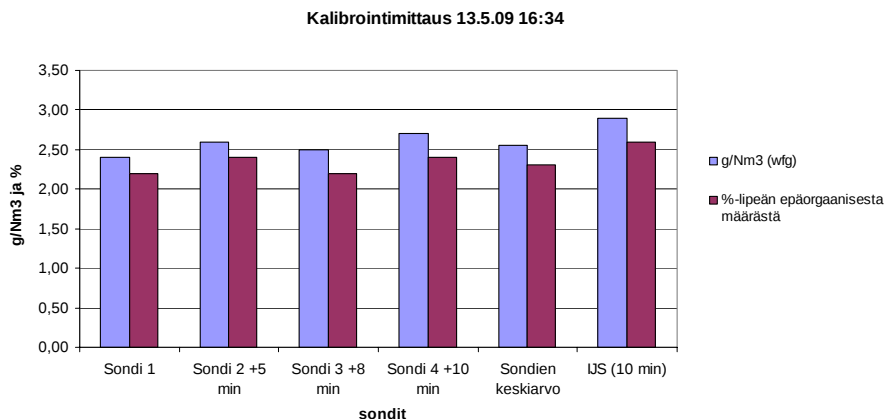


Kuva 23. Samanaikainen mittaus minuuttisondilla ja ilmajähdytteisellä sondilla.

Kalibroitimittaus 13.5.09 15:30



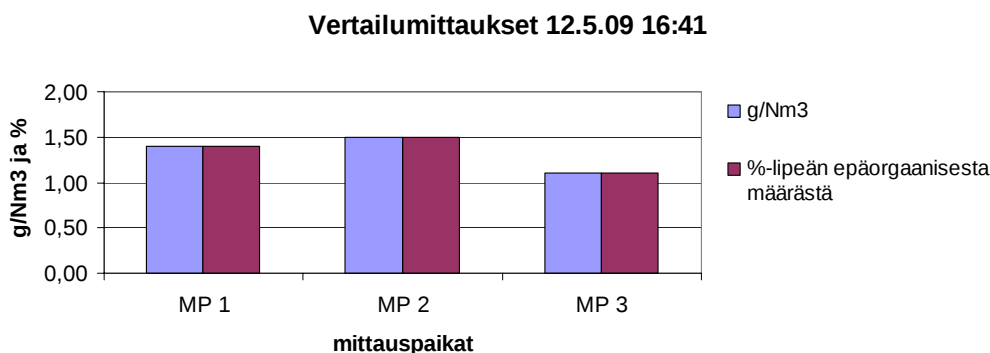
Kuva 24. Samanaikainen mittaus minuuttisondilla ja ilmajähdytteisellä sondilla.



Kuva 25. Samanaikainen mittaus minuuttisondilla ja ilmajähdytteisellä sondilla.

Kuvista 15-25 huomaa selvästi että pientä vaihtelua löytyy minuuttisondin ja ilmajähdytteisen sondin tuloksista. Vaihtelu johtuu siitä että minuuttisondilla mitataan hetkellinen (10 tai 20 s) carry-over määrä kun taas ilmajähdytteisellä sondilla mitataan pidemmän ajan (15 min) keskiarvo carry-over määrästä. Toinen syy miksi vaihtelua löytyy, on että minuuttisondia verrataan kalibrointi kuva sarjaan visuaalisesti. Tämä aiheuttaa että osumien peittävyysaste arvioidaan silmämääräisesti, joten tarkkaa arvoa osumien peittävyysasteesta ei saada. Kaiken kaikkiaan minuuttisondi on yksinkertainen ja halpa väline carry-over määrän arvioimiseen.

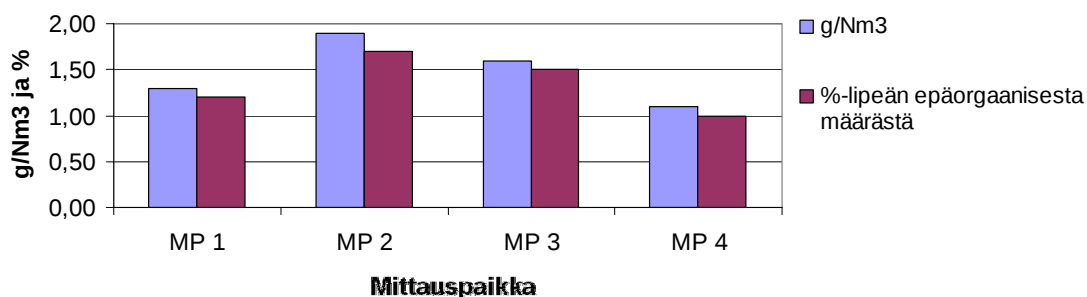
Kymissä mitattiin myös minuuttisondilla carry-over määrän vaihtelua eri kohdilla soodakattilaa. Ensimmäisenä päivänä suoritettiin yksi kappale mittaus jolla tukittiin carry-over määrän vaihtelua eri kohdilla soodakattilaa. Tämä mittaus suoritettiin nokantasolla olevissa kolmessa tarkistusluukussa. Toisena mittauspäivänä suoritettiin neljä kappaletta vertailumittausta mahdollisimman samanaikaisesti kaikissa neljässä mittauspisteessä.



Kuva 26. Vertailumittaukset kolmesta mittauspaikasta minuuttisondilla.

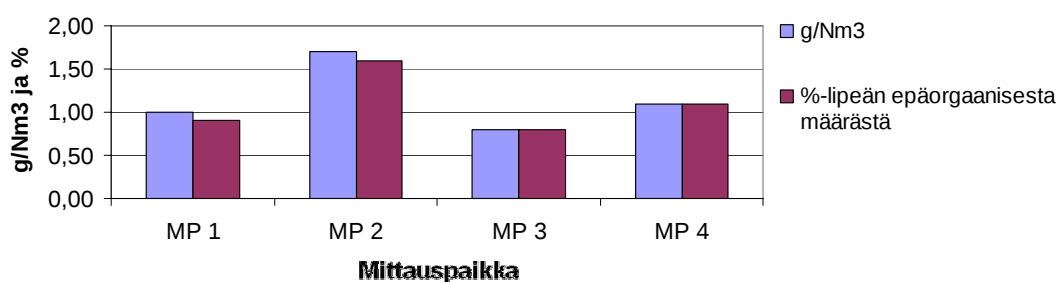


Vertailumittaukset 13.5.09 13:53



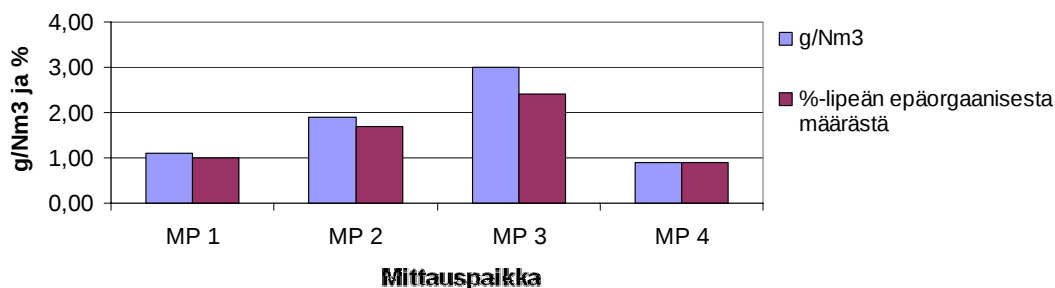
Kuva 27. Vertailumittaukset neljästä mittauspaikasta minuuttisondilla.

Vertailumittaukset 13.5.09 14:19



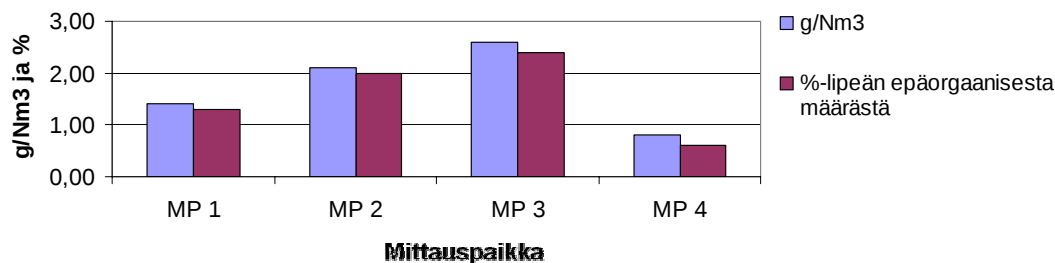
Kuva 28. Vertailumittaukset neljästä mittauspaikasta minuuttisondilla.

Vertailumittaukset 13.5.09 16:13



Kuva 29. Vertailumittaukset neljästä mittauspaikasta minuuttisondilla.

Vertailumittaukset 13.5.09 17:04



Kuva 30. Vertailumittaukset neljästä mittauspaikasta minuuttisondilla.

Minuuttisondia on mahdollista käyttää carry-over määrän vaihtelu mittaukseen eri kohdilla soodakattilaa. Toisena mittauspäivänä (kello 15 jälkeen) muodostui keko soodakattilan oikealle



puolelle. Vertailumittauksissa huomattiin että carry-over määrä kasvoi kattilan oikealla puolella suuremmaksi luultavasti keon takia.



Liite A: Kymin mittauksen tulokset taulukkomuodossa

Kalibrointimittauksia MP2							
12.5.2009 12:25	Sondi 1	Sondi 2 +5 min	Sondi 3 +10 min	Sondi 4 +15 min	Sondien keskiarvo	IJS (15 min)	MS 20s
Peittävyysaste / mm/h	38,2 %	46,2 %	37,3 %	36,2 %	39,5 %	6 mm/h	CA
g/Nm3 (w fg)	2,00	2,40	2,00	1,90	2,08	2,50	
%-lipeän epäorgaanisesta määrästä	1,90	2,30	1,80	1,80	1,95	2,30	
12.5.2009 13:00	Sondi 1	Sondi 2 +5 min	Sondi 3 +10 min	Sondi 4 +15 min	Sondien keskiarvo	IJS (15 min)	MS 20s
Peittävyysaste / mm/h	70,0 %	55,0 %	52,0 %	45,0 %	55,5 %	7,6 mm/h	VI
g/Nm3 (w fg)	3,60	2,90	2,70	2,30	2,88	3,10	
%-lipeän epäorgaanisesta määrästä	3,40	2,70	2,60	2,20	2,73	3,00	
12.5.2009 13:39	Sondi 1	Sondi 2 +5 min	Sondi 3 +10 min	Sondi 4 +15 min	Sondien keskiarvo	IJS (15 min)	MS 10s
Peittävyysaste / mm/h	25,0 %	22,0 %	28,0 %	30,0 %	26,3 %	7,6 mm/h	VI
g/Nm3 (w fg)	2,60	2,20	2,80	3,00	2,65	3,10	
%-lipeän epäorgaanisesta määrästä	2,50	2,20	2,80	2,90	2,60	3,00	
12.5.2009 15:36	Sondi 1	Sondi 2 +5 min	Sondi 3 +10 min	Sondi 4 +15 min	Sondien keskiarvo	IJS (15 min)	MS 10s
Peittävyysaste / mm/h	32,0 %	30,0 %	32,0 %	28,0 %	30,5 %	6,4 mm/h	VI
g/Nm3 (w fg)	3,10	2,90	3,10	2,70	2,95	2,40	
%-lipeän epäorgaanisesta määrästä	2,90	2,70	2,90	2,60	2,78	2,30	
13.5.2009 13:13	Sondi 1	Sondi 2 +5 min	Sondi 3 +10 min	Sondi 4 +15 min	Sondien keskiarvo	IJS (15 min)	MS 10s
Peittävyysaste / mm/h	25,0 %	28,0 %	25,0 %	28,0 %	26,5 %	6,8 mm/h	VI
g/Nm3 (w fg)	1,90	2,10	1,90	2,10	2,00	2,10	
%-lipeän epäorgaanisesta määrästä	1,70	1,90	1,70	1,90	1,80	1,90	
13.5.2009 14:54	Sondi 1	Sondi 2 +5 min	Sondi 3 +10 min	Sondi 4 +15 min	Sondien keskiarvo	IJS (15 min)	MS 20s
Peittävyysaste / mm/h	42,0 %	40,0 %	46,0 %	38,0 %	41,5 %	5,6 mm/h	VI
g/Nm3 (w fg)	1,60	1,50	1,80	1,40	1,58	1,70	
%-lipeän epäorgaanisesta määrästä	1,50	1,40	1,60	1,30	1,45	1,50	
13.5.2009 15:30	Sondi 1	Sondi 2 +5 min	Sondi 3 +10 min	Sondi 4 +15 min	Sondien keskiarvo	IJS (15 min)	MS 20s
Peittävyysaste / mm/h	52,3 %	41,1 %	46,5 %	57,4 %	49,3 %	6,8 mm/h	CA
g/Nm3 (w fg)	2,00	1,60	1,70	2,20	1,88	2,00	
%-lipeän epäorgaanisesta määrästä	1,80	1,40	1,60	2,00	1,70	1,90	
13.5.2009 16:34	Sondi 1	Sondi 2 +5 min	Sondi 3 +8 min	Sondi 4 +10 min	Sondien keskiarvo	IJS (10 min)	MS 20s
Peittävyysaste / mm/h	65,0 %	70,0 %	65,0 %	70,0 %	67,5 %	9,6 mm/h	VI
g/Nm3 (w fg)	2,40	2,60	2,50	2,70	2,55	2,90	
%-lipeän epäorgaanisesta määrästä	2,20	2,40	2,20	2,40	2,30	2,60	

Lyhenteet:

MS = Minuuttisondi mittausaika 10 s tai 20 s

IJS = Ilmajäähdytteinen sondi (mittausaika)

CA = Computer Analyzed , peittävyysaste analysoitu tietokoneella

VI = Visual Inspection, peittävyysaste määritetty vertaamalla minuuttisondikuva kalibrointikuvasarjaan



12.5.2009 16:41	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MS 20 s
Peittävyysaste	29,6 %	32,5 %	24,2 %		CA
g/Nm3 (w fg)	1,40	1,50	1,10		
%-lipeäruiskutuksesta	1,40	1,50	1,10		
13.5.2009 13:53	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MS 10 s
Peittävyysaste	18,0 %	25,0 %	22,0 %	15,0 %	VI
g/Nm3 (w fg)	1,30	1,90	1,60	1,10	
%-lipeäruiskutuksesta	1,20	1,70	1,50	1,00	
13.5.2009 14:19	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MS 20 s
Peittävyysaste	27,3 %	46,4 %	22,3 %	30,3 %	CA
g/Nm3 (w fg)	1,00	1,70	0,80	1,10	
%-lipeäruiskutuksesta	0,90	1,60	0,80	1,10	
13.5.2009 16:13	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MS 20 s
Peittävyysaste	28,0 %	50,0 %	70,0 %	25,0 %	VI
g/Nm3 (w fg)	1,10	1,90	3,00	0,90	
%-lipeäruiskutuksesta	1,00	1,70	2,40	0,90	
13.5.2009 17:04	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MS 10 s
Peittävyysaste	18,0 %	28,0 %	34,0 %	9,0 %	VI
g/Nm3 (w fg)	1,40	2,10	2,60	0,80	
%-lipeäruiskutuksesta	1,30	2,00	2,40	0,60	

MS = Minuuttisondi mittausaika 10 s tai 20 s

CA = Computer Analyzed , peittävyysaste analysoitu tietokoneella

VI = Visual Inspection, peittävyysaste määritetty vertaamalla minuuttisondikuvaa kalibrointikuvasarjaan

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY
RAPORTTISARJA

- 1/2008 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Konemestaripäivä 24.1.2008, esitelmät
Radisson SAS Roayl Hotel, Vaasa/ Oy Metsä-Botnia Ab, Kaskisten tehdas
(16A0913-E0093) 24.1.2008
- 2/2008 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Vuosikertomus 2007
(16A0913-E0094) 10.4.2008
- 3/2008 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Pöytäkirja. Vuosikokous 10.4.2008 Pohjola Vakuutus Oy, Helsinki
(16A0913-E0095)
- 4/2008 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilan pidentyneet keskeytymättömät ajoajat.
Antti Koski, Savonia-ammattikorkeakoulu.
(16A0913-E0096). 9.6.2008.
- 5/2008 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilan savukaasujen päästörajoitukset
Merja Strengell, Pöyry Forest Industry Oy
Soodakattilayhdistyksen Ympäristötyöryhmän kanssa.
(16A0913-E0097) 18.9.2008
- 6/2008 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilapäivä 29.10.2008
Scandic Rosendahl, Tampere
(16A0913-E0098)

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY
RAPORTTISARJA

- 1/2009 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Konemestaripäivä 22.1.2009, esitelmät
Sokos Hotel Vaakuna, Kouvola/UPM Kymmene Oyj, Kymin tehdas, Kuusankoski
(16A0913-E0099) 22.1.2009
- 2/2009 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Vuosikertomus 2008
(16A0913-E0100) 2.4.2009
- 3/2009 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Pöytäkirja. Vuosikokous 2.4.2009, Pöyry Industry Oy, Vantaa
(16A0913-E0101) 16.4.2009
- 4/2009 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilan keon lämmönsiirto-ominaisuudet – Kirjallisuuskatsaus
Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Professori Esa Vakkilainen
(16A0913-E0102) 30.6.2009
- 5a/2009 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Utveckling och användning av en korttidssond vid mätningar av överbäring
i sodapannor
Åbo Akademi, Niklas Vähä-Savo
(16A0913-E0103) 25.9.2009
- 5b/2009 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Minuuttison-di-projekti
Åbo Akademi, Niklas Vähä-Savo
(16A0913-E0104) 25.9.2009