

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / käyttö ja käynnissäpito

Keijo Pietilä

HIUKKASPITOISUUDEN MÄÄRITTÄMINEN SAVUKAASUISTA ISO 23210

MUKAISESTI

Opinnäytetyö 2012

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

PIETILÄ, KEIJO

Hiukkaspitoisuuden määrittäminen savukaasuista

ISO 23210 mukaisesti

Opinnäytetyö

77 sivua + 11 liitesivua

Työn ohjaaja

Tutkimusinsinööri Mikko Nykänen

Toimeksiantaja

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu / päästömittaustoriorio

Marraskuu 2012

Avainsanat

ISO 23210, PM10, PM2,5, hiukkaset, impaktori, päästömittaus

Tässä insinööriyössä on käsitelty standardin SFS-EN ISO 23210:2009 mukaista hiukkaspitoisuuden mittaamista kiinteän päästölähteen savukaasuista. Standardi määrittelee menetelmän matalapitoisten savukaasujen PM_{2,5}- ja PM₁₀- pitoisuuden määrittämiseen kaksitasoisella alipaineimpaktorilla.

Tämän insinööriyön taustalla on jatkuvasti kasvava tarve suorittaa hiukkasmittauksia erilaisten päästölähteiden savukaasuista. Työssä on laboratoriomittausten ja standardin ISO 23210 pohjalta pyritty löytämään toimintatavat, joilla käytännön mittaukset voidaan suorittaa mahdollisimman laadukkaasti. Työn tulosten on myös tarkoitus tukea tulevaisuudessa päästömittaustoriorion akkreditointia PM_{2,5}- ja PM₁₀- mittauksiin.

Työn yhteydessä tehtyjen hiukkasmittausten tulokset on käyty läpi ja todettu käyttökelpoisiksi. Samankaltaisissa olosuhteissa suoritetuista mittauksista saatiin samaa suuruusluokkaa olevia pitoisuuksia. Keräysalustojen esi- ja jälkikäsitteilyn todettiin olevan suurin epävarmuutta aiheuttava tekijä pitoisuusmittauksissa. Mittausta ennen ja sen jälkeen suoritettava laskenta on käyty läpi esimerkkilaskennan avulla.

Kanavan ulkopuolisen mittauksen aikana syntyviä lämpötilaeroja laitteistossa tutkittiin mittaamalla lämpötiloja erilaisten mittausjärjestelyjen aikana. Mittaustulosten pohjalta löydettiin toimiva mittausmenetelmä, jolla veden kondensoituminen impaktorissa ja näytteenottoputkessa vältetään. Impaktorin riittävän esilämmityksen ja mittausyhteen tiivistämisen todettiin olevan tärkeimpiä tekijöitä kosteuden tiivistymisen estämisessä.

Työssä on käsitelty myös yleistä teoriaa hiukkasten muodostumisesta, kokoluokittelusta ja terveysvaikutuksista sekä esitelty erilaisia mittausmenetelmiä ja niiden toimintaperiaatteita.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

PIETILÄ, KEIJO

Determination of Particulate Matter Concentration in Flue Gas According to ISO 23210

Bachelor's Thesis

77 pages + 11 pages of appendices

Supervisor

Mikko Nykänen, Research Engineer

Commissioned by

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu / Emission Measurement Laboratory

November 2012

Keywords

ISO 23210, PM10, PM2.5, particulate matter, impactor, emission measurement

This thesis discusses with the measurement of particle emissions from the flue gases standard in accordance with SFS-EN ISO 23210:2009. The Standard specifies a standard reference method for the determination of $PM_{2,5}$ and PM_{10} mass concentrations on stationary emission sources by using two-stage decompression-impactors.

The background of this thesis is a growing need to perform particulate measurements from a variety of particulate emission sources. The first objective of this thesis was to investigate the practices to carry out measurements can to the highest quality in practice. The objective was achieved by applying the standard ISO 23210, and by making particle emission measurements and analyzing them. The second objective of this thesis was to investigate the condensation temperatures of flue gas in a measurement device. The objective was achieved by making temperature measurements and analyzing them.

This thesis provided a measurement method and calculation of $PM_{2,5}$ and PM_{10} mass concentrations, and a measurement method which prevents the condensation of water vapour in a measurement device. The thesis discusses the general theory of particle formation, size classification, health effects, as well as examples of different methods of measurement and their operating principles.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	SYMBOLIT JA LYHENTEET	6
2	TERMIT JA MÄÄRITELMÄT	7
	2.1 Virtaukseen liittyvät termit	7
	2.2 Mittalaitteeseen liittyvät termit	8
	2.3 Mittaukseen liittyviä termejä	9
3	JOHDANTO	9
4	HIUKKASET	10
	4.1 Yleistä	10
	4.2 Terveysvaikutukset	14
	4.3 Savukaasujen hiukkaset	16
	4.4 Mittausmenetelmiä	17
	4.4.1 Massan hitauteen perustuvat menetelmät	18
	4.4.2 Suodatus	20
	4.4.3 Sähkövaraukseen perustuvat menetelmät	22
	4.4.4 Optiset menetelmät	23
5	SFS-EN ISO 23210:2009	25
6	IMPAKTORIN TOIMINTAPERIAATE	28
7	KAKSITASOINEN KASKADI-IMPAKTORI DEKATI PM10	31
8	MITTAUSLAITTEISTO	34
9	ISOKINEETTINEN NÄYTTEENOTTO	40
10	LASKENTA	41
	10.1 Lähtöarvot	42
	10.2 Tilavuusvirtaukset ja katkaisukohtat	47
	10.3 Mittaustulosten laskenta	54
	10.4 Mittausepävarmuus	56
11	VALMISTELU, MITTAUSMENETTELY JA JÄLKIKÄSITTELY	56

12 MITTAUSTULOKSET	62
12.1 PM _{2,5} - ja PM ₁₀ - pitoisuusmittaukset	62
12.1.1 Pitoisuusmittausten tulosten arviointi	65
12.1.2 Huomioita mittauksista	66
12.2 Lämpötilamittaukset	68
12.2.1 Lämmitysaika	69
12.2.2 Lämpötilat hiukkasmittauksen aikana	70
12.2.3 Lämpötilamittausten tulosten arviointi	74
13 YHTEENVETO	76

LIITTEET

- Liite 1. Dekati PM10 -impaktorin esite
- Liite 2. Pall Life Sciences suodatinvalmistajan tuotetiedot
- Liite 3. Tarvittavat vakiot laskentaan
- Liite 4. Laskenta, Mathcad muodossa
- Liite 5. Mittauspöytäkirjapohja

1 SYMBOLIT JA LYHENTEET

A	erottelukyky
BF	pohjasuodatin
$c_{1,i}$	i :des pitoisuus arvo ensimmäisestä mittaussysteemistä
$c_{2,i}$	i :des pitoisuus arvo toisesta mittaus systeemistä
C	Cunninghamin kerroin
CP2	impaktorin toisen jakson keräysalusta
d_{ae}	aerodynaaminen halkaisija
d_e	ekvivalenttinen volymetrinen halkaisija
d_{in}	impaktorin suuttimen halkaisija
d_{nozzle}	sisääntulosuuttimen halkaisija
d_{50}	katkaisukohdan halkaisija
E	keräyskyky
f_n	vesihöyryn massakonsentraatio standardiolosuhteissa kuivalla kaasulla
g	putoamiskiihtyvyys
i	sarjaelementtinumero, $i=1, 2, 3, \dots m$
j	sarjaelementtinumero, $j=1, 2, 3, \dots n$
l_{in}	impaktorin suuttimen pituus
m	näytteen massa
$m(\text{BF})$	partikkelien massa pohjasuodattimessa
$m(\text{CP2})$	partikkelien massa toisen jakson keräysalustalla
M	moolimassa
n	mittausparien lukumäärä
N	impaktorin suuttimien lukumäärä
p	absoluuttinen kaasun paine
p_{atm}	ilmakehän paine mittaustaikalla (ilmanpaine)
p_n	standardipaine
p_{st}	mittauspisteen staattisen paineen ja mittaustaikan ilmanpaineen ero
r	tilavuusosuus
R	kaasuvakio
Re	Reynoldsin luku
s	välimatka suuttimen loppumisesta impaktorin tasolle
s_D	standardipoikkeama mittaustuloksissa
S	Sutherlandin kerroin

S_t	Stokesin luku
T	kaasun lämpötila
T_n	standardilämpötila
T_{crit}	kriittinen lämpötila
v_{fg}	savukaasun nopeus
v_{in}	kaasun nopeus impaktorin suuttimessa
v_{nozzle}	kaasun nopeus sisääntulosuuttimessa
v_p	partikkelin asettumisnopeus
V	näytteen tilavuus
V_n	näytteen tilavuus standardiolosuhteessa kuivasta kaasusta
\dot{V}	tilavuusvirtaus
WV	vesihöyry
λ	keskimääräinen vapaa kulkumatka
χ	dynaaminen muotokerroin ei-pallomaisille partikkeleille
η	kaasun dynaaminen viskositeetti
ρ_n	kuivan kaasun tiheys standardiolosuhteessa
$\rho_{n,WV}$	vesihöyryn tiheys standardiolosuhteessa
$\rho_{p,t,h}$	kaasun tiheys vallitsevassa olosuhteessa
ρ_p	partikkelin massatiheys
$\rho_{O,P}$	partikkelin yksikkömassatiheys (1g/cm^3)

2 TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

2.1 Virtaukseen liittyvät termit

Aerodynaaminen halkaisija: Hiukkasen aerodynaaminen halkaisija kuvaa sellaisen hiukkasen kokoa, jolla on sama loppunopeus painovoiman vaikutuksesta kuin pyöreällä hiukkasella, jonka tiheys on 1g/cm^3 , seisovassa ilmassa ja samassa olosuhteessa (lämpötila, paine ja suhteellinen kosteus).

Katkaisukohta halkaisija: Aerodynaaminen halkaisija, jossa impaktorin tason erottelukyky on 50 %.

PM₁₀: Partikkelit, jotka tulevat erotelluksi sisääntulosta 50 %:n tehokkuudella katkaisukohdan aerodynaamisella halkaisijalla 10 µm.

PM_{2,5}: Partikkelit, jotka tulevat erotelluksi sisääntulosta 50 %:n tehokkuudella katkaisukohdan aerodynaamisella halkaisijalla 2,5 µm.

Reynoldsin luku: Dimensioton suhdeluku, joka kuvaa virtauksen laminaarisuutta / turbulentsuutta. Reynoldsin luku määritellään kaasuvirtauksen inertiavoimien ja kitkavoimien suhteena.

Stokesin luku: Dimensioton suhdeluku, joka kuvaa tilannetta, jossa virtaus muuttuu nopeasti. Se vertaa hiukkasen inertiaa virtauksen suunnanmuutokseen liittyvään karakteriseen pituusmittaan.

Cunninghamin kerroin: Korjauskerroin, joka ottaa huomioon muutoksen partikkeleiden ja kaasufaasin välisessä vuorovaikutuksessa.

Sutherlandin vakio: Kaasun ominaisvakio, jota käytetään viskositeetin riippuvuuden laskemiseen lämpötilasta.

Aerosoli: Aerosoli tarkoittaa kaasumaista väliainetta ja siinä leijuvia kiinteitä tai/ja nestemäisiä hiukkasia, joilla on merkityksettömän pieni putousnopeus.

2.2 Mittalaitteeseen liittyvät termit

Suodatinasetelma: Asetelma koostuu kahdesta keräysalustasta ja yhdestä pohjasuodattimesta.

Keräysalusta: Tasomainen alusta (alumiinifolio, kuitusuodatin tai polycarbonaatti kalvo), johon partikkelit kerääntyvät impaktorissa.

Pohjasuodatin: Tasomainen suodatin, johon pienemmät kuin PM_{2,5} partikkelit kerääntyvät.

Keräysalustan pohja: Kannatin, johon keräysalusta kiinnitetään.

Pohjasuodattimen alusta: Reikälevy, jonka päälle pohjasuodatin kiinnitetään.

Hajoitin: Kartiomainen osa ennen suutintasoa estämään sakkausta (jos tarvitaan).

2.3 Mittaukseen liittyviä termejä

Mittauspaikka: Paikka, joka sijaitsee savukaasukanavan välittömässä läheisyydessä käsittäen mittaustason, yhteen, mittaustasanteen, työskentelyalustan, ympäristön ja tekniset laitteet.

Mittausyhde: Mittaustasossa savukaasukanavaan sijoitettu putkimainen liityntä, jossa on sisään- ja ulostulo.

Mittaustaso: Taso, joka sijaitsee kohtisuorassa savukanavan keskilinjaan nähden näytteenotto kohdassa.

3 JOHDANTO

Insinööriyön tavoitteena on luoda edellytykset Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästömittaustalokatoriolle hiukkaspitoisuuksien mittaamiseen Dekati® PM10 -impaktorilla SFS-EN ISO 23210:2009 (myöhemmin käytetään myös lyhennettynä ISO 23210) standardin mukaisesti. ISO 23210 standardi määrittelee menetelmän PM₁₀ - ja PM_{2,5} -pitoisuuksien mittaamiseksi kiinteän päästölähteen matalapitoisista savukaasuista kaksitasoisella impaktorilla. Laitteistolla tehtyjen mittausten ja niistä saadun kokemuksen pohjalta on tarkoitus laatia menetelmäohje standardin mukaisiin mittauksiin käytännön olosuhteissa. Työhön kuuluu myös mittauspöytäkirjan ja siihen tarvittavan laskennan laatiminen Excel-muodossa. Insinööriyöhön liittyvät mittaukset tehtiin keväällä 2012 Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratorion biomassakattilan savukaasuista.

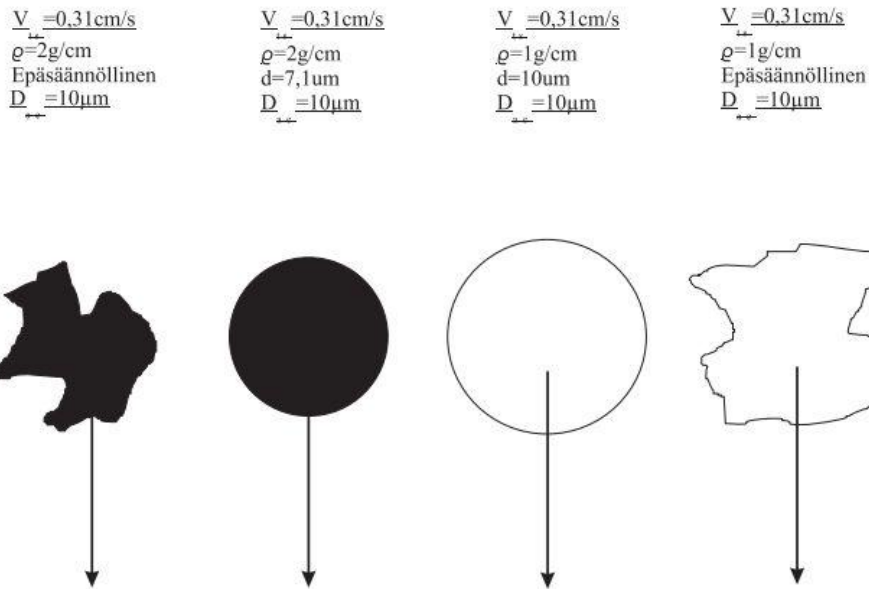
Decati®PM10-impaktori on hankittu Kymenlaakson ammattikorkeakoulun Tuhka-hankkeeseen liittyviä hiukkasmittauksia varten. Syksyllä 2011 olin harjoittelijana energiatekniikan laboratoriossa suorittamassa näitä mittauksia ja tuolloin minulle tarjottiin tätä insinööriyön aihetta. Työn taustalla on jatkuvasti lisääntyvä tarve suorittaa hiukkasmittauksia erilaisista laitoksista viranomaisten vaatimuksesta. Insinööriyön tavoitteena on myös tukea tulevaisuudessa päästömittaustalokatorion akkreditointia ISO 23210 standardin mukaisiin mittauksiin.

4 HIUKKASET

4.1 Yleistä

Meitä ympäröivässä ilmassa leijuu aina hyvin pienikokoisia kiinteässä ja nestemäisessä olomuodossa olevia hiukkasia. Ilma muodostaa näiden hiukkasten kanssa seoksen, jota kutsutaan aerosoliksi. Kiinteitä ja nestemäisessä eli sulassa muodossa olevia hiukkasia voidaan kutsua myös aerosolihiukkasiksi.

Hiukkasten koko, muoto ja koostumus vaihtelevat huomattavasti. Suurin osa hiukkasista on niin pieniä, ettei niitä pysty paljaalla silmällä havaitsemaan. Mittayksikkönä käytetään mikrometriä tai ultrapienien hiukkasten kanssa nanometriä. Aerosolihiukkasten kokojakaumana pidetään 1 nm – 100 μm . Kokonsa mukaan hiukkaset jaetaan yleisesti neljään ryhmään. **Suuret hiukkaset** ovat halkaisijaltaan yli 10 μm , **hengitettävät karkeat hiukkaset** ovat halkaisijaltaan 2,5 – 10 μm , **hengitettävät pienhiukkaset** alle 2,5 μm ja **ultrapienet hiukkaset** alle 0,1 μm . Pienten hiukkasten ollessa kyseessä käytetään myös termiä moodi, jolla tarkoitetaan kokoluokkaa. Nukleatiomoodi on pienin kokoluokka 0,001 – 0,01 μm , Aitkenmoodi on kokoluokka 0,01 – 0,1 μm ja Akkumulaatiomoodi 0,1 – 1 μm (Hämeri ym. 2005:24). On olemassa myös muita käytäntöjä luokitella hiukkasia. Hiukkasten koon määrittäminen geometrinen mittojen mukaan on usein mahdotonta, koska niiden muoto vaihtelee suuresti. Käytössä on kolme erilaista määrittelytapaa: optinen, liikkuvuus - ja aerodynaaminen halkaisija. Määrittelytapojen tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia keskenään. Tässä työssä käytetään aerodynaamista halkaisijaa. Kuvassa 1 on esitetty neljä erilaista hiukkasta, joiden tiheys ja muoto poikkeavat toisistaan. Kaikilla kuvan hiukkasilla on kuitenkin sama aerodynaaminen halkaisija, 10 μm .

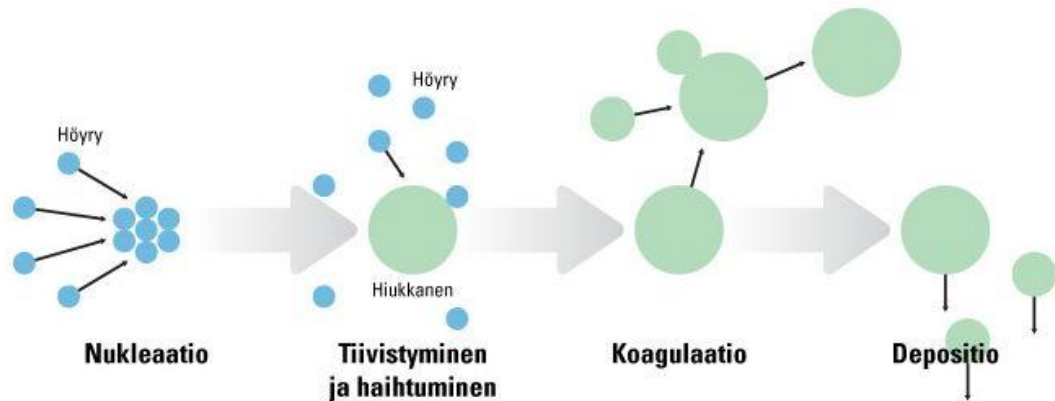


Kuva 1. Esimerkkejä hiukkasista joilla on sama aerodynaaminen halkaisija (Hämeri ym. 2005:44)

Hiukkasten koostumus riippuu niiden syntytavasta – ja lähteestä. Ilmassa olevat karkeat hiukkaset ovat pääosin peräisin maaperästä, kuten liikenteen maasta nostattamaa katupölyä, maanmuokkauksen aiheuttamaa pölyä sekä tuulen nostattamaa eroosion ja rapautumisen seurauksena irronnutta kiviainesta. Karkeiden hiukkasten synty tapa on yleensä mekaaninen. Siitepölyt, itiöt ja meren suola hiukkaset kuuluvat myös karkeisiin hiukkasiin. Suurten ja karkeiden hiukkasten yleisimpiä aineita ovat maankuoren orgaaninen – ja epäorgaaninen materiaali.

Pienhiukkasten merkittävimpiä paikallisia lähteitä ovat liikenteen pakokaasut ja puun pienpolto. Muita ihmisen aiheuttamia lähteitä on mm. energiantuotannon ja teollisuuden polttoprosessit. Ihmisen toiminnasta riippumattomia lähteitä ovat mm. metsäpalot, tulivuoren purkaukset, meret ja kasvillisuus. Pienhiukkaset kulkeutuvat ilmavirtausten mukana jopa tuhansia kilometrejä. Tätä kutsutaan kaukokulkeutumaksi. Pienhiukkasia syntyy runsaasti epätäydellisessä palamisessa. Esimerkiksi puuta käyttävä pientulisija tuottaa suhteellisen paljon nokea ja orgaanisia yhdisteitä. Erilaisten polttolaitosten palamisessa syntyvät hiukkaset ovat primäärihiukkasia eli syntyvät suoraan laitoksessa. Pienhiukkasia syntyy myös tiivistymällä kaasusta. Näitä hiukkasia kutsutaan sekundaarihiukkasiksi. Syntymekanismin ensimmäistä vaihetta, jossa ylikylläisestä höyrystä alkaa tiivistyä hiukkasen alkio kutsutaan nukleaatioksi. Kun hiukkasen pinnalle tiivistyy höyryä, se kasvaa ja vastaavasti kun hiukkasesta höyrysty materiaalia, se piene-

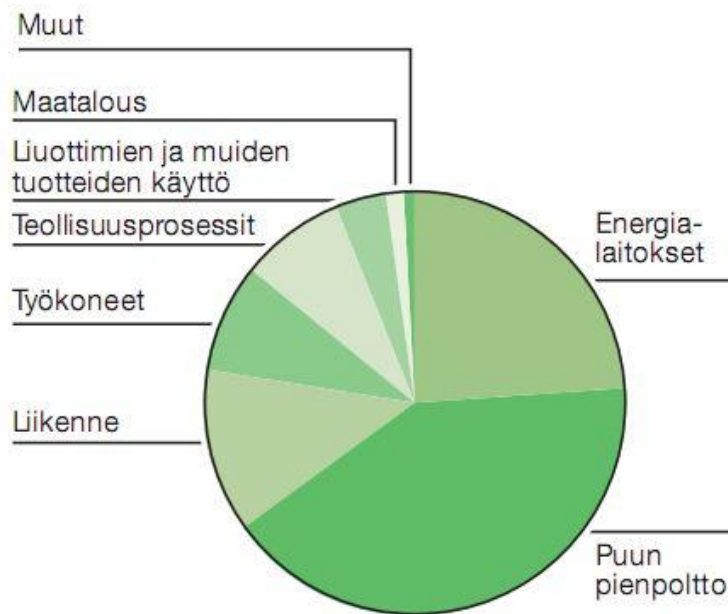
nee. Hiukkasten törmäily keskenään saa ne tarttumaan toisiinsa ja muodostuu suurempia hiukkasia. Tätä kutsutaan koagulaatioksi. Depositioilla tarkoitetaan hiukkasen poistumista ilmasta erilaisilla mekanismeilla. Kaaviokuva prosessista on esitettyä kuvassa 2.



Kuva 2. Kaaviokuva aerosolidynaamisesta prosessista (Hiukkaskäsikirja:aerosolien dynamiikka)

Pääasialliset depositiomekanismit ovat impaktio, interseptio, diffuusio, sedimentaatio, ja sähköstaattinen vuorovaikutus. **Impaktiolla** tarkoitetaan suoraa törmäystä, kun hiukkanen ei kykene seuraamaan ilmavirtausta massan hitauden johdosta. **Interseptiossa** hiukkanen kulkee ilmavirran mukana ja kokonsa takia sivuaa estettä ja tarttuu siihen. Ilmamolekyylien lämpöliike aikaansaa niiden törmäilyä hiukkasiin, josta johdetaan hiukkasten ns. Brownin liike. Brownin liike aiheuttaa hiukkasten hakeutumisen alhaisemman hiukkaspitoisuuden suuntaan. Ilmiötä kutsutaan **diffuusioksi**. **Sedimentaatiolla** tarkoitetaan hiukkasten poistumista ilmasta gravitaation vaikutuksesta eli putoamalla (Hiukkaskäsikirja:depositio.).

Kuvan 2 prosessi tapahtuu ilmakehässä. Siihen vaikuttaa myös auringonvalo sekä erilaiset kemialliset reaktiot. Tästä johtuen ilmakehässä muodostuvien pienhiukkasten koostumusta on vaikea tämän työn puitteissa lähteä erittelemään. Karkeasti voidaan todeta, että pienhiukkaset koostuvat noesta, tuhkasta, kaasumaisten hiilivetyjen muodostamista orgaanisista hiukkasista sekä rikkidioksidista ja typen oksideista muodostuneista epäorgaanisista hiukkasista. Kuvassa 3 on esitetty Suomen ensisijaiset pienhiukkasten päästöjen lähteet vuonna 2004.



Kuva 3. Suomen ensisijaiset pienhiukkasten lähteet vuonna 2004 (Salonen ym. 2006:9)

Hiukkasia on aina ilmassa, mutta niiden pitoisuus ja kokojakauma vaihtelevat suuresti. Pitoisuus ilmoitetaan joko määrän tai massan mukaan tiettyä tilavuusyksikköä kohti. Lukupitoisuus ilmoitetaan yleensä kp/cm^3 ja massapitoisuus $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (savukaasulle mg/m^3). Hiukkaspitoisuuksia ilmoitetaan myös kokoluokittain PM (particulate matter) massapitoisuusarvoina. Yleisesti käytettyjä kokoluokkia on **PM10** (alle $10\ \mu\text{m}$), **PM2.5** (alle $2,5\ \mu\text{m}$), **PM0.1** (alle $0,1\ \mu\text{m}$) ja **PM10-2.5** (välillä $10\ \mu\text{m} - 2,5\ \mu\text{m}$). Kokojakaumasta puhuttaessa tarkoitetaan hiukkasten määrää koon funktiona. Se voidaan ilmoittaa hiukkasten lukumäärään tai massaan perustuen. Yleensä hiukkasten suurin lukumäärä on keskittynyt ultrapienille hiukkasille ja massa suuremmille hiukkasille. Aerosolit voivat periaatteessa koostua vain yhdestä hiukkaskoosta (monodispersiivinen), mutta käytännössä ne koostuvat aina useiden kertaluokkien kokoalueesta (polydispersiivinen). Kokojakauman kuvaamiseen käytetään mm. lognormaalialueita ja diskreettiä jakaumaa.

Lognormaalilla jakaumalla voidaan usein kuvata aerosolihhiukkasten kokojakaumia, kun tunnetaan kolme parametria: geometrinen keskihalkaisija, geometrinen keskihajonta ja kokonaispitoisuus. Jatkuvan lognormaalialueen jakauman on todettu kuvaavan melko hyvin useiden aerosolien kokojakaumaa. Jakauman geometrinen keskihalkaisija on sama kuin mediaanihalkaisija eli puolet hiukkasista on suurempia ja toinen puoli

pienempiä. Tieteellistä todistusta sen käytölle ei kuitenkaan ole olemassa ja hallitsematon käyttö saattaa johtaa virheisiin. On monia käytännön tilanteita, jolloin kokojakauma poikkeaa lognormaalista muodosta. Näissä tilanteissa kokojakauma ei noudata minkään funktion muotoa, vaan on käytettävä **diskreettiä jakaumaa** (Raiko ym. 2002:237.).

4.2 Terveysvaikutukset

Ilmansaasteiden vaikutusta ihmisten terveyteen on tutkittu 1950-luvulta lähtien. Vasta 1990-luvulla menetelmien kehittymisen myötä löydettiin kiistattomia todisteita siitä, että yhdyskuntailmassa olevien hiukkasten määrällä on selkeä yhteys kuolleisuuteen. Vuonna 1993 Harvardin yliopisto julkisti niin sanotun kuuden kaupungin tutkimuksen. Tutkimus osoitti, että pitkäksi ajaksi kohonnut hiukkaspitoisuus lyhensivät merkittävästi elinikää. Pienet hiukkaset arvioitiin haitallisemmiksi kuin suuret. 2000-luvulla tutkijat ovat päätyneet siihen, että suurin terveydellinen haittatekijä ympäristössämme ovat hiukkasmaiset saasteet yhdyskuntailmassa (Salonen ym. 2006:5.).

Yhdyskuntailman hiukkasten terveysvaikutukset vaihtelevat suuresti eri yksilöillä. Herkimmin oireilevat astmaatikot, iäkkäämmät sepelvaltimotautia ja keuhkohtaumia sairastavat sekä lapset. Kevät on Suomessa kaupunkien ilmanlaadun kannalta ongelmallisinta aikaa. Tuolloin talven aikana tiealueille kertynyt hiekoitushiekka sekä renkaista ja asfaltista irronnut materiaali pölyää ilmassa lumien sulettua. Samaan aikaan on myös pahin siitepölykausi meneillään. Nämä kevääseen ajoittuvat hiukkuhuiput ovat pääosin suuria - ja karkeita hengitettäviä hiukkasia. Pienhiukkasten määrään ei vuodenajoilla juurikaan ole merkitystä. Terveysten kannalta pahin pienhiukkasten tuottaja on autojen pakokaasut, jotka purkautuvat ilmaan suoraan hengityskorkeudella. Myös puun pienpoltto voi aiheuttaa paikallisesti suuria pienhiukkaspitoisuuksia. Satunnaisesti myös kaukokulkeumat voivat lisätä pienhiukkasten määrää huomattavasti, esimerkiksi Venäjällä yleisten metsäpalojen hiukkaspäästöt voivat kulkeutua Suomeen. Pitkittyneet suuret pienhiukkaspitoisuudet ulkoilmassa aiheuttavat myös sisäilman laadun heikkenemistä.

Suuret hiukkaset jäävät pääosin nenään ja nieluun, jossa ne aiheuttavat lieviä ärsytysoireita kuten nuhaa, yskää sekä kurkun ja silmien kutinaa ja kirvelyä. Suuret hiukkaset poistuvat elimistöstä nopeasti yskimällä ja aivastelemalla sekä hengitysilman

mukana. **Karkeat hiukkaset** tunkeutuvat keuhkoputkiin saakka, josta ne poistuvat li-
manerityksen ja värekarvatoiminnan ansiosta tuntien kuluessa. Pitkään kestävät hengi-
tyssairaudet kuten astma ja keuhkohtaumatauti muuttavat hengitysteiden rakennetta
ja värekarvojen toimintaa, mikä hidastaa hiukkasten poistumista keuhkoista. **Pien-
hiukkaset** tunkeutuvat pieniin keuhkoputkiin ja keuhkorakkuloihin saakka. Poistumi-
nen elimistöstä on hidasta, mikä nostaa pitoisuuksia. **Ultrapienet hiukkaset** voivat
kulkeutua keuhkorakkuloista verenkiertoon ja edelleen sisäelimiin. Poistuminen eli-
mistöstä voi olla erittäin hidasta tai ne jäävät sinne pysyvästi. Vaikutukset elimistössä
riippuvat hiukkasen koostumuksesta. Esimerkiksi epätäydellisestä palamisesta synty-
vät PAH-yhdisteet voivat tuottaa muuntuneita DNA-molekyylejä, jotka puolestaan li-
säävät syöpäriskiä (Salonen ym. 2006:14). Pienet ja etenkin ultrapienet hiukkaset ovat
siis terveyden kannalta kaikkein vaarallisimpia. Niiden koostumus on usein suuria
hiukkasia haitallisempi ja niiden poistuminen kehosta kestää kauan. Hengitettävät
karkeat hiukkaset aiheuttavat ongelmia ihmisille joilla on jokin perussairaus, ja suur-
ten hiukkasten vaikutus on lähinnä viihtyvyyttä heikentävä. Taulukossa 1 on esitetty
pienhiukkasten (PM2.5) vaikutuksia terveyteen Euroopassa ja Suomessa vuonna 2000.

Taulukko 1. Pienhiukkasten (PM2,5) vaikutuksia terveyteen Euroopassa ja Suomessa
vuonna 2000 (Salonen ym. 2006:20)

Arvioitu terveydellinen haitta	EU25	Suomi
Ennenaikaisia kuolemantapauksia	347 900	1 270
Menetettyjä elinvuosia	3 618 700	13 840
Imeväiskuolemia (0-1 v)	677	2
Kroonisia keuhkoputken- tulehduksia (27 v →)	163 800	620
Hengitys- ja sydänsairaiden sairaalaan ottoja (0-100 v)	100 300	383
Lasten hengitystieläkkeiden käyttöpäiviä (5-14 v)	4 218 500	11 310
Aikuisten hengitystieläk- keiden käyttöpäiviä (20 v →)	27 741 700	104 450
Lasten alempien hengitys- teiden oirepäiviä (5-14 v)	192 756 400	778 870
Työikäisten vajaa- kuntoisuuspäiviä (15-64 v)	347 687 000	1 323 390
Taloudelliset menetykset	268–781 miljardia euroa/vuosi	1–2,9 miljardia euroa/vuosi

4.3 Savukaasujen hiukkaset

Tässä työssä perehdytään savukaasujen hiukkaspitoisuuksien määrittämiseen, joten on aiheellista tutustua myös polttoprosessien tuottamien hiukkasten syntymiseen hiivenen tarkemmin.

Polttoprosesseissa savukaasujen mukana kulkeutuvat erilaiset höyryt ja hiukkaset muodostavat aerosolin, jota kutsutaan palamis-aerosoliksi. Savukaasu sisältää pääkomponentit happi (O_2), typpi (N_2), hiilidioksidi (CO_2) ja haitalliset komponentit häkä (CO), rikkidioksidi (NO_2) sekä pieninä pitoisuuksina typen oksideja (NO_x). Kaasumolekyylin koko on noin 0,2 – 0,6 nm. Savukaasu sisältää myös useita erilaisia höyryjä, jotka voivat tiivistyä joko kemiallisen reaktion tai savukaasun jäähtymisen seurauksena. Savukaasuissa on myös aina aerosolihiuksia, jotka ovat suurempia kuin kaasumolekyylit (1 nm >). Kaasumolekyylit ja pienet hiukkaset käyttäytyvät polttoprosessissa eri tavalla. Hiukkasen törmätessä esimerkiksi lämmönsiirtopintaan se tarttuu siihen kiinni. Kaasumolekyylin törmäys samaan pintaan on puolestaan kimmoisa eli se pomppaa takaisin savukaasuvirtaukseen. Kaasumolekyylin kimmoisuus aikaansaa kaasun kokonaispaineen. Savukaasujen sisältämien hiukkasten maksimikoko riippuu prosessista ja virtausolosuhteista. Harvoin havaitaan yli 100 μm hiukkasia ennen hiukkaspuhdistimia. Toimivan hiukkaspuhdistimen jälkeen hiukkaset ovat suurimmalta osin alle 10 μm , esimerkiksi kivihiilen pölypoltossa keskimääräinen hiukkasten koko on 2 μm sähkösuotimen jälkeen (Raiko ym. 2002:233 - 234.).

Kaasumaisen yhdisteen kaikki molekyylit ovat identtisiä. Hiukkasten koko puolestaan vaihtelee välillä 1 nm – 100 μm ja ulkomuoto sekä koostumus vaihtelevat yleensä koosta riippuen. Palamisprosessissa syntyy useita erilaisia hiukkastyyppejä. Esim. kivihiilen pölypoltossa tuhkan höyrystyneistä komponenteista syntyy tiivistyessä alle 0,5 μm :n hiukkasia, joilla on ketjumainen rakenne. Ketjut muodostuvat primäärihiukkasista, joiden halkaisija on luokkaa 30 – 70 nm. Polttoaineesta vapautuvien hiilivetyjen palaessa epätäydellisesti syntyy pieniä ketjumaisia nokihiukkasia. Ne muodostuvat noin 30 nm:n primääripalloista ja ovat pituudeltaan noin 0,1 μm . Höyrystymättömästä tulkasta syntyy valtaosin yli 1 μm :n hiukkasia ja palamattomasta polttoaineesta yli 5 μm :n hiukkasia. Tietyissä kokoluokassa havaitaan yleensä hiukkasia, joiden koostumus vaihtelee suuresti. Epäorgaaniset hiukkaset ovat lähinnä metallioksideja, mutta myös klorideja, sulfaatteja ja karbonaatteja havaitaan. Nokihiukkaset ovat lähinnä

amorfista hiiltä, joiden pinnalle tiivistyy polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH). Aerosolin höyrykomponenttien määrä ja koostumus riippuu tarkastelulämpötilasta. Tulipesälämpötiloissa tyypillisesti havaitaan höyryinä metallien oksideja, klorideja ja sulfaatteja. Alle 200 °C:n lämpötiloissa merkittäviä höyrykomponentteja ovat vesihöyry sekä rikki – ja suolahappo (Raiko ym. 2002:233 - 234.).

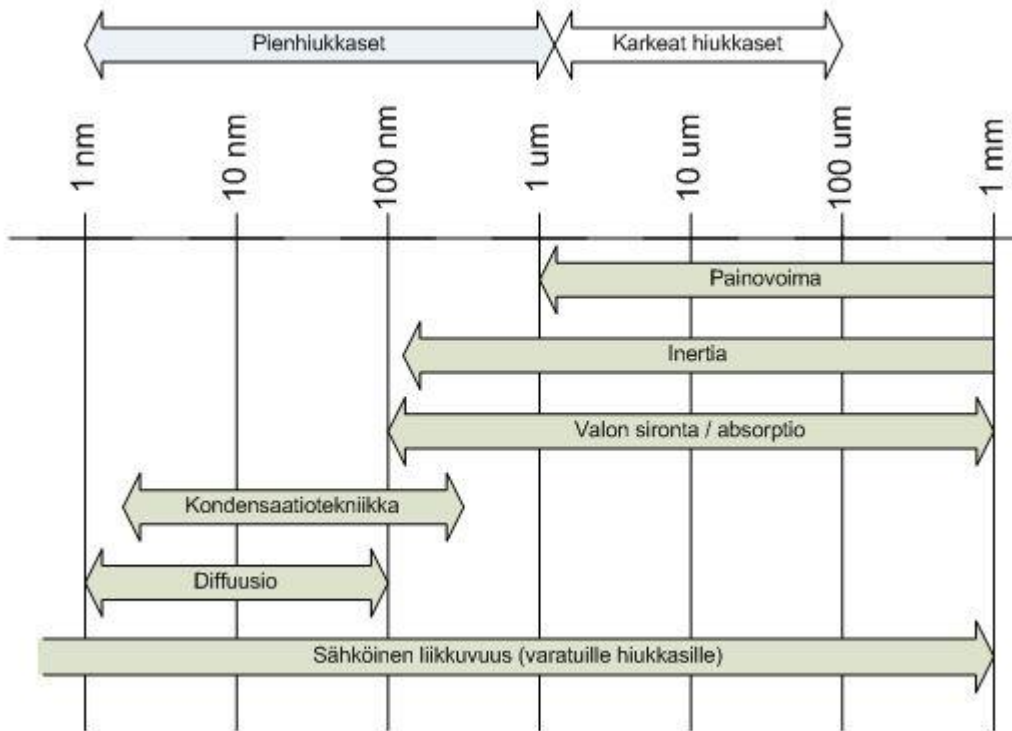
Palamisen yhteydessä polttoaineesta vapautuneet höyrymuodossa olevat aineet jäähtyvät edetessään prosessissa. Jäähtymisen yhteydessä syntyy hyvin ylikylläistä höyryä, joka pyrkii tiivistymään. Höyrymolekyylit takertuvat toisiinsa muodostaen ryppäitä ja saavuttavat niin sanotun kriittisen koon (homogeeninen nukleaatio). Kriittisen koon omaavat ryppäät ovat pienimpiä systeemissä esiintyviä hiukkasia (10^{-10} m). Nämä alkeishiukkaset kuitenkin kasvavat hyvin nopeasti törmäillessään toisiinsa (agglomeraatio). Alkeishiukkasten kasvua lisää vielä kaasumaisten yhdisteiden tiivistyminen niiden pinnoille (kondensaatio). Hiukkasten syntyminen homogeenisella nukleaatiolla vaatii suuria höyryn ylikyllästystiloja. Nämä voivat syntyä adiabaattisen laajenemisen, sekoittumisen ja lämmön siirtymisen kautta. Myös kemialliset reaktiot saattavat johtaa ylikyllästystilaan. Lämpötilan edelleen laskiessa syntyneiden hiukkasten pinnalle tiivistyy höyryä, joka kasvattaa niiden kokoa ja muuttaa koostumusta. Tätä ilmiötä kutsutaan heterogeeniseksi tiivistymiseksi. Kahden nestemäisen hiukkasen törmätessä toisiinsa ne sulautuvat yhteen ja muodostavat suuremman pallomaisen hiukkasen (koagulaatio). Jos törmäävät hiukkaset ovat kiinteitä tai vain osittain sulia, ne eivät sulaudu yhdeksi pallomaiseksi hiukkaseksi, vaan muodostavat agglomeraatteja eli ka-
saumia (Raiko ym. 2002:239 - 243.). Prosessi on vastaavanlainen kuin ilmakehässä tapahtuva hiukkasen muodostuminen ja muuntuminen, joka on esitettyä aiemmin kuvassa 2 sivulla 14.

Polttoprosessissa syntyvien hiukkasten koko, rakenne ja koostumus riippuvat monista osatekijöistä. Määrävin tekijä on käytettävä polttoaine ja itse polttoprosessi. Palamislämpötila sekä savukaasujen lämpötilan – ja paineen muutokset prosessin eri vaiheissa vaikuttavat myös hiukkasten muodostumiseen sekä kerääntymiseen lämmönsiirtopinnoille.

4.4 Mittausmenetelmiä

Tässä työssä käsitellään savukaasujen hiukkaspitoisuuden mittaamista, mutta menetelmät ovat vastaavanlaisia myös ympäristön ilmanlaatua tarkkailtaessa. Menetelmiä

on monenlaisia ja ne perustuvat erilaisiin fysikaalisiin ilmiöihin, kuten painovoima, inertia, sähkövaraus sekä valon sironta ja absorptio. Menetelmää valittaessa tulee tietää, mitä ollaan mittaamassa, eli halutaanko tarkastella hiukkaspitoisuuksia jatkuva-toimisesti vai otetaanko savukaasusta näyte jollakin aikavälillä ja tarvitaanko kappale – vai massapitoisuus. Tulee myös tietää, tarvitaanko kokojakauma ja millä tarkkuudella, vai riittääkö pelkästään kiintoainepitoisuuden selvittäminen. Mittausmenetelmillä on fysikaalisia rajoituksia ja ne soveltuvat parhaiten vain tietyille kokoaluille. Niitä tulisikin käyttää useampia rinnakkain. Monessa mittalaitteessa hyödynnetäänkin useampaa kuin yhtä fysikaalista ilmiötä. Hiukkasten koostumuksen ja muodon selvittäminen vaatii yleensä näytteen keräämistä talteen ja analysointia laboratoriossa. Kuvassa 4 on esitetty eri mittausmenetelmien soveltuvuuksia.



Kuva 4. Mittausmenetelmien käyttöalueet (Hiukkaskäsikirja:hiukkasten mittaaminen)

4.4.1 Massan hitauteen perustuvat menetelmät

Savukaasussa olevat hiukkaset liikkuvat savukaasuvirtauksen mukana. Hiukkasen kyky seurata savukaasuvirtausta riippuu sen inertiasta eli massan hitaudesta. Mitä pienempi hiukkanen sitä herkemmin se reagoi savukaasuvirtauksen muutokseen. Savukaasussa olevaan hiukkaseen kohdistuu aina alaspäin suuntautuva painovoima. Hiukkasen liikkessa kaasuvirtausta vastaan siihen kohdistuu myös liikettä jarruttava ilmanvastusvoima, joka kasvaa hiukkasen nopeuden kasvaessa. Voimien ollessa tasa-

painossa hiukkasen putoamisnopeus on vakio. Tätä kutsutaan asettumisnopeudeksi. Aerosolihiukkaset ovat massaltaan hyvin pieniä ja tästä syystä ne saavuttavat asettumisnopeuden silmänräpäyksessä. Asettumisnopeus riippuu vahvasti hiukkasen halkaisijasta. Esimerkiksi 100 μm :n kokoinen hiukkanen putoaa keskimäärin nopeudella 250 mm/s, kun taas 10 μm :n hiukkanen putoaa nopeudella 3 mm/s ja 1 μm :n kokoinen enää 0,03 mm/s. Asettumisnopeuden perusteella määritellään hiukkasen aerodynaaminen halkaisija. Tämä kuvaa sellaisen hiukkasen kokoa, jolla on sama asettumisnopeus kuin pyöreällä hiukkasella jonka tiheys on 1g/cm^3 (Hiukkaskäsikirja:hiukkasten liike ilmassa.).

Edellä kuvattua ilmiötä voidaan hyödyntää hiukkasten keräämiseen näytekaasusta, sekä kokojakauman määrittämiseen. Inertiaa hyödyntäviä mittalaitteita ovat esimerkiksi: impaktorit, virtuaali-impaktorit, syklonit ja lentoaikalaitteistot.

Tämän työn aiheena on hiukkaspitoisuuden määrittäminen savukaasuista kaksitasoisella impaktorilla, joten sen toimintaan perehdytään tarkemmin jatkossa. Impaktorissa kaasuvirtauksen liikesuunta muuttuu jyrkästi keräysalustan yläpuolella. Rajakokoa suuremmat hiukkaset eivät kykene seuraamaan virtausta, vaan törmäävät keräysalustaan ja jäävät siihen. Impaktori siis jakaa hiukkaset kahteen osaan niiden aerodynaamisen halkaisijan perusteella. Kaskadi-impaktorissa on keräysasteita useampi peräkkäin, joten sillä saadaan tietoa kokojakaumasta. Impaktoreiden yhteydessä puhutaan katkaisukohdasta tai leikkausrajusta. Tällä tarkoitetaan aerodynaamista halkaisijaa, jonka erotuskyky tasolla on 50 %.

Impaktoreja on tehty laajalle kokoalueelle noin 5 nm:tä aina 50 μm :iin asti. Tilavuusvirtaus alue on myös laaja, muutamasta cm^3/min aina useisiin m^3/min . Alustoille kertyneet hiukkaset voidaan analysoida neljällä tavalla:

1. hiukkaset kerätään lasilevyille tai kalvoille ja analysoidaan mikroskoopilla
2. hiukkaset kerätään kalvoille jotka punnitaan
3. hiukkaset kerätään kvartsikiteiden pinnalle, joista massa määritetään reaaliaikaisesti ominaistajuuden muutoksesta
4. hiukkaset varataan ennen impaktoria ja varattujen hiukkasten aiheuttamasta virrasta saadaan massan kertyminen reaaliaikaisesti (Hämeri ym. 2005:86.).

Virtuaali-impaktorin toimintaperiaate ja erottelukyky vastaavat normaalia impaktoria. Keräysalustan tilalla on näytteenottoputki, johon suuremmat hiukkaset seuraavat pientä sivuvirtausta.

Sykloneita käytetään yleensä suurempien hiukkasten keräämiseen. Esimerkiksi impaktoria ennen voidaan erotella suuret yli 10 µm:n hiukkaset pois näytekäasusta. Sykloneja voidaan käyttää suuremmilla hiukkaspitoisuuksilla kuin impaktoreja. Kokojakauma saadaan kaskadi syklonilla, eli laitteella jossa eri erotuskyvyn omaavia sykloneja on kytkettyä sarjaan.

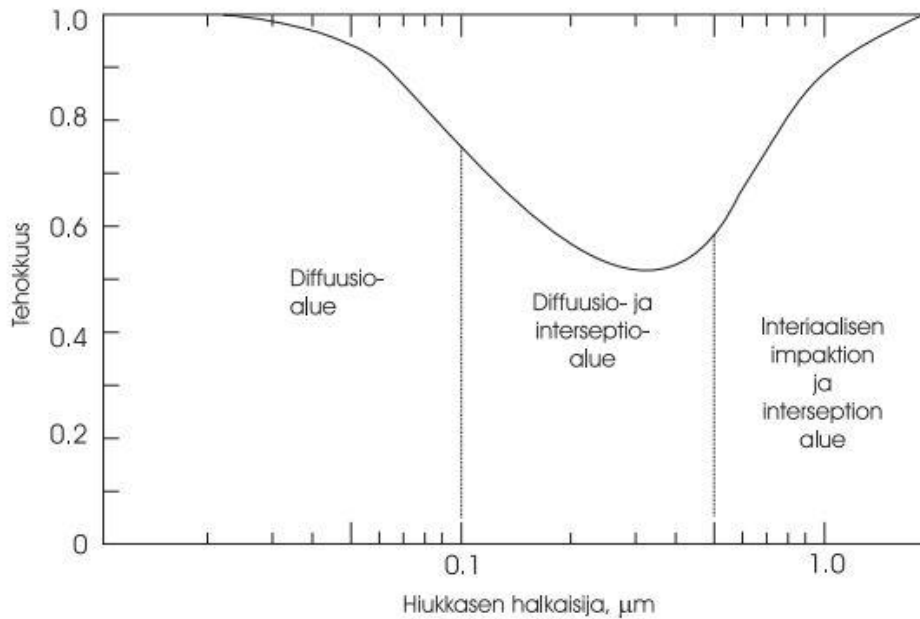
Lentoaikalaitteistoissa, eli TOF spektrometrissä hiukkasten koko määritellään hiukkasten tiettyyn matkaan käyttämän kulkuajan perusteella. Useimmissa sovelluksissa hiukkaset saatetaan kiihtyvään liikkeeseen, jolloin erikokoiset hiukkaset käyttäytyvät eri tavoin. Hiukkasten laskenta tapahtuu optisesti, tai lasermittaukseen perustuen (Hämeri ym. 2005:43.).

4.4.2 Suodatus

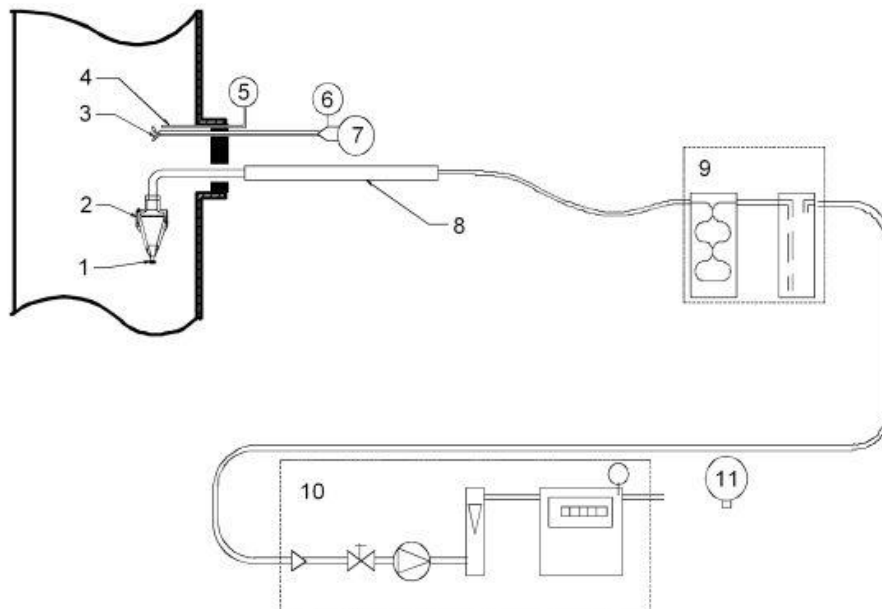
Hiukkasten kerääminen suodattimella on vielä nykyisinkin käytetyin menetelmä hiukkaspitoisuuden määrittämiseksi savukaasuista. Menetelmällä ei saada tietoa kokojakaumasta. Suodatin materiaaleina käytetään yleisesti kvartssia ja lasikuitua, kuitujen paksuuden ollessa luokkaa 0,1 – 100 µm. Hiukkaset kerääntyvät suodattimelle eri depositiomekanismien avulla, kuvan 5 sivulla 22 mukaisesti. Keräystehokkuus on kuvaajan mukaan pienimmillään hiukkaskoolle n. 0,3 µm. Suodatinkeräyksen tavantomainen ongelma on suodattimen ominaisuuksien muuttuminen hiukkasten kertyessä siihen. Tämä voidaan havaita muun muassa paine-eron muuttumisena suodattimen yli.

Standardi SFS – EN 13284-1, määrittelee gravimetrinen menetelmän hiukkaspitoisuuden määrittämiseksi savukaasuista. Standardin mukaan suodattimen erotusaste on oltava 99,5 % testiaerosolilla, jonka keskimääräinen hiukkaskoko on 0,3 µm, tai 99,9 % keskimääräisellä hiukkaskoolla 0,6 µm, odotettavissa olevalla suurimmalla tilavuusvirralla. Menetelmän periaate on yksinkertainen. Pumpulla imetään näytekäasua savukanavasta näytelinjaa pitkin suodattimen läpi. Suodatinkotelo voi olla savukanavassa tai sen ulkopuolella. Imetyn näytekäasun tilavuusvirtaus mitataan, jolloin saadaan lasketuksi pitoisuus, kun tiedetään kertyneiden hiukkasten massa. Isokineettisyyden var-

mistaminen oikealla suutinkoolla ja näytekaasun virtausnopeudella on tärkeää. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 6.



Kuva 5. Hiukkasten kertymismekanismit suodattimelle ja niiden tehokkuus hiukkaskoon mukaan (Hämeri ym. 2005:96)



Kuva 6. Näytteenottolaitteisto, jossa: 1. suutin, 2. suodatinkotelo, 3. pitot-putki, 4 ja 5. lämpötilamittaus, 6. staattisen paineen mittaus, 7. dynaamisen paineen mittaus, 8. tukiputki, 9. jäähdytys- ja kuivausyksikkö, 10. imulaitteisto, 11. ilmanpaineen mittaus (SFS-EN 13284-1:11)

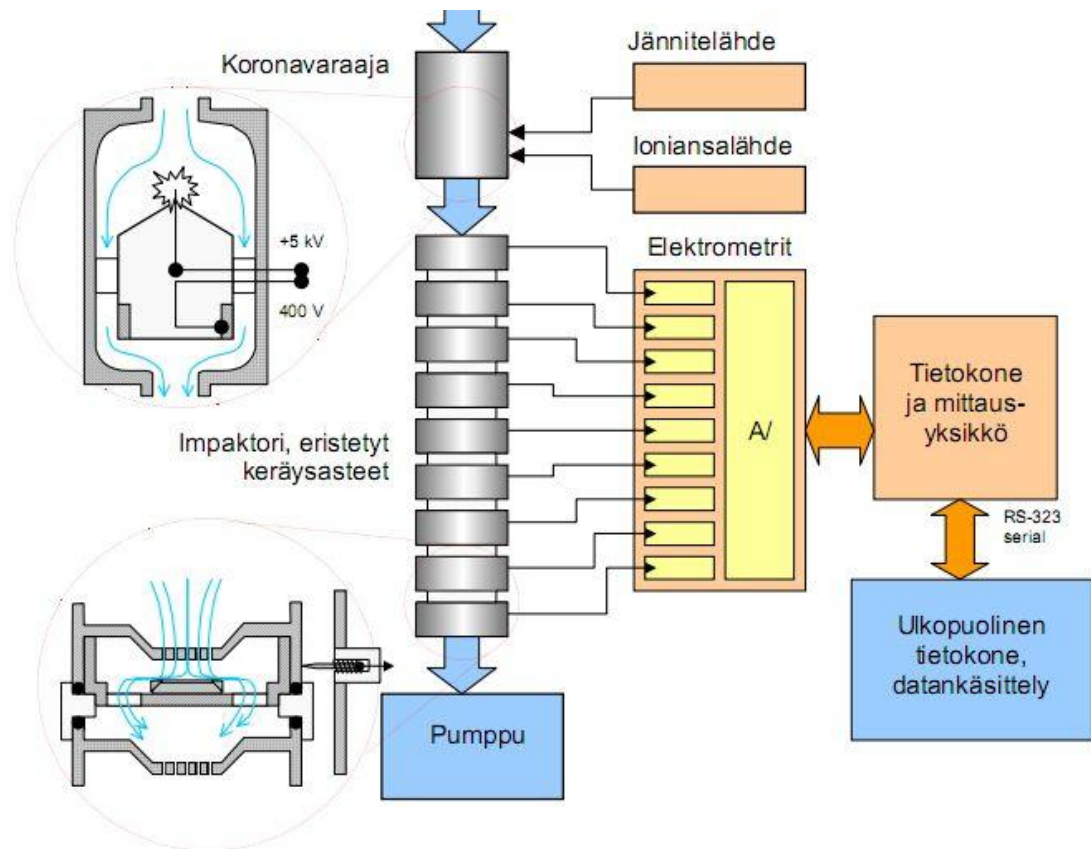
4.4.3 Sähkövaraukseen perustuvat menetelmät

Mitattaessa hiukkasia sähköisillä menetelmillä täytyy niiden varausjakauma tuntea. Hiukkasten varausjakauma savukaasussa on yleisesti ottaen tuntematon. Tästä syystä täytyy näytekaasu varata jollakin hallitulla menetelmällä. Toivottu varausjakauma riippuu mittalaitteesta, mutta yleensä toivottavaa olisi yksi varaus kullakin hiukkasella. Hiukkasten varaaminen tapahtuu yleisesti tuottamalla näytekaasuun ioneja, jotka tarttuvat hiukkasten pinnalle aiheuttaen niihin varauksen. Ionien tuotto ja niiden kuljettaminen hiukkasten pinnalle voidaan saada aikaiseksi useilla eri tavoilla kuten: staattisena varautumisena, indusoituna varautumisena, spray varautumisena ja elektrolyytti varautumisena (Hämeri ym. 2005:71.).

Ilmakehän hiukkasmittauksissa käytetään muun muassa: ionispektrometriä, sähköistä liikkuvuusanalysointia (DMA) ja sähköistä kokoluokittelijaa (DMPS / SMPS).
(Hiukkaskäsikirja: sähkövaraukseen perustuvat menetelmät)

Savukaasumittauksissa yleisesti käytössä on sähköinen alipaineimpaktori (ELPITM, Electrical Low Pressure Impactor). ELPITM toimii kuten perinteinen kaskadialipaineimpaktori sillä erotuksella, että hiukkaset varataan diodityyppisellä koronavaraajalla ennen alipaineimpaktoria. Hiukkaset saavat koronavaraajassa tunnetun varaustilan, joka riippuu hiukkasen koosta. Tämän jälkeen hiukkaset koko - luokitellaan 13 asteisella alipaineimpaktorilla. Kertyessään kokonsa mukaiselle impaktoriasteelle hiukkanen luovuttaa varauksensa, josta aiheutuva sähkövirta vahvistetaan ja muunnetaan jännitteeksi. Hiukkasten mukanaan kuljettama keskimääräinen varaus tunnetaan, jolloin mitatusta sähkövirrasta saadaan laskettua hiukkasten lukumäärä (VTT osa3 2007:10.). Kuvassa 7 sivulla 24 on esitetty sähköisen alipaineimpaktorin toimintaperiaate.

ELPITM:llä voidaan mitata hiukkasia kokoalueella 7 nm – 10 µm. Laite on reaaliaikainen ja sen aikaresoluutioksi ilmoitetaan 2 - 3 sekuntia. Hiukkasten kemiallinen analysointi on mahdollista mittauksen jälkeen, koska hiukkaset kerääntyvät keräysalustoille. Alun perin laite on suunniteltu käytettäväksi voimalaitosmittauksissa, mutta se soveltuu myös muihin kohteisiin kuten: ajoneuvojen pakokaasut, ulko- ja sisäilmanlaatu, erilaiset teollisuusprosessit sekä hitsauskaasujen mittaukset. Savukaasumittauksissa näytekaasu on laimennettava ja sen lämpötila saa olla maksimissaan 40 °C (VTT osa3 2007:13.).



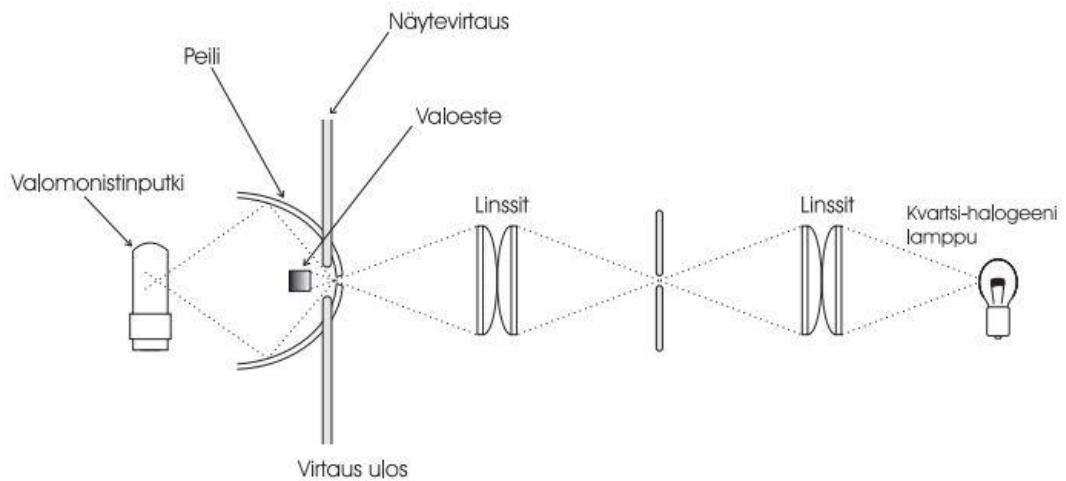
Kuva 7. ELPITM - sähköisen alipaineimpaktorin toimintaperiaate (VTT osa3 2007:11)

4.4.4 Optiset menetelmät

Optiset menetelmät ovat lähes reaaliaikaisia, herkkiä ja eivät vaadi fyysistä kontaktia hiukkaseen. Menetelmiä ovat muun muassa: optinen hiukkaslaskuri, kondensaatiohiukkaslaskuri, fotometri ja nefelometri. Menetelmiä käytetään yleisesti pitoisuuden ja kokojakauman reaaliaikaiseen mittaamiseen. Valon sirontaan tai vaimenemiseen perustuen voidaan havaita sekä yksittäisiä hiukkasia että koko hiukkaspopulaatiota hyvin laajalla pitoisuusalueella. Optisten mittalaitteiden käyttöalutta rajoittaa valon aallonpituus, josta johtuen havaittava minimikoko on noin 100 nm. Tätä pienemmät hiukkaset ovat havaittavissa valolla vain, jos niiden kokoa kasvatetaan. Tällöin niiden alkuperäinen koko jää selvittämättä (Hiukkaskäsikirja:optiset menetelmät.).

Optinen hiukkaslaskuri (OPC) on yleisesti käytetty mittalaite valon aallonpituutta suurempia hiukkasia mitattaessa. Laitteessa näytkeasu imetään pumpun avulla laitteen näytetilavuuteen, missä sironneen valon intensiteettiä tietyssä kulmassa mitataan.

OPC:n toimintaperiaate yksinkertaistettuna on seuraava: Näytekaasu kulkee fokuroidun valon läpi hiukkanen kerrallaan. Valon välähdykset hiukkasista kerätään photodetektorilla, joka sijaitsee määrättyssä kulmassa valolähtettiin nähden. Optinen laskuri antaa lukumääräpitoisuuden, laskentataajuuden ja tilavuusvirtauksen perusteella. Hiukkasen aiheuttaman pulssin korkeus kertoo sen koon. Laitteen rajoituksena on hiukkasen pienin koko, joka pystytään havainnoimaan. Tämä riippuu käytetystä valolähteestä. Liian suuret pitoisuudet aiheuttavat sen, että kahden tai useamman hiukkasen ilmaantuminen havaintotilavuuteen liian lyhyin väliajoin tulkitaan yhdeksi hiukkasiksi (Hämeri ym. 2005:38.). Tästä johtuen suurilla pitoisuuksilla voidaan saada todellisuutta pienempiä mittaustuloksia.



Kuva 8. Optisen laskurin periaatekuva (Hämeri ym. 2005:38)

Suoraan savukanavasta hiukkaspitoisuutta mitattaessa käytetään valon vaimenemiseen, tai hajavaloon perustuvia menetelmiä. Pitoisuusmittauksiin menetelmät soveltuvat parhaiten kohteissa, joissa hiukkasen optisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät pysyvät muuttumattomina (Raiko ym. 2002:673.). Menetelmät ovat jatkuvatoimisia ja tarkoituksena on antaa informaatiota prosessin tilasta käyttökäyttäjälle. Kosteiden savukaasujen hiukkaspitoisuuksia mitattaessa saattaa ongelmaksi muodostua pienet vesipisarot, jotka tulkitaan myös hiukkasiksi.

5 SFS-EN ISO 23210:2009

Tässä luvussa olevat standardin esittely ja soveltamisala ovat suoria käännöksiä alkuperäisestä englanninkielisestä standardista EN ISO 23210:2009.

Esittely

EN ISO 23210:2009, eurooppalaisen standardin on laatinut tekninen komitea ISO/TC 146 "Air quality" yhteistyössä teknisen komitean CEN/TC 264 "Air quality" kanssa, kummatkin sihteeristöt ovat DIN:in ylläpitämiä.

Tälle eurooppalaiselle standardille on annettava kansallisen standardin asema, joko julkaisemalla standardin kanssa yhtäpitävä teksti tai ilmoittamalla sen voimaansaattamisesta helmikuun 2010 loppuun mennessä, ja ristiriitaiset kansalliset standardit on kumottava helmikuun 2010 loppuun mennessä.

CEN/CENELEC:in sääntöjen mukaisesti seuraavat maat ovat velvollisia vahvistamaan tämän eurooppalaisen standardin: Alankomaat, Belgia, Bulgaria, Espanja, Irlanti, Islanti, Iso-Britannia, Italia, Itävalta, Kreikka, Kypros, Latvia, Liettua, Luxemburg, Malta, Norja, Portugali, Puola, Ranska, Romania, Ruotsi, Saksa, Slovakia, Slovenia, Suomi, Sveitsi, Tanska, Tšekin tasavalta, Unkari Ja Viro.

Suomen standardoimisliitto SFS on vahvistanut eurooppalaisen standardin EN ISO 23210:2009, suomalaisiksi kansalliseksi standardiksi 21.9.2009. Standardista ei ole saatavana suomenkielistä versiota. Tämä työ pohjautuu alkuperäiseen englanninkieliseen versioon: **Stationary source emissions - Determination of PM10/PM2,5 mass concentration in flue gas - Measurement at low concentrations by use of impactors (ISO 23210:2009)**. Vapaasti suomennettuna: PM10/PM2,5 massapitoisuuksien määrittäminen impaktoreilla, kiinteiden päästölähteiden matalapitoisista savukaasuisista.

On syytä huomioida, että jotkut standardin osiot saattavat sisältää patentti oikeuksien alaista materiaalia. CEN (ja/tai CENELEC) ei ota vastuuta näiden patentti oikeuksien erittelystä.

Jotta voidaan määrittää PM10- ja PM2,5- hiukkaspitoisuuksia kiinteän lähteen päästöistä, tai yksilöidä lähteen PM10- ja PM2,5- osuus ilman hiukkaskuormituksesta, on tarpeellista mitata hiukkaspitoisuuksia teollisten lähteiden savukaasuista.

Tämä kansainvälinen standardi esittelee mittausmenetelmän PM10- ja PM2,5- päästöjen massapitoisuuden määrittelemiseksi. Menetelmän erotuskäyrät ovat vastaavat, kuin mitä on määritelty ilmalle standardissa ISO 7708:1995. Menetelmä perustuu impektioon. Näytteenoton jälkeen hiukkaset ovat eroteltu kolmeen kokoluokkaan niiden aerodynaamisen halkaisijan mukaan: suuremmat kuin 10 µm, välillä 10 µm ja 2,5 µm sekä pienemmät kuin 2,5 µm (SFS-EN ISO 23210:V.).

Mittausmenetelmä on tarkoitettu PM10- ja PM2,5- päästöjen pitoisuuden samanaikaiseen määrittämiseen. Menetelmä on tarkoitettu mittauksiin kiinteän päästölähteen savukanavasta (SFS-EN ISO 23210:V.).

PM10- ja PM2,5- osuus kiinteän lähteen päästöistä, tai ympäröivästä ilmasta voidaan jakaa primääri - ja sekundaari hiukkasiin. Primäärihiukkasina voidaan pitää niitä hiukkasia, jotka kulkeutuvat savukanavasta savukaasun mukana suoraan ilmaan. Sekundaari hiukkaset muodostuvat savukaasuista ilmakehässä kemiallisten reaktioiden vaikutuksesta. Tämän kansainvälisen standardin mittaustekniikka ei mittaa sekundaari hiukkasten osuutta, joka muodostuu savukaasuista ilmakehässä (SFS-EN ISO 23210:V.).

Tämä kansainvälinen standardi sisältää ohjeellisia viittauksia standardiin ISO 12141:2002. Viitattut kohdat ovat identtisiä myös eurooppalaisissa standardeissa EN 13284-1:2001 ja EN 15259:2007 (SFS-EN ISO 23210:V.).

Tämä kansainvälinen standardi sisältää velvoittavia viittauksia ja lainauksia muista julkaisuista. Nämä velvoittavat viittaukset on mainittu tekstin soveltuvassa kohdassa ja julkaisuluettelo on alla. Päivätyjen viittausten myöhempiä muutoksia tai versioita tulee soveltaa tähän kansainväliseen standardiin vain liittämällä siihen myös muutokset tai versiot. Päiväämättömien viittausten kohdalla sovelletaan julkaisun viimeisintä painosta, mukaan lukien muutokset (SFS-EN ISO 23210:1.).

ISO 7708:1995, Air quality — Particle size fraction definitions for health-related sampling

ISO 12141:2002, Stationary source emissions — Determination of mass concentration of particulate matter (dust) at low concentrations — Manual gravimetric method

ISO 20988:2007, Air quality — Guidelines for estimating measurement uncertainty

Soveltamisala

Tämä kansainvälinen standardi määrittelee standardi referenssimenetelmän PM10- ja PM2,5- massapitoisuuksien määrittämiseen kiinteästä päästölähteestä kaksi-tasoisilla impaktoreilla. Mittausmenetelmä soveltuu erityisesti massapitoisuuksille alle 40 mg/m³, puolen tunnin keskiarvolla standardi olosuhteissa (273K, 1013 hPa, kuiva kaasu). Se on hyväksyttävä menetelmä savukaasujen mittaamiseen polttoprosesseissa ja myös erilaisissa teollisissa sovelluksissa kuten, sementin- ja teräksen tuotantolaitoksissa (SFS-EN ISO 23210:1.).

Tämä kansainvälinen standardi ei sovellu näytteenottoon vesihöyryllä kyllästyneestä savukaasusta, eikä kun suurin osa hiukkasista todennäköisesti ylittää 10 µm, kuten esimerkiksi puhdistamattomille kaasuille tai tuotantohäiriöissä. Tämä kansainvälinen standardi ei myöskään sovellu kiintoainepitoisuuden määrittämiseen (SFS-EN ISO 23210:1.).

Huom. 1. Mittaukset suuremmasta hiukkaspitoisuudesta kuin 40 mg/m³ puolentunnin keskiarvolla standardi olosuhteissa, voivat aiheuttaa keräysalustojen ja suodattimen ylikuormittumiseen ja saattaisivat vaatia lyhyemmän näytteenottoajan.

Huom. 2. Keräysalustoja ja suodatinta voidaan käyttää myös kemiallisissa analyyseissä.

Huom. 3. Tulosten arvioimiseksi voi olla hyödyllistä esittää myös kokonaishiukkasmäärä mittapäässä, PM10- ja PM2,5- mittaustulosten lisäksi.

Tämä kansainvälinen standardi esittelee rakennetta, käyttöä ja teoriaa pyöreäsuutin impaktoreille. Se ei poissulje muun tyyppisiä impaktoreja sillä ehdolla, että järjestelmä täyttää tässä kansainvälisessä standardissa esitetyt kriteerit riippumattoman laboratorion varmennuksella (SFS-EN ISO 23210:1.).

6 IMPAKTORIN TOIMINTAPERIAATE

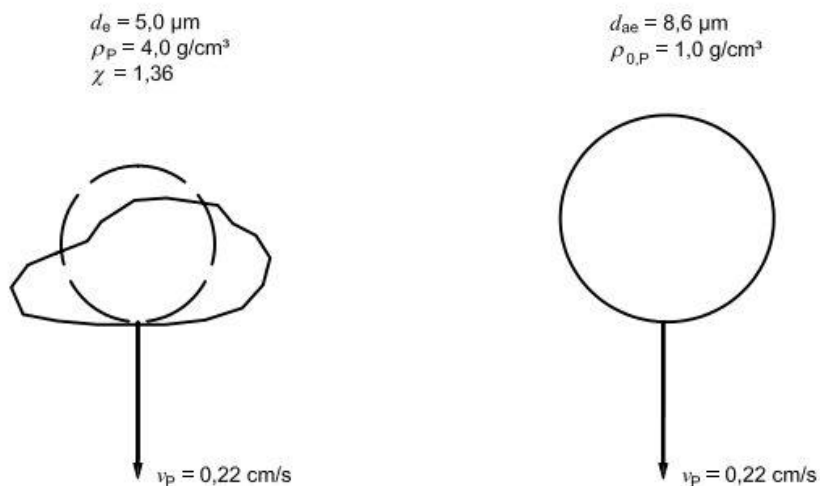
Tässä luvussa esitetty toimintaperiaatteen teoria on kokonaisuudessaan peräisin standardista SFS-EN ISO 23210:2009.

Aerodynaamisella halkaisijalla tarkoitetaan sellaisen hiukkasen halkaisijaa, jolla on sama asettumisnopeus kuin pyöreällä hiukkasella ja jonka tiheys on 1 g/cm^3 . Kun ulkopuoliset voimat ovat rajoitettu painovoimaan ja ilmanvastusvoimaan joka pysyy Stokesin lain alueella sekä kaasu on liikkumatonta, hiukkasen alaspäin suuntautuva leijumisnopeus on tällöin vakio. Tätä kutsutaan asettumisnopeudeksi. Asettumisnopeus v_p saadaan lasketuksi likimääräisesti kaavalla 1 (SFS-EN ISO 23210:28.):

$$v_p = \frac{\rho_P d_e^2 g}{18\eta\chi} = \frac{\rho_{0,P} d_{ae}^2 g}{18\eta} \quad (1)$$

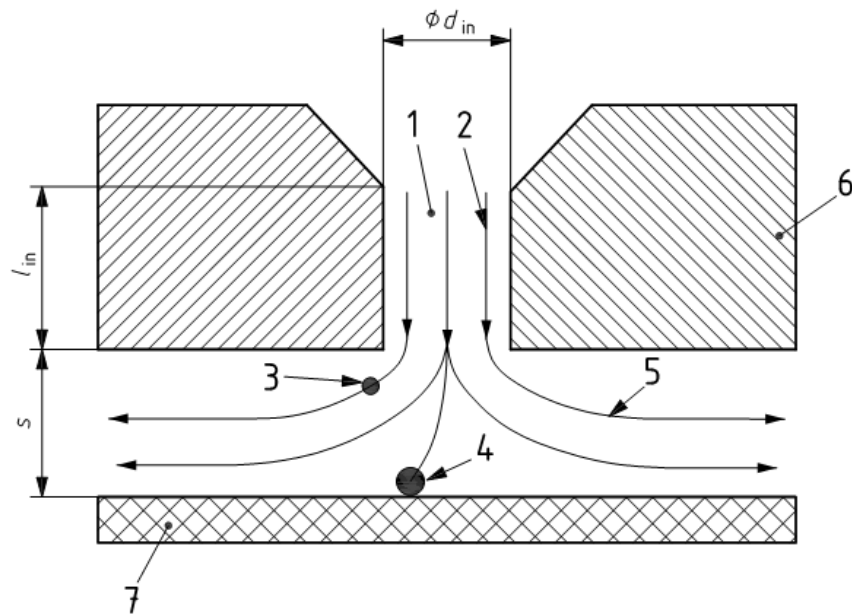
jossa:

v_p	asettumisnopeus
ρ_P	hiukkasen massatiheys
$\rho_{0,P}$	hiukkasen yksikkömassatiheys (1 g/cm^3)
d_e	ekvivalenttinen volymetrinen halkaisija
d_{ae}	aerodynaaminen halkaisija
χ	dynaaminen muotokerroin ei-pallomaisille partikkeleille
g	putoamiskiihtyvyys
η	kaasun dynaaminen viskositeetti



Kuva 9. Vasemmalla epäsäännöllinen hiukkanen jonka ekvivalenttinen volymetrinen halkaisija on esitettyinä katkoviivalla ($5,0 \mu\text{m}$), ja oikealla esitettyinä sitä vastaava aerodynaaminen halkaisija $8,6 \mu\text{m}$ (SFS-EN ISO 23210:29).

Impaktori erottelee hiukkaset niiden tietyn aerodynaamisen halkaisijan mukaan. Aerosoli kiihdytetään suuttimen läpi ja käännetään jyrkästi 90° . Hiukkaset joilla on katkaisukohtaa suurempi aerodynaaminen halkaisija, eivät kykene seuraamaan kaasuvirtausta ja tulevat impaktoiduksi, eli törmäävät keräysalustaan ja jäävät sille. Hiukkasten kertyminen alustalle riippuu hiukkasen inertiaasta sekä kitkasta hiukkasen ja ympäröivän kaasun välillä. Mikäli hiukkasen massavoimat ovat suurempia kuin kitkavoimat, erkanee hiukkanen kaasuvirrasta ja törmää keräysalustaan. Toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 10 (SFS-EN ISO 23210:6.).



Kuva 10. Impaktorin toimintaperiaate, jossa:

1. impaktorin suutin
2. virtauslinja
3. virtausta seuraava hiukkanen
4. impaktoitu hiukkanen
5. hiukkasen lentorata
6. suutin levy

7. keräysalusta

l_{in} impaktorin suuttimen pituus

s etäisyys suuttimen ulostulosta keräysalustalle

d_{in} impaktorin suuttimen halkaisija

Impaktorin tasolle on määritelty niin kutsuttu katkaisukohtan halkaisija d_{50} . Hiukkasille joilla on tämä aerodynaaminen halkaisija, on impaktorin erottelukyky 50 %.

Kaavalla 2 voidaan laskea katkaisukohtan halkaisija d_{50} , yksitasoiselle pyöreäsuu-
tinimpaktorille (SFS-EN ISO 23210:6.).

Katkaisukohtan halkaisija d_{50} :

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\pi St_{50} \eta N d_{in}^3}{4\rho_{0,P} C \dot{V}}} \quad (2)$$

jossa:

St_{50} Stokesin luku suhteessa katkaisukohtan halkaisijaan d_{50}

η kaasun dynaaminen viskositeetti

N impaktorin suutinten lukumäärä

d_{in} impaktorin suuttimen halkaisija

$\rho_{0,P}$ hiukkasen tiheys (1g/cm^3)

C Cunninghamin kerroin

V tilavuusvirtaus impaktorin läpi käyttö-olosuhteessa

Seuraavat ehdot tulee ottaa huomioon suunnittelussa ja kaavan 1 soveltamisessa:

a) suuttimen ja keräysalustan välinen etäisyys

suuttimen ulostulon ja keräysalustan välimatkan s suhde suuttimen halkaisijan d_{in} tulee olla välillä $0,5 \leq s/d_{in} \leq 5,0$

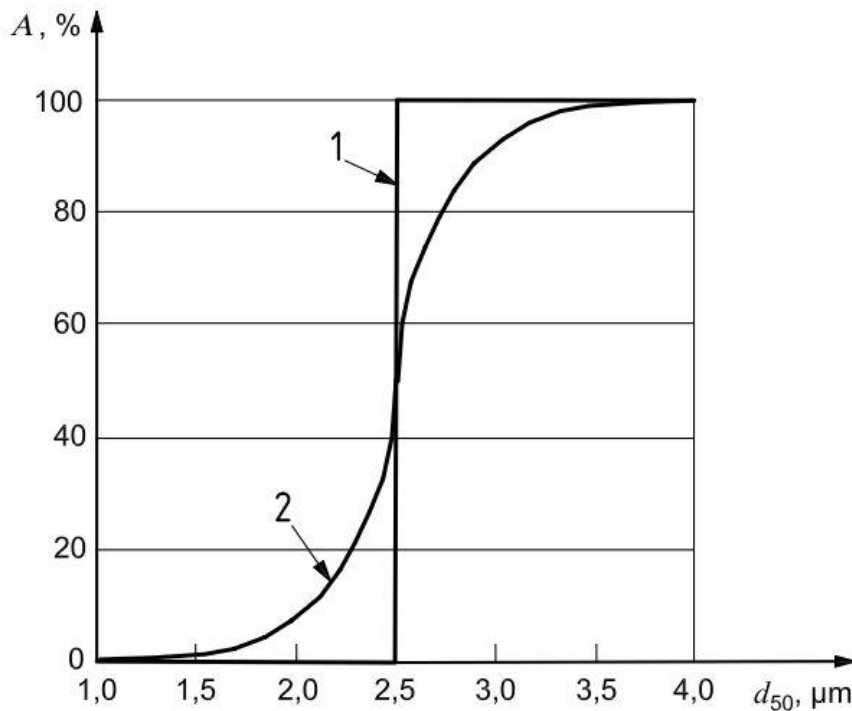
b) suuttimen pituuden suhde suuttimen halkaisijaan

impaktorin suuttimen pituuden l_{in} suhde suuttimen halkaisijaan d_{in} tulee olla välillä $0,25 \leq l_{in}/d_{in} \leq 2,0$

c) Reynoldsin luku

suuttimessa kaasu virtauksen Reynoldsin luku Re tulee olla laminaarisen virtauksen alueella $100 < Re < 3000$ (SFS-EN ISO 23210:7.).

Käytännössä hiukkasten erottelu ei ole ideaalista ilmoitetun katkaisukohtan mukaisesti, vaan erottelu tapahtuu kuvassa 11 esitetyn kuvaajan 2 mukaisesti (SFS-EN ISO 23210:7). Kuvaajasta nähdään, että erottelukyky on 50 % aerodynaamiselle halkaisijalle 2,5 μm , joten katkaisukohtan halkaisija d_{50} on tässä tapauksessa 2,5 μm .



Kuva 11. Impaktorin erottelukyky A katkaisukohtan halkaisijan d_{50} funktiona, käyrä 1 on ideaalinen ja käyrä 2 todellinen (SFS-EN ISO 23210:7)

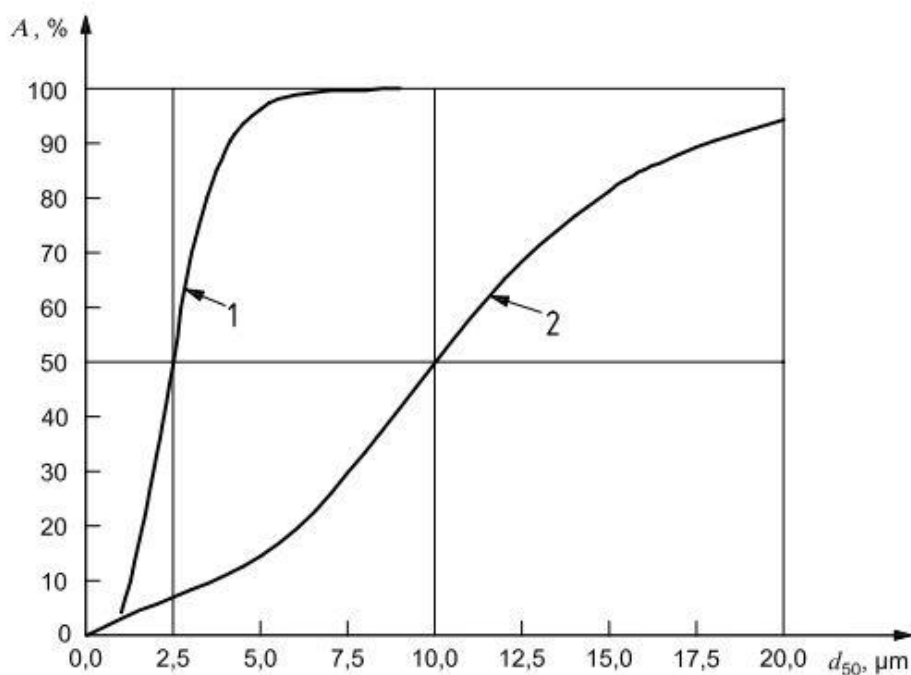
7 KAKSITASOINEN KASKADI-IMPAKTORI DEKATI PM10

Kaskadi-impaktori koostuu useammasta perättäisestä impaktoriasteesta, joilla on erilainen katkaisukohta. Katkaisukohdat on saatu aikaiseksi erilaisella rakenteella, lähinnä suutinten osalta. Asteiden katkaisukohdat ovat järjestyksessä suurimmasta pienimpään.

Standardi SFS-EN ISO 23210:2009, koskee impaktoreja, joissa on kaksi keräysastetta katkaisukohtilla 10 μm ja 2,5 μm . Impaktoriasteiden jälkeen on pohjasuodatin, johon pienimmät hiukkaset kerääntyvät. Ensimmäiseen impaktoriasteeseen jäävät hiukkaset, joiden aerodynaaminen halkaisija on suurempi kuin 10 μm . Toiseen impaktoriasteeseen jäävät hiukkaset, joiden aerodynaaminen halkaisija on välillä 10 μm – 2,5 μm ja hiukkaset, joiden aerodynaaminen halkaisija on pienempi kuin 2,5 μm keräytyvät pohjasuodattimeen. PM_{2,5}- massapitoisuus saadaan pohjasuodattimeen kertyneistä hiuk-

kasista ja PM10- massapitoisuus on pohjasuodattimen kertymä laskettuna yhteen toisen impaktoriasteen (10 µm – 2,5 µm) kertymän kanssa. Ensimmäisen impaktoriasteen (yli 10 µm) kertymää ei oteta huomioon PM10- ja PM2,5- laskennassa.

Impaktori asteiden PM10- ja PM2,5- erottelukäyrät tulee muotoutua siten, että ne vastaavat erottelukyky vaatimuksia, jotka on määritelty standardissa ISO 7708:1995.



Kuva 12. Erottelukäyrät PM10 (kuvaaja 2) ja PM2,5 (kuvaaja 1) ISO 7708:1995 mukaisesti, jossa A on erottelukyky prosentteina ja d_{50} on katkaisukohdan halkaisija µm:nä (SFS-EN ISO 23210:9)

Dekati PM10- impaktori

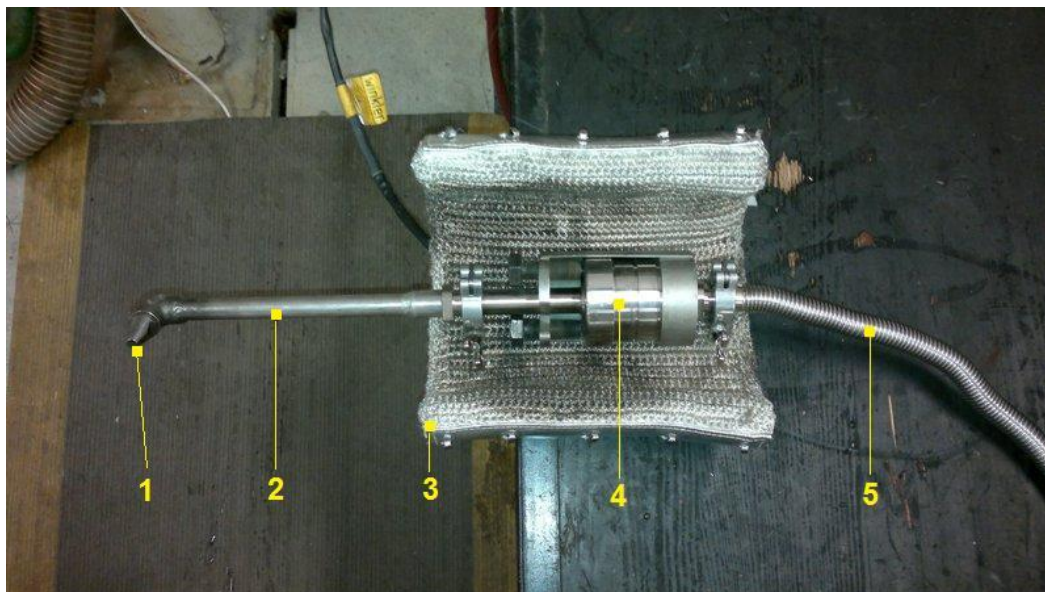
Kymenlaakson ammattikorkeakoululla on käytössä Dekati Ltd:n valmistama PM10-impaktori, josta esite liitteenä (liite 1). Dekati PM10- impaktori täyttää standardin SFS-EN ISO 23210:2009 vaatimukset.

Impaktorin nimellinen näytevirtaus on 10 l/min ja kokojakauma 0-10 µm kahdella impaktoriasteella (2,5 µm ja 10 µm) sekä pohjasuodattimella. Käyttölämpötila on 0-200 °C korkean lämpötilan pulteilla, ja korkean lämpötilan tiivisteillä se kestää jopa 400 °C. Painoa laitteella on 2,4 kg, halkaisija on 65 mm ja pituus 180 mm. Valmistusmateriaali rungolla ja impaktoriasteilla on ruostumatonteräs, suodattimen tukirenkaat ovat

teflonia ja o-rengastiivisteet vitonia. Dekati PM10 on tyypiltään kaskadialipaineimpaktori eli näytekaasu imetään sen läpi pumpulla (Dekati Ltd. 2010:2.).

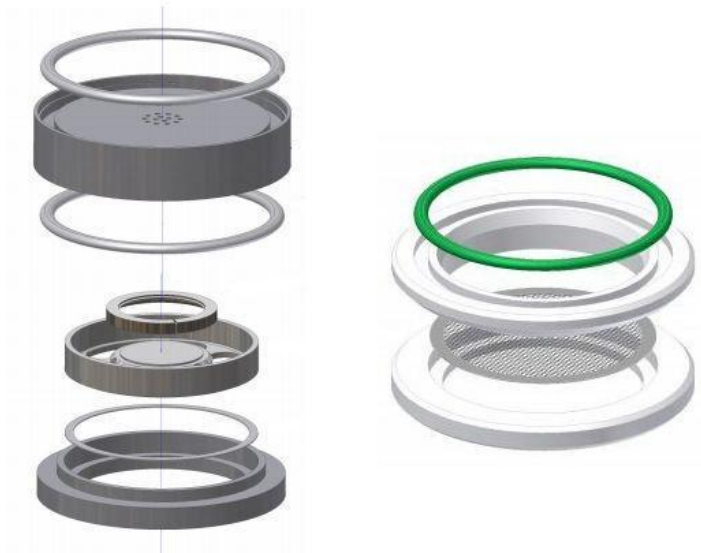
Näyte kerätään impaktoriasteella keräysalustalle, joka on halkaisijaltaan 25 mm. Keräysalustoina käytetään rasvattuja alumiinalustoja, tai analysoitaville näytteille polykarbonaattialustoja. Myös muut keräysalustamateriaalit ovat mahdollisia. Dekati Ltd. myy kahta eri alustarasvaa: Apiezol-L (max. 150 °C) ja Apiezol-H (max. 200 °C). Tämän työn mittauksissa on käytetty alumiinisia keräysalustoja rasvattuna Apiezol-L aerosolirasvalla. Rasvauksella on tarkoitus estää hiukkasten kimpoaminen alustoista osuman jälkeen, sekä pitää kerätyt hiukkaset luotettavasti alustoilla punnitukseen saakka.

Pohjasuodatin on halkaisijaltaan 47 mm ja niitä on olemassa monen tyyppisiä. Tämän työn mittauksissa on käytetty Emfab TX40- suodattimia, jotka kestävät tuoteselosteen (liite 2) mukaan lämpöä 260 °C ja erottelukyky on 99,9 %, hiukkaskoolla 0,3 µm virtauksella 32 l/min/100cm².



Kuva 13. Dekati PM10- impaktori mittausvalmiudessa, jossa:

1. isokineettisen näytteenoton tulosuutin
2. näytteenottoputki ns. hanhenkaula
3. lämmitysmatto avattuna
4. impaktori
5. imuputki



Kuva 14. Vasemmalla on kuvattuna yksi impaktoriaste. Osat lueteltuna ylhäältä: tiiviste, suutin, tiiviste, pidätinrenkas, (tähän väliin asetetaan keräysalusta), keräysalustan pohja, jousi ja asetinrenkas. Oikealla on kuvattuna suodatinaste. Osat lueteltuna ylhäältä: tiiviste, ylempi tukirenkas, (tähän väliin asetetaan pohjasuodatin), pohjasuodattimen alusta ja alempi tukirenkas (Dekati Ltd. 2010:7)

8 MITTAUSLAITTEISTO

Impaktori itsessään on hyvin yksinkertainen laite, ja mittausmenetelmän periaate on myös yksinkertainen. Mittauksessa tarvitaan kuitenkin lukuisia oheislaitteita impaktorin lisäksi ja työvaiheita on useita. Seuraavaksi on lueteltuna standardin SFS-EN ISO 23210:2009, mukaiset laitteet, välineet ja tarvikkeet. Listaa on täydennetty soveltuvilta osin standardista SFS-EN ISO 13284-1, koska siihen viitataan standardissa ISO 23210.

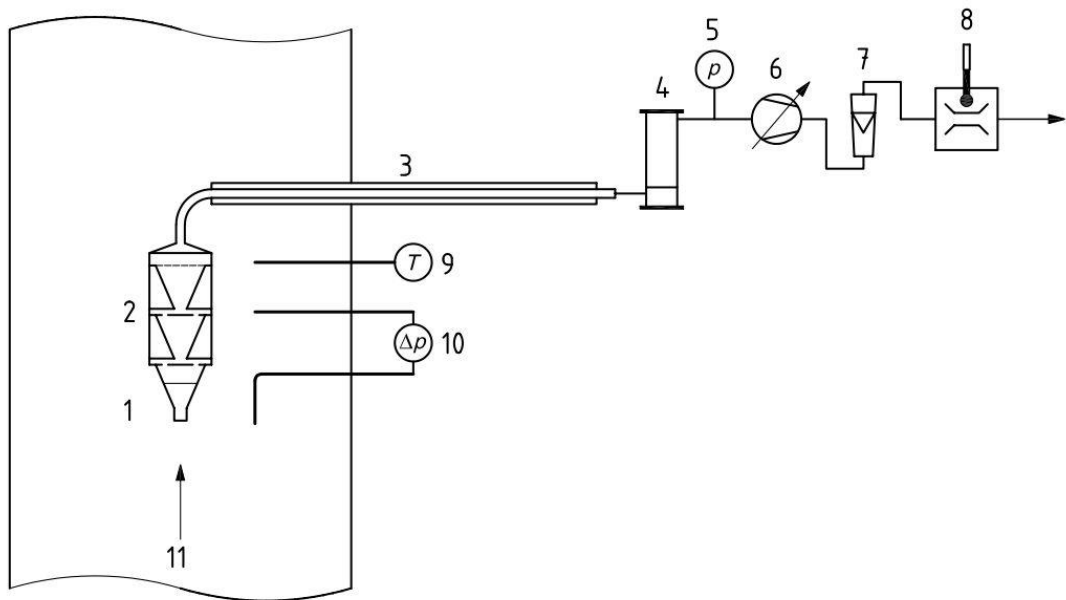
Laboratoriolaitteet ovat:

1. tarkkuusvaaka; mitta-alue 60 g, resoluutiolla 0,01 mg
2. kuivausuuni; laboratoriouuni lämpötilansäädöllä ± 5 °C
3. eksikaattori; sijoituspaikka vaakahuone, sisältää kuivausaineen (silikageeli, kalsiumkloridi)
4. lämpömittari, kosteusmittari ja ilmanpainemittari lähellä vaakaa
5. kuljetussäiliöt keräysalustoille ja pohjasuodattimille (SFS-EN ISO 23210:13.).

Laitteet savukaasun ja mittauspaikan olosuhteiden määrittämiseen ovat:

1. laitteisto savukaasun nopeuden ja staattisen paineen määrittämiseen; esimerkiksi L-mallinen pitot-putki ja mikromanometri
2. savukaasuanalysointilaitteisto CO₂- ja O₂- pitoisuuden määrittämiseen
3. savukaasun lämpötilan mittauslaitteisto
4. laitteisto savukaasun kosteuden määrittämiseen
5. vallitsevan ilmanpaineen mittauslaite; esimerkiksi barometri
6. ilman lämpötilan mittauslaitteisto (SFS-EN ISO 23210:13.).

Kuvassa 15 on esitettynä näytteenottolaitteiston pääkomponentit:



Kuva 15.(SFS-EN ISO 23210:11). kanavan sisäpuolinen näytteenottolaitteisto, jossa:

1. sisääntulosuutin; jonka koolla aikaansaadaan isokineettisyys, suuttimia välillä 6 – 18 mm tulee olla käytettävissä
2. impaktori, kanavan ulkopuolisessa laitteistossa on käytettävä lämmitysmattoja impaktorin ympärillä
3. imuputki; halkaisijalla 8 - 15 mm korroosionkestävästä materiaalista pituudeltaan vähintään 2m, jonka jatkona voi olla taipuisaa imulettoa
4. näytekaasun lauhdutus ja/tai kuivaus yksikkö; jossa on kuivausainetta, jäännöskosteus suurimmalla näytekaasuvirralla on alle 10 g/m³

5. paineen mittauslaitteisto; imuputken staattisen paineen ja ilmanpaineen eron mittaamiseen (absoluuttinen paine), mittausepävarmuudella alle 1 %
6. imulaitteisto; automaattisella virtauksen säädöllä, korroosionkestävä pumppu jonka tuotto vähintään 4 m³/h 400hPa paineella poistopuoella
7. virtausmittari; esim. rotametri helpottamaan kaasuvirran säätöä, kalibroitu kuivalla kaasukellolla
8. näytekaasun tilavuusvirtausmittari lämpötilamittauksella; kuiva kaasukello jonka kapasiteetti on 6 m³/h mittausepävarmuudella alle 2 % oletettavalla kaasuvirralla, varustettuna lämpötilan mittauksella mittausepävarmuudella alle 1 %
9. savukaasun lämpötilan mittaus
10. pitot-putki paine-eromittauksella
11. savukaasuvirtaus (SFS-EN ISO 23210:12.).

Mittauksissa tarvittavat tarvikkeet ovat:

1. kuivausainetta; esimerkiksi silikageeli väri-indikaattorilla
2. pohjasuodattimia tai materiaalia josta niitä voi valmistaa, suodatinmateriaalin vähimmäisvaatimus; erottelukyky vähintään 99,5 % partikkeleille 0,3 µm tai 99,9 % partikkeleille 0,6 µm, suodattimien toimittajan on annettava sertifikaatti erotusasteesta ja suodatinmateriaali ei saa reagoida tai adsorboida näytekaasun kaasumaisia yhdisteitä, sekä materiaalin on kestävä odotettavissa oleva korkein lämpötila
3. standardi suosittelee käytettäväksi samaa suodatinmateriaalia keräysalustoissa (SFS-EN ISO 23210:13.). Dekati Ltd. suosittelee käytettäväksi laitteessaan alumiinisia keräysalustoja rasvattuna Apiezol – rasvalla, tai teflon alustoja jos näyte analysoidaan, keräysalustan maksimi paksuus on 0,1 mm.

Tämän työn mittauksissa käytetyt laitteet:

Insinööriyöhön liittyvät savukaasumittaukset on tehty Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratoriossa keväällä 2012. Mitattavat savukaasut tuotettiin 100 kw biomassakattilalla, jonka polttoaineena käytettiin pellettien ja hakkeen sekoitusta suhteella 1/1. Keräysalustojen ja pohjasuodattimien valmistelu sekä punnitukset suoritettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästömittauslaboratoriossa. Seuraavaksi kuvia (kuvat 16 – 20) käytännön mittausjärjestelyistä sekä laitteista joita on käytetty tässä työssä. Impaktori mittausvalmiudessa on esitetty aiemmin kuvassa 13 sivulla 34.



Kuva 16. Päästömittauslaboratorion vaaka vasemmalla, jossa pohjasuodattimen punnitus meneillään, ja oikealla eksikaattori pohjasuodattimet sisällään

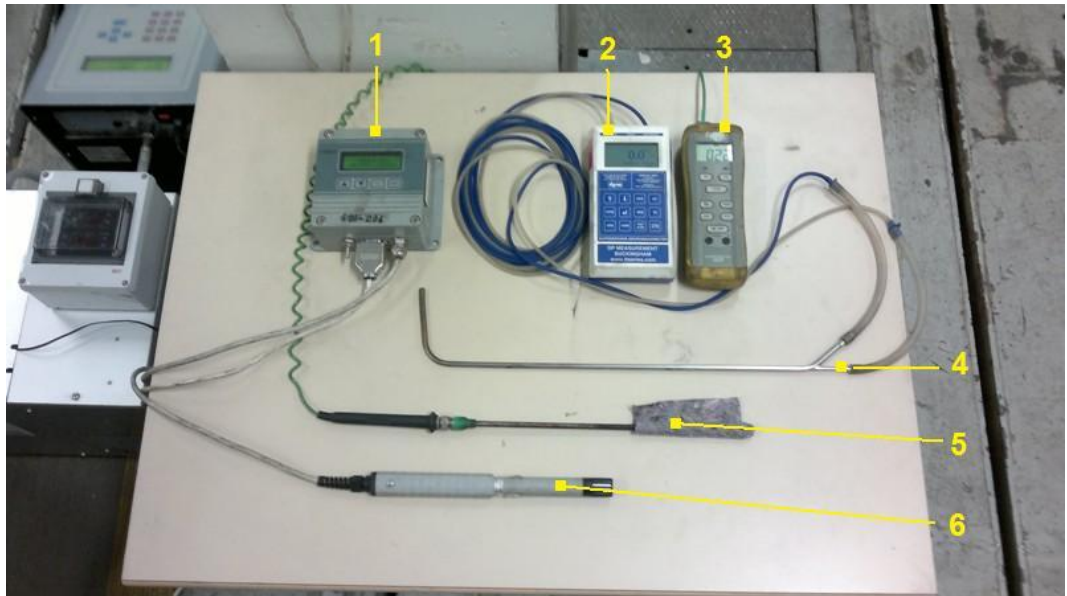


Kuva 17. Vasemmalla ylhäällä pohjasuodattimia näytteenoton jälkeen menossa laboratoriuuniin lämpökäsiteltäväksi, oikealla ylhäällä pohjasuodatin kuljetusrasiassa ja alhaalla keräysalustoja näytteenoton jälkeen, alustat pidätinrenkailla pohjissa kiinni



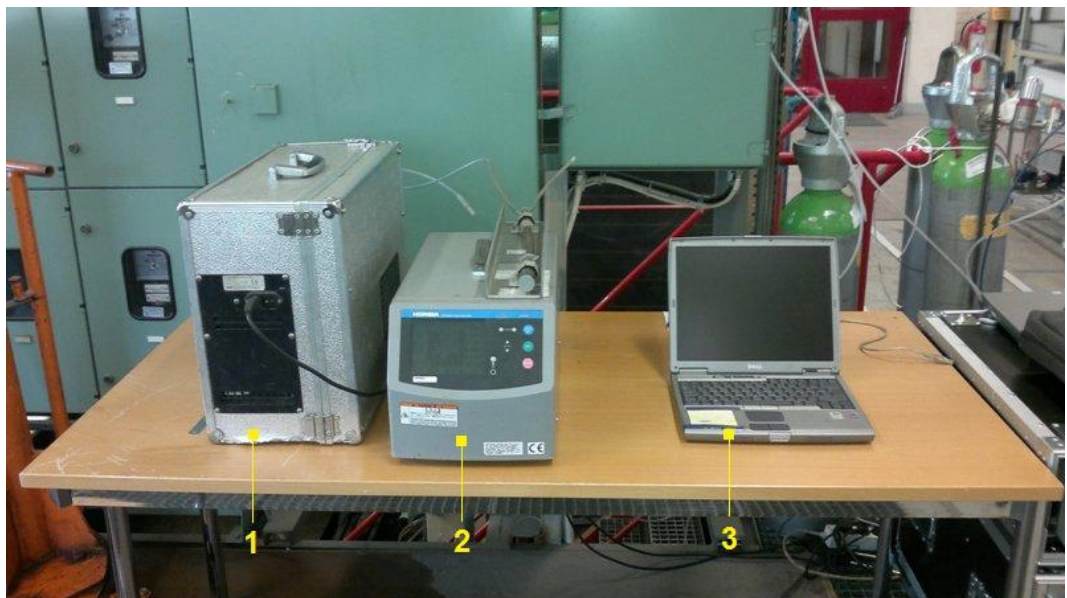
Kuva 18. Näytteenotto laitteisto kanavan ulkopuolisella menetelmällä, jossa:

1. automaattinen näytteenottopumppu tilavuusvirtausmittauksella ja lämpötilamittauksella
2. säädettävä näytekaasun jäähdytin
3. lämmitysmaton säätöyksikkö
4. impaktori mittausyhteeseen asetettuna, lämmitysmatto ympärillään



Kuva 19. Mittausvälineistöä, jossa:

1. Vaisala PTU ympäristön olosuhteiden mittalaite; lämpötila, ilmanpaine ja kosteus
2. dp measurement RS 232 mikromanometri
3. Thermometer 307P lämpömittari
4. L-tyypin pitot-putki
5. K-tyypin lämpötila-anturi
6. Vaisala PTU:n mittapää



Kuva 20. Jatkuvatoiminen savukaasuanalysointilaitteisto, jossa:

1. näytteenottopumppu
2. Horiba jatkuvatoiminen savukaasuanalysointilaitteisto
3. tiedonkeruu

9 ISOKINEETTINEN NÄYTTEENOTTO

Isokineettisyydellä tarkoitetaan näytteenoton yhteydessä sitä, että näytekaasun nopeus tulosuuttimessa on yhtä suuri kuin savukaasun virtausnopeus suuttimen kohdalla savukanavassa. Isokineettisellä näytteenotolla saadaan hiukkaspitoisuudesta ja jakaumasta oikeat arvot. Jos näytettä imetään liian suurella nopeudella, verrattuna savukaasun nopeuteen, saadaan liian pieni pitoisuus liian hienolla kokojakaumalla. Tätä kutsutaan **yli-isokineettiseksi** näytteenotoksi. Ilmiö johtuu siitä, etteivät suuret hiukkaset kykene seuraamaan kiihtyvää virtausta ja pieniä hiukkasia kertyy vastaavasti virtauksen mukana suutinta suuremmalta alalta. Puolestaan, jos näytettä imetään liian pienellä nopeudella verrattuna savukaasun nopeuteen, saadaan liian suuri pitoisuus liian karkealla kokojakaumalla. Tätä kutsutaan **ali-isokineettiseksi** näytteenotoksi. Tällöin pienet hiukkaset kulkeutuvat ohi suuttimesta nopeamman savukaasuvirtauksen mukana ja näytevirtaan kuulumattomat isommat hiukkaset tulevat kerätyksi (VTT osa1 2007:20.).

Isokineettinen näytteenotto täytyy impaktorimittauksissa järjestää erikokoisten tulosuutinten avulla. Impaktorin läpi tulee virrata tietty tilavuusvirtaus, jotta sen katkaisukohdat pysyvät sellaisina, joiksi ne ovat suunniteltu. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun Dekati PM10- impaktorin nimellisvirtaus on 10 l/min, tarkka virtausarvo saadaan laskennallisesti impaktorin olosuhteista. Kun tämän lisäksi tiedetään savukaasun virtausnopeus, voidaan suuttimen koko d_{nozzle} laskea kaavan 3 avulla.

Tulosuuttimen sisähalkaisija d_{nozzle} :

$$d_{nozzle} = \sqrt{\frac{4\dot{V}}{\pi v_{fg}}} \quad (3)$$

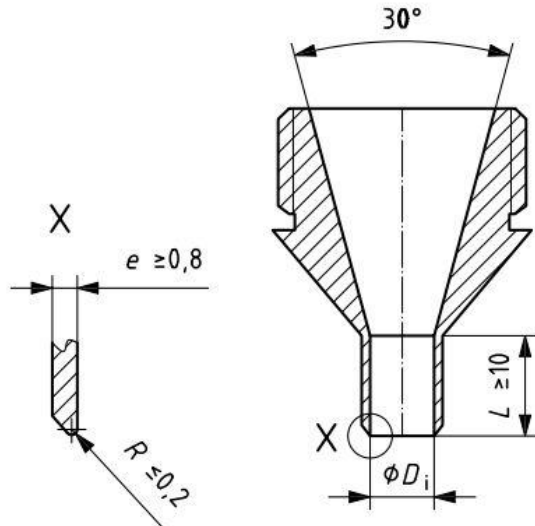
jossa:

V näytekaasun tilavuusvirtaus suuttimessa, joka on käytännössä sama kuin impaktorin tilavuusvirtaus
 v_{fg} savukaasun nopeus näytteenotto pisteessä (SFS-EN ISO 23210:25)

Tulosuutin tulee valita laskennallisesta arvosta siten, että näytteenoton isokineettisyysaste pysyy välillä 0,9 ja 1,3 (SFS-EN ISO 2009:15). Isokineettisyysasteella tar-

koitetaan näytekaasun nopeuden suhdetta suuttimessa, savukaasun nopeuteen mittauspisteessä.

Suuttimen rakenne on määritelty standardeissa ISO 12141 ja EN 13284-1. Kuvassa 21 on esitetty yksi vaihtoehto suuttimen toteutukselle standardien vaatimusten mukaisesti.



Kuva 21. Isokineettisen näytteenoton suutin, jossa:

e	suuttimen kärjen seinämänpaksuuden on oltava pienempi kuin $D_i / 12$, mutta kuitenkin vähintään 0,8 mm
D_i	suuttimen tuloreiän halkaisija
R	suuttimen kärjen pyöristyksen säteen tulee olla enintään 0,2 mm
L	suuttimen kärjen halkaisijan D_i tulee olla muuttumaton vähintään 10 mm
30°	laajennuskartion kulma saa olla enintään 30° (SFS-EN ISO 23210:38)

10 LASKENTA

Tässä kappaleessa käydään läpi mittauksissa tarvittava laskenta. Laskenta on SFS-EN ISO 23210:2009 mukainen. Standardi ei kuitenkaan käsittele savukaasulaskentaa riittävän laajasti, jotta se sellaisenaan toimisi käytännön lähtöarvojen kanssa. Laskentaa on puuttuvilta osin täydennetty VTT:n päästömittauskäsikirja osasta 1. Esimerkkilaskennassa on käytetty todellisia arvoja, jotka ovat peräisin 12.6.2012 energiatekniikan laboratoriossa tehdystä mittauksesta.

10.1 Lähtöarvot

Ennen kuin voidaan suorittaa varsinaisia hiukkasmittauksia, on tehtävä laskenta, jolla selvitetään impaktorin läpi menevä tilavuusvirtaus, teoreettiset katkaisukohtat sekä isokineettisen suuttimen koko. Mittaamalla on saatu seuraavat lähtöarvot:

T	savukaasun lämpötila	206 °C (479,15 K)
T_{sg}	imetyn näytteen lämpötila kaasukellossa	20 °C (293,15 K)
V_{sg}	imetyn näytteen tilavuus	2,00 m ³
m_v	lauhtuneen veden massa	166,2 g
r_{O2k}	kuivan savukaasun happipitoisuus	8,38 %
r_{CO2k}	kuivan savukaasun hiilidioksidipitoisuus	12,54 %
p_{atm}	mittauspaikan vallitseva ilmanpaine	99,9 kPa
p_{st}	staattinen paine savukanavassa	-5,0 Pa
p_{dyn}	savukaasun dynaaminen paine mittauspisteessä	5,0 Pa
p_{sg}	imetyn näytteen paine ennen pumppua	95,9 kPa
p	savukaasun absoluuttinen paine ($p_{atm}+p_{st}$)	99,895 kPa

Laskennassa on käytetty normaaliolosuhteen arvoina, normaalilämpötilaa T_n (273,15 K) ja normaalipainetta p_n (101,33 kPa). Edellisten mittaamalla saatujen arvojen perusteella tulee laskea: kuivan savukaasun typpipitoisuus, kostean- ja kuivan kaasun tiheys, kostean kaasun komponenttien osuudet, veden ja kuivan kaasun massasuhde, näytekaasun tilavuus normaaliolosuhteessa sekä savukaasun vesipitoisuus normaaliolosuhteessa, näiden avulla saadaan savukaasun nopeus mittauspisteessä v_{fg} . Alla on esitetty laskennassa tarvittavat kaavat, sijoittelua ei tässä yhteydessä ole mielekäästä tehdä, täydellinen Mathcad-laskenta on liitteenä (liite 4).

Kuivan savukaasun typpipitoisuus r_{N2k} :

$$r_{N2k} = 100 \% - r_{CO2k} - r_{O2k} \quad (4)$$

jossa;

r_{O2k}	kuivan savukaasun happipitoisuus	8,38 %
r_{CO2k}	kuivan savukaasun hiilidioksidipitoisuus	12,54 %

Sijoittamalla arvot kaavaan 4. saadaan kuivan savukaasun typpipitoisuudeksi:

$$r_{N2k} = 79,08 \%$$

Kuivan savukaasun tiheys normaaliolosuhteessa ρ_n :

$$\rho_n = r_{O2k} \times \rho_{nO2} + r_{CO2k} \times \rho_{nCO2} + r_{N2k} \times \rho_{nN2} \quad (5)$$

jossa:

ρ_{nO2}	hapen tiheys normaaliolosuhteessa	1,429 kg/m ³
ρ_{nCO2}	hiilidioksidin tiheys normaaliolosuhteessa	1,977 kg/m ³
ρ_{nN2}	typen tiheys normaaliolosuhteessa	1,251 kg/m ³
r_{O2k}	kuivan savukaasun happipitoisuus	8,38 %
r_{CO2k}	kuivan savukaasun hiilidioksidipitoisuus	12,54 %
r_{N2k}	kuivan savukaasun typpipitoisuus	79,08 %

Sijoittamalla arvot kaavaan 5. saadaan kuivan savukaasun tiheydeksi normaaliolosuhteessa:

$$\rho_n = 1,357 \text{ kg/m}^3$$

Veden ja kuivan kaasun massasuhde x_s :

$$x_s = \frac{m_v}{V_{sg} \times \frac{T_n}{T_{sg}} \times \frac{p_{atm}}{p_n} \times \rho_n} \quad (6)$$

jossa;

m_v	lauhtuneen veden massa	166,2 g
V_{sg}	imetyn näytteen tilavuus	2,00 m ³
T_{sg}	imetyn näytteen lämpötila kaasukellossa	293,15 K
T_n	normaalilämpötila	273,15 K
p_{atm}	mittaustaikan vallitseva ilmanpaine	99,9 kPa
p_n	normaalipaine	101,33 kPa
ρ_n	savukaasun tiheys normaaliolosuhteessa	1,357 kg/m ³

Sijoittamalla arvot kaavaan 6. saadaan veden ja kuivan kaasun massasuhteeksi:

$$x_s = 0,067 \frac{kg}{kg}$$

Kostean savukaasun vesipitoisuus r_{H_2O} :

$$r_{H_2O} = \frac{\frac{x_s}{\rho_{nH_2O}}}{\left(\frac{1}{\rho_n} + \frac{x_s}{\rho_{nH_2O}}\right)} \quad (7)$$

jossa;

ρ_{nH_2O}	vesihöyryn tiheys normaaliolosuhteessa	0,804 kg/m ³
ρ_n	savukaasun tiheys normaaliolosuhteessa	1,357 kg/m ³
x_s	veden ja kuivan kaasun massasuhde	0,067 kg/kg

Sijoittamalla arvot kaavaan 7. saadaan kostean kaasun vesipitoisuudeksi:

$$r_{H_2O} = 10,12 \%$$

Kostean savukaasun happipitoisuus r_{O_2} , hiilidioksidipitoisuus r_{CO_2} ja typpipitoisuus r_{N_2} :

$$r_{O_2} = r_{O_2k} \times (1 - r_{H_2O}) \quad (8)$$

$$r_{O_2} = 7,53 \%$$

$$r_{CO_2} = r_{CO_2k} \times (1 - r_{H_2O}) \quad (9)$$

$$r_{CO_2} = 11,27 \%$$

$$r_{N_2} = r_{N_2k} \times (1 - r_{H_2O}) \quad (10)$$

$$r_{N_2} = 71,08 \%$$

joissa;

r_{O_2k}	kuivan savukaasun happipitoisuus	8,38 %
r_{CO_2k}	kuivan savukaasun hiilidioksidipitoisuus	12,54 %
r_{N_2k}	kuivan savukaasun typpipitoisuus	79,08 %
r_{H_2O}	kostean kaasun vesipitoisuus	10,12 %

Imetyn näytteen tilavuus normaaliolosuhteessa V_{sgn} :

$$V_{sgn} = V_{sg} \times \frac{T_n}{T_{sg}} \times \frac{p_{atm}}{p_n} \quad (11)$$

jossa;

V_{sg}	imetyn näytteen tilavuus	2,00 m ³
T_{sg}	imetyn näytteen lämpötila kaasukellossa	293,15 K
T_n	normaalilämpötila	273,15 K
p_{atm}	mittauspaikan vallitseva ilmanpaine	99,9 kPa
p_n	normaalipaine	101,33 kPa

Sijoittamalla arvot kaavaan 11. saadaan imetyn näytteen tilavuudeksi normaaliolosuhteessa:

$$V_{sgn} = 1,837 \text{ m}^3$$

Savukaasun vesipitoisuus normaaliolosuhteessa f_n :

$$f_n = \frac{m_v}{V_{sgn}} \quad (12)$$

jossa;

m_v	lauhtuneen veden massa	166,2 g
V_{sgn}	imetyn näytteen tilavuus normaaliolosuhteessa	1,837 m ³

Sijoittamalla arvot kaavaan 12. saadaan savukaasun vesipitoisuudeksi normaaliolosuhteessa:

$$f_n = 0,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Kostean savukaasun tiheys savukanavassa ρ_{pth} :

$$\rho_{pth} = \frac{(p_{atm} + p_{st}) \times T_n \times (\rho_n + f_n)}{p_n \times T \times \left(1 + \frac{f_n}{\rho_{nH_2O}}\right)} \quad (13)$$

jossa;

p_{atm}	mittauspaikan vallitseva ilmanpaine	99,9 kPa
p_{st}	staattinen paine savukanavassa	-5,0 Pa
p_n	normaalipaine	101,33 kPa
T	savukaasun lämpötila	479,15 K
T_n	normaalilämpötila	273,15 K
ρ_{nH_2O}	vesihöyryn tiheys normaaliolosuhteessa	0,804 kg/m ³
ρ_n	savukaasun tiheys normaaliolosuhteessa	1,357 kg/m ³
f_n	savukaasun vesipitoisuus normaaliolosuhteessa	0,09 kg/m ³

Sijoittamalla arvot kaavaan 13. saadaan kostean savukaasun tiheydeksi savukanavassa:

$$\rho_{pth} = 0,731 \frac{kg}{m^3}$$

Savukaasun virtausnopeus mittauspisteessä v_{fg} :

$$v_{fg} = \sqrt{\frac{2 \times p_{dyn}}{\rho_{pth}}} \quad (14)$$

jossa;

p_{dyn}	savukaasun dynaaminen paine mittauspisteessä	5,0 Pa
ρ_{pth}	kostean savukaasun tiheys savukanavassa	0,731 kg/m ³

Sijoittamalla arvot kaavaan 14. saadaan savukaasun virtausnopeudeksi mittauspisteessä:

$$v_{fg} = 3,70 \frac{m}{s}$$

10.2 Tilavuusvirtaukset ja katkaisukohdat

Tilavuusvirtauksien laskentaan tarvitaan savukaasun lämpötilariippuvainen dynaaminen viskositeetti $\eta_{(T)}$, sekä Cunninghamin kertoimet $C_{2,5}$ ja C_{10} . Lämpötilariippuvainen dynaaminen viskositeetti lasketaan savukaasun komponenttien viskositeettien kautta. Kaavat on esitetty alla, mutta sijoittelua ei tässä yhteydessä ole mielekäästä tehdä. Tarvittavat taulukkoarvot löytyvät liitteenä (liite 3). Täydellinen Mathcad-laskenta on liitteenä (liite 4).

Lämpötilariippuvainen dynaaminen viskositeetti savukaasun komponenteille $\eta_{j(T)}$:

$$\eta_{j(T)} = \eta_{n,j} \times \sqrt{\frac{T}{T_n}} \times \frac{1 + \frac{S_j}{T_n}}{1 + \frac{S_j}{T}} \quad (15)$$

jossa;

j	indeksi savukaasu komponentille ($j = \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$)	
$\eta_{n,j}$	savukaasun komponenttien dynaamiset viskositeetit normaaliolosuhteessa	liite 3.
S_j	savukaasun komponenttien Sutherlandin vakiot	liite 3.
T	savukaasun lämpötila	479,15 K
T_n	normaalilämpötila	273,15 K

Kaavaan 15. sijoitetaan vastaavat hapen, hiilidioksidin, typen ja vesihöyryn arvot liitteestä 3, jolloin saadaan:

$$\eta_{\text{O}_2(T)} = 2,952 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$$

$$\eta_{\text{CO}_2(T)} = 2,311 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$$

$$\eta_{\text{N}_2(T)} = 2,482 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$$

$$\eta_{H_2O(T)} = 1,645 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}$$

Savukaasun lämpötilariippuvainen dynaaminen viskositeetti $\eta_{(T)}$:

$$\eta_{(T)} = \frac{\sum_j r_j \times \eta_{j(T)} \times \sqrt{M_j \times T_{crit,j}}}{\sum_j r_j \times \sqrt{M_j \times T_{crit,j}}} \quad (16)$$

jossa;

j	indeksi savukaasu komponentille ($j = CO_2, O_2, N_2, H_2O$)	
r_j	kostean savukaasun komponenttien pitoisuudet	(alla)
r_{O_2}	kostean savukaasun happipitoisuus	7,53 %
r_{CO_2}	kostean savukaasun hiilidioksidipitoisuus	11,27 %
r_{N_2}	kostean savukaasun typpipitoisuus	71,08 %
r_{H_2O}	kostean savukaasun vesihöyrypitoisuus	10,12 %
$\eta_{j(T)}$	savukaasun komponenttien lämpötilariippu- dynaamiset viskositeetit	
$T_{crit,j}$	savukaasun komponenttien kriittiset lämpötilat	liite 3.
M_j	savukaasun komponenttien moolimassat	liite 3.

Sijoittamalla kaavaan 16. tarvittavat savukaasun komponenttien arvot, saadaan savukaasun lämpötilariippuvaiseksi dynaamiseksi viskositeetiksi:

$$\eta_{(T)} = 2,358 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}$$

Cunninghamin kertoimien $C_{2,5}$ ja C_{10} laskentaan tarvitaan savukaasun moolimassaa M ja keskimääräinen vapaa matka λ .

Savukaasun moolimassa M :

$$\bar{M} = \sum_j r_j \times M_j \quad (17)$$

jossa;

j	indeksi savukaasu komponentille ($j = \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$)	
r_j	kostean savukaasun komponenttien pitoisuudet	
M_j	savukaasun komponenttien moolimassat	liite 3.

Sijoittamalla arvot kaavaan 17. saadaan savukaasun moolimassaksi:

$$\bar{M} = 0,029 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

Keskimääräinen vapaa matka λ :

$$\lambda = 2 \times \frac{\eta(T)}{p} \times \sqrt{\frac{\pi \times R \times T}{8 \times M}} \quad (18)$$

jossa;

$\eta(T)$	savukaasun lämpötilariippuvainen viskositeetti	$2,358 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$
p	savukaasun absoluuttinen paine	99,895 kPa
T	savukaasun lämpötila	479,15 K
M	savukaasun moolimassa	0,029 kg/mol
R	kaasuvakio	8,315 J/molK

Sijoittamalla arvot kaavaan 18. saadaan keskimääräiseksi vapaaksi matkaksi:

$$\lambda = 1,095 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Cunninghamin kertoimet $C_{2,5}$ ja C_{10} :

$$C_i = 1 + \frac{2 \times \lambda}{d_{50,i}} \times \left[1,23 + 0,41 \times \exp \left(-0,88 \times \frac{d_{50,i}}{2 \times \lambda} \right) \right] \quad (19)$$

jossa;

i	indeksi hiukkasten kokoluokille ($i = 2,5 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}$)	
λ	keskimääräinen vapaa matka	$1,095 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
$d_{50,i}$	katkaisukohta kokoluokalle i	

Sijoittamalla arvot kaavaan 19. saadaan Cunninghamin kertoimiksi:

$$C_{2,5} = 1,108$$

$$C_{10} = 1.027$$

Impaktorin läpi menevän näytekaasun tilavuusvirtaus \dot{V} lasketaan impaktoriasteiden tilavuusvirtausten keskiarvona, olosuhteina voidaan pitää savukaasun olosuhteita mitauspisteessä.

Näytekaasun tilavuusvirtaus impaktoriasteessa \dot{V}_i :

$$\dot{V}_i = \frac{9 \times \pi \times d_{in,i}^3 \times St_{50} \times \eta_{(T)} \times N_i}{4 \times d_{50,i}^2 \times C_i \times \rho_{0,P}} \quad (20)$$

jossa:

i	indeksi hiukkasten kokoluokille ($i = 2,5 \mu\text{m}, 10\mu\text{m}$)	
$d_{in,2,5}$	impaktoriasteen $2,5\mu\text{m}$ suuttimen halkaisija	1,4 mm
$d_{in,10}$	impaktoriasteen $10\mu\text{m}$ suuttimen halkaisija	8,3 mm
St_{50}	Stokesin luku	0,22
$\eta_{(T)}$	näytekaasun lämpötilariippuvainen viskositeetti	$2,358 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$
$N_{2,5}$	impaktoriasteen $2,5 \mu\text{m}$ suutinten lukumäärä	14
N_{10}	impaktoriasteen $10 \mu\text{m}$ suutinten lukumäärä	1
$d_{50,2,5}$	impaktoriasteen $2,5 \mu\text{m}$ katkaisukohdan halkaisija	$2,5 \mu\text{m}$
$d_{50,10}$	impaktoriasteen $10 \mu\text{m}$ katkaisukohdan halkaisija	$10 \mu\text{m}$
C_i	Cunninghamin kerroin hiukkaskoolle i	
$\rho_{0,P}$	hiukkasen yksikkömassatiheys	1 g/cm^3

Sijoittamalla arvot kaavaan 20. saadaan impaktoriasteiden tilavuusvirtaukset:

$$\dot{V}_{2,5} = 12,209 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

$$\dot{V}_{10} = 12,251 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Impaktorin läpi menevän näytekaasun tilavuusvirtaus saadaan edellisten keskiarvona:

$$\bar{V} = \frac{\dot{V}_{2,5} + \dot{V}_{10}}{2} \quad (21)$$

$$\bar{V} = \frac{12,209 \frac{l}{min} + 12,251 \frac{l}{min}}{2} = 12,23 \frac{l}{min}$$

Näytekaasun tilavuusvirtaus normaaliolosuhteessa V_n :

$$\dot{V}_n = \bar{V} \frac{T_n(p_{atm} + p_{st})}{p_n \times T \left(1 + \frac{f_n}{\rho_{n,H_2O}}\right)} \quad (22)$$

jossa:

T	savukaasun lämpötila	479,15 K
T_n	normaalilämpötila	273,15 K
p_{atm}	mittauspaikan vallitseva ilmanpaine	99,9 kPa
p_n	normaalipaine	101,33 kPa
p_{st}	savukanavan staattinen paine	- 5 Pa
f_n	savukaasun vesipitoisuus normaaliolosuhteessa	0,09 kg/m ³
ρ_{n,H_2O}	vesihöyryn tiheys normaaliolosuhteessa	0,804 kg/m ³

Sijoittamalla arvot kaavaan 22. saadaan näytekaasun tilavuusvirtaukseksi normaaliolosuhteessa:

$$\dot{V}_n = 6,178 \frac{l}{min}$$

Näytekaasun tilavuusvirtaus pumpun olosuhteessa V_s saadaan soveltamalla kaavaa 22., korvataan normaalipaineen p_n -ja lämpötilan T_n arvot pumpun vastaaviin arvoihin p_{sg} ja T_{sg} .

$$\dot{V}_s = \bar{V} \frac{T_{sg}(p_{atm} + p_{st})}{p_{sg} \times T \left(1 + \frac{f_n}{\rho_{n,H_2O}}\right)} \quad (23)$$

jossa:

T_{sg}	imetyn näytteen lämpötila kaasukellossa	293,15 K
p_{sg}	imetyn näytteen paine ennen pumppua	95,9 kPa

Sijoittamalla arvot kaavaan 23. saadaan näytekaasun tilavuusvirtaukseksi pumpun olosuhteissa:

$$\dot{V}_s = 7,006 \frac{l}{min}$$

Isokineettisen näytteenoton edellyttämä tulosuuttimen sisähalkaisija d_{nozzle} saadaan aiemmin esitetyllä kaavalla 3:

$$d_{nozzle} = \sqrt{\frac{4 \times \dot{V}}{\pi \times v_{fg}}} \quad (3)$$

jossa:

\dot{V}	impaktorin läpi menevä tilavuusvirtaus	12,23 l/min
v_{fg}	savukaasun nopeus mittauspisteessä	3,70 m/s

Sijoittamalla arvot kaavaan 3. saadaan isokineettisen suuttimen kooksi:

$$d_{nozzle} = 8,4 \text{ mm}$$

Impaktoriasteiden laskennalliset katkaisukohtat saadaan aiemmin esitetyllä kaavalla 2:

$$d_{50,i} = \sqrt{\frac{9\pi St_{50,i} \eta N_i d_{in,i}^3}{4\rho_{0,p} C_i \dot{V}}} \quad (2)$$

i indeksi hiukkasten kokoluokille
($i = 2,5 \mu\text{m}, 10\mu\text{m}$)

$St_{50,i}$	Stokesin luku	0,22
$\eta_{(T)}$	näytekaasun lämpötilariippuvainen viskositeetti	$2,358 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$
$N_{2,5}$	impaktoriasteen 2,5 μm suutinten lukumäärä	14
N_{10}	impaktoriasteen 10 μm suutinten lukumäärä	1
$d_{in,2,5}$	impaktoriasteen 2,5 μm suuttimen halkaisija	1,4 mm

$d_{in,10}$	impaktoriasteen 10 μ m suuttimen halkaisija	8,3 mm
$\rho_{0,P}$	hiukkasen yksikkömassatiheys	1 g/cm ³
$C_{2,5}$	Cunninghamin kerroin hiukkaskoolle 2,5 μ m	1,108
C_{10}	Cunninghamin kerroin hiukkaskoolle 10 μ m	1,027
\dot{V}	näytekaasun tilavuusvirtaus impaktorissa	12,23 l/min

Sijoittamalla arvot kaavaan 2. saadaan impaktoriasteiden katkaisukohdiksi:

$$d_{50,2,5} = 2,498 \mu m$$

$$d_{50,10} = 10,009 \mu m$$

Aiemmin impaktorin toimintaperiaatetta käsittelevässä luvussa todettiin että Reynoldsin luvun Re tulee olla laminaarisen virtauksen alueella, eli 100 – 3000. Reynoldsin luvun laskemiseksi tarvitaan näytekaasun nopeus v_{in} impaktoriasteen suuttimessa.

Näytekaasun nopeus impaktoriasteen suuttimessa v_{in} :

$$v_{in,i} = \frac{4 \times \dot{V}}{N_i \times \pi \times d_{in,i}^2} \quad (24)$$

jossa:

i	indeksi hiukkasten kokoluokille ($i = 2,5 \mu m, 10 \mu m$)	
\dot{V}	näytekaasun tilavuusvirtaus impaktorissa	12,23 l/min
$N_{2,5}$	impaktoriasteen 2,5 μ m suutinten lukumäärä	14
N_{10}	impaktoriasteen 10 μ m suutinten lukumäärä	1
$d_{in,2,5}$	impaktoriasteen 2,5 μ m suuttimen halkaisija	1,4 mm
$d_{in,10}$	impaktoriasteen 10 μ m suuttimen halkaisija	8,3 mm

Sijoittamalla arvot kaavaan 24. saadaan näytekaasun nopeudeksi impaktoriasteiden suuttimissa:

$$v_{in,2,5} = 9,458 \frac{m}{s}$$

$$v_{in,10} = 3,767 \frac{m}{s}$$

Impaktoriasteen Reynoldsin luku Re :

$$Re_i = \frac{v_{in,i} \times d_{in,i} \times \rho_{p,t,h}}{\eta_{(T)}} \quad (25)$$

jossa:

$\rho_{p,t,h}$	kostean savukaasun tiheys	0,731 kg/m ³
$\eta_{(T)}$	näytekaasun lämpötilariippuvainen viskositeetti	2,358*10 ⁻⁵ kg/ms
$d_{in,2,5}$	impaktoriasteen 2,5µm suuttimen halkaisija	1,4 mm
$d_{in,10}$	impaktoriasteen 10µm suuttimen halkaisija	8,3 mm

Sijoittamalla arvot kaavaan 25. saadaan impaktoriasteiden Reynoldsin luvuiksi:

$$Re_{2,5} = 410,6$$

$$Re_{10} = 969,5$$

10.3 Mittaustulosten laskenta

Edellä esitetty laskenta tulee suorittaa ennen varsinaista hiukkasmittausta. Tässä esitetään hiukkasmittauksen jälkeen tehtävä standardin ISO 23210, mukainen PM_{2,5}- ja PM₁₀- pitoisuuksien laskenta. Ennen pitoisuuksien laskentaa tulee selvittää imetyn näytekaasun tilavuus normaaliolosuhteissa. Tämä saadaan aiemmin esitetyllä kaavalla 11.

Imetyn näytekaasun tilavuus normaaliolosuhteissa V_{sgn} ;

$$V_{sgn} = V_{sg} \times \frac{T_n}{T_{sg}} \times \frac{p_{atm}}{p_n} \quad (11)$$

jossa:

V_{sg}	imetyn näytteen tilavuus	0,3 m ³
T_{sg}	näytekaasun lämpötila mittakellolla	293,15 K

T_n	normaalilämpötila	273,15 K
p_{atm}	mittauspaikan vallitseva ilmanpaine	99,9 kPa
p_n	normaalipaine	101,33 kPa

Sijoittamalla arvot kaavaan 11. saadaan näytekaasun tilavuudeksi normaaliolosuhteessa:

$$V_{\text{sgn}} = 0,276 \text{ m}^3$$

Savukaasun $\text{PM}_{2,5}$ - massapitoisuus $c(\text{PM}_{2,5})$;

$$c(\text{PM}_{2,5}) = \frac{m(\text{BF})}{V_{\text{sgn}}} \quad (26)$$

jossa:

$m(\text{BF})$	hiukkasten massa pohjasuodattimessa	8,43 mg
V_{sgn}	imetyn näytteen tilavuus normaaliolosuhteessa	0,276 m ³

Sijoittamalla arvot kaavaan 26. saadaan savukaasun $\text{PM}_{2,5}$ - massapitoisuudeksi:

$$c(\text{PM}_{2,5}) = 30,54 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Savukaasun PM_{10} - massapitoisuus $c(\text{PM}_{10})$;

$$c(\text{PM}_{10}) = \frac{m(\text{BF}) + m(\text{CP2})}{V_{\text{sgn}}} \quad (27)$$

jossa:

$m(\text{BF})$	hiukkasten massa pohjasuodattimessa	8,43 mg
$m(\text{CP2})$	hiukkasten massa keräysalustalla 2	0,24 mg
V_{sgn}	imetyn näytteen tilavuus normaaliolosuhteessa	0,276 m ³

Sijoittamalla arvot kaavaan 27. saadaan savukaasun PM_{10} - massapitoisuudeksi:

$$c(PM_{10}) = 31,41 \frac{mg}{m^3}$$

10.4 Mittausepävarmuus

Standardin ISO 23210, mukaan mittausten epävarmuus määritellään käyttämällä kahta identtistä mittauslaitteistoa toistettavissa ja uusittavissa olosuhteissa. Näytteet otetaan samasta mittausyhteestä ja samasta mittauspisteestä. Mittausepävarmuus on määriteltävä ISO 20988, mukaisesti mittausparin tuloksista standardipoikkeaman s_D kaavan avulla.

Standardipoikkeama s_D lukupareille on:

$$s_D \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_{i,1} - c_{i,2})^2}{2n}} \quad (28)$$

jossa;

$c_{1,i}$	pitoisuusarvo ensimmäisestä mittausjärjestelmästä	(29,75 mg/m ³)
$c_{2,i}$	pitoisuusarvo toisesta mittausjärjestelmästä	(30,54 mg/m ³)
n	näyteparien lukumäärä	1

Standardin mukaista mittausepävarmuuden määrittystä ei ole tehty, koska Kymenlaakson ammattikorkeakoululla on käytettävissään vain yksi laitteisto. Mittausepävarmuus on tässä laskettu kahden perättäisen mittauksen tuloksista. Olosuhteet mittauksissa olivat hyvin samankaltaiset. Standardipoikkeama on laskettu PM_{2,5}- pitoisuuksilla. Si-joittamalla arvot kaavaan 28. saadaan standardipoikkeamaksi $s_{D(PM_{2,5})}$:

$$s_{D(PM_{2,5})} = 0,56 \frac{mg}{m^3}$$

11 VALMISTELU, MITTAUSMENETTELY JA JÄLKIKÄSITTELY

Tässä luvussa käydään läpi standardin SFS-EN ISO 23210 mukainen menettely mittauksen valmistelun, itse mittaamisen ja jälkikäsitteilyn osalta. Menettely on otettu suoraan standardista, lisättynä siinä viitattuja kohtia sekä joitakin selvennyksiä.

Yleistä

Mittausyhteiden tulee täyttää kansainvälisesti tai kansallisesti standardoidut vaatimukset sijoittelun, lukumäärän ja rakenteen osalta. Mittausyhteiden tulee olla mitoitukseltaan sellaisia, että impaktori voidaan asettaa suoraan savukanavaan ilman seinämäkosketusta. Mittaustason tulee täyttää sovellettavan standardin vaatimukset. Sovellettava standardi on esimerkiksi SFS-EN 13284-1, josta suora lainaus (SFS-EN ISO 23210:13.):

Mittaustason tulisi sijaita kanavan suoralla osalla (mieluummin pystysuoralla), jossa kanavan muoto ja poikkileikkauspinta-ala on muuttumaton. Mittaustason tulisi sijaita riittävän kaukana ennen ja jälkeen sijaitsevista mahdollisista häiritsevistä kohteista, jotka voisivat muuttaa virtauksen suuntaa (häiriöitä voivat aiheuttaa mm. mutkat, puhaltimet tai osittain suljetut sulkupellit).

Savukaasun olosuhteet tulee pysyä muuttumattomina koko mittauksen ajan. Tulee myös varmistaa, että näytteenoton isokineettisyysaste pysyy välillä 0,9 ja 1,3. Impaktoria tulee käyttää savukaasukanavan sisällä sisääntulosuuttimen kanssa, joka on rakenteeltaan kuvan 21. mukainen. Mittauspiste mittaustasolla tulee valita siten, että näyte on mahdollisimman edustava. Edustava mittauspiste määritellään standardin ISO 12141 mukaisesti savukaasun nopeuksista. Näytteenoton aikana tulee varmistua siitä, että katkaisukohtat pysyvät muuttumattomina. Vakaisissa savukaasun olosuhteissa tämä voidaan varmistaa tasaisella näytekaasun virtauksella (SFS-EN ISO 23210:14.).

Kenttänollanäytteen otto on suoritettava laadunvarmistustoimenpiteenä jokaisen mitaussarjan jälkeen, tai vähintään kerran päivässä. Kenttänollanäytteen otto suoritetaan kuten normaali näytteenotto, mutta imulaitteistoa ei käynnistetä. Näytettä tulee käsitellä kuten normaalia hiukkasnäytettä ja kertymän tulee olla lähellä nollaa. Kenttänollanäytteen tulee sisältää alustojen käsittelystä, kuljetuksesta, varastoinnista sekä käsittelystä ja punnituksesta laboratoriossa aiheutunut kertymä (SFS-EN ISO 23210:14.).

Valmistelu

Impaktorin tulee olla puhdistettu valmistajan ohjeiden mukaisesti ennen mittauksia, sekä määrätyn välein mittauspaikalla. Kaikki impaktorin sisäpinnat tulee puhdistaa jokaisen mittauksen välillä, esimerkiksi mikrokuituliinalla (SFS-EN ISO 23210:14.).

Suodatinasetelman (keräysalustat ja pohjasuodatin alustoineen) tulee valmistella laboratoriossa. Jos tarpeen, voidaan keräysalustoja valmistaa sopivan läpimittaisella lävistimellä kuitusuodatinmateriaalista. Lävistyksen jälkeen tulee tarkistaa alustojen reunat visuaalisesti ja poistaa irtonaiset kuidut pinseteillä. Keräysalustoja tulee käyttää sileä pinta ylöspäin. Standardi ISO 23210 suosittelee käytettäväksi rasvaamattomia kvartsi-kuituisia suodattimia keräysalustoina, mutta toisaalta keräystehokkuutta voidaan parantaa rasvatuilla alustoilla. Tämä vaatii kuitenkin olosuhteiden huomioon ottamista, kuten korkean lämpötilan vaikutuksen (SFS-EN ISO 23210:14.).

Keräysalustat ja pohjasuodattimet on asetettava yksilöidysti merkityille alustoille. Sen jälkeen keräysalustat ja pohjasuodattimet alustoineen on kuivattava, lämpö tasattava ja punnittava standardin EN 13284-1 mukaisesti. Keräysalustat ja pohjasuodattimet alustoineen on säilytettävä ja kuljetettava tiiviisti suljetuissa sekä selkeästi merkityissä kotelossa (SFS-EN ISO 23210:14.).

Punnitus EN 13284-1 mukaisesti

Punnittavat osat on kuivattava uunissa vähintään 1 h ja vähintään 180 °C:n lämpötilassa, jonka jälkeen keräysalustat ja pohjasuodattimet alustoineen on jäädytettävä ympäristön lämpötilaan punnitushuoneessa sijaitsevassa eksikaattorissa vähintään 4 h. Suuret osat, kuten punnitusastiat, saattavat tarvita jopa 12 h. Jos punnitushuoneen kosteus on säädettävissä vakioksi eikä näyte ole hygroskooppista, keräysalustojen ja pohjasuodattimien alustoineen voidaan antaa tasaantua punnitushuoneessa.

Koska hiukkaspitoisuus määritetään useiden päivien väliajoin saatavien painojen erona, erityistä huomiota on kiinnitettävä punnitusvirheisiin, jotka aiheutuvat vaa'an liukumasta, puutteellisesta punnittavien osien lämpötasapainosta ja ilmaston muutoksesta. Siksi ennen mitään punnitusta käyttäjän on validoitava oma punnitusmenettelynsä. Samaa vaakaa suositellaan voimakkaasti käytettäväksi ennen näytteenottoa ja sen jälkeen.

Ennen jokaista punnitussarjaa:

- a) vaaka tulee tarkistaa vertailupunnuksilla
- b) lisätarkistuksia tulee tehdä punnitsemalla vertailuosia, jotka ovat samanlaisia kuin mittauksissa käytettävät osat ja on esikäsitelty samoissa valvotuissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ja estetty niiden kontaminoituminen
- c) kirjataan punnitushuoneen ympäristöolosuhteet

Huomiota on kiinnitettävä painon lisääntymiseen tai vähenemiseen seuraavista syistä:

- a) staattiset sähkövaraukset voivat aiheuttaa virheellisen lukeman ja ne on yritettävä poistaa purkamalla varaukset tai neutraloimalla (maadoitettu metallilevy, ionisäteilijä)
- b) suodatinmateriaalin ja/tai hiukkasnäytteen hygroskooppiset ominaisuudet. Punnitus tulee tehdä 3 min aikana eksikaattorista oton jälkeen. Kolme lukemaa otetaan 1 min, 2 min ja 3 min kuluttua. Jos painon lisäys on huomattava, näyte laitetaan takaisin eksikaattoriin vähintään 4 tunniksi ja sen jälkeen punnitusmenettely toistetaan. Kuiva alkupaino on laskettava ajanhetkelle nolla.
- c) pienikin lämpötilaero punnittavan osan ja ympäristön välillä voi häiritä vaa'an toimintaa
- d) kun punnitaan osia joilla on suuri tilavuus, lämpötila ja ilmanpaine voivat vaikuttaa näennäiseen painoon.

Näytteenoton jälkeen punnittavat osat kuivataan uunissa vähintään 1 h 160 °C:ssa.

Kuivauksen jälkeen niiden annetaan tasaantua ympäristön lämpötilaan, punnitushuoneessa sijaitsevassa eksikaattorissa vähintään 4 h ajan. Tämän jälkeen suoritetaan punnitukset kuten ennen näytteenottoakin.

Mittausmenettely

Mittaus suunnitelmaan tulisi yleensä sisällyttää:

- a) laitoksen käyttöolosuhteet sisältäen: polttoaineen ja savukaasun komponentit sekä olosuhteet
- b) näytteenotto päivämäärä ja aika sekä mittauksen sijainti
- c) mittausmenetelmä jota käytetään

- d) mittaustasot ja mittauspaikat
- e) tekninen valvoja ja mittausten suorittaja
- f) raportointi menettely

Näytteenoton kesto riippuu savukaasun hiukkaspitoisuudesta ja kokojakaumasta. Jos näitä ei tunneta, on ne selvitettävä esimitauksilla. Näytteenoton kesto tulee määrittää siten, etteivät keräysalustat ja pohjasuodatin ylikuormitu, mutta toisaalta saadaan kerätyksi riittävän edustava määrä hiukkasia (SFS-EN ISO 23210:15.).

Ennen hiukkasmittausta savukaasusta tulee selvittää seuraavat arvot:

- a) savukaasun nopeus
- b) savukaasun komponenttien pitoisuudet; O₂, CO₂, N₂, kosteus
- c) lämpötila
- d) staattinen paine

Näytekaasun tilavuusvirtaus impaktorin olosuhteessa tulee määritellä ennen hiukkasmittausta, laskenta osiossa esitetyllä tavalla. Tämä tilavuusvirtaus tulee muuntaa imulaitteiston olosuhteeseen. Laskenta suoritetaan edellä esitetyistä savukaasun arvoista. Näytekaasun tilavuusvirtaus tulee olla monitoroitu ja pidettävä vakaana ± 5 % lasketusta arvosta. Tällä varmistetaan että impaktoriasteiden katkaisukohtat pysyvät oikeina (SFS-EN ISO 23210:15.).

Impaktorin tulosuuttimen koko tulee määritellä laskentaosiossa esitetyllä tavalla.

Suuttimen koko tulee valita siten että, näytteenotto suoritetaan isokineettisyysasteella 0,9 – 1,3 (SFS-EN ISO 23210:15.).

Näytteenottolaitteisto tulee vuoto testata ennen hiukkasmittausten aloittamista. Tarkistetaan mahdolliset vuodot sulkemalla suutin ja käynnistämällä imulaite. Alipainetestillä havaitun vuotovirtauksen, kun laitteeseen on imetty näytteenotossa syntyvä suurin alipaine, on oltava alle 2 % näytteenotokaasun tilavuusvirrasta. Näytteenoton aikana vuotoja voidaan tarkkailla mittaamalla jatkuvatoimisesti sopivia kaasukomponentteja (CO₂, O₂, jne.) suoraan kanavasta ja näytteenottolaitteiston jälkeen. Näiden mittausten havaittavissa olevat pitoisuuserot osoittavat vuodon olevan kanavan ulkopuolella olevissa laitteiston osissa. Vuoto on paikallistettava ja korjattava (SFS-EN ISO 23210:15.).

Impaktorin (näytteenottoputken) tulee olla savukaasun lämpötilassa ennen mittauksen aloittamista. Jos savukaasun lämpötila on lähellä kastepistettä, tulee koko impaktori lämmittää yli savukaasun lämpötilan, savukanavan ulkopuolella. Impaktori (näytteenotto putki) asetetaan savukanavaan siten, ettei tulosuutin kosketa savukanavan seinämää. Mittausyhde tulee tiivistää ilman sisäänpääsyn minimoimiseksi ja savukaasun ulospääsyn estämiseksi. Kulma tulosuuttimen keskilinjan ja savukaasun virtaus-suunnan välillä tulee olla alle 10° (SFS-EN ISO 23210:16.).

Edellä kuvattujen toimenpiteiden jälkeen voidaan sulkuventtiili avata ja imulaite käynnistää. Näytekaasun virtaus tulee olla säädettyinä laskettuun arvoon. Virtaus tulee tarkastaa vähintään 5 minuutin välein ja tarvittaessa säätää. Dynaamista painetta tulee seurata jatkuvasti pitot-putkella tai jollakin muulla tarkoitukseen soveltuvalla laitteella, joka on asennettu kiinteästi savukanavaan tai joka on impaktorin (näytteenottoputken) yhteydessä. Dynaaminen paine on kirjattava ylös vähintään 5 minuutin välein. Mittauksen jälkeen impaktori (näytteenottoputki) tulee poistaa savukanavasta. Imetyksen tilavuus tulee määrittää ja kirjata ylös (SFS-EN ISO 23210:16.).

Keräysalustat ja pohjasuodatin alustoineen tulee poistaa impaktorista ja laittaa ne kuljetuskoteloon. Epäpuhtauksien pääsy keräysalustoihin ja pohjasuodattimeen on estetävä (SFS-EN ISO 23210:16.).

Jälkikäsitteily

Tulosten määrittelyyn käytetään pohjasuodatinta ja toisen impaktoriasteen keräysalustaa. Jos ensimmäistä impaktoriastetta ennen on impaktorin sisäpinnoille kertynyt näkyvää pölyä, on pohjasuodatin tutkittava elektronimikroskoopilla. Mikäli karkeampia hiukkasia on kimpoillut pohjasuodattimelle, mittausmenetelmä ei ole käyttökelpoinen tutkittavaan prosessiin ja tällöin tulokset on hylättävä. Mikäli karkeita hiukkasia ei ole pohjasuodattimella, voidaan seinämään kertyneet hiukkaset jättää huomiotta $PM_{2,5}$ - ja PM_{10} - pitoisuuksien määrittämisessä, koska ne ovat kokojakaumaltaan näitä suurempia (SFS-EN ISO 23210:16.).

Toisen impaktoriasteen keräysalusta ja pohjasuodatin alustoineen on kuivattava, lämpö tasattava eksikaattorissa ja punnittava standardissa EN 13284-1, esitetyllä tavalla. Mittauksissa käytetyt keräysalustat ja suodattimet, sekä vertailu keräysalustat ja suodattimet on punnittava samoissa olosuhteissa kuin esikäsitteilyn aikana. Punnitusten tu-

lostien perusteella määritellään PM_{2,5}- ja PM₁₀- pitoisuudet laskentaosiossa esitetyllä tavalla (SFS-EN ISO 23210:16.).

12 MITTAUSTULOKSET

Suoritetuissa mittauksissa keskityttiin kahteen erilliseen asiaan. Pääasiallinen tavoite oli suorittaa hiukkasmittausarja ISO 23210 standardin mukaisesti, siten että olosuhteet olisivat mahdollisimman tasaiset ja mittaukset mahdollisimman identtisiä. Hiukkasmittaukset tehtiin kolmen mittauksen sarjana, kahtena perättäisenä päivänä. Tavoitteena oli siis saada kuusi PM_{2,5}- ja PM₁₀- mittaustulosta, jotka poikkeaisivat mahdollisimman vähän toisistaan. Toissijaisten mittausten tavoitteena oli tutkia kanavan ulkopuolisen mittauksen aiheuttamia lämpötilaeroja impaktorissa ja näytteenottoputkessa. Tarkoituksena oli selvittää millaisella mittausjärjestelyllä estetään näytekaasussa olevan kosteuden tiivistyminen näytteenottoputkeen ja impaktoriin. Toinen mittaussarja käsitti kuusi erillistä mittausta, jotka jokainen suoritettiin erilaisilla mittausjärjestelyillä.

12.1 PM_{2,5}- ja PM₁₀- pitoisuusmittaukset

Mittausten valmistelu suoritettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästömittauslaboratoriossa 8.6.2012. Alumiinisia keräysalustoja rasvattiin 12 kpl. DS-515 alustarasvalla Dekatin ohjeiden mukaisesti. Rasvatut keräysalustat lämpö käsiteltiin yhden tunnin ajan 150 °C:ssa, joka on rasvalle ilmoitettu maksimilämpötila. Tarkoituksena oli poistaa, rasvata mahdollisesti haihtuvat komponentit, ennen punnitusta. Tämän jälkeen keräysalustojen lämpötila tasattiin huoneilmassa 30 minuutin ajan. Keräysalustat ovat massaltaan niin pieniä (n.0,014 g), että tämän ajan katsottiin riittävän. Keräysalustat punnittiin, punnitustulokset kirjattiin ylös, keräysalustat asetettiin numeroiduille alustoille ja kiinnitettiin pidätinrenkailla. Tämän jälkeen keräysalustat alustoineen laitettiin numerojärjestyksessä laatikkoon, jonka tarkoituksena oli estää epäpuhtauksien pääsy keräysalustoille.

Kuusi kappaletta pohjasuodattimia PMF-047 lämpö käsiteltiin uunissa 180 °C:ssa yhden tunnin ajan. Tämän jälkeen suoritettiin lämpötilan taseus eksikaattorissa kahden tunnin ajan. Pohjasuodattimet otettiin eksikaattorista punnitukseen yksi kerrallaan, punnitustulokset kirjattiin ylös ja suodattimet asetettiin tämän jälkeen muovisiin numeroituihin säilytysrasioihin.

Hiukkasmittaukset suoritettiin energiatekniikan laboratorion 100 kW:n biomassakattilan savukaasuista, jossa polttoaineena käytettiin pellettien ja sekahakkeen seosta suhteella 1/1. Biomassakattilan olosuhteet pyrittiin pitämään mahdollisimman vakaina. Mittaukset 1 – 3 tehtiin 11.6.2012 ja mittaukset 4 – 6 tehtiin 12.6.2012.

Savukaasuista mitattiin Horiba savukaasuanalysointilaitteella jatkuvatoimisesti CO, CO₂ ja O₂ pitoisuuksia, jotka tallentuivat automaattisesti tiedonkeruujärjestelmään. Savukaasun lämpötilaa mitattiin jatkuvatoimisesti ja tulokset kirjattiin säännöllisesti noin 5 minuutin väliajoin. Mittauspaikalla vallitsevat olosuhteet kirjattiin ennen jokaista mitausta.

Ennen jokaisen hiukkasmittauksen aloittamista mitattiin savukanavan staattinen paine pitot-putkella. Samalla laitteella mitattiin savukaasun dynaaminen paine kuudesta pisteestä, joiden tuloksista otettiin keskiarvo. Savukaasun kosteus määritettiin mittauksissa 1 – 5 kuiva/märkälämpötilamittauksella, menetelmän kuvaus löytyy VTT:n päästömittauskäsikirjasta osa 1. Ennen mittausta 6, savukaasun kosteus määritettiin myös lauhdutus/punnitus menetelmällä. Valmistelevien mittausten aikana impaktori oli asetettu lämmitysmaton sisälle ja sitä lämmitettiin 180 °C:ssa n. 40 minuutin ajan ennen jokaisen mittauksen aloittamista.

Saatujen mittaustulosten perusteella laskettiin impaktorin tulosuuttimen koot, joiden perusteella kaikkiin mittauksiin valittiin 7,62 mm:n suutin. Samojen valmistelevien mittausten perusteella laskettiin imulaitteistolle asetettava tilavuusvirtausarvo, kaikissa mittauksissa päädyttiin käyttämään samaa arvoa 6 l/min. Imettävän näytteen tilavuudeksi asetettiin 300 litraa, tämä perustui aiempiin kokemuksiin samasta päästölähteestä.

Impaktori näytteenottoputkella ja tulosuuttimella sekä lämmitysmatolla asetettiin mitausyhteeseen. Tarkoituksena oli tiivistää impaktori yhteeseen mahdollisimman hyvin lämmitysmatolla. Näytteenottoputken annettiin lämmetä savukanavassa noin viisi minuuttia ennen imulaitteiston käynnistämistä. Näytteenottolinjassa ennen Imulaitteistoa oli näytekaasun jäähdytyslaitteisto, jossa näytekaasusta pyritään tiivistämään kosteus pois. Jäähdytyslaitteiston lämpötila oli lähellä 0 °C:ta. Imulaitteistoa ennen oli näytekaasun lämpötilan mittausta. Jokaisessa mittauksessa näytekaasun lämpötila ennen imulaitteistoa oli noin 16 °C. Imulaitteisto lopettaa automaattisesti näytteenoton kun aseteltu tilavuus on imetty. Jokainen näytteenotto oli kestoaltaan noin 50 minuuttia. Savu-

kaasun lämpötilaa ja koostumusta seurattiin näytteenoton aikana aktiivisesti ja savukaasun lämpötila kirjattiin ylös noin 5 minuutin välein.

Näytteenoton jälkeen impaktori poistettiin yhteestä, irrotettiin imuletku ja poistettiin lämmitysmatto. Impaktorin jäähtyttyä sellaiseen lämpötilaan, että sitä pystyi käsittelemään hansikkaat kädessä, se purettiin ja keräysalustat alustoineen ja pohjasuodatin poistettiin. Keräysalustat alustoineen ja pohjasuodatin asetettiin niille varattuihin säilytys laatikkoon ja rasiaan. Impaktorille suoritettiin kevyt puhdistus ja ladattiin siihen uudet keräysalustat sekä pohjasuodatin, tämän jälkeen suoritettiin uusi mittaus mahdollisimman samalla tavalla kuin edellinenkin.

Kerättyjen hiukkasnäytteiden jälkikäsitteily ja punnitus suoritettiin päästömittauslaboratoriossa 13.6.2012. Alumiinisten keräysalustojen kanssa päädyttiin standardista poikkeavaan menettelyyn, koska alumiini itsessään ei kerää kosteutta ja hiukkasnäyte on massaltaan hyvin pieni. Eli alumiinisia keräysalustoja ei enää lämpökäsitelty ennen punnitusta. Keräysalustat irrotettiin alustoistaan, punnittiin ja tulokset kirjattiin ylös. Pohjasuodattimet kuivattiin uunissa 160 °C:n lämpötilassa yhden tunnin ajan. Tämän jälkeen niiden lämpötila tasattiin eksikaattorissa kahden tunnin ajan. Standardia lyhyempään tasaantumisaikaan päädyttiin, koska pohjasuodattimet ovat massaltaan pieniä noin 0,09 g.

Taulukko 2. mittausten aikaiset savukaasun - ja mittauspaikan olosuhteet

Mitt.	CO _k	CO _{2k}	O _{2k}	H ₂ O	T	p _{st}	p _{dyn}	p _{atm}	T _{atm}	H ₂ O _{atm}
	ppm	vol%	vol%	vol%	°C	Pa	Pa	kPa	°C	%
1	390	5,4*	15,1*	12,2	185,3	-10	4,3	100,7	19,1	48
2	317	12,7	8,3	12,6	197,3	-10	4,1	100,7	19,2	50
3	301	12,2	8,7	12,5	198,9	-10	4,6	100,6	19,2	50
4	366	13,2	7,6	11,9	199,6	-10	4,6	99,8	18,9	55
5	306	13,0	7,8	9,2	204,6	-8	4,8	99,9	19,7	53
6	277	12,5	8,4	10,1	206,0	-5	5,0	99,9	20,0	52

jossa savukaasun kuivat pitoisuudet CO_k, CO_{2k}, O_{2k}, savukaasun kosteus H₂O, savukaasun lämpötila T, staattinen paine savukanavassa p_{st}, dynaaminen paine mittauspisteessä p_{dyn}, vallitseva ilmanpaine p_{atm}, ilman lämpötila T_{atm} ja suhteellinen ilmankosteus H₂O_{atm}. (* vuoto Horiban mittausyhteessä)

Taulukko 3. punnitustulokset sekä PM_{2,5}- ja PM₁₀- pitoisuudet

Mitt.	m(CP1)		m(CP2)		m(BF)		V _{sg}	V _{sgn}	c(PM _{2,5})	c(PM ₁₀)
	1	2	1	2	1	2				
	mg	mg	mg	mg	mg	mg	m ³	m ³	mg/m ³	mg/m ³
1	13,64	13,67	13,65	13,74	86,54	91,64	0,300	0,279	18,30	18,62
2	13,60	14,28*	13,66	13,84	85,80	95,29	0,300	0,279	34,05	34,69
3	13,74	13,75	13,54	13,82	86,51	95,32	0,300	0,278	31,64	32,64
4	13,70	13,74	13,45	13,65	87,69	92,96	0,300	0,276	19,08	19,80
5	13,49	13,55	13,89	14,15	87,80	96,01	0,300	0,277	29,69	30,63
6	13,51	13,60	13,70	13,94	86,34	94,77	0,300	0,276	30,59	31,46

jossa ensimmäisen impaktoriasteen keräysalustan massat m(CP1) ennen 1 ja jälkeen 2 näytteenoton, vastaavasti toisen asteen keräysalustalle m(CP2) ja pohjasuodattimelle m(BF), imetyn näytteen tilavuus V_{sg} imulaitteen olosuhteessa, V_{sgn} näytteen tilavuus normaaliolosuhteessa ja pitoisuudet c(PM_{2,5}) sekä c(PM₁₀). (* näytteenottoputkeen kondensoitunut vesi pääsi ensimmäiselle keräysalustalle)

12.1.1 Pitoisuusmittausten tulosten arviointi

Ensinnäkin on todettava, että käytössä olleen päästölähteen olosuhteet identtisten mittausten suorittamiseen eivät olleet parhaat mahdolliset. Biomassakattila ei ole jatkuvassa käytössä, vaan se lämmitetään aina mittauksia varten. Kattilan ja savukanavan lämpeneminen normaaliin käyttölämpötilaan vie useita tunteja. Ensimmäiset mittaukset on jouduttu aloittamaan liian aikaisin, johtuen rajallisesta työskentelyajasta. Polttoaine ei myöskään ollut kovin tasalaatuista. Pellettien ja kostean sekahakkeen sekoittaminen ja annostelu kattilaan ei ollut mahdollista kovin suurella tarkkuudella.

Tuloksia tarkasteltaessa voidaan todeta, että olosuhteiden ollessa samankaltaiset ovat myös pitoisuusarvot hyvin lähellä toisiaan. Mittauspäivien ensimmäisissä mittauksissa savukaasun lämpötilat olivat alemmat ja vastaavasti häkäarvot (CO) korkeammat. Näiden mittausten 1 ja 4 pitoisuusarvot ovat samaa suuruusluokkaa ja yllättävästi pienemmät kuin suuremmissa savukaasulämpötiloissa tehdyt mittaukset. Voisi olettaa, että palamisen ollessa epätäydellistä mitattaisiin suurempia hiukkaspitoisuuksia. Syynä tuloksiin voi olla se, että hiukkasia ei synny niin paljon kun palaminen ei vielä ole kovin voimakasta, tai sitten hiukkaset käyttäytyvät eri tavalla kylmemmissä olosuhteissa, esimerkiksi tarttuvat lämmönsiirtopintoihin ja savukanavan seinämiin. Savukaasun

virtausnopeus kasvaa kun savukanava lämpenee ja savukaasu on kuumempaa. Tämä tuskin kuitenkaan on syynä tuloksiin, sillä isokineettisyysasteet kaikissa mittauksissa olivat välillä 0,93 – 1,03. Tämän työn puitteissa on vaikea lähteä asiaa tämän tarkemmin analysoimaan.

Pitoisuusarvoista voidaan huomata että $PM_{2,5}$ - ja PM_{10} - pitoisuuksissa ei ole käytännössä mitään eroa. Tämä tarkoittaa sitä, että mitatussa prosessissa syntyy pääasiassa hiukkasia joiden koko on alle 2,5 μm , eli pienhiukkasia. Ensimmäiselle impaktoriasteelle, eli yli 10 μm ei kerry käytännössä mitään ja toisenkin impaktoriasteen 10 μm – 2,5 μm kertymä on hyvin vähäistä. Lähes kaikki hiukkaskertymä on siis pohjasuodattimella.

Täytyy kuitenkin todeta etteivät tulokset ole aivan oikeita, johtuen muutamasta mittauksissa olleista menetelmävirheistä. Lähtöarvoissa on käytetty virheellisesti näytekääsun lämpötilana lauhduttimen jälkeen mitattua arvoa, joka myöhemmissä tutkimuksissa osoittautui vääräksi. Imulaitteistossa näytekääsu lämpenee lähelle vallitsevaa ilmanlämpöä ja ennen kaasukelloa sen lämpötila mitataan. Tämä arvo on saatavissa imulaitteistosta ja sitä tulee käyttää. Mittausta edeltävässä laskennassa tarvitaan lisäksi näytekääsun absoluuttinen paine ennen imulaitteisto. Tätä arvoa ei näissä mittauksissa ole mitattu, vaan on käytetty virheellisesti vallitsevaa ilmanpaineen arvoa. Myöhemmissä mittauksissa todettiin tuon paineen olevan noin 3 – 4 kPa vallitsevaa ilmanpainetta alhaisempi.

Edelliset virheet mittausta edeltävässä laskennassa ovat aiheuttaneet sen, että imulaitteistolle on aseteltu liian alhainen tilavuusvirtausarvo, mikä aikaansaa impaktorissa liian alhaisen virtauksen. Tämän seurauksena todelliset katkaisukohtat impaktoriasteilla ovat olleet noin 12 μm ja 3 μm . Tämä poikkeama katkaisukohtien arvoissa ei kuitenkaan vaikuta olennaisesti tulosten oikeellisuuteen kyseisen päästölähteen mittaustuloksissa. Kertymä toiselle impaktoriasteelle olisi voinut olla aavistuksen suurempi ja kertymä pohjasuodattimelle vastaavasti aavistuksen pienempi. Todennäköisesti ei kuitenkaan havaittavaa eroa tulosten välille syntyisi.

12.1.2 Huomioita mittauksista

Mittaustapahtuma itsessään on hyvin yksinkertainen ja suoraviivainen. Keräysalustojen ja suodattimien esivalmistelu ja jälkikäsitteily näyttelee ehkä suurinta osaa tulosten

luotettavuuden kannalta. Kerättävät hiukkasmassat ovat niin pieniä, että pienetkin epäpuhtaudet näytteessä vääristävät tulosta ja toisaalta jos kerätystä näytteestä menetetään vähäinenkin osa, tulos vääristyy. Alumiinisten keräysalustojen käsittely pinseillä on erittäin hankalaa ja virheherkkää. Varsinkin irrotettaessa keräysalustan pidätinrengasta menetetään helposti osa näytteestä. Standardissa mainitaan, että keräysalustat tulisi punnita alustoineen. Tämä voisikin olla parempi toimintatapa, sillä jokainen työvaihe punnitusten välillä lisää epävarmuutta tuloksissa. Keräysalustat olisi pitänyt standardin mukaan lämpökäsitellä ja tasata eksikaattorissa keräyksen jälkeen, mutta katsoimme että tämä lisää epävarmuutta liikaa. Laboratoriuunია käytetään polttoainenäytteiden kuivaamiseen ja siellä on voimakas ilmavirtaus, joten näytteen saastuminen on enemmän kuin todennäköistä. Kuitenkin suodattimet, jotka ovat massaltaan ja kooltaan suurempia, käsiteltiin uunissa folioastian sisällä. Standardi suosittaa käytettäväksi qvartsikuitusuodattimia keräysalustoina. Tätä emme ole kokeilleet. Suodattimet saattaisivat toimia kuumilla savukaasuilla paremmin kuin rasvatut alumiinialustat. Mittauksissa käytetty alustarasva kestää 150 °C ja savukaasujen lämpötila oli luokkaa 200 °C. Jokaisella mittaussarjan keräysalustalla ja suodattimella tulisi olla oma numeroitu alustansa, joka valmistellaan laboratorio-olosuhteissa ja sijoitetaan tarkoitukseen valmistettuun kuljetuskoteloon. Tämä ei tällä hetkellä aivan toteudu.

Mittausta edeltävässä laskennassa tarvittavien lähtöarvojen merkitys on myös suuri. Hankalaksi osoittautui etenkin savukaasun kosteuden määrittäminen, joka tulisi tehdä ennen varsinaisia mittauksia. Yhdessä hiukkasmittauksessa lauhtunut vesimäärä on niin pieni, ettei sen perusteella voida savukaasun kosteutta luotettavasti määrittää. Jos määrittäminen tehdään lauhduttamalla, se on tehtävä erillisenä mittauksena. Tässä työssä käytettiin kuiva/märkälämpötilamittausta, joka osoittautui kohtuullisen toimivaksi. Mittauksen ainoa heikkous oli selkeästi luettavan kostean ilman i,x-diagrammin puuttuminen. Myös savukaasun dynaamisen paineen mittaaminen pitot-putkella osoittautui hankalaksi ja virheherkäksi. Dynaaminen paine mitattiin virheellisesti kuudesta eri pisteestä, joista otettiin keskiarvo. Mittaus olisi pitänyt suorittaa standardin ISO 12141 mukaisesti valitusta mittauspisteestä (kyseistä standardia ei ollut käytettävissä) useampaan kertaan ja ottaa näistä tuloksista keskiarvo. Tässä kohteessa tuolla virheellä ei suurta merkitystä ole, koska kanavan halkaisija pieni ja virtausnopeus suhteellisen sama joka paikassa. Dynaamisen paineen seuranta näytteenoton aikana jäi myös toteuttamatta.

12.2 Lämpötilamittaukset

Impaktori-mittauksissa veden tiivistyminen savukaasusta impaktorin sisäpinnoille ja näytteenottoputkeen on haitallinen ilmiö. Jos vettä tiivistyy näytteenottoputkeen, se aiheuttaa hiukkasten keräytymistä veteen ja tästä johtuvaa näytteen laimentumista. Vesi saattaa myös joutua impaktoriin kun sitä poistetaan mittaussyhteestä ja liikuttelun mittausten jälkeen, tuolloin vesi tuhoaa kerätyn näytteen. Vesi voi tiivistyä myös impaktoriasteille, jolloin hiukkasia tarttuu seinämille tiivistyneeseen veteen. Vesipisarot myös muuttavat tasojen toimintaa sekä kuljettavat hiukkasia mukanaan seuraaville asteille. Jos impaktoriasteilla havaitaan merkkejä veden tai jonkin muun savukaasukomponentin tiivistymisestä, on näyte hylättävä.

Veden tiivistyminen näytteenottoputkeen tai impaktoriin johtuu niiden liian alhaisesta lämpötilasta verrattuna savukaasun lämpötilaan. Jos jonkin osan lämpötila järjestelmässä on savukaasun kastepisteessä tai sen alapuolella, sen pinnalle tiivistyy vettä. Savukaasun komponenttien kastepisteiden määrittäminen tarkasti on melko hankalaa, mutta veden osalta se voidaan tehdä likimääräisesti kokeellisen kaavan 29 avulla. Savukaasun vesipitoisuus normaaliolosuhteessa tulee tuntea.

$$f_n = 6,335 + 0,6718 \times T_{dp} - 2,0887 \times 10^{-2} \times T_{dp}^2 + 7,3095 \times 10^{-4} \times T_{dp}^3 \quad (29)$$

jossa:

f_n	savukaasun vesipitoisuus normaaliolosuhteessa (g/m^3)
T_{dp}	kylläisen savukaasun lämpötila eli kastepiste ($^{\circ}\text{C}$) (Hyper Physics).

Edellä esitetystä kaavasta 29 voidaan ratkaista kastepisteen lämpötila T_{dp} kolmannesasteenyhtälön ratkaisun mukaisesti. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan käydä tätä läpi, ratkaisu saadaan helposti esimerkiksi Excelin avulla.

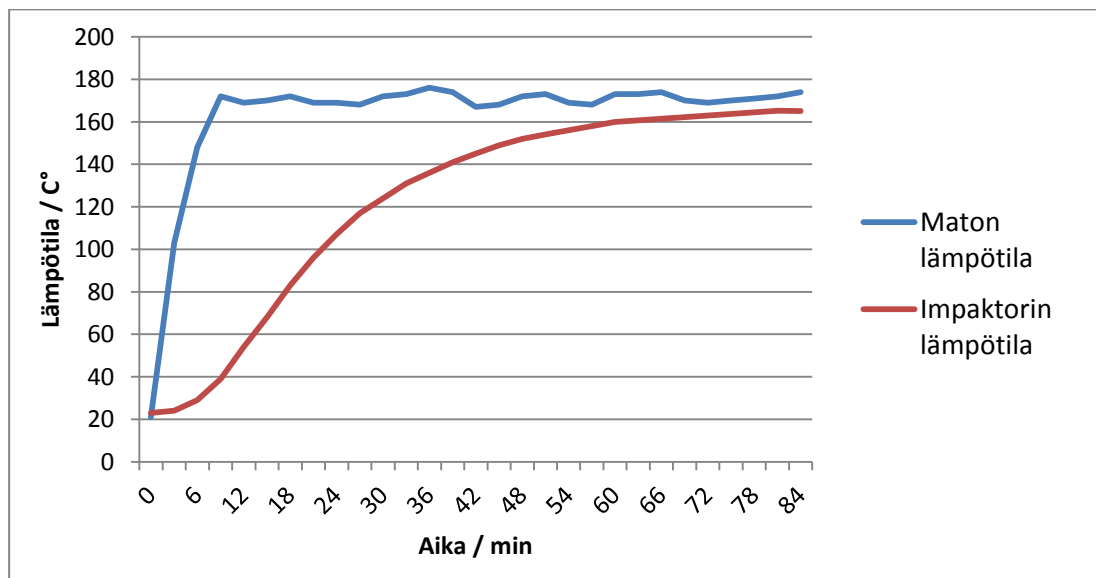
Esimerkkilaskennassa käytetyn mittauksen no.6 savukaasun vesipitoisuudella normaaliolosuhteessa (90 g/m^3), saadaan kastepisteeksi:

$$T_{dp} = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Toisen mittaussarjan tarkoituksena oli tutkia erilaisten mittausjärjestelyiden vaikutusta impaktorin ja näytteenottoputken lämpötiloihin sekä veden kondensoitumiseen niihin. Ensimmäisen mittaussarjan hiukkasmittausten yhteydessä huomattiin kondensoitumista tapahtuvan näytteenottoputkessa, joten käytetty mittausjärjestely ei ollut paras mahdollinen.

12.2.1 Lämmitysaika

Ensimmäinen selvitettävä asia oli impaktorin lämpenemisaika lämmitysmaton sisällä, kun sitä esilämmitetään ennen sijoittamista mittaussyhteeseen. Lämpenemisajan määrittäminen toteutettiin sijoittamalla lämpötila-anturi ensimmäisen impaktoriasteen keräysalustalle. Impaktoria lämmitettiin lämmitysmatolla, jonka maksimilämpötilaksi oli aseteltu 170 °C. Käytännössä paljon tämän suurempaa lämpötilaa ei voida asettaa maton ohjauksikköön (maks. 180 °C), sillä säädön hitaudesta johtuen lämpötila saattaa kohota liian korkeaksi ja lämmitys lopetetaan. Mittaus suoritettiin 29.5.2012 energiatekniikan laboratoriossa, ympäristön lämpötilan ollessa 20.3 °C ja mittausajan 1 h 25 min.



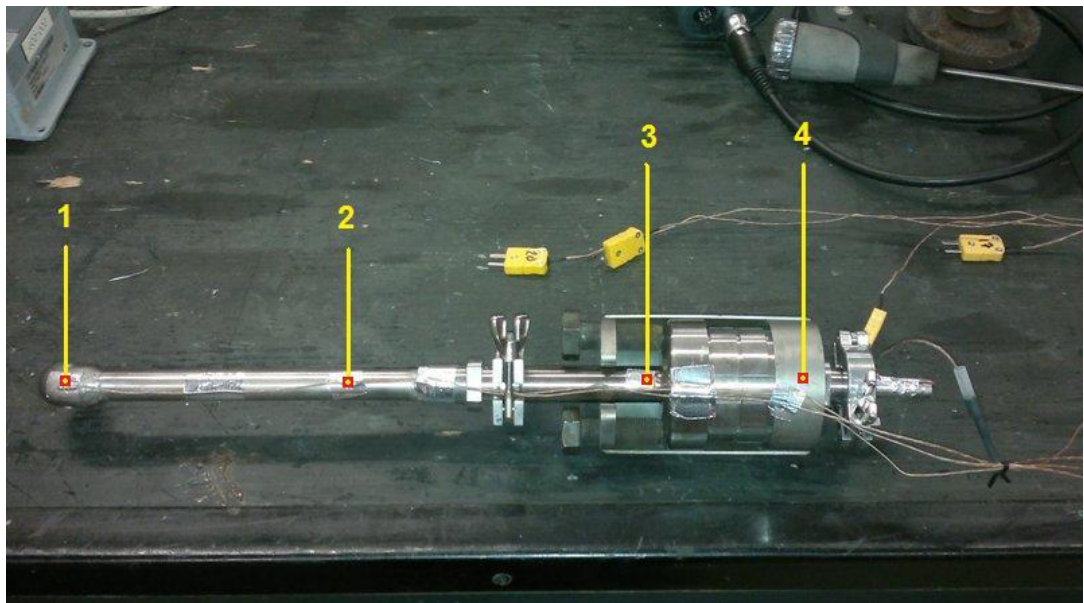
Kuva 22. Impaktorin ensimmäisen asteen lämpötila ajan funktiona esitettyä punaisella kuvaajalla ja lämmitysmaton lämpötila ajan funktiona esitettyä sinisellä kuvaajalla

Kuvasta 22 voidaan havaita että impaktorin lämpeneminen on suhteellisen hidasta ja se ei käytännössä kohtaa lämmitysmatolle aseteltua lämpötilaa. Jos oletetaan että 100 °C olisi käytännössä riittävä lämpötila impaktorille ennen sen asettamista yhteeseen, kuluu tämänkin lämpötilan saavuttamiseen 22 minuuttia. Standardin mukaan impakto-

rin tulee olla vähintään savukaasun lämpötilassa ennen mittauksen aloittamista. Tämä on käytännössä vaikea toteuttaa, jos savukaasun lämpötila on yli 150 °C. Esimerkiksi hiukkasmittauksessa no.6, savukaasun lämpötila oli 206 °C ja lämmitysmattoon aseteltuna 180 °C, eli oikeaa lämpötilaa ei pystytty saavuttamaan edes teoriassa.

12.2.2 Lämpötilat hiukkasmittauksen aikana

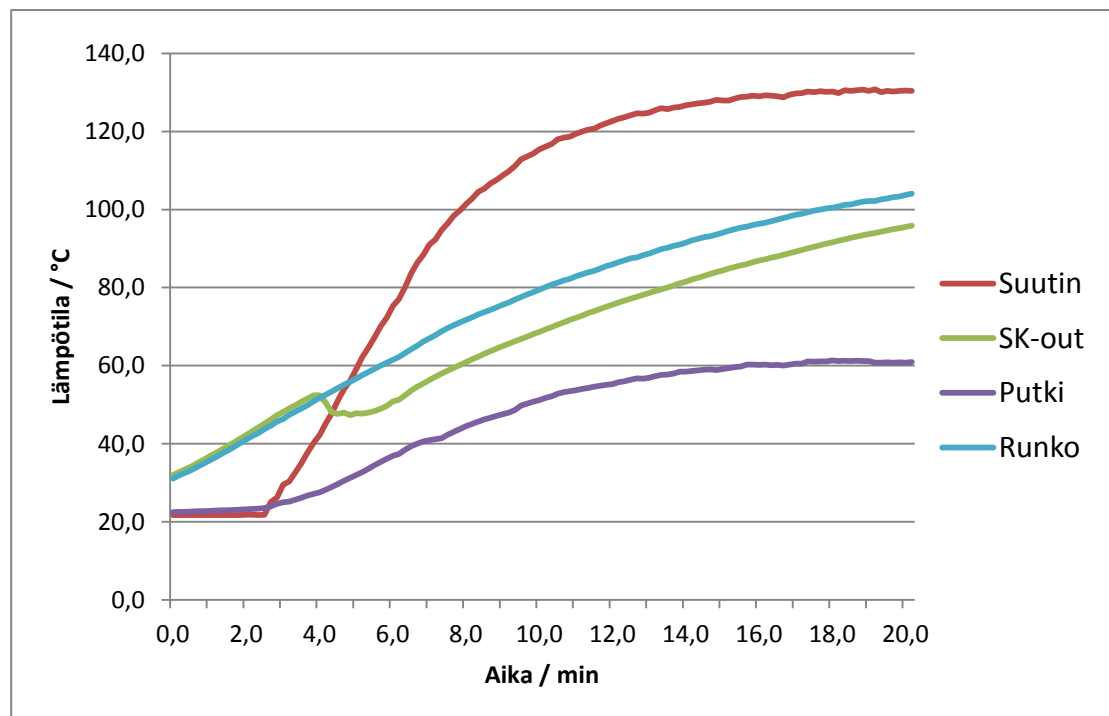
Viidellä erillisellä mittauksella pyrittiin selvittämään suuttimen, näytteenottoputken ja impaktorin lämpötilojen käyttäytyminen erilaisilla yhteeseen sijoitus tavoilla. Mittaukset suoritettiin energiatekniikan laboratoriossa biomassakattilan savukaasuista 29.6.2012. Kattilaa lämmitettiin öljypolttimella, mistä johtuen savukaasun lämpötila oli aiempia mittauksia alhaisempi eli noin 150 °C, savukanavan staattinen paine oli -5 Pa ja näytekaasua imettiin 7 l/min. Mittaukset toteutettiin viidellä lämpötilanturilla, jotka olivat kytkettynä tiedonkeruujärjestelmään. Mittauskohteina olivat savukaasun lämpötila savukanavassa, suuttimen, näytteenottoputken ja impaktorin lämpötila sekä pohjasuodattimelta poistuvan savukaasun lämpötila. Lämpötila-antureiden sijoittelu näkyy kuvassa 23.



Kuva 23. Lämpötila-antureiden sijoittelu, jossa: 1 suuttimen lämpötila, 2 näytteenottoputken lämpötila, 3 impaktorin rungon lämpötila ja 4 pohjasuodattimen jälkeinen savukaasun lämpötila (anturi impaktorin sisällä)

Mittaus 1:

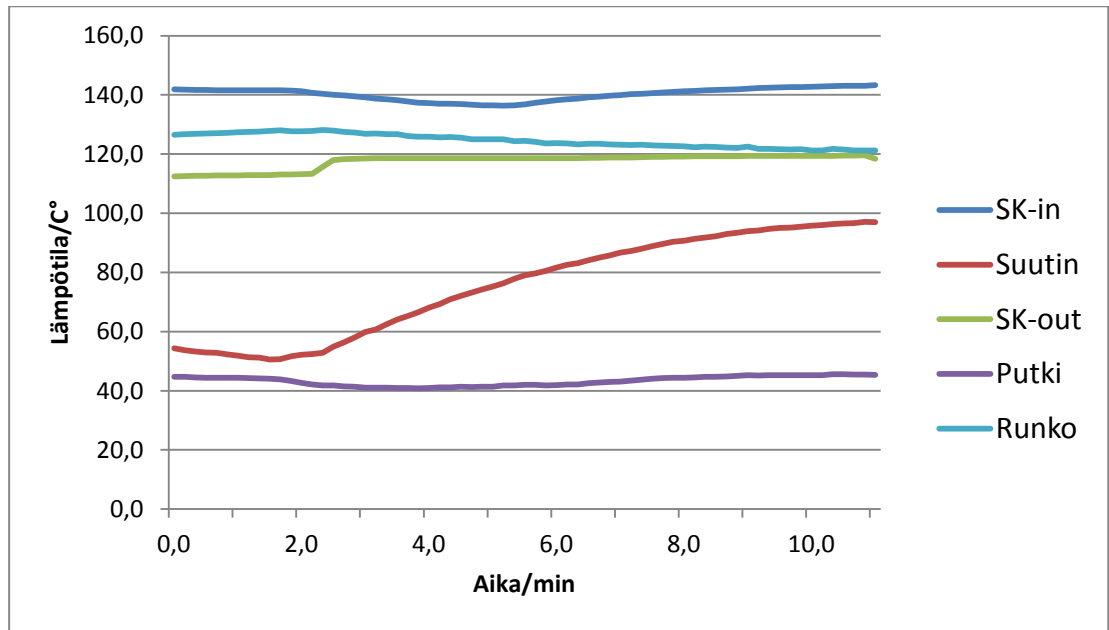
Ensimmäisessä mittauksessa simuloitiin tilannetta, jossa tullaan mittausta paikalle ja laitetaan impaktori lämmitysmaton sisälle lämpenemään. Impaktori asetettiin yhteeseen välittömästi kun lämmitysmatto oli saavuttanut asetellun lämpötilan 155 °C . Yhdettä ei tiivistetty mitenkään, ainoastaan lämmitysmatto oli työnnettynä yhteeseen kiinni, niin tiiviisti kuin mahdollista. Imulaitteisto käynnistettiin kun näytteenottoputki oli ollut savukanavassa noin kolme minuuttia. Kerätty lämpötiladata on kuvassa 24, savukaasun lämpötilan nauhoitus ei tässä mittauksessa toiminut (oli noin 145 °C).



Kuva 24. Ensimmäisen mittauksen lämpötilat jossa: punainen on suuttimen lämpötila, vihreä poistuvan näytteen kaasun lämpötila, violetti näytteenottoputken lämpötila ja turkooosi on impaktorin rungon lämpötila

Mittaus 2:

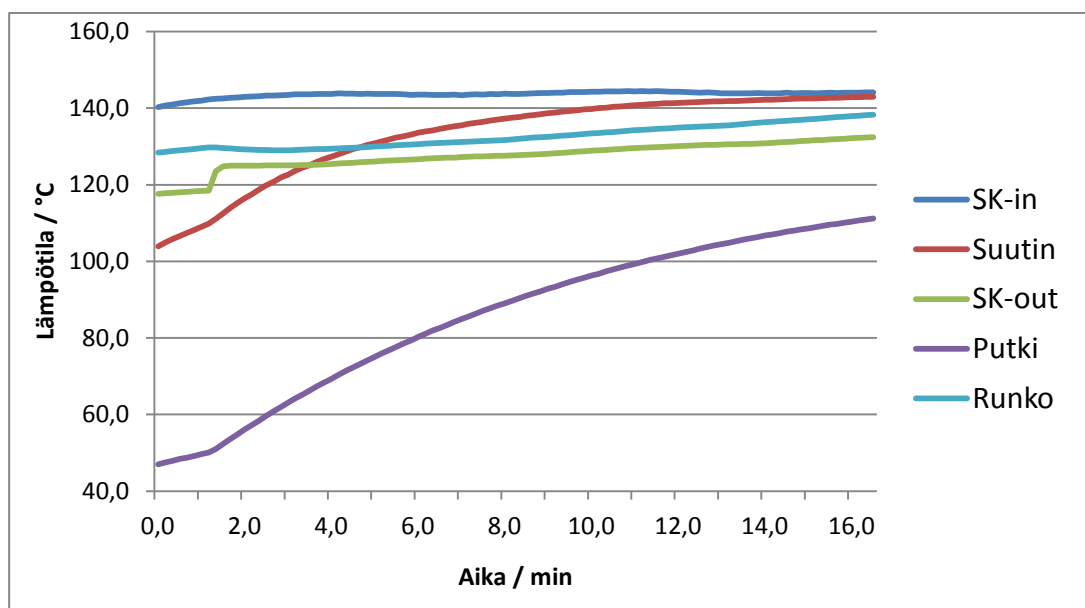
Toisessa mittauksessa impaktori oli esilämmitettynä ja näytteenottoputken annettiin lämmitä kanavassa noin kolmen minuutin ajan ennen imulaitteen käynnistämistä. Impaktori oli asetettuna yhteeseen siten että yhteen ja lämmitysmaton väliin jäi noin 20mm rako, eli savukaasun ja ilman liikettä ei juurikaan rajoitettu. Kerätty lämpötiladata on kuvassa 25.



Kuva 25. Toisen mittauksen lämpötilat jossa: tummansininen on savukaasun lämpötila savukanavassa, punainen suuttimen lämpötila, vihreä poistuvan näytekaasun lämpötila, violetti näytteenottoputken lämpötila ja turkoosi on impaktorin rungon lämpötila

Mittaus 3:

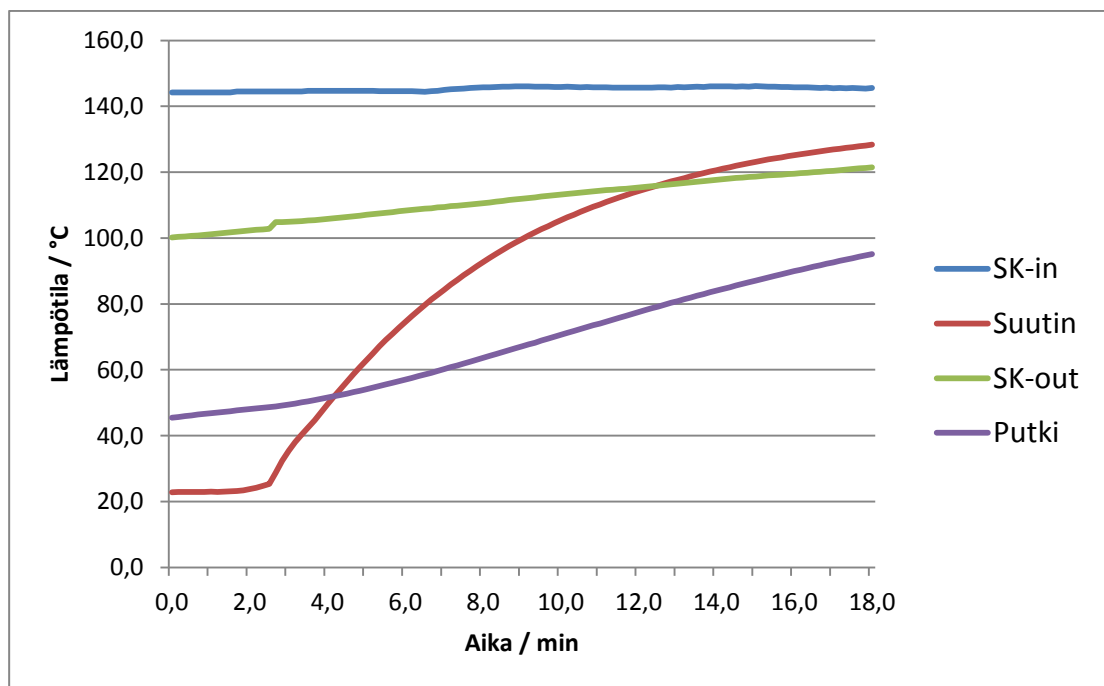
Kolmannessa mittauksessa impaktori oli esilämmitetty ja näytteenottoputken annettiin lämmetä savukanavassa noin kahden minuutin ajan ennen imulaitteiston käynnistämistä. Yhteen ja näytteenottoputken väli oli tiivistetty vuorivillalla ja lämmitysmatto mahdollisimman tiiviisti yhteessä kiinni. Savukaasun ja ilman liike oli pyritty estämään täydellisesti yhteessä. Kerätty lämpötiladata on kuvassa 26.



Kuva 26. Kolmannen mittauksen lämpötilat jossa: tummansininen on savukaasun lämpötila savukanavassa, punainen suuttimen lämpötila, vihreä poistuvan näytteen kaasun lämpötila, violetti näytteenottoputken lämpötila ja turkoosi on impaktorin rungon lämpötila

Mittaus 4:

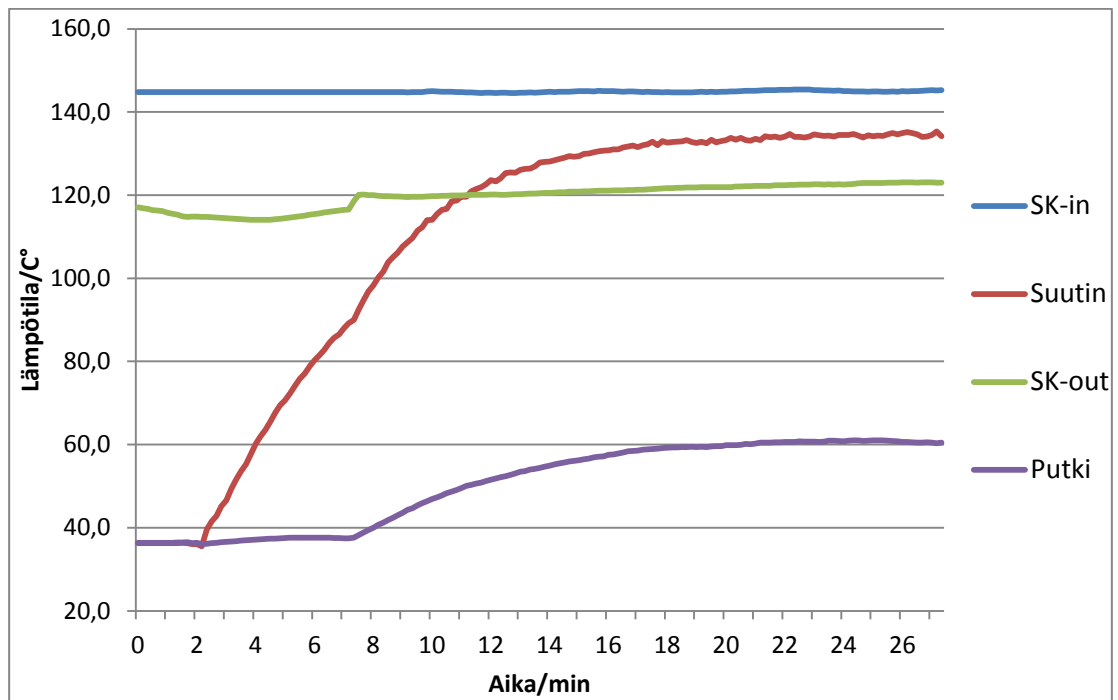
Neljännessä mittauksessa näytteenottoputken ympärille laitettiin vuorivillaa eristeeksi ja villan päälle kiedottiin alumiinifoliota. Impaktori oli valmiiksi lämmin ja suuttimen annettiin lämmetä savukanavassa noin kahden minuutin ajan ennen imulaitteiston käynnistämistä. Lämmitysmatto asetettiin yhdettä vasten mahdollisimman tiiviisti. Kerätty lämpötiladata on kuvassa 27, impaktorin rungon lämpötila-anturi vaurioitui näytteenottoputkea eristettäessä. Rungon lämpötila ei kuitenkaan ole oleellinen tieto, koska se on ollut kahdessa edeltävässä mittauksissa riittävä.



Kuva 27. Neljännen mittauksen lämpötilat jossa: tummansininen on savukaasun lämpötila savukanavassa, punainen suuttimen lämpötila, vihreä poistuvan näytteen kaasun lämpötila ja violetti on näytteenottoputken lämpötila

Mittaus 5:

Viidennessä mittauksessa pyrittiin toistamaan mahdollisimman tarkasti menettely, jota käytettiin aiemmissa hiukkasmittauksissa. Impaktorin annettiin siis lämmitä lämmitysmaton sisällä noin 40 minuuttia ennen yhteeseen asettamista. Impaktori asetettiin yhteeseen siten että lämmitysmatto oli mahdollisimman tiiviisti yhdettä vasten. Näytteenottoputken annettiin lämmitä savukanavassa noin viiden minuutin ajan ennen imulaitteiston käynnistämistä. Kerätty lämpötiladata on kuvassa 28.

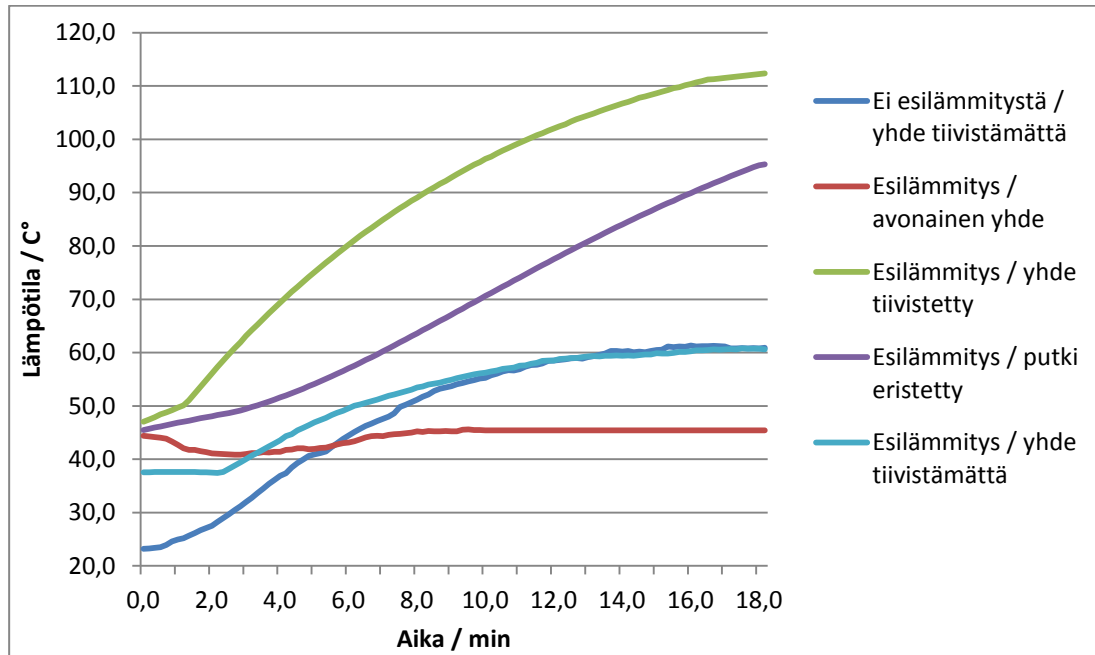


Kuva 28. Viidennen mittauksen lämpötilat jossa: tummansininen on savukaasun lämpötila savukanavassa, punainen suuttimen lämpötila, vihreä poistuvan näytekaasun lämpötila ja violetti on näytteenottoputken lämpötila. Kahden minuutin kohdalla näytteenottoputki on asetettu savukanavaan ja seitsemän minuutin kohdalla imulaitteisto käynnistetty, nämä kohdat voidaan havaita kuvaajista.

12.2.3 Lämpötilamittausten tulosten arviointi

Ensinnäkin voidaan todeta että esilämmityksen tarve ajallisesti oli oletettua suurempi ja näytteenottoputken lämpötila oletettua paljon alhaisempi mittauksen aikana. Toisaalta itse impaktorin lämpötilat olivat riittävän korkeat mittauksissa joissa esilämmitys oli suoritettu. Suurin ongelma kanavan ulkopuolisessa mittauksessa näyttäisi ole-

van näytteenottoputken lämpötilan hallinta osuudelta joka on yhteen sisällä. Kuvaan 29 on otettu kaikkien mittausten näytteenottoputken lämpötilat.



Kuva 29. Näytteenottoputken lämpötilat mittauksissa 1 – 5 jossa: tummansininen on mittaus 1, punainen mittaus 2, vihreä mittaus 3, lila mittaus 4 ja turkoosi on mittaus 5

Kuvan 29 perusteella voidaan todeta että näytteenottoputken lämpötila riippuu hyvin paljon siitä miten hyvin yhde on tiivistetty. Mittauksessa 3, jossa yhde on huolellisesti tiivistetty, tulos on selkeästi muita parempi. Eli lämpötila näytteenottoputkessa nousee nopeiten ja korkeimpaan lämpötilaan. Kuvaajista voidaan myös havaita että lämpötila näytteenottoputkessa lähtee kohoamaan jyrkemmin kun imulaitteisto käynnistetään, eli näytekaasun virtaus putken läpi lämmittää sitä tehokkaimmin. Mittauksessa 4, jossa näytteenottoputki on eristetty, lämpötilan nousu mittauksen alussa on hitaampaa, mutta tulos on selkeästi toiseksi paras ja hyväksyttävä. Hitaampi lämpötilan nousu johtuu siitä, ettei savukaasu pääse lämmittämään putken ulkopintaa, vaan sitä lämmitetään ainoastaan läpivirtaava näytekaasu.

Mittaus no.5, joka oli tehty mahdollisimman identtisesti aiempien hiukkasmittausten kanssa, osoittaa selkeästi mistä mittausten aikana veden kondensoituminen näytteenottoputkeen johtui. Aiemmin määriteltiin savukaasun kastepiste yhdelle hiukkasmittaukselle, kastepisteeksi saatiin 53 °C . Kuvasta 28 voidaan havaita, että lämpötila näyt-

teenottoputken keskiosalla on alle 60 °C:ssa noin 20 minuutin ajan, eli ollaan selkeästi sellaisella lämpötila-alueella jossa kondensoitumista voi tapahtua.

Olemassa olevalla laitteistolla ainut käyttökelpoinen menettelytapa on impaktorin riittävä esilämmitys ja yhteen huolellinen tiivistäminen sekä lämmitysmaton asettaminen siten ettei sen ja yhteen/tiivisteiden väliin jää rakoja. Näytteenottoputken eristäminen antoi myös hyväksyttävän tuloksen, mutta se oli hyvin hankala tehdä ja yhteeseen asennus eristeen kanssa vaikeaa. Todennäköisesti parhaaseen lopputulokseen käytännön olosuhteissa päästäisiin lämmitetyllä näytteenottoputkella ja yhteen tiivistämisellä.

13 YHTEENVETO

Lyhyenä yhteenvetona voidaan todeta, että tässä insinööriyössä on saavutettu sille asetetut tavoitteet mielestäni kohtuullisen hyvin. Aihe itsessään oli hyvin haastava johtuen sen sisältämästä vaikeahkosta teoriasta, joka tuli sisäistä. Haastavaksi minulle työn teki erityisesti se, että valtaosa materiaalista oli englanninkielistä. Käytännön mittaukset olivat erittäin mielenkiintoisia, ja antoivat runsaasti hyödyllistä informaatiota. Työhön liittyi myös paljon matemaattisia kaavoja, joiden soveltaminen osoittautui melko työlääksi prosessiksi. Lopputuloksena kuitenkin oli laskentamalli, jota pystytään soveltamaan luotettavasti käytännön mittauksissa. Osan laskennasta sisällytin tekemääni mittauspöytäkirjapohjaan (liite.5). Yksiselitteisen käyttöohjeen laatiminen osoittautui jokseenkin mahdottomaksi siten, ettei se olisi ristiriidassa standardin kanssa. Tyydyinkin tekemään väljän suomennoksen standardin esittämistä menettelyohjeesta pienillä lisäyksillä. Käytännön mittauksista saadun kokemuksen pohjalta olen esittänyt omia näkemyksiä siitä, miten mittauksissa tulisi menetellä.

LÄHTEET

Dekati Ltd. 2010. PM10 Impactor user manual ver. 2.51. Tampere: Dekati Ltd

Hämeri, K. & Mäkelä, J. 2005. Aerosolien mittaustekniikka. Helsingin Yliopiston Fysiikan laitoksen opetusmateriaali [viitattu 5.9.2012]

Hiukkaskäsikirja. Helsingin Yliopiston Fysiikan laitoksen ylläpitämä internetsivusto: www.hiukkastieto.fi/node/1 [viitattu 13.11.2012]

Hyper Physics. Georgia State University:n ylläpitämä internetsivusto: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html> [viitattu 16.10.2012]

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Toinen täydennetty painos. Jyväskylä: Gummerrus.

Salonen, R.O. & Pennanen, A. 2006. Pienhiukkasten vaikutus terveyteen. Helsinki: Libris.

SFS-EN 13284-1. 2001. Kiinteät päästölähteet. Pienten hiukkaspitoisuuksien määrittäminen. Osa 1: Manuaalinen gravimetrinen menetelmä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. Saatavissa maksullisena:

<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=quicksearch&info=SFS-EN+13284-1> [viitattu 13.11.2012]

SFS-EN 23210. 2009. Stationary source emissions. Determination of PM10/PM2,5 mass concentration in flue gas. Measurement at low concentrations by use of impactors. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. Saatavissa maksullisena:

<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=quicksearch&info=iso+23210> [viitattu 13.11.2012]

VTT Prosessit. 2007. Päästömittausten käsikirja osa 1. Saatavissa:

<http://www.isy.fi/kasikirja.html> [viitattu 4.9.2012]

VTT Prosessit. 2007. Päästömittausten käsikirja osa 3. Saatavissa:

<http://www.isy.fi/kasikirja.html> [viitattu 4.9.2012]

- Combustion processes
- Air quality monitoring
- Automotive exhaust
- Pharmaceutical aerosols

Dekati® PM10 Impactor

PM10, PM2.5 and PM1
mass concentrations

Combustion source sampling
according to ISO23210



Excellence in Particle Measurements





Dekati® PM10 Impactor

Dekati® PM10 impactor is a cascade impactor that measures PM10 and PM2.5 mass concentrations simultaneously. The impactor fulfills all requirements of the ISO standard 23210 for measuring PM10 and PM2.5 in stationary sources, and it can be upgraded to measure PM1 mass concentration as well.

The Dekati® PM10 impactor's easy to use and simple design makes it an ideal choice for gravimetric or chemical analysis of PM. The impactor has been calibrated with different collection filter materials according to the ISO 23210 standard, and the whole system can be heated up to 200 °C.

In addition to the impactor unit, Dekati is able to provide complete measurement setup for PM10 and PM2.5 measurements according to ISO23210. The standard recommends carrying out the measurements so that the impactor is placed inside the flue gas channel directly against the flue gas flow. Iso-kinetic sampling is achieved with the use of straight isokinetic nozzles. Alternatively, the impactor can be placed outside the stack with a heated jacket around it to keep it in the flue gas temperature during the measurement. In both cases, a flow control system with a pump is required.



Specifications

Nominal air flow	10 or 30 l/min
Size fractions	PM10, PM2.5 PM1 available as an accessory
Maximum temperature	200 °C
Weight	2.4 kg
Dimensions	Ø 76 x 180 mm
Material	Stainless steel (AISI 316)

Dekati® PM10 impactor includes

- Impactor unit for PM10 and PM2.5 measurements (PM1 stage available as an accessory)
- Calibration sheet
- Calculation sheet for data analysis
- Carry case



Available accessories include

- Pump with flow control
- Hoses and hose connectors
- Stainless steel sampling probes
- Isokinetic nozzles
- Impactor heaters and heater controllers
- Quartz, aluminium and polycarbonate filters
- Collection substrate grease

For more information, please contact: sales@dekati.fi



Dekati Ltd.
Osuusmyllynkatu 13
FIN-33700 Tampere
Finland
Tel. int. +358 3 3578 100
Fax int. +358 3 3578 140
E-mail sales@dekati.fi
www.dekati.fi

Dekati Ltd. is specialized in the design and manufacture of innovative fine particle measuring and sampling devices. Since its founding in 1994, Dekati has become the technological market leader in producing fine particle measurement instrumentation for various applications and hundreds of customers. ●

Emfab – preferred filters for diesel exhaust and stack emission testing

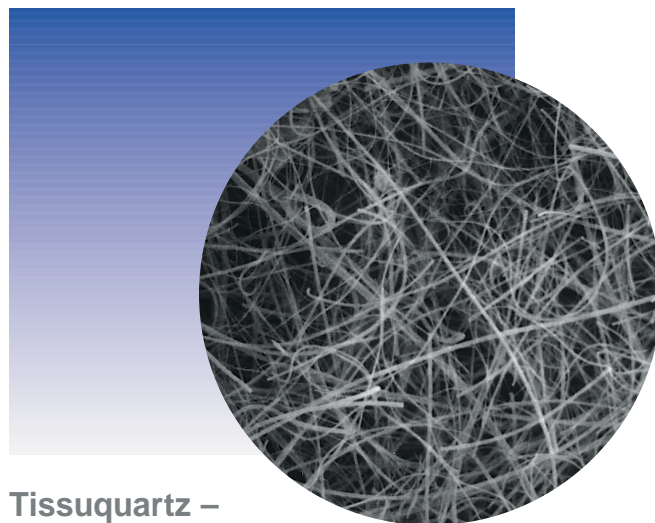
Pure borosilicate glass microfibers reinforced with woven glass cloth and bonded with PTFE

- Withstands folding for weighing and transport.
- Every filter flushed with DI water to remove water-soluble residue.
- Low moisture pickup eliminates lengthy desiccations.
- Low air resistance.

Fiberfilm – economical filters for air monitoring applications

Pure borosilicate glass fibers with fluorocarbon coating

- Unique combination of heat-resistant borosilicate glass fibers and moisture-resistant fluorocarbon (tetrafluoroethylene, TFE) coating.
- Moisture variations in air or gases during air sampling will not cause chemical reactions on the filter.
- Low moisture pickup eliminates lengthy desiccations.
- Low air resistance.



Tissuquartz – uniquely designed for air monitoring in high temperatures and aggressive atmospheres

Binder-free pure quartz

- Heat treated for reduction of trace organics and superior chemical purity.
- High temperature use up to 1093 °C (2000 °F).
- High flow rate and filtration efficiency.

Applications

- Emfab Filters – Low air resistance for use in critical aerosol sampling tests that demand filter purity and non-hygroscopic properties such as diesel exhaust, stack emission control, and ambient air monitoring for particulate concentration.
- Fiberfilm Filters – Suitable for high temperature and hot gas air monitoring applications. Heat-treated (HT) version available for reduction of trace organics.
- Tissuquartz Filters – High temperature use for analysis of acidic gases and stack sampling aerosols. Ultra-pure soft water processing reduces residual ion content. (Contact Pall Life Sciences for typical values.)

Specifications

Description	Emfab Filters	Fiberfilm Filters	Tissuquartz Filters
Filter Media	Borosilicate microfibers reinforced with woven glass cloth and bonded with PTFE	Heat resistant borosilicate glass fiber coated with fluorocarbon (TFE)	Pure quartz, no binder
Diameter	12 - 142 mm [and 8 x 10 in. (20 x 25 cm)]	25 - 100 mm [and 8 x 10 in. (20 x 25 cm)]	25 - 142 mm [and 8 x 10 in. (20 x 25 cm)]
Typical Thickness	178 µm (7 mils)	203 µm (8 mils)	432 µm (17 mils)
Typical Filter Weight	5.0 mg/cm ²	3.4 mg/cm ²	5.8 mg/cm ²
Typical Water Flow Rate at 0.35 bar (5 psi)	32 mL/min/cm ²	220 mL/min/cm ²	220 mL/min/cm ²
Typical Air Flow Rate at 0.7 bar (10 psi)	68 L/min/cm ²	180 L/min/cm ²	73 L/min/cm ²
Maximum Operating Temperature – Air	260 °C (500 °F)	315.5 °C (600 °F)	1093 °C (2000 °F)
Typical Aerosol Retention*	99.9%	96.4%	99.9%
pH in Boiled Water Extract	Not available	Not available	6.5 - 7.5

*Following ASTM D 2986-95A 0.3 µm (DOP) at 32 L/min/100 cm² filter media

Ordering Information

Emfab™ Filters

Product No.	Description	Packaging
7258	TX40HI20WW, 12 mm	100/pkg
7219	TX40HI20WW, 25 mm	100/pkg
7217	TX40HI20WW, 37 mm	100/pkg
7256	TX40HI20WW, 41 mm	100/pkg
7220	TX40HI20WW, 44 mm	100/pkg
7221	TX40HI20WW, 47 mm	100/pkg
7222	TX40HI20WW, 70 mm	100/pkg
7218	TX40HI20WW, 81 mm	100/pkg
7223	TX40HI20WW, 90 mm	100/pkg
7225	TX40HI20WW, 110 mm	100/pkg
7252	TX40HI20WW, 142 mm	100/pkg
7224	TX40HI20WW, 8 x 10 in.	100/pkg

Fiberfilm™ Filters

Product No.	Description	Packaging
7210	T60A20, 25 mm	100/pkg
7211	T60A20, 37 mm	50/pkg
7212	T60A20, 47 mm	50/pkg
7216	T60A20, 55 mm	50/pkg
7213	T60A20, 70 mm	50/pkg
7209	T60A20-HT, 70 mm	50/pkg
7214	T60A20, 90 mm	50/pkg
7257	T60A20, 100 mm	50/pkg
7215	T60A20, 8 x 10 in.	50/pkg

Tissuquartz™ Filters

Product No.	Description	Packaging
7200	2500QAT-UP, 25 mm	100/pkg
7201	2500QAT-UP, 37 mm	25/pkg
7202	2500QAT-UP, 47mm	25/pkg
7199	2500QAT-UP, 54 mm	25/pkg
7191	2500QAT-UP, 60 mm	25/pkg
7197	2500QAT-UP, 63.5 mm	25/pkg
7196	2500QAT-UP, 64 mm	25/pkg
7190	2500QAT-UP, 83 mm	25/pkg
7205	2500QAT-UP, 82.6 mm	25/pkg
7206	2500QAT-UP, 85 mm	25/pkg
7203	2500QAT-UP, 90 mm	25/pkg
7204	2500QAT-UP, 8 x 10 in.	25/pkg
7195	2500QAT-UP, 100 mm	25/pkg
7207	2500QAT-UP, 102 mm	25/pkg
7250	2500QAT-UP, 110 mm	25/pkg
7208	2500QAT-UP, 125 mm	25/pkg
7251	2500QAT-UP, 142 mm	25/pkg

Non-heat Treated Quartz Filters

Product No.	Description	Packaging
7198	2500QAO-UP, 37 mm	25/pkg
7194	2500QAO-UP, 47 mm	25/pkg
7193	2500QAO-UP, 142 mm	25/pkg
7240	2500QAO-UP, 70 mm	25/pkg
7241	2500QAO-UP, 90 mm	25/pkg

Complementary Products

Filter Holders

Product No.	Description	Packaging
1107	25 mm Open-face Filter Holder	6/pkg
1219	37 mm Open-face Aluminum Filter Holder	1/pkg
1220	47 mm Open-face Aluminum Filter Holder	1/pkg
2220	47 mm In-line Stainless Steel Filter Holder	1/pkg



Pall Life Sciences
600 South Wagner Road
Ann Arbor, MI 48103-9019 USA

800.521.1520 toll free in USA
734.665.0651 phone
734.913.6114 fax

Australia - Sydney, NSW
Tel: 2-9428 2333
1800-635 082
Fax: 2-9428 5610

Austria - Vienna
Tel: 01-49 192 0
Fax: 01-49 192 933

Canada - Ontario
Tel: 905-542-0330
800-263-5910 (in Canada)
Fax: 905-542-0331

Canada - Québec
Tel: 514-337-2744
800-435-6268 (in Canada)
Fax: 514-337-7114
800-808-6268 (in Canada)

China - P. R., Beijing
Tel: 10-6464-9156/9157
Fax: 10-6464-9139

France - St. Germain-en-Laye
Tel: 01 30 61 32 90
Fax: 01 30 61 57 08

Germany - Dreieich
Tel: 06103-307 333
Fax: 06103-307 399

India - Mumbai
Tel: 22-578 9105
Fax: 22-578 9106
Ireland - Co. Dublin
Tel: 01-2846177
Fax: 01-2807739

Italy - Milano
Tel: 02-47-79-61
Fax: 02-47-79-6394
or 02-41-22-985

Japan - Tokyo
Tel: 3-3495-8319
Fax: 3-3495-5897

Korea - Seoul
Tel: 2-569-9161
Fax: 2-569-9092

Russia - Moscow
Tel: 095-490-68-07
Fax: 095-490-69-09

Singapore

Tel: 7448255
Fax: 7434938

Spain - Madrid
Tel: 91-657-9876
Fax: 91-657-9837

Sweden - Lund
Tel: 46-158 400
Fax: 46-320 781

Switzerland - Basel
Tel: 061-638 39 00
Fax: 061-638 39 40

Taiwan - Taipei
Tel: 2-2545-5991
Fax: 2-2545-5990

United Kingdom - Portsmouth
Tel: 023 92 302600
Fax: 023 92 302601

Visit us on the Web at www.pall.com/lab

E-mail us at Lab@pall.com

Filtration. Separation. Solution.™

© 2002, 2000 Pall Corporation. Pall, PALL, Emfab, Fiberfilm, Pallflex, and Tissuquartz are trademarks of Pall Corporation. Filtration. Separation. Solution. is a service mark of Pall Corporation. ® indicates a trademark registered in the USA.

9/02, 2K, GN02.0601

PN 33187

Constant	Symbol	Value	Unit
Gas constant	R	8,314 51	J/(mol K)
Standard temperature	T_n	273,15	K
Standard pressure	p_n	1 013,25	hPa
Density of CO ₂ in standard conditions	ρ_{n,CO_2}	1,977	kg/m ³
Density of O ₂ in standard conditions	ρ_{n,O_2}	1,429	kg/m ³
Density of N ₂ in standard conditions	ρ_{n,N_2}	1,251	kg/m ³
Density of dry air in standard conditions	$\rho_{n,air}$	1,293	kg/m ³
Density of water vapour in standard conditions	$\rho_{n,WV}$	0,804	kg/m ³
Particle unit mass density	$\rho_{n,P}$	1 000	kg/m ³
Dynamic viscosity of CO ₂	η_{n,CO_2}	$1,370 \times 10^{-5}$	kg/ms
Dynamic viscosity of O ₂	η_{n,O_2}	$1,928 \times 10^{-5}$	kg/ms
Dynamic viscosity of N ₂	η_{n,N_2}	$1,652 \times 10^{-5}$	kg/ms
Dynamic viscosity of air	$\eta_{n,air}$	$1,717 \times 10^{-5}$	kg/ms
Dynamic viscosity of water vapour	$\eta_{n,WV}$	$8,660 \times 10^{-6}$	kg/ms
Molar mass of CO ₂	M_{CO_2}	44,01	g/mol
Molar mass of O ₂	M_{O_2}	32,00	g/mol
Molar mass of N ₂	M_{N_2}	28,02	g/mol
Mean molar mass of dry air	\bar{M}_{air}	28,97	g/mol
Molar mass of water vapour	M_{WV}	18,02	g/mol
Sutherland constant of CO ₂	S_{CO_2}	273	K
Sutherland constant of O ₂	S_{O_2}	125	K
Sutherland constant of N ₂	S_{N_2}	104	K
Sutherland constant of air	S_{air}	113	K
Sutherland constant of water vapour	S_{WV}	650	K
—	$\sqrt{MT_{crit}}$ (CO ₂)	115,7	$\sqrt{g \text{ mol}^{-1} K}$
—	$\sqrt{MT_{crit}}$ (O ₂)	70,4	$\sqrt{g \text{ mol}^{-1} K}$
—	$\sqrt{MT_{crit}}$ (N ₂)	59,5	$\sqrt{g \text{ mol}^{-1} K}$
—	$\sqrt{MT_{crit}}$ (air)	61,9	$\sqrt{g \text{ mol}^{-1} K}$
—	$\sqrt{MT_{crit}}$ (water vapour)	107,9	$\sqrt{g \text{ mol}^{-1} K}$

(SFS-EN ISO 23210:2009)

12.6.2012 Mittaus 6. pelletti + sekahake

Liite 4.

$$T := 206^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{sg}} := 20^\circ\text{C}$$

$$p_{\text{atm}} := 99.9\text{kPa}$$

$$V_{\text{sg}} := 2\text{m}^3$$

$$p_{\text{st}} := -5\text{Pa}$$

$$m_v := 166.2\text{gm}$$

$$p_{\text{dyn}} := 5.0\text{Pa}$$

$$r_{\text{O2k}} := 8.379\%$$

$$p_{\text{sg}} := 95.9\text{kPa}$$

$$r_{\text{CO2k}} := 12.538\%$$

$$p := p_{\text{atm}} + p_{\text{st}}$$

$$r_{\text{N2k}} := 1 - r_{\text{CO2k}} - r_{\text{O2k}}$$

$$p = 99.895\text{kPa}$$

$$r_{\text{N2k}} = 79.083\%$$

T	savukaasun lämpötilä
T _{sg}	imetyn näytteen lämpötilä pumpulla
p _{atm}	vallitseva ilmanpaine
p _{st}	staattinen paine savukanavassa
p _{dyn}	dynaaminen paine mittauspisteessä
p _{sg}	imetyn näytteen paine pumpulla
V _{sg}	imetyn näytteen tilavuus
m _v	lauhtuneen veden massa
r _{O2k}	happipitoisuus kuiva
r _{CO2k}	hiilidioksidipitoisuus kuiva

Taulukkoarvoja:

$$T_n := 273.15\text{K}$$

$$p_n := 101.3\text{kPa}$$

$$R := 8.31451 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$$

$$(X = \sqrt{MT_{\text{crit}}})$$

$$S_{\text{O2}} := 125\text{K}$$

$$\eta_{\text{O2}} := 1.92810^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$M_{\text{O2}} := 32 \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

$$X_{\text{O2}} := 70.4 \sqrt{\text{gm}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}}$$

$$S_{\text{CO2}} := 273\text{K}$$

$$\eta_{\text{CO2}} := 1.37010^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$M_{\text{CO2}} := 44.01 \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

$$X_{\text{CO2}} := 115.7 \sqrt{\text{gm}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}}$$

$$S_{\text{N2}} := 104\text{K}$$

$$\eta_{\text{N2}} := 1.65210^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$M_{\text{N2}} := 28.02 \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

$$X_{\text{N2}} := 59.5 \sqrt{\text{gm}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}}$$

$$S_{\text{H2O}} := 650\text{K}$$

$$\eta_{\text{H2O}} := 8.66010^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$M_{\text{H2O}} := 18.02 \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

$$X_{\text{H2O}} := 107.9 \sqrt{\text{gm}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}}$$

$$\rho_{\text{nO2}} := 1.429 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{nCO2}} := 1.977 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{nN2}} := 1.251 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{nH2O}} := 0.8038 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Kuivan savukaasun tiheys:

$$\rho_n := r_{\text{O2k}} \cdot \rho_{\text{nO2}} + r_{\text{CO2k}} \cdot \rho_{\text{nCO2}} + r_{\text{N2k}} \cdot \rho_{\text{nN2}}$$

$$\rho_n = 1.357 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Veden ja kuivan kaasun massasuhte

$$x_s := \frac{m_v}{V_{\text{sg}} \cdot \frac{T_n}{T_{\text{sg}}} \cdot \frac{p_{\text{atm}}}{p_n} \cdot \rho_n}$$

$$x_s = 0.067 \text{ kg/kg}$$

Kosteat pitoisuudet

$$r_{\text{H}_2\text{O}} := \frac{\frac{x_s}{\rho_{\text{nH}_2\text{O}}}}{\left(\frac{1}{\rho_n} + \frac{x_s}{\rho_{\text{nH}_2\text{O}}}\right)}$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 10.116\%$$

$$r_{\text{O}_2} := r_{\text{O}_2\text{k}} \cdot (1 - r_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$r_{\text{O}_2} = 7.531\%$$

$$r_{\text{CO}_2} := r_{\text{CO}_2\text{k}} \cdot (1 - r_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$r_{\text{CO}_2} = 11.27\%$$

$$r_{\text{N}_2} := r_{\text{N}_2\text{k}} \cdot (1 - r_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$r_{\text{N}_2} = 71.083\%$$

Imetyn näytteen tilavuus normaaliolosuhteessa:

$$V_{\text{sgn}} := V_{\text{sg}} \cdot \frac{T_n}{T_{\text{sg}}} \cdot \frac{p_{\text{atm}}}{p_n}$$

$$V_{\text{sgn}} = 1.837\text{m}^3$$

Savukaasun vesipitoisuus normaaliolosuhteessa

$$f_n := \frac{m_v}{V_{\text{sgn}}}$$

$$f_n = 0.09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Kostean savukaasun tiheys vallitsevassa olosuhteessa:

$$\rho_{\text{pth}} := \frac{(p_{\text{atm}} + p_{\text{st}}) \cdot T_n \cdot (\rho_n + f_n)}{p_n \cdot T \cdot \left(1 + \frac{f_n}{\rho_{\text{nH}_2\text{O}}}\right)}$$

$$\rho_{\text{pth}} = 0.731 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Savukaasun nopeus mittauspisteessä

$$v_{\text{fg}} := \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{dyn}}}{\rho_{\text{pth}}}}$$

$$v_{\text{fg}} = 3.698 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\eta_{O_2T} := \eta_{O_2} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_n}} \cdot \frac{1 + \frac{S_{O_2}}{T_n}}{1 + \frac{S_{O_2}}{T}}$$

$$\eta_{O_2T} = 2.952 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$\eta_{CO_2T} := \eta_{CO_2} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_n}} \cdot \frac{1 + \frac{S_{CO_2}}{T_n}}{1 + \frac{S_{CO_2}}{T}}$$

$$\eta_{CO_2T} = 2.311 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$\eta_{N_2T} := \eta_{N_2} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_n}} \cdot \frac{1 + \frac{S_{N_2}}{T_n}}{1 + \frac{S_{N_2}}{T}}$$

$$\eta_{N_2T} = 2.482 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$\eta_{H_2OT} := \eta_{H_2O} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_n}} \cdot \frac{1 + \frac{S_{H_2O}}{T_n}}{1 + \frac{S_{H_2O}}{T}}$$

$$\eta_{H_2OT} = 1.645 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

Savukaasun lämpötilariippuvainen viskositeetti:

$$\eta_T := \frac{r_{O_2} \cdot \eta_{O_2T} \cdot X_{O_2} + r_{CO_2} \cdot \eta_{CO_2T} \cdot X_{CO_2} + r_{N_2} \cdot \eta_{N_2T} \cdot X_{N_2} + r_{H_2O} \cdot \eta_{H_2OT} \cdot X_{H_2O}}{r_{O_2} \cdot X_{O_2} + r_{CO_2} \cdot X_{CO_2} + r_{N_2} \cdot X_{N_2} + r_{H_2O} \cdot X_{H_2O}}$$

$$\eta_T = 2.358 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

Savukaasun moolimassa:

$$M := r_{O_2} \cdot M_{O_2} + r_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + r_{N_2} \cdot M_{N_2} + r_{H_2O} \cdot M_{H_2O}$$

$$M = 0.029 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

Vapaa matka:

$$\lambda := 2 \cdot \frac{\eta_T}{p} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot R \cdot T}{8M}}$$

$$\lambda = 1.095 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Cunninghamin kerroin PM2,5 ja PM10

$$C_{2.5} := 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{2.5 \mu\text{m}} \cdot \left[1.23 + 4.41 \cdot e^{\left(-0.88 \cdot \frac{2.5 \mu\text{m}}{2 \cdot \lambda} \right)} \right]$$

$$C_{2.5} = 1.108$$

$$C_{10} := 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{10 \mu\text{m}} \cdot \left[1.23 + 4.41 \cdot e^{\left(-0.88 \cdot \frac{10 \mu\text{m}}{2 \cdot \lambda} \right)} \right]$$

$$C_{10} = 1.027$$

Näytteen tilavuusvirtaus savukaasun olosuhteissa:

$$d_{in2.5} := 1.4\text{mm} \quad ST_{50.2.5} := 0.22 \quad N_{2.5} := 14 \quad d_{50.2.5} := 2.5\mu\text{m} \quad \rho_{0.P} := 1 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$$

$$d_{in10} := 8.3\text{mm} \quad ST_{50.10} := 0.22 \quad N_{10} := 1 \quad d_{50.10} := 10\mu\text{m}$$

$$V_{2.5} := \frac{9 \cdot \pi \cdot d_{in2.5}^3 \cdot ST_{50.2.5} \eta_T \cdot N_{2.5}}{4 \cdot d_{50.2.5}^2 \cdot C_{2.5} \rho_{0.P}} \quad V_{2.5} = 12.209 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$V_{10} := \frac{9 \cdot \pi \cdot d_{in10}^3 \cdot ST_{50.10} \eta_T \cdot N_{10}}{4 \cdot d_{50.10}^2 \cdot C_{10} \rho_{0.P}} \quad V_{10} = 12.251 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$V := \frac{V_{2.5} + V_{10}}{2} \quad V = 2.038 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad V = 12.23 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Näytteen tilavuusvirtaus normaali olosuhteissa:

$$V_n := V \cdot \frac{T_n \cdot (p_{atm} + p_{st})}{p_n \cdot T \cdot \left(1 + \frac{f_n}{\rho_{nH2O}}\right)} \quad V_n = 1.03 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad V_n = 6.178 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Näytteen tilavuusvirtaus pumpun olosuhteissa:

$$V_s := V \cdot \frac{T_{sg} \cdot (p_{atm} + p_{st})}{p_{sg} \cdot T \cdot \left(1 + \frac{f_n}{\rho_{nH2O}}\right)} \quad V_s = 1.168 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad V_s = 7.006 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Savukaasun nopeus impaktorin suuttimessa:

$$v_{in2.5} := \frac{4 \cdot V}{N_{2.5} \cdot \pi \cdot d_{in2.5}^2} \quad v_{in2.5} = 9.458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{in10} := \frac{4 \cdot V}{N_{10} \cdot \pi \cdot d_{in10}^2} \quad v_{in10} = 3.767 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsin luku:

$$Re_{2.5} := \frac{v_{in2.5} d_{in2.5} \rho_{pth}}{\eta_T}$$

$$Re_{2.5} = 410.551$$

$$Re_{10} := \frac{v_{in10} d_{in10} \rho_{pth}}{\eta_T}$$

$$Re_{10} = 969.494$$

Tasojen katkaisukohdat:

$$d_{50.2.50} := \sqrt{\frac{9 \cdot \pi \cdot S T_{50.2.5} \eta_T \cdot N_{2.5} d_{in2.5}^3}{4 \rho_{0.P} C_{2.5} V}}$$

$$d_{50.2.50} = 2.498 \mu\text{m}$$

$$d_{50.10.0} := \sqrt{\frac{9 \cdot \pi \cdot S T_{50.10} \eta_T \cdot N_{10} d_{in10}^3}{4 \rho_{0.P} C_{10} V}}$$

$$d_{50.10.0} = 10.009 \mu\text{m}$$

Suuttimen koko:

$$d_{nozzle} := \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot v_{fg}}}$$

$$d_{nozzle} = 8.377 \text{ mm}$$

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu päästömittauslaboratorio

PM10 ja PM2,5 pitoisuusmittauksen mittauspöytäkirja

no.

Päiväys: _____		<i>Mittauspaikan olosuhteet</i>	
Mittaus aloitettu: _____		Lämpötila*	<input type="text"/> °C
Mittaus lopetettu: _____		Ilmanpaine	<input type="text"/> kPa
Mittajat: _____		Ilmankosteus*	<input type="text"/> %
Mitattava kohde: _____			
<i>Savukaasun koseuden määrittely</i>		<i>Savukaasun olosuhteet</i>	
Lauhtunut vesimäärä	<input type="text"/> kg	Lämpötila	<input type="text"/> °C
Näytteen tilavuus	<input type="text"/> m ³	Staattinen paine	<input type="text"/> Pa
Näytekaasun lämpötila	<input type="text"/> °C	Dynaaminen paine	<input type="text"/> Pa
Savukaasun kosteus	<input type="text" value="0,00"/> %	O ₂ pitoisuus	<input type="text"/> %
Xs <i>i,x-diagrammista</i>	<input type="text"/> kg/kg	CO ₂ pitoisuus	<input type="text"/> %
		CO pitoisuus*	<input type="text"/> ppm
<i>Tulosuuttimen koko</i>		<i>Imulaitteiston olosuhteet / asetukset</i>	
Impaktorin virtaus	<input type="text"/> l/min	Näytekaasun lämpötila	<input type="text"/> °C
Savukaasun nopeus	<input type="text"/> m/s	Näytekaasun paine	<input type="text"/> kPa
Suuttimen halkaisija	<input type="text"/> mm	Näytteen tilavuus	<input type="text"/> l
		Näytekaasun virtaus	<input type="text"/> l/min

<i>Punnitukset</i>					<i>Pitoisuudet</i>		
Jakauma	1.	2.	Kertymä	no.	Jakauma	O ₂ red.%	
	mg	mg	mg			<input type="text"/>	
					mg/m ³ _n	mg/m ³ _n	
<10 µm	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<10 µm	<input type="text"/>	<input type="text"/>
10-2,5 µm	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	10-2,5 µm	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2,5> µm	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	2,5> µm	<input type="text"/>	<input type="text"/>
					PM10	<input type="text"/>	<input type="text"/>
					PM2,5	<input type="text"/>	<input type="text"/>

<i>Mittauksen aikainen seuranta*</i>				<i>Lisätietoja</i>
Aika	dyn.pain. Pa	sk.lämpö °C	valinnainen	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

* merkityt eivät vaikuta laskentaan