

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
KONETEKNIIKAN OSASTO

Karel Nieminen

**KOKEELLINEN TUTKIMUS
MUSTALIFEÄLUSIKKASUUTTIMEN TOIMINNASTA**
(EXPERIMENTS ON BLACK LIQUOR SPLASHPLATE NOZZLE
PERFORMANCE)

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkittiin kuristetun mustalipeälusikkasuuttimen toimintaa. Sarja tehdasmittakaavakokeita suoritettiin muuttamalla massavirtaa vakio-ämpötilassa. Kokeet tehtiin aidolla mustalipeällä sumutuskammiossa, joka sijaitsi soodakattilan vieressä. Lipeäkalvon rikkoutumistapahtuma videoitiin analysointia varten. Massavirranjakautuminen mitattiin kerääjällä. Suuttimen tuottamat lipeäpisarat videoitiin ja mitattiin videokuva-analysointitekniikan avulla.

Tehdasmittakaavakokeet toistettiin myöhemmin pienoismallilla laboratorio-olosuhteissa, jotka mahdollistivat nestekalvon rikkoutumistapahtuman tutkimisen perinpohjaisesti. Pienoismallikokeet tehtiin käyttämällä veden ja glyserolin liuosta sekä lusikkasuutinta, joka oli kooltaan noin kymmenesosa täydenkoon suuttimesta. Koko nestekalvo ja lusikan lähiympäristö videoitiin. Videokuvauslaitteisto (kamera ja objektiivi) eivät kuitenkaan pystyneet havaitsemaan erittäin ohutta ja läpinäkyvää nestekalvoa. Massavirranjakautuminen mitattiin keräyslaitteella 2.5° askelin lusikan keskilinjalta. Pisarakoot mitattiin eri kalvokulmista Malvern-hiukkaskokoanalysaattorilla ja vaihe-Doppler-anemometrillä (Aerometrics). Mallintaminen perustui dimensioanalyysiin.

Tavoitteena oli verrata näitä kahta koejärjestelyä ja saada selville, jos pienoismallikokeita voidaan käyttää täydelle koolle ominaisen ruiskutuksen ennustamiseen. Tavoitteena oli myös testata mitattuja mustalipeäpisarakokoja kirjallisuudesta saatujen pisarakokokorrelaatioiden kanssa.

Massavirranjakautumismittaukset kulman funktiona lusikan keskilinjalta olivat pienoismallissa mittavammat kuin tehdasmittakaavassa. Todettiin, että pienoismallituloksia voidaan käyttää mustalipeän massavirranjakautumisen tendenssin ennustamiseen. Suuttimen kuristus, pienen lusikkakulman myötävaikutuksella, ohjaa valtaosan massavirrasta lusikan keskilinjalle. Suhteellinen massaosuus lusikan keskilinjan läheisyydessä kasvaa kasvavan massavirran funktiona. Samanaikaisesti suihkun leveys kasvaa mutta suhteellinen massaosuus pienenee kohti kalvon reunoja.

Mustalipeäpisarakoko (lusikan keskilinjalla) oli melkein vakio massavirrasta riippumatta. Pienoismallitiedot ja pisarakokokorrelaatiot kuitenkin osoittavat, että pisarakoko pienenee kasvavan massavirran funktiona. Tämän eroavaisuuden syy ei ole täysin tiedossa. Mahdollinen selitys vakio lipeäpisarakoolle on se että lipeäkalvon pituus kasvoi kun massavirta pieneni. Tämän seurauksena kalvonpaksuus rikkoutumiskohdassa pysyi massavirrasta riippumatta lähes vakiona. Sekä pienoismalli- että tehdasmittakaavakokeet viittaavat siihen, että tietty kalvonpaksuus rikkoutumiskohdassa tuottaa samaa kokoluokkaa olevia pisaroita.

Tässä työssä esitetyt tulokset rohkaisevat pienoismallien kehittämistä uusien mustalipeäsuuttimien testauksessa ennen kuin siirrytään täydenkoon olosuhteisiin.

ALKUSANAT

Tämä työ on lyhennelmä opinnäytetyöstä Experiments on Black Liquor Splashplate Nozzle Performance (Nieminen, 1996), joka tehtiin LIEKKI 2 ohjelmaan kuuluvan TkL Ari Kankkusen johtamassa Mustalipeän pisaroituminen-projektissa. Työn valvojana toimi professori Carl-Johan Fogelholm ja ohjaajana TkL Tomi Helpiö.

Taloudellisen perustan ja tieteellistä asiantuntemusta työlle ovat antaneet Kauppa- ja teollisuusministeriö, TEKES, A. Ahlström Oy, Tampella Power Oy ja Soodakattilayhdistys ry. Lipeän ja tilat tarjosivat projektin käyttöön Sunila Oy. Kaikkia edellämainittuja tahoja tahdon osaltani kiittää.

Otaniemessä 1.3.1996



Karel Nieminen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ALKUSANAT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
KÄYTETYT MERKINNÄT	6
1 JOHDANTO.....	8
2 TEHDASKOKEIDEN MALLINTAMINEN.....	8
2.1 Dimensioanalyysi.....	8
3 KOEJÄRJESTELYT.....	10
3.1 Koelaitteistot.....	11
3.1.1 Lusikkasuutin.....	11
3.1.2 Sumutuskammio ja ruiskutuslinja	12
3.1.2.1 Tehdaskokeet	12
3.1.2.2 Pienoismallikokeet.....	14
3.2 Mittalaitteistot.....	14
3.2.1 Tehdaskokeet.....	14
3.2.1.1 Kuva-analyysilaitteisto (VIA).....	14
3.2.2 Pienoismallikokeet.....	15
3.2.2.1 Kuva-analyysilaitteisto (VIA).....	15
3.2.2.2 Malvern 2600 hiukkaskokoanalysaattori	15
3.2.2.3 Aerometrics (PDPA).....	15
4 KOKEIDEN TULOKSET	15
4.1.1 Yleiset huomiot.....	15
4.1.2 Mustalipeäkalvon pituus.....	18
4.1.3 Massavirranjakautuminen.....	19
4.1.4 Mustalipeäkalvon nopeus	20
4.1.5 Mustalipeäkalvon paksuus rikkoutumiskohdassa.....	21
4.1.6 Täydenkoon suuttimen pisarakoko	22
4.2 Tehdas- ja pienosmallikoetulosten vertailu	23
4.2.1 Rajat ja rajaukset	23
4.2.2 Dimensiottomien tekijöiden käyttö tuloksien vertailussa.....	24
4.3 Kirjallisuudessa esiintyvät pisarakokokorrelaatiot	27
4.3.1 Pisarakokokorrelaatiot	27
4.3.2 Pisarakokokorrelaatioiden testaus	29
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	31

6 TULOSSIEN HYÖDYNTÄMINEN SOODAKATTILA- OLOSUHTTEISSA.....	32
 LÄHDELUETTELO	 34
 LIITE 1	 35
LIITE 2	36
LIITE 3	37

KÄYTETYT MERKINNÄT

Symboli	Yksikkö	Määritelmä
A	-	vakiokerroin kaavassa 8
B	-	vakiokerroin kaavassa 10
C	-	vakiokerroin kaavassa 10
C_D	-	ulosvirtauskerroin
D	m	halkaisija
FN	m^2	virtausluku
h	m	nestekalvon paksuus
MMD	m	massakeskihalkaisija
m	kg	massa
p	bar	paine
Δp	bar	paine-ero
r	m	kalvon rikkoutumispituus
SMD	m	Sauter-keskihalkaisija
u	m/s	nopeus
v	m/s	putkivirtauksen nopeus
x	m	pisaran halkaisija
η	Pa·s	viskositeetti
ρ	kg/m^3	tiheys
σ	N/m	pintajännitys
ν	m^2/s	kinemaattinen viskositeetti

Yläindeksit

*	dimensioton
'	pienoismalli

Alaindeksit

a	ilma
avg	keskimääräinen
c	kerääjä
D	halkaisija
g	kaasu
l	neste
max	maksimi
mean	keski-
n	suutin
r	kalvon rikkoutumispituus
s	kalvo
v	nopeus

w	vesi
η	viskositeetti
ρ	tiheys
0	lusikalla

Dimensiottomat ryhmät

$$Eu = \frac{p_w}{u^2 \cdot \rho_l} \quad \text{Eulerin luku}$$

$$Re = \frac{D_n \cdot \rho_l \cdot v_{avg}}{\eta_l} \quad \text{Reynoldsin luku}$$

$$We = \frac{D_n \cdot v_{avg}^2 \cdot \rho_l}{\sigma_l} \quad \text{Weberin luku}$$

$$\rho^* = \frac{\rho_g}{\rho_l} \quad \text{dimensioton tiheys}$$

$$\eta^* = \frac{\eta_g}{\eta_l} \quad \text{dimensioton viskositeetti}$$

$$MMD^* = \frac{MMD}{D_n} \quad \text{dimensioton massakeskihalkaisija}$$

$$h^* = \frac{h_r}{D_n} \quad \text{dimensioton nestekalvon paksuus}$$

1 JOHDANTO

Mustalipeä on selluloosateollisuudessa syntyvä jäteliemi. Mustalipeän poltolla soodakattiloissa saavutetaan kaksi tärkeintä päämäärää: ensimmäinen ja samalla tärkein on epäorgaanisten keittokemikaalien talteenotto, toinen päämäärä on käyttää hyväksi orgaanisen aineksen sisältämä kemiallinen energia, jolla kehitetään höyryä.

Mustalipeän ruiskutuksella on tärkeä osuus kattilan toiminnan optimoinnissa. Liian pienet pisarat tempautuvat savukaasujen mukana tulistinpinoille. Liian suuret pisarat puolestaan eivät ehdi kuivua ennenkuin ne tippuvat kecoon, jonka seurauksena keon lämpötila laskee ja pahimmassa tapauksessa johtaa keon sammumiseen. Lipeäpisaroiden kokoon vaikuttavat pääparametrit ovat suuttimen geometria, kattilan toiminta ja mustalipeän fysikaaliset ominaisuudet.

Sarja kokeita suoritettiin täydenkoon mustalipeäalusikkasuuttimella touko-kesäkuussa 1995 Sunila Oy:n sellutehtaalla kattilahallissa SK 11. Kokeet suoritettiin sumutuskammiossa, joka sijaitsi soodakattilan vieressä. Kiinnostuksen kohteena oli tutkia lipeäkalvon rikkoutumismekanismeja kuten myös syntyvää pisarakokoa vakio­lämpötilassa, joka oli alle lipeän kiehumispisteen. Kokeissa käytettiin kaikenkaikkiaan kolmea eri massavirtaa. Tehdaskokeet toistettiin myöhemmin pienoismallia hyväksikäyttäen laboratorio-olosuhteissa, jotka mahdollistivat kalvon rikkoutumistapahtuman perinpohjaisen tutkimisen. Pienoismallikokeet suoritettiin Teknillisessä Korkeakoulussa Energiatekniikan ja Ympäristönsuojelun Laboratoriossa. Pienoismallikokeet kestivät elokuusta lokakuuhun 1995.

Tämän työn tavoitteena oli verrata näitä kahta koejärjestelyä ja saada selville, jos pienoismallikokeita voidaan käyttää täydelle koolle ominaisen ruiskutuksen ennustamiseen. Tavoitteena oli myös testata mitattuja mustalipeäpisarakokoja kirjallisuudesta saatujen pisarakokokorrelaatioiden kanssa.

Tämä työ on lyhennelmä opinnäytteestä Experiments on Black Liquor Splashplate Nozzle Performance (Nieminen, 1996). Lyhennelmään on lisätty ylimääräinen kohta 6, jossa pohditaan koetulosten hyödynnettävyyttä soodakattilaolosuhteissa.

2 TEHDASKOKEIDEN MALLINTAMINEN

2.1 Dimensioanalyysi

Dimensioanalyysin mukaan on seitsemän itsenäistä muuttujaa, jotka vaikuttavat pisarakokoon. Nämä muuttujat ovat suuttimen halkaisija, keskimääräinen putkivirtaus, nesteen tiheys ja viskositeetti sekä ympäröivän kaasun tiheys ja viskositeetti. Nämä muuttujat koostuvat kolmesta perusdimensiosta: massa, pituus

ja aika. Voidaan siis muodostaa $7-3=4$ riippumatonta dimensiota muuttujaa (Giffen ja Muraszew, 1953). Mielekkäimmät muuttujat ovat Reynoldsin luku, Weberin luku, tiheyksien suhde ja viskositeettien suhde.

Dimensiottomat muuttujat ovat

$$Re = \frac{D_n \cdot \rho_l \cdot v_{avg}}{\eta_l} \quad (1)$$

$$We = \frac{D_n \cdot v_{avg}^2 \cdot \rho_l}{\sigma_l} \quad (2)$$

$$\rho^* = \frac{\rho_g}{\rho_l} \quad (3)$$

$$\eta^* = \frac{\eta_g}{\eta_l} \quad (4)$$

Tehdaskokeiden mallinnuksessa on tavoitteena saada dimensiottomat muuttujat samoiksi.

Niinpä, saadaan neljä yhtälöä

$$Re' = Re \quad (5)$$

$$We' = We \quad (6)$$

$$\rho^{*'} = \rho^* \quad (7)$$

$$\eta^{*'} = \eta^* \quad (8)$$

Yläindeksi (') viittaa pienoismalliin.

Tehdaskokeissa esiintyneiden dimensiottomien muuttujien todellisten arvojen kokoluokat sekä joitakin muita ruiskutusparametrejä (huomaa, että dm/dt vastaa massavirtaa ja p vastaa painetta) on esitetty Taulukossa 1. Mustalipeän pintajännitykseksi oletettiin 0.050 N/m. Taulukossa 1 olevien dimensiottomien tekijöiden arvoja ei täysin saavutettu. Tämä johtui pääosin siitä, että vesi-glyserolin tiheys ($\rho_l = 1180 \text{ kg/m}^3$) ja pintajännitys ($\sigma_l = 0.065 \text{ N/m}$) erosivat hieman mustalipeän vastaavista arvoista. Pienoismallikokeissa esiintyneiden dimensiottomien muuttujien todellisten arvojen kokoluokat sekä muut ruiskutusparametrit on esitetty Taulukossa 2.

Taulukko 1 Tehdaskokeissa käytettyjen dimensiottomien muuttujien ja ruiskutusparametrien todellisten arvojen suuruusluokat

dm/dt	p	T	ρ_l	η_l	v_{avg}	Re	We	Oh
(kg/min)	(bar)	(°C)	(kg/m ³)	(Pa·s)	(m/s)	()	()	()
192.65	0.58	112.0	1387	0.057	6.32	3321	23921	0.047
194.96	0.56	112.0	1385	0.058	6.40	3279	24533	0.048
267.24	1.11	113.0	1384	0.058	8.78	4536	46099	0.047
270.68	1.23	113.0	1384	0.050	8.90	5344	47309	0.041
346.50	1.93	112.0	1389	0.059	11.35	5789	77268	0.048
354.86	2.03	113.0	1383	0.050	11.67	7012	81369	0.041

Taulukko 2 Pienoisallikokeissa käytettyjen dimensiottomien muuttujien ja ruiskutusparametrien todellisten arvojen suuruusluokat

(dm/dt)'	p'	T'	ρ'_l	η'_l	v'_{avg}	Re	We	Oh
(kg/min)	(bar)	(°C)	(kg/m ³)	(Pa·s)	(m/s)	()	()	()
6.10	9.01	20.00	1180	0.018	21.67	3196	19179	0.043
6.30	9.65	20.00	1180	0.018	22.38	3301	20458	0.043
9.10	19.93	20.00	1180	0.018	32.33	4768	42683	0.043
9.30	21.02	20.00	1180	0.018	33.04	4873	44580	0.043
12.10	34.09	20.00	1180	0.018	42.98	6340	75465	0.043
12.30	34.98	20.00	1180	0.018	43.69	6445	77980	0.043

Tulokset esitetään myöhemmin massavirtojen avulla. Tehdaskokeita edustavat massavirrat 195, 270 ja 355 kg/min, sekä pienoisallikokeita vastaavasti 6.2, 9.2 ja 12.2 kg/min. Näinollen tehdas- ja pienoisallikokeiden dimensiottomien muuttujien arvot ovat samaa suuruusluokkaa.

3 KOEJÄRJESTELYT

Tehdaskokeissa käytettiin aitoa mustalipeää. Lipeän keskimääräiset fysikaaliset ominaisuudet on koottu Taulukkoon 3. Lipeän lämpötila mitattiin anturilla juuri ennen suutinta. Kuiva-ainepitoisuus, viskositeetti ja kiehumapisteen nousu (BPR) mitattiin jälkikäteen Keskuslaboratorion (KCL) toimesta; viskositeetti ja BPR käyrät kuiva-ainepitoisuuden funktiona ovat Liitteissä 1 ja 2. Lipeän tiheys mitattiin on-line mittauksena massavirtamittarin (Schlumberger 2'') avulla.

Taulukko 3 Tehdaskokeissa käytetyn mustalipeän keskimääräiset fysikaaliset ominaisuudet

Lämpötila	Kuiva-ainep.	Viskositeetti	BPR	Tiheys
113°C	67.2 %	56 mPa·s	14.2°C	1385 kg/m ³

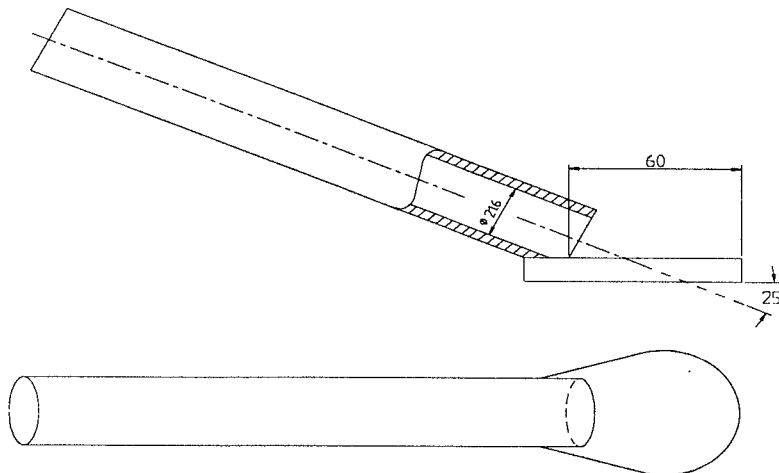
Pienoismallikoejärjestelyiden tavoitteena oli tarjota koeympäristö, jossa tehdaskokeissa suoritettut mittaukset voitaisiin mallintaa ja tutkia perinpohjaisesti. Pienoismallikokeissa käytettiin veden ja glyserolin seosta, jonka fysikaaliset ominaisuudet huoneenlämpötilassa olivat seuraavat: tiheys = 1180 kg/m³, viskositeetti = 18 mPa·s ja pintajännitys = 0.065 N/m.

3.1 Koelaitteistot

3.1.1 Lusikkasuutin

Kuvassa 1 on esitetty tehdaskokeissa käytetty täydenkoon lusikkasuutin. Suuttimen ulostuloaukko oli kuristettu ja lusikkakulma oli 25°. Suuttimen halkaisija oli 21.6 mm; suuttimen halkaisijaksi on määritetty suuttimen sisähalkaisija ennen kuristusta. Myöhemmin täydenkoon suuttimesta käytetään nimitystä B22. Suuttimelle ominainen massavirta paineen funktiona karakteristika on Liitteessä 3.

Pienoismallikokeissa käytettiin lusikkasuutinta, joka oli muodoltaan samanlainen kuin täydenkoon suutin B22. Pienoismallisuutin, josta myöhemmin käytetään nimitystä A2, oli halkaisijaltaan 2.25 mm.



Kuva 1 Lusikkasuutin B22

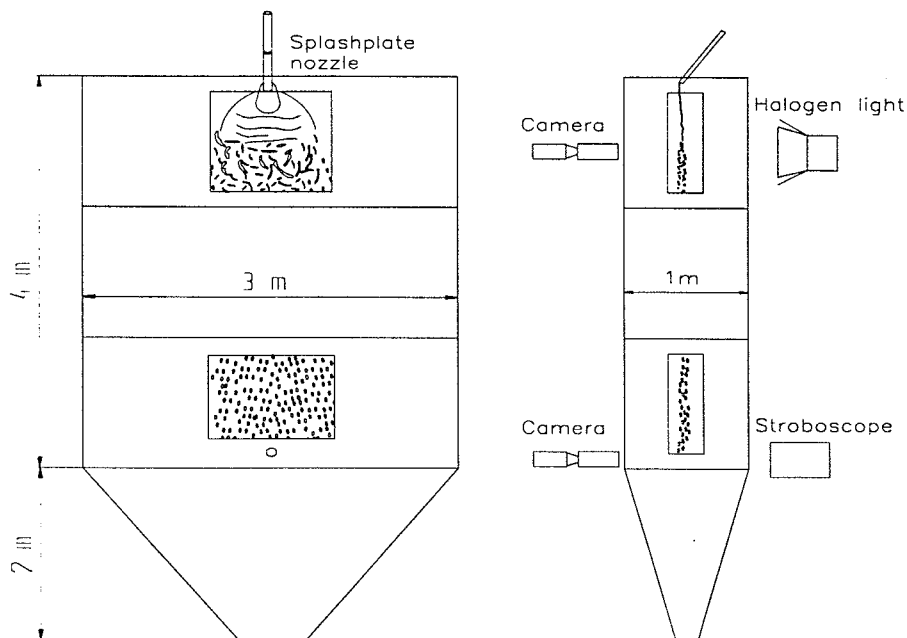
3.1.2 Sumutuskammio ja ruiskutuslinja

3.1.2.1 Tehdaskokeet

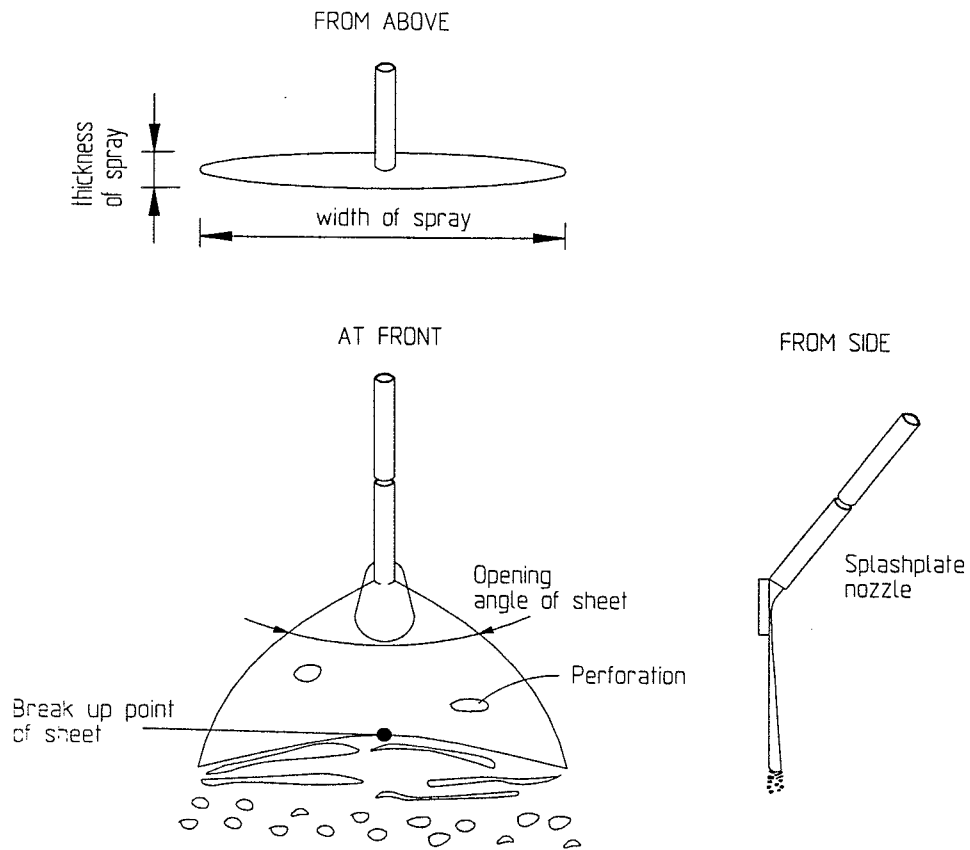
Tehdaskokeita varten rakennettiin erityinen sumutuskammio (pohjapinta-ala 1 m x 3 m ja korkeus 6 m), joka on esitetty Kuvassa 2. Sumutuskammio, jossa kaikki tehdaskokeet suoritettiin, sijaitsi soodakattilan vieressä. Kokeissa käytettiin aitoa tehdaslipeää, joka tuli päälipeälinjasta erillistä ruiskutuslinjaa pitkin. Koko linjan pituus oli noin 40 m. Mustalipeää lämmitettiin höyryllä ennen ruiskuttamista tukkeutumisen välttämiseksi. Lipeälinjan yhteyteen saman lämpöeristyksen sisälle oli asennettu höyrylinja, jonka avulla lipeälinja pidettiin lämpimänä silloin kun linjassa ei ollut virtausta. Mustalipeän lämpötilaa voitiin vaihdella sekoittamalla lipeään korkeapaineista höyryä. Jotta sekoitus oli täydellinen, niin höyryn lisäysventtiili sijaitsi noin viisitoista metriä ennen suuttimen suuaukkoa.

Mustalipeä ruiskutettiin pystysuoraan kammion yläosasta sijainneesta suuttimesta. Ruiskutettu lipeä johdettiin kammion pohjassa olleen ulosmenoputken kautta lattiakanaaleihin.

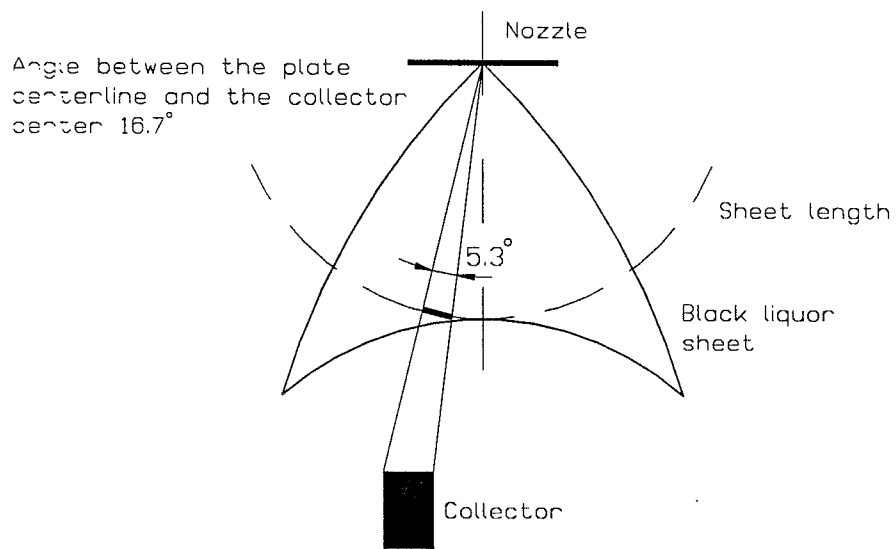
Näköyhteydet kammion sisälle oli järjestetty plexi-lasien avulla, jotka mahdollistivat lipeäkalvon videoinnin myöhempiä tutkimuksia varten. Lipeäkalvo on esitetty eri kuvakulmissa Kuvassa 3. Lipeän massavirranjakautuminen suoritettiin kerääjän avulla ja tämä koejärjestely on esitetty Kuvassa 4.



Kuva 2 Kaaviokuva tehdaskokeissa käytetystä sumutuskammioista



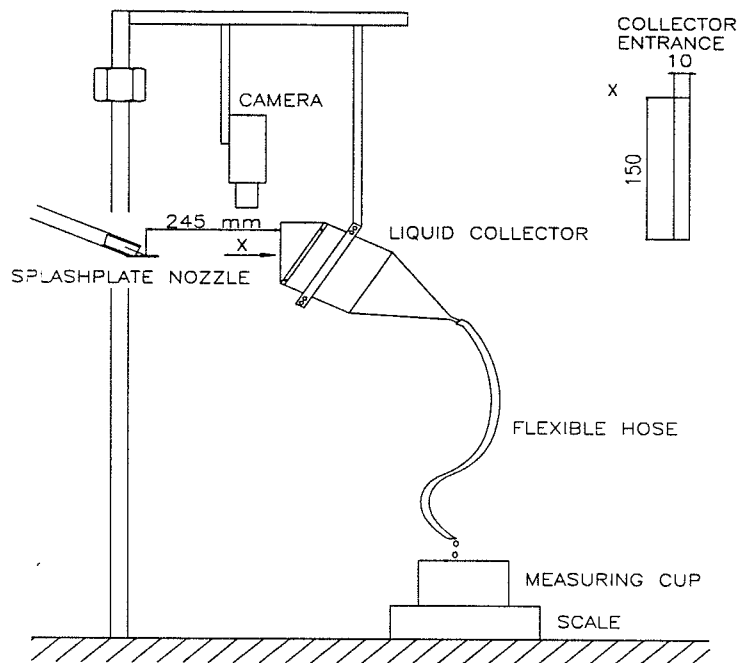
Kuva 3 Mustaliipeäkalvo eri kuvakulmista katsoen (Kankkunen, 1995)



Kuva 4 Tehdaskokeissa lipeän massavirranjakautumiseen käytetty koejärjestely

3.1.2.2 Pienoismallikokeet

Pienoismallikokeet suoritettiin kahdella eri koelaitteistolla. Valtaosa kokeista suoritettiin samanlaisessa sumutuskammiossa kuin tehtaalla (ainoastaan kammion dimensiot olivat pienemmät eli pohjapinta-ala 1 m x 2 m ja korkeus 3.5 m). Massavirranjakautumismittauksia varten rakennettiin erityinen keräyslaitteisto, joka on esitetty Kuvassa 5.



Kuva 5 Pienoismallikokeissa vesi-glyserolin massavirranjakautumiseen käytetty laitteisto

3.2 Mittalaitteistot

3.2.1 Tehdaskokeet

3.2.1.1 Kuva-analyysilaitteisto (VIA)

Kuva-analyysilaitteisto (Video Image Analysis equipment) koostuu videokamerasta, videonauhurista, kuva-analyysikortista sekä tietokoneeseen asennetusta kuva-analyysiohjelmasta. Kahta videonauhuriä käytettiin samanaikaiseksi tehdaskokeissa. Yksi laitteisto kuvasi lipeäkalvoa, josta mitattiin kalvon avautumiskulma, pituus, nopeus ja sen rikkoumismekanismit. Toinen laitteisto tallensi vuorostaan kymmenen minuutin pituisia jaksoja suuttimen tuottamista pisaroista, joista muun muassa määritettiin niiden lukumäärä ja tilavuus.

3.2.2 Pienoismallikokeet

3.2.2.1 Kuva-analyysilaitteisto (VIA)

Pienoismallikokeissa VIA laitteistoa käytettiin massavirranjakautumiskokeiden yhteydessä nestekalvon nopeuden mittaamiseen.

3.2.2.2 Malvern 2600 hiukkaskokoanalysaattori

Malvern hiukkaskokoanalysaattoria käytettiin ainoastaan sumutinkammiossa tehdyissä pienoismallikokeissa. Laitteella mitattiin pisaroiden kokoja ja kokojakaumia.

3.2.2.3 Aerometrics (PDPA)

Aerometrics, jota myöhemmin kutsutaan nimellä PDPA (Phase Doppler Particle Anemometer) käytettiin ainoastaan sumutinkammiossa tehdyissä pienoismallikokeissa. Laitteella mitattiin sekä pisaroiden kokoja ja jakaumia että kalvon nopeutta.

4 KOKEIDEN TULOKSET

Tässä osassa käsitellään ensiksi tärkeimpiä mustalipeällä tehtyjen kokeiden tuloksia. Tämän jälkeen tarkastellaan dimensiottomien tekijöiden hyväksikäyttöä, joiden avulla voidaan vertailla pienoismalli- ja tehdaskokeita keskenään. Lopuksi täydenkoon suuttimen tuottamia mustalipeäpysarakokoja vertaillaan myös kirjallisuudesta poimittujen pisarakokokorrelaatioiden kanssa.

4.1.1 Yleiset huomiot

Sekä mustalipeäkalvoa että kalvon rikkoutumismekanismeja tutkittiin niin kokeiden aikana Sunilassa kuin myöhemmin Otaniemessä videotallenteita hyväksikäyttäen. Seuraavassa on eritelty joukko havaintoja eri massavirtojen mukaan (Taulukko 4, ja Kuvat 6-11).

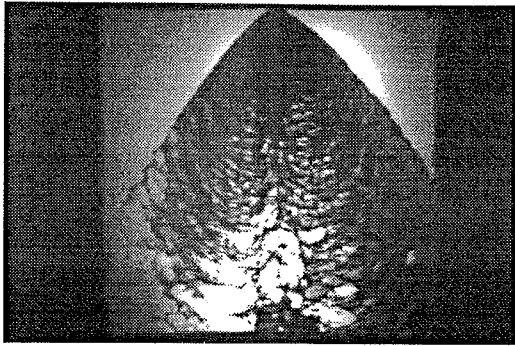
Kalvo oli hieman oikealle toispuolinen jokaisella massavirralla. Tämä johtui todennäköisesti suuttimen epätäydellisestä konstruktiosta. Kahdella pienimmällä massavirralla oli havaittavissa massavirran keskittyneisyyttä lusikan keskilinjalla; vastaavasti keskilinjan molemmilla puolilla massavirta huomattavasti väheni.

Pienimmällä massavirralla muodostui suurimmaksi osaksi pisaroita mutta riekaleiden määrä oli huomattavan suuri, vastaavasti kahden suurimman massavirran tapauksessa syntyi paljon pisaroita ja riekaleiden määrä jäi vähäiseksi.

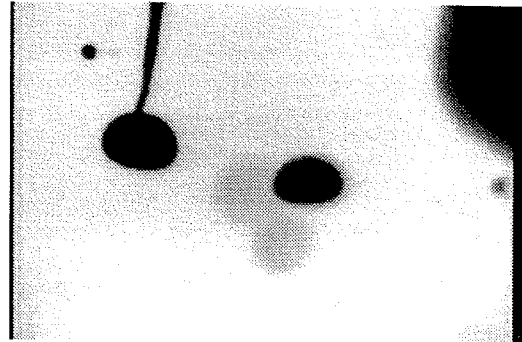
Taulukko 4 Havaittuja ja mitattuja lipeäsuihkun ominaisuuksia

Massavirta [kg/min]	Kalvon avautumis- kulma [°]	Rikkoutumisme- kanismi A/R	Pisarakoko [µm]
195	100	A ja R	3463 ja 2509
270	104	A ja R	3084
355	106	A ja R	3293

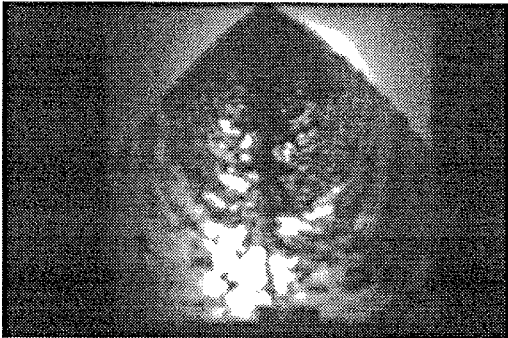
A = aallonmuodostus ja R = reikiintyminen



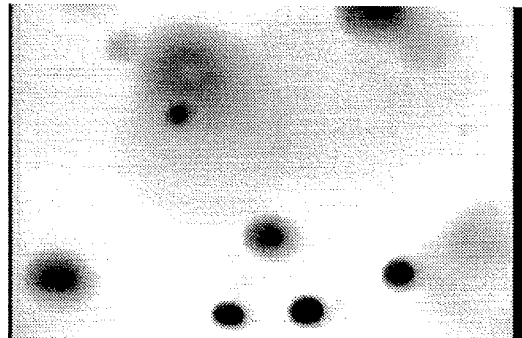
Kuva 6 Mustalipeäkalvo (kuvan koko 1080x770 mm); massavirta 195 kg/min, lämpötila 113°C. Suutin sijaitsee kuvan ylälaudassa keskellä.



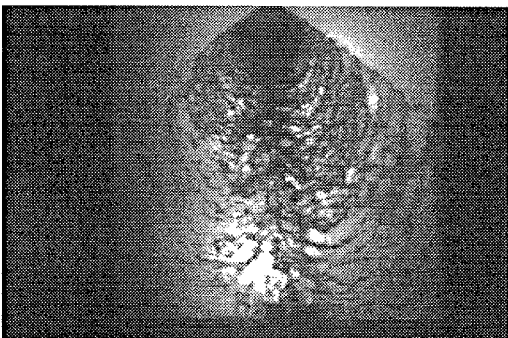
Kuva 7 Mustalipeäpisaroita (kuvan koko 26.86x19.55 mm); massavirta 195 kg/min, lämpötila 113°C



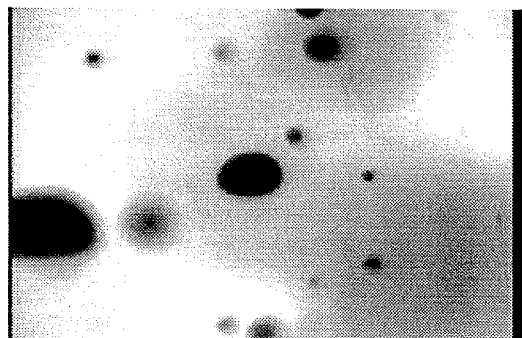
Kuva 8 Mustalipeäkalvo (kuvan koko 1080x770 mm); massavirta 270 kg/min, lämpötila 113°C. Suutin sijaitsee kuvan ylälaudassa keskellä.



Kuva 9 Mustalipeäpisaroita (kuvan koko 26.86x19.55 mm); massavirta 270 kg/min, lämpötila 113°C



Kuva 10 Mustalipeäkalvo (kuvan koko 1080x770 mm); massavirta 355 kg/min, lämpötila 113°C. Suutin sijaitsee kuvan ylälaudassa keskellä.

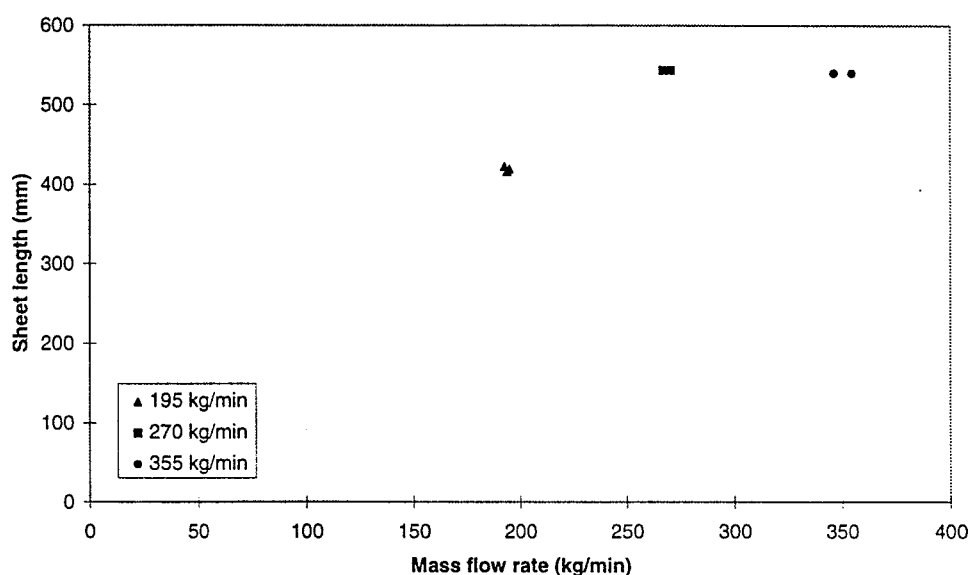


Kuva 11 Mustalipeäpisaroita (kuvan koko 26.86x19.55 mm); massavirta 355 kg/min, lämpötila 113°C

4.1.2 Mustalipeäkalvon pituus

Kalvon pituus mitattiin videokuvien avulla. Mustalipeäkalvon pituudeksi määritetään suurin etäisyys lusikan keskilinjalla, jossa kalvo viimeisen kerran liittyi muuhun kalvoon.

Kuten Kuvasta 12 nähdään, niin lipeäkalvon pituus kasvaa kun massavirta kasvaa. Kankkunen (1995) teki päinvastaisen havainnon. Kankkunen suoritti kokeita kuristamattomalla lusikkasuuttimella ($D_n = 15$ mm, lusikkakulma = 35°), joka antoi erilaisen massavirranjakautumiskuvion sekä suuremman kalvon avautumiskulman kuin B22. Tämä tulos viittaa siihen, että kalvon pituus on riippuvainen suuttimen rakenteesta.

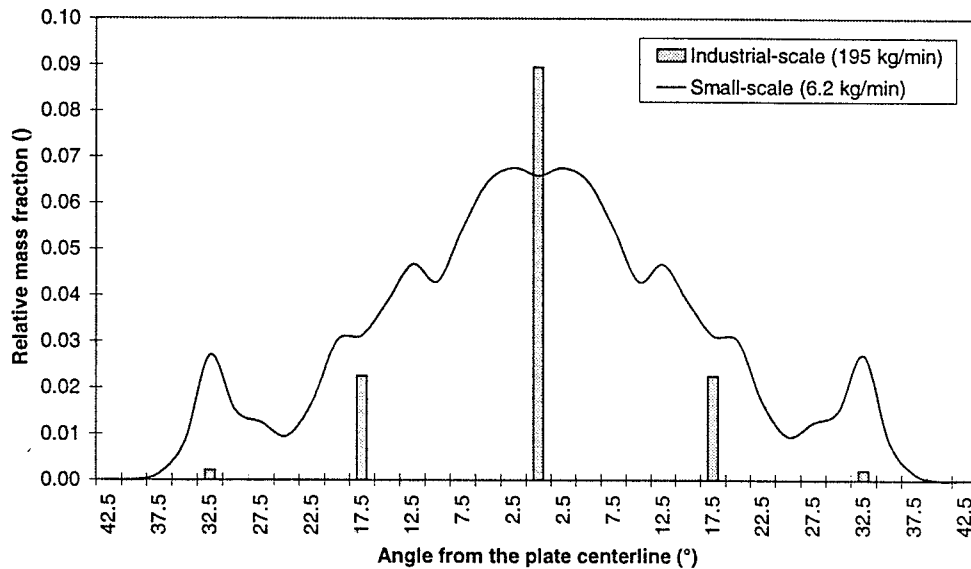


Kuva 12 Mustalipeäkalvon pituus massavirran funktiona; lusikan keskilinja (lämpötila 113°C)

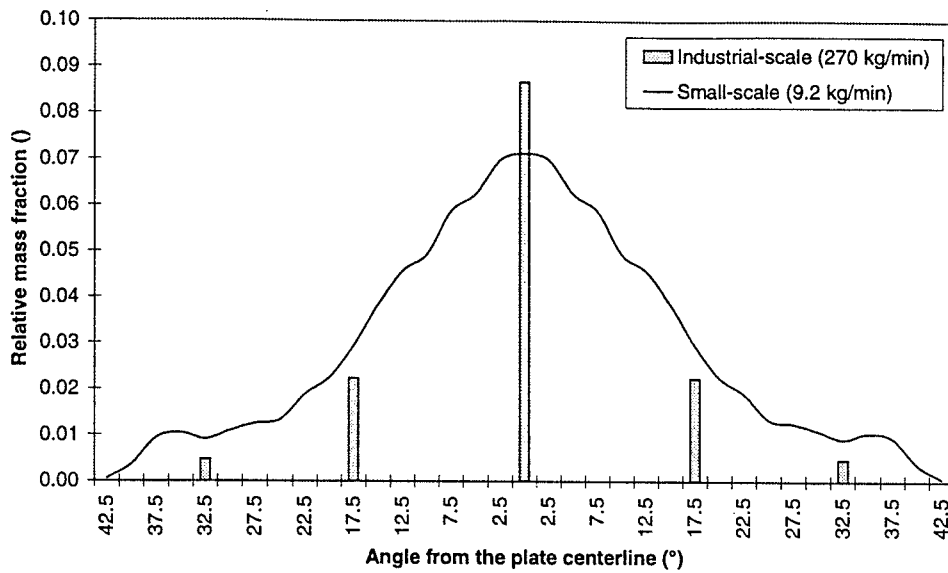
Pienoismallikokeissa käytetty videokuvauslaitteisto (kamera ja objektiivi) eivät kyenneet havaitsemaan erittäin ohutta ja läpinäkyvää nestekalvoa. Näinollen kalvon rikkoutumista ja kalvon pituutta ei pystytty tutkimaan pienoismallilla. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin oletettu, että nestekalvo oli olemassa ja sen pituudeksi arvioitiin noin kymmenesosa tehtaalla esiintyneiden kalvojen pituuksista. Niinpä laskelmissa sekä tekstissä olevan vesi-glyserolikalvon pituus on 50 mm.

4.1.3 Massavirranjakautuminen

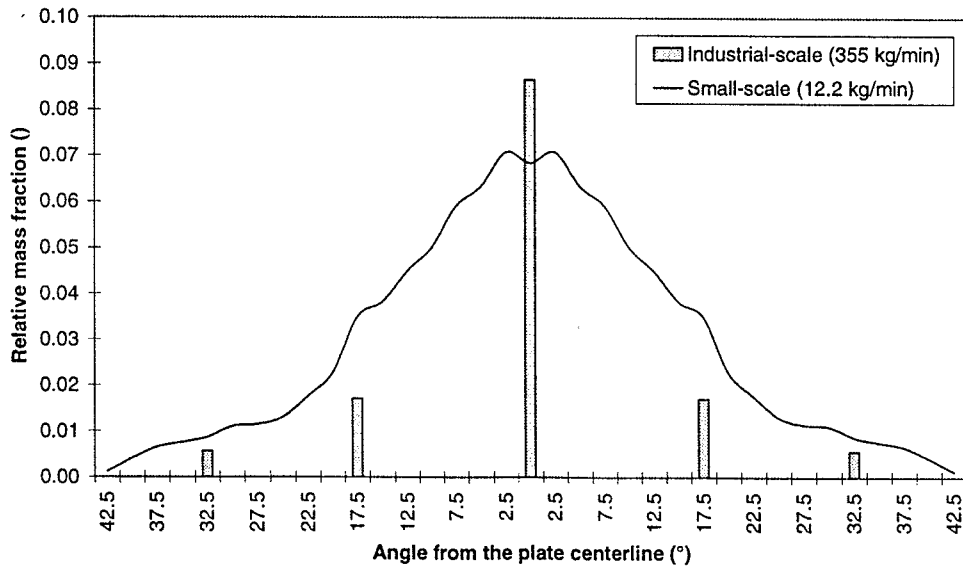
Kuvissa 13, 14 ja 15 on kuvattu suhteellinen massaosuus kalvokulman funktiona. Massavirranjakautuminen mitattiin niin tehdasmittakaavassa kuin pienoismallilla (Kuvat 4 ja 5). Laboratorio-olosuhteissa suoritettut pienoismallimittaukset suoritettiin 2.5° askelin lusikan keskilinjalta lähtien. Havaitaan, että lusikan keskilinjalla on noin 20% ero massavirranjakautumisessa mallien välillä. Tämä ero johtuu osaksi siitä, että mittaukset tehtiin vaakatasoon ruiskutetusta vesiglyseroli suihkusta kun taas mustalipeä ruiskutettiin kohtisuoraan.



Kuva 13 Suhteellinen massaosuus kalvokulman funktiona (6.2 ja 195 kg/min)



Kuva 14 Suhteellinen massaosuus kalvokulman funktiona (9.2 ja 270 kg/min)

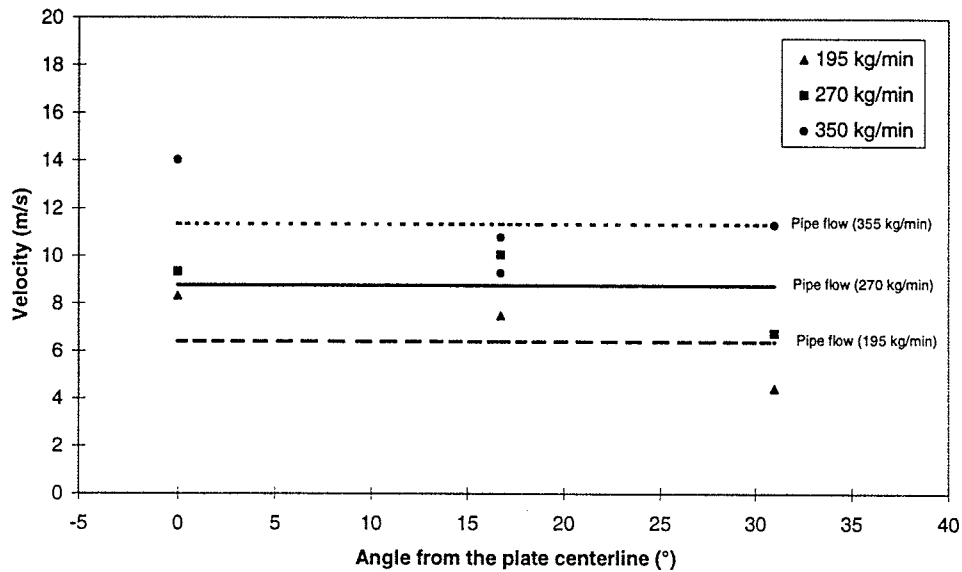


Kuva 15 Suhteellinen massaosuus kalvokulman funktiona (12.2 ja 355 kg/min)

4.1.4 Mustalipeäkalvon nopeus

Mustalipeäkalvon nopeus- ja paksuusmittaukset tehtiin samanaikaisesti Sunilassa. Kuten nähdään Kuvasta 16, lipeäkalvon nopeus kasvaa kun massavirta kasvaa.

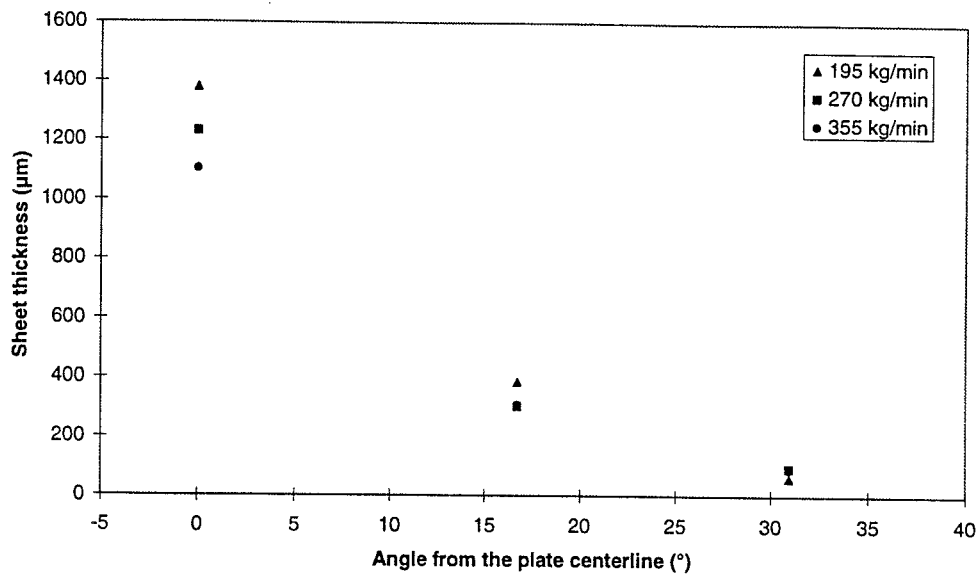
Suuttimen kuristus kiihdyttää nesteen nopeutta suuaukossa. Siten lusikan keskilinjalla, jonne myös suurin osa massavirrasta on jakautunut (kohta 4.1.3), esiintyy myös suurin kalvon nopeus. Vastaavasti kalvon laidoille mentäessä (pieni suhteellinen massaosuus) nopeus pienenee ja painuu alle putkivirtauksen.



Kuva 16 Mustalipeäkalvon nopeus kalvokulman funktiona (lämpötila 113°C)

4.1.5 Mustalipeäkalvon paksuus rikkoutumiskohdassa

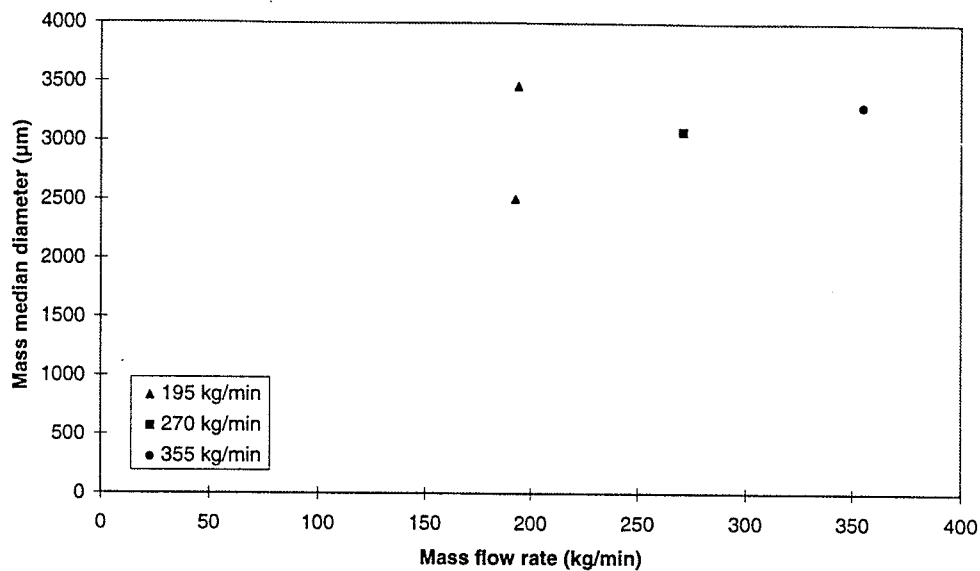
Lipeäkalvon paksuus rikkoutumiskohdassa määritettiin laskennallisesti massavirranjakautumis- ja kalvon nopeusmittauksien avulla. Kuvassa 17 on esitetty mustalipeäkalvon paksuus rikkoutumiskohdassa kalvokulman funktiona. Kuten Kuvista 13, 14 ja 15 huomataan niin suhteellinen massaosuus pienenee lipeäkalvon laidoille mentäessä. Vastaavasti kalvon paksuus pienenee kalvon laidoille mentäessä (Kuva 17).



Kuva 17 Mustalipeäkalvon paksuus (rikkoutumiskohdassa) kalvokulman funktiona (lämpötila 113°C)

4.1.6 Täydenkoon suuttimen pisarakoko

Mustalipeäpisarakoot mitattiin VIA tekniikalla neljä metriä lusikan alapuolelta. Mittaukset tehtiin ainoastaan lusikan keskilinjalta. Kuten jo aikaisemmin huomattiin Kuvista 7, 9 ja 11 niin lipeäsuihkussa ilmeni myös riekaleita ja ”nuijapäitä”. Kuten Kuvasta 17 nähdään, niin pisarakoko on melko vakio massavirrasta riippumatta. Ainoa arvo, joka eroaa muista massavirralla 195 kg/min mitattu toinen pisarakoko. Eroavaisuuden syy on yhden tai kahden pisaran puuttuminen suuremmista havaituista kokoluokista.



Kuva 18 Mustalipeäpisarakoko (MMD) massavirran funktiona (lämpötila 113°C)

4.2 Tehdas- ja pienoismallikoetulosten vertailu

4.2.1 Rajat ja rajaukset

Pienoismallikokeet suoritettiin huoneenlämpötilassa, joten lämpötilan vaikutus nesteeseen ja sen käyttäytymiseen kuten myös ympäröivään kaasuun täytyy sulkea tarkastelun ulkopuolelle. Tämän lisäksi mustalipeä on neste, jonka ominaisuudet vaihtelevat suuresti riippuen esimerkiksi tehtaasta, käytetystä puutavarasta sekä mukana olevista keittokemikaaleista. Vesi-glyseroli on taasen kemiallisesti homogeenista ja erittäin tunnettua liuosta.

Kummassakin koejärjestelyssä neste ruiskutettiin kammiassa kohtisuoraan. Niinpä gravitaatiolla on oma osuutensa erityisesti mustalipeäkalvon muotoon ja massavirranjakautumiseen. Pienoismallikokeissa massavirranjakautumisen mittaukset suoritettiin vaakatasoon ruiskutetusta suihkusta.

On myös muistettava, että pienoismallikokeissa ei havaittu nestekalvoa. Niinpä ei voida tehdä päätelmiä kalvon rikkoutumismekanismeista, jotka vaikuttavat pisaroitumistapahtumaan. Myöskään todellista kalvon pituutta ei voida varmuudella sanoa.

4.2.2 Dimensiottomien tekijöiden käyttö tuloksien vertailussa

Tehdasmittakaava ja pienoismallikokeita voidaan vertailla keskenään käyttämällä hyväksi dimensiottomia parametrejä. Massakeskihalkaisija ja nestekalvon paksuus saadaan dimensiottomiksi jakamalla ne suuttimen halkaisijalla.

Dimensioton massakeskihalkaisija MMD^* on

$$MMD^* = \frac{MMD}{D_n}$$

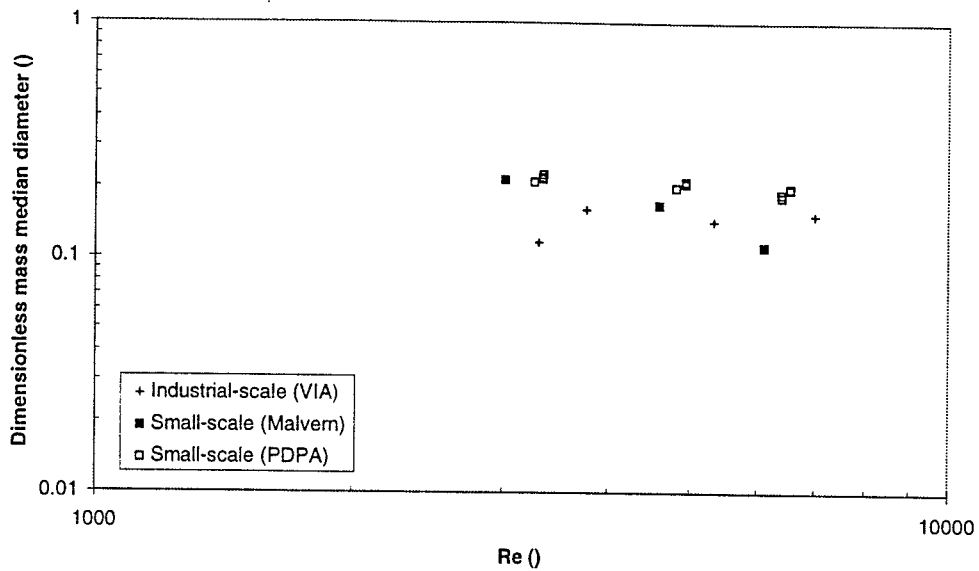
ja vastaavasti dimensioton kalvon paksuus h^* on

$$h^* = \frac{h_r}{D_n}$$

Muut dimensiottomat parametrit, Re , We , ρ^* ja η^* , määritettiin aikaisemmin kohdassa 3.1.

Dimensioton massakeskihalkaisija lusikan keskilinjalla Reynoldsin luvun funktiona on esitetty Kuvassa 19. Nähdään, että pienoismallikokeissa mitattu pisarakokoalue on samaa suuruusluokkaa tehdaskokeissa mitattujen pisarakokojen kanssa. Niinpä voidaan päätellä, että pienoismallisuuttimen tuottaman pisarakokoinformaation avulla voidaan tehdä karkea arvio täydenkoon suuttimen tuottamasta pisarakokoalueesta.

Malvernilla ja PDPA:lla saatu pisarakoko vaikuttaisi pienentyvän Reynoldsin luvun kasvaessa. Tehtaalla mitattu pisarakoko näyttäisi taasen pysyvän suhteellisen vakiona massavirrasta riippumatta. Syy tähän eroavaisuuteen ei ole täysin tiedossa. Varteenotettava selitys, joka on tehty mittausten ja oletusten perusteella, on seuraava. Mustaliipeäkalvon pituus kasvoi kun massavirta kasvoi (katso Kuva 12). Tämän seurauksena sekä kalvon paksuus rikkoutumiskohdassa että syntyvä pisarakoko pysyivät lähes vakiona massavirrasta riippumatta. Toisaalta, pienoismallikokeissa ei kyetty havaitsemaan nestekalvoa (katso kohta 4.1.2). Siten syy siihen miksi pisarakoko pieneni lusikan keskilinjalla Reynoldsin luvun funktiona voi olla se, että pienoismallikokeissa vallinneet kalvon pituudet ja kalvon paksuudet rikkoutumiskohdassa eivät vastanneet tehdaskokeissa esiintyneitä arvoja.

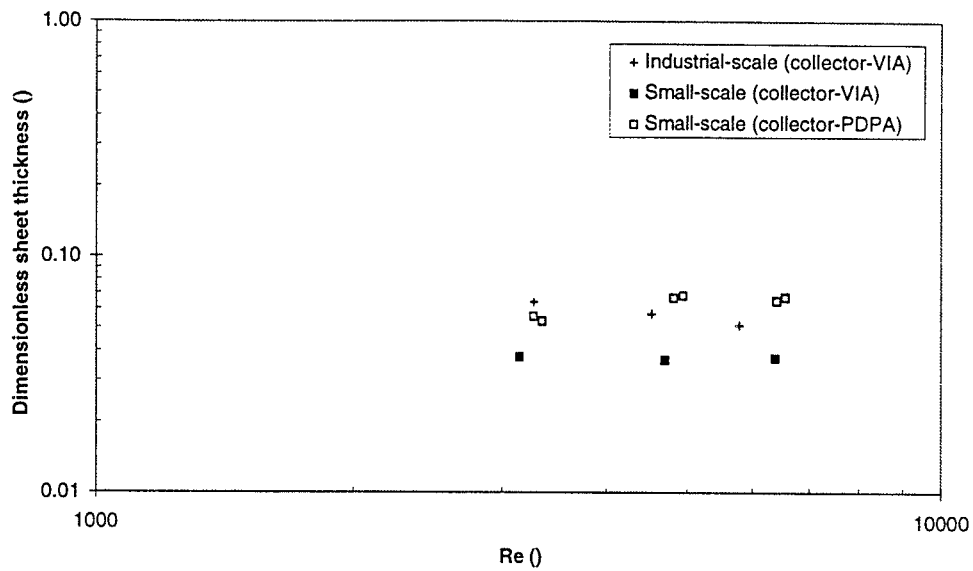


Kuva 19 Dimensioton pisarakoko (MMD*) Reynoldsin luvun funktiona

Vaikka pienoismallikokeissa ei havaittu nestekalvoa, voidaan laskutoimituksien ja dimensioanalyysin toimivuuden kannalta olettaa, että kalvo oli olemassa. Niinpä pienoismallikokeissa vallinneelle keskiarvo kalvon pituudelle valittiin arvoksi 50 mm. Tämä pituus on noin kymmenesosa tehdaskokeissa esiintyneestä lipeäkalvon pituudesta.

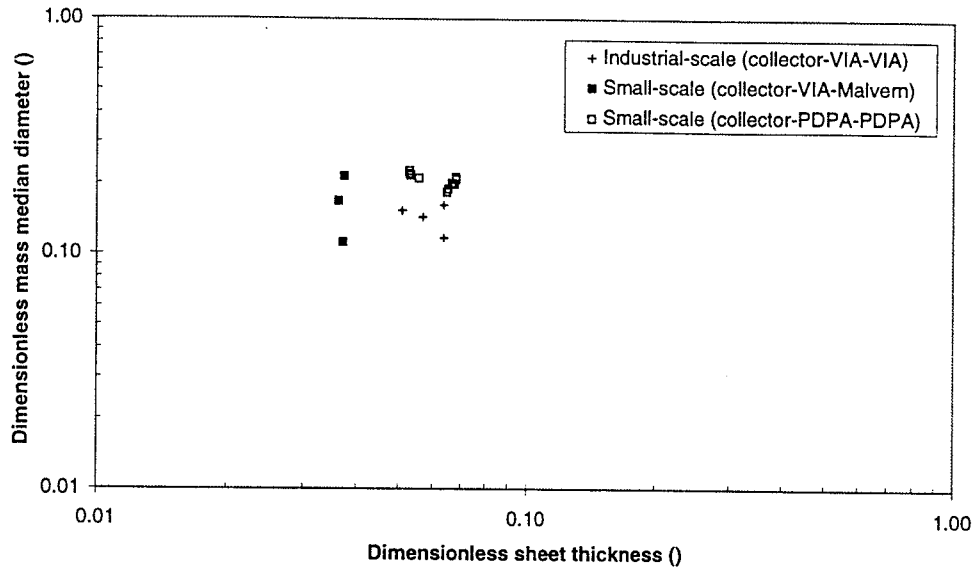
Kuvassa 20 on esitetty dimensioton kalvon paksuus rikkoutumiskohdassa Reynoldsin luvun funktiona. Pienoismallitulokset ja erityisesti PDPA-keräyslaitteisto yhdistelmällä saadut tulokset ovat yhdenmukaisia tehtaalla mitattujen tulosten kanssa.

Jos pienoismallikokeissa oletettu kalvon pituus olisi ollut pienempi kuin 50 mm, niin laskettu kalvon paksuus molemmissa pienoismalli tapauksissa (PDPA-keräyslaitteisto, ja VIA-keräyslaitteisto) olisi kasvanut. Siten Via-keräyslaitteiston avulla laskettu kalvon paksuus olisi ollut lähempänä tehdaskoearvoja.



Kuva 20 Dimensioton kalvon paksuus (rikkoutumiskohdassa) Reynoldsin luvun funktiona

Eräs tehokas tapa vertailla koetuloksia on yrittää löytää yhteys kalvon paksuudelle rikkoutumiskohdassa sekä syntyvälle pisarakoolle. Kuvassa 21 on esitetty dimensioton massakeskihalkaisija lusikan keskilinjalla kalvon rikkoutumiskohdassa olevan dimensiottoman kalvon paksuuden funktiona. Jos otetaan huomioon epävarmuustekijät ja rajaukset, niin kalvon paksuus ja pisarakoko kaikissa kokeissa korreloivat suhteellisen hyvin. Kuitenkin olisi tarvittu enemmän mittapisteitä, jotta olisi voitu muodostaa korrelaatioyhtälö kalvon paksuuden (rikkoutumiskohdassa) ja pisarakoon välille.



Kuva 21 Dimensioton pisarakoko (MMD) dimensiottoman kalvonpaksuuden (rikkoutumiskohdassa) funktiona

4.3 Kirjallisuudessa esiintyvät pisarakokokorrelaatiot

Pisaroitumista on käsitelty laajasti niin teoreettisesti kuin kokeellisesti. Seuraavaksi esitellään muutamia kirjallisuudessa esitettyjä pisarakokokorrelaatioita. Kankkunen (1995) on esitellyt ja testannut myös samat korrelaatiot aiemmin, jolloin tutkimuksen kohteena oli kuristamaton lusikkasuutin ($D_n = 15$ mm).

4.3.1 Pisarakokokorrelaatiot

Fraser *et al.* (1962) tutki kokeellisesti rakosuuttimen tuottamien pisaroiden muodostumista. Fraser esittää pisaroiden keskikoon x_{mean} seuraavasti

$$x_{\text{mean}} = A \cdot \left(\frac{h_r \cdot r \cdot \sigma_l}{C_D^2 \cdot \Delta p} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Adams ja Frederick (1989) yksinkertaistivat Dombrowskin *et al.* (1962) esittämän pisarakokokorrelaation, jota voidaan käyttää määrittäessä suurien mustalipeälusikkasuuttimien pisarakokoa seuraavasti

$$\text{MMD} = 0.862 \cdot D_n \cdot \text{We}^{-\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot \left[1 + 3.52 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{12}} \cdot \frac{\text{We}^{\frac{2}{3}}}{\text{Re}} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (9)$$

Lefebvre (1989) ilmaisee pyörrekammiosuuttimen pisarakoon puolestaan seuraavasti

$$\text{SMD} = B \cdot \left(\frac{\sigma_l \cdot \eta_l^2}{\rho_a \cdot \Delta p_l^2} \right)^{0.25} \cdot h_0^{0.25} + C \cdot \left(\frac{\sigma_l \cdot \rho_l}{\rho_a \cdot \Delta p_l} \right)^{0.25} \cdot h_0^{0.75} \quad (10)$$

$$h_0 = 2.7 \cdot \left(\frac{D_n \cdot \text{FN} \cdot \rho_l}{(\Delta p_l \cdot \rho_l)^{0.5}} \right)^{0.25} \quad (11)$$

$$\text{FN} = \frac{m_{\text{flow}}}{(\Delta p_l \cdot \rho_l)^{0.5}} \quad (12)$$

Snyder *et al.* (1989) ilmaisee rakosuuttimen tuottaman pisarakoon seuraavasti

$$\text{SMD} = D_n \cdot \left(2.83 \cdot \frac{\sigma_l \cdot v_l^2}{\rho_a \cdot D_n^3 \cdot \Delta p_l^2} \right)^{0.25} + D_n \cdot 0.26 \cdot \left(\frac{\sigma_l \cdot \rho_l}{\rho_a \cdot D_n \cdot \Delta p} \right)^{0.25} \quad (13)$$

Snyderin mukaan korrelaatiota (10) voidaan käyttää seuraavien ehtojen puitteissa: nesteen kinemaattinen viskositeetti on 10^{-6} - 10^{-4} m²/s, nesteen pintajännitys on 0.020-0.073 N/m, nesteen tiheys on 900-1200 kg/m³ ja suutinaukon hydraulinen halkaisija on 0.157-0.214 mm.

Paloposki ja Kankkunen (1991b) ovat kehittäneet pyörrekammiosuuttimen pisarakoolle seuraavan esitystavan

$$\text{MMD}^* \propto \text{Re}^{-0.20} \cdot \text{We}^{-0.25} \cdot (\rho^*)^{-0.53} \cdot (\eta^*)^{-0.04} \quad (14)$$

Empie *et al.* (1995) taasen ilmaisee mustalipeälusikkasuuttimen pisarakoon (millimetreissä) taasen seuraavasti

$$\text{MMD} = 4.06 \cdot \text{Re}^{-0.16} \cdot \text{Eu}^{0.21} \cdot D_n^{0.39} \quad (15)$$

$$\text{Eu} = \frac{P_w}{u^2 \cdot \rho_l} \quad (16)$$

4.3.2 Pisarakokokorrelaatioiden testaus

Kaikki edellisessä kohdassa 4.3.1 esitetyt korrelaatiot sisältävät paineen muiden parametrien ohella. Massavirta on myös paineen funktio; tämä relaatio riippuu taasen suutintyypistä ja konstruktiosta. Huolimatta siitä, että esitetyt korrelaatiot ovat lusikkasuuttimelle vai eivät niin laskutoimituksissa käytetty paine (paine-ero Δp) on peräisin suuttimella B22 tehdyistä kokeista (katso Liite 3)

Muut pisarakokokorrelaatioissa esiintyvät parametrit (esim. σ_l , ρ_l , ρ_g ja η_l) ovat saatu mustalipeäkokeissa käytetyistä ruiskutusparametreistä. Jotkut korrelaatiot sisältävät suuttimen rakenteesta riippuvia vakiokertomia. Näille kertoimille on määritetty arvot sijoittamalla korrelaatio tunnettuun pisarakokoon. Tätä tarkoitusta varten valittiin pisarakoko 3080 μm (270 kg/min, 1.23 bar).

Fraserin korrelaatioissa (8) ulosvirtauskertoimelle C_D valittiin arvoksi 0.8 ja sijoittamalla korrelaatio tunnettuun pisarakokoon saatiin vakiokertomille A arvo 14.35.

Lefebvre esittää yhtälön (10), jolla voidaan laskea kalvon paksuus lusikalla. Tätä ei kuitenkaan käytetty, koska mittaustuloksien avulla määritetty kalvon paksuus lusikalla antoi paremman tuloksen. Korrelaatio (10) sijoitettiin tunnettuun pisarakokoon, jolloin saatiin kertoimiksi $B = 3.66$ ja $C = 0.32$.

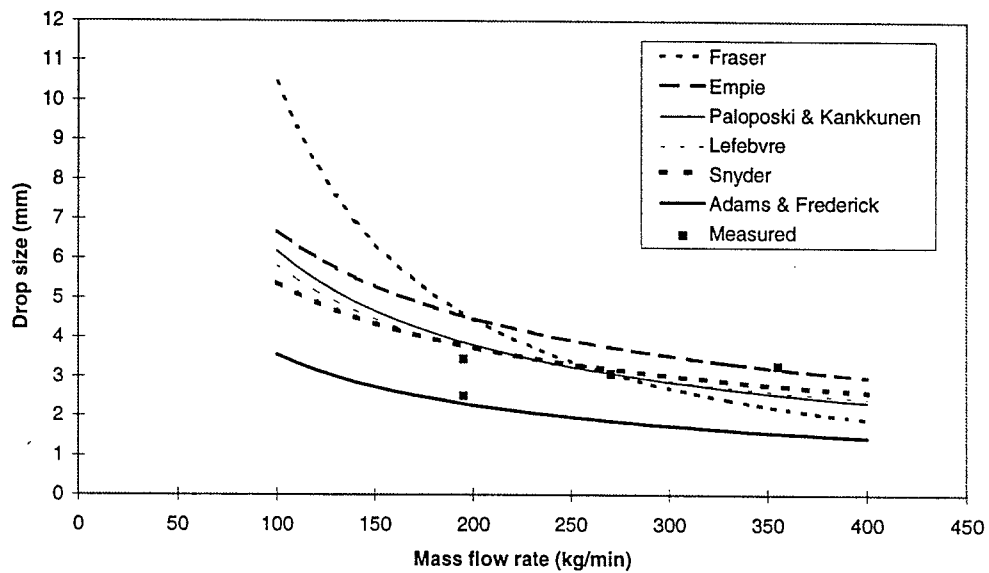
Paloposken ja Kankkusen korrelaatio (14) sijoitettiin myös tunnettuun pisarakokoon, jolloin vakiokertomeksi saatiin 0.17. Muut korrelaatiot (9), (13) ja (15) eivät sisällä määritettäviä vakioita, joten niitä ei sijoitettu tunnettuun pisarakokoon.

Pisarakokokorrelaatiot ja mitatut mustalipeäpisarakoot ovat esitetty Kuvissa 22 ja 23; huomaa, että kaikki pisarakoot ovat muutettu massakeskihalkaisijoiksi (MMD). Kuten pienoismallimittauksetkin niin myös kaikki korrelaatiot ennustavat, että pisarakoko pienenee massavirran tai paineen kasvaessa. Mitatut mustalipeäpisarakoot pysyvät taasen lähes vakiona massavirrasta tai paineesta riippumatta. Syytä tähän eroavaisuuteen pohdittiin jo aikaisemmin kohdassa 4.2.2.

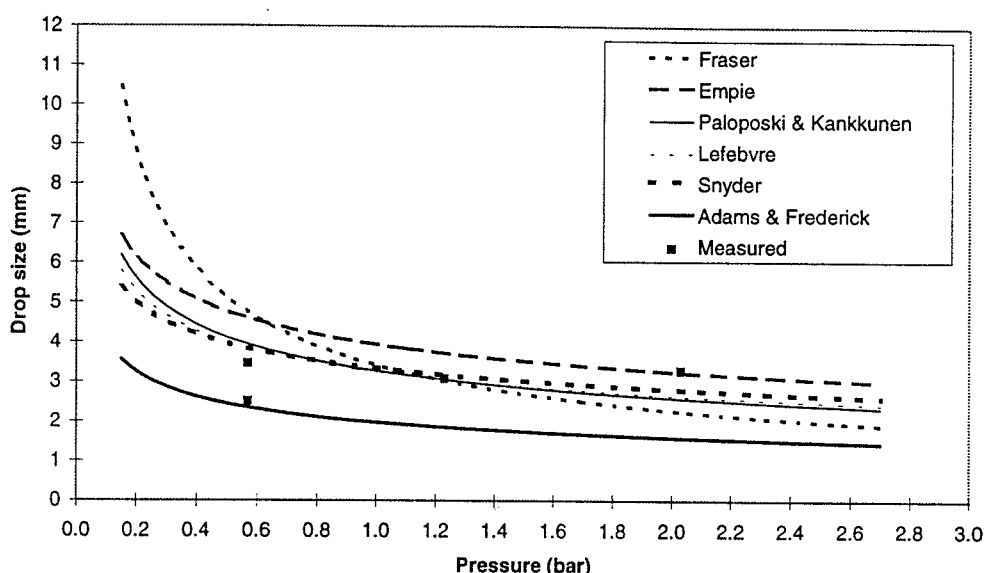
Pisarakokokorrelaatiot, jotka sijoitettiin tunnettuun pisarakokoon ovat keskenään erittäin yhdensuuntaisia. Empien korrelaatio antaa hieman korkeampia arvoja ja vastaavasti Adams ja Frederickin korrelaatio hieman alhaisempia pisarakoko

arvoja kuin muut korrelaatiot. Mutta jos näihin kahteen korrelaatioon olisi lisätty vakiokerroin niin kaikki korrelaatiot olisivat olleet huomattavan yhdensuuntaisia keskenään.

Pisarakokokorrelaatiokäyrät osoittavat, että karkea pisarakokoalue (kiehumispisteen alapuolella) massavirran tai paineen funktiona voidaan niiden avulla laskennallisesti määrittää, jos tunnetaan yksi mitattu pisarakoko sekä joitakin ruiskutusparametrejä. Niinpä myös todelliset pisarakoot voidaan arvioida kohtalaisella tarkkuudella.



Kuva 22 Kirjallisuudessa esiintyviä pisarakokokorrelaatioita massavirran funktiona (mustalipeä, 113°C, 56 mPa·s)



Kuva 23 Kirjallisuudessa esiintyviä pisarakokkorrelaatioita paineen funktiona (mustalipeä, 113°C, 56 mPa·s)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tehdaskokeissa havaittiin mustalipeäkalvon hajoavan sekä aallonmuodostuksella että reikiintymällä. Tiettyä dominoivaa kalvon rikkoutumismekanismia ei havaittu. Niinpä voidaan päätellä, että kalvon rikkoutuminen lipeän kiehumispisteen alapuolella ei ole massavirran funktio.

Mustalipeäsuihkun leveys oli suhteellisen kapea. Kalvon avautumiskulma kasvoi massavirran kasvaessa.

Pienoismallikokeissa ei havaittu nestekalvoa. Täten voidaan päätellä, että pienoismallikokeita ei voida hyödyntää nestekalvon pituutta ja rikkoutumismekanismeja tutkittaessa, jos kokeet suoritetaan käyttämällä läpinäkyvää korvikenestettä. Laskutoimituksien yksinkertaistamiseksi oletettiin, että pienoismallikokeissa nestekalvon pituus oli noin kymmenesosa täydenkoon kalvon pituudesta.

Pienoismallikokeissa tehtiin erittäin onnistuneesti massavirranjakautumisen mittaukset, jotka suoritettiin 2.5° askelin lusikan keskilinjalta lähtien. Pienoismallikokeiden tuloksia voidaan käyttää hyväksi arvioidessa täydenkoon suuttimen massavirranjakautumisen tendenssejä.

Suuttimen suuaukon kuristus ohjaa alhaisen lusikkakulman avustuksella suurimman osan massavirrasta lusikan keskilinjalle. Suhteellinen massaosuus lusikan keskilinjan läheisyydessä kasvaa kun massavirta kasvaa. Samanaikaisesti

suihkun leveys kasvaa mutta suhteellinen massaosuus pienenee kalvon laitoja kohti.

Kokeet osoittavat, että kalvon nopeus pienenee kalvon laitoja kohti massavirran kasvaessa. Kalvon paksuus, joka voidaan laskennallisesti määrittää kalvon nopeus sekä massavirranjakautumismittauksien avulla, myös pienenee kalvon laitoja kohti massavirran kasvaessa.

Kokeiden tuloksien mukaan tietty kalvon paksuus rikkoutumiskohdassa tuottaa pisaroita, jotka ovat samaa kokoluokkaa. Toisaalta olisi tarvittu enemmän mittapisteitä, jotta olisi voitu muodostaa korrelaatioyhtälö kalvon paksuuden (rikkoutumiskohdassa) ja syntyvän pisarakoon välille.

Mustalipeäpisaroiden koko (lusikan keskilinjalla) oli melkein vakio massavirrasta riippumatta. Toisaalta sekä pienoismalliaineisto ja pisarakokokorrelaatiot osoittivat, että pisarakoko pienenee massavirran kasvaessa. Syytä tähän eroavaisuuteen ei ole vielä tiedossa. Eräs selitys, joka voidaan esittää mittatuloksien ja oletusten perusteella on seuraava. Lipeäkalvon pituus kasvoi massavirran kasvaessa. Tämän seurauksena lipeäkalvon paksuus rikkoutumiskohdassa pysyi lähes vakiona massavirrasta riippumatta. Toisaalta ei voida olla varmoja pienoismallikokeissa olleen nestekalvon ominaisuuksista. Täten todelliset vesi-glyserolikalvon pituudet ja rikkoutumismekanismit, joilla molemmilla on vaikutuksensa syntyvään pisarakokoon, jäivät tuntemattomiksi.

6 TULOKSIEN HYÖDYNTÄMINEN SOODAKATTILA- OLOSUHTEISSA

Tämä kohta on lisätty täydentämään Niemisen (1996) diplomityötä ”Experiments on Black Liquor Splashplate Nozzle Performance”. Tässä osassa pohditaan tehtyjen kokeiden hyödynnettävyyttä kattilan toimivuuden kannalta.

Ensinnäkin on huomioitava, että soodakattilassa vallitsevat olosuhteet poikkeavat erittäin paljon kokeissa esiintyneistä olosuhteista. Lämpötila kattilan sisällä on toista tuhatta astetta, joten sen vaikutus lipeäkalvoon sekä sitä ympäröivän kaasun lämpötilaan on ilmeinen. Toisaalta ilmavirtaukset kattilan sisällä omalta osaltaan myös vaikuttavat kalvon rikkoutumiseen. Vastaavasti sumutuskammiossa tehdyt täydenkoon mustalipeäkokeet suoritettiin lämpötilan ollessa noin 100°C (ympäröivä ilma) ja pienoismallikokeet suoritettiin huoneenlämpötilassa. Molemmissa koeolosuhteissa ei vallinnut merkittäviä ilmavirtauksia.

Suuttimen B22 tuottaman mustalipeän pisarakooksi sumutuskammiossa mitattiin noin 3 mm, joka osoittautui massavirrasta riippumattomaksi. Voidaan olettaa, että myös kattilaolosuhteissa (kun lipeän lämpötila alle kiehumispisteen) mustalipeäpisaroiden keskikoko on noin 3 mm mutta toisaalta pisarakoko saattaa muuttua huomattavastikin, jos lipeän lämpötilaa kohotetaan tai jos massavirta on muu kuin sumutuskammiokeissa käytetty.

Suuttimen B22 tuottamasta lipeäkalvosta otetut Kuvat 6, 8 ja 10 osoittavat, että kyseinen suutintyyppi muodostaa massavirraltaan epätasaisesti jakautuvan mustalipeäkalvon. Kohdissa, joissa kalvo ”kuultaa” läpi on ohentumia, jotka ilmenevät suhteellisen massaosuuden vähenemisenä ja pisarakoon pienenemisenä. Toisaalta kohdissa, joissa esiintyy suhteellisen massavirran keskittyneisyyttä, voidaan olettaa olevan suurempi pisarakoko (tällainen kohta oli esimerkiksi lusikan keskilinjalla, jossa pisarakokomittaukset suoritettiin).

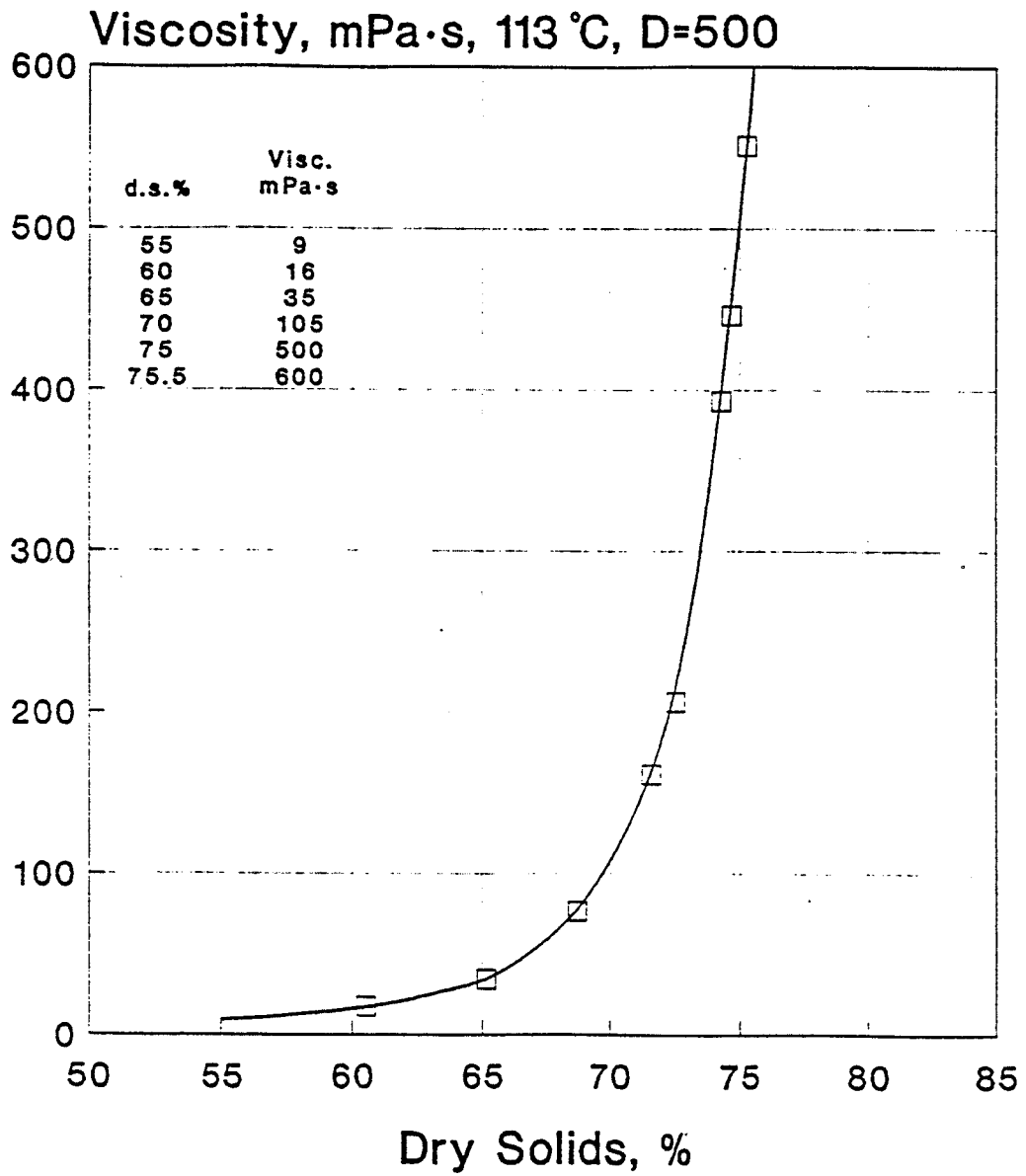
Tehdaskokeissa havaittu lipeäkalvo oli suhteellisen kapea. Tämä tarkoittaa myös, että massavirta keskittyy kapealle sektorille. Näinollen polttoaineen sekoittuminen palamisilmaan ei ole välttämättä yhtä täydellistä kuin leveän lipeäkalvon tapauksessa. Kapea lipeäsuihku tunkeutuu myös pidemmälle kattilaan. Tämä täytyy ennalta tiedostaa varsinkin, jos suutinta käytetään pienissä kattiloissa.

Toisaalta kapea ruiskutuskuvio tarjoaa erinomaisen mahdollisuuden käyttää suutinta B22 kattilan kulmissa. Tällöin tarjoutuu mahdollisuus hyödyntää tehokkaasti jokainen poltinaukko. Suuttimen B22 tuottaman suhteellisen kapean ruiskutuskuvion avulla on mahdollista välttyä ruiskuttamasta lipeää kattilan seinille.

LÄHDELUETTELO

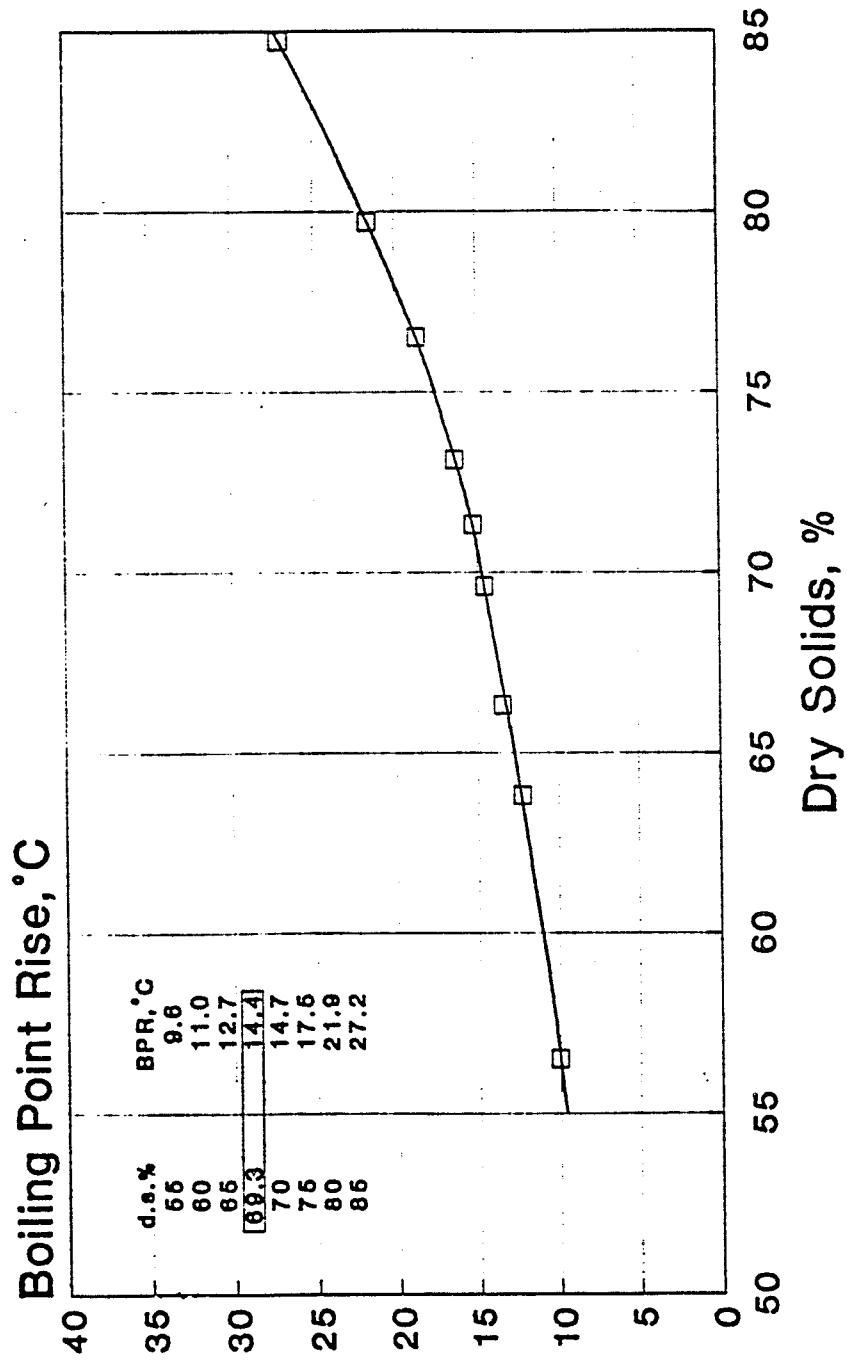
- Adams, T. N., Frederick, W. J., (1988), Kraft recovery boiler physical and chemical processes. The American Paper Institute, New York.
- Dombrowski, N., Johns, W. R. (1962), The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. Chemical Engineering Science, 18. pp. 203- 214.
- Empie, H. J., Lien, S. J., Yang, W., Adams, T. N. (1995). Spraying characteristics of commercial black liquor nozzles. Tappi Journal, Vol. 78, No. 1., 1995, pp. 121-128.
- Fraser, R. P., Eisenklam, P., Dombrowski, N. & Hasson, D. (1962), Drop formation from rapidly moving liquid sheets. AIChE J. 8 pp. 672-680.
- Giffen, E. & Muraszew, A. (1953), The atomization of liquid fuels. John Wiley & Sons, New York.
- Kankkunen, A. (1995), Mustalipeän pisaroituminen lusikkasuuttimessa. Licensiaatintyö, Teknillinen Korkeakoulu, Helsinki.
- Lefebvre, A. H. (1989), Atomization and sprays. Hemisphere, New York.
- Nieminen, K. (1996), Experiments on Black Liquor Splashplate Nozzle Performance. Master's thesis, Helsinki University Of Technology.
- Paloposki, T., Kankkunen, A. (1991b), Dimensional analysis and spray modeling. Sprays and Aerosols '91, Guilford, 30.09.-02.10.1991, pp. 144-149.
- Snyder, H. E., Senser, D. W. & Lefebvre, A. H. (1989), Mean drop sizes from fan spray atomizers. Journal of Fluids Engineering, Vol. 111, September 1989, pp. 342-347.

LIITE 1



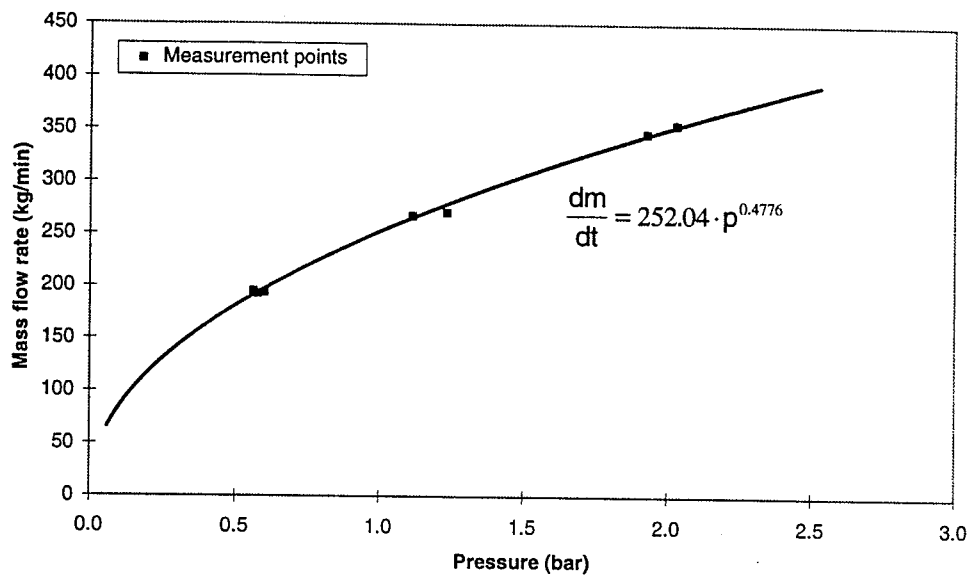
Kuva 24 Viskositeetti kuiva-ainepitoisuuden funktiona (mustalipeä, 113°C)

LIITE 2



Kuva 25 Kiehumapisteen nousu kuiva-ainepitoisuuden funktiona (mustalipeä, 113°C)

LIITE 3



Kuva 24 Mustalipeäsuuttimelle B22 (Ø 21.6 mm) ominainen massavirta paineen funktiona käyrä