

Helsinki University of Technology Department of Mechanical
Engineering
Energy Engineering and Environmental Protection Publications
Teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan ja ympäristönsuojelun julkaisuja
Espoo 2002

TKK-ENY-8

MUSTALIFEÄN RUIKUTUSKOKEET SOODA-KATTILASSA JA RUIKUTUSKAMMIOSSA

Pasi Miikkulainen Ari Kankkunen Mika Järvinen

Helsinki University of Technology
Department of Mechanical Engineering
Laboratory of Energy Engineering and Environmental Protection

Teknillinen korkeakoulu
Konetekniikan osasto
Energiatekniikan ja ympäristönsuojelun laboratorio

Distribution:

Helsinki University of Technology

Department of Mechanical Engineering

Laboratory of Energy Engineering and Environmental Protection

PL 4400

02015 TKK

Puh. +358-9-451 3631

Fax. +358-9-451 3418

ISBN 951-22-6026-3

ISSN 1457-9944

Picaset Oy

Helsinki 2002

ESIPUHE

Tämä tutkimusraportti käsittelee Teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan ja ympäristönsuojelun laboratorion tekemiä mustalipeän ruiskutuskokeita, jotka tehtiin soodakattilan viereen ruiskutustasolle rakennetussa ruiskutuskammiossa ja tulipesässä. Mittaukset tehtiin kahdessa jaksossa, vuoden 2000 elo-syyskuussa ja marras-joulukuussa, suomalaisella soodakattilalla.

Ilman soodakattilan henkilökunnan apua näitä kokeita ei olisi voitu toteuttaa ja siksi haluan kiittää soodakattilan käyttöhenkilökuntaa ja johtoa mahdollisuudesta tehdä kokeet oikeissa olosuhteissa. Kiitos Energiatekniikan ja ympäristönsuojelun laboratorion henkilökunnalle ainutlaatuisen ruiskutuskoelaitteiston rakentamisesta ja mittausten järjestelyistä. Kiitos myös projektin rahoittajille, jotka ovat TEKES, Andritz Oy, Kvaerner Pulping Oy sekä Suomen Akatemia.

Espoossa 15.4.2002 Pasi Miikkulainen

SISÄLLYSLUETTELO

Esipuhe.....	3
Sisällysluettelo	4
Käytetyt merkinnät.....	5
1 Johdanto	6
1.1 Tämän raportin sisällöstä ja rakenteesta	6
1.2 Pisaroitumiseen vaikuttavat tekijät ja niiden merkitys	6
1.3 Ruiskutuslämpötilan ja -paineen merkitys	8
1.4 Tutkimuksen tavoite ja tulosten soveltaminen.....	8
2 Mittauslaitteisto ja –menetelmät	9
2.1 Yleistä	9
2.2 Koejärjestelyt	9
2.3 Suuttimet	10
2.4 Tulipesäendoskooppi mittausinstrumenttina	11
2.5 Suihkun nopeus ja muoto.....	12
2.6 Massavirta- ja nopeusjakaumat.....	13
2.7 Prosessidata ja ajoparametrit.....	13
2.8 Lipeäanalyysit	13
2.9 Pisarakoko ja muoto.....	14
3 Tulokset.....	15
3.1 Yleistä	15
3.2 Suihkun muoto	15
3.2.1 Avautumiskulma	15
3.2.2 Massavirtajakauma	16
3.2.3 Hajoamismekanismit.....	17
3.3 Suihkun nopeus	21
3.3.1 Nopeusjakauma.....	21
3.3.2 Ruiskutuslämpötilan ja -paineen vaikutus suihkun nopeuteen	21
3.4 Pisarakoko	23
3.5 Pisarakokojakauma	25
4 Yhteenvedo ja johtopäätökset	26
4.1 Suihkun muoto	26
4.2 Suihkun nopeus ja syntyvä pisarakoko	26
4.3 Tulosten hyödyntäminen käytännössä	27
4.4 Tulevaisuudessa	27
Lähdeluettelo.....	29
Liite 1 Lipeänäytteiden kuiva-ainepitoisuudet.....	30
Liite 2 Mustalipeän alkuaineanalyysi	31
Liite 3 Mustalipeän kiehumispisteen nousu (BPR)	32
Liite 4 Mustalipeän dynaaminen viskositeetti	33

KÄYTETYT MERKINNÄT

Symbolit

A	Suuttimen pienimmän aukon poikkipinta-ala, m^2
$\dot{m}$	Massavirta, kg/s
p	Paine, bar
T	Lämpötila, °C
u_p	Kiehumattoman putkivirtauksen nopeus pienimmässä aukossa, m/s
u_s	Mitattu nopeus suihkun keskilinjalla, m/s
u^*	Dimensioton nopeus, -
$\dot{V}$	Tilavuusvirta, m^3/s
a	Suihkun avautumiskulma, °
dT_b	lämpötilan ero kiehumispisteeseen normaali ilmanpaineessa, °C
r_{BL}	Mustalipeän tiheys, kg/m^3
f	Suihkun suuntakulma keskilinjaan nähden, °
D_{ekv}	Pisaran ekvivalenttihalkaisija, mm

Lyhenteet

SVHS	VHS-formaatista edelleen kehitetty videonauhaformaatti, jolla saavutetaan parempi kuvanlaatu
TC	Ruiskutuskammio (Test chamber)
F	Tulipesä (Furnace)

1 JOHDANTO

1.1 Tämän raportin sisällöstä ja rakenteesta

Teknillisen korkeakoulun energiatekniikan ja ympäristönsuojelun laboratorio on tutkinut mustalipeän pisaroitumista ja siihen vaikuttavia tekijöitä vuodesta 1990 lähtien. Kokeellista tutkimusta on tehty sekä pienoismalleilla että täyden mittakaavan suuttimilla. Pääasiassa on keskitytty tutkimaan lusikkasuuttimia, jotka ovat maailmalla eri suutintyypeistä yleisimmin käytössä. Kokeita on tehty korvikenesteillä ja mustalipeällä. Ruiskutuskokeita on tehty erilaisissa koeruiskutuskammioissa ja vuonna 1997 käyttöön otetun tulipesäendoskoopin avulla kokeita on pystytty tekemään myös soodakattilan tulipesässä.

Tulipesäendoskoopilla voidaan kuvata mustalipeän ruiskutusta tulipesän sisäpuolella. Ruiskutuskammiossa pisaroitumistapahtumaa on helpompi seurata usean kameran ja tarkistusikkunoiden avulla, mutta ruiskutusympäristönä kammio poikkeaa soodakattilasta huomattavasti. Endoskooppi kehitettiin, jotta vertailu näiden kahden ympäristön välillä olisi mahdollista. Sillä pystytään tulipesässä tutkimaan suihkun hajoamismekanismeja ja mittaamaan suihkun nopeus ja avautumiskulma. Lisäksi endoskoopilla voidaan kuvata ja tutkia kattilan muita osia, kuten tulistinpintoja ja niiden likaantumista.

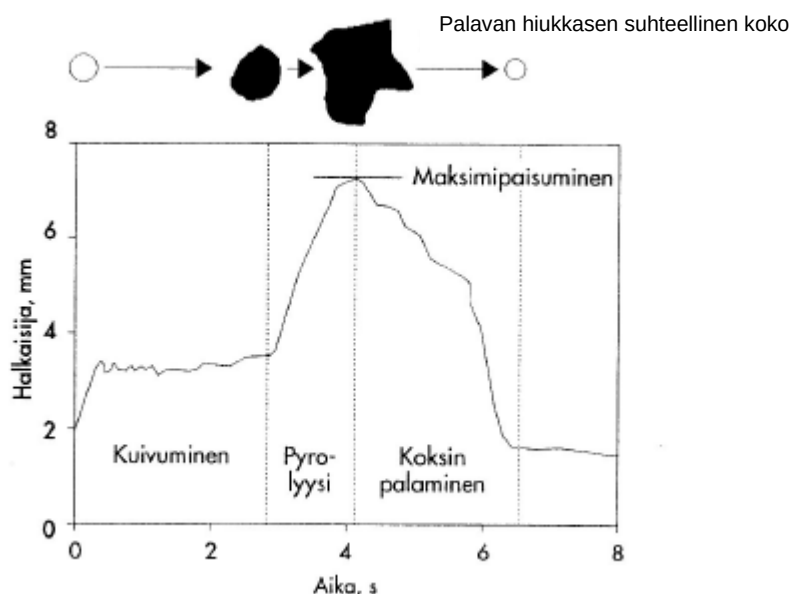
Tämä mittausraportti käsittelee erittäin laajaa mittaussarjaa, joka tehtiin lähes samanaikaisesti sekä tulipesässä ja ruiskutuskammiossa suoraan soodakattilan lipeärenkaalta otetulla mustalipeällä. Tavoitteena oli nähdä miten ruiskutusympäristö, ruiskutuslämpötila ja massavirta vaikuttavat pisaroitusprosessiin. Kokeet tehtiin kahdella, geometrialtaan erilaisella, kaupallisella lusikkasuuttimella. Raportin alussa käsitellään tutkimuksen merkitystä ja mittausmenetelmiä. Sen jälkeen kerrotaan mittaustuloksista ja lopuksi tuloksia käsitellään sekä kerrotaan niiden soveltamisesta ja työn jatkumisesta.

1.2 Pisaroitumiseen vaikuttavat tekijät ja niiden merkitys

Mustalipeä ruiskutetaan soodakattilaan tavallisesti lusikkasuuttimilla, jotka tuottavat massakeskihalkaisijaltaan 3-5 mm kokoisia pisaroita /1/. Lusikkasuutin muodostaa litteän suihkun, jota voidaan ohjailla säätämällä suutinkulmaa tai muuttamalla suuttimen kokoa ja geometriaa. Soodakattilan toimintaa ohjataan säätämällä ruiskutuspainetta ja lämpötilaa.

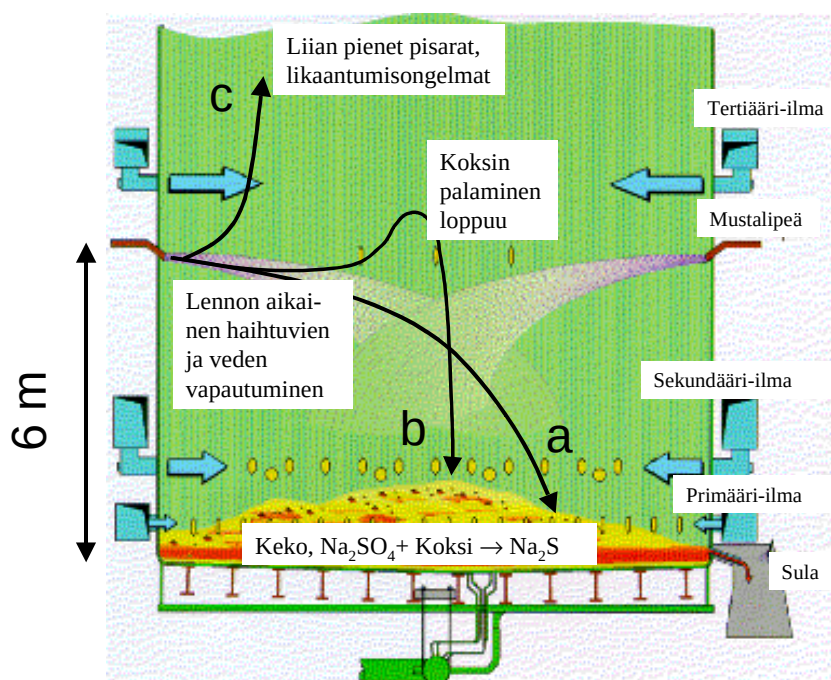
Pyrkimyksenä on saada aikaan sopivan kokoisia pisaroita, jotka lentävät kattilan pohjalla olevaan kekkoon juuri palamisen oikeassa vaiheessa. Kuvassa 1.1 on esitetty pisan palamisen eri vaiheet. Ensin pisarasta poistuu vesi. Kuivumisen jälkeen suurin osa pisan orgaanisesta aineesta vapautuu kaasumaiseen muotoon eli pisara pyrolysoituu. Pyrolyysikaasut poltetaan sekundääri- ja tertiääri-ilmalla. Pyrolysoitumisen jälkeen jäljelle jää jäännöshiili ja epäorgaaninen aines. Jäännöshiili eli koksi palaa tulipesän pohjan läheisyydessä ja pohjalle muodostuvan keon pinnalla. Epäorgaaninen aines otetaan talteen sulassa. /2, 3/ Edellä mainitut palamisen vaiheet voivat tapahtua osin samanaikaisesti.

Mustalipeäpisara paisuu huomattavasti pyrolyysivaiheen aikana. Paisuminen vaikuttaa palamiseen ja pisaran lentorataan. Kuvassa 1.2 on esitetty eri kokoisten pisaroiden lentoradat.



Kuva 1.1. Mustalipeäpisaran mitattu halkaisija ja palamisen eri vaiheet /2/.

Oikean kokoinen pisara (a) laskeutuu kekoon siinä vaiheessa, kun se on kuivunut ja osittain pyrolysoitunut. Jäljellä on koksi ja epäorgaaninen aines. Koksi on välttämätöntä keon tehokkaalle toiminnalle, korkean reduktioasteen saavuttamiseksi. Jos pisara on liian pieni (b) koksi palaa jo ilmalennon aikana ja epäorgaaninen aines ehtii myös hapettua. Erittäin pienet pisarat (c) tempautuvat savukaasujen mukana kattilan yläosiin aiheuttaen lämmönsiirtopintojen likaantumista ja tukkeutumista.



Kuva 1.2. Soodakattilan alaosa ja eri kokoisten pisaroiden lentoradat

1.3 Ruiskutuslämpötilan ja -paineen merkitys

Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus vaihtelee ajon aikana. Pumpattavuuden vuoksi lipeän viskositeetti on pidettävä riittävän alhaisena. Tavallisesti rajana pidetään 300-500 mPas. Tämä toteutetaan pitämällä lipeän lämpötila riittävän korkeana ja mahdollisesti erityisen lämpökäsittelyn avulla./4/ Polttolipeän lämpötilaa nostetaan vielä suorasti tai epäsuorasti höyryn avulla ennen ruiskutusta. Kun mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on 80 % luokkaa, ruiskutuslämpötila on silloin noin 16°C lipeän kiehumispisteen yläpuolella. Tämä tarkoittaa sitä, että kun lipeän paine lasketaan ympäristön tasolle (ulosvirtaus suuttimella), lipeä pyrkii jäähtymään 16°C. Tämä energia vapautuu ns. "flash-höyrystyksen kautta eli lipeä kiehuu muodostaen kuplia. Virtauksen sisältämät kuplat kiihdyttävät putkivirtausta ja vaikuttavat lusikalla muodostuvan lipeäsuihkun hajoamismekanismeihin ja siten muodostuvaan pisarakokoon. Voimakkaasti kiehuva lipeäsuihku hajoaa nopeasti ja yhtenäistä kalvoa ei muodostu. Suuttimen läpi virtaavan lipeän määrällä vaikutetaan suutinputkessa vallitsevaan paineeseen. Mitä alhaisempi lipeävirtaus, sitä alhaisempi paine suutinputken sisällä ja sitä voimakkaampaa on kiehuminen.

1.4 Tutkimuksen tavoite ja tulosten soveltaminen

Mittausprojektin tavoitteena oli tehdä laaja ruiskutuskoesarja kahdella teollisuuden yleisesti käyttämällä suutinmallilla ja sitä kautta luoda selkeä kuva muodostuvan suihkun massavirtajakaumasta ja suihkun ominaisuuksista. Tekemällä kokeet oikealla mustalipeällä, käytössä olevilla suuttimilla sekä toteuttamalla samoja kokeita sekä ruiskutuskammiossa että tulipesässä pyrittiin sulkemaan pois useita pisaroitumiseen vaikuttavia epävarmuustekijöitä, kuten lipeäkohtaiset erot, erilaiset suuttimet, tulosten sovellettavuus tulipesään, kuiva-aineen muutokset ja ajotapaerot. Tavoitteena oli myös kerätä aineistoa aiempien ruiskutuskammiokokeiden siirtämiseksi koskemaan tulipesää.

Tuloksia voidaan soveltaa parempien ruiskutustapojen valinnassa jo toimivilla kattiloilla. Ruiskutuksen ongelmista johtuvia seisokkeja voidaan vähentää ja ruiskutusta tehostaa ja siten saavuttaa kustannussäästöjä. Tulokset helpottavat uusien korkeakuiva-aineista mustalipeää käyttävien kattiloiden suunnittelua. Mustalipeän pisaroitumisen ja palamisen mallinnustutkimus voi hyödyntää näitä tuloksia laskennan lähtötietoina sekä testata mallien toimivuutta. Lähtötietoina saadaan mm. pisarakoko, suihkun lähtönopeudet ja suunnat.

2 MITTAUSLAITTEISTO JA –MENETELMÄT

2.1 Yleistä

Ruiskutustutkimus täydenmittakaavan lipeäruiskuilla, ruiskutuskammioilaitteistolla ja oikealla polttolipeällä vaatii usean tekijän yhtäaikaisen huomioonottamisen. Lipeää ei voida ruiskuttaa, laimentaa ja johtaa takaisin haihduttamolle määrättömästi häiritsemättä tehtaan normaalia toimintaa. Lisäksi on otettava huomioon turvallisuusnäkökohdat.

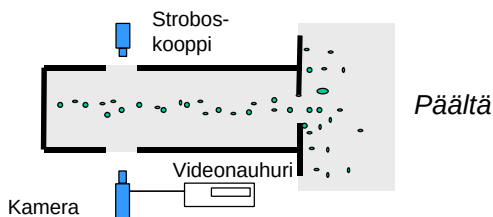
Tässä esitettävät koejärjestelyt ja laitteet rakennettiin ennen varsinaisia tehdasmittauksia laboratorioon ja ruiskutuskokeita tehtiin kylmällä vedellä. Haluttiin varmistua kammion tiiviyydestä ja mittausmenetelmien toimivuudesta. Nämä laboratoriokokeet todettiin välttämättömiksi, vaikka mustalipeän korvikenesteenä vesi kelpaa kuumalle mustalipeälle ainoastaan suuntaa antavaksi. Esimerkiksi massavirtajakauman mittaus onnistui vedellä, muttei mustalipeällä ja jo ennalta testattu massavirtajakauman mittauslaitteisto jouduttiin rakentamaan kokonaan uudestaan.

Varsinaiset ruiskutuskokeet tehtiin modernilla suomalaisella soodakattilalla syksyn 2000 aikana. Kattilahuoneen ruiskutasolle rakennettiin täyden mittakaavan vaakasuora ruiskutuskammio. Mustalipeän ruiskutusta tutkittiin kahdella suutintyyppillä sekä tulipesässä että ruiskutuskammiossa. Lipeän kuiva-aine vaihteli välillä 74 - 80 %. Ruiskutuslämpötila oli 129-135°C ja ero kiehumispisteeseen 13-19°C. Kyseessä oli havulipeä (30 % kuusta ja 70 % mäntyä). Mittauksia tehtiin kolmella eri massavirralla: 4.3, 5.2 ja 6.1 kg/s. Ruiskutuslämpötilaa vaihdeltiin tehtaan normaalien säätörajojen puitteissa pyrkimyksenä saada mittaustuloksia kullekin massavirralle kolmessa eri lämpötilassa.

Kuvassa 2.1 on esitetty ruiskutuskoelaitteiston pääkomponentit. Normaalisti käytössä olevaan lipeärenkaalta tulevaan suutinletkuun liitettiin 10 m pitkä jatko-osa. Letku eristettiin huolellisesti. Suutin kiinnitettiin jatko-osaan normaalisti. Mittauksia tehtiin sekä ruiskutuskammiossa että tulipesässä. Molemmissa kokeissa käytettiin samaa lipeänsyöttöjärjestelmää.

2.2 Koejärjestelyt

Lipeä ruiskutettiin ruiskutuskammioon vaakatasossa kuten tulipesäänkin. Kammiossa suihkua valaistiin voimakkaasti alapuolelta (sähköteho 10000W). Tulipesässä kattilan pohjalla oleva keko antoi tarvittavan taustavalon kuvauksia varten. Suihkua kuvattiin sekä endoskoopilla että kammion kattorakenteeseen asennetulla kameralla. Endoskoopissa käytettävä kamera oli valoherkempi ja resoluutio oli parempi kuin kattokameran. Molempien kameroiden valotusaikaa ja -määrää voitiin säätää manuaalisesti. Kattokameralla kuvattu materiaali tallennettiin SVHS -formaattiin videonauhalle ja endoskoopilla kuvattu materiaali tallennettiin suoraan tietokoneen kovalevyille.



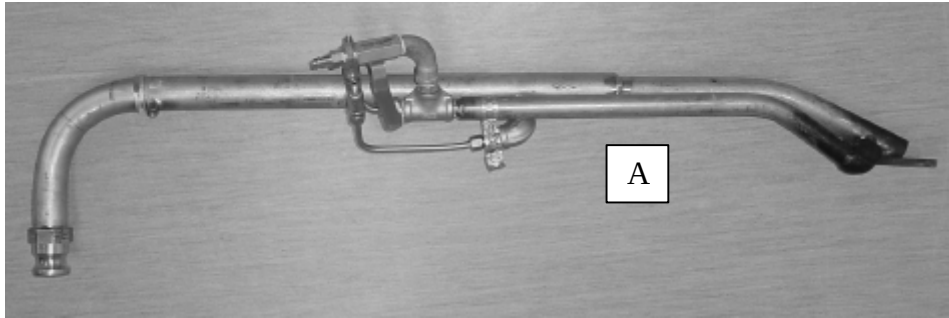
Kuva 2.1. Kaaviokuva koejärjestelyistä ruiskutuskammiossa /5/

Ruiskutuskammion valaistu osa oli noin 1.2 m leveä. Kammion keskivaiheilla suihkusta leikattiin 14.5 cm levyinen kaistale, joka lensi kammion peräosaan pisarakoon mittauspisteeseen. Muu osa lipeävirrasta laimennettiin ja johdettiin soodakattilan sekoitussäiliöön.

Pisarakoko mitattiin suihkun keskilinjalta (myös vertikaalisuunnassa keskeltä) 4 m etäisyydellä suuttimesta. Pisarakokomittauksiin käytettiin videokameraa ja valaistukseen ja kameran ohjaukseen voimakasta stroboskooppia. Mittausjaksolta kerätty kuva-aineisto analysoitiin myöhemmin kuva-analyysilaitteiston avulla.

2.3 Suuttimet

Tutkitut lusikkasuutintyyppit ovat suomalaisilla soodakattiloilla yleisesti käytössä. Tässä tutkimuksessa niistä käytetään nimityksiä A ja B. Suuttimet eroavat toisistaan ennen kaikkea lusikan kiinnitystavaltaan. Suuttimessa A lusikalla leikataan suutinaukon pinta-alasta osa pois ja kuristetaan lipeävirtausta. Suuttimessa B suutinputki on kokonaan irti lusikan pinnasta ja kiinnitetty erillisellä kaulusosalla. Molempiin suuttimiin asennettiin paineenmittausyhteet, joista lusikkaa lähempänä oleva jäähdytettiin ilmalla. Suuttimet on esitetty kuvassa 2.2.



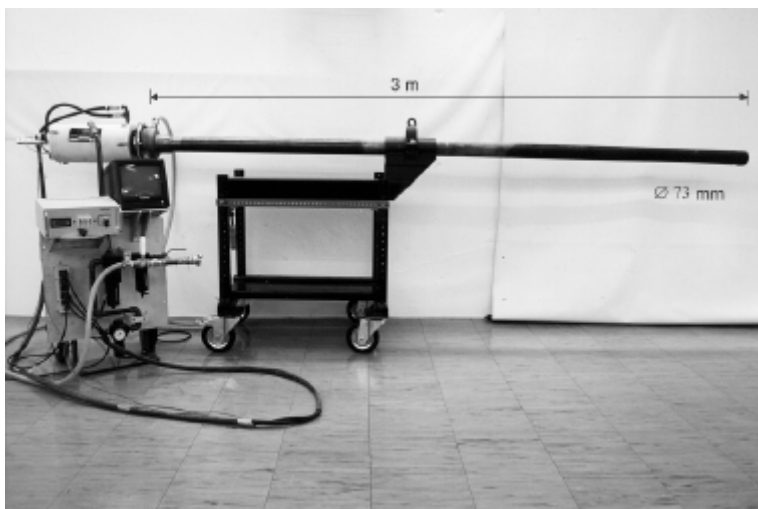
Kuva 2.2. Kokeissa käytetyt suuttimet A ja B

Suuttimien päämitat:

A:	Putken sisähalkaisija	27 mm
	Lusikkakulma	23°
B:	Putken sisähalkaisija	28 mm
	Lusikkakulma	36°

2.4 Tulipesäendoskooppi mittausinstrumenttina

Tulipesäendoskoopilla mitattiin lipeäsuihkun nopeus ja avautumiskulma sekä ruiskutuskammiassa että tulipesässä. Lisäksi vertailtiin suihkun hajoamismekanismeja molemmissa ruiskutusympäristöissä. Tavoitteena oli selvittää ruiskutuskammiosta saatujen tulosten sovellettavuus todellisiin tulipesässä vallitseviin olosuhteisiin.



Kuva 2.3. Tulipesäendoskooppi

Tulipesäendoskooppi on Teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan ja ympäristönsuojelun laboratoriossa kehitetty soodakattilakuvauksiin tarkoitettu mittausräppä, ks. kuva 2.3. Endoskooppi koostuu pitkästä (3.1 m) putkesta, jonka toisessa päässä on kamera ja toisessa linssi ja prisma. Prismalla avulla muutetaan kuvaussuunta suoraan kulmaa putken keskilinjaa nähden. Putkiosa koostuu 3 sisäkkäisestä putkesta, joista sisimmässä on useita linssipaketteja, joilla kuva viedään kameralle. Kaksi ulointa putkea toimivat tuki- ja suojaputkina, joiden välissä virtaa jäähdytysilma. Vettä ei voida käyttää jäähdytysnesteenä sularäjähdysriskin vuoksi./6/

Tulipesäendoskoopin käyttömahdollisuudet

- *Yksinkertainen, siirreltävä mittalaittekokonaisuus, joka tarvitsee paineilmaa jäähdytykseen ja linssin puhtaanapitoon sekä sähköä kameralle.*
- *Päästään tulipesän sisälle tutkimaan ruiskutustapahtumaa eli voidaan havaita todellisissa olosuhteissa, mitä eri ruiskutusparametreit vaikuttavat suuttimelta muodostuvaan suihkuun ja suuttimen toimintaan.*
- *Voidaan mitata suihkun nopeus, avautumiskulma ja lentorata, sekä tutkia suihkun alkupään (max. 2 m tulipesän sisäpuolella) hajoamismekanismeja.*
- *Soveltuu pienin muutoksin myös käytönaikaisiin tulitinkuvauksiin. Vaatimuksena on vain riittävän iso tarkistusluukku tms. tulipesän seinässä.*

2.5 Suihkun nopeus ja muoto

Suihkun nopeus mitattiin suihkun keskilinjalta 0.5 m etäisyydellä suuttimelta. Mittaus tehtiin molemmissa mittaussympäristöissä endoskooppiin asennetun nopean videokameran avulla ja kuvat tallennettiin suoraan tietokoneen kovalevyille. Kameralla kuvattiin samaan kuvaan kolme valotusta tunnetulla viiveellä. Viiveenä käytettiin 1 ms ja valotusaika säädettiin 10 - 400 µs välille riippuen kuvaolosuhteista. Tulipesässä jouduttiin käyttämään valon puutteen vuoksi pitkiä valotusaikoja. Tämä näkyy kuvissa epätarkkuutena, mutta ei vaikuta mittaustuloksen tarkkuuteen.

Nopeusmittauksen tulos laskettiin kuva-analyysiohjelman avulla. Kustakin kuvasta mitattiin suihkun liikkuma matka viiveen ja valotusajan aikana. Menetelmä on varsin tarkka, jos kuvattavan kohteen mittakaava tunnetaan tarkasti. Nopeusmittausten maksimivirhe oli noin 4-7%./7/

Suihkun muotoa tutkittiin siten, että suihkun keskilinjaa kuvattiin 0.1 m välein niin syvälle tulipesään tai ruiskutuskammioon kuin kussakin mittaustilanteessa oli mahdollista. (1-1.5 m lusikalta) Tavoitteena oli tutkia suihkun hajoamismekanismeja ja lusikalla mahdollisesti muodostuvan kalvon pituutta. Suihkun avautumiskulma määritettiin kuva-analyysiohjelman avulla.

Ruiskutuskammion katolle asennettiin myös nopea videokamera, jolla kuvattiin laajempaa kuva-alaa kuin endoskoopilla. Näin voitiin havainnoida lipeäsuihkun ominaisuuksia kokonaisuutena. Kameraa liikuteltiin suihkun suunnassa kattoä pitkin. Myös kattokameralla pystyttiin määrittämään suihkun nopeus ja avautumiskulma. Sitä käytettiin tulosten tarkistamiseen, mutta varsinaiset mittaustulokset ovat peräisin endoskooppimittauksista

2.6 Massavirta- ja nopeusjakaumat

Massavirtajakauma määritettiin molemmille suutintyypeille yhdellä massavirralla (5.2 kg/s). Ruiskutuskammioon asennettiin keräin, josta lipeä johdettiin vaa'an varassa roikkuvaan keräysastiaan. Mitattiin massa ja sen kertymiseen kulunut aika. Suutinta kääntämällä mitattiin massavirta 0°, 10°, 20° ja 30° suuntakulmiin suihkun keskilinjalta. Menetelmä oli varsin työläs ja ympäristön tärinä vaikeutti vaa'an käyttöä. Nopeusjakauma mitattiin endoskoopilla samanaikaisesti massavirtajakaumamittauksen kanssa.

2.7 Prosessidata ja ajoparametrit

Soodakattilan oma ohjausjärjestelmä mahdollisti prosessidatan ja eri ajoparametrien keräyksen mittauskohtaisesti. Ruiskutuskokeet tehtiin kattilan takaseinällä ja sitä koskevat tiedot saatiin ohjausjärjestelmästä erikseen talteen. Kun kokeet olivat käynnissä takaseinällä oli käytössä ainoastaan koesuutin. Kattilalla oli seinäkohtainen tilavuusvirran ja paineen mittausta. Tilavuusvirta mittari kalibroitiin erillisellä massavirtamittarilla ennen kokeita. Soodakattilan takaseinä kytkettiin pois automaattisen säädön piiristä ja kokeet voitiin toteuttaa halutulla tavalla soodakattilan toimintaa kohtuuttomasti häiritsemättä. Myös yleisiä prosessitietoja kuten polttolipeän lämpötila, kuiva-aine, kokonaistilavuusvirta, keon lämpötila, savukaasun lämpötila eri kohdissa, höyryntuotanto, ilmansyöttö, lipeän lämpötilaero kiehumispisteeseen ja tuotanto (tka/vrk) kerättiin talteen.

Mitattavilta suuttimilta mitattiin paine ja lämpötila. Paine mitattiin suutinputkesta 50 mm ja 500 mm etäisyydellä suuttimen ulostulosta. Näin haluttiin tutkia suutinputken sisällä tapahtuvaa kiehumista. Painemittauksen ongelma - varsinkin tulipesässä - oli paineanturien tukkeutuminen.

2.8 Lipeäanalyysit

Soodakattilalla käytettiin ainoastaan havulipeää. Polttolipeän kuiva-aine vaihteli mittausajanjaksolla 74-80 % välillä. Mittausjaksolla otettiin lipeänäytteet aamulla ja illalla. Näytteet analysoitiin KCL:ssa (Oy Keskuslaboratorio - Centrallaboratorium Ab). Kaikista polttolipeänäytteistä määritettiin kuiva-ainepitoisuus. Lisäksi yhdelle näytteelle tehtiin viskositeettikäyrä kuiva-aineen funktiona, kiehumispisteen nousukäyrä (BPR) ja alkuaineanalyysi. Analyysituloksia verrattiin kerättyyn prosessidataan ja ko. parametrit korjattiin analyysituloksia vastaaviksi. Lipeäanalyysin tulokset on esitetty liitteissä 1-4.

2.9 Pisarakoko ja muoto

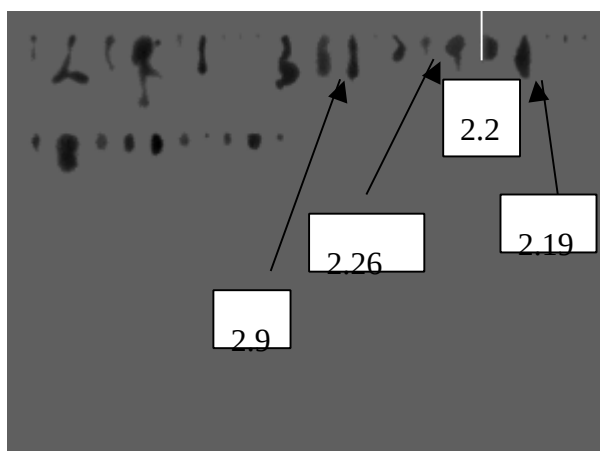
Pisarakoko ja -kokojakauma mitattiin videokameran ja stroboskoopin avulla 4 m etäisyydellä suuttimesta. Arvioitiin, että tällä etäisyydellä lopullinen pisarakoko on saavutettu. Pisarakoko mitattiin pelkästään ruiskutuskammio-olosuhteissa, ks. kuva 2.1. Koejärjestelyssä arvioitiin myös, että ruiskutuskammion pisaraa jäähdyttävä vaikutus olisi samansuuntainen kuin tulipesän pisaran pintaa kuivaava vaikutus. Eli kammiossa jäähtyvä ja jähmettyvä pisara käyttäytyisi samoin kuin tulipesässä kuivuva ja pinnaltaan kovettuva pisara. Pisaraa koossa pitävät voimat (pintajännitys) ovat samaa luokkaa./8/

Stroboskooppi säädettiin 50 Hz taajuudelle ja se oli synkronoitu kameran kanssa siten, että kamera ohjasi stroboskooppia. Kuvattu materiaali tallennettiin SVHS-nauhalle. Yksi mittausjakso kesti 10 minuuttia, mikä tarkoittaa 15000 kuvaa. Nauhalta kuvat digitoitiin ja pisarakoko määritettiin kuva-analysiohjelman avulla. Tätä varten kehitettiin mustalipeän pisarakokomittauksiin soveltuva tietokoneohjelma, joka huomioi myös geometrisesti hankalat, ei-pyöreät, partikkelit. Yhdessä mittausjaksosta voidaan analysoida noin 10 000 - 100 000 partikkelia.

Mustalipeäpisaran muodon määrittäminen on olennainen osa pisarakokomittauksia. Mittauksissa havaittiin, että merkittävä osa pisaroista ei ollut pyöreitä, vaan vaihtelevan muotoisia ja kokoisia rihmoja ja riekaleita. Siksi perinteiset menetelmät pisarakoon määrittämiseksi eivät tulleet kysymykseen, vaan kehitettiin luokitusmenetelmä eri muotoisille partikkeleille. Menetelmä perustuu pisaroiden pyöreysarvoon, joka määritellään seuraavasti:

$$\text{Pyöreys} = \frac{\text{Piiri}^2}{4 * p * \text{Pinta - ala}} \quad (2.1)$$

Ympyrän pyöreysarvo on 1. Mitä suurempi pyöreysarvo on sitä vähemmän partikkelin poikkileikkaus muistuttaa ympyrää. Kuvassa 2.4 on esitetty eri muotoisia mustalipeäpisaroita ja niiden pyöreysarvoja. Pyöreysarvo näyttäisi pienenevän samalla, kun partikkelin koko pienenee. Pintajännitys vaikuttaa suhteessa enemmän pienempiin partikkeleihin./5/



Kuva 2.4. Pyöreysarvoja eri partikkeleille/5/

3 TULOKSET

3.1 Yleistä

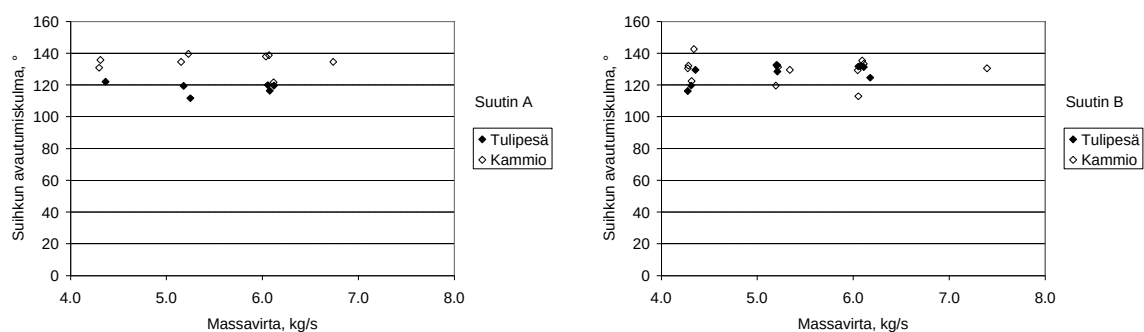
Ruiskutuskokeet tehtiin koeruiskutuskammiossa ja tulipesässä. Molemmissa mitattiin suihkun avautumiskulma ja nopeus suihkun keskilinjalla, sekä tutkittiin kalvon hajoamismekanismeja. Kammiossa pystyttiin mittaamaan lisäksi pisarakoko 4 m etäisyydellä suuttimesta, sekä nopeus- ja massavirtajakaumat.

Suihkun avautumiskulman, keskilinjan nopeuden ja hajoamismekanismien osalta suoritettiin vertailu kammio- ja tulipesätulosten osalta. Näin pyrittiin selvittämään tulipesäolosuhteiden vaikutusta lipeäsuihkun pisaroitumistapahtumaan ja sitä, miten hyvin kammiossa havaitut pisanmuodostusilmiöt voidaan soveltaa koskemaan todellisia olosuhteita.

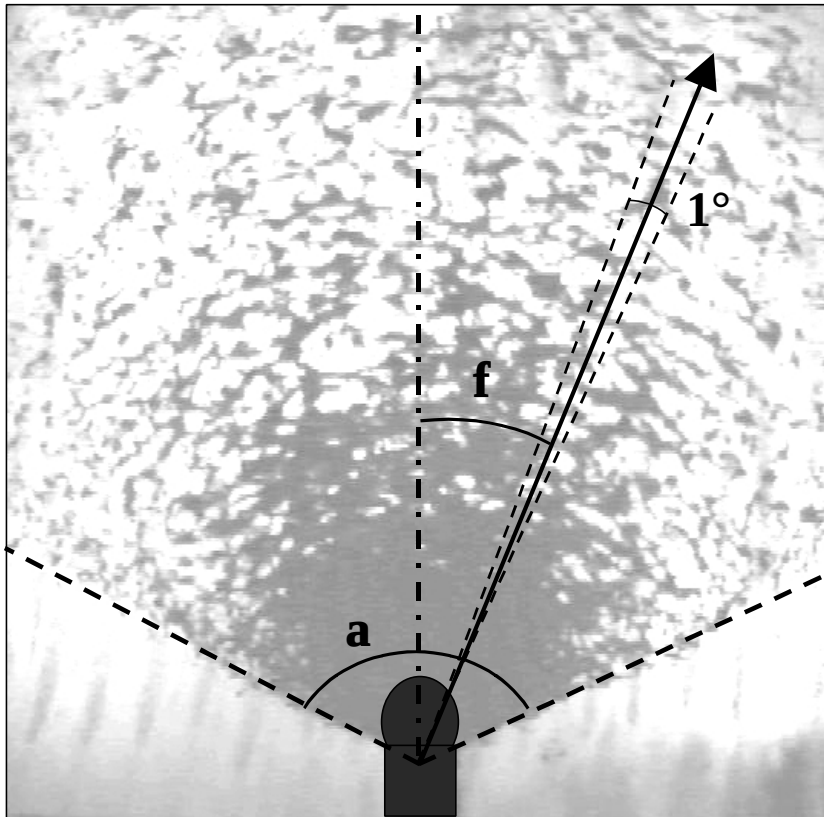
3.2 Suihkun muoto

3.2.1 Avautumiskulma

Suihkun avautumiskulma (α , kuvassa 3.2) mitattiin tulipesäendoskoopilla sekä tulipesässä että ruiskutuskammiossa. Kammioista mitatut tulokset varmistettiin vielä kattokameran avulla (ks. kuva 2.1). Kuvassa 3.1 on esitetty suihkun avautumiskulma massavirran funktiona. Kummallakin suutintyyppillä avautumiskulma pysyi vakiona riippumatta massavirran muutoksesta. Suutin A muodosti tulipesässä noin 15° kapeamman suihkun kuin kammiossa. Kammiossa suihkun avautumiskulma oli noin 135° . Suutin B muodosti avautumiskulmaltaan samanlaisen suihkun ($125\text{--}135^\circ$) sekä tulipesässä että ruiskutuskammiossa./5, 7/



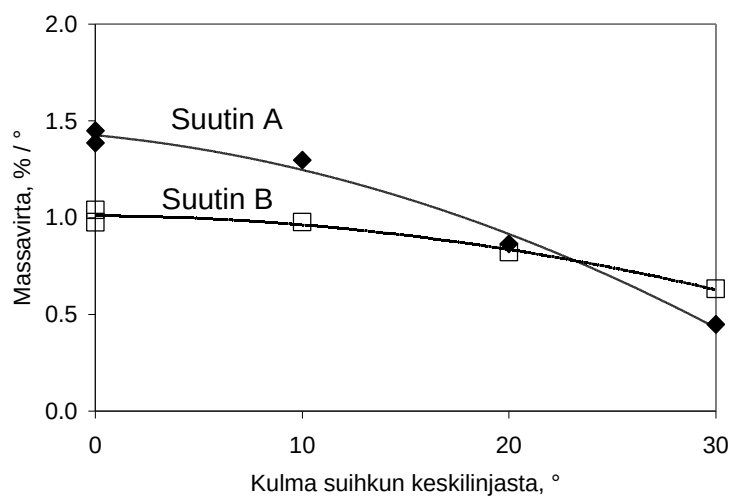
Kuva 3.1. Suihkun avautumiskulma tulipesässä ja kammiossa, suuttimet A ja B /5/



Kuva 3.2. Suihkun avautumiskulma (a) ja kulma keskilinjasta (f)

3.2.2 Massavirtajakauma

Molemmille suutintyypeille mitattiin 5.2 kg/s massavirralla massavirtajakauma 60 cm etäisyydellä suuttimen ulostulosta. Mittaukset tehtiin ruiskutuskammiossa 0, 10, 20 ja 30° kulmissa (ϕ , kuvassa 3.2) suihkun keskilinjasta. Kuvassa 3.3 on esitetty massavirtajakauma molemmille suuttimille. Pystyakselilla on esitetty massavirran osuus, joka menee yhden asteen sektoriin (ks. myös kuva 3.2).



Kuva 3.3. Massavirtajakaumat, 5.2 kg/s /7/

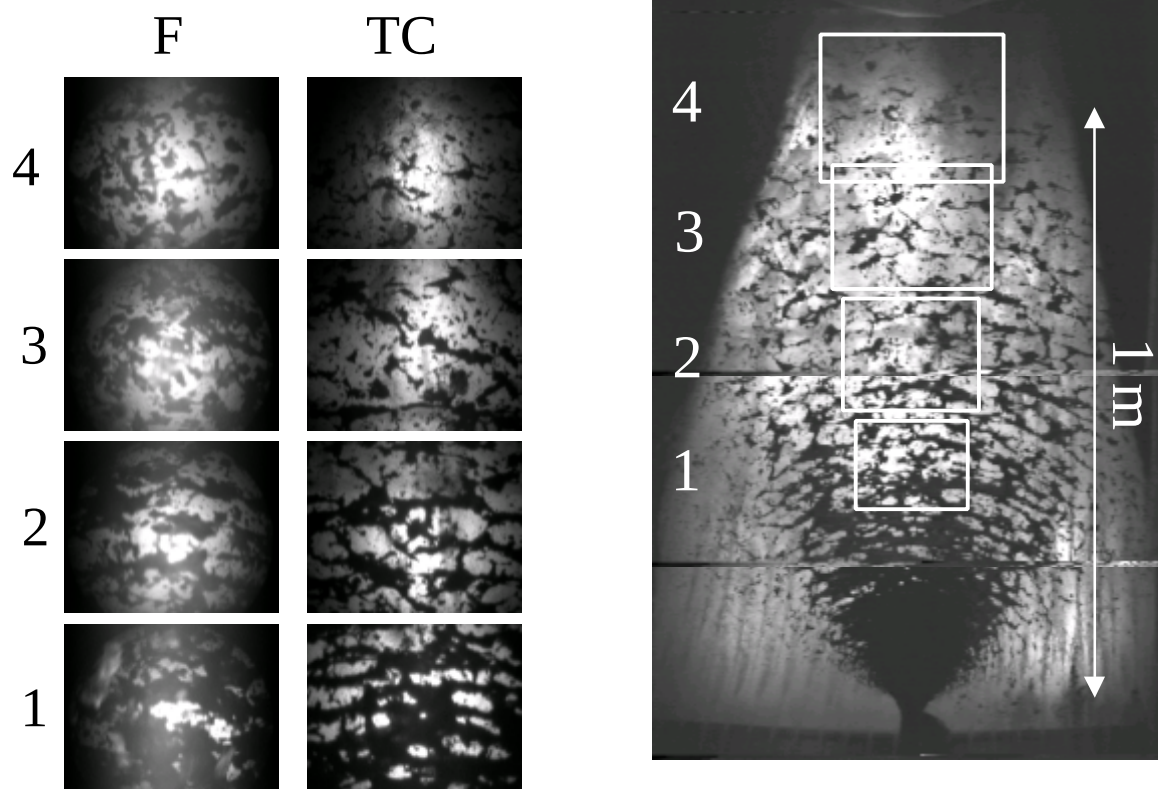
Suutin A muodosti suihkun, jossa suurin osa massavirrasta keskittyi suihkun keskilinjalle ja reunoille meni vain hyvin vähän. Suutin B muodosti tasaisemmin jakautuneen suihkun kuten kuvasta 3.3 voidaan havaita.

3.2.3 Hajoamismekanismit

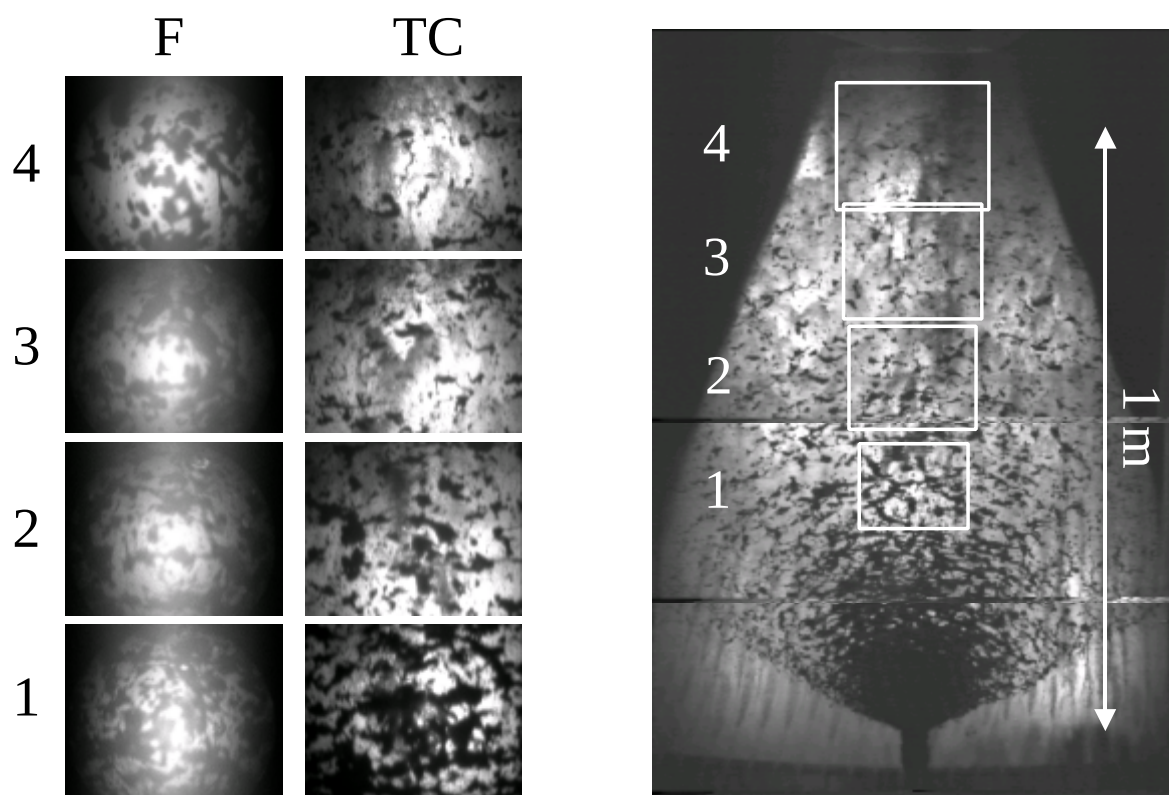
Lipeän ruiskutuslämpötilaa säädettiin tehtaan säätörajojen puitteissa. Tämän lisäksi tehtiin koesarja, jossa matalinta mahdollista lipeälinjasta saatavaa lämpötilaa laskettiin lipeäletkun vesijähdytyksellä 1-2°C. Tällöin ero lipeän kiehumispisteeseen (normaali ilmanpaineessa) oli pienimmillään 13.5°C. Korkein mahdollinen ero kiehumispisteeseen oli lähes 19°C. Normaalisissa ajotilanteissa ero kiehumispisteeseen oli noin 16-17°C.

Lusikkasuutin muodostaa tavallisesti litteän mustalipeäsuihkun. Lusikalla muodostuu lipeäkalvo, joka hajoaa eri mekanismein eri pituisiksi ja muotoisiksi rihmoiksi ja riekaleiksi. Nämä saattavat hajota pienemmiksi pisaroiksi. Kalvon tai suihkun hajoamismekanismiin vaikuttavat suutingeometrian lisäksi pääasiassa suihkun nopeus sekä nesteen sisältämien kuplien määrä. Kun lipeää ruiskutetaan reilusti kiehumispisteen yläpuolella suutinputken sisällä muodostuu pieniä kuplia, jotka kasvavat paineen laskiessa ja kiihdyttävät virtausta suutinputkessa. /9, 10/

Kuvissa 3.4 ja 3.5 on esitetty perusruiskutustilanne (5.2 kg/s) molemmille suuttimille kuvattuna sekä tulipesässä että ruiskutuskammiossa. Havaitaan, että lipeäsuihkun hajoamismekanismit ovat samanlaiset molemmissa ruiskutusympäristöissä, mutta poikkeavat jonkin verran suutintyyppien välillä. Kuvassa 3.4 (suutin A) ruiskutuslämpötila on 17°C kiehumispisteen yläpuolella ja suihkun nopeus on 13 m/s. Kuvassa 3.5 (suutin B) ruiskutuslämpötila on 17°C kiehumispisteen yläpuolella ja suihkun nopeus on noin 14 m/s./7/



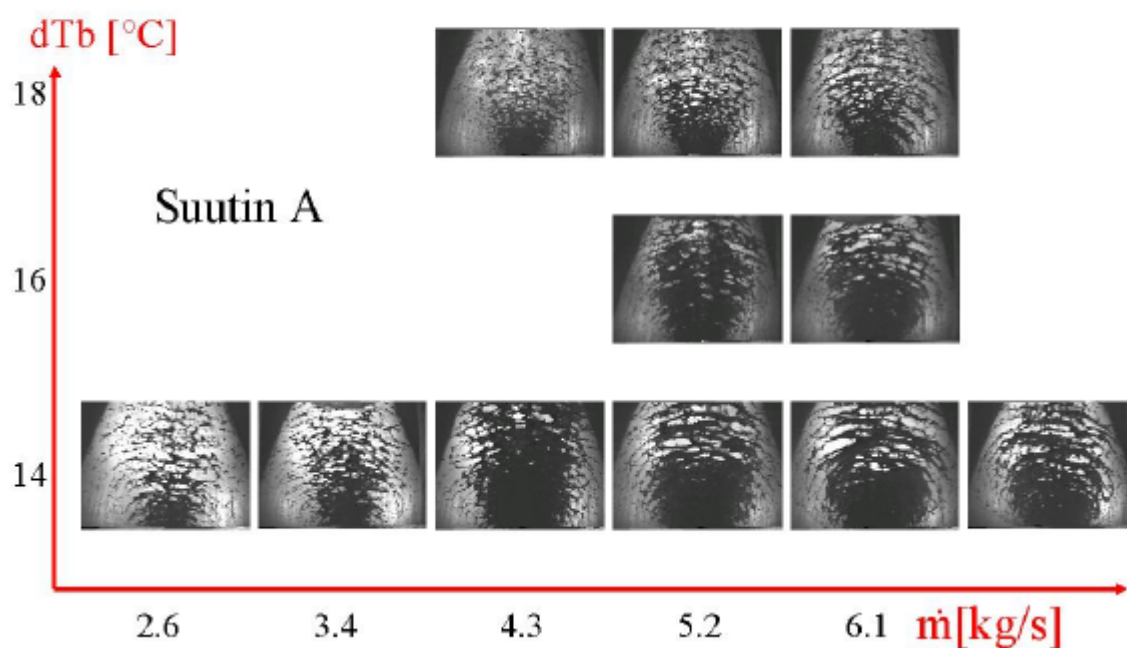
Kuva 3.4. Mustalipeäsuihkun hajoaminen tulipesässä (F) ja ruiskutuskammiossa (TC) 0.4 m (1), 0.6 m (2), 0.8 m (3) ja 1.0 m (4) etäisyydellä suuttimen ulostulosta. Oikealla kokonaiskuva suihkusta ruiskutuskammiossa, Suutin A./7/



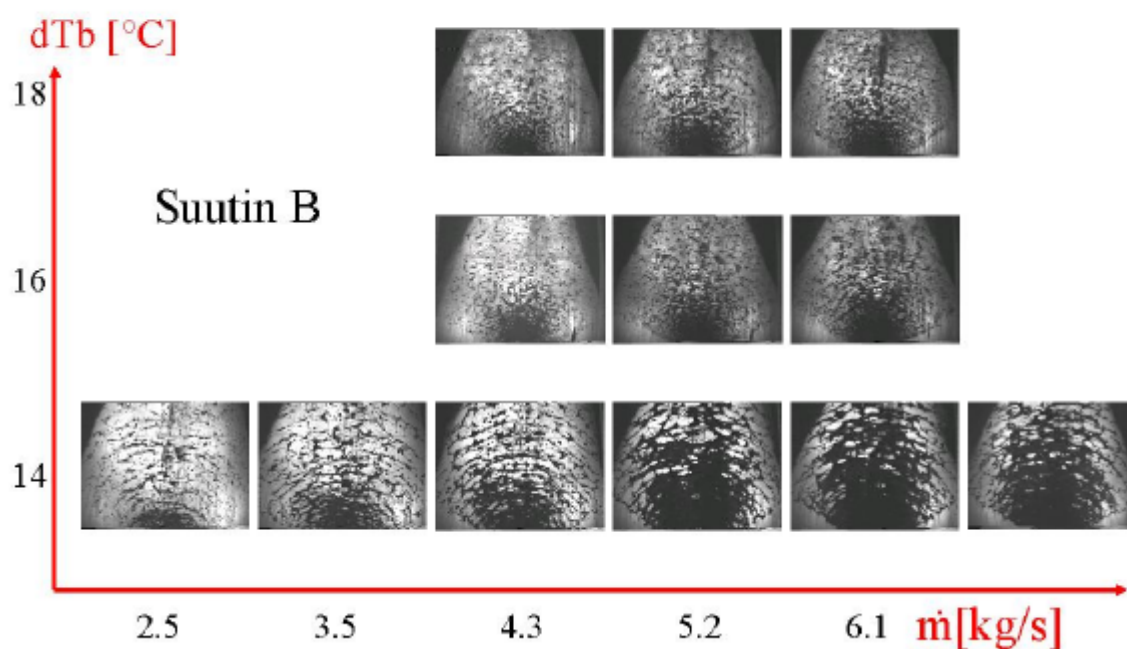
Kuva 3.5. Mustalipeäsuihkun hajoaminen tulipesässä (F) ja ruiskutuskammiossa (TC) 0.4 m (1), 0.6 m (2), 0.8 m (3) ja 1.0 m (4) etäisyydellä suuttimen ulostulosta. Oikealla kokonaiskuva suihkusta ruiskutuskammiossa, Suutin B./7/

Molemmissa tapauksissa lusikalla muodostuva yhtenäinen kalvo on lyhyt. Suutin A muodostaa kalvon, joka hajoaa kulkusuuntaan nähden poikittaisiksi rihmoiksi, jotka jo 1m matkalla hajoavat pienemmiksi kappaleiksi. B-suutin muodostaa tasaisesti jakautuneen, erittäin lyhyen kalvon, joka hajoaa 0.5 m matkalla pieniksi kappaleiksi. Vaikka hajoamismekanismit eivät ole samanlaiset, voidaan todeta, että molemmissa tapauksissa lipeän kiehumisen jo suutinputken sisällä nopeuttaa lusikalla muodostuvan kalvon hajoamista./7/

Edellä esitetyt esimerkit ovat peräisin ns. normaaleista ajotilanteista. Lipeäsuihkun hajoamismekanismi muuttuu olennaisesti molemmilla suuttimilla, jos lipeän ruiskutuslämpötilaa lasketaan tai massavirtaa kasvatetaan. Suutinputken sisällä tapahtuva kiehumisen heikkenee ja molemmat suuttimet muodostavat pitkän yhtenäisen kalvon. A-suuttimella ero ei ole kovin suuri, mutta B-suuttimella ero on merkittävä. Suihkun hajoamismekanismit on esitetty lämpötilan ja massavirran funktiona kuvissa 3.6 ja 3.7. Mukaan vertailuun on otettu kolme normaalista koesarjasta poikkeavaa massavirtaa eli 2.6, 3.4, ja 7.0 kg/s havainnollistamaan massavirran vaikutusta. Näitä mittasarjoja ei tehty kuin alimmalla ruiskutuslämpötilalla.



Kuva 3.6. Ruiskutuslämpötilan ja massavirran vaikutus lipeäsuihkun hajoamiseen. dT_b = ero kiehumispisteeseen. Kuvien korkeus on noin 0.7 m.



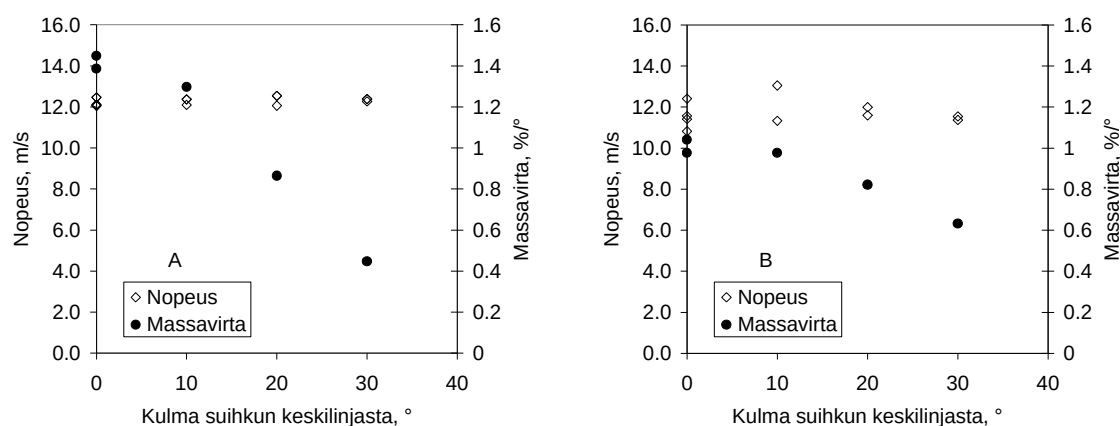
Kuva 3.7 Ruiskutuslämpötilan ja massavirran vaikutus lipeäsuihkun hajoamiseen. dT_b = ero kiehumispisteeseen. Kuvien korkeus on noin 0.7 m.

3.3 Suihkun nopeus

Tulipesäendoskoopilla mitattiin suihkun nopeus monivalotustekniikan avulla. Nopeusmittaus tehtiin 50 cm etäisyydellä suuttimesta suihkun keskilinjalla sekä tulipesässä että ruiskutuskammiossa. Nopeusjakauma eri suuntakulmiin määritettiin ruiskutuskammiossa suutinta kääntämällä endoskoopin pysyessä paikoillaan.

3.3.1 Nopeusjakauma

Nopeusjakauma eri suuntakulmiin (ϕ kuvassa 3.2) mitattiin kahdessa ruiskutustilanteessa molemmille suuttimille. Ero lipeän kiehumispisteeseen oli 16.5°C ja 17.4°C kokonaismassavirran ollessa 5.2 kg/s. Kuvassa 3.8 on esitetty nopeusjakauma yhdessä massavirtajakauman kanssa. Molemmilla suutintyypeillä perusuiskutustilanteessa nopeus on vakio eri suuntakulmiin, vaikka massavirran osuus pienenee suihkun reunalle mentäessä./5/



Kuva 3.8. Nopeus- ja massavirtajakaumat suutintyypeille A ja B, 5.2 kg/s

3.3.2 Ruiskutuslämpötilan ja -paineen vaikutus suihkun nopeuteen

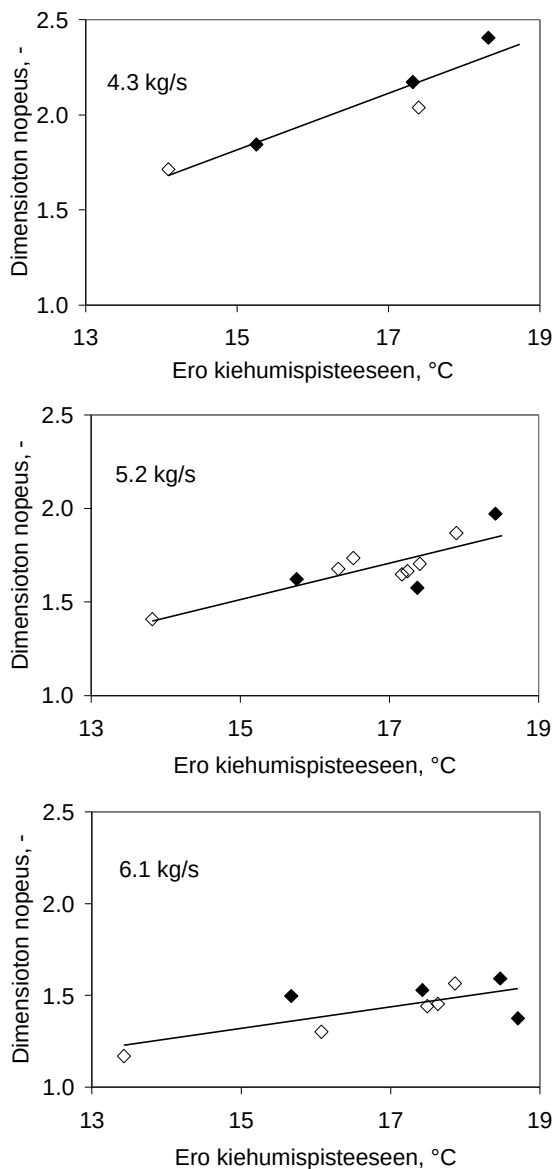
Ruiskutuslämpötilan vaikutusta suihkun nopeuteen tutkittiin mittaamalla suihkun nopeus, kun ero kiehumispisteeseen oli 13-19 °C. Nopeus mitattiin kolmella eri massavirralla tulipesässä ja ruiskutuskammiossa molemmille suutintyypeille. Kun ruiskutuslämpötila on näin paljon kiehumispisteen yläpuolella, kiehumisen suutinputkessa on todennäköistä.

Suutinputken sisäisen kiehumisen vaikutusta virtauksen nopeuteen kuvaa hyvin dimensioton nopeus, joka on laskennallisen kiehumattoman putkivirtauksen nopeuden suhde mitattuun suihkun nopeuteen. Toisin sanoen dimensioton nopeus kuvaa sitä, miten paljon virtaus on kiihtynyt kiehumisen vaikutuksesta. Lusikkasuuttimen tapauksessa myös suuttimen geometria, kuten lusikkakulma ja se kuristetaanko virtausta lusikkalevyllä, vaikuttaa virtauksen nopeuteen. Siksi kiehumaton tapaus lähestyy dimensiottoman nopeuden arvoa, joka on suurempi kuin yksi. Alla on esitetty dimensiottoman nopeuden kaava 3.1./6, 7/

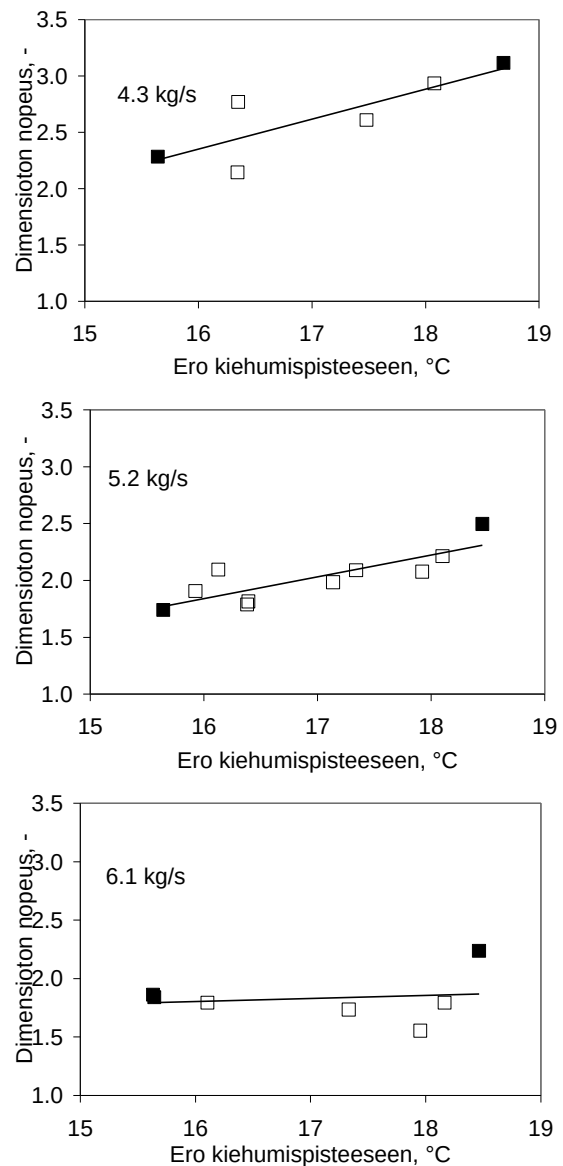
$$u^* = \frac{u_s}{\frac{\dot{m}}{A \rho_{BL}}} = \frac{u_s}{u_p} \quad (3.1)$$

missä u_s on mitattu nopeus suihkun keskilinjalta ja u_p laskennallinen kiehumattoman putkivirtauksen nopeus ulostulon pienimmässä aukossa, A , $\dot{m}$ on massavirta ja ρ_{BL} mustalipeän tiheys.

Kuvissa 3.9 ja 3.10 on esitetty molemmille suutintyypeille dimensioton nopeus eron kiehumispisteeseen funktiona kolmella eri massavirralla.



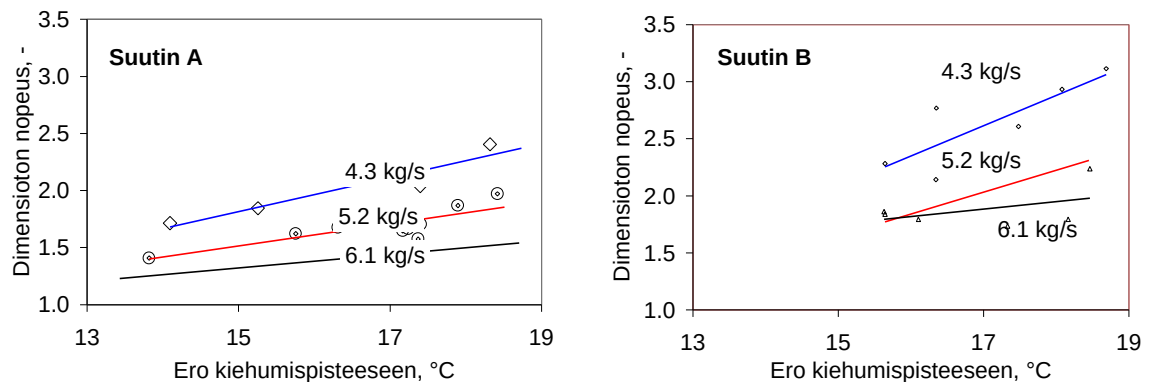
Kuva 3.9. Suutin A, dimensioton nopeus kolmella eri massavirralla, musta vinoneliö = tulipesä ja läpinäkyvä vinoneliö = ruiskutuskammio./7/



Kuva 3.10. Suutin B, dimensioton nopeus kolmella eri massavirralla, musta neliö = tulipesä ja läpinäkyvä neliö = ruiskutuskammio./7/

Kuvista 3.9 ja 3.10 nähdään, että tulipesästä ja kammioista mitatut tulokset eivät eroa toisistaan merkittävästi eli tulipesä ei vaikuta suihkun lähtönopeutta kiihdyttävästi. Eri massavirroilla eli ruiskutuspainella dimensioton nopeus on erilainen. Mitä pienempi ruiskutuspainelähtö on, sitä voimakkaampaa on suutinputken sisäinen kiehuminen ja sitä enemmän lämpötilan kohoaminen kiihdyttää suihkua. Pienimmällä massavirralla (4.3 kg/s) B suuttimella virtaus kiihtyi yli kolminkertaiseksi verrattuna kiehumattomaan putkivirtaukseen.

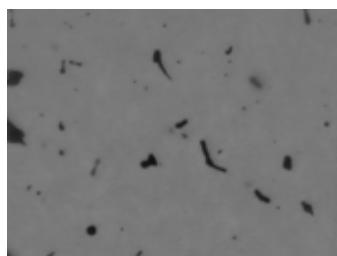
Kuvaan 3.11 on koottu edellä esitetyt nopeusmittaustulokset suutinkohtaisesti. Lineaariset sovitteet on kerätty molemmissa tapauksissa samalle asteikolle helpottamaan vertailua.



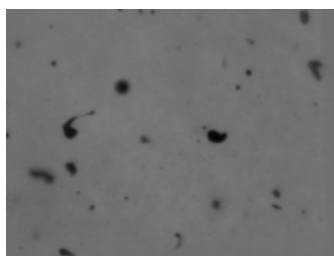
Kuva 3.11. Dimensioton nopeus eri massavirroilla lämpötilan funktiona koottuna suutinkohtaisesti

3.4 Pisarakoko

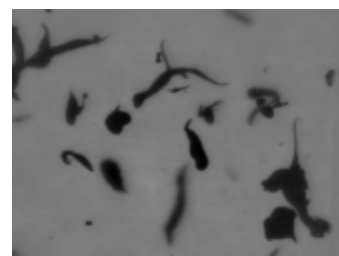
Pisarakoko ja -jakauma mitattiin videokameran ja stroboskoopin avulla 4 m etäisyydellä suuttimesta. Pisarakoko mitattiin 10 minuuttia kestävältä jaksolta. Tässä ajassa mittauspisteeseen osui noin 10 000 pisaraa. Havaittiin, että merkittävä osa pisaroista ei ollut pyöreitä, vaan vaihtelevan muotoisia ja kokoisia rihmoja ja riekaleita. Kuvissa 3.12 ja 3.13 on esitetty esimerkkikuvia pisaroista ja niiden muodoista eri ajotilanteissa. Vasemmassa reunassa on tilanne, jossa suutinputken sisäinen kiehuminen on voimakasta eli lämpötila on mahdollisimman korkea ja massavirta pieni. Oikealle mentäessä lämpötila laskee ja massavirta kasvaa eli kiehuminen heikkenee. Kuvien korkeus on noin 73 mm.



$dT_b = 18.0^\circ\text{C}$, 4.3 kg/s

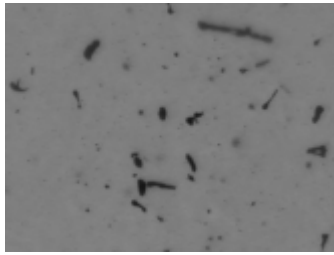


$dT_b = 17.4^\circ\text{C}$, 5.2 kg/s

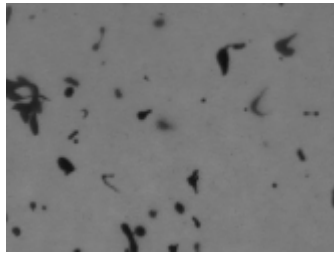


$dT_b = 13.8^\circ\text{C}$, 6.1 kg/s

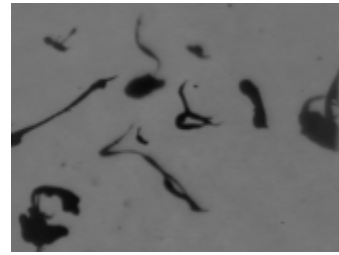
Kuva 3.12. Pisaroita eri ajotilanteissa, Suutin A



$dT_b = 18.1^\circ\text{C}$, 4.3 kg/s



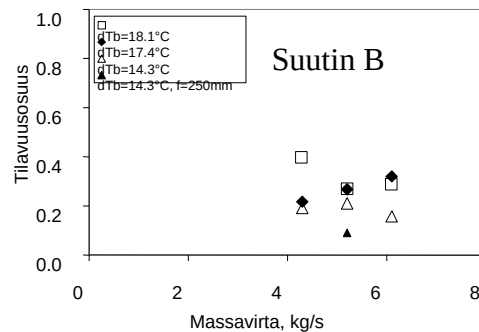
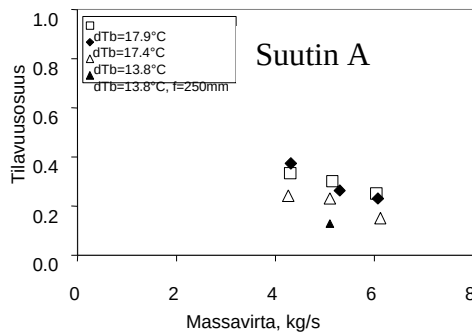
$dT_b = 17.3^\circ\text{C}$, 5.2 kg/s



$dT_b = 14.2^\circ\text{C}$, 6.1 kg/s

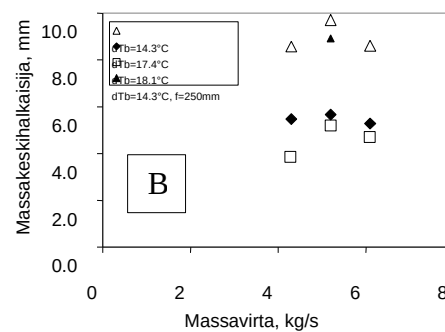
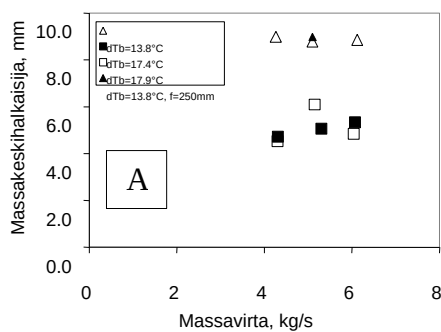
Kuva 3.13. *Pisaroita eri ajotilanteissa, Suutin B*

Kaikissa mittausjaksoissa esiintyi sekä pyöreitä että ei-pyöreitä pisaroita. Pyöreiden pisaroiden osuus vaihteli 15 - 40 % välillä. Mitä alhaisempi ruiskutuslämpötila tai korkeampi massavirta sitä vähemmän pyöreitä pisaroita syntyi, kuten kuvasta 3.14 voidaan havaita. Kuvassa oleva musta kolmio esittää mittaustulosta, joka tehtiin pienemmän kuva-alan optiikalla.

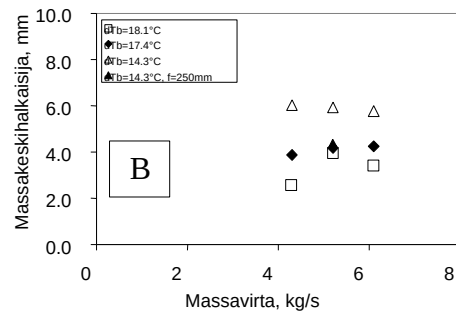
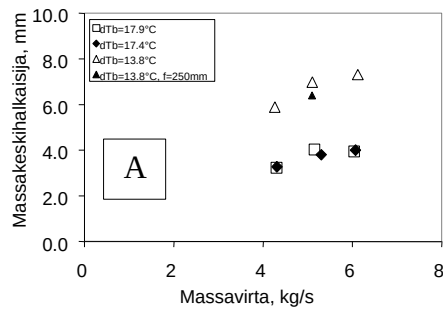


Kuva 3.14. *Pyöreiden pisaroiden tilavuusosuus, dT_b on ruiskutuslämpötilan ero kiehumispisteeseen./5/*

Pyöreiden ja ei-pyöreiden pisaroiden keskikoko on esitetty erikseen kuvissa 3.15 ja 3.16. Massakeskihalkaisija vaihteli 3.9 -10 mm välillä. Rihmojen keskiahkaisu oli 3.2 - 5.8 mm välillä.



Kuva 3.15. *Massavirran vaikutus pyöreiden pisaroiden keskikokoon /5/*

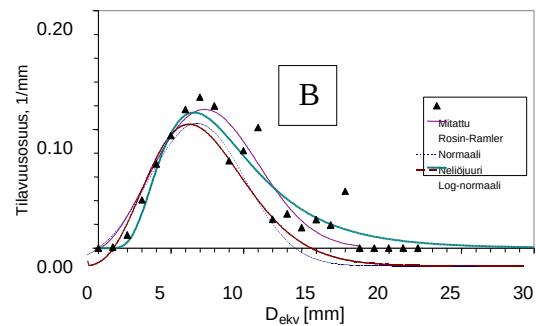
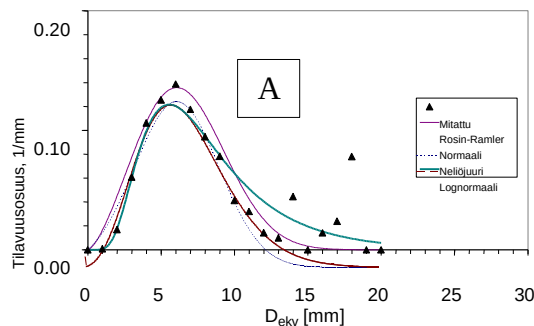


Kuva 3.16. Massavirran vaikutus rihmojen keskihalkaisijaan eri ruiskutuslämpötiloissa /5/

3.5 Pisarakokojakauma

Kun oletetaan, että kaikki partikkelit muodostavat pyöreitä pisaroita kumulatiivinen vertailukokojakauma voidaan muodostaa. Massakeskihalkaisija on suurempi kuin pelkkien pyöreiden pisaroiden massakeskihalkaisija tai rihmojen keskihalkaisija vastaavassa tapauksessa. Tämä on seurausta rihmojen tilavuuden muuttamisesta vastaamaan pyöreän partikkelin tilavuutta./5/

Kasvava massavirta levensi pisarakokojakaumaa. Keskihalkaisija vaihteli 6 - 14 mm välillä ja kasvoi, kun ruiskutuslämpötilaa kohotettiin tai massavirtaa pienennettiin. Rosin-Rammler-, normaali-, neliöjuuri-normaali- ja log-normaali-jakauma sovitettiin yhdistettyihin pisarakokomittaustuloksiin. Kuvassa 3.17 on esitetty mittaustulokset yhdessä laskennallisten jakaumien kanssa. Ruiskutustilanne oli 5.2 kg/s ja dT_b oli 17°C . Havaitaan, että kaikki tutkitut jakaumat kuvaavat melko hyvin koetuloksia. Neliöjuuri-normaali-jakauma antoi parhaan tuloksen. Seuraavaksi lähinnä mittaustuloksia oli log-normaali-jakauma. Normaali- ja Rosin-Ramler-jakaumat yliarvioivat pienten pisaroiden osuutta./5/



Kuva 3.17. Yhdistetty mitattu pisarakokojakauma ja neljä kokojakaumasovitetta /5/

4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa mitattiin useita mustalipeän pisaroitumiseen vaikuttavia tekijöitä. Projektin viimeisessä vaiheessa on tarkoitus yhdistää mitatut parametrit yhtenäiseksi kokonaisuudeksi ja kehittää yleinen, laajemmalle alueelle soveltuva ruiskutusmalli. Kaikki mitatut parametrit ovat välttämättömiä osatekijöitä ruiskutusmallin kehityksessä. Pyritään selvittämään lusikkasuuttimella muodostuvan suihkun geometria, nopeus ja hajoamismekanismi sekä niihin vaikuttavat tekijät. Nämä yhdistetään tulevaisuudessa pisarakokoon. Seuraavassa käsitellään erikseen eri osatekijöitä ja niiden soveltamista käytäntöön.

4.1 Suihkun muoto

Ruiskutuskammioympäristössä suutin A muodosti suihkun, jonka avautumiskulma oli noin 135° . Tulipesässä avautumiskulma oli 15° pienempi eli noin 120° . Suutin B muodosti avautumiskulmaltaan $125\text{--}135^\circ$ suihkun sekä tulipesässä että ruiskutuskammiossa. Syynä avautumiskulman muutokseen suuttimen A tapauksessa on massavirtajakauma. Reunojen lähellä massavirta on hyvin pieni ja tulipesäolosuhteissa reunat "karstoittuvat" erittäin nopeasti eli lusikan reunoille kuivui suihkua kaventava kerros lipeää. Tällä ei ollut merkitystä suuttimen toiminnalle. Avautumiskulma ei kerro suuttimella muodostuvan suihkun peittoaluetta yksin, vaan on tunnettava myös massavirtajakauma. Molemmat riippuvat suutingeometriasta ja ovat kullekin suutintyypille erilaiset.

4.2 Suihkun nopeus ja syntyvä pisarakoko

Kun lipeän ruiskutuslämpötila on reilusti kiehumispisteen yläpuolella, suutinputken sisäinen kiehumisen on paineen alentuessa, eli lähellä suutinputken ulostuloa, todennäköistä. Kiehumisen kiihdyttää suutinvirtausta ja nopeuttaa suihkun hajoamista pisaroiksi. Massavirran pysyessä vakiona $3\text{--}4^\circ\text{C}$ muutos ruiskutuslämpötilassa vaikuttaa suihkun nopeuteen jopa 4 m/s . Alla olevassa taulukossa 4.1 on havainnollisuuden vuoksi esitetty suihkun nopeus, kun ero kiehumispisteeseen on pienin ja suurin massavirran ollessa 5.2 kg/s . Kyseessä on yksittäiset mittapisteet, jotka löytyvät myös kuvasta 3.9 ja 3.10 Vastaavanlainen vertailu voitaisiin tehdä myös massavirran vaikutuksesta pitämällä ero kiehumispisteeseen vakiona.

Taulukko 4.1. Suihkun nopeus matalassa ja korkeassa ruiskutuslämpötilassa, 5.2 kg/s

Suutin	Ero kiehumis- pisteeseen, dT_b	Dimensioton nopeus, u^*	Nopeus, u
A	13.8°C	1.4	10.1 m/s
A	18.4°C	2.0	14.1 m/s
B	15.6°C	1.7	10.2 m/s
B	18.5°C	2.5	14.7 m/s

Dimensioton nopeus kertoo kiehumisen voimakkuudesta. Mitä suurempi dimensioton nopeus on, sitä voimakkaampaa on kiehuminen ja sitä nopeammin ja sitä pienemmiksi pisaroiksi suihku hajoaa.

Tämä tutkimus mahdollisti luotettavan vertailun kammio- ja tulipesäympäristön välillä. Havaittiin, että lipeäsuihkun hajoamismekanismit ovat samanlaiset molemmissa ruiskutusympäristöissä. Myöskään nopeusmittauksissa ei ollut merkittävää eroa eri ympäristöjen välillä. Voidaan todeta, että ruiskutettaessa suurilla massavirroilla mustalipeää siten, että kiehuminen dominoi suihkun hajoamista ruiskutusympäristö ei vaikuta suihkun lähtönopeuteen tai hajoamismekanismeihin. Ruiskutuskammiossa voidaan tutkia mustalipeän ruiskutusta ja tulokset ovat suoraan siirrettävissä koskemaan myös tulipesäolosuhteita.

Tutkimuksessa havaittiin, että merkittävä osa pisaroista ei ollut pyöreitä, vaan vaihtelevan muotoisia ja kokoisia rihmoja ja riekaleita. Pyöreiden pisaroiden osuus vaihteli 15 - 40 % välillä. Mitä alhaisempi ruiskutuslämpötila tai korkeampi massavirta sitä vähemmän pyöreitä pisaroita syntyi. Siksi perinteiset menetelmät pisarakoon määrittämiseksi eivät tulleet kysymykseen, vaan kehitettiin luokitusmenetelmä eri muotoisille partikkeleille. Menetelmä perustuu pisaroiden pyöreysarvoon. Pisarakoolla ja muodolla on erittäin paljon merkitystä luotettavien pisaranpalamismallien kehitystyössä. Pisarakojakauman muoto noudattaa parhaiten neliöjuuri-normaali-jakaumaa.

4.3 Tulosten hyödyntäminen käytännössä

Mustalipeän ruiskutus helpottuu ja tehostuu, kun tiedetään, mitä eri ajoparametrien muutokset aiheuttavat lipeäsuihkun ominaisuuksiin. Voidaan todeta, että tavallisilla säätöparametreilla, kuten lämpötila ja paine, vaikutetaan suoraan suihkun nopeuteen ja suihkun hajoamismekanismeihin. Lämpötilaa kohottamalla ja painetta laskemalla, eli massavirtaa pienentämällä suutinmäärän pysyessä vakiona, suihkun nopeus saadaan kasvamaan. Samalla suihkun hajoaminen nopeutuu ja tuloksena on pienempi pisarakoko. Pisarakoon on oltava oikea, jotta soodakattilan toiminta olisi mahdollista.

Mustalipeän palamisen mallinnus sekä koko soodakattilamalli tarvitsee lähtötietoinaan suihkun muodon eli avautumiskulman, massavirta- ja nopeusjakauman ja syntyvän pisarakoon. Tässä esitettyjä tuloksia voidaan jo nyt soveltaa vastaavanlaista tilannetta mallinnettaessa. Lipeä on havulipeää, jonka kuiva-aine pitoisuus on 75-80 %, suuttimien geometrian on oltava samankaltainen ja ruiskutuslämpötilan ja paineen on oltava samalla alueella kuin tässä esitetyt. Tämän tutkimuksen perusteella massavirtajakaumana voidaan käyttää mitattua jakaumaa (kuvat 3.3 ja 3.8). Nopeus on eri suuntakulmiin vakio ja avautumiskulma on suutintyyppikohtainen.

4.4 Tulevaisuudessa

Tutkimustyö ja mittaustulosten käsittely jatkuu. Pyrkimyksenä on löytää suihkun ominaisuuksien ja syntyvän pisarakoon ja -kokojakauman välinen yhteys.

Tätä tutkimusta on tähän mennessä raportoitu kahden artikkelin muodossa. Ensimmäinen käsitteli tulipesäolosuhteiden vaikutusta lipeäsuihkun ominaisuuksiin.

Artikkelissa vertailtiin tässäkin raportissa esitettyjä tuloksia suihkun nopeusmittauksista ja hajoamismekanismeista kammio- ja tulipesäympäristöissä. Toinen artikkeli käsitteli ei-pyöreiden ja pyöreiden partikkelien suhdetta eri ajotilanteissa. Molemmat artikkelit esitettiin 2001 International Chemical Recovery -konferenssissa Kanadassa. Ensimmäinen artikkeli hyväksyttiin myös julkaistavaksi Pulp and Paper Canada -lehdessä. Lisäksi tutkimustuloksia ja aineistoa on julkaistu TEKES:in teknologiaohjelma CODE:n raportoinnin muodossa.

Korkeakuiva-aineisen mustalipeän pisarakoon ja pisarakokojakauman määrittämisestä on valmistumassa väitöskirja lähitulevaisuudessa. Tutkimusta raportoidaan lisäksi lehtiartikkelien muodossa lähivuosina.

LÄHDELUETTELO

1. Kankkunen, A., Miikkulainen, P. and Järvinen, M. The Ratio of Ligaments and Droplets of Black Liquor Sprays, International Chemical Recovery Conference, Chateau Whistler Resort, Whistler, BC, Canada, 11-14 June 2001.
2. Hupa, M. ja Hyöty, P. Mustalipeän poltto ja soodakattila. Teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J., Hupa, M. Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation (IFRF) Suomen kansallinen osasto. Teknillisten Tieteiden Akatemia (TTA). Jyväskylä. 1995.629 s.
3. Adams T. N., Frederick, W. J., Grace, T. M., Hupa, M., Iisa, K., Jones, A. K., Tran, H. Kraft Recovery Boilers. TAPPI Press. Atlanta. USA. 1997. 381 s.
4. Holmlund, K., Parviainen K. Evaporation of black liquor. Teoksessa: Johan Gullichsen and Carl-Johan Fogelholm. Papermaking Science and Technology, Chemical Pulping, osa 6B. Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI. Jyväskylä. 2000. 497 s.
5. Miikkulainen, P., Kankkunen, A., Järvinen, M. and Fogelholm, C.-J. Experimental and Numerical Research on Firing and Combustion Behavior of Black Liquor, CODE Yearbook 2001, pp.27-42.
6. Miikkulainen, P., Järvinen, M. and Kankkunen A. Black Liquor Spray Properties in Operating Recovery Boiler Furnaces, INFUB 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto – Portugal, 11-14 April 2000.
7. Miikkulainen, P., Kankkunen, A. and Järvinen, M. The Effect of Furnace Environment on Black Liquor Spray Properties, International Chemical Recovery Conference, Chateau Whistler Resort, Whistler, BC, Canada, 11-14 June 2001.
8. Kankkunen, A., Black liquor droplet formation on a splashplate nozzle, Licentiate's thesis, Helsinki University of Technology. 1995. 103 p.
9. Kankkunen, A. , Flow Regimes inside a Black Liquor Splashplate Nozzle, ILASS-Europe'98, Manchester 6-8 July 1998. p. 412-417.
10. Kankkunen, A., Miikkulainen, P., Järvinen, M., Drop Formation of Black Liquor Sprays, Toim. Matinlinna, J.; Hupa, M., LIEKKI 2 Technical Review 1993-1998. p. 875-906.

LIITE 1 LIPEÄNÄYTTEIDEN KUIVA-AINEPITOISUUDET



504322

Menetelmät Kuiva-ainepitoisuus määritettiin 105 °C:ssa menetelmällä SCAN-N 22:77. Hiili-, vety- ja typpipitoisuus analysoitiin polttamalla näyte puhtaassa hapessa ja määrittämällä palamiskaasujen hiili- ja vetypitoisuus IR-ilmaisimella sekä typpipitoisuus lämmönjohtokykyilmaisimella (LECO CHN-600). Natrium ja kalium määritettiin laimentamisen jälkeen liekkiatomiabsorptiospektrofotometrisesti (FAAS). Kokonaisrikkipitoisuus määritettiin menetelmän SCAN-N 35:96 mukaisesti ja kloori ns. AOX-laitteistolla. Sulfaattipitoisuus määritettiin menetelmällä KCL 71:81, karbonaatti menetelmällä SCAN-N 32:98 ja epäorgaanisen ja orgaanisen aineen suhde menetelmällä KCL 61:83. Kalorimetrinen lämpöarvon määrittämisessä käytettiin automaattista kalorimetria. Tehollisen lämpöarvon laskemisessa on tehty rikki- ja vetykorjaukset.

Tulokset Kaikista näytteistä määritettiin kuiva aine

Näyte	Kuiva-aine, %	Näyte	Kuiva-aine, %
A	75,3	H	75,8
B1	76,8	I	76,0
C	76,1	J	77,0
D	76,3	K	74,7
E	76,1	L	76,9
F1	75,8	M	76,8
G	76,5	N	78,5

LIITE 2 MUSTALIPEÄN ALKUAINESANALYYSI



21.12.2000

504322

Näytteestä F1 tehtiin lisäksi alkuaine- ja lämpöarvoanalyysit, joiden tulokset ovat seuraavat:

Kuiva aine		%	75,8
Kuiva-aineen			
tuhka		%	55,7
hiili	C	% ^{*)}	31,6
vety	H	% ^{*)}	3,4
typpi	N	% ^{*)}	0,1
natrium	Na	%	20,9
kalium	K	%	2,1
rikki	S	%	6,6
kloori	Cl	%	0,2
karbonaatti	CO ₃ ⁻	%	4,8
sulfaatti	SO ₄ ⁻	%	6,0
epäorg./org. suhde			0,63
Kuiva-aineen			
kalorimetrinen lämpöarvo	MJ/kg		13,00
tehollinen lämpöarvo	MJ/kg		10,19
Näytteen tehollinen lämpöarvo	MJ/kg		7,14

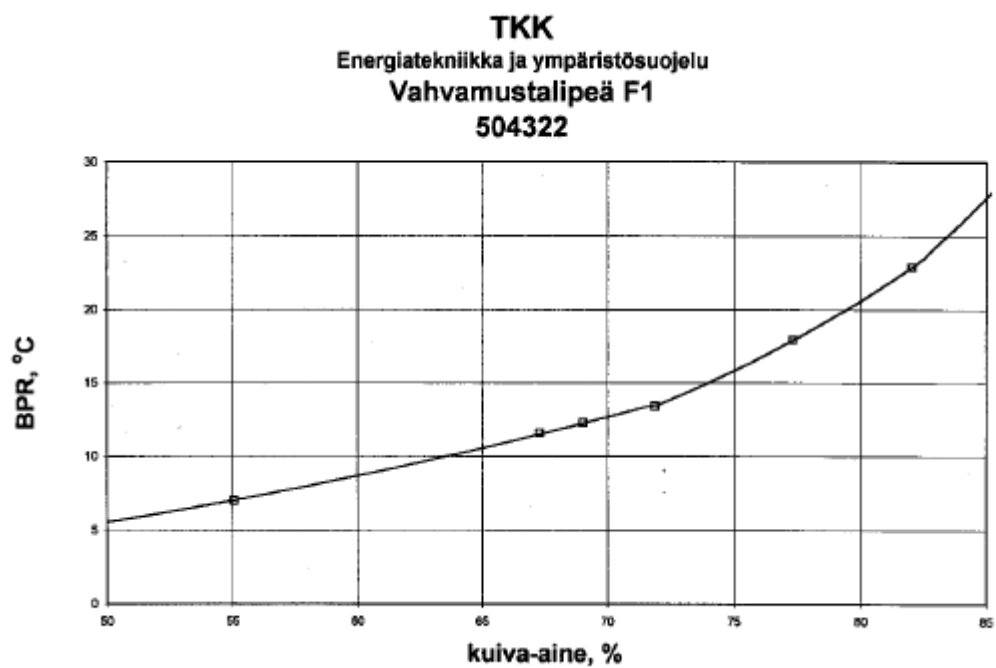
^{*)} määritetty VTT:llä

Näytteen F1 kiehumispisteen nousu kuiva-aineen funktiona (BPR-käyrä) sekä viskositeettikäyrät lämpötiloissa 110 °C, 135 °C ja 160 °C, on esitetty liitteissä. Lisäksi kiehumispistemäärityksen sekä viskositeettimittausten mitatut ja lasketut pisteet on esitetty liitteinä olevissa taulukoissa.

Oy Keskuslaboratorio-Centrallaboratorium Ab
KCL Services, epäorgaaninen analytiikka


Jorma Torniainen
ryhmäpäällikkö

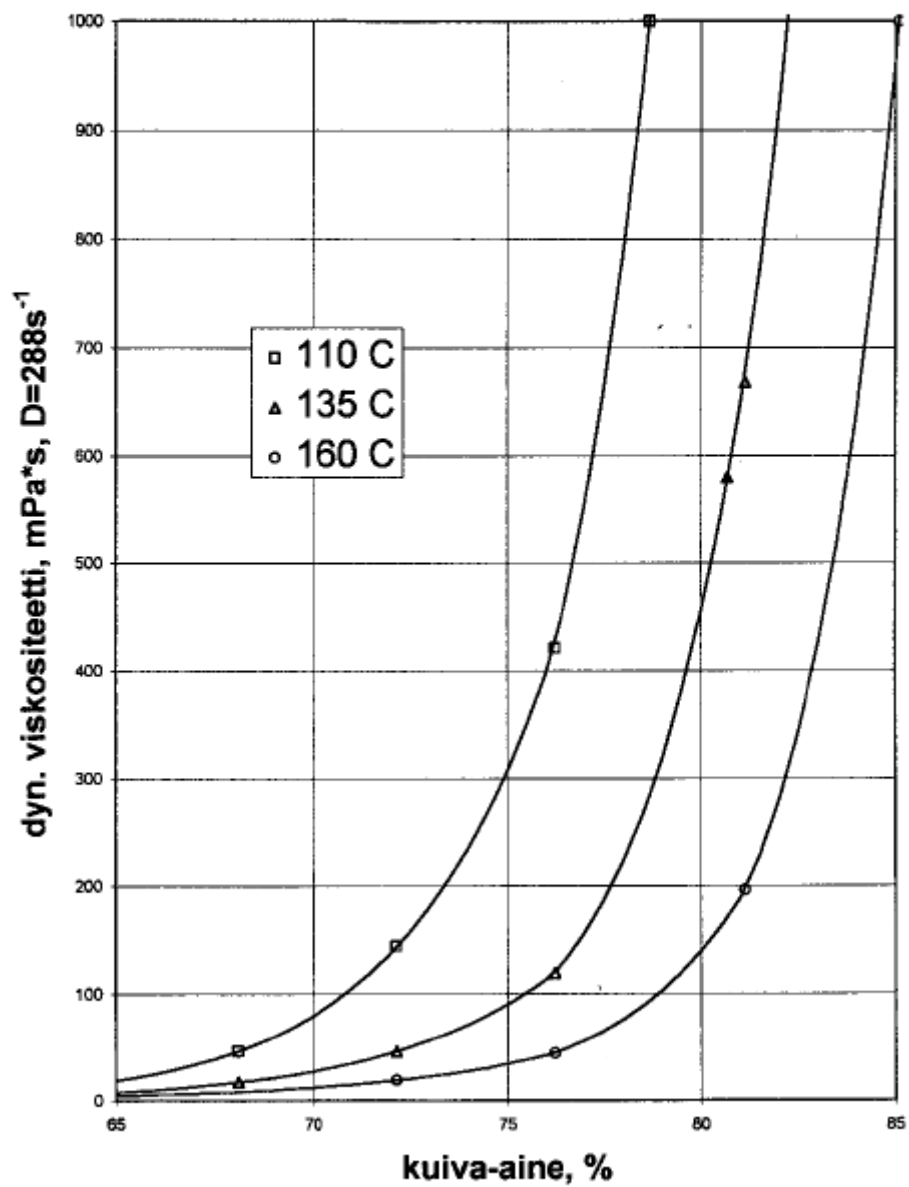
LIITE 3 MUSTALIPEÄN KIEHUMISPISTEEN NOUSU (BPR)



LIITE 4 MUSTALIPEÄN DYNAAMINEN VISKOSITEETTI



TKK/Energiat.ja ympärist.suojelu Näyte F 504322



11.12.00 JHM,VAK