LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Kemia

Tatu Kumpulainen

Kaasun dispergoituminen tehdasmittakaavaisessa keskisakean massan sekoittimessa

Työn tarkastajat: Prof, Kaj Backfolk
TkT, Jari Käyhkö

Työn ohjaajat: DI, Kari Peltonen
DI, Timo Perttula
TkT, Jari Käyhkö
TkL, Tapio Tirri
DI, Aki Mankki

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Andritz Oy:lle Kari Peltosen toimeksiannosta marraskuun 2010 ja huhtikuun 2011 välisenä aikana. Haluan kiittää Karia mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja asiantuntevista neuvoista työn aikana. Kiitos kuuluu myös Jari Käyhkölle, Tapio Tirrille, Kaj Backfolkille sekä Timo Perttulalle, jotka toimivat työn ohjaajina.

Työn kokeellinen osio tehtiin Savonlinnan Kuitulaboratoriossa yhteistyössä PulpVision – projektin kanssa. Kiitokset Aki Mankille kuvauslaitteiden käyttöopastuksesta ja arvokkaista kuvaukseen liittyvistä neuvoista työn aikana. Kiitos myös muulle FiberLaboratoryn henkilökunnalle mukavista hetkistä diplomityön parissa.

Lappeenrannassa 1.4.2011

Tatu Kumpulainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Kemia

Tatu Kumpulainen

Kaasun dispergoituminen tehdasmittakaavaisessa keskisakean massan sekoittimessa

Diplomityö

2011

92 sivua, 32 kuvaa, 10 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Prof. Kaj Backfolk
TkT, Jari Käyhkö

Hakusanat: Dispersio, kuvantaminen, kuplakokojakauma, sekoitus, MC-sekoitus, kemiallinen massa, fluidisaatio, valkaisu

Työn tarkoituksena oli selvittää Proto 10 kemikaalisekoittimen kyky dispergoida kaasua keskisakean valkaistun mäntysellun joukkoon. Työssä käytettiin kuvantamistekniikkaa, jonka avulla pystyttiin näkemään sekoittimen ja putkiston sisälle sekoitustapahtuman aikana. Muodostunutta dispersiota tarkasteltiin kolmesta kuvauspisteestä, joista yksi sijaitsi sekoittimen pesässä ja kaksi putkistossa sekoittimen jälkeen. Työssä verrattiin myös laboratoriosekoittimella saatuja tuloksia teollisen mittakaavan sekoittimella saatuihin tuloksiin, sekä määritettiin tarvittava pinta-aktiivisen aineen konsentraatio, jolla saavutettiin ruskeaa massaa vastaava vaahtoaminen.

Työn kokeellinen osuus koostui kolmesta osasta. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin ruskeasta mänty- ja koivumassasta lingotun suodoksen vaahtoamista ja verrattiin sitä vedellä ja pesuaineella saatavaan vaahtoon. Toisessa vaiheessa suoritettiin referenssiajot laboratoriosekoittimen ja teollisen mittakaavan sekoittimen vertailua varten Quantum Mark IV laboratoriosekoittimella. Kolmannessa vaiheessa tutkittiin Proto 10 sekoittimen kykyä dispergoida kaasua mäntysellun joukkoon eri pyörimisnopeuksilla ja virtaamilla.

Työn tuloksien perusteella energiankäytön kannalta paras pyörimisnopeus Proto 10 sekoittimelle on 1500 min^{-1}. Nostamalla kierrosnopeutta yli tämän ei saavutettu merkittävää parannusta dispersion laadussa varsinkaan suuremmilla virtaamilla. Virtaamalla todettiin olevan suuri merkitys sekoitustulokseen. Laboratoriosekoittimella tehtyjen kokeiden todettiin vastaavan parhaiten teollisen mittakaavan tuloksia pyörimisnopeudella 1200 min^{-1}.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
LUT Chemistry

Tatu Kumpulainen

The dispergation of gas in mill-size medium consistency pulp mixer

Master's Thesis

2011

92 pages, 32 figures, 10 tables and 4 appendices

Examiners: Professor Kaj Backfolk
D.Sc. Jari Käyhkö

Keywords: Dispersion, imaging, bubble size distribution, chemical pulping, mixing, MC-mixing, fluidization, bleaching

The purpose of this thesis was to resolve Proto 10 chemical mixer ability to disperse gas into medium consistent bleached pine kraft. New imaging equipment was used to take pictures inside the mixer and pipeline after mixer during the mixing process. Dispersion was studied through three imaging assemblies. One of the assemblies was located inside the mixer and two other assemblies were located inside the pipeline after the mixer. The comparison between laboratory mixing and mill-size mixing was also one subject of this thesis. The concentration of surface active agent was studied to create a similar dispersion with unbleached kraft by using bleached pulp suspensions.

The experimental part of this thesis consisted of three separate parts. The purpose of the first part was to compare the foaming abilities of brown pine/birch pulp filtrates and pure water-soap mixture. The purpose of the second part was to determine the right concentration of a surface active agent to create similar foaming with bleached pulp than by using unbleached pulp in laboratory mixer. Third and the main part of this thesis were to resolve the Proto 10 high-shear mixer ability to disperse gas inside pulp suspension by using different retention times and rotation speeds.

The results of this work show that the best rotational speed for Proto 10 mixer is 1500 rpm. The consumption of energy increases but the quality of the dispersion does not improve significantly if the rotational speed increases over that. Retention time inside the mixer is very important factor affecting to mixing quality. The best analogy between laboratory mixing and mill-size mixing was achieved when used the rotational speed 1200 rpm in laboratory mixer.

SISÄLLYS

SYMBOLILUETTELO **1**
1 JOHDANTO **3**
2 KESKISAKEUSALUEEN KÄYTTÖSOVELLUKSET **4**
3 KESKISAKEAN MASSAN VIRTAUSOMINAISUUDET **5**
3.1 Flokkaantuminen 6
3.2 Fluidisaatio 6
3.2.1 Kuituverkoston myötöjännitys 6
3.2.2 Tehodissipaatio 10
3.3 Keskisakean massan pumppaaminen 11
3.3.1 Virtauksen kehittyminen 11
3.3.2 Ilmanpoisto 12
3.3.3 Keskisakean massan pumppauslaitteistot 14
4 KEMIKAALIEN SEKOITTAMINEN KESKISAKEUSALUEELLA **17**
4.1 Sekoituksen laadun kuvaaminen 18
4.1.1 Sekoitusaste 19
4.1.2 Erottumisen intensiteetti 20
4.1.3 Sekoitusaika ja sekoituspinta 21
4.2 Keskisakeusalueella käytetyt sekoittimet 23
4.3 Valkaisussa käytetyt sovellutukset 28
5 KAASUJEN SEKOITTAMINEN KESKISAKEUSALUEELLA **30**
5.1 Sekoituksen tavoite 31
5.2 Sekoituksen tehonkulutus 32
5.3 Aineensiirto 35
5.4 Kuplien käyttäytyminen 39
5.4.1 Kuplien hajoaminen 39
5.4.2 Kuplien yhdistyminen 41
5.4.3 Kuitutyypin vaikutus kuplakokoon 43
5.4.4 Sakeuden vaikutus kuplakokoon 44
6 KOKEELLISEN OSAN TAVOITTEET JA SUORITUS **45**
6.1 Koelaitteisto 46
6.1.1 Sekoitinlaitteistot 46
6.1.2 Kuvauslaitteisto 48
6.2 Koesuunnitelma 49
6.3 Kokeiden suoritus ja käytetyt menetelmät 50
6.4 Kuvien käsittely ja kuplien laskenta 52
7 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU **54**
7.1 Vaahtoutumiskokeiden tulokset 55
7.2 Quantum Mark IV referenssiajojen tulokset 56
7.3 Proto 10 sekoituskokeiden tulokset 58
7.3.1 Sekoitusintensiteetin vaikutus sekoitustulokseen 59
7.3.2 Virtaaman vaikutus sekoitustulokseen. 65
7.3.3 Sekoituksen energiankulutus 68
7.3.4 Pinta-aktiivisen aineen vaikutus kuplakokojakaumaan 70
7.3.5 Eri kuvausyhteistä saatujen tulosten vertailu 73
8 VIRHEARVIO **74**
9 YHTEENVETO **75**
10 KEHITYSEHDOTUKSET **77**
LÄHDELUETTELO **81**

SYMBOLILUETTELO

A	Sekoituspinta, m^2
C	Kuitususpension sakeus, %
$\overline{c}$	Kemikaalin keskimääräinen pitoisuus, kg/m^3
c_i	Kemikaalin pitoisuus kohdassa i, kg/m^3
D	Sekoittimen roottorin halkaisija, m
D_v	Säiliön halkaisija, m
$d_{b,\max}$	Stabiilin kuplan maksimikoko, m
H	Henryn lain vakio, -
I	Patersonin erottumisen intensiteetti, -
$K_L\alpha_i$	Kokonaisaineensiirtokerroin, -
$k_{g\alpha_i}$	Kaasufaasin aineensiirtokerroin, -
$K_L\alpha_j$	Nestefaasin aineensiirtokerroin, -
k_1, k_2, k_3	Vakioita, -
k_L	Sekoittimen roottorin lapojen lukumäärä, kpl
L	Säiliön korkeus, m
l	Sekoittimen roottorin lavan pituus, m
M_d	Vääntömomentti, Nm
$\dot{m}$	Kuitususpension massavirtaus, kg/s
N	Sekoittimen pyörimisnopeus, 1/s
N_f	Sekoittimen fluidisaatiopyörimisnopeus, 1/s
$\frac{P_g}{P_{o,w}}$	Sekoituksen tehosuhde, -
q	Sekoitusaste, %
R_f	Fluidisaatiosuhde, -
V_0	Sekoittimen vapaa tilavuus, m^3
$\dot{V}$	Kuitususpension läpivirtaus, m^3/s
We_c	Kriittinen Weberin luku, -
z	Rinnakkaisten näytteiden lukumäärä, kpl

α, k	Vakioita, -
ε	Turbulenssin aiheuttama tehohäviö, W/kg
θ	Sekoitusaika, s
μ_L	Nesteen dynaaminen viskositeetti, kg/m s
μ_G	Kaasun dynaaminen viskositeetti, kg/m s
ρ_G	Kaasun tiheys, kg/m^3
ρ_L	Nesteen tiheys, kg/m^3
σ	Kemikaalin keskihajonta seoksessa, kg/m^3
σ	Pintajännitys, N/m
τ	Dynaaminen paine, N
τ_d	kuituverkoston myötöjännitys, N/m2
LC	Kuitususpension matalasakeusalue, C < 6 %
MC	Kuitususpension keskisakeusalue C = 8 – 18 %
HC	Kuitususpension korkeasakeusalue, C > 20 %

1 JOHDANTO

Fluidisoivien keskipakopumppujen kehitys on mahdollistanut sen, että yhä useampi sellunkäsittelyprosessi voidaan suorittaa nykyaikaisella sellutehtaalla keskisakeusalueella, jolloin massan sakeus on 8-16 massaprosenttia. Happidelignifioinnin ja valkaisun lisäksi myös jatkuvatoiminen keitto ja monet pesut tehdään keskisakeuksiselle massalle. Saman sakeusalueen käytöllä eri prosessivaiheissa massan laimennus- ja sakeutustarve on vähentenyt huomattavasti, jolloin on saavutettu huomattavia säästöjä massan käsittelyn kustannuksissa.

Sekoitus on eräs keskeisimmistä yksikköoperaatioista sellun valkaisussa. Koska valkaisu suoritetaan usein kokonaisuudessaan keskisakeusalueella, on myös sekoitus pystyttävä suorittamaan samalla massan sakeudella. Nykyisin niin sanotut fluidisoivat sekoittimet ovat vallanneet keskisakean massan sekoittamisen markkinat. Hyvällä sekoittamisella aikaansaadaan tasainen valkaisutulos, ja suurempi osa kemikaalista saadaan reagoimaan värillisten yhdisteiden kanssa, kuten on tarkoitettu. Tällöin valkaisun ympäristökuormitus ja kustannukset pienenevät.

Nykyaikainen keskisakean massan sekoitus ja pumppaaminen perustuvat massan fluidisoimiseen. Massan fluidisoinnilla tarkoitetaan, että massaan kohdistetaan niin suuria leikkausvoimia, että yhtenäinen kuituverkosto ja flokit hajoavat, jolloin massa alkaa käyttäytyä nesteen tavoin. Tällöin massa on täysin turbulenttisessa olotilassa.

Valkaisussa käytetään kaasumaisia kemikaaleja, kuten happea ja otsonia. Kun kaasua lisätään massan joukkoon, syntyy kolmifaasisysteemi, jonka hallinta on hyvin vaikeaa massasuspensioiden monimutkaisen hydrodynamiikan vuoksi. Tämän työn kirjallisuusosiossa käsitellään yleisesti keskisakean massan käsittelyä, sekoittamista ja kaasun käyttäytymistä sekoituksessa ja sen jälkeen. Työn kokeellisessa osassa tutkitaan kuvantamistekniikkaa hyväksi käyttäen tehdasmittakaavaisen keskisakean massan sekoittimen kykyä dispergoida kaasua

massasuspension joukkoon. Syntyneitä kuplia kuvataan digitaalisen kameran avulla sekoittimessa ja putkistossa olevien kuvausyhteiden kautta. Työn tarkoituksena on tuottaa uutta tietoa kaasun käyttäytymisestä tehdasmittakaavaisessa, fluidisoivassa keskisakean massan sekoittimessa ja sekoittimen jälkeisessä putkistossa.

2 KESKISAKEUSALUEEN KÄYTTÖSOVELLUKSET

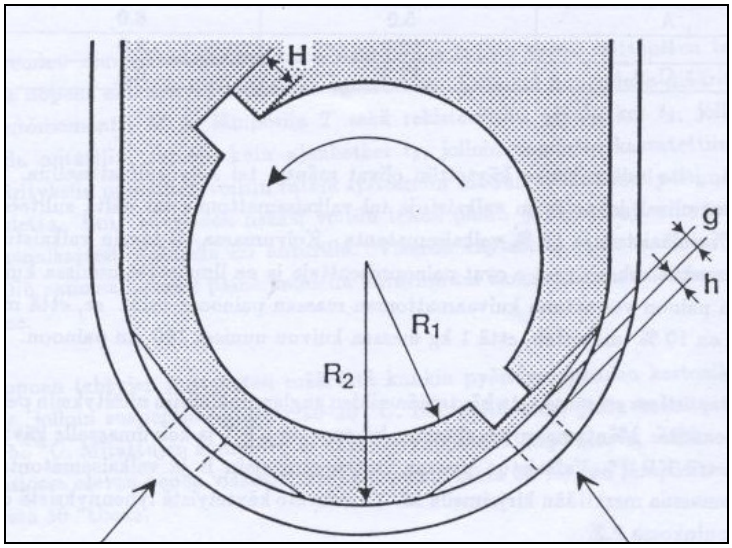
Monet sellutehtaan yksikköoperaatioista toteutetaan keskisakeusalueella, jolloin kuitujen osuus suspensiosta on 8-16 %. Suurimpana edistysaskeleena keskisakeusteknologian kehityksessä on ollut fluidisoivien keskipakopumppujen kehitys, joka mahdollisti keskisakean massan pumppaamisen matalasakeuksisen massan tavoin aina 12 %:n sakeuteen saakka. Pumppaus voidaan suorittaa keskipakopumpuilla aina 18 %:n sakeuteen saakka, mutta tutkimustulosten mukaan juuri 12 %:n sakeuden jälkeen pumppaaminen tarvittava energiamäärä kasvaa voimakkaasti. Ennen fluidisoivia keskipakopumppuja keskisakean massan pumppaamiseen käytettiin mäntäpumppuja, koska keskisakean massan pumppaaminen keskipakopumpuilla ei ole mahdollista ilman kuitususpension saattamista turbulenttiseen tilaan./1,2,3/

Valkaisu suoritetaan miltei kokonaisuudessaan keskisakeusalueella, mutta myös korkealla sakeusalueella toimivia happi- ja otsonointivaiheita on vielä yleisesti käytössä. Myös nykyaikainen jatkuvatoiminen keitto ja monet pesut tehdään keskisakeusalueella. Saman sakeusalueen käytöllä eri prosessivaiheissa saavutetaan kustannussäästöjä, koska massan sakeutus- ja laimennustarve vähenee. Matalasakeudella toimivia prosessivaiheita ovat nykyään enää lähinnä massan lajittelu ja rainanmuodostus kuivauskoneella. Fluidisoitumisilmiö tarjoaa myös mielenkiintoisen kehitysmahdollisuuden: Koska massaa voidaan pumpata aina 12 %:n sakeuteen asti veden tavoin, voidaan olettaa, että kaikki kuitususpension virtausta hyödyntävät prosessit voidaan suorittaa myös keskisakeusalueella. Tulevaisuudessa on periaatteessa mahdollista, että esimerkiksi paperi- ja kuivauskoneiden perälaatikkosakeus saadaan nostettua aina 10 %:iin saakka. Nykyisin perälaatikkosakeudet ovat yleisesti luokkaa 1 %.

Sakeuden nostaminen 10 %:iin vähentäisi oleellisesti kiertovesien määrää ja toisi huomattavia säästöjä pumppauskustannuksissa sellu- ja paperitehtailla. /2,3,4/

3 KESKISAKEAN MASSAN VIRTAUSOMINAISUUDET

Hietaniemi ja Gullichsen /2/ ja Gullichsen ja Härkönen /5/ ovat tutkineet keskisakean kuitususpension virtausominaisuuksia testikammiossa. Käytetyissä testikammioissa massaan kohdistettiin leikkausvoimia roottorin ja virtauksenmuokkauskappaleiden avulla. Hietaniemen ja Gullichsenin /2/ käyttämän laitteen alaosan yksityiskohtainen rakenne on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Piirros Hietaniemen ja Gullichsenin käyttämästä testikammion alaosasta. Yksityiskohtaisiksi mitoiksi on annettu R_1 = 70 mm, R_2 = 100 mm ja H = 17 mm. /2/

Kuvassa 1 vasemmalla olevan nuolen kohdalla sijaitsi paine- ja leikkausjännitysanturit sekä oikean nuolen kohdalla lämpötila-anturi. Kammion alareunoissa sijaitsevien virtauksenmuokkauskappaleiden sijainti roottorin ripoihin nähden oli säädettävä, jollon laitteella saatiin aikaiseksi erilaisia virtausgeometrioita. Hietaniemen ja Gullichsenin /2/ mukaan laiteen rakenteesta johtuen sillä voidaan simuloida monipuolisesti keskisakean massan (MC) sekoittimen toimintaa, joten kokeissa saatuja tuloksia ja havaintoja voidaan ainakin jossain määrin käyttää hyväksi nykyaikaisen MC-sekoittimessa tapahtuvien ilmiöiden ymmärtämisessä.

3.1 Flokkaantuminen

Kuiduilla on ominainen taipumus muodostaa jo pienissä pitoisuuksissa veden seassa flokkeja, eli sakeampia kuitukeskittymiä. Sakeuden kasvaessa kuituverkoston lujuus kasvaa, koska kuitujen väliset vuorovaikutukset lisääntyvät. Näin ollen flokit ovat lujempia kuin niitä ympäröivä kuitususpensio. 1950- luvulla Mason /6,7/ osoitti, että flokkaantuminen on pääpiirteittäin mekaaninen ilmiö, ja tapahtuu aina kriittisen sakeuden ylittyessä. Massakuiduille kriittinen sakeus on alle 0,1 %. Kuituosuuksilla 0,2-0,4 % alkaa muodostua yhtenäinen kuituverkosto, jossa flokit näkyvät tihentyminä. Flokkaantumisen voimakkuuteen vaikuttavat monet tekijät, mutta tärkein yksittäinen tekijä on sakeus. Flokkaantuminen ja kuituverkoston lujuus kasvavat eksponentiaalisesti sakeuden kasvaessa. /2,6,7/

Flokkien hajoaminen voidaan jakaa kolmeen perusmekanismiin: Yleisen- ja välitason mekanismit, sekä pintaeroosio. Yleisen tason mekanismilla on suurin vaikutus, ja se kohdistuu koko flokkiin. Siihen kuuluu flokkien muodonmuutos, venyminen, halkeaminen ja osittuminen. Välitason mekanismi lohkaisee flokista vain pienen osan jättäen suurimman osan koskemattomaksi. Pintaeroosio on hyvin paikallinen mekanismi, joka aiheutuu flokin ja ympäröivän fluidin välillä vallitsevasta nopeuserosta. Tehokas hajoaminen edellyttää yleisen tason vaikutusta yhdistettynä pintaeroosioon, jolloin vaikutus yltää kuitutasolle asti. Keskisakean massan käsittelyssä flokkien hajottaminen on perusedellytys massan fluidisoinnille. /8/

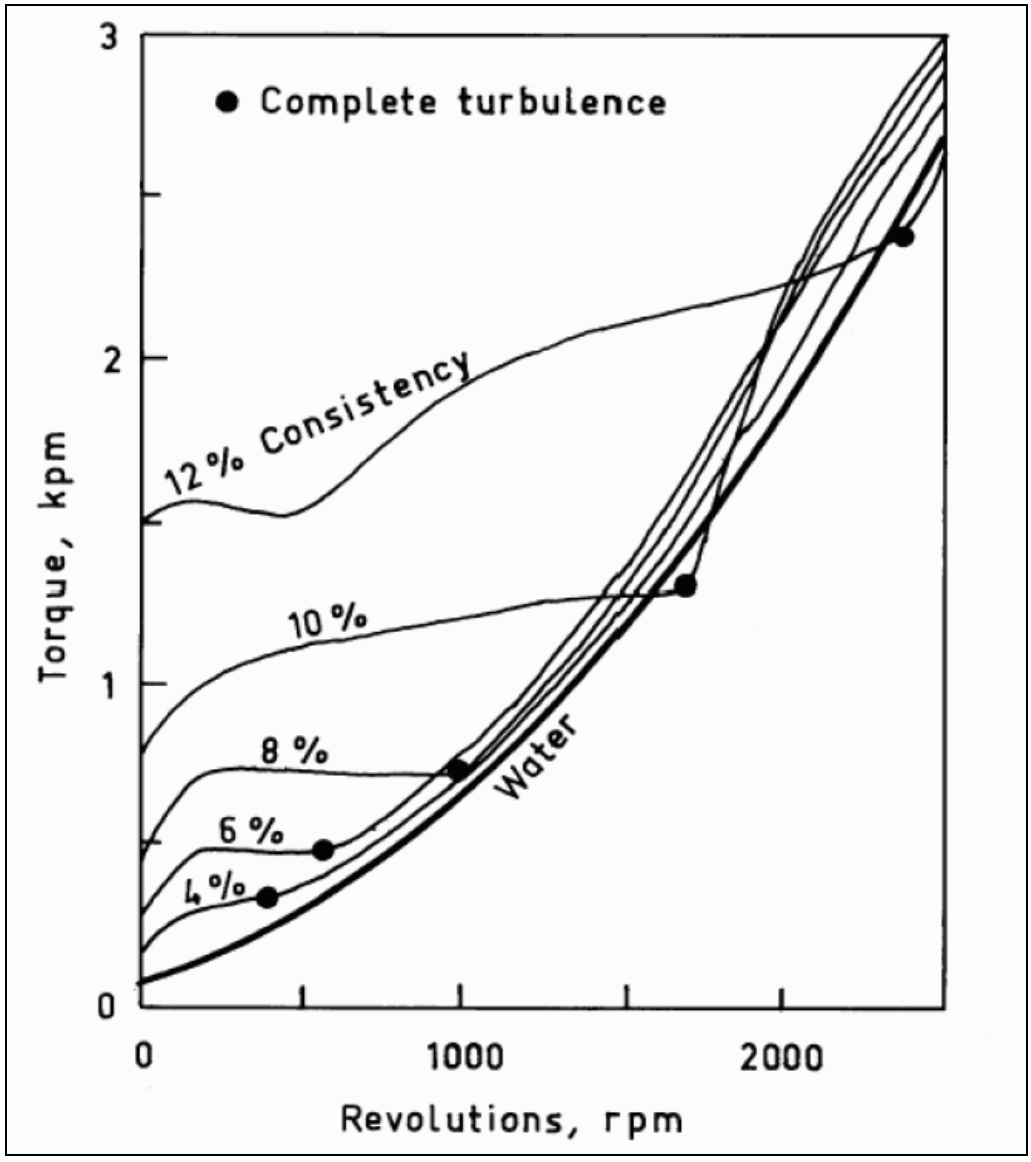
3.2 Fluidisaatio

Lepotilassa keskisakea massa muodostaa yhtenäisen kiinteän kuituverkoston, joka käyttäytyy viskoelastisen materiaalin tavoin. Joutuessaan riittävien leikkausvoimien alaiseksi, kuituverkosto hajoaa, ja alkaa käyttäytyä newtonisen nesteen tavoin. Tätä muutosta kutsutaan kuitususpension fluidisaatioksi./1,2/

3.2.1 Kuituverkoston myötöjännitys

Fluidisaation vaatimien leikkausvoimien selvittämiseksi sekoitintyyppisissä testilaitteistoissa avainasemassa on vääntömomentin ja kierrosluvun mittaaminen.

Fluidisaatiopisteessä näiden kahden muuttujan välinen riippuvuus muuttuu huomattavasti. Kuvassa 2 on esitetty Gullichsenin ja Härkösen /5/ tutkimuksen tulokset eri sakeuden omaavien massojen fluidisoitumisesta. Tutkimukset on tehty samankataisella laitteistolla, kuin kuvassa 1 on esitetty. /2,5/



Kuva 2. Sekoittimen vääntömomentti kierrosnopeuden funktiona eri sakeuden omaaville massoille ja vedelle. /5/

Kuvasta 2 nähdään, että sekoittimen kierrosnopeuden saavutettua tietyn arvon, vääntömomentin ja kierrosluvun riippuvuutta toisistaan kuvaava käyrä on yhtenevä veden vastaavan käyrän kanssa. Tämä on massan fluidisoitumispiste, jonka jälkeen sekoittimessa vallitsee täydellinen turbulenssi. Massan fluidisoimiseen tarvittava vääntömomentti kasvaa eksponentiaalisesti massan

sakeuden kasvaessa. Tämä todistaa myös sen, että kuituverkoston lujuus kasvaa eksponentiaalisesti massan sakeuden kasvaessa. /2,5/

Myötöjännitys kuvaa kuituverkoston lujuutta. Jotta kuituverkosto saadaan hajotettua, tarvitaan vähintään myötöjännityksen suuruinen leikkaava voima. Duffy *et al* ./9/ osoittavat tutkimuksissaan, että kuitutulpan myötöjännitys voidaan laskea yhtälöllä (1).

$$\tau_d = k * C^{\alpha} \qquad (1)$$

missä τ_d kuituverkoston myötöjännitys, N/m^2

C massan sakeus, %

k , α kokeellisesti määritettyjä vakioita

k :n ja α :n arvoiksi valkaistulle mäntysellulle on määritetty:

α =2.0

k =27

Tutkimuksissaan Gullichsen ja Härkönen vertasivat saamiaan tuloksia kaavalla (1) saatuihin tuloksiin. He laskivat kuituverkoston myötöjännityksen kaavalla (2) saamistaan mittaustuloksista.

$$\tau_d = \frac{2 * M_d}{\pi * D_v^2 * L} \qquad (2)$$

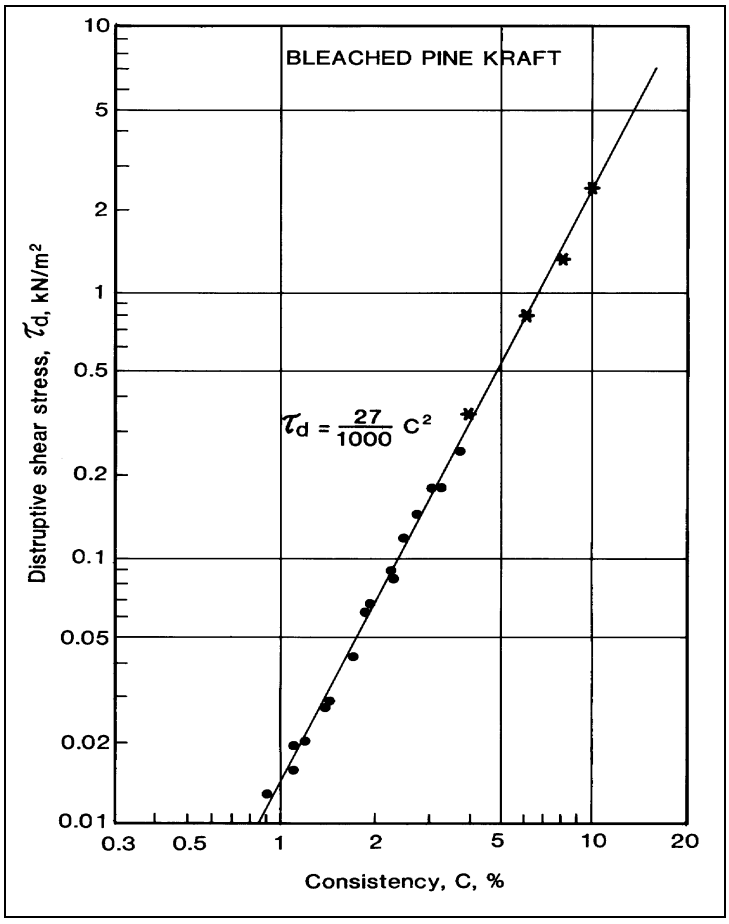
missä τ_d Kuituverkoston myötöjännitys, N/m^2

M_d Vääntömomentti fluidisaatiopisteessä, Nm

D_v Säiliön halkaisija, m

L Säiliön korkeus, m

Kuvassa 3 on esitetty kaavalla (1) lasketut myötöjännitykset, ja Gullichsenin ja Härkösen mittauksiin perustuvat kaavalla (2) lasketut tulokset eri sakeuden omaaville massoille logaritmisellä asteikolla.

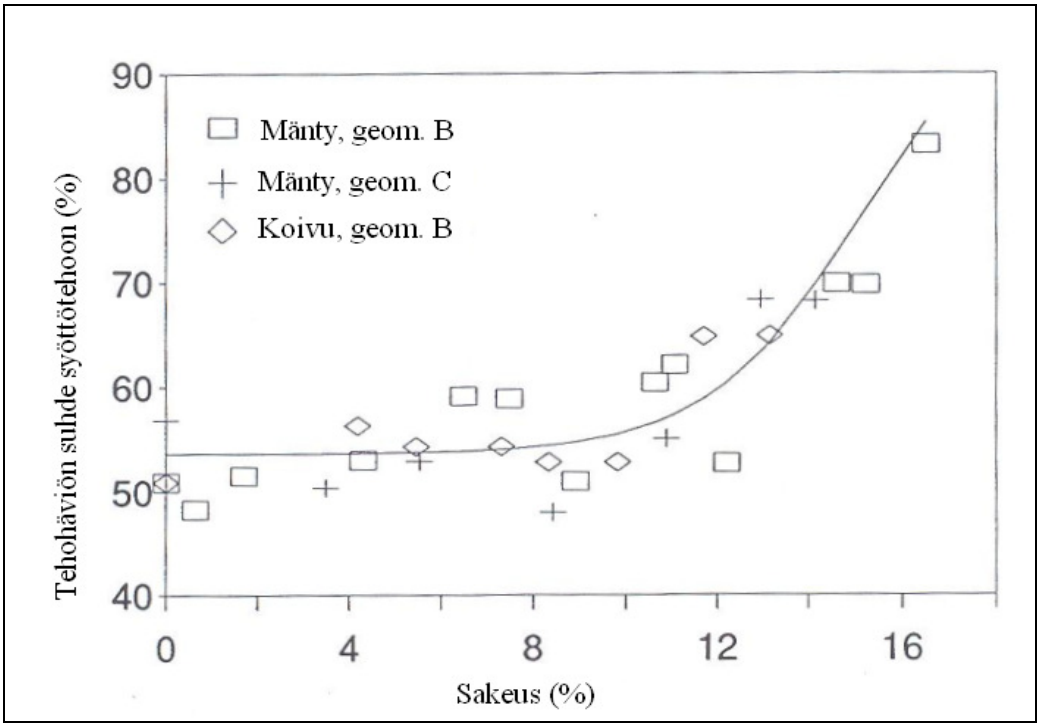


Kuva 3. Kuituverkoston myötöjännityksen suuruus kuitususpension sakeuden funktiona valkaistulle mäntysellulle. /5/

Kuvassa 3 Gullichsenin ja Härkösen mittauksiin perustuvat tulokset on esitetty mustilla pisteillä ja Duffy *et al.* /9/ esittämällä kaavalla (1) lasketut tulokset tähdillä. Kuvasta nähdään, että kaavalla (1) lasketut tulokset pätevät hyvin ainakin 10 %:n sakeuteen asti. Niinpä kaava (1) on käyttökelpoinen arvioitaessa keskisakeuksisen kuituverkoston myötöjännitystä. /5,9/

3.2.2 Tehodissipaatio

Hietaniemi ja Gullichsen /2/ tutkivat työssään myös moottorin syöttötehon suhdetta tehodissipaatioon. Tehodissipaatiolla tarkoitetaan kuitususpension fluidisoimisessa tehomäärää, mikä kuluu fluidisaation aikaansaamisen sijasta lämpöhäviöihin. Hietaniemi ja Gullichsen määrittivät tehodissipaation mittaamalla massan lämmönnousua sekoituksen aikana. Heidän mukaansa säiliöön syötetty energia menee lähinnä massan liikkeen aikaansaamiseksi ja sen ylläpitämiseen, sekä kuituverkoston hajottamiseen. Virtaus sen sijaan aiheuttaa turbulenssia, joka aiheuttaa kuitujen välisiä kontakteja ja kitkan vaikutuksesta massan lämpötilan nousemisen. Kuvassa 4 on esitetty Hietaniemen ja Gullichsenin mittaustulokset tehohäviön ja syöttötehon suhteesta eri virtausgeometrioilla massan sakeuden funktiona.



Kuva 4. Tehodissipaation suhde syöttötehoon verrattuna eri sakeuksilla. /2/

Kuvasta 4 nähdään, että 10 %:n rajasakeuden jälkeen yhä suurempi osa syötetystä energiasta muuttuu lämpöenergiaksi. Tulos ei ole riippuvainen virtausgeometriasta tai massalajista. Hietaniemi ja Gullichsen arvelevat, että tehohäviön kasvaminen johtuu siitä, että 10 % sakeuden yläpuolella kuituverkoston liikkeeseen liittyvä kitkatehohäviö kasvaa voimakkaasti pelkän

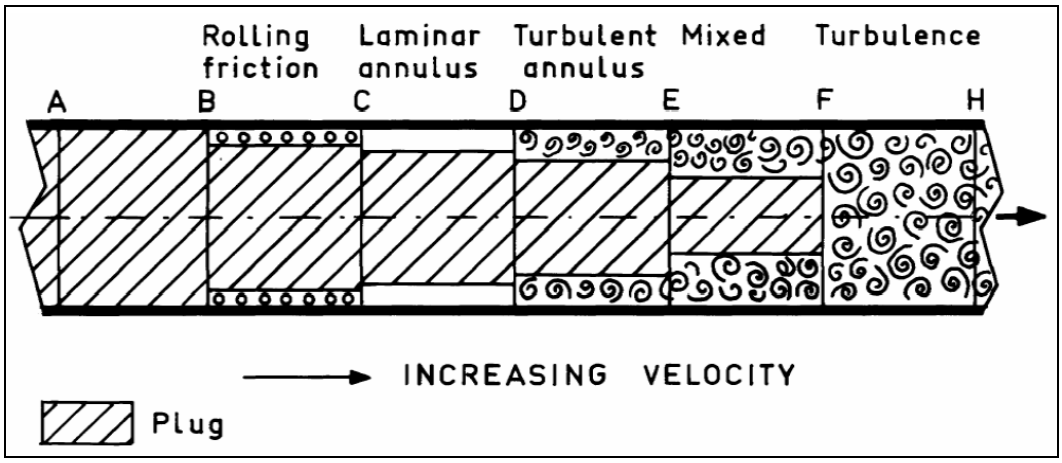
nesteen kitkatehohäviöihin verrattuna. Tästä syystä keskisakeuksisen massan käsittely suoritetaan yleensä alle 12 %:n sakeudessa. /2/

3.3 Keskisakean massan pumppaaminen

Kuitususpension virtausmekaniikka on erittäin monimutkaista verrattuna esimerkiksi puhtaan nesteen, kuten veden virtausominaisuuksiin. Kuitususpension sakeus vaikuttaa merkittävästi massan virtausominaisuuksiin, ja sakeuden noustessa kuitususpensio muistuttaa viskoosia kiintoainetta. Kuitususpension virtaus putkessa voidaan jakaa kolmeen perustyyppiin: Tulppavirtaus, sekavirtaus ja turbulenttinen virtaus. Aikaisemmin keskisakeaa massaa pumpattiin syrjäytysperiaatteeseen perustuvilla ruuvi- tai hammasrataspumpuilla. Fluidisoivien pumppujen kehitys on mahdollistanut keskisakean massan pumppaamisen keskipakopumpuilla, jolloin kuitususpensio saatetaan hetkellisesti turbulenttiseen tilaan. Keskipakopumpun yksinkertaisen rakenteen ansiosta pumppujen huoltokustannukset pysyvät alhaisina. Keskipakopumppujen energiatehokkuus on myös ruuvi- ja hammasrataspumppuja parempi, jolloin syntyy säästöjä pumppauskustannuksissa. Johan Gullichsenin, Esko Härkösen ja Toivo Niskasen muodostamalle tutkijaryhmälle myönnettiinkin vuoden 1984 Suomalainen insinöörityöpalkinto heidän tutkimasta tekniikastaan keskisakean massan siirtämiseksi keskipakopumpulla. Nykyisin keskisakean massan pumppaaminen hoidetaan lähes poikkeuksetta fluidisoivilla keskipakopumpuilla. /1,3,10/

3.3.1 Virtauksen kehittyminen

Keskipakopumpuissa fluidisaatio saadaan aikaiseksi hajottamalla flokkeja pumpun fluidisaattorin avulla. Tämä onnistuu aina 18 %:n sakeuteen asti. Kuituverkosto alkaa kuitenkin yhdistyä välittömästi pumpun jälkeen. Turbulenttinen virtauskenttä rajoittuu siis vain pumpun tai sekoittimen läheisyyteen. Kuvassa 5 on esitetty yhtenäisen kuituverkoston virtauksen kehittyminen tulppavirtauksesta turbulenttiseksi virtaukseksi.



Kuva 5. Massasuspension fluidisoitumisen eri vaiheet putkivirtauksessa. /11/

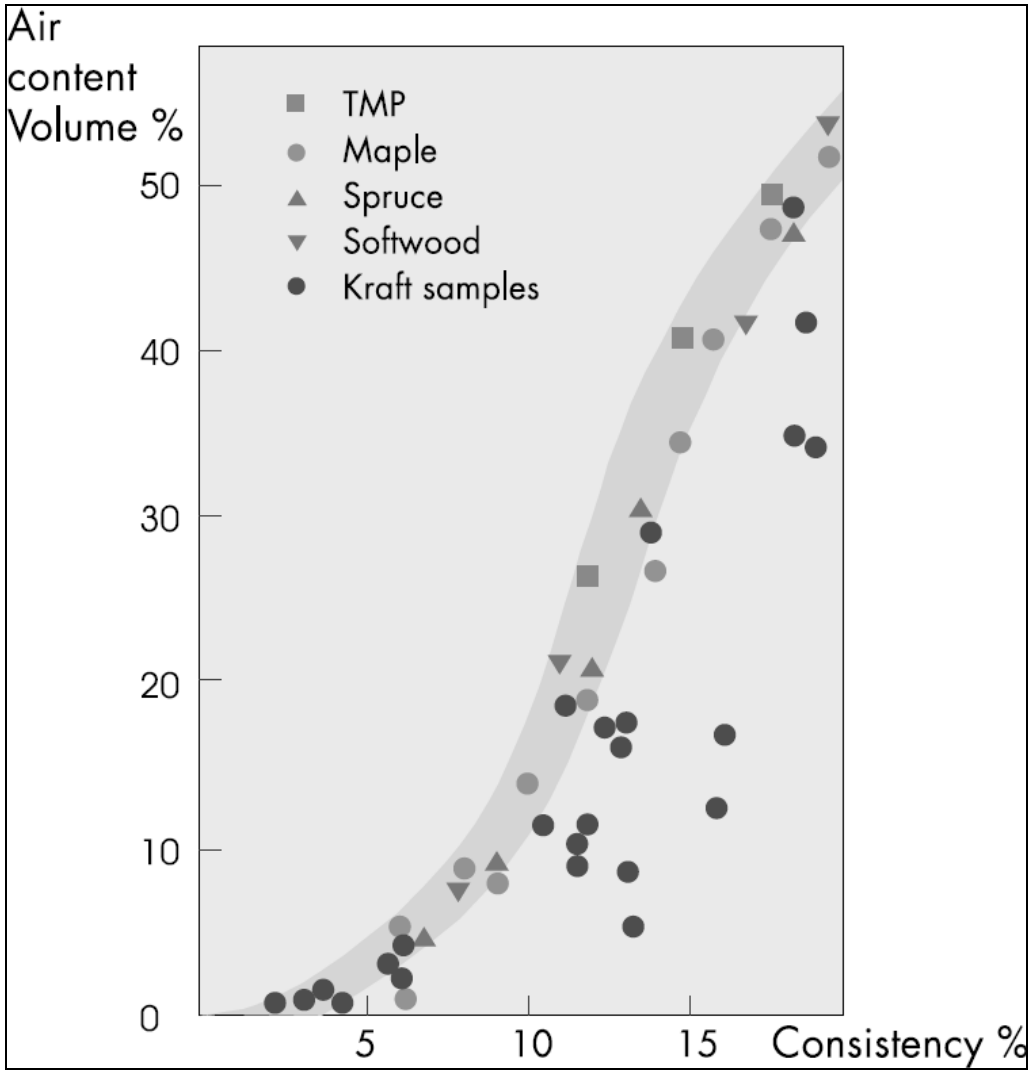
Kuvasta 5 nähdään, että massatulpan liikkeellelähdön ja fluidisoitumisen välillä on useita eri virtausvyöhykkeitä. Jotta kiinteä massatulppa ylipäätään saadaan liikkeelle, täytyy tulpan ja putken seinämän väliset kitkavoimat voittaa. Kun tulppaa paikallaan pitävät kitkavoimat on voitettu, alkaa massatulppa liikkua yhtenäisenä viskoelastisena runkona (B). Tätä virtausmuotoa kutsutaan tulppavirtaukseksi. Kun virtausnopeus kasvaa, vesi muodostaa renkaan massatulpan ja putken seinämän välille. Tällöin kuidut eivät ole enää suorassa kontaktissa putken seinämän kanssa. Alkuun nesterenkaan virtaus on laminaarista, mutta virtausnopeuden kasvaessa se muuttuu turbulenttiseksi. Nämä vaiheet ovat kuvassa vyöhykkeillä C ja D. Virtausnopeuden yhä kasvaessa turbulenssi voimistuu ja rikkoo keskellä virtaavaa kuitutulppaa. Yhä enemmän kuituja irtoaa tulpasta turbulenttisen virtauksen mukaan ja kuitutulppa pienenee. Lopulta virtausnopeuden kasvaessa kohdassa F koko kuitutulppa hajoaa ja virtaus on kauttaaltaan turbulenttista. Virtausaluetta tulppavirtauksen ja turbulenttisen virtauksen välillä kutsutaan sekavirtaukseksi. Jotta keskisakea massa fluidisoituisi putkivirtauksessa, olisi virtausnopeuden oltava niin suuri, ettei pumppaaminen olisi kitkahäviöiden vuoksi kannattavaa. Siksi keskisakea massa fluidisoidaan pumpuissa ja sekoittimissa hetkellisesti, jonka jälkeen turbulenssi pienenee nopeasti, ja virtaus jatkuu seka- tai tulppavirtauksena. /5,12/

3.3.2 Ilmanpoisto

Aikaisemmin käytettäessä syrjäytysperiaatteella toimivia sakean massan pumppauslaitteita, massan sekaan saatettiin syöttää ilmaa pienentämään putkiston

painehäviötä. Tutkimuksissaan Duffy *et al.* /13/ huomasivat, että erään putkiston painehäviö pieneni ilman syöttämisen ansiosta niin paljon, että jopa 30 %:n energiansäästö pumppauksessa oli mahdollinen. Massan sisältämä ilma on yleensä haitaksi itse pumppaamisen lisäksi usein myös koko prosessin toiminnalle. /13,14/

Kuitususpension kyky pidättää ilmaa riippuu voimakkaasti sakeudesta. Kuvassa 11 on esitetty kuitususpension kyky pidättää ilmaa sakeuden kasvaessa.



Kuva 6. Kuitususpension ilmapitoisuus sakeuden kasvaessa eri massalajeilla. /1/

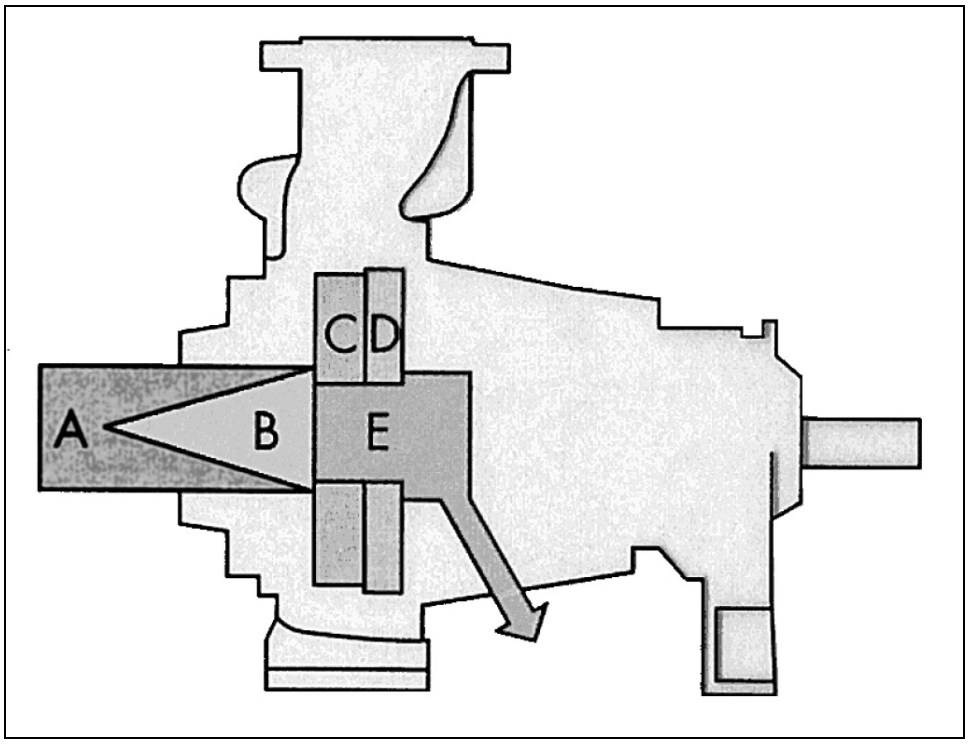
Kuvasta 6 nähdään, että keskisakeusalueella yleisesti käytetyssä 10 %:n sakeudessa kuitususpensio pystyy pidättämään sisällään noin 10 tilavuusprosenttia ilmaa. Sakeuden noustessa tästä suspension ilmanpidätyskyky kasvaa voimakkaasti. Sekoitettaessa kaasumaisia kemikaaleja kuitususpension joukkoon,

on tärkeää, että ilmaa on saatu poistettua mahdollisimman paljon ennen kaasumaisen kemikaalin lisäystä. Jos massa sisältää ennen sekoitusta huomattavasti ilmaa, sekoituksen laatu heikkenee ja kemikaali laimenee läsnä olevan ilman vuoksi. Ilman läsnäolo kuitususpensiossa on haitallista myös itse pumpun toiminnan kannalta, koska ilma laskee merkittävästi pumppauskapasiteettia jo 1-2 %:n pitoisuuksissa. Tämä johtuu lähinnä siitä, että pienet ilmakuplat aiheuttavat pumpussa voimakkaita paineiskuja, jolloin pumpun tehokkuus laskee. Pienemmissä määrin ilma on hyödyllistä myös fluidisoivan pumppaamisen kannalta, koska se vähentää putkiston paineiskuja ja painehäviötä, kuten aikaisemmin todettiin. /1,15/

Matalissa sakeuksissa, kuten paperi- tai kuivauskoneella kuitususpension sisältämää ilmaa voidaan poistaa perinteisillä alipainejärjestelmillä. Niissä ilmanpoistosäiliöön imetään alipaine imupumpun avulla, jolloin suspensio kiehuu alipaineen vaikutuksen vuoksi, ja ilma vapautuu. Pumpun ilmanpoisto on saatu aikaiseksi kehittämällä paine-ero pumpun imupuolen ja kaasunpoistokammion välille. Paine-ero saadaan aikaiseksi tyhjiöpumpun avulla tai nostamalla imupuolen paine riittävän korkeaksi. Myös erilaiset keskisakean massan purkulaitteet toimivat ilmaa poistavina laitteina samalla periaatteella kuin keskisakeuspumppu. /15,16/

3.3.3 Keskisakean massan pumppauslaitteistot

Keskisakean massan keskipakopumpun on kyettävä fluidisoimaan pumpattava kuitususpensio, joten juoksupyörän aiheuttamien leikkausvoimien on oltava riittävän voimakkaita. Ongelmana on, että kaikki massa ei automaattisesti ajaudu riittävän lähelle juoksupyörää, jotta suurin osa massasta saataisiin fluidisoituneeseen tilaan. Tämän vuoksi MC-pumpuissa joudutaan käyttämään eräänlaista juoksupyörään liitettyä ruuvia, fluidisaattoria, joka saattaa massan fluidisoituneeseen tilaan ennen varsinaista pumppausta. Kuvassa 7 on esitetty MC-pumpun eri toimintavyöhykkeet.



Kuva 7. Kaasunpoistolla varustetun keskisakean massan keskipakopumpun toimintavyöhykkeet. /3/

Kuvasta 7 nähdään viisi eri toimintavyöhykettä, jotka ovat oleellisia keskisakean massan pumppaamista ajatellen.

A. Fluidisoimisalue, jossa kuituverkosto hajoaa suurten leikkausvoimien vallitessa.

B. Kaasunerotusalue, jossa ilma ja muut kaasut erottuvat kuitususpensiosta keskipakovoiman vaikutuksesta.

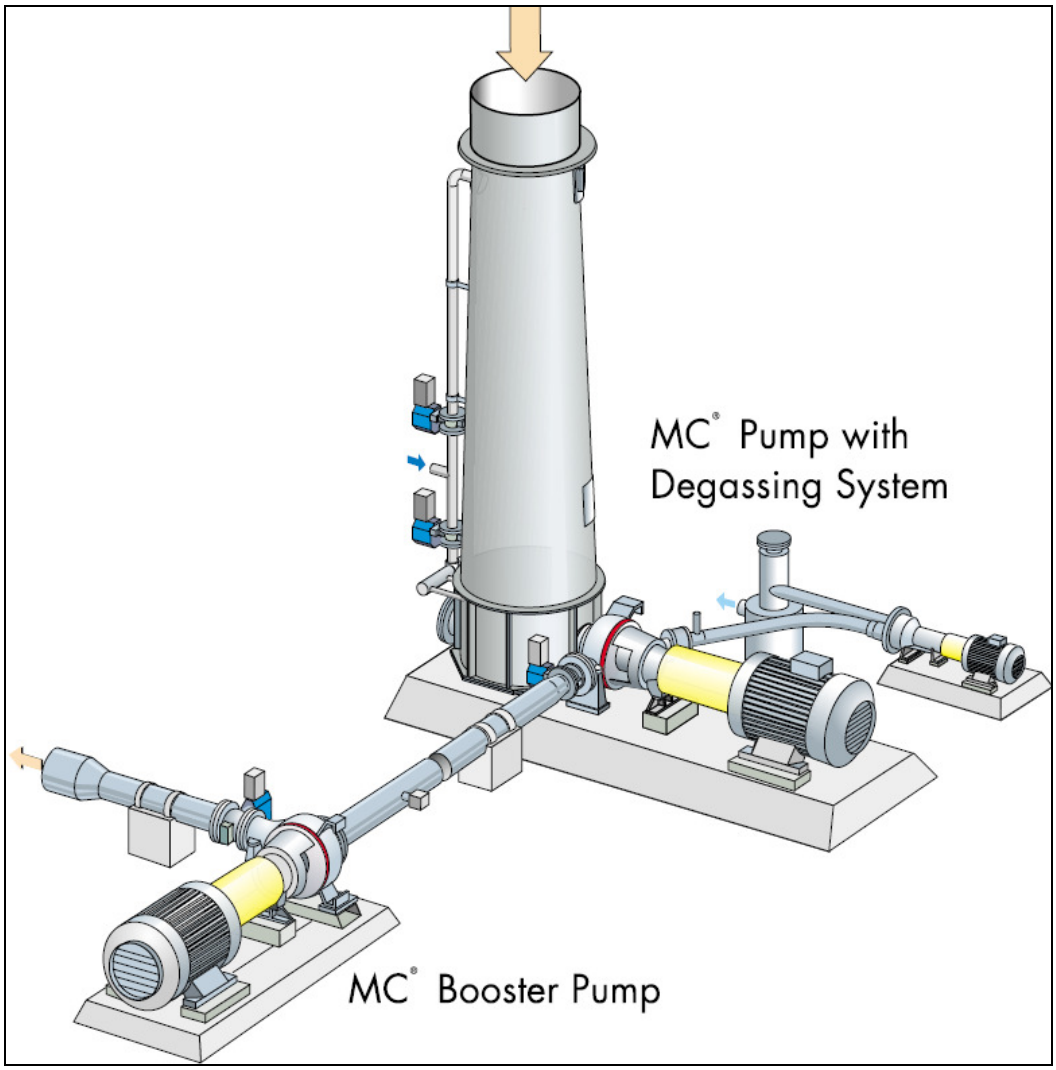
C. Pumppausalue, jossa juoksupyörän siivekkeet työntävät massaa eteenpäin.

D. Kuitujen palautusalue, jossa kaasunpoiston yhteydessä kaasun mukaan lähteneet kuidut palautetaan takaisin pumppaukseen juoksupyörässä olevien takasiipien avulla.

E. Kaasunpoistoalue, jossa suspensiosta erottunut ilma poistetaan pumpusta.

Mikäli kuitususpensio ei sisällä kaasua tai imupuolen paine on riittävän suuri, vyöhykkeet B, D ja E eivät ole välttämättömiä. Joissakin keskisakeuspumpuissa on erillinen kaasunpoistojärjestelmä, mikä lisää laitteiston käytettävyyttä. Nykyään on saatavana keskisakeuspumppuja, joiden kapasiteetti on 6000 tonnia ilmakuivaa sellua vuorokaudessa (adt/vrk) ja nostokorkeus 240 m. /1,3,17/

Välittömästi pumpun jälkeen kuidut alkavat muodostua jälleen yhtenäiseksi kuituverkostoksi, ja virtaus alkaa muuttua turbulenttisesta virtauksesta sekavirtaukseksi. Mitä sakeampaa massa on, sitä nopeammin virtauksen turbulenssi heikkenee pumpusta poispäin mentäessä. Integroiduilla paperi- ja sellutehtailla pumppausmatkat tehtaiden välillä saattavat olla useita satoja metrejä. Yleensä pitkien matkojen pumppaukset suoritetaan matalassa sakeudessa, mutta se on myös mahdollista keskisakeusalueella sakeuden ollessa 10 – 12 %. Tällöin käytetään apupumppua, joka sijoitetaan matkan varrelle hajottamaan syntynyttä kuituverkostoa ja lisäämään virtauksen turbulenssia. Apupumpussa ei enää tarvita kaasunpoistoa, koska ensimmäinen keskisakeuspumppu on jo alentanut suspension kaasupitoisuuden riittävälle tasolle. Kuvassa 8 on esitetty Ahlströmin apupumppausjärjestelmä. /1/



Kuva 8. Ahlströmin apupumppausjärjestelmä keskisakean massan siirtämiseksi normaalia pidempiä matkoja. /1/

Kuvassa 8 kaasunpoisto suoritetaan ensimmäisen keskisakeuspumpun yhteydessä olevalla erillisellä kaasunpoistojärjestelmällä. Apupumppausjärjestelmää voidaan käyttää myös korkeita linjapaineita vaativissa sovelluksissa, kuten happidelignifioinnissa ja peroksidivalkaisussa. Mikäli keskisakeuspumpun tuottama paine-ero ei ole prosessin kannalta riittävä, voidaan linjaan lisätä toinen pumppu, jolla paine putkistossa nostetaan riittävälle tasolle. /1/

4 KEMIKAALIEN SEKOITTAMINEN KESKISAKEUSALUEELLA

Sellu valkaistaan useassa eri vaiheessa käyttäen kaasumaisia ja nestemäisiä kemikaaleja, jotka reagoivat värillisen yhdisteiden kanssa vaalentaen massaa. Valkaisun alkuvaiheessa käytetyt kemikaalit ovat yleensä vähemmän selektiivisiä,

kuin valkaisun loppupäässä käytetyt kemikaalit. Selektiivisyydellä tarkoitetaan kemikaalin kykyä kohdistaa reaktio värilliseen ligniiniin selluloosan sijasta. Kemikaalin reagoidessa selluloosan kanssa tapahtuu ei-toivottuja reaktioita, jotka pilkkovat selluloosaketjuja aiheuttaen massan laadun heikkenemistä. Yleisesti käytettyjä vähemmän selektiivisiä kemikaaleja ovat happi ja otsoni. Nykyisin keittovaihetta seuraa yleisesti happivaihe, jota ei kuitenkaan lueta valkaisuprosessiksi, vaan keiton jatkamiseksi. Valkaisun loppupäässä käytetään yleensä selektiivisiä kemikaaleja, kuten klooridioksidia. Muita yleisesti käytettyjä valkaisukemikaaleja ovat vetyperoksidi, peretikkahappo ja hypokloriitti. Jotta valkaisusta saadaan tehokas ja tasalaatuinen, täytyy kemikaalit saada sekoitettua massan joukkoon tasaisesti. Nykyisin tähän tarkoitukseen keskisakealla massalla käytetään ns. fluidisoivia sekoittimia. /1,18/

Sekoitus on erittäin oleellinen prosessi sellun valkaisussa. Hyvällä sekoituksella aikaansaadaan tasainen kemikaalin sekoittuminen kuitususpension joukkoon, jolloin valkaisusta saadaan ulos hyvälaatuista massaa. Hyvä sekoittaminen vähentää myös valkaisun energiantarvetta ja pienentää kemikaalien kulutusta. Vähentynyt kemikaalien kulutus pienentää valkaisun ympäristökuormitusta. Voidaan siis sanoa, että hyvä massan ja kemikaalin sekoittaminen on avainasemassa valkaisun onnistumisen kannalta. /19/

4.1 Sekoituksen laadun kuvaaminen

Sekoituksen laatua voidaan tutkia sekoittimen ulostulon konsentraatio- tai lämpötilajakaumien avulla. Konsentraatiojakaumien tarkastelussa käytetään helposti jäljitettävää ainetta, kuten litiumkloridia, jonka pitoisuus voidaan määrittää massan joukosta sekoituksen jälkeen. Myös radioaktiivisia aineita voidaan käyttää määritysten tekemiseen. Viheriälehdon /18/ mukaan yleisimpiä sekoituksen tuloksen kuvaamiseen käytettyjä käsitteitä ovat sekoitusaste, erottumisen intensiteetti ja erottumisen taso. Kuitenkaan mitään yleisesti hyväksyttyä kvantitatiivista menetelmää sekoituksen laadun kuvaamiselle ei ole olemassa. Tehtaalla huono sekoittimen toiminta havaitaan yleensä parhaiten lisääntyneestä kemikaalikulutuksesta tai kappaluvun ja vaaleuden vaihtelusta.

Erittäin huono sekoittimen toiminta näkyy paljaalla silmällä katsottaessa epätasaisena massan värinä. /18,20/

Nykyisin käytettäessä fluidisoivia sekoittimia, tärkeä sekoitusta kuvaava käsite on fluidisaatiosuhde. Se kuvaa kuitususpension fluidisaatioastetta, ja se on määritelty seuraavasti.

$$R_f = \frac{N}{N_f} \tag{3}$$

missä R_f fluidisaatiosuhde

N pyörimisnopeus, 1/s

N_f fluidisaatiopyörimisnopeus, 1/s

Tehokkaan sekoittumisen perusedellytys on, että $R_f \geq 1$, eli sekoittimen on kyettävä vähintäänkin fluidisoimaan sekoitettava massa. /21/

4.1.1 Sekoitusaste

Sekoitusaste kuvaa seoksen homogeenisuutta. Käytännössä se tarkoittaa seoksen kemikaalikonsentraation suhteellista keskihajontaa. Jotta sekoitusaste voidaan laskea, tulee seoksen jonkin komponentin keskihajonta määrittää. Käytännössä tämä tapahtuu analysoimalla seoksesta otetut näytteet ja laskemalla niille keskiarvo kaavalla (4).

$$\bar{c} = \frac{1}{z} * \sum_{i=1}^{z} c_i \tag{4}$$

missä $\bar{c}$ kemikaalin keskimääräinen pitoisuus, kg/m^3

z näytteiden lukumäärä

c_i kemikaalin pitoisuus kohdassa i, kg/m^3

Tällöin koetuloksista laskettu keskihajonta saadaan laskettua kaavalla (5).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{z-1}\sum_{i=1}^{z}(c_i - \bar{c})^2} \qquad (5)$$

missä σ kemikaalin keskihajonta seoksessa, kg/m^3

Nyt kemikaalin keskimääräisen pitoisuuden ja keskihajonnan avulla voidaan laskea seoksen sekoitusaste kaavalla (6).

$$q = \frac{\sigma}{\bar{c}} * 100\% \qquad (6)$$

Missä q sekoitusaste, %

Seos on sitä homogeenisempaa, mitä lähemmäksi nollaa sekoitusasteen arvo menee. /22/

4.1.2 Erottumisen intensiteetti

Erottumisen intensiteetti kuvaa konsentraatioeroa, joka vallitsee kemikaalipisaroiden ja ympäröivän fluidin välillä. Erottumisen intensiteettiin vaikuttaa merkittävästi se, reagoiko lisätty kemikaali massasuspension kanssa. Koska valkaisussa kemikaalin vaikutus perustuu reaktioihin massasuspensiossa olevan ligniinin kanssa, on hyödyllistä tarkastella Patersonin erottumisen intensiteettiä (7), jossa kemikaalin reagointi on otettu huomioon.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{z}(c_i - \bar{c})^2}{z * \bar{c}^2} \qquad (7)$$

missä I Patersonin erottumisen intensiteetti

c_i kemikaalipitoisuus kohdassa i, kg/m^3

$\bar{c}$ Kemikaalin keskimääräinen pitoisuus, kg/m^3

Patersonin erottumisen intensiteetti on johdettu Danckwertsin kaavasta, jolla lasketaan erottumisen intensiteetti kemikaalille, joka ei reagoi massasuspension kanssa. Käsiteltäessä valkaisua, Patersonin kaava on käyttökelpoisempi, koska se ottaa huomioon kemikaalin reagoimisen. Mitä pienemmän arvon erottumisen intensiteetti saa, sitä paremmin kemikaali on jakautunut kuitususpension joukkoon. /23/

4.1.3 Sekoitusaika ja sekoituspinta

Sekoitusaika on aika, joka kuluu tietyn homogeenisuusasteen saavuttamiseksi massasuspensiossa. Sekoituksen alussa seoksen homogeenisuus kasvaa nopeasti sekoitusajan funktiona. Myöhemmässä vaiheessa seoksen homogeenisuus kasvaa huomattavasti hitaammin, ja sekoitusasteen määritelmän mukaan täydellistä sekoittumista ei voida koskaan saavuttaa. Jotta sekoitin osattaisiin mitoittaa oikein, on tärkeää tietää sekoitusaika, joka tarvitaan halutun sekoitustuloksen saavuttamiseksi tietyllä roottorin pyörimisnopeudella. Sekoitusajan laskennalle on olemassa useita kokeellisesti määritettäviä yhtälöitä. Yhtälössä (8) sekoitusaika on määritetty puhtaasti kokeellisten vakioiden kautta. Yhtälössä (9) käytetään Patersonin erottumisen intensiteettiä sekoitusajan laskentaan.

$$\ln\left(\frac{q}{100}\right) = k_1 - k_2 * \theta \qquad (8)$$

ja $$\ln I = -k_3 * \theta \qquad (9)$$

joissa

	q	sekoitusaste, %
	θ	sekoitusaika, s
	I	Patersonin erottumisen intensiteetti
	k_1, k_2, k_3	kokeellisesti määritettäviä vakioita

Sekoitusaika voidaan laskea sekoittimen kapasiteetin perusteella, kun tiedetään sekoittimen vapaa tilavuus ja massasuspension läpivirtaus. Tällöin massasuspension viipymäaika sekoittimessa voidaaan määrittää yksinkertaisella kaavalla (10).

$$\theta = \frac{V_0}{\dot{V}} \tag{10}$$

missä V_0 sekoittimen vapaa tilavuus, m^3

$\dot{V}$ Kuitususpension läpivirtaus, m^3/s

Sekoittimen vapaa tilavuus saadaan laskettua vähentämällä sekoitusastian tai sekoittimen tilavuudesta roottorin tilavuus. /18/

Sekoittimen maksimikuormituksen selvittämiseksi on tärkeä tietää sekoittimen sekoituspinta. Sekoituspinnalla tarkoitetaan pinta-alaa, jolla roottorin lapa pyyhkäisee massasuspensiota pyörähtäessään. Lavan paksuus ei juuri vaikuta sekoituspinnan suuruuteen, mutta on merkittävä tekijä roottorin kestävyyden kannalta. Sekoituspintaan sen sijaan vaikuttaa voimakkaasti roottorin lavan pituus, leveys ja muoto. Nämä tekijät vaikuttava samalla myös voimakkaasti tehoon, joka vaaditaan lavan liikuttamiseen massasuspensiossa.

$$A = \frac{k_L * \frac{\pi}{4} * \left[(D + 2 * l)^2 - D^2\right] * N}{\dot{m}} \tag{11}$$

missä A sekoituspinta, m^2/t massaa

k_L lapojen lukumäärä

D roottorin halkaisija, m

l lavan pituus, m

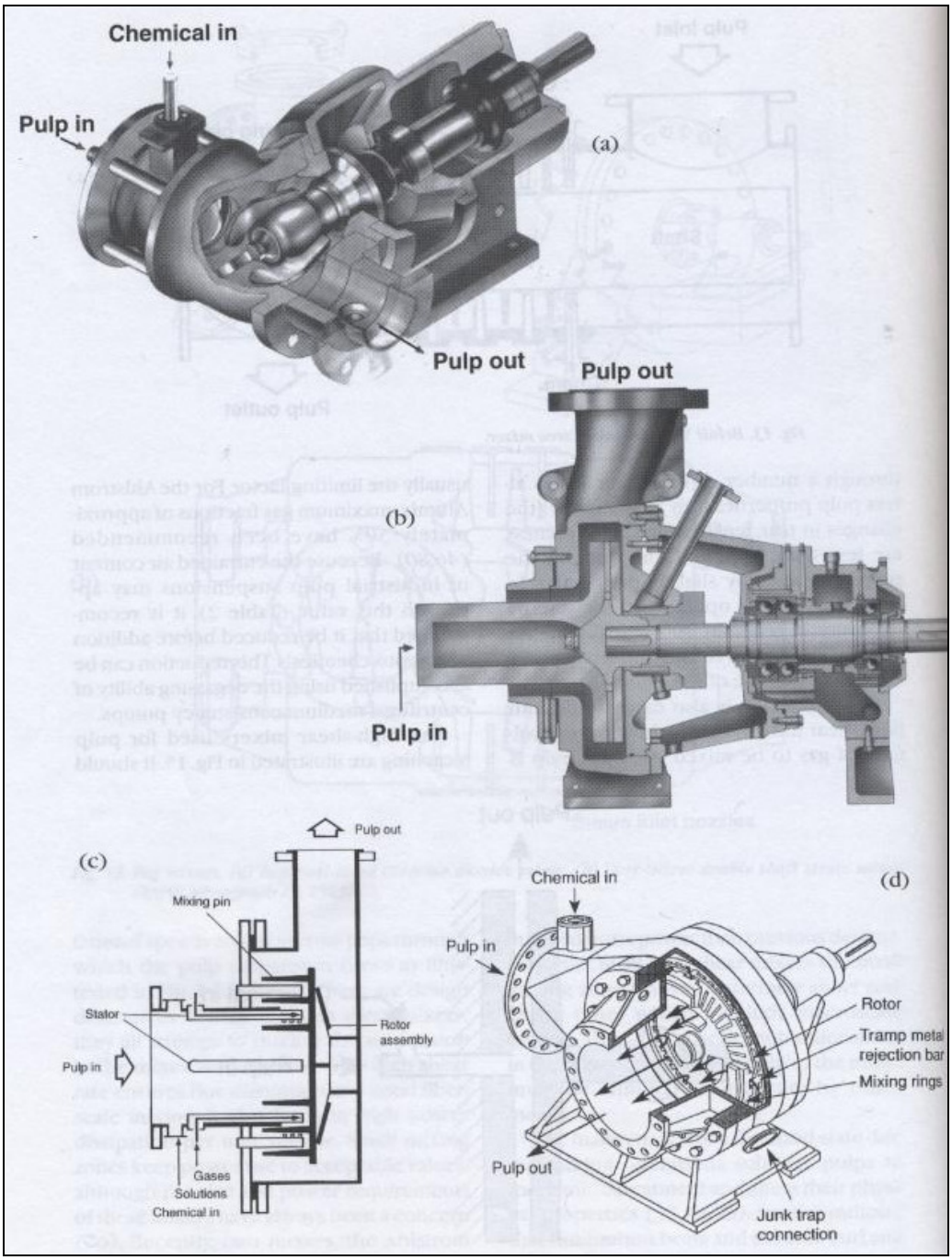
N pyörimisnopeus, 1/s

$\dot{m}$ massasuspension massavirtaus, kg/s

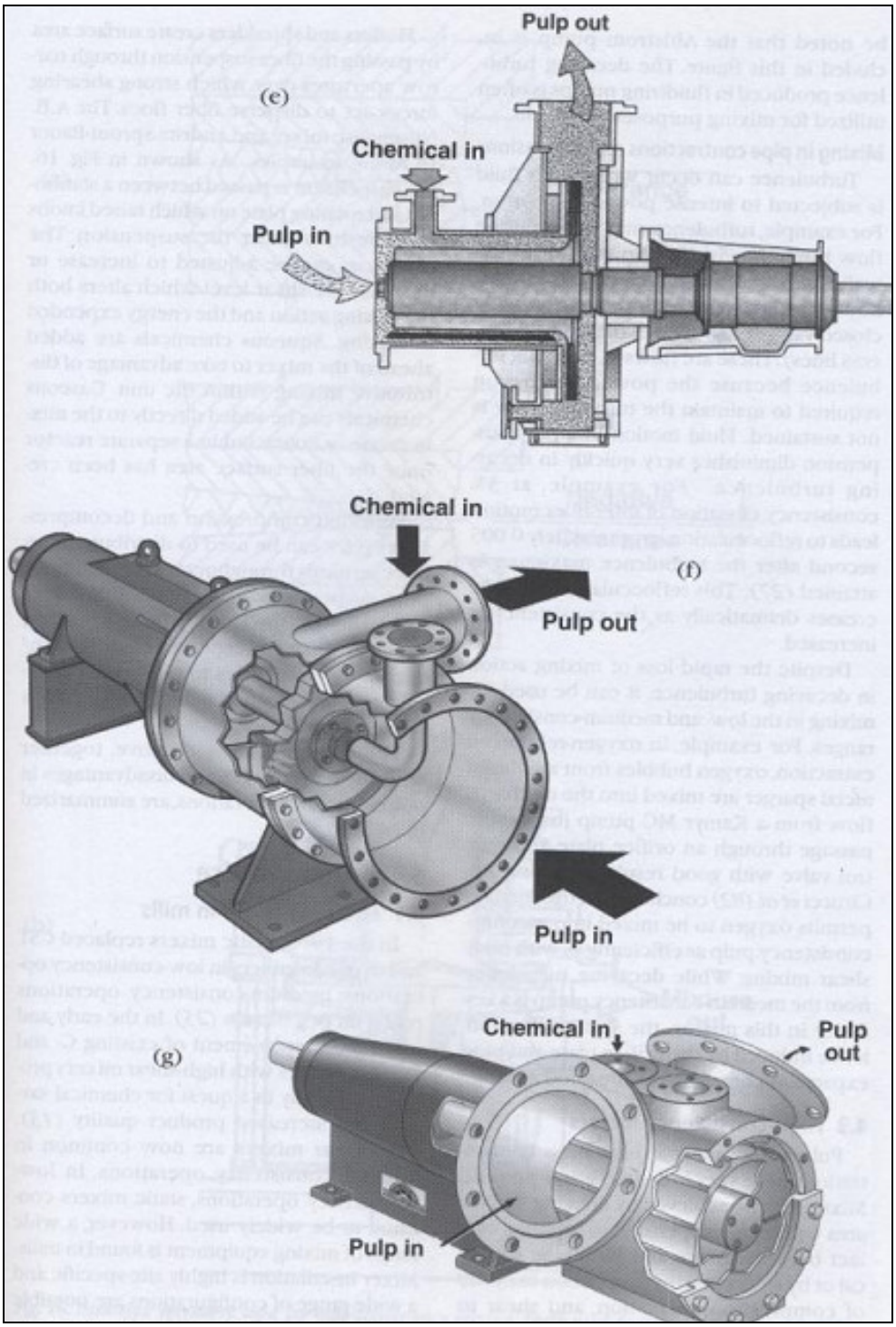
Sekoituspintaa laskettaessa tehdään olettamus, että roottorin lapa muodostaa liikkuessaan vain yhden pinnan. Viheriälehdon /18/ mukaan sekoitettaessa kaasuja sekoituspinnan tarve on huomattavasti suurempi kuin nestemäisiä kemikaaleja sekoitettaessa. Tämä ilmenee myös Meredithin /24/ tekemistä tutkimuksista, joissa sekoitettiin nestemäistä ja kaasumaista klooria massan joukkoon. Nestemäiselle kloorille sekoituspinnan tarpeeksi Meredith määritti laboratorio-olosuhteissa 6000 m^2/t, kun taas kaasumainen kloori vaati sekoituspintaa 20 000 m^2/t samantasoisen sekoittumisen saavuttamiseksi. /18,24/

4.2 Keskisakeusalueella käytetyt sekoittimet

Suurin osa keskisakean massan sekoituslaitteista on niin sanottuja fluidisoivia sekoittimia (high-shear), joissa kuituverkosto saatetaan turbulenttiseen tilaan. Sekoittaminen tapahtuu todella nopeasti, tyypillinen viipymäaika sekoittimessa on luokkaa 0,05-0,5 sekuntia pienen sekoitustilavuuden vuoksi. Fluidisoivat sekoittimet hajottavat tehokkaasti flokkeja suurten leikkausvoimien ansiosta, ja mahdollistavat näin hyvän sekoitustuloksen myös kuitutasolla. Huonona puolena fluidisoivissa sekoittimissa on niiden suuri tehonkulutus sekoittimen tilavuusyksikköä kohden. Toisaalta laitteiden pienen sekoitustilavuuden vuoksi tehonkulutus on pysynyt siedettävänä. Sekoitettaessa kaasumaisia kemikaaleja fluidisoivilla sekoittimilla, sekoitettavalla kaasumäärällä on tietty raja, jonka jälkeen kaasu kerääntyy sekoittimen keskiosaan, eikä kaasun sekoittumista massan joukkoon tapahdu. Tyypillisesti tämä raja on luokkaa 30 % massan tilavuudesta. Pienemmillä kaasumäärillä saadaan aikaan tehokkaampi ja tasaisempi sekoittuminen. Siksi ennen kaasumaisen kemikaalin lisäämistä massasta täytyy poistaa ilmaa. Kuvissa 9 ja 10 on esitetty yleisesti teollisuudessa käytössä olevia fluidisoivia sekoittimia. /1,12,25/



Kuva 9. Yleisesti käytettyjä high-shear – sekoittimia: (a) Ahlström Ahlmix, (b) Ahlströmin MC-pumppu, (c) Beloit-Rauman R sarjan sekoitin, (d) Ingersoll-Rand Hi-Shear. /25/

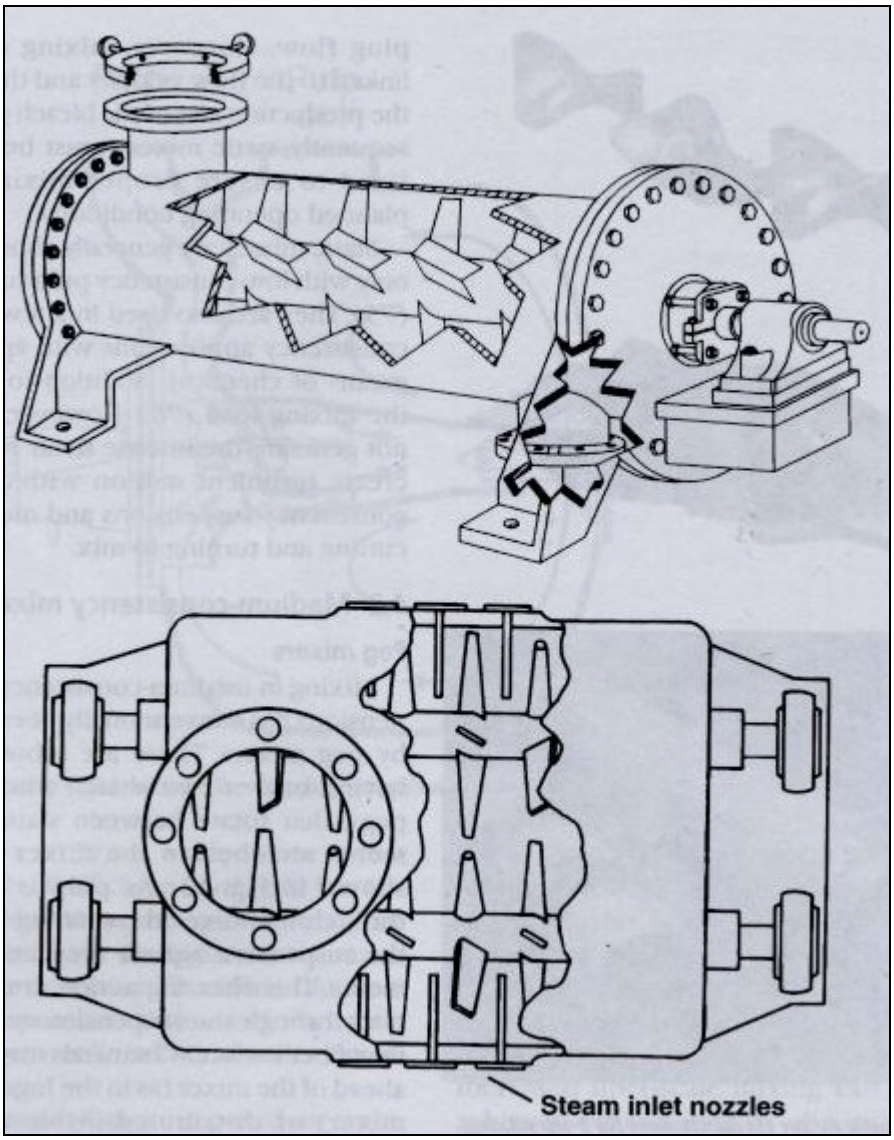


Kuva 10. Yleisesti käytettyjä high-shear – sekoittimia: (e) Kamyr MC, (f) Sunds SM ja (g) Sunds T. /25/

Kuten kuvista 9 ja 10 huomataan, eri valmistajien sekoittimet muistuttavat ulkoisesti hyvin paljon toisiaan. Suurimmat erot ovat sekoittimen roottorin rakenteessa ja turbulenssiripojen sijoittelussa. Huomattavaa on, että kuvassa 1 on esitetty myös Ahlströmin MC-pumppu (b). Joissakin tapauksissa sekoitettaessa nestemäisiä kemikaaleja kuitususpension joukkoon, keskisakeuspumpun

aiheuttama turbulenssi on riittävä kunnollisen sekoituksen aikaansaamiseksi, eikä erillistä sekoitinta tarvita. /25/

Ennen fluidisoivien sekoittimien aikakautta keskisakean massan sekoittamiseen käytettiin niin sanottuja tappisekoittimia. Rakenteeltaan ne ovat putkimaisia säiliöitä, joiden sisällä on yksi tai kaksi akselia. Akseleihin liitetyt tapit pyörivät kiinteiden, sekoittimen kuoreen kiinnitettyjen elementtien (staattoreiden) välissä. Pyörivät tapit aiheuttavat leikkausvoimia syötettyyn massaan sen joutuessa staattoreiden ja tappien väliin, jolloin kuituflokkien järjestäytyessä uudelleen paljastuu uutta kuitupintaa, jonka kanssa sekoitettu kemikaali voi reagoida. Pyörimisnopeudet tappisekoittimissa ovat niin pieniä, että ne eivät riitä kokonaan hajottamaan flokkeja. Kuvassa 11 on esitetty rakennekuvat kahdesta eri käyttötarkoitukseen suunnitellusta tappisekoittimesta.



Kuva 11. Kahden erityyppisen tappisekoittimen rakenne. /25/

Kuvassa 11 ylempänä on yksiakselinen Ingersoll-Rand klooridioksidisekoitin ja alempana kaksiakselinen Dorr-Oliver höyrysekoitin. Tappisekoittimet alkavat olla vanhentunutta teknologiaa keskisakean massan sekoituksessa, ja tilalle ovat tulleet aikaisemmin mainitut fluidisoivat sekoittimet. /25,26/

Myös staattisten sekoittimien käyttöä keskisakean massan sekoituksessa on tutkittu, mutta teollisuudessa kyseinen teknologia ei ole ainakaan vielä saanut jalansijaa. Staattisia sekoittimia käytettäessä keskisakeusalueella ongelmaksi muodostuu niiden tarjoama huono sekoitus kuitu- ja mikrotasolla. Sen sijaan matalalla sakeusalueella staattiset sekoittimet ovat yleisesti käytettyjä. Staattisten

sekoittimien kehittäminen keskisakeuksisen massan sekoitukseen soveltuviksi toisi merkittäviä säästöjä energiankulutuksen suhteen. /25,26/

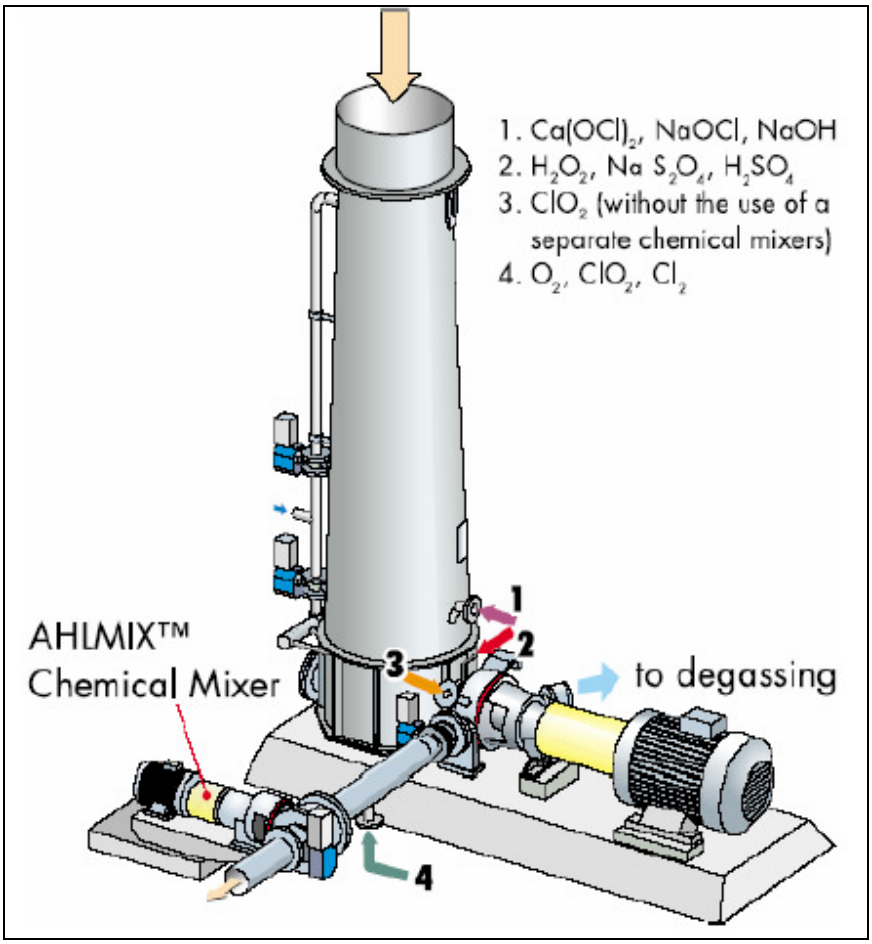
4.3 Valkaisussa käytetyt sovellutukset

Valkaisun eri vaiheissa käytetään yleensä samanlaisia sekoittimia. Massan sekoitukseen vaikuttavat ominaisuudet kuitenkin muuttuvat merkittävästi mentäessä eteenpäin valkaisusekvenssissä. Tämä johtuu siitä, että kuitujen joukosta peseytyy pois keitosta kuidun mukana tulleita pinta-aktiivisia aineita, jotka saavan massan vaahtoutumaan sekoittimessa. Näin ollen happivalkaisuun menevän massan sekoittuminen on täysin erilainen, kuin esimerkiksi klooridioksidivaiheeseen syötettävän massan, vaikka molempiin kohdistettaisiin sama sekoitusteho samanlaisella sekoittimella. Loppuvaiheessa pinta-aktiivisten aineiden puuttuminen aiheuttaa sen, että kaasumaisten kemikaalien kuplat yhdistyvät helpommin ja nopeammin suuremmiksi kupliksi, jolloin aineensiirto reaktorissa heikkenee.

Myös eri kemikaaleilla on niille ominaisia piirteitä, jotka vaikuttavat sekoittamiseen. Happi ja klooridioksidi tarvitsevat pidemmän viipymäajan reaktorissa, kun taas otsonivaiheessa valkaisureaktiot tapahtuvat jo sekoittimessa. Otsonoinnissa valkaisureaktioita ei enää tapahdu reaktorin sisällä. Otsonireaktorin tarkoituksena onkin lähinnä tasoittaa massan virtausta sekoituksen jälkeen ja edesauttaa kaasun erottumista. /27/

Tarkasteltaessa eri valkaisuvaiheita, itse laitteisto säilyy pääpiirteittäin samanlaisena. Suurimmat erot ovat materiaalivalinnoissa, koska eri kemikaaleilla on erilaisia korrosiivisia ominaisuuksia. Yleensä valkaisuvaihe koostuu MC-pumpusta, sekoittimesta ja reaktorista. Nestemäisille kemikaaleille MC-pumpun aiheuttama voimakas turbulenssi on riittävä hyvän sekoituksen aikaansaamiseksi, jolloin erillinen kemikaalisekoitin on tarpeeton. Tällöin kemikaali syötetään pumpun imupuolelle, tai suoraan pumppuun. Kaasumaiset kemikaalit syötetään yleensä putkistoon pumpun jälkeen, jolloin erillinen kemikaalisekoitin on välttämätön. Klooridioksidin sekoittamisessa pelkän pumpun käyttäminen on joskus mahdollista, mutta yleisesti erillisen sekoittimen käyttäminen on

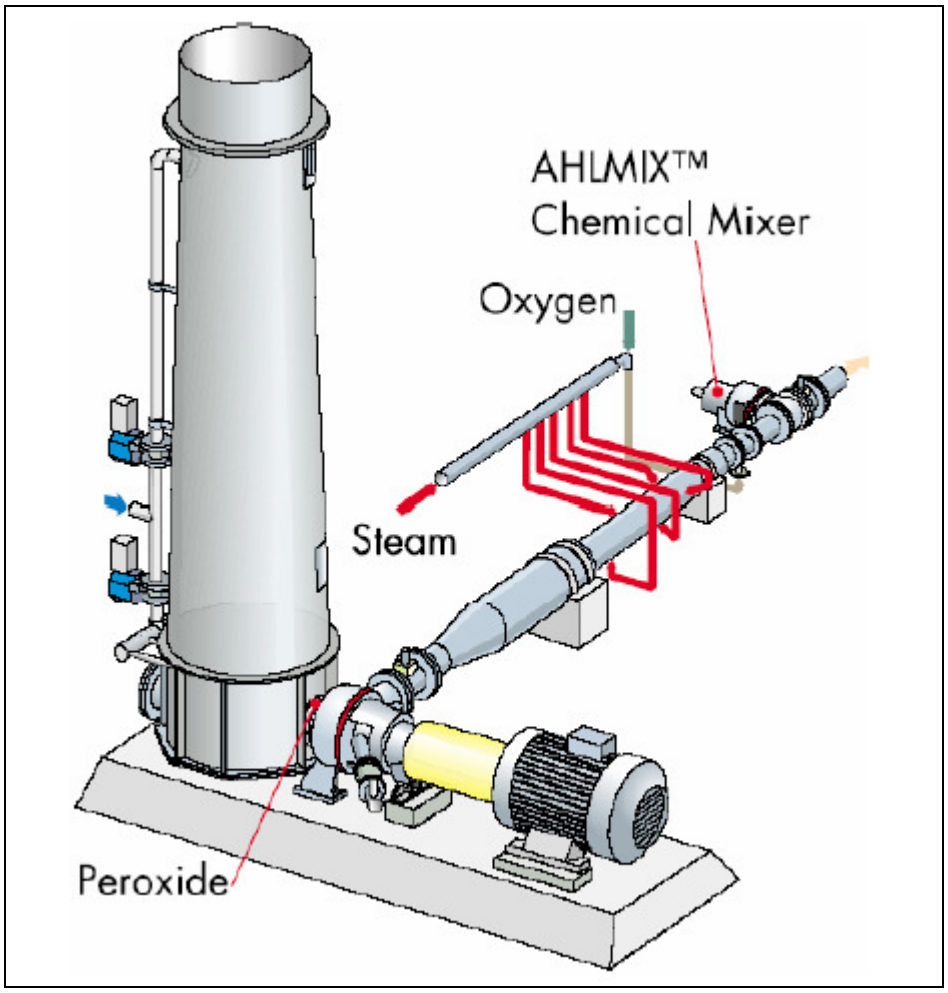
välttämätöntä, tai vähintäänkin suositeltavaa. Kuvassa 12 on esitetty Ahlströmin keskisakean massan pumppaus- ja sekoituslaitteisto, sekä kohdat mihin eri kemikaalit yleensä syötetään. /1/



Kuva 12. Ahlströmin keskisakean massan pumppaus- ja sekoituslaitteisto, sekä kemikaalien syöttöpisteet. /1/

Kuvasta 12 nähdään, että nestemäisten kemikaalien syöttö tapahtuu yleensä ennen MC-pumppua, kun taas kaasumaiset kemikaalit syötetään pumpun jälkeen ennen sekoitinta. Klooridioksidi syötetään yleensä vasta pumpun jälkeen, mutta mikäli erillisen sekoittimen käytöstä on luovuttu, syöttö tapahtuu suoraan pumppuun.

Massan lämpötila vaihtelee eri valkaisuvaiheissa. Korkeimmillaan lämpötila on happivaiheessa, jossa se lämmitetään jopa 105 °C lämpötilaan. Lämmittämiseen käytetään suoraa höyrylämmitystä, jolloin höyryä syötetään massan joukkoon ennen kemikaalisekoitinta. Kuvassa 13 on esitetty Ahlströmin höyryn ja hapen sekoituslaitteisto. /1/



Kuva 13. Ahlströmin höyryn ja hapen sekoituslaitteisto. /1/

Kuvasta 13 nähdään, että happi syötetään putkistoon yhdessä höyryn kanssa. Sekoittimessa molemmat kaasut pyritään dispergoimaan mahdollisimman tasaisesti ja pieninä kuplina massan joukkoon. Myös höyrylämmityksen kannalta höyryn tasainen syöttö mahdollisimman pieninä kuplina on tärkeää tasaisen lämmitystuloksen ja mahdollisimman suuren lämmönsiirtopinnan saavuttamiseksi. Hapen suhteen tasaisella dispergoinnilla saavutetaan tasainen valkaisutulos ja suuri aineensiirtopinta neste- ja kaasufaasin välille. /1/

5 KAASUJEN SEKOITTAMINEN KESKISAKEUSALUEELLA

Valkaisussa käytetään kaasumaisia kemikaaleja, kuten happea ja otsonia, jotka sekoitetaan nykyään lähes poikkeuksetta fluidisoivilla sekoittimilla. Klooridioksidi syötetään kylmänä nestemäisenä liuoksena massan joukkoon, mutta lämpötilan noustessa klooridioksidikaasua saattaa vapautua nestefaasista.

Klooridioksidivaihetta suunniteltaessa olosuhteet pyritään valitsemaan siten, että kaasun vapautumista tapahtuisi mahdollisimman vähän. Yleensä reaktori pyritään tekemään sen verran korkeaksi, että hydrostaattinen paine reaktorin alaosassa estää kaasun vapautumisen nestefaasista, kunnes reaktiot kuidun kanssa ovat tapahtuneet. Klooridioksidin sekoittaminen keskisakeuspumpussa ei ole siitäkään syystä suositeltavaa, että kaasua poistavana laitteena osa klooridioksidista saattaa kaasuuntua pumpussa ja poistua järjestelmästä. /28/

Joitakin nestemäisiä apu- ja valkaisukemikaaleja pystytään sekoittamaan massan joukkoon keskisakean massan pumpuissa, mutta kaasun lisääminen vaatii aina erillisen sekoittimen. Kun kuitususpension joukkoon lisätään kaasua, muodostuu kolmifaasisysteemi, jonka tehokas sekoittaminen on avainasemassa valkaisun onnistumisen kannalta. Kaasun läsnäolo muodostaa omat haasteensa massan sekoittamisen ja käsittelyn suhteen. /1,29/

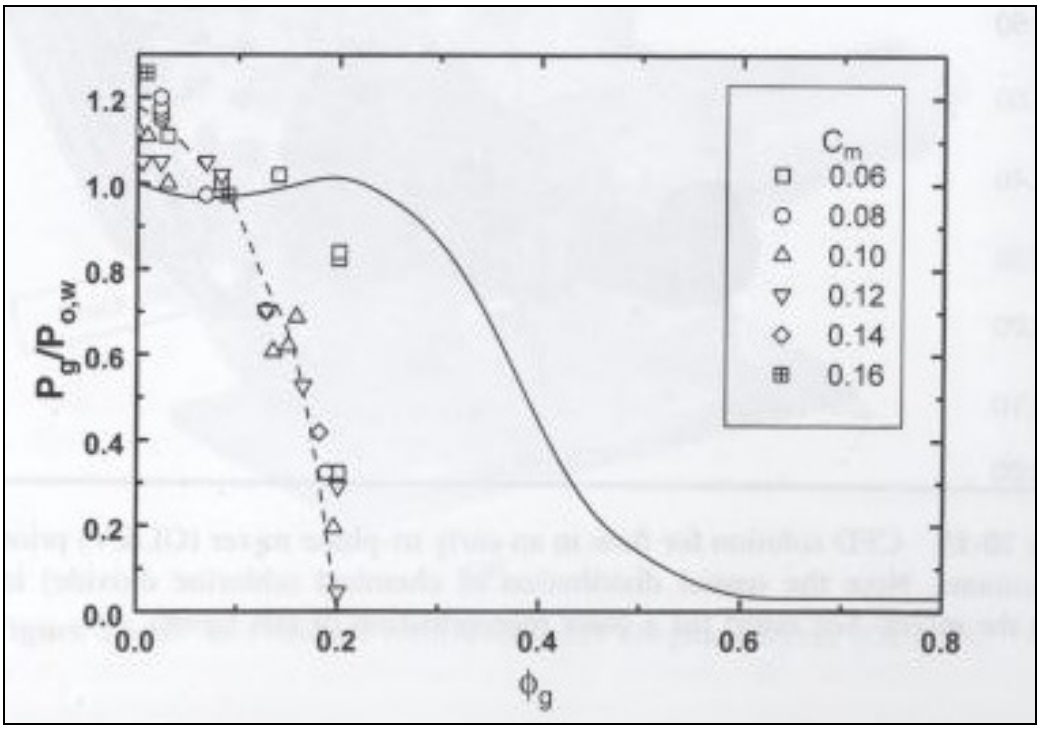
5.1 Sekoituksen tavoite

Sekoitettaessa kaasumaisia kemikaaleja kuitususpensioon, tavoitteena on saada aikaan dispersio, jossa pienet kaasukuplat ovat jakautuneet tasaisesti kaikkialle. Tasaisen kemikaalijakauman saavuttamiseksi on ehdottoman tärkeää, että tehokas sekoittuminen saadaan aikaan niin suuremmalla makrotasolla, kuin pienemmillä kuitu- ja mikrotasoillakin. Mitä tasaisemmin kaasu on jakautunut massan joukkoon, sitä yhtäläisemmin jokainen kuitu pystyy reagoimaan kaasun kanssa. Mikäli kaasu on sekoittunut epätaisaisesti massan joukkoon, osa kuiduista poistuu reaktorista ylivalkaistuina, ja osa ei ole reagoinut kemikaalin kanssa ollenkaan. Tällöin massa on epätasalaatuista, ja kemikaalia on kulunut hukkaan. Yleensä huonosta sekoituksesta johtuvaa epätasaista valkaisutulosta joudutaan korjaamaan lisäämällä käytettävää kemikaalimäärää. Yhdessä valkaisuvaiheessa saavutettava kappareduktio on rajallinen, ja tietyn rajan jälkeen valkaisukemikaalia lisäämällä ei pystytä enää merkittävästi parantamaan valkaisutulosta. Siksikin on tärkeää, että kemikaali on sekoittunut tasaisesti massan joukkoon, jolloin kemikaalista saatava hyöty on parhaimmillaan. Hyvällä sekoituksella voidaan siis vaikuttaa merkittävästi kemikaalien kulutukseen ja sitä kautta myös valkaisukustannuksiin ja ympäristökuormitukseen. Kemikaalisekoittimen on siis kyettävä tuottamaan

riittävän pieniä kuplia, jotta aineensiirtopinta-ala olisi mahdollisimman suuri massan ollessa reaktorissa. Kaikenkaikkiaan voidaan sanoa, että sekoittaminen on avainasemassa valkaisun onnistumisen kannalta. /1,25,29/

5.2 Sekoituksen tehonkulutus

Eräs suunnittelukriteeri nykyaikaisille fluidisoiville keskisakean massan sekoittimille on, että niiden fluidisaatiosuhteen tulee olla yli yksi. Toisin sanoen niiden on kyettävä fluidisoimaan sekoitettava kuitususpensio kokonaan. Kaasun lisääminen kuitususpension joukkoon vähentää sekoittimen tehonkulutusta, koska kaasulla on taipumus kerääntyä roottorin keskiöön. Vertaamalla sekoittimen tehonkulutusta kaasun lisäämisen jälkeen tilanteeseen, jossa kaasua ei vielä ollut lisätty, saadaan sekoituksen tehosuhde, jonka avulla voidaan arvioida sekoituksen laatua kaasun läsnäollessa. Tietyssä pisteessä kaasumäärän noustessa sekoittimen tehosuhde alkaa laskea jyrkästi. Tässä vaiheessa kaasua alkaa kerääntyä voimakkaasti roottorin keskiosaan, jolloin kuitususpensio pakenee sekoittimen reunoille, eikä kaasu dispergoidu enää tehokkaasti kuitususpensioon. Kuvassa 14 on Benningtonin /29/ määrittämä tehosuhde kaasumäärän funktiona hänen käyttämälleen laboratoriosekoitinlaitteistolle. Yhtenäinen viiva kuvaa pelkälle vedelle määritettyä tehosuhdetta. /29/



Kuva 14. Sekoituksen tehosuhde massasuspension kaasumäärän noustessa. /29/

Kuvasta 14 nähdään, että kaasumäärän noustessa yli 10 %:n, tehosuhde laskee jyrkästi kaasun kerääntyessä roottorin keskiosaan, jolloin roottorin massaan kohdistama sekoitusteho laskee. Tehosuhdekäyrä on jokaiselle sekoittimelle ominainen johtuen rakenteellisista eroista, ja yleensä teollisilla korkeaintesiteettisillä sekoittimilla vastaava raja saavutetaan kaasupitoisuuden ollessa luokkaa 30 %. /25,29/

Sekoituksen tehodissipaation avulla voidaan arvioida epäsuorasti sekoituksen fluidiin aiheuttamaa liikkeen intensiteettiä. Bournen /30/ mukaan kaikki laitteet, jotka käyttävät saman energiamäärän tilavuusyksikköä kohden, saavat aikaan samantasoisen sekoittumisen mikrotasolla. Olettaen, että sekoitusenergia on jakautunut tasaisesti koko sekoittimen alueelle. Korkeaintensiteettisissä sekoittimissa sekoitusteho jakautuu tasaisesti koko sekoittimen alueelle. Korkeaintensiteettisissä sekoittimissa tehohäviö on käyttökelpoinen parametri. Sen avulla voidaan arvioida melko luotettavasti sekä sekoittimen kykyä luoda turbulenssia massasuspensioon, että saavutettua sekoituksen tasoa. Korkeaintensiteettisten sekoittimien tehodissipaatio on luokkaa 10^6-10^7 W/m^3. /25,30,31/

Sekoituksen energiankulutuksen avulla voidaan arvioida turbulenssin määrää, jonka sekoitus on saanut aikaan massasuspensiossa ja tätä kautta toteutuneen sekoituksen kokonaistasoa. Energiamäärä, joka massasuspension sekoittamiseen tarvitaan, on voimakkaasti riippuvainen sakeudesta. Sakeuden noustessa sekoituksen energiankulutus nousee, koska sakeampi massaa vastustaa voimakkaammin liikettä. Sakeuden merkitystä massan sekoittamisessa kuvaa hyvin myös tehtaalla käytettävien fluidisoivien sekoittimien tehonkulutus. Sakeuden vaihdellessa välillä 9-16 % vaihtelee tehonkulutus välillä 8-43 MJ/ tonni sellua. Vaikka eri korkeaintensiteettisillä sekoittimilla on huomattavia eroja sekoitusajassa, on siitä huolimatta kaikilla sekoittimilla minimienergiankulutus luokkaa 11 MJ/t sellua. Energiamääriä tarkastellessa on kuitenkin muistettava, että sama energiankulutus ei välttämättä tarkoita samanlaatuista sekoitustulosta kahdessa eri sekoittimessa. Yleensä korkean tehohäviön ja lyhyen sekoitusajan omaava sekoitin toimii tehokkaammin kuin pienemmän tehohäviön ja pidemmän sekoitusajan omaava sekoitin. Taulukossa 1 on esitetty yleisesti sellun valkaisussa käytettyjen sekoittimien toimintasakeuksia, viipymäaikoja, tehohäviöitä ja energiankulutuksia. Taulukon tiedot ovat peräisin kirjasta Pulp Bleaching /25/. Taulukon tiedoista osa on peräisin Benningtonin, Kerekesin ja Gracen tutkimuksista /19/, osa on mitattu suoraan tekijöiden toimesta, ja osa tiedoista on saatu suoraan laitevalmistajilta. /19,25/

Taulukko I Quantum laboratoriosekoittimen ja yleisimpien tehdasmittakkavaisten valkaisussa käytettävien kemikaalisekoittimien toimintasakeuksien, viipymäaikojen, tehohäviöiden ja energiankulutusten vertailu. /25/

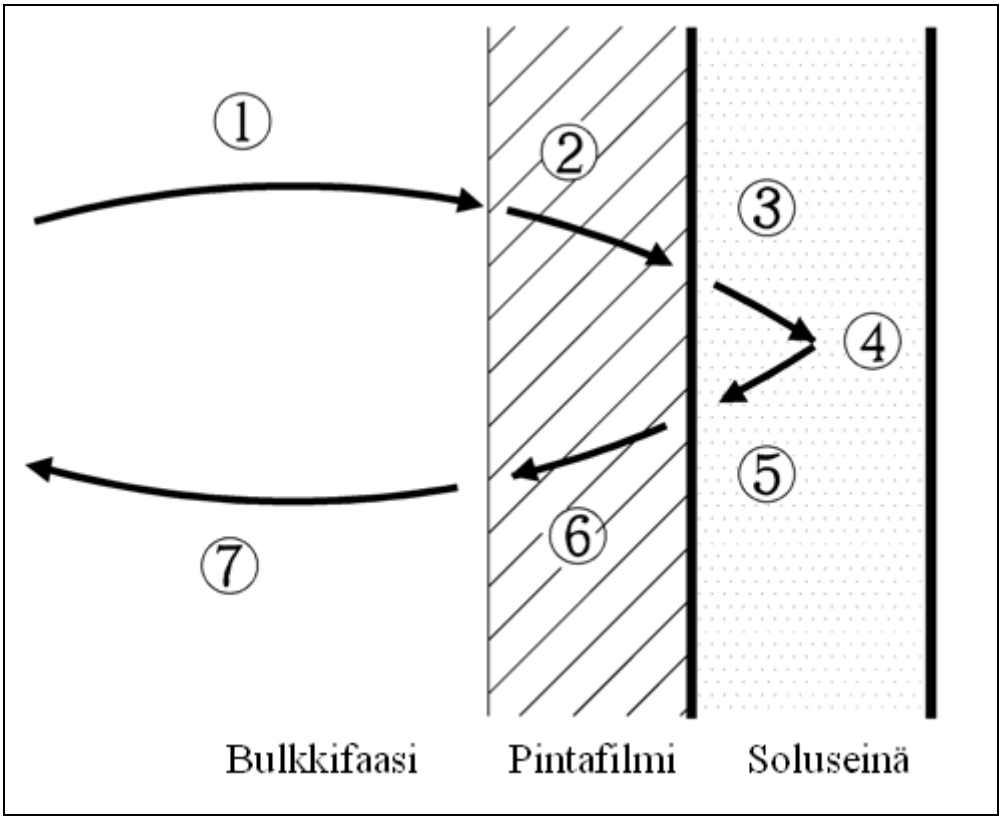
Sekoitin	Toiminta-sakeus (C_m, %)	Viipymäaika (s)	Tehohäviö (MW/m^3)	Energiankulutus (MJ/t)
Quantum (256g sellua, 2600rpm)	5 10 15	10 10 10	0,45 1,1 2,2	63 160 310
Ahlström Ahlmix	8-20	0,03-0,2	1-6	2-6
Beloit-Rauma R-Serie	10	2-4	4	13-28
Ingersoll-Rand Hi-Shear	9-16	0,05	55	8-15
Kamyr MC	9-14	0.2-0.9	6-12	14-43
Sunds SM	9-14	0,025-0,05	40-110	9-18
Sunds T-25	18 (max)	0,05-0,2	50	3-6
Kamyr MC-pumppu (pilot)	8-11	0,3-0,5	4-5	13-18
Venttiili- ja putkilaajennukset	8-11	0,3-0,4	1-3	9-11
Staattinen sekoitus (Komax)	10	3-5	0,1	4
Peg	10-12	10-12	0,08-0,11	11-15

Taulukosta 1 nähdään, että korkeaintensiivinen sekoittaminen kuluttaa huomattavia määriä energiaa. Staattisen Komax sekoittimen energiankulutus on merkittävästi pienempi kuin mekaanisten sekoittimien. Tästä syystä keskisakeusalueella toimivien staattisten sekoittimien kehittäminen on ollut viime aikoina laitevalmistajien kiinnostuksen kohteena, jotta sekoittamisen energiankulutusta saataisiin pienennettyä. /26/

5.3 Aineensiirto

Kaasumaisen kemikaalin saaminen tehokkaaseen kontaktiin kuitususpension kanssa on tärkeää valkaisun onnistumisen kannalta. Kaasun lisäämisen jälkeen kuitususpensioon muodostuu kiinteä-neste-kaasu kolmifaasisysteemi. Päästäkseen reagoimaan kuidun kanssa, kaasumaisen valkaisukemikaalin on ensin liuettava nestefaasiin. Jotta tämä on mahdollista, sekoituksessa täytyy saada aikaan hyvä kaasun ja nesteen välinen kontakti. Jotta liuennut kaasu saadaan riittävän lähelle kuitua, tarvitaan myös hyvä nesteen ja kiinteän faasin välinen kontakti.

Valkaisureaktio tapahtuu kuidun soluseinämän sisäpuolella, joten kaasun on vielä diffuntoiduttava nestefaasista kuidun soluseinämän läpi, jotta reaktio on mahdollinen. Kuvassa 15 on esitetty valkaisukemikaalien kulkeutuminen kuidun pinnalle, ja reaktiot vaiheittain. /12,32/



Kuva 15 Valkaisukemikaalin aineensiirto ja reaktiovaiheet valkaisussa. /12/

Kuvasta 15 nähdään, että valkaisukemikaalin saattaminen kontaktiin kuidun kanssa ja reagoiminen värillisten yhdisteiden kanssa on monivaiheinen prosessi, joka voidaan jakaa useaan eri vaiheeseen:

1. Reagenssin siirtyminen bulkkifaasista kuitua ympäröivälle pintafilmille
2. Reagenssin diffuusio pintafilmin läpi
3. Reagenssin diffuusio kuidun soluseinän läpi
4. Reaktiot ligniinin ja hiilihydraattien kanssa
5. Reaktiotuotteiden diffuusio kuidun soluseinän läpi
6. Reaktiotuotteiden diffuusio pintafilmin läpi
7. Reaktiotuotteiden siirtyminen bulkkifaasiin

Kemikaalin reagoiminen kuitumateriaalin kanssa tapahtuu vain kohdassa 4. Kaikki muut vaiheet liittyvät kemikaalin aineensiirtoon, jonka aikana voi tapahtua sivureaktioita valkaisukemikaalin ja valkaisussa syntyneiden yhdisteiden välillä. Kaasumaisten kemikaalien kohdalla vaaditaan, että yllä kuvattujen aineensiirtovaiheiden lisäksi kaasun täytyy liueta nestefaasiin, ennenkuin reaktio on mahdollinen. Kaasun ja nesteen välistä aineensiirtoa voidaan kuvata kokonaisaineensiirtokertoimen (12) avulla. Usein käytetään myös aineensiirtopinta-alasta riippuvaista tilavuusmääräistä kaasu-nesteaineensiirtokerrointa k_La. /1,33/

$$\frac{1}{K_L\alpha_i} = \frac{1}{Hk_{g\alpha_i}} + \frac{1}{K_L\alpha_j} \qquad (12)$$

missä

	$K_L\alpha_i$	Kokonaisaineensiirtokerroin, -
	H	Henryn lain vakio, -
	$k_{g\alpha_i}$	Kaasufaasin aineensiirtokerroin, -
	$K_L\alpha_j$	Nestefaasin aineensiirtokerroin, -

Erityisesti nopeasti reagoivien valkaisukemikaalien, kuten otsonin kohdalla valkaisutehokkuuteen vaikuttaa voimakkaasti se, kuinka tehokkaasti kemikaalia pystytään saattamaan kontaktiin kuidun kanssa. Sekoittimen toiminta on siis erittäin tärkeää valkaisun onnistumisen kannalta.

Bennington *et al*. /34/ ovat tutkineet kaasun ja nesteen välistä aineensiirtoa sellun sekoituksessa. Tutkimuksessaan he esittävät sekoittamiselle kolme perusvaatimusta, joiden tulee täyttyä hyvän aineensiirron ja tehokkaan valkaisun varmistamiseksi:

1. Kaasumaisen kemikaalin virtaaminen sekoittimeen tulee olla tasaista.
2. Sekoittimen on aikaansaatava tasainen kolmifaasisysteemi edesauttaakseen neste-kaasu faasin ja kiinteä-neste faasin välistä aineensiirtoa sekoittimessa

3. Kaasua sisältävän kolmifaasisysteemin on pysyttävä riittävän stabiilina sekoittimesta poistumisen jälkeen, jotta aineensiirto diffuusion kautta on mahdollinen.

Nopeille valkaisureaktioille, kuten otsonivalkaisulle vaihe kaksi on tärkein, koska valtaosa reaktioista tapahtuu sekoituksen aikana, tai välittömästi sen jälkeen. Hitaammille valkaisureaktioille, kuten happi- ja klooridioksidivalkaisuille vaihe kolme on aivan yhtä tärkeä, kuin vaihe kaksi. Bennington *et al*. /34/ mukaan kuitufaasin läsnäolon heikentävän kaasumaisen kemikaalin aineensiirtoa kaasufaasista nestefaasiin merkittävästi. Kuitupitoisuuden kasvattaminen heikensi myös osaltaan aineensiirtoa, mutta vain pienissä määrin. Puukuituja sisältävien kokeiden aineensiirtokerroin oli miltei kertaluokkaa pienempi, kuin pelkällä vedellä tehtyjen kokeiden. Mielenkiintoiseksi tutkimuksen tekee se, että korvattaessa puukuidut nailonkuiduilla, aineensiirto on samaa luokkaa kuin pelkällä vedellä tehtyjen kokeiden. Syytä, miksi puukuidut heikentävät aineensiirtoa ei vielä tiedetä. Lisäksi Bennington *et al*. /34/ huomasivat, että sekoitustehon ja kaasumäärän lisääminen paransivat kaasun liukenemista nestefaasiin. Tosin kaasumäärän kasvattaminen paransi aineensiirtokerrointa vain noin 5 %:n sakeuteen asti. /34/

Aineensiirron tehokkuuteen ja nopeuteen vaikuttavat monet eri tekijät. Koska kaasumaisten kemikaalien avulla tehtävä valkaisu perustuu siihen, että kaasu liukenee nestefaasiin ennen reagoimista kuidun kanssa, on kaasun ja nesteen välisellä kontaktipinta-alalla suuri merkitys faasien väliseen aineensiirtoon. Mitä pienempinä kuplina kaasu saadaan dispergoitumaan kuitususpension joukkoon, sitä suurempi aineensiirtopinta-ala faasien välille muodostuu. Myös paineella ja lämpötilalla on suuri merkitys. Esimerkiksi happivalkaisu tehdään lämpötilan ollessa noin 100 °C, jolloin hapen liukoisuus veteen on huonoimmillaan. Tästä syystä happivalkaisu suoritetaan huomattavassa ylipaineessa, jolloin hapen liukeneminen veteen tehostuu. Korotetusta lämpötilasta on taas toisaalta huomattava hyöty ajateltaessa hapen ja kuituseinämän välistä aineensiirtoa, joka on noin viisinkertainen verrattuna 25 °C tapahtuvaan aineensiirtoreaktioon. Myös alkaliset olosuhteet heikentävät kaasun liukenemista nestefaasiin ainakin hapen osalta. /35/

5.4 Kuplien käyttäytyminen

Sekoittamisessa syntyvien kaasukuplien käyttäytymisellä on suuri merkitys valkaisun lopputuloksen kannalta. Sekoitus on todella nopea tapahtuma, jossa kuitususpensioon kohdistuu suuria leikkausvoimia. Leikkausvoimien ansioista kaasu hajoaa massan joukkoon pieninä kuplina, joiden käyttäytymistä määrittävät monet eri tekijät.

Kuplakoko on valkaisun kannalta oleellisin tekijä sekoitettaessa kaasumaisia valkaisukemikaaleja kuitususpensioon. Kuplakoko määrittää sen, kuinka suureksi annostellun kaasun ja nestefaasin välinen kontaktipinta-ala muodostuu. Mitä pienempinä kuplina kaasu saadaan dispergoitua kuitususpensioon, sitä suurempi aineensiirtopinta-ala faasien välille muodostuu, ja sitä paremmin kaasu pystyy liukenemaan. Sekoittimen geometria ja sekoitusintensiteetti ovat tärkeimmät tekijät, joilla kuplakokojakaumaa pystytään hallitsemaan. Myös kaasun ja nesteen fysikaaliset ominaisuudet kuten viskositeetti ja tiheys vaikuttavat siihen, minkä kokoisiksi kupliksi kaasu pyrkii sekoitettaessa dispergoitumaan. Kuitufaasin läsnäolo on myös omalta osaltaan merkittävä tekijä kuplien käyttäymisen kannalta, koska yhtenäinen verkosto pidättää kaasukuplia sisäänsä ja estää kuplien vapaata liikettä. /36/

5.4.1 Kuplien hajoaminen

Sekoittimessa massaan kohdistuvat leikkausvoimat saavat aikaan fluidisoitumisen, jolloin massa on täysin turbulenttisessa tilassa. Tällöin massan joukossa on voimakkaita turbulenssipyörteitä, joiden väliset paine-erot saavat kuplat muuttamaan muotoaan ja lopulta hajoamaan. Toisaalta kuplia koossapitävät pintajännitysvoimat taas pyrkivät vastustamaan kuplan muodonmuutoksia. Näiden kahden erisuuntiin vaikuttavien voimien suhdetta voidaan kuvata kriittisellä Weberin luvulla (13).

$$We_c = \frac{\tau}{\sigma / d_{b,\max}} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/3} \qquad (13)$$

missä We_c Kriittinen Weberin luku, -

τ Dynaaminen paine, N

σ Pintajännitys, N/m

$d_{b,\max}$ Stabiilin kuplan maksimikoko, m

ρ_G Kaasun tiheys, kg/m^3

ρ_L Nesteen tiheys, kg/m^3

Kriittinen Weberin luku riippuu aineiden fysikaalisista ominaisuuksista ja olosuhteista. Kirjallisuudessa kriittiselle weberin luvulle on esitetty arvoja 1,1 vaakatasossa tapahtuvalle putkivirtaukselle ja 2,3 turbulenttiselle kaasu-nestevirtaukselle. /36/

Stabiilin kuplan maksimikoko riippuu faasien välisestä viskositeettierosta, ja se voidaan ratkaista yhtälöstä (14).

$$d_{b,\max} = We_c^{0,6} \frac{\sigma^{0,6}}{\rho_G^{0,2} \varepsilon^{0,4}} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0,1} \qquad (14)$$

missä ε Turbulenssin aiheuttama tehohäviö, W/kg

μ_L Nesteen dynaaminen viskositeetti, kg/m s

μ_G Kaasun dynaaminen viskositeetti, kg/m s

Yhtälöstä (14) saadaan sellaisen kuplan maksimikoko, joka voi selvitä kyseisessä virtauskentässä hajoamatta. Tätä suuremmat kuplat hajoavat useammaksi pienemmäksi kuplaksi virtauskentän aiheuttaman turbulenssin vaikutuksesta. Paineen ja lämpötilan vaikutusta kuplan maksimikokoon on myös tutkittu. Paineen kohottamisen on todettu pienentävän stabiilin kuplan maksimikokoa. Myös lämpötilan nostamisella on sama vaikutus, koska pintajännitys ja viskositeetti pienenevät lämpötilan nostamisen myötä. /36/

Kuplien hajoamisen kuvaamiseen on kehitetty useita erilaisia malleja, joiden avulla voidaan tarkastella kuplien käyttäytymistä. Sekoittamisen kannalta

oleellinen malli on Princen ja Blanchin (1990) kehittämä malli, joka perustuu kuplien kriittiseen nopeuteen. Sen mukaan kuplien hajoaminen johtuu kuplien törmäämisestä turbulenttisiin pyörteisiin. Vain osa törmäyksistä johtaa kuplan hajoamiseen. Mallin mukaan kuplia hajottavat virtaukset ovat samaa suuruusluokkaa kuplan halkaisijan kanssa, tai hieman tätä pienempiä. Kuplaa huomattavasti suuremmat pyörteet vain kuljettavat kuplia, kun taas huomattavasti kuplaa pienemmät pyörteet eivät sisällä riittävästi energiaa kuplan rikkomiseen. /36,37/

Toinen oleellinen mekanismi on Colella *et al.* /38/ esittämä mekanismi toisen kuplan aiheuttaman pyörteen aiheuttamasta kuplien hajoamisesta. Mekanismin mukaan kupla voi hajota silloin, kun se on osittain toisen kuplan liikkeen aiheuttaman pyörteen sisällä ja osittain ulkopuolella. Kupla pyrkii imeytymään pyörteen sisälle hajottaen sen pienemmiksi kupliksi. Colella *et al*. /38/ esittämä matemaattinen malli kuplien hajoamisen tehokkuudelle on sinällään merkittävä, että siinä otetaan huomioon myös kuplien muoto ja kaasun tiheys. /36,38/

Muita kuplien hajoamisen mekanismeja ovat muun muassa kuplan pintaenergiaan ja kapillaaripaineeseen liittyvät mallit. Kuplat voivat siis hajota monella eri mekanismilla, jolloin hajoamiseen vaikuttavat monet eri tekijät yhtäaikaisesti. Kuitufaasin läsnäolo sekoituksessa vaikeuttaa vielä omalta osaltaan kuplien käyttäytymisen ennustamista. Siispä puhtaalle nesteelle ja kaasulle muodostetut mallit eivät täysin päde kuituja sisältävässä kolmifaasisysteemissä, eikä niiden lähempi tarkastelu ole tämän työn kannalta oleellista. Tutkimuksia kuplien hajoamisesta kuitususpensiossa on tehty hyvin vähän, joten olosuhteita hyvin kuvaavia mallejakaan ei ole olemassa. /36/

5.4.2 Kuplien yhdistyminen

Virtauskentässä kuplat voivat joutua kosketuksiin toistensa kanssa turbulenssin, eri virtausnopeuden tai kuplan liikkeen aiheuttaman pyörteen vuoksi. Kuplien välisen kontaktin myötä kuplat voivat yhdistyä yhdeksi suuremmaksi kuplaksi. Ilmiö on erittäin tärkeä tarkasteltaessa kaasua sisältäviä nestevirtauksia.

Huolimatta ilmiön oleellisuudesta, kuplien yhdistymisen mekanismeja ei vieläkään tunneta kunnolla. /36/

Nesteen koostumus vaikuttaa hyvin paljon kuplien yhdistymiseen puhtaissa 2-faasisysteemeissä. Pienikin epäpuhtauksien ja elektrolyyttien läsnäolo vaikuttaa merkittävän paljon kuplien yhdistymiskäyttäytymiseen. Niinpä kuplien yhdistymisen ennustaminen kuituja sisältävässä kolmifaasisysteemissä on erittäin hankalaa. /36/

Alkuperäinen kuplien yhdistymistä koskeva Maruccin teoria on vuodelta 1969. Sen mukaan kuplien koskettaessa toisiaan, kuplien väliin jää ohut nestekalvo. Kalvo kuivuu ja ohenee jatkuvasti kuplien välisen kontaktin säilyessä, kunnes saavutettuaan kriittisen paksuuden, kalvo hajoaa ja kuplat yhtyvät. Kuplien yhtyminen on siis mahdollista, mikäli kontaktiaika on pidempi kuin nestekalvon kuivumiseen tarvittava aika. Kuplien välinen kontaktiaika määräytyy sen mukaan, kuinka suuri turbulenssi virtauskentässä vallitsee. Voimakkaan turbulenssin vallitessa pyörteet kuljettavat kuplat erilleen ennen kuin nestefilmi on ehtinyt kuivumaan, eikä yhdistymistä tapahdu. Pinta-aktiivisten aineiden läsnäolo vaikuttaa kuplien välisen pintafilmin käyttäytymiseen. Filmin venyminen pinta-aktiivisten aineiden läsnäollessa muodostaa konsentraatiogradientin filmin venyneen osan ja rajapinnan muiden osien välille, jolloin syntyneet pinta-aktiiviset voimat pyrkivät estämään muutosta. Pinta-aktiivisten voimien ansioista kuplien välinen filmi on pysyvämpi, joten kuplat eivät yhdisty niin helposti. /36,39/

Maruccin teoria on siinä mielessä puutteellinen, ettei se ota huomioon kuplien välisten törmäysten voimakkuutta. Voimakkaassa sekoituksessa tapahtuu myös voimakkaita kuplien välisiä törmäyksiä, jotka voivat saada kuplat yhtymään. Sekoittimen jälkeen turbulenssin heikentyessä kuplien väliset törmäykset ovat myös heikompia, jolloin kuplien käyttäytymisen voidaan olettaa olevan enemmän Maruccin teorian mukaista. Toisaalta tässä työssä kuitujen läsnäolo omalta osaltaan vaikuttaa kuplien käyttäytymiseen. Yhtenäinen kuituverkosto pidättää kuplia sisäänsä ja estää muutenkin niiden vapaata liikettä, jolloin tilanne on täysin

erilainen kuin puhtaassa neste-kaasusysteemissä, jolla suurin osa kuplien käyttäytymisen malleista on määritetty.

5.4.3 Kuitutyypin vaikutus kuplakokoon

Garner ja Heindel /40/ ovat tutkineet kuitutyypin vaikutusta kuplakokoon kuplakolonnissa pienillä kuitupitoisuuksilla. Heidän laitteistonsa koostui 20 cm halkaisijaltaan olevasta sylinterimäisestä kuplakolonnista, joka täytettiin 80 cm korkeuteen 1 %:n sakeudessa olevalla kuitususpensioilla. Kaasuna työssä käytettiin suodatettua ja paineistettua ilmaa, jota puhallettiin kolonniin 2 l/min sintratun suuttimen kautta. Työn alkuperäisenä tarkoituksena oli tutkia kuplakoon vaikutusta eri kuitutyypeillä kierrätyspaperin musteenpoistossa. Työssä vertailtiin vanhan sanomalehtipaperin, kopiopaperin ja tuoreen valkaistun havusellun vaikutusta kuplakokoon. Kuplakoon mittaamiseksi laitteisto läpivalaistiin Röntgenpulssilla. /40/

Keskimääräiseksi kuitupituudeksi sanomalehtipaperille mitattiin 1,4 mm, kopiopaperille 2,0 mm ja tuoreelle havusellulle 2,8 mm. Tutkimuksissaan Garner ja Heindel huomasivat, että kuitupituuden kasvaessa suurten, yli 12 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus kuitususpension joukossa kasvoi. Sen sijaan pienten, alle 12 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus kasvoi kuitupituuden lyhentyessä. Tulos vaikuttaa sinällään loogiselta, että lyhyemmillä kuidunpituuksilla yhtenäinen kuituverkosto on tiheämpi suuremman kuitumäärän vuoksi, jolloin suurille kuplille on vähemmän tilaa. Mutikainen /41/ ja Rantala /42/ ovat tutkineet diplomitöissään hapen dispergoitumista keskisakean koivu- ja mäntysellun joukkoon fluidisoivassa Quantum Mark IV laboratoriosekoittimessa. Heidän tutkimuksiensa mukaan mäntysellu antaa pienemmän kuplakokojakauman, kun sen sijaan koivusellun joukkoon pyrkii muodostumaan suurempia kuplia. Tutkimustulokset ovat keskenään ristiriidassa, mutta erot selittyvät todennäköisesti erilaisten pinta-aktiivisten aineiden läsnäololla, koska pienetkin erot pinta-aktiivisuudessa vaikuttavat voimakkaasti kuplien käyttäytymiseen. Myös koeolosuhteet poikkesivat merkittävästi toisistaan näissä kokeissa muun muassa sakeuden osalta. Lisäksi Garnerin ja Heindelin tutkimuksessa muutaman satunnaisen suuren kuplan syntyminen on saattanut

vaikuttaa merkittävästi tutkimuksen lopputulokseen. Näin ollen tutkimustuloksiin kuidunpituuden vaikutuksesta kuplakokoon tulee suhtautua varauksella. /40,41,42/

5.4.4 Sakeuden vaikutus kuplakokoon

Heindel ja Garner /43/ ovat tutkineet myös sakeuden vaikutusta kuitususpension joukkoon puhalletun ilman kuplakokoon matalissa sakeuksissa. Työssään he käyttivät valkaistua mäntysellua 0 – 1,5 %:n sakeuksilla, jonka joukkoon he puhalsivat puhdistettua ilmaa 2 l/min. Mittaukset tehtiin 20 cm halkaisijaltaan olevassa kuplakolonnissa, johon laitettin 80 cm kerros kuitususpensiota. Kuplien laskemiseksi kuplakolonni läpivalaistiin 30 nanosekunnin mittaisella röntgenpulssilla. /43/

Tutkimuksen mukaan kuplakoko kasvoi sakeuden kasvaessa. Taulukossa II on esitetty keskimääräiset kuplien halkaisijat eri sakeuksilla, ja kuplakoon keskihajonta.

Taulukko II Kuitususpension sakeuden vaikutus kuplakokoon /43/

Suspension sakeus [%]	Keskimääräinen kuplan halkaisija [mm]	Keskihajonta [mm]
0	3,0	1,2
0,5	3,5	3,6
1,0	4,2	5,8
1,5	6,3	9,3

Taulukosta II nähdään, että sakeuden kasvaessa mitattu kuplakoko kasvaa. kasvu voimistuu sakeuden ylittäessä 1,0 %. Tämä johtuu siitä, että jo 0,1 % sakeudessa kuidut alkavat muodostaa flokkeja, jotka voivat pidättää sisäänsä nousevia kaasukuplia. Tällöin kuplan on joko ohitettava flokki tai yhdistyttävä toisten kuplien kanssa päästäkseen pinnalle. 1 %:n sakeudessa on muodostunut jo yhtenäinen kuituverkosto, joka pidättää tehokkaammin kaasukuplia sisäänsä. Tällöin kuplien yhdistymisiä tapahtuu enemmän, koska alhaaltapäin nousevat kuplat törmäävät kuituverkoston pidättämiin kupliin. Kuplat yhdistyvät, ja syntyy suurempi kupla, joka pääsee suuremman nosteen ansiosta nousemaan pinnalle.

Suuremmilla kuitupitoisuuksilla myös keskihajonta kasvaa. Tämä johtuu siitä, että suurten, yli 12 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus kasvoi sakeuden noustessa. Tutkimuksessaan Garner ja Heindel havaitsivat myös, että syntyneet suuret kuplat sekoittivat systeemiä tehokkaasti noustessaan ylöspäin estäen flokkien muodostumista. /43/

Valkaisussa kaasu pyritään dispergoimaan kuitususpension joukkoon mahdollisimman pieninä kuplina tehokkaamman aineensiirron saavuttamiseksi. Toisaalta suuret kuplat saattavat toimia sekoittajina noustessaan valkaisutornin läpi. Tällöin olosuhteet pysyvät tasaisempina valkaisutornin eri kohdissa ja flokkien muodostuminen on vähäisempää. Toisaalta taas suurien kuplien myötä paljon kaasua jää reagoimatta värillisten yhdisteiden kanssa. Suurempien kuplien aiheuttama sekoittuminen voidaan helposti korvata mekaanisella sekoittamisella, jolloin kaasu voidaan dispergoida kuitususpension joukkoon pieninä kuplina ja hyödyntää tehokkaammin siihen tarkoitukseen, kuin se on alun perin tarkoitettu.

6 KOKEELLISEN OSAN TAVOITTEET JA SUORITUS

Kokeellisen osan tavoitteena oli selvittää, miten kuitususpension virtaama sekoittimessa ja sekoittimen pyörimisnopeus vaikuttavat kaasun dispergoitumiseen tehdasmittakaavaisessa keskisakean massan sekoittimessa. Työn tavoitteena oli myös verrata Quantum Mark IV laboratoriosekoittimen dispergointikykyä teollisen mittakaavan sekoittimen dispergointikykyyn. Vertailu tehtiin käyttämällä hyödyksi Mutikaisen /41/ ja Rantalan /42/ aikaisemmin diplomitöistään aikaansaamia tuloksia liittyen kaasun dispergoitumiseen laboratoriosekoittimessa, sekä tekemällä referenssiajoja laboratoriosekoittimella ja vertaamalla tuloksia teollisen mittakaavan sekoittimella saatuihin tuloksiin. Kokeet tehtiin hyödyntämällä kuvantamistekniikkaa, jolla oli mahdollista ottaa kuvia putken ja sekoittimen sisäpuolelta niihin tehtyjen kuvausyhteiden kautta. Työn kokeellisen osan mittaukset tehtiin Savonlinnan Kuitulaboratorion tiloissa Savonlinnassa.

6.1 Koelaitteisto

Koelaitteistoon koostui Quantum Mark IV laboratoriosekoittimesta, Proto 10 teollisen mittakaavan sekoittimesta, sekä kuvauslaitteistosta. Lisäksi vaahtoutumisen tutkimista varten rakennettiin laite, jossa ilmavirran avulla pystyttiin vaahtouttamaan ruskeasta massasta lingottuja suodoksia ja veden ja pesuaineen seoksia. Kuva laitteesta on esitetty liitteessä III.

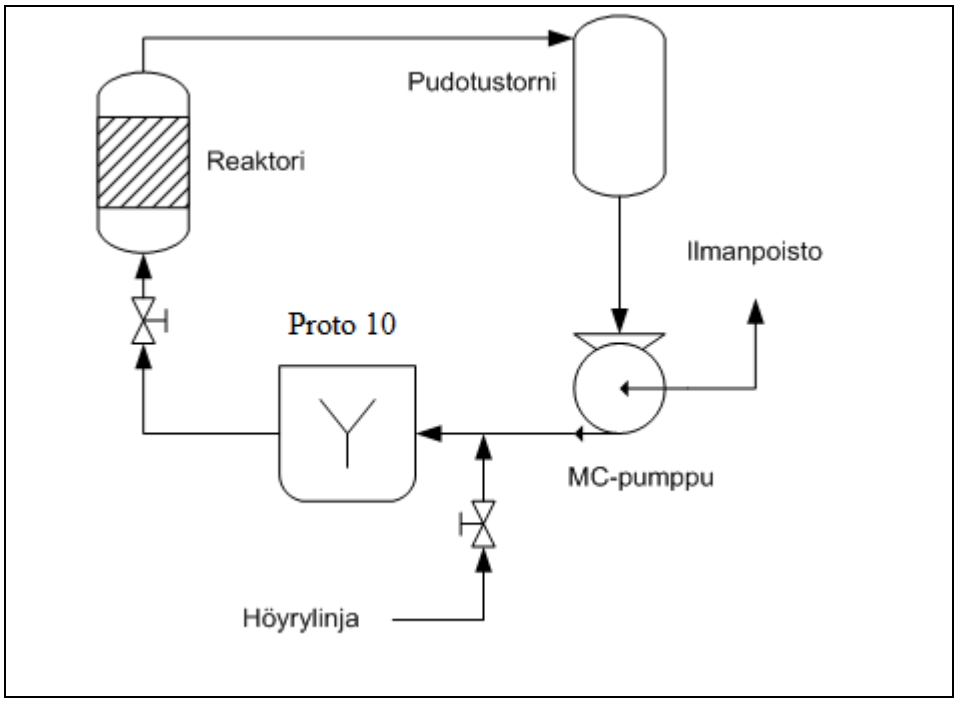
6.1.1 Sekoitinlaitteistot

Referenssiajot tehtiin samalla Quantum Mark IV laboratoriosekoittimella, jota Mutikainen /41/ ja Rantala /42/ käyttivät diplomitöissään. Kyseessä on Quantum Technologies – yhtiön rakentama keskisakeuksiselle kuitususpensiolle tarkoitettu fluidisoiva laboratoriosekoitin. Toisin kuin teolliset sekoittimet, Quantum Mark IV on panostoiminen sekoitin. Tästä syystä jouduttiin tekemään referenssiajoja, jotta pystyttiin selvittämään, kuinka teollisella sekoittimella saadut tulokset saadaan vertailukelpoisiksi laboratoriosekoittimella saatujen tulosten kanssa. Kuvassa 16 on esitetty Quantum Mark IV sekoittimen sisäpuoli ja roottori.

Kuva 16. Quantum Mark IV laboratoriosekoitin /41/

Kuplien kuvaamista varten sekoittimen kanteen ja kylkiin oli rakennettu aikaisempia töitä varten kuvausyhteitä, joiden kautta kaasukuplia pystyttiin kuvaamaan.

Proto 10 -teollisen mittakaavan sekoitin oli osa looppia, jossa keskisakeaa massa oli mahdollista kierrättää sekoittimen jälkeen reaktorin kautta pudotusputkeen ja takaisin uudelleenpumpattavaksi sekoittimelle. Laitteisto koostui keskisakean massan pumpusta, sekoittimesta, valkaisureaktorista ja pudotusputkesta, josta massa pumpattiin uudelleen kiertoon. Kokeissa käytetyn loopin virtauskaavio on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Proto 10 sekoittimen koeajoissa käytetyn loopin virtauskaavio.

Kuten kuvasta 17 nähdään, loopissa oli myös höyrynsyöttöyhde, jonka kautta massa lämmitettiin kokeita varten 75 °C:n lämpötilaan. Käytetyistä kuvausyhteistä yksi sijaitsi sekoittimen pesässä roottorin yläpuolella ja kaksi putkistossa sekoittimen jälkeen. Putkistossa olevista yhteistä toinen sijaitsi 550 mm sekoittimen jälkeen ja toinen 2450 mm sekoittimen jälkeen juuri ennen reaktoria.

6.1.2 Kuvauslaitteisto

Kuvauslaitteisto koostui kamerasta, kamerasovitteesta, boroskoopista, kahdesta stroboskoopista, signaaligeneraattorista ja AVT SmartView tietokoneohjelmistosta. Kamerana käytettiin Foculus FO531TB mustavalkokameraa, jonka tarkkuus oli 1628×1236 pikseliä. Kuvaaminen kuvausyhteiden kautta tapahtui Richard Wolfin boroskoopin 6,05045,00 avulla. Kamera liitettiin boroskooppiin Richard Wolfin 51 kamerasovitteella. Valonlähteenä käytettyjen Contrôle Rechearche Industrien ST-15E-stroboskooppien valo ohjattiin boroskooppiin MSG8-1100-2 Y kuituvalokaapelin avulla. Kameran laukaisuhetken ja kameran ja valon välistä ajastusta ohjattiin Stanford Research Systemsin valmistamalla nelikanavaisella signaaligeneraattorilla. Kuvat johdettiin kamerasta tietokoneelle FireWire

liitännän kautta. Kuvausta ohjattiin tietokoneelta AVT SmartView ohjelmistolla, jolla oli mahdollista säätää myös säätämään kuvan ominaisuuksia.

6.2 Koesuunnitelma

Koesuunnitelma jakautui kolmeen eri osioon. Kokeet aloitettiin vertailemalla suomalaisen sellutehtaan ruskean massan pesureilta otettujen koivu- ja mäntymassojen suodosten vaahtoutumista pesuaineen ja veden seoksella saatavaan vaahtoon. Tavoitteena oli löytää oikea konsentraatio pinta-aktiivista ainetta, jolla saadaan aikaiseksi suodoksia vastaava vaahtoaminen veden kanssa.

Kokeita jatkettiin Quantum Mark IV laboratoriosekoittimella, jossa valkaistun massan joukkoon lisättiin pinta-aktiivisena aineena Fairy original – astianpesuainetta. Pesuaine annosteltiin kaikissa kokeissa massan joukkoon kauppatavarana, tai siitä laimennettuna seoksena. Oikean annoksen löytämiseen käytettiin aikaisemmista vaahtoutumiskokeista saatuja tuloksia. Laboratoriosekoittimella tehtyjen kokeiden tarkoituksena oli löytää oikea konsentraatio pinta-aktiivista ainetta, jolla saadaan aikaiseksi Mutikaisen /41/ ja Rantalan /42/ töissään käyttämää ruskeaa mäntymassa vastaava vaahtoutuminen. Oikean konsentraation löytämiseksi sekoittimesta otettuja kuvia tarkasteltiin silmämääräisesti, ja sopivan dispersion löydyttyä tulos varmistettiin tekemällä kuville kuplamäärän laskenta ja kuplakokoanalyysi. Olosuhteet laboratoriosekoittimessa olivat samanlaiset, kuin Mutikaisen ja Rantalan töissä. Tällöin paine reaktorissa oli 4 bar, kaasun tilavuus 20 % ja massan sakeus 10 %. Pyörimisnopeudet olivat 1200, 1800 ja 2400 min^{-1}.

Proto 10 – sekoittimen koeajot tehtiin valkaistulla mäntysellulla, joka ei käytännössä vaahtoudu lainkaan. Aikaisemmissa töissä Mutikainen ja Rantala ovat tutkineet helposti vaahtoutuvia ruskean massan dispersioita, joten vertailukelpoisten tulosten saamiseksi valkaistun mäntysellun joukkoon jouduttiin lisäämään pinta-aktiivista ainetta. Sopiva konsentraatio oli määritetty aikaisemmin vaahtoutumiskokeilla ja Quantum Mark IV referenssiajoilla. Kokeet aloitettiin laskemalla tarvittava pinta-aktiivisen aineen määrä loopissa olevan massan joukkoon. Välillä sekoittimesta otettiin kuvasarja, josta määritettiin

silmämääräisesti vaahtoutumisen taso. Kokeet aloitettiin, kun loopissa oleva massa oli saatu silmämääräisesti vaahtoutumaan ruskean massan tavoin. Samainen vaahtoutumisen taso saavutettiin referenssiajojen perusteella määritetyllä pinta-aktiivisen aineen konsentraatiolla.

Kokeiden suorituksen jälkeen päätettiin tehdä vielä lisäkokeita lisäämällä massan joukkoon 0,05 ml/l yliannos pinta-aktiivista ainetta. Teollisella sekoittimella tehdyissä kokeissa paine oli 1,5 bar, mikä pidettiin vakiona. Kokonaisuudessaan looppi oli avoin, mutta ylipaine sekoittimessa johtui sekoittimen yläpuolella olevassa reaktorissa olevan massamäärän aiheuttamasta hydrostaattisesta paineesta. Kaasutilavuudeksi säädettiin 20 %, joka pidettiin vakiona kaikissa kokeissa. Muuttujina työssä käytettiin sekoittimen kierrosnopeutta ja virtaamaa sekoittimessa. Käytetyt kierrosnopeudet olivat 1200, 1500 ja 1800 min^{-1}. Virtaaman olivat 10, 20 ja 30 l/s. Kokeiden edetessä muuttujaksi päätettiin ottaa myös pinta-aktiivisen aineen konsentraatio. Koeajosuunnitelmat ja koeajopöytäkirjat on esitetty liitteessä I.

6.3 Kokeiden suoritus ja käytetyt menetelmät

Kokeissa käytettiin suomalaiselta sellutehtaalta hankittua valkaistua mäntysellua. Vaahtoutumiskokeissa käytettiin ruskean massan pesureilta otetusta massasta lingottua suodosta. Quantum Mark IV- Koeajoja tehtiin loopista otetulla jauhautuneella massalla. Vaahtoutumiskokeet tehtiin läpinäkyvässä 110 mm halkaisijaltaan olevassa putkessa, jonka korkeus oli 1 m. Putken sisälle laitettiin 400 ml tutkittavaa nestettä, joka vastasi putkessa 5 cm kerrosta. Nestekerroksen läpi puhallettiin ilmaa 6 l/min. Kokeessa määritettiin vaahdon puoliintumisaika, 30 cm kerroksen muodostumiseen kuluva aika, sekä 30 s aikana muodostuvan vaahtokerroksen korkeus.

Quantum Mark IV laboratoriosekoittimella tehtäviä kokeita varten massaa punnittiin 2,88 kg:n annoksissa muovipusseihin, jolloin panostoimisen sekoittimen täyttöasteeksi tuli 80 %. Muovipusseihin annostellut massa-annokset lämmitettiin 80 °C:n lämpötilaan vesihauteessa. Sekoitin paineistettiin 4 barin ylipaineeseen hapella ennen sekoittamista. Sekoitusaika oli kaikissa kokeissa

kuusi sekuntia, ja roottorin kiihdytysajaksi oli asetettu 0,5 sekuntia. Sekoituskokeita tehtiin roottorin pyörimisnopeuksilla 1200, 1800 ja 2400 min^{-1}. Sekoitettava massa vaihdettiin jokaisen sekoituskokeen jälkeen, jotta kuituverkostoon jumiutuneet kaasukuplat eivät vaikuttaisi koetuloksiin. Kuvauksia tehtiin kahdesta eri paikasta. Sekoittimen kannessa oleva yhde sijaitsi 250 mm etäisyydellä sekoittimen reunasta. Kyljessä oleva yhde sijaitsi 105 mm korkeudella sekoittimen pohjasta. Sekoitustapahtumaa kuvattiin koko sekoituksen ajan kuvataajuudella 14 kuvaa sekunnissa. Näistä kuvista valittiin tarkasteluun sekoituksen aikavälillä 2-5 s otettuja kuvia.

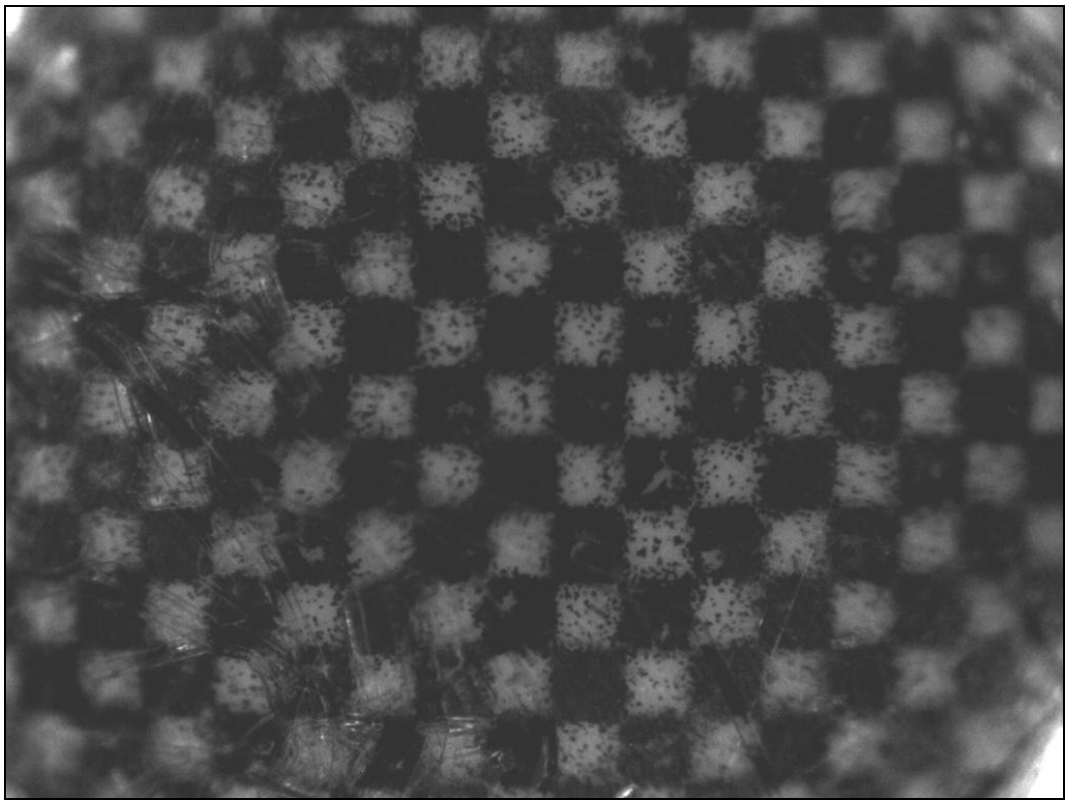
Teollisen mittakaavan sekoittimen kokeita varten sekoittimen pesään ja putkistoon sekoittimen jälkeen tehtiin yhteensä kolme kuvausyhdettä, joista yksi sijaitsi sekoittimen pesässä ja kaksi putkistossa sekoittimen jälkeen. Ennen kokeiden aloittamista yhteiden ja kuvauslaitteiden toimivuus testattiin vesiajolla, jotta saatiin varmuus siitä, että kuvaaminen on ylipäätään mahdollista. Seuraavassa vaiheessa looppiin lisättiin noin 7 m^3 10,5 % sakeudessa olevaa valkaistua mäntysellua. Massan joukkoon lisättiin puolet laskennallisesti tarvittavasta pinta-aktiivisesta aineesta. Lisääminen tehtiin siten, että massaa pumpattiin loopissa eteenpäin ja samalla avonaiseen pudotusputkeen lisättiin tasaisesti tarvittava määrä pinta-aktiivista ainetta. Tämän jälkeen konsentraatioerojen annettiin tasoittua kierrättämällä massaa loopissa noin 20 minuutin ajan. Kuva koelaitteistosta on esitetty liitteessä III.

Olosuhteiden tasoituttua yhteistä otettiin kuvasarjat vaahtoutumisen tutkimista varten. Vaahtoutuminen ei ollut vielä tässä vaiheessa riittävää, joten pinta-aktiivista ainetta lisättiin laskennallisesti tarvittava määrä ja olosuhteiden annettiin tasoittua. Silmämääräisesti vaahtoutuminen oli samaa luokkaa kuin Mark-laitteistossa, joten mittaukset päätettiin aloittaa. Mittauksia tehtiin roottorin pyörimisnopeuksilla 1200, 1500 ja 1800 min^{-1}. Virtaamina käytettiin määriä 10, 20 ja 30 l/s. Sekoittimen tehonkulutukset kirjattiin ylös kullakin virtaama/pyörimisnopeusyhdistelmällä valvomon näytöltä. Sekoittimen pesästä kuvat otettiin noin 15 mm sekoittimen sisäpinnan sisäpuolella. Putkessa sijaitsevista kuvausyhteistä kuvat otettiin 30 mm syvyydeltä putken sisäpinnasta.

Kuvia otettiin kahdeksan kuvaa sekunnissa noin 15 sekunnin ajan. Kustakin kuvasarjasta valittiin sattumanvaraisesti 8 laskentakelpoista kuvaa kuplien laskentaa ja analysointia varten. Kuvausten jälkeen pinta-aktiivisen aineen pitoisuutta loopissa päätettiin vielä kasvattaa ja ottaa kuvasarjat pinta-aktiivisen aineen konsentraation vaikutuksen tutkimiseksi.

6.4 Kuvien käsittely ja kuplien laskenta

Sekoittimista ja putkistosta otetuista kuvista määritettiin tulokset Rautiaisen /44/ kehittämän Matlab-pohjaisen roskalaskentaohjelman avulla. Jo aikaisemmassa työssään Rantala /42/ havaitsi, että ohjelman automaattinen laskentamalli ei sovellu kuplien laskemiseen. Näin ollen laskenta jouduttiin tekemään käsin merkitsemällä jokainen kuvasta löytyvä kupla erikseen käsin. Ohjelma laski kuplien pinta-alan Excel-taulukkoon, jossa pinta-aloista voitiin laskea kuplien halkaisijat. Pinta-alan laskentaa varten täytyi määrittää otettujen kuvien korkeus, jonka avulla roskalaskentaohjelma osasi laskea kuplien oikean pinta-alan. Kuvan korkeuden määrittämiseen käytettiin kameran tarkennuksessa käytettävää tarkennuskuvaa, joka koostui 0,17 mm halkaisijaltaan olevista mustista ja valkoisista ruuduista. Kuvassa 18 on esitetty kameran tarkentamiseen ja kuva-alan määrittämiseen tarkoitettu tarkennuskuva.



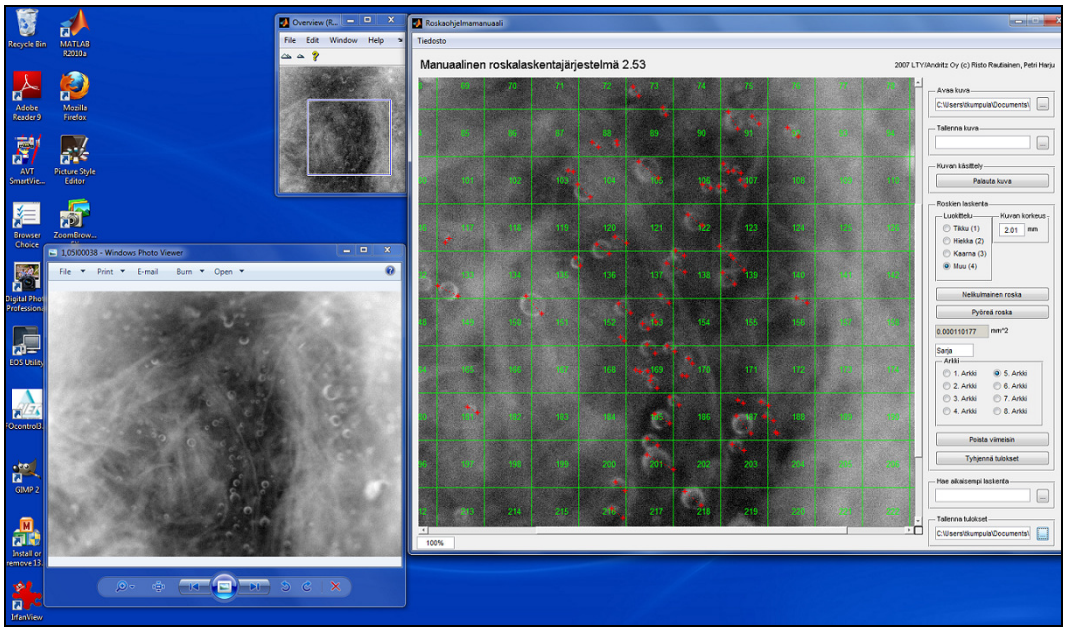
Kuva 18. Kameran tarkentamiseen ja kuva-alan määrittämiseen käytetty tarkennusruudukko, yksittäisen neliön sivun pituus 0,17 mm.

Kuvasta 18 nähdään, että kuva-alaan mahtuu hieman yli 11 ruutua. Tarkka kuva-alan määrittäminen tehtiin kuvankäsittelyohjelman avulla, jolla pystyttiin laskemaan kuvan todellinen korkeus pikseleiden perusteella, kun tiedettiin tarkennuskuvan ruudun korkeus ja kameran tarkkuus. Kuvan korkeudeksi määritettiin 2,01 mm, jolloin kuva-ala on 2,65×2,01 mm^2.

Laskentaan valittujen kuvien käsittely tehtiin IrfanView -kuvankäsittelyohjelmalla. Kuplien laskemiseen käytettävä Matlab- ohjelmisto ei tunnistanut kameran mustavalkokuvia, joten kuvat täytyi muuntaa värillisiksi ja tallentaa TIF-muodossa laskentaa varten. Samalla valitut kuvat terävöitettiin ohjelman automaattisen terävöityksen avulla, ja suurimmassa osassa kuvia kuvan värien kääntäminen negatiiviseksi helpotti kuplien reunojen hahmottamista. Esimerkkejä laskentaan käytetyistä kuvista on esitetty liittessä IV.

Käsittelyn jälkeen kuvat avattiin Matlab-pohjaiseen roskalaskentaohjelmaan, jossa kuvasta rajattiin 1,13×1,13 mm^2 kokoinen alue laskentaa varten. Roskalaskentaohjelma heikensi kuvan laatua huomattavasti, jolloin pienimmät

kuplat hävisivät näkyvistä tai hukkuivat näytöllä olevan ruudukon taakse. Tämän vuoksi laskennan apuna täytyi käyttää alkuperäistä kuvaa, josta hävinneet kuplat pystyttiin tunnistamaan. Jokaisesta kuvasarjasta laskentaan valittiin 8 kuvaa, joista jokainen kupla merkittiin käsin. Kuvista laskettiin vain selkeästi erottuvat kuplat. Kuvassa 19 on esitetty tietokoneen kuvaruutunäkymä, jolta kuplien laskenta suoritettiin.



Kuva 19. Kuvaruutunäkymä kuplien laskennasta.

Kuvasta 19 nähdään, kuinka matlab – roskalaskentaohjelma heikentää kuvan laatua. Lisäksi roskalaskentaohjelmassa olevat apuruudukot voivat peittää alleen pienimpiä kuplia tai vaikeuttaa kuplan havaitsemista. Lisäksi kuvissa, joissa kuplia oli huomattavasti suurempi määrä, kuplien merkitsemistä ilmaisevat punaiset tähdet ja viivat haittasivat pienimpien, toisiaan lähellä olevien kuplien havaitsemista.

7 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Kuplakokojakauman määrittämiseksi Matlab - ohjelmalla lasketut kuplat jaettiin kokoluokkiin kuplan halkaisijan perusteella. Jako tehtiin 0,01 mm välein, samoin kuin Mutikaisen /41/ ja Rantalan /42/ aikaisemmissa töissä. Pienimpään luokkaan kuuluivat kaikki alle 0,01 mm halkaisijaltaan olevat kuplat, ja suurimpaan luokkaan kaikki yli 0,15 mm halkaisijaltaan olevat kuplat. Jokaisesta koesarjasta

määritettiin myös kuplien halkaisijoiden keskiarvo, mediaani, moodi, keskihajonta, sekä suurin ja pienin kuplakoko. Vaahtoutumiskokeissa vaahdon muodostumista ja pysyvyyttä arvioitiin määrittämällä vaahdon puoliintumisaika, 30 s aikana muodostuvan vaahtopatjan korkeus ja 30 cm vaahtopatjan muodostumiseen tarvittava aika.

7.1 Vaahtoutumiskokeiden tulokset

Vaahtoutumiskokeet aloitettiin vertaamalla koivu- ja mäntysuodoksen vaahtoutumista. Vaahtoutumiskokeita varten hankittiin ruskeaa koivu- ja mäntymassaa sellutehtaalta ruskean massan pesurilta. Massat lingottiin, ja suodos otettiin talteen vaahtoutumiskokeiden suorittamista varten. Aikaisempien töiden perusteella oli odotettavissa, että mäntysuodos vaahtoaisi koivusuodosta paremmin, mutta kävikin ilmi, että koivusuodos vaahtoutui huomattavasti helpommin ja vaahto oli pysyvämpää. Taulukossa III on esitetty vaahtoutumiskokeiden tulokset.

Taulukko III Vaahtoutumiskokeiden tulokset ruskean massan pesurilta otettujen massojen suodoksille, sekä fairy original- astianpesuaineelle ja mäntysuovalle.

	Koivusuodos	Mäntysuodos	Fairy 0,04ml	Suopa 3ml
Puoliintumisaika [s]	35	13	240	130
30s vaahdotus [cm]	30	21	35	19
30cm vaahdotus [s]	29	64	25	47

Kuten taulukosta III huomataan, ruskean massan pesurilta otettu koivumassa suodos vaahtoaa huomattavasti paremmin kuin vastaava mäntysuodos, sekä vaahdon pysyvyys on merkittävästi parempi. Vaahdotukseen käytetty suodosmäärä oli 400 ml. Samalla huomattiin, että mäntysuopa vaahtosi erittäin huonosti verrattuna Fairy original- astianpesuaineeseen. Vaahdotuskokeissa valittiin käytettäväksi Fairy- astianpesuaine, koska loopissa tehtäviä kokeita varten lisättävä suopa-annos olisi ollut useita kymmeniä litroja. Koivusuodoksen

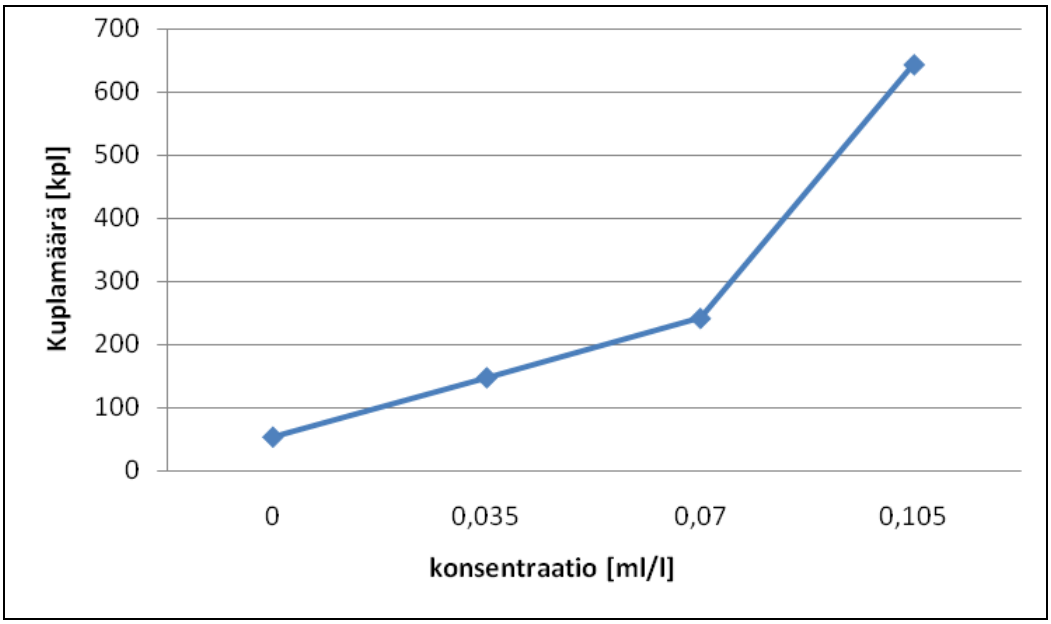
paremman vaahtoutumisen ajateltiin johtuvan mäntysuodoksen suuremmista vaahdonestoainejäämistä, jonka varmentamiseksi päätettiin tehdä toinen vaahtoutumiskoe keittimien purkusäiliöstä otetuille suodoksille. Tässä vaiheessa massan sekaan ei ole vielä lisätty keiton jälkeen mitään apukemikaaleja. Olettamus osoittautui oikeaksi, sillä purkusäiliöstä otetun mäntymassan suodos vaahtosi merkittävästi koivumassan suodosta paremmin.

7.2 Quantum Mark IV referenssiajojen tulokset

Quantum Mark IV referenssiajot aloitettiin varmistamalla, että vaahtoutumiskokeissa saadut tulokset pätevät myös sekoittimessa. Kokeet aloitettiin tutkimalla mäntysuovan vaahtoutumista. Vaahtoutumiskokeiden perusteella mäntysuopaa tarvitaan huomattavan suuri annos, 30 ml/l massaa, ennen kuin riittävä vaahtoutumisaste on saavutettu. Vaahtoutumiskokeiden tulokset pätivät hyvin, sillä Rantalan ja Mutikaisen töissä ruskealle mäntymassalle vastaavan vaahtoutumisasteen aikaansaamiseksi tarvittiin 40 ml/l annos mäntysuopaa. Tarkastelu tehtiin silmämääräisesti. Käytännössä tämä olisi tarkoittanut, että loopissa tehtäviä kokeita varten tarvittaisiin 280 l mäntysuopaa massamäärän ollessa 7 m^3. Tästä syystä valkaistun massan vaahtouttamiseen valittiin Fairy original – astianpesuaine, jota tarvittiin vain noin 1 l vaahtoutumisen aikaansaamiseksi.

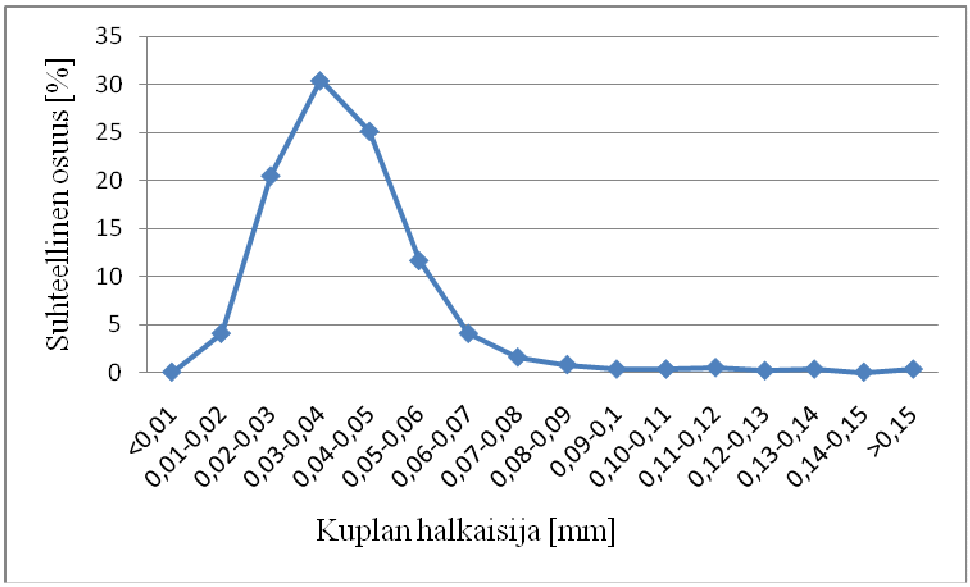
Valkaistun mäntysellun vaahtouttamista pinta-aktiivisen aineen avulla tutkittiin lisäämällä vähän kerrallaan pinta-aktiivisen aineen konsentraatiota sekoittimessa. alkuun tehty testiajo lisäämällä 1 ml edellämainittua pinta-aktiivista ainetta 3,6 litran massa-annoksen joukkoon osoittautui aivan liian suureksi pitoisuudeksi, koska tällöin kuplamäärä nousi moninkertaiseksi Mutikaisen ja Rantalan töissä ruskealle massalle tehtyihin kokeisiin verrattuna. Töissä havaitut kuplamäärät olivat luokkaa 300–800 kuplaa/kuvasarja. Sopivaa konsentraatiota haettiin tämän jälkeen aloittamalla konsentraatiolla 0,035 ml/l ja jatkamalla tästä 0,035 ml/l lisäyksin, kunnes sopiva vaahtoutumisen taso saavutettiin annoksella 0,105 ml/l. Vertailu tehtiin kierrosnopeudella 1200 min^{-1}, koska sekoituksen viipymäaika teollisen mittakaavan sekoittimissa on huomattavasti pienempi kuin panostoimisessa laboratoriosekoittimessa. Tällöin pienemmällä

sekoitusintensiteetillä saadaan aikaiseksi parempi sekoittuminen, koska sekoitukseen käytetty energiamäärä kasvaa ajan kuluessa. Myös Proto 10 sekoittimelle tehty silmämääräinen tarkastelu osoitti, että kyseisellä pyörimisnopeudella saadut tulokset olivat lähimpänä toisiaan. Kuvassa 20 on esitetty pinta-aktiivisen aineen konsentraation vaikutus Quantum Mark IV laboratoriosekoittimessa havaittavaan kuplamäärään valkaistulla mäntysellulla.



Kuva 20. Quantum Mark IV referenssiajojen tulokset pinta-aktiiviselle aineelle. Pyörimisnopeus 1200 min^{-1}, sakeus 10 %, lämpötila 70 °C.

Kuvasta nähdään, että kuplamäärä nousee voimakkaastii pinta-aktiivisen aineen konsentraation kasvaessa. Sopivaksi konsentraatioksi Proto 10 – sekoittimella tehtäviä kokeita varten valittiin 0,1 ml/l. Myös kuplakokojakaumaa verrattiin Mutikaisen ja Rantalan töissään tutkimiin ruskealle massalle tehtyihin sekoituskokeisiin. Vertailussa havaittiin, että kuplakokojakauma on edellisten töiden kaltainen, mutta hieman näitä tasaisempi. Kuvassa 21 on esitetty Quantum Mark IV referenssiajoissa määritetty kuplakokojakauma pinta-aktiivisen aineen konsentraatiolla 0,105 ml/l.



Kuva 21. Quantum Mark IV referenssiajojen kuplakokojakauma. Pyörimisnopeus 1200 min^{-1}, sakeus 10 %, lämpötila 80 °C, pinta-aktiivisen aineen konsentraatio 0,105ml/l, sekoitusaika 6 s.

Kuvasta 21 nähdään, että halkaisijaltaan 0,03-0,04 mm olevia kuplia esiintyy eniten. Myös 0,02-0,03 ja 0,04-0,05 mm halkaisijaltaan olevia kuplia esiintyy paljon, mutta tätä pienempien ja suurempien kuplien esiintyminen vähenee voimakkaasti. Samanlainen kokojakauma oli yleisin myös Mutikaisen ja Rantalan tekemissä tutkimuksissa ruskealle mäntymassalle sillä erotuksella, että heidän töissään kuplakokojakaumat eivät olleet aivan yhtä tasaisia. Kuitenkin voidaan sanoa, että pinta-aktiivisella aineella tehdyt koeajot vastaavat hyvin ruskealla massalla tehtyjä vastaavia kokeita konsentraation ollessa 0,10 ml/l.

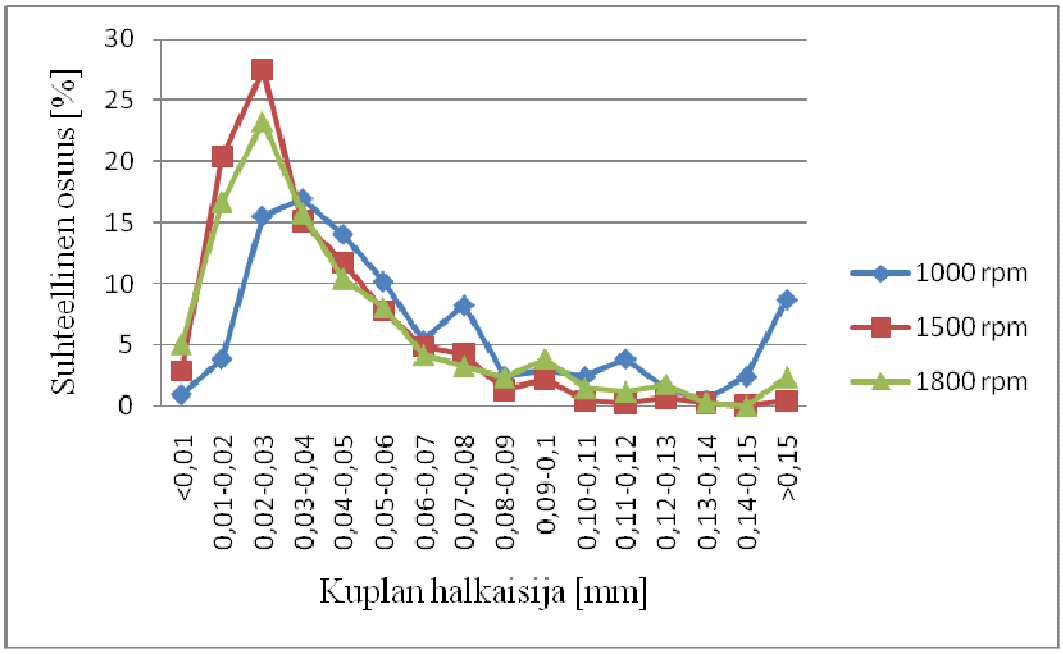
7.3 Proto 10 sekoituskokeiden tulokset

Työn päätarkoituksena oli selvittää Proto 10 fluidisoivan kemikaalisekoittimen kyky dispergoida ilmaa keskisakean valkaistun mäntysellun joukkoon ja verrata tuloksia Quantum Mark IV laboratoriosekoittimella saatuihin tuloksiin. Työssä tutkittiin virtaaman ja sekoitusintensiteetin vaikutusta kolmesta eri kuvausyhteestä havaittaviin kuplamääriin ja kuplakokojakaumiin. Valkaistun mäntysellun vaahtoutuminen saatiin aikaiseksi lisäämällä pinta-aktiivista ainetta kuitususpension joukkoon. Kokeissa käytetty pinta-aktiivisen aineen annos oli 0,10 ml / l l kuitususpensiota. Kokeiden alussa tehtävässä silmämääräisessä tarkastelussa havaittiin, että Proto 10 sekoittimen aikaansaama dispersio

muistuttaa eniten laboratoriosekoituksessa pyörimisnopeudella 1200 min^{-1} saatuja tuloksia. Niinpä referenssiajojen dispersion karakterisointi päätettiin tehdä kyseisellä pyörimisnopeudella saaduista tuloksista.

7.3.1 Sekoitusintensiteetin vaikutus sekoitustulokseen

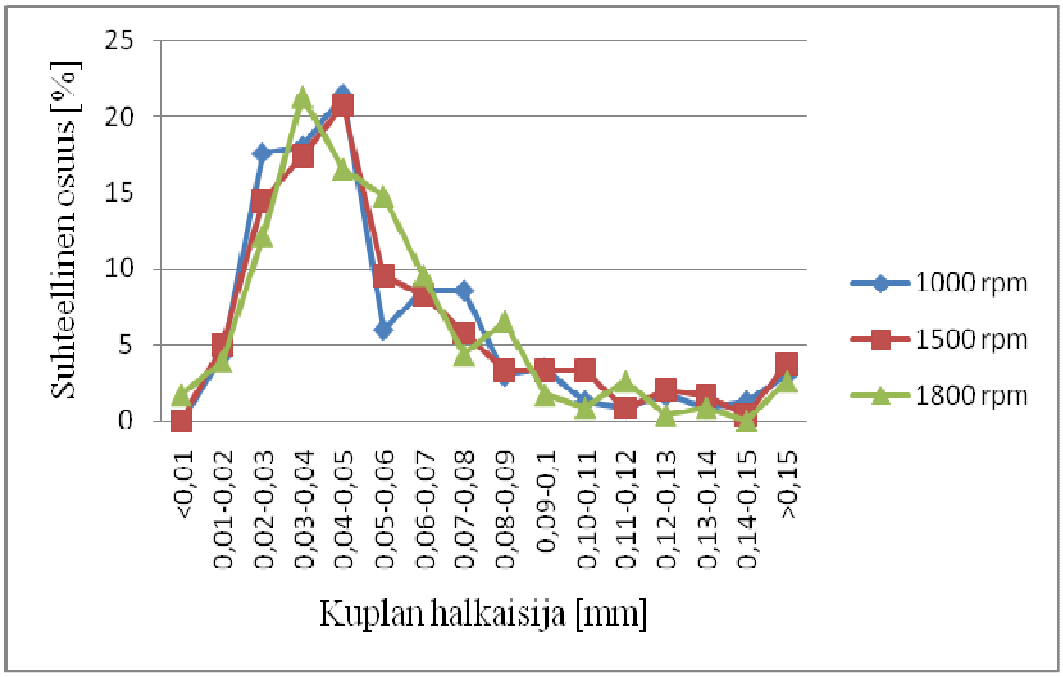
Sekoitusintensiteetin vaikutusta sekoitustulokseen tarkasteltiin vertailemalla eri roottorin pyörimisnopeuksilla saatuja dispersioita kolmella eri virtaamalla. Sekoittimen pesästä tehtyjen analyysien perusteella virtaamilla 20 ja 30 l/s paras sekoitustulos saatiin aikaiseksi kierrosnopeudella 1500 min^{-1}. Kuvassa 22 on esitetty roottorin pyörimisnopeuden vaikutus kuplakokojakaumaan virtaaman ollessa 10 l/s



Kuva 22. Sekoitusintensiteetin vaikutus ilman suhteelliseen kuplakokojakaumaan Proto 10 fluidisoivassa sekoittimessa virtaaman ollessa 10 l/s. Ilman pitoisuus 20 %, sakeus 10,5 % ja lämpötila 75 °C.

Kuvasta 22 nähdään, että pyörimisnopeuden noustessa 1500 min^{-1}:ssa, pienten kuplien osuus kasvaa voimakkaasti. Edelleen kierrosnopeuden noustessa 1800 min^{-1}:ssa, pienten kuplien osuus dispersiossa alkaa vähetä, josta voidaan päätellä, että myös sekoittuminen heikkenee. Huomattavaa kuvassa on myös se, että pyörimisnopeudella 1000 min^{-1} suurten, yli 15 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus on huomattava. Kuvassa 22 esitetty kuplakokojakauma oli yhtenevä 20 l/s

virtaamalla saatuihin tuloksiin. Sen sijaan virtaaman kasvaessa 30 l/s:ssa, pyörimisnopeudella ei havaittu enää olevan yhtä merkittävää vaikutusta dispersioon. Kuvassa 23 on esitetty roottorin pyörimisnopeuden vaikutus kuplakokojakaumaan virtaaman ollessa 30 l/s.



Kuva 23. Sekoitusintensiteetin vaikutus ilman suhteelliseen kuplakokojakaumaan Proto 10 fluidisoivassa sekoittimessa virtaaman ollessa 30 l/s. Ilman pitoisuus 20 %, sakeus 10,5 % ja lämpötila 75 °C.

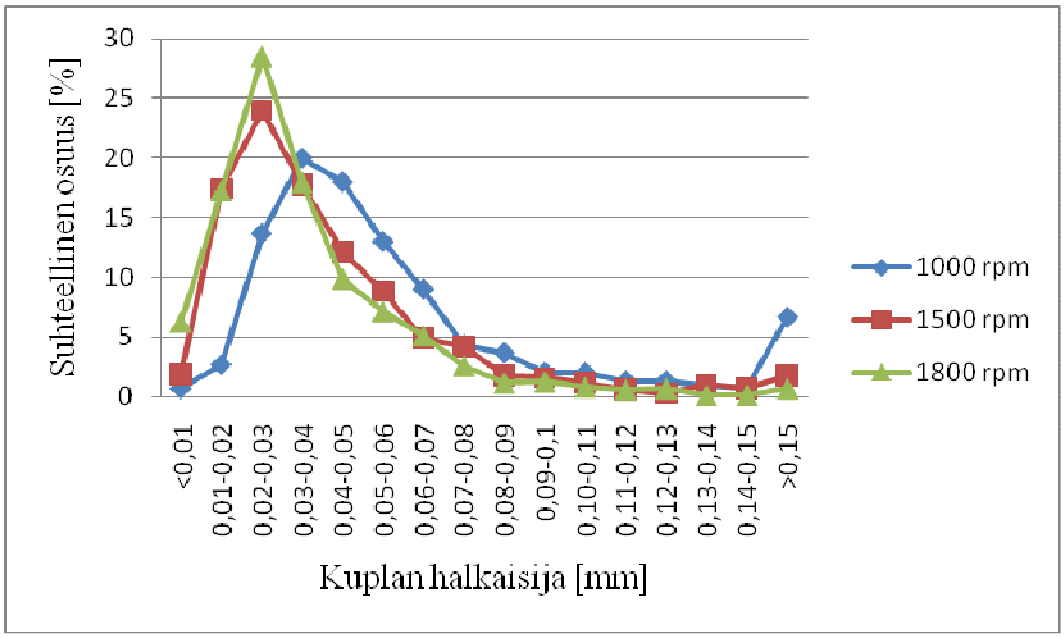
Kuvasta 23 nähdään, että virtaaman kasvaessa 30 l/s:ssa, sekoittimen pyörimisnopeuden vaikutuksella ei ole enää yhtä suurta merkitystä kuplakokojakaumaan kuin pienemmillä virtaamilla. Myös suurten, yli 0,15 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus on kaikilla pyörimisnopeuksilla miltei sama. Taulukossa IV on esitetty sekoittimelle tehtyjen kuplakokoanalyysien tulokset.

Taulukko IV. Kuplakokoanalyysin tulokset Proto 10 sekoittimen pesästä otetuille kuville kierrosnopeuden muuttuessa. Virtaama 10-30 l/s, Ilmapitoisuus 20 %, sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C.

Nopeus	Virtaama	Kpl	Keskiarvo	Mediaani	Moodi	Keskihajonta	Min	Max
[rpm]	[l/s]	[n]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1000	10	206	0,069	0,048	0,031	0,060	0,008	0,42
1500	10	451	0,037	0,029	0,012	0,023	0,005	0,162
1800	10	336	0,045	0,033	0,015	0,042	0,004	0,39
1000	20	255	0,051	0,041	0,033	0,040	0,007	0,383
1500	20	337	0,041	0,035	0,014	0,024	0,007	0,177
1800	20	279	0,047	0,038	0,024	0,039	0,005	0,407
1000	30	233	0,055	0,045	0,029	0,037	0,011	0,274
1500	30	241	0,058	0,045	0,021	0,049	0,013	0,531
1800	30	230	0,053	0,047	0,03	0,031	0,005	0,181

Taulukosta IV nähdään, että virtaamilla 10 ja 20 l/s suurin kuplamäärä ja pienin kuplien keskiarvo, mediaani, moodi ja keskihajonta saavutetaan roottorin pyörimisnopeudella 1500 min^{-1}. Tämä tukee olettamusta, että sekoittimen optimaalinen toiminta-alue on lähellä kyseistä pyörimisnopeutta.

Siirryttäessä sekoittimesta 0,55 m sekoittimen jälkeen putkistossa sijaitsevaan kuvausyhteeseen, muuttuu kuplakokojakauma hieman sekoittimen sisällä havaitusta. Pyörimisnopeuksilla 1500 ja 1800 min^{-1} saadut kuplakokojakaumat ovat hyvin terävät. Pyörimisnopeudella 1000 min^{-1} saavutettu dispersio on hyvin samankaltainen kuin sekoittimessa samalla virtaamalla havaittu. Kuplakokojakauma on suurempia pyörimisnopeuksia huomattavasti laajempi ja jakauman piikki sijoittuu yhtä kuplakokoluokkaa suuremmalle alueelle. Putkistossa eri pyörimisnopeuksilla havaitut kuplakokojakaumat virtaamalla 10 l/s on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Sekoitusintensiteetin vaikutus ilman suhteelliseen kuplakokojakaumaan 0,55 m Proto 10 fluidisoivan sekoittimen jälkeen 0,163 m halkaisijaltaan olevassa putkessa. Virtaama 10 l/s. Ilman pitoisuus 20 %, sakeus 10,5 % ja lämpötila 75 °C.

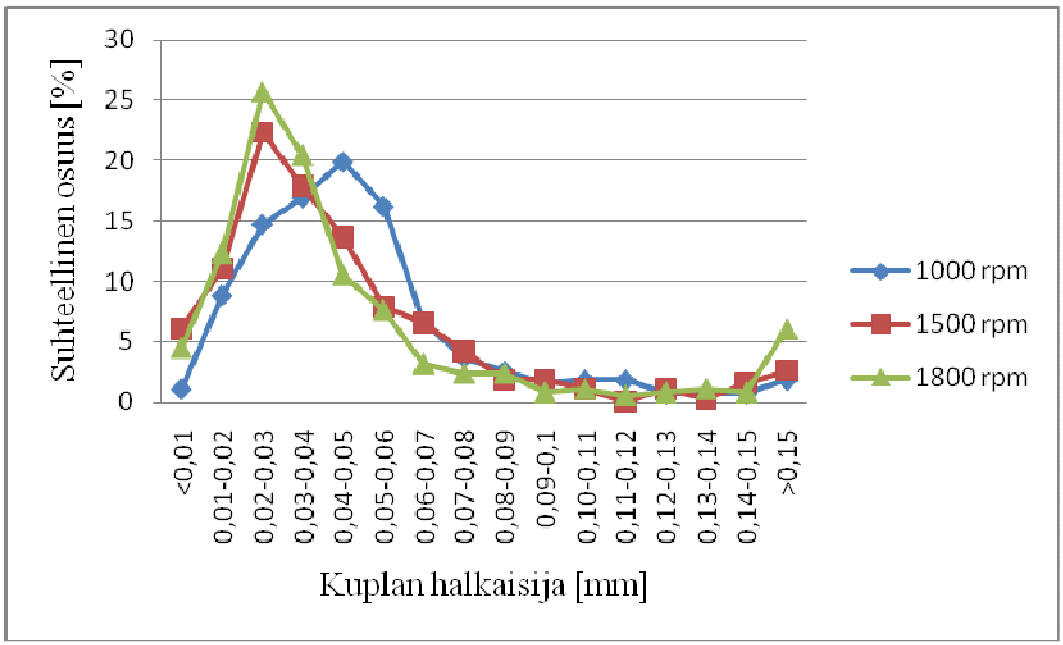
Kuvasta 24 nähdään pienimmällä pyörimisnopeudella havaitun kuplakokojakauman laajempi koko ja sijoittuminen yhtä kuplakokoluokkaa suuremmalle alueelle verrattuna suuremmilla pyörimisnopeuksilla saatuihin dispersioihin. Myös suurten, yli 0,15 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus on merkittävä pyörimisnopeuden ollessa 1000 min^{-1}. Merkittävin ero sekoittimessa saatuihin tuloksiin verrattuna oli se, että putkistossa havaittava kuplamäärä kasvoi erittäin voimakkaasti sekoittimen kierrosnopeuden kasvaessa. Samalla keskimääräinen kuplakoko pieneni huomattavasti. Taulukossa V on esitetty 0,55 m sekoittimen jälkeen otetuista kuvista tehty kuplakokoanalyysi.

Taulukko V. Kuplakokoanalyysin tulokset 0,55 m Proto 10 sekoittimen jälkeen 0,168 m halkaisijaltaan olevasta putkesta otetuille kuville kierrosnopeuden muuttuessa. virtaama 10 l/s, Ilmapitoisuus 20 %, sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C.

Nopeus	Virtaama	Kpl	Keskiarvo	Mediaani	Moodi	Keskihajonta	Min	Max
[rpm]	[l/s]	[n]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1000	10	300	0,069	0,048	0,045	0,086	0,004	0,78
1500	10	692	0,042	0,033	0,018	0,034	0,002	0,358
1800	10	881	0,036	0,029	0,023	0,026	0,002	0,262

Taulukosta V nähdään, että kuplamäärä kasvaa voimakkaasti sekoittimen kierrosnopeuden kasvaessa. Myös mediaani, keskihajonta ja keskimääräinen kuplakoko pienenevät sekoitusnopeuden kasvaessa.

Siirryttäessä 2,45 m sekoittimen jälkeen sijaitsevaan kuvausyhteeseen huomattiin, että 10 l/s virtaamalla kuplakokojakauma ja kuplien määrä oli miltei samanlainen kuin 0,55m reaktorin jälkeen. Virtaamalla 20 l/s saatiin samankaltainen kuplakokojakauma, kuin 10 l/s virtaamalla. Kuvassa 25 on esitetty 2,45 m reaktorin jälkeen 20 l/s virtaamalla havaittu suhteellinen kuplakokojakauma.



Kuva 25. Sekoitusintensiteetin vaikutus ilman suhteelliseen kuplakokojakaumaan 2,45 m Proto 10 fluidisoivan sekoittimen jälkeen 0,163 m halkaisijaltaan olevassa putkessa. Virtaama 20 l/s. Ilman pitoisuus 20 %, sakeus 10,5 % ja lämpötila 75 °C.

Kuvasta 25 nähdään, että pyörimisnopeuksilla 1500 ja 1800 min^{-1} saadaan miltei samanlainen kuplakokojakauma 2,45 m sekoittimen jälkeen kuin kuvassa 24 esitetyssä kuvassa 0,55 m sekoittimen jälkeen. Tämä kertoo siitä, että merkittävää kuplien välistä yhdistymistä kuvausyhteiden välisellä matkalla ei tapahdu. Kuvista 24 ja 25 nähdään myös, että kierrosnopeuksilla 1500 ja 1800 min^{-1} saadut kuplakokojakaumat ovat miltei samanlaiset. Tästä voidaan päätellä, että olisi energiatehokkaampaa käyttää kierrosnopeutta 1500 min^{-1}, koska tällöin saadaan samankaltainen dispersio pienemmällä energiankulutuksella.

Tarkasteltaessa kuplamääriä huomataan, että virtaamalla 10 l/s sekoittimen pyörimisnopeudella on erittäin suuri vaikutus kuplamäärään. Sen sijaan virtaamilla 20 ja 30 l/s sekoittimen pyörimisnopeuden vaikutus pienenee, eikä vaikuta enää yhtä merkittävästi havaittuihin kuplamääriin. Taulukossa VI on esitetty 2,45 m sekoittimen jälkeen otetuista kuvista tehty kupla-analyysi.

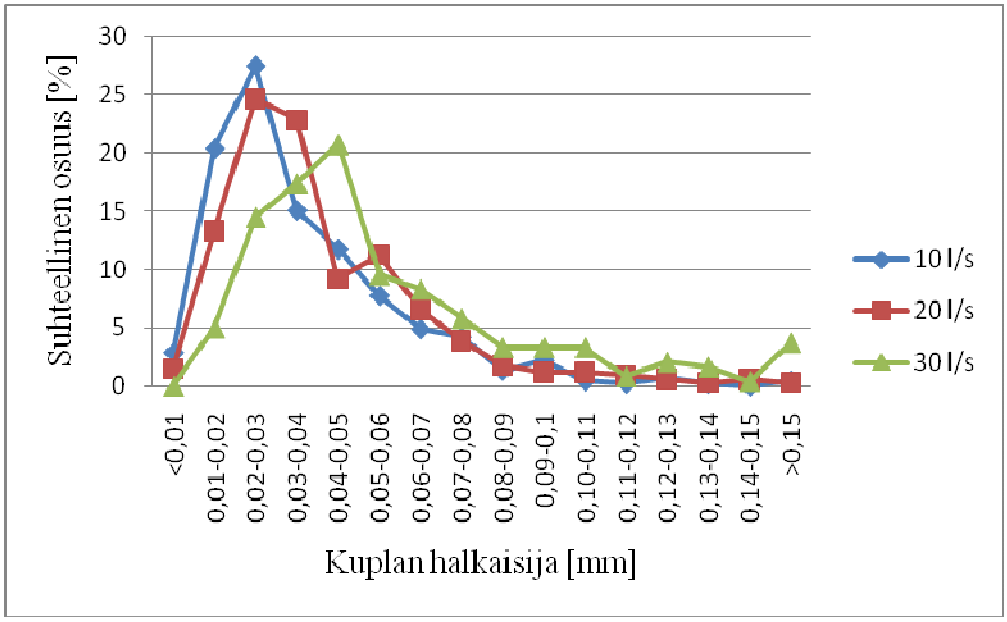
Taulukko VI. Kuplakokoanalyysin tulokset 2,45 m Proto 10 sekoittimen jälkeen 0,168 m halkaisijaltaan olevasta putkesta otetuille kuville. Ilmapitoisuus 20 %, sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C.

Nopeus	Virtaama	Kpl	Keskiarvo	Mediaani	Moodi	Keskihajonta	Min	Max
[rpm]	[l/s]	[n]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1000	10	322	0,05	0,039	0,034	0,054	0,005	0,439
1500	10	532	0,03	0,027	0,016	0,034	0,002	0,324
1800	10	772	0,035	0,026	0,019	0,032	0,002	0,386
1000	20	271	0,050	0,045	0,057	0,035	0,007	0,296
1500	20	380	0,045	0,035	0,025	0,039	0,004	0,31
1800	20	381	0,051	0,033	0,031	0,064	0,005	0,763
1000	30	214	0,069	0,050	0,053	0,060	0,007	0,422
1500	30	258	0,068	0,046	0,034	0,074	0,012	0,643
1800	30	269	0,069	0,047	0,017	0,081	0,005	0,883

Taulukosta VI nähdään, että virtaamalla 10 l/s sekoittimen pyörimisnopeus vaikuttaa voimakkaasti kuplamäärään. Sen sijaan virtaamilla 20 ja 30 l/s pyörimisnopeuden vaikutus havaittuun kuplamäärään on suhteellisen pieni. Käytettäessä Proto 10 sekoittimelle virtaamia 20 - 30 l/s, optimaalinen kierrosnopeus on kuplakokoanalyysien ja havaittujen kuplamäärien perusteella luokkaa 1500 min^{-1}.

7.3.2 Virtaaman vaikutus sekoitustulokseen.

Aikaisempien tuloksien perusteella todettiin, että sekoittimen pyörimisnopeudella 1000 min^{-1} dispersion laatu muuttuu aineensiirron kannalta epäedullisempaan suuntaan. Tämä havaittiin myös virtaamille tehdyssä vertailussa, sillä pyörimisnopeudella 1000 min^{-1} saadut kuplakokojakaumat olivat hyvin laajoja ja epätasaisia. Niinpä virtaamien vertailu päätettiin tehdä pelkästään pyörimisnopeuksille 1500 ja 1800 min^{-1}. Sekoittimen sisältä määritetyt kuplakokojakaumat olivat hyvin samankaltaiset molemmilla pyörimisnopeuksilla. Kuvassa 26 on esitetty sekoittimen pyörimisnopeudella 1500 min^{-1} määritetty suhteellinen kuplakokojakauma sekoittimen sisältä.



Kuva 26. Virtaaman vaikutus ilman suhteelliseen kuplakokojakaumaan Proto 10 fluidisoivassa sekoittimessa. Pyörimisnopeus 1500 min^{-1}, Ilman pitoisuus 20 %, sakeus 10,5 % ja lämpötila 75 °C.

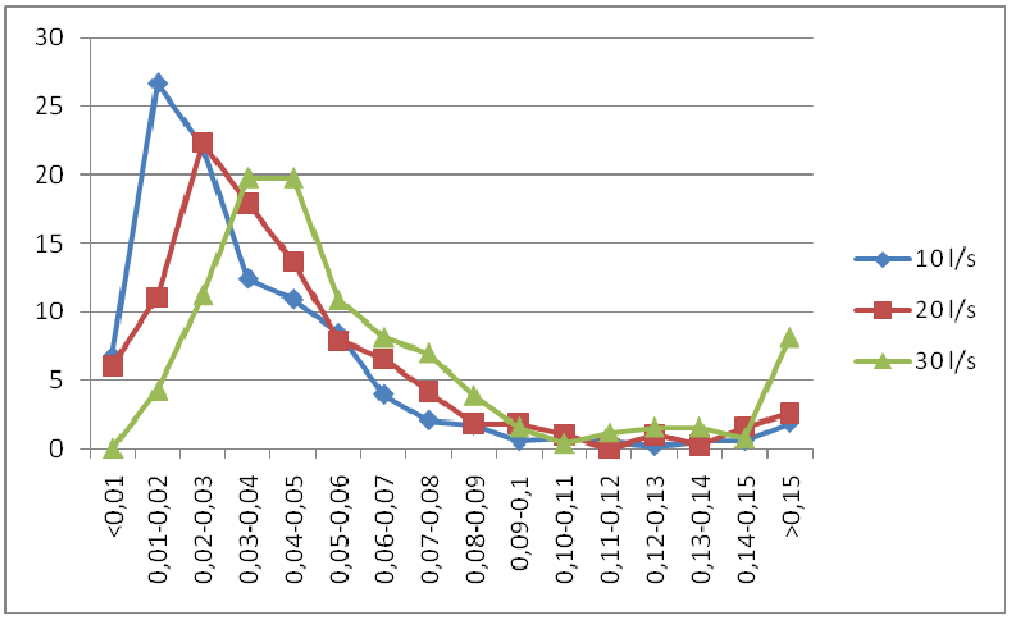
Kuvasta 26 nähdään, että virtaaman kasvaessa dispersion laatu heikkenee. Virtaamalla 30 l/s jakauman huippukohta on jo kaksi kokoluokka suuremmalla alueella kuin pienemmillä virtaamilla. Myös suurten, yli 0,15 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus kasvaa. Sen sijaan virtaamilla 10 ja 20 l/s kuplakokojakaumat ovat kohtalaisen samanlaiset. Näin ollen virtaaman pienentäminen alle 20 l/s ei vaikuta merkittävästi siihen, minkä kokoisia kuplia sekoittimessa esiintyy. Kuplamäärän suhteen ero näillä kahdella virtaamalla on

kuitenkin suurehko. Taulukossa VII on esitetty sekoittimen sisältä otetuille kuville tehtyjen kuplakokoanalyysien vertailu virtaaman muuttuessa.

Taulukko VII Kuplakokoanalyysin tulokset Proto 10 sekoittimessa virtaaman muuttuessa. Ilmapitoisuus 20 %, sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C.

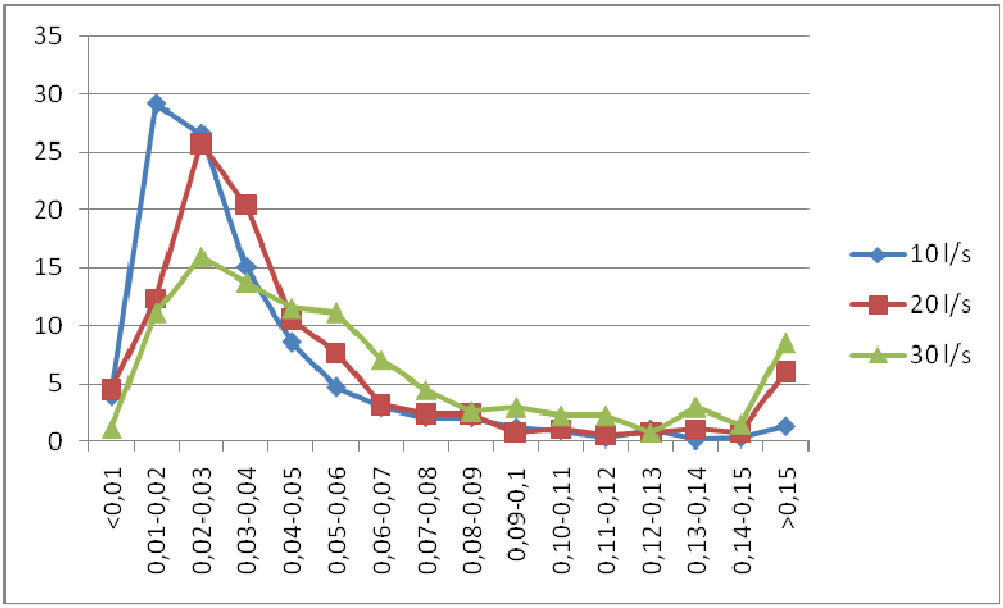
Nopeus	**Virtaama**	**Kpl**	**Keskiarvo**	**Mediaani**	**Moodi**	**Keskihajonta**	**Min**	**Max**
[rpm]	[l/s]	[n]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1500	10	451	0,037	0,029	0,012	0,023	0,005	0,162
1500	20	337	0,041	0,035	0,014	0,024	0,007	0,177
1500	30	241	0,058	0,045	0,021	0,049	0,013	0,531
1800	10	336	0,045	0,033	0,015	0,042	0,004	0,39
1800	20	279	0,047	0,038	0,024	0,039	0,005	0,407
1800	30	230	0,053	0,047	0,03	0,031	0,005	0,181

Taulukosta VII nähdään, että virtaaman pienentäminen kasvattaa havaittavaa kuplamäärää ja pienentää keskimääräistä kuplakokoa, kuten oli ennalta arvattavissa. Valkaisun kannalta merkittävää on kuitenkin se, millainen dispersio valkaisureaktoriin saadaan vietyä. 2,45 m sekoittimen jälkeen, juuri ennen reaktorin syöttöä havaitut kuplakokojakaumat muistuttivat hyvin paljon sekoittimessa havaittuja kuplakokojakaumia, mutta kuplamäärissä oli suuri ero. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty 2,45 m sekoittimen jälkeen havaitut kuplakokojakaumat virtaaman muuttuessa pyörimisnopeuksilla 1500 ja 1800 min^{-1}.



Kuva 27. Virtaaman vaikutus ilman suhteelliseen kuplakokojakaumaan 2,45 m Proto 10 fluidisoivan sekoittimen jälkeen. Pyörimisnopeus 1500 min^{-1}, Ilman pitoisuus 20 %, sakeus 10,5 % ja lämpötila 75 °C.

Kuvasta 27 nähdään, kuinka kuplakokojakauman siirtyy kuvaajassa pykälittäin oikealle ja levenee kuitususpension virtaaman kasvaessa sekoittimessa.



Kuva 28. Virtaaman vaikutus ilman suhteelliseen kuplakokojakaumaan 2,45 m Proto 10 fluidisoivan sekoittimen jälkeen. Pyörimisnopeus 1800 min^{-1}, Ilman pitoisuus 20 %, sakeus 10,5 % ja lämpötila 75 °C.

Kuvasta 28 nähdään, että sekoitusintensiteettiä kasvattamalla siirimmalla virtaamalla saadun dispersion kuplakokojakauman huippu on saatu yhtä kokoluokkaa pienemmälle alueelle, kuin kuvassa 27. Jakauma on kuitenkin

edelleen hyvin laaja, ja suurten, yli 15 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus on suuri. Taulukossa IIX on esitetty 2,45 m sekoittimen jälkeen tehtyjen kuplakokoanalyysien tulokset sekoitusajan muuttuessa.

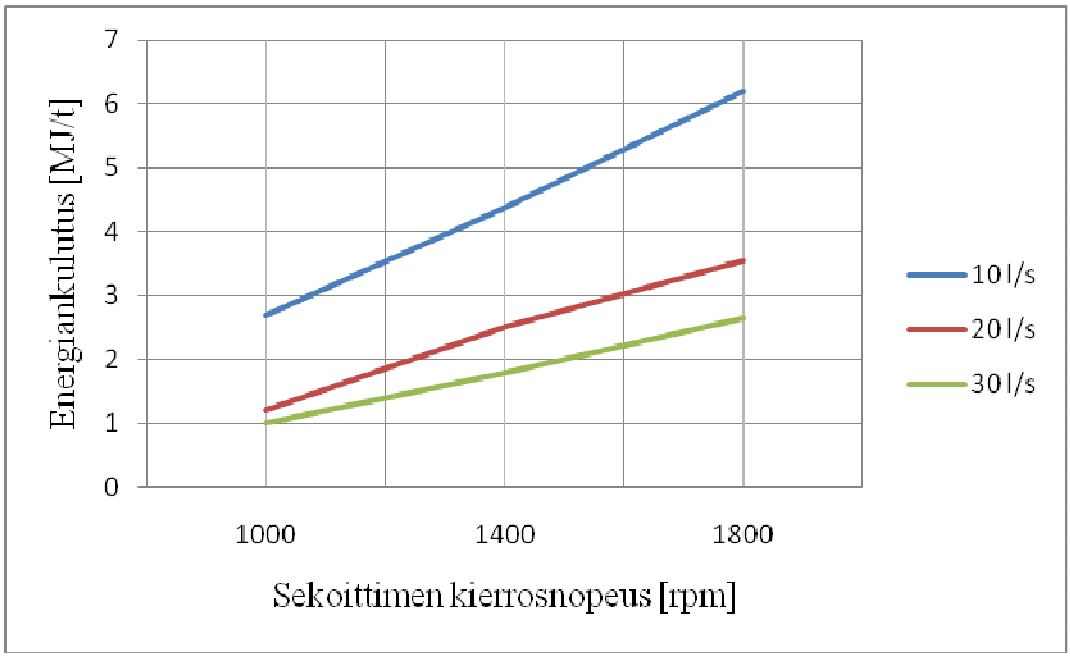
Taulukko IIX. Kuplakokoanalyysin tulokset 2,45 m Proto 10 sekoittimen jälkeen 0,168 m halkaisijaltaan olevassa putkessa virtaaman muuttuessa. Ilmapitoisuus 20 %, sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C.

Nopeus	Virtaama	Kpl	Keskiarvo	Mediaani	Moodi	Keskihajonta	Min	Max
[rpm]	[l/s]	[n]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1500	10	532	0,037	0,027	0,016	0,034	0,002	0,324
1500	20	380	0,045	0,035	0,025	0,039	0,004	0,31
1500	30	258	0,068	0,046	0,034	0,074	0,012	0,643
1800	10	772	0,035	0,026	0,019	0,032	0,002	0,386
1800	20	381	0,051	0,033	0,031	0,064	0,005	0,763
1800	30	269	0,069	0,047	0,017	0,081	0,005	0,883

Taulukosta IIX havaitaan, että sekoitusajan lyhentäminen pienentää havaittavaa kuplamäärää voimakkaasti. Samalla keskimääräinen kuplakoko kasvaa ja keskihajonta suurenee. Tämä tarkoittaa sitä, että kuplakoon vaihtelu kasvaa merkittävästi.

7.3.3 Sekoituksen energiankulutus

Sekoituksen tehonkulutusta seurattiin ohjaamon näytöltä ja sekoittimen ottotehot kirjattiin ylös kierrosnopeuden ja virtaaman muuttuessa. Ottotehon ja virtaaman perusteella laskettiin sekoituksessa käytetty energiamäärä sellutonnia kohden. Kuvassa 29 on esitetty sekoituksen energiankulutus eri virtaamilla sekoittimen kierrosnopeuden muuttuessa.



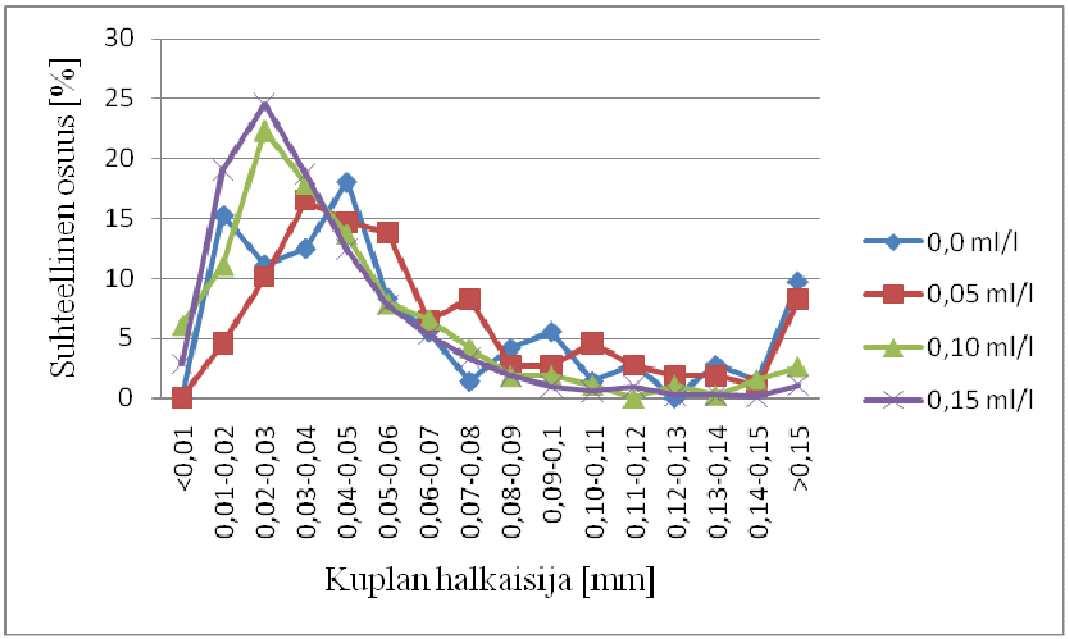
Kuva 29. Sekoitukseen käytetty energiamäärä sellutonnia kohden eri virtaamilla pyörimisnopeuden muuttuessa Proto 10 sekoittimessa. Sakeus 10,5 %, ilmapitoisuus 20 %, lämpötila 75 °C.

Kuvasta 29 nähdään, että sellutonnia kohden käytetty energiamäärä kasvaa lineaarisesti sekoittimen pyörimisnopeuden kasvaessa. Pienimmällä virtaamalla käytetty energiamäärä sellutonnia kohden on noin 2-3 kertainen 20 ja 30 l/s virtaamiin verrattuna. Käytetyn energiamäärän vaikutus sekoitustulokseen näkyy hyvin kuplakokojakaumia ja kuplamääriä tarkasteltaessa. Pienimmällä virtaamalla saavutettiin suurin kuplamäärä ja pienin keskimääräinen kuplakoko. Mutikainen /41/ mittasi työssään Quantum Mark IV laboratoriosekoituksen tehonkulutuksia. Mäntysellun sekoittaminen vaadittiin 2-7 kW tehonkulutus pyörimisnopeuksilla 1200–2400 min^{-1}. Tällöin sekoitusajan ollessa 6 s energiankulutus sellutonnia kohden on 42–146 MJ/sellutonni. Tällöin sekoitukseen käytetty energiamäärä on jopa 40 kertainen verrattuna jatkuvatoimiseen fluidisoivaan sekoittamiseen. Näin ollen laboratoriosekoituksen ja jatkuvatoimisen teollisen mittakaavan sekoittamisen vertailukelpoisuutta voidaan pitää kyseenalaisena. Bournen /30/ mukaan samalla energiamäärällä saadaan aikaiseksi samankaltainen sekoittuminen mikrotasolla. Tällöin parhaiten jatkuvatoimista sekoittamista kuvaavat tulokset pitäisi saada Quantum Mark IV laboratoriosekoituksen alkuvaiheilta, jolloin käytetty energiamäärä sellutonnia kohden on molemmissa sekoituksissa samaa luokkaa.

Taulukossa I sivulla 36 on esitetty erilaisten sekoittimien energiankulutuksia sellutonnia kohden. Taulukosta nähdään, että Ahlström Ahlmix sekoittimen teollisuudessa havaittu energiankulutus on luokka 2-6 MJ/t. Energiamäärien suhteen tässä työssä saadut tulokset pätevät hyvin Ahlmix tyyppisille sekoittimille. Taulukossa on esitetty, että laboratoriosekoituksessa käytetyt energiamäärät ovat 63–310 MJ/t. Niinpä Mutikaisen saamia tuloksia voidaan pitää hyvin normaalia laboratoriosekoitusta kuvaavina.

7.3.4 Pinta-aktiivisen aineen vaikutus kuplakokojakaumaan

Koeajoja Proto 10 sekoittimella päätettiin jatkaa lisäämällä suurempi määrä pinta-aktiivista ainetta valkaistun massan joukkoon. Tällöin konsentraatioksi muodostui 0,15 ml/l. Tarkoituksena oli saada lisätietoa pinta-aktiivisen aineen käyttäytymisestä sekoittimessa tulevia töitä varten. Kuvassa 30 on esitetty pinta-aktiivisen aineen vaikutus kuplakokojakaumaan 2,45 m sekoittimen jälkeen olevassa yhteessä sekoittimen pyörimisnopeudella 1500 min^{-1} ja virtaamalla 20 l/s.



Kuva 30. Pinta-aktiivisen aineen konsentraation vaikutus kuplakokojakaumaan 2.45 m Proto 10 sekoittimen jälkeen 0,168 m halkaisijaltaan olevassa putkessa. Sakeus 10,5 %, ilmapitoisuus 20 %, lämpötila 75 °C.

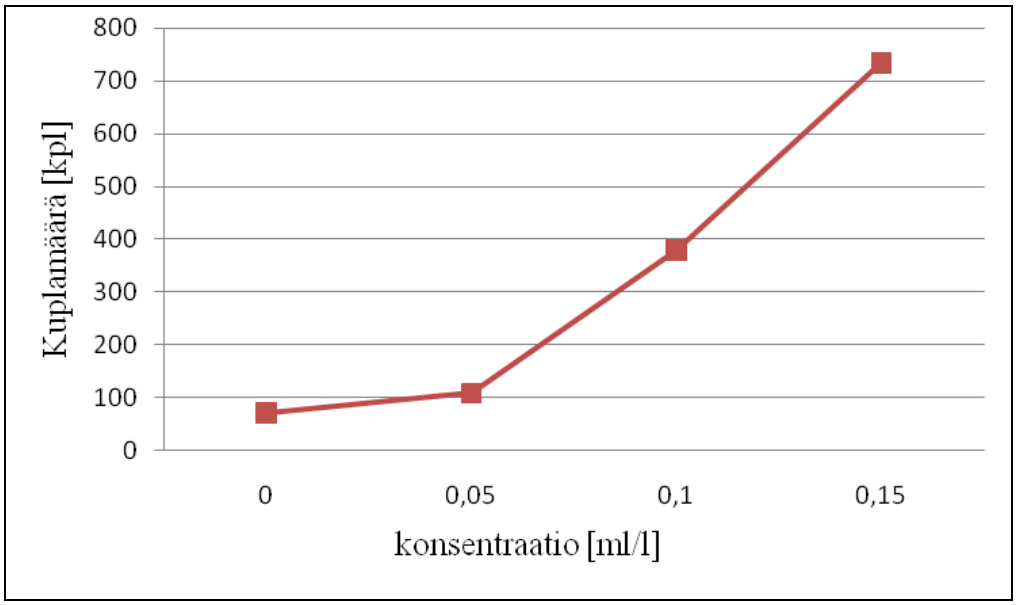
Kuvasta 30 nähdään, että pesuainekonsentraation kasvaessa kuplakokojakauma muuttuu terävämmäksi ja piikki sijoittuu pienemmälle kuplakokoalueelle. Myös suurten, yli 0,15 mm halkaisijaltaan olevien kuplien osuus pienenee voimakkaasti konsentraation kasvaessa yli 0,05 ml/l.

Taulukossa IX on esitetty vastaavien kokeiden kuplakokoanalyysien tulokset samaisesta kuvausyhteestä tarkasteltuna pyörimisnopeuden ollessa 1500 min^{-1} virtaamalla 20 l/s.

Taulukko IX. Pinta-aktiivisen aineen konsentraation vaikutus havaittavaan kuplamäärään ja kuplakokoanalyysin tuloksiin sekoittimen pyörimisnopeudella 1500 min^{-1} ja virtaama 20 l/s. Sakeus 10,5 %, ilmapitoisuus 20 %, lämpötila 75 °C.

Fairy	**Kpl**	**Keskiarvo**	**Mediaani**	**Moodi**	**Keskihajonta**	**Min**	**Max**
[ml/l]	[n]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	72	0,06555	0,0426	0,028	0,0559805	0,01	0,242
0,05	109	0,07568	0,0533	0,033	0,0768339	0,012	0,568
0,1	380	0,04555	0,0357	0,025	0,0391837	0,004	0,31
0,15	734	0,03895	0,0321	0,02	0,0316192	0,004	0,489

Taulukosta IX nähdään, että havaittava kuplamäärä muuttuu erittäin voimakkasti verrattuna muihin arvoihin pinta-aktiivisen aineen konsentraation kasvaessa. Keskimääräinen kuplakoko, mediaani, moodi, keskihajonta ja pienin havaittu kuplakoko laskevat jatkuvasti lisättäessä pinta-aktiivista ainetta. Kuvassa 31 on esitetty pinta-aktiivisen aineen konsentraation vaikutus havaittuun kuplamäärään sekoittimen pyörimisnopeudella 1500 min^{-1} virtaamalla 20 l/s.



Kuva 31. Pinta-aktiivisen aineen konsentraation vaikutus kuplamäärään 2.45 m Proto 10 sekoittimen jälkeen 0,168 m halkaisijaltaan olevassa putkessa. Sakeus 10,5 %, ilmapitoisuus 20 %, lämpötila 75 °C.

Kuvasta 31 nähdään, että kuplamäärä kasvaa voimakkaasti pinta-aktiivisen aineen konsentraation kasvaessa. Sama ilmiö havaittiin aikaisemmin kuvassa 20 Quantum Mark IV laboratoriosekoittimella tehdyissä referenssiajoissa. Kuplamäärät olivat molemmissa kokeissa hyvin samankaltaiset, joten voidaan sanoa, että Quantum Mark IV:llä pyörimisnopeudella 1200 min^{-1} tehdyt kokeet vastaavat kohtalaisen hyvin Proto 10 sekoittimella pyörimisnopeudella 1500 min^{-1} ja virtaamalla 20 l/s saatuja tuloksia. Vertailtaessa kuvassa 21 olevaa kuplakokojakaumaa ja kuvassa 30 konsentraatiolla 10 ml/l saatua kuplakokojakaumaa havaitaan, että kuplakokojakaumat ovat hyvin samankaltaiset. Tämä kertoo siitä, että laboratoriosekoituksella saadaan aikaan hyvin teollista sekoitusta kuvaava dispersio, mutta käytetty energiamäärä massayksikköä kohden on valtavasti suurempi.

Kokeissa havaittiin myös, että käytännössä kyseisellä kuvauslaitteella tulevat kokeet on tehtävä siten, että kuplamäärä on alle 1000 kuplaa/kuvasarja. Tämä johtuu siitä, että kuplakoon ollessa luokkaa 0,02-0,04 mm kyseisellä kuplamäärällä saavutetaan raja, jolloin kuva muuttuu epäselväksi ja epäteräväksi valon heijastuessa yhtenäisestä kuplaparvesta. Aluksi virheen arveltiin johtuvan kameran tarkennuksen siirtymisestä, mutta pian havaittiin, että tarkennus oli

kohdillaan, ja epäselvyys johtui kuplien suuresta määrästä. Sama ilmiö havaittiin myös Quantum Mark IV sekoittimella tehdyissä referenssiajoissa valkaistulle mäntysellulle. Myös valkaistujen kuitujen läsnäolo vaikeuttaa omalta osaltaan kuvaamista, koska valo heijastuu valkaistun kuidun pinnasta paljon helpommin, kuin valkaisemattomasta kuidusta.

7.3.5 Eri kuvausyhteistä saatujen tulosten vertailu

Eri kuvausyhteistä saatuja tuloksia verrattiin, jotta kuplien käyttäytymistä matkalla sekoittimesta reaktoriin pystyttiin arvioimaan. Matka sekoittimesta kauimpana sijaitsevaan kuvausyhteeseen oli 2,45 m, jolloin putken sisähalkaisijan ollessa 0,168 m viipymäajat putkistossa olivat 1,7 – 5,1 s. Mikäli matkan aikana tapahtuisi merkittävää kuplien yhdistymistä, pitäisi tämän näkyä havaittavissa kuplamäärissä ja keskimääräisessä kuplakoossa. Taulukossa X on esitetty vertailun tulokset virtaamalla 10 l/s.

Taulukko X. Eri kuvausyhteistä saatujen tulosten vertailu virtaamalla 10 l/s sekoittimen pyörimisnopeuden muuttuessa. Sakeus 10,5 %, ilmapitoisuus 20 %, lämpötila 75 °C.

Nopeus [rpm]	Yhde	Kpl [n]	Keskiarvo [mm]	Mediaani [mm]	Moodi [mm]	Keskihajonta [mm]	Min [mm]	Max [mm]
1000	Sekoitin	206	0,069	0,048	0,031	0,06	0,008	0,42
1500	Sekoitin	451	0,037	0,029	0,012	0,023	0,005	0,162
1800	Sekoitin	336	0,045	0,033	0,015	0,042	0,004	0,39
1000	0,55 m	300	0,069	0,048	0,045	0,086	0,004	0,78
1500	0,55 m	692	0,042	0,033	0,018	0,034	0,002	0,358
1800	0,55 m	881	0,036	0,029	0,023	0,026	0,002	0,262
1000	2,45 m	322	0,05	0,039	0,034	0,054	0,005	0,439
1500	2,45 m	532	0,03	0,027	0,016	0,034	0,002	0,324
1800	2,45 m	772	0,035	0,026	0,019	0,032	0,002	0,386

Taulukosta X nähdään, että kuplamäärät sekoittimen jälkeen ovat huomattavasti suurempia, kuin sekoittimen sisällä havaitut. Myös keskimääräinen kuplakoko pienenee. Tämä kertoo siitä, että sekoittuminen jatkuu tutkimuksissa käytetyn sekoittimen päällä sijaitsevan kuvausyhteen jälkeen. Niinpä sekoittimen pesästä saadut tulokset kuvaavat keskeneräistä sekoitustapahtumaa. Verrattaessa 0,55 m ja 2,45 m sekoittimen jälkeen saatuja tuloksia, nähdään, että havaittava kuplamäärä laskee hieman. Kuplamäärän pieneneminen voisi kertoa pienimuotoisesta kuplien

yhdistymisestä, mutta toisaalta samaan aikaan kuplien halkaisijan keskiarvo, mediaani ja moodi pienenevät, mikä viittaa siihen, ettei yhdistymisiä tapahdu merkittävästi kyseisellä virtausnopeudella. Suuremmilla virtausnopeuksilla putkessa vallitseva turbulenssi on suurempi ja pidempikestoisempi, jolloin teorian mukaan kuplien välisiä törmäyksiä ja yhdistymisiä tulisi tapahtua enemmän. Toisaalta taas teorian mukaan turbulenttinen virtaus rikkoo kuplia, joten kuplien käyttäytymisen ennustaminen ilman konkreettista näyttöä on hankalaa.

8 VIRHEARVIO

Mutikainen ja Rantala tekivät töissään virhearvion määrittämällä kolmen rinnakkaisen mittaustuloksen eroavaisuudet. Heidän töissään sekoittamisen alkuvalmistelut olivat monivaiheiset, jolloin tapahtumaan vaikuttavien virhelähteiden määrä on suuri. Kuitenkin rinnakkaismittaukset osoittautuivat hyvin samankaltaisiksi. Tässä työssä mahdollisten virhelähteiden lukumäärä on huomattavasti pienempi, koska kyseessä on jatkuvatoiminen prosessi. Suurimpana virhelähteenä voidaan pitää sitä, ettei pinta-aktiivisen aineen konsentraation tasaisuutta kuitususpension joukossa pystytty toteamaan. Käytettävä pinta-aktiivinen aine annosteltiin pudotusputkeen käsin, samanaikaisesti pumpaten massaa loopin läpi. Sekoittimessa ei tapahdu merkittävää takaisinpäinsekoittumista, joten annostelussa syntyneet konsentraatioerot ovat saattaneet vaikuttaa tuloksiin. Konsentraatioerojen tasoittamiseksi massaa kierrätettiin useita kierroksia loopissa annostelun jälkeen.

Suurin virhelähde tässä työssä on kuplien käsinlaskenta. Matlab-ohjelmisto heikensi kuvan laatua siinä määrin, että pienimpien kuplien havaitseminen muuttui mahdottomaksi. Lisäksi kuplan rajapinnan hahmottaminen oli joissakin tapauksissa vaikeaa. Myös laskentanäytöllä olevat apuviivat peittivät joidenkin pienten kuplien näkyvyyden, jolloin on todennäköistä, että kyseisiä kuplia on jäänyt havaitsematta useita. Toisaalta menettely kaikkien kuvien kohdalla oli samanlainen, ja voidaan ajatella, että samat virheet ovat toistuneet kaikkien kuvien kohdalla.

9 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli määrittää Proto 10 teollisen mittakaavan sekoittimen kyky dispergoida ilmaa keskisakean massan joukkoon. Saatuja tuloksia verrattiin Mutikaisen ja Rantalan edeltävissä töissä saamiin tuloksiin Quantum Mark IV laboratoriosekoittimella. Tarkoituksena oli selvittää, että onko mahdollista saada aikaan valkaistun mäntysellun ja pinta-aktiivisen aineen seoksella ruskeaa mäntymassaa vastaava dispersio, sekä se, voidaanko Quantum Mark IV laboratoriosekoittimessa saatuja tuloksia verrata teollisen mittakaavan sekoittimella saatuihin tuloksiin.

Työ aloitettiin tekemällä vaahtoutuskokeita Fairy original- astianpesuaineella sekä mäntysuovalla. Vaahtoutuskokeissa havaittiin, että mäntysuopaa tarvittaisiin loopissa tehtäviin kokeisiin niin suuri määrä, että ainoaksi vaihtoehdoksi jäi Fairy original-astianpesuaineen käyttäminen. Fairyn vaahtoaminen mäntysuopaan verrattuna oli noin 100-kertainen.

Kokeita jatkettiin Quantum Mark IV referenssiajoilla, jolloin tarkoituksena oli määrittää sellainen pinta-aktiivisen aineen konsentraatio, jolla saadaan aikaiseksi ruskeaa mäntymassaa vastaava dispersio Proto 10 sekoittimessa. Laboratoriosekoittimen ja Proto 10 sekoittimen roottorin kehänopeudet olivat lähellä toisiaan, kun käytettiin laboratoriosekoittimessa pyörimisnopeutta 1200 min^{-1}. Kyseisellä pyörimisnopeudella saatiin ruskeaa massaa vastaava vaahtoutuminen aikaiseksi pinta-aktiivisen aineen konsentraation ollessa 0,10 ml/l. Myöhemmässä tarkastelussa huomattiin, että laboratoriosekoittimella saadut tulokset vastasivat hyvin Proto 10 sekoittimella saatuja tuloksia.

Koeajoissa huomattiin, että kyseinen kuvauslaitteisto soveltuu hyvin valkaistun massan kuvaamiseen. Koska valkaistu massa heijastaa valoa ruskeaa massaa enemmän, valotehon havaittiin olevan riittävä. Käytettäessä kahta stroboskooppia havaittiin, että välillä valoteho oli jopa liian suuri valon heijastuessa valkaistuista kuiduista aiheuttaen häiritseviä heijastumia kuvissa. Valkaistut sellukuidut näkyvät myös kuvissa ruskeita kuituja selvemmin, joten todennäköisesti tässä

työssä saaduista kuvista ei havaittu yhtä syvällä olevia kuplia, kuin Mutikaisen työssä, jossa ruskean massan valottamiseen käytettiin Cavilux pulssilaseria. Lisäksi suuri osa kuvamateriaalista jouduttiin hylkäämään laskennasta sen vuoksi, koska tiheä kuituverkko kamerayhteen linssin kohdalla peitti näkyvyyden putkeen, jolloin yhtään kuplaa ei ollut havaittavissa.

Tarkasteltaessa sekoitusintensiteetin vaikutusta sekoitustulokseen, havaittiin, että sekoittimen sisällä paras dispersio saavutettiin pyörimisnopeudella 1500 min^{-1}. Kyseisen sekoittimen nimelliskäyttöalue on välillä 1500–1800 min^{-1}, joten tulos viittaa siihen, että optimaalinen käyttöalue on lähempänä pyörimisnopeutta 1500 min^{-1}. Sekoittimen jälkeen sen sijaan dispersion laatu ei huonontunut kierrosnopeutta lisäämällä. Pienimmällä virtaamalla sekoitusintensiteetin kasvattamien vaikutti voimakkaasti havaittavaan kuplamäärään. Esimerkiksi 0,55 m sekoittimen jälkeen saaduissa tuloksissa kuplamäärä kasvoi 692:sta 881:een sekoittimen pyörimisnopeuden noustessa 1500:sta 1800:aan min^{-1} virtaaman ollessa 10 l/s. virtaamilla 20 ja 30 l/s kuplamäärä ei merkittävästi kasvanut nostettaessa pyörimisnopeutta yli 1500 min^{-1}. Lisäksi kuplakokojakaumat olivat molemmilla pyörimisnopeuksilla hyvin samankaltaiset, vaikka pyörimisnopeudella 1800 min^{-1} sellutonnin sekoittamiseen käytetty energiamäärä oli noin 0,7 MJ/t suurempi, kuin pyörimisnopeudella 1500 min^{-1}. Tästä voidaan päätellä, että Proto 10 tyyppisessä sekoittimessa pyörimisnopeuden kasvattaminen yli 1500 min^{-1} ei ole sekoitustuloksen, eikä energiankäytön kannalta suositeltavaa. Lisäksi havaittiin, että pyörimisnopeudella 1000 min^{-1} ei saada aikaiseksi yhtä hyvää dispersiota edes pienimmällä virtaamalla.

Tarkasteltaessa virtaaman vaikutusta sekoitustulokseen havaittiin 30 l/s virtaaman olevan riittämätön kunnollisen dispersion aikaansaamiseksi. Pienennettäessä virtaamaa 20 l/s, dispersio muuttui merkittävästi tasaisemmaksi. Yhä virtaamaa pienennettäessä 10 l/s havaittiin, että dispersion kuplakoko pieneni yhä entisestään, mutta ero ei ollut enää yhtä suuri. Erityisen voimakkaasti sekoitusajan kasvattaminen vaikutti havaittavaan kuplamäärään. Niinpä tulokset vahvistavat sen, että virtaaman pienentäminen parantaa dispersion laatua. Samalla sellutonnin sekoittamiseen tarvittava energiamäärä kasvaa, joten on löydettävä optimaalinen

virtaama, jolla saadaan valkaisun kannalta riittävän hyvä dispersio aikaiseksi. Näiden tulosten pohjalta on mahdotonta sanoa, missä vaiheessa kyseinen sekoittumisen taso saavutetaan, sillä kuplan pinta-ala on valkaisun kannalta määräävä tekijä. Tähän mennessä ei ole vielä selvillä, miten suuri neste- ja kaasufaasin välinen kontaktipinta-ala kunnollisen valkaisun aikaansaamiseksi tarvitaan. Mikäli tämän työn jälkeen tutkimuksia päätetään jatkaa, olisi kyseisen pinta-alan määrittäminen tarpeen, jotta tiedetään, mihin kuplakokoluokkaan sekoituksella tulee päästä.

Kuvausyhteiden välisessä vertailussa havaittiin, että sekoittimen sisältä kuvattu dispersio ei kuvaa valmista sekoitustulosta, sillä sekoittimen jälkeen havaitut kuplamäärät ovat merkittävästi suurempia ja keskimääräiset kuplakoot merkittävästi pienempiä. Esimerkiksi pyörimisnopeudella 1500 min^{-1} ja virtaamalla 10 l/s sekoittimen sisällä havaitaan 336 kuplaa, kun taas 0,55 m sekoittimen jälkeen havaittu kuplamäärä on samoilla arvoilla 881. Tästä voidaan päätellä, että sekoittimen pesästä otetut kuvat kuvaavat keskeneräistä sekoitustapahtumaa.

Tutkittaessa pinta-aktiivisen aineen konsentraation vaikutusta sekoitustulokseen havaittiin, että konsentraation noustessa havaittu kuplamäärä kasvaa voimakkaasti. Samalla keskimääräinen kuplakoko pienenee voimakkaasti. Myös suuret, yli 0,15 mm halkaisijaltaan olevat kuplat harvinaistuvat. Tutkimuksille sopivaksi konsentraatioksi määritettiin 0,10 ml/l. Kyseisellä konsentraatiolla saatiin laskukelpoisia kuplien laskemiseen soveltuvia kuvia kaikilla käytetyillä pyörimisnopeuksilla ja virtaamilla. Lisäksi kuplamäärät ja koot olivat samaa luokkaa Mutikaisen ja Rantalan edeltävissä töissä.

10 KEHITYSEHDOTUKSET

Valkaistun mäntysellun kuvaamisessa käytetyillä stroboskoopeilla aikaansaatu valoteho oli kuvaamisen kannalta riittävä. Testimielessä kokeiltiin, pystyttäisiinkö pelkästään toista stroboskooppia käyttämällä aikaansaamaan riittävä valoteho kuplien kuvaamiseen. Kuvaaminen onnistui hyvin kameran asetuksia säätämällä,

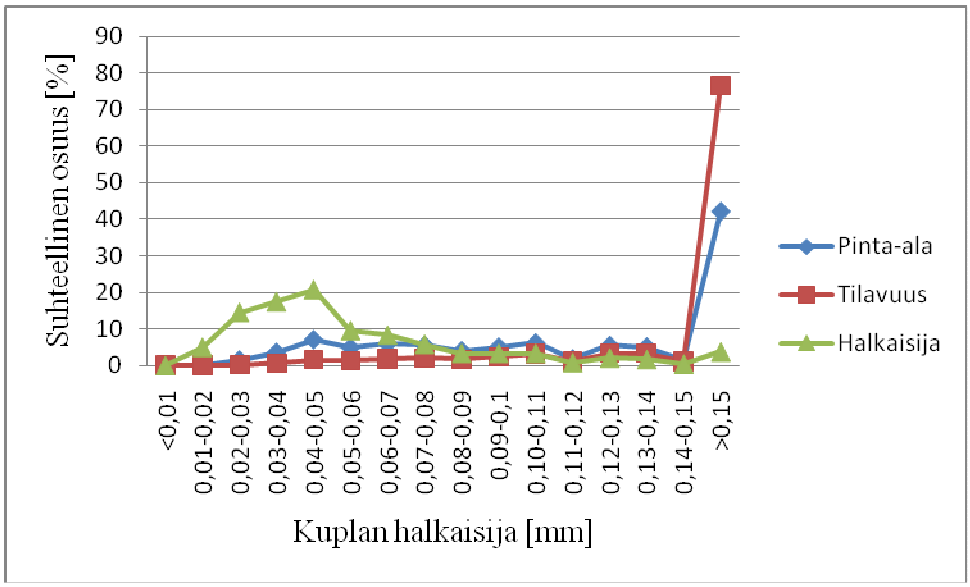
joten kyseisellä laitteistolla myös kahden kameran yhtäaikainen käyttäminen olisi mahdollista. Kyseistä mahdollisuutta tutkittiin tämän työn tiimoilta, mutta hankkeesta päätettiin luopua kuvauspaikan tilanpuutteen vuoksi. Lisäksi kyseessä on jatkuvatoiminen prosessi, jolloin alkuvalmistelut eivät vaikuta lopputulokseen yhtä voimakkaasti kuin laboratoriosekoittimella tehdyissä kokeissa. Kuitenkin loopissa olevien konsentraatioerojen vaikutusta voitaisiin vähentää useamman kameran yhtäaikaisella käytöllä. Niinpä tulevissa töissä toisen kameran käyttöönotto on varteenotettava vaihtoehto.

Tässä työssä kaasun dispergoitumista valkaistun mäntysellun joukkoon tutkittiin käyttämällä pinta-aktiivista ainetta pysyvien kuplien aikaansaamiseen. Tuloksia voidaan pitää referenssiajojen perusteella hyvin teollisuuden happivaiheen sekoitusta kuvaavina. Pienetkin erot pinta-aktiivisuudessa vaikuttavat merkittävästi kuplien käyttäytymiseen, kuten yhdistymiseen ja hajoamiseen. Niinpä kokeita olisi järkevää jatkaa tekemällä vastaavanlaiset koeajot samalla laitteistolla käyttäen tehtaalta hankittua autenttista happivaiheeseen menevää massaa. Kokeet on syydä tehdä sekä koivu, että mäntymassalle, jotta tuloksia voidaan verrata Mutikaisen ja Rantalan töissä havaittuihin eroavaisuuksiin.

Tätä työtä tehdessä heräsi kysymyksiä vaahdonestoainejäämien vaikutuksesta happivaiheen sekoitustulokseen. Aikaisempia kokeita varten käytettävät massat on hankittu suomalaiselta sellutehtaalta, jossa sekä koivu että mäntylinjaan annostellaan vaahdonestoainetta useisiin eri vaiheisiin. Mäntylinjalla vaahdonestoainetta käytetään merkittävästi suurempia määriä. Yleensä vaahdonestoaine annostellaan ennen pesuria, jotta vaahtoaminen ei heikentäisi pesutulosta. Niinpä myöhempiin pesuvaiheisiin annosteltu vaahdonestoaine kulkeutuu vastavirtapesussa aikaisempiin vaiheisiin pesusuodosten mukana. Käytettäessä silikonipohjaisia vaahdonestoaineita osa käytetystä annoksesta kulkeutuu myös kuitujen mukana seuraaviin vaiheisiin. Niinpä on syytä olettaa, että vaahdonestoaineet vaikuttavat merkittävästi myös massan sekoittamiseen, joten kyseistä asiaa olisi syytä tutkia tulevissa töissä.

Kuplien laskenta tehtiin käsin Matlab – pohjaisella roskalaskentaohjelmalla. Käsinlaskenta on hyvin työlästä, ja virheiden määrä lisääntyy ohjelmiston huonontaessa kuvanlaatua. Pienimpien kuplien erottaminen laskentaohjelmiston kuvasta oli käytännössä mahdotonta. Lisäksi ohjelmisto on suunniteltu roskien laskentaan selluarkeista, eikä sovellu hyvin kuplien laskentaan. Mikäli vastaavanlaista tutkimusta halutaan jatkaa, tulisi tilalle kehittää ohjelmisto, joka osaa laskea kuplat automaattisesti.

Tulosten käsittelyssä on syytä miettiä, onko kuplien kokojakaumat järkevää ilmaista kuplan halkaisijoiden perusteella. Mikäli kokojakauma muutetaan pinta-ala- tai tilavuuspohjaiseksi, saadaan aikaiseksi täysin erilainen jakauma. Jotta kaasumainen kemikaali pystyy reagoimaan kuidussa olevien värillisten yhdisteiden kanssa, täytyy sen ensin liueta nestefaasiin. Tässä tapahtumassa määräävä tekijä on kuplan pinta-ala. Jotta kaasumainen kemikaali saadaan liukenemaan hyvin nestefaasiin, on faasien välisen kontaktipinta-alan oltava mahdollisimman suuri. Mitä pienempinä kuplina kaasu saadaan dispergoitua massan joukkoon, sitä suuremmaksi kokonaispinta-ala muodostuu. Tulevissa töissä olisi järkevää määrittää, mikä on kyseinen kuplan koko, jolla aikaansaadaan riittävä kontaktipinta-ala hyvän valkaisun aikaansaamiseksi. Lisäksi on syytä miettiä, olisiko tulokset järkevämpää ilmaista pinta-alapainotteisina, koska valkaisun lopputuloksen kannalta juuri pinta-ala on ratkaiseva tekijä. Tämän työn tulosten pohjalta voidaan sanoa, että mitä pienemmiksi kupliksi kaasu halutaan dispergoida, sitä enemmän energiaa sekoittamiseen joudutaan käyttämään. Niinpä olisi järkevää määrittää sellainen kuplakoko, jolla riittävä valkaisutulos saavutetaan, ja johon sekoituksessa pyritään. Tällöin voidaan välttää ylisekoittamasta kuitususpensiota, jolloin säästetään energiaa, ja sekoituksessa aiheutuvat kuituvauriot vähenevät. Kuvassa 32 on esitetty halkaisija, pinta-ala ja tilavuuspohjaisten kuplakokojakaumien eroavaisuudet.



Kuva 32. Halkaisija-, pinta-ala-, ja tilavuuspainotteisten kuplakokojakaumien eroavaisuudet sekoittimen pyörimisnopeudella 1500 min^{-1} virtaamalla 30 l/s sekoittimen pesästä tarkasteltuna. Sakeus 10,5 %, ilmapitoisuus 20 %, lämpötila 75 °C

Kuvasta 32 nähdään, että kuplakokojakauma muuttuu merkittävästi, mikäli tarkastelu tehdään joko pinta-ala tai tilavuuspainotteisena. Tilavuuspainotteista kuvaajaa tarkasteltaessa huomataan, että miltei 80 % kaasusta on suurissa, yli 0,15 mm halkaisijaltaan olevissa kuplissa. Sen lisäksi, että tulokset esitettäisiin pinta-ala- tai tilavuuspainotteisena, olisi järkevää miettiä, millaisella asteikolla tarkastelu tehdään.

Tässä työssä käytetty kuva-ala oli hyvin pieni, 2,65×2,01 mm^2. Kuvissa havaittiin, että joukossa liikkui myös niin suuria kuplia, etteivät ne sopineet kuvaan. Tällaiset kuplat pystyttiin havaitsemaan, kun kuplan rajapinta kulki kuvan lävitse. Kokeita olisi järkevää tehdä käyttämällä huomattavasti suurempaa kuva-alaa, jolloin nähtäisiin varmuudella, kuinka yleisiä kyseiset suuret kuplat ovat. Valkaisun kannalta suurten kuplien merkitys on suuri, koska valtaosa kaasumäärästä kulkeutuu suurten kuplien mukana reaktorin läpi, jolloin kemikaali ei pääse reagoimaan kuidussa olevien värillisten yhdisteiden kanssa. Esimerkiksi 2 mm halkaisijaltaan oleva kupla sisältää 1 000 000 kertaa enemmän kaasua, kuin 0,02 mm halkaisijaltaan oleva kupla. Niinpä muutaman suuren kuplan merkitys voi olla huomattava.

LÄHDELUETTELO

1. Pikka, O., Vesala, R., Vilpponen, A., Bleaching applications, Papermaking Science and Technology, Book 6A, *Chemical Pulping*, Gullichsen, J., Fogelholm, C-J., (Eds.), Fapet Oy, Jyväskylä, 2000, s. 616-665

2. Hietaniemi, J., Gullichsen, J., Keskisakean kuitususpension reologia, KCL Paper Science Centre, PSC Communications 63, 1994, 100 s.

3. Lindsay, J., Gullichsen, J., Pulp Pumping and Hydraulics, *Pulp Bleaching – Principles and Practice*, Dence, C.W., Reeve, D.W., (Eds.), Tappi Press, 1996, s. 513-536

4. Gullichsen, J., Härkönen, E., Niskanen, T., Medium-consistency technology, *TAPPI Journal*, **64**(1981)9, s. 113-116

5. Gullichsen, J., Härkönen, E., Medium consistency technology, *TAPPI Journal*, **64**(1981)6, s. 69-72

6. Mason, S.G., The Motion of Fibres in Flowing Liquids, *Pulp and Paper Magazine of Canada*, **51**(1950)4, s. 93

7. Mason S.G., Fibre Motions and Flocculation, *TAPPI Journal*, **37**(1954)11 s. 494

8. Lee, C.W., Brodkey, R.S., A visual study of pulp floc dispersion mechanism, *AIChe Journal*, **33**(1987)2, s. 297-302

9. Duffy, G., Titchener, A.L., The disruptive shear stress of pulp networks, *Svensk Papperstid*, **78**(1975)13, s. 474-479

10. Suomalainen insinöörityöpalkinto 1981-2007 [verkkojulkaisu], Tekniikan akateemisten liitto TEK, Teknisk Föreningen i Finland TFiF, 2007, [viitattu 28.1.2011] Saatavissa: http://www.tek.fi/ci/pdf/teknologia/sitp2007.pdf

11. Brecht, W., Heller, H., A study of the friction losses of paper stock suspensions, *TAPPI Journal*, **33**(1950)14A

12. Gullichsen, J., Chemical engineering principles of fiber line operations, Papermaking Science and Technology, Book 6A, *Chemical Pulping*, Gullichsen, J., Fogelholm, C-J., (Eds.), Fapet Oy, Jyväskylä, 2000, s. 244-327

13. Duffy, G., Longdill, G., Lee, P.F.W., High consistency flow of pulp suspensions in pipes, *TAPPI Journal*, **61**(1978)9, s. 85-88

14. Kurronen, S., Kuitulietteiden virtaus ja pumppaus ja massasulpun kyyppivarastointi, Suomen Paperi-insinöörien yhdistyksen oppi- ja käsikirja, *Puumassan valmistus II osa 1*, Virkola, N-E., (Ed.), Oy Turun Sanomat, Turku, 1983, s. 639–682

15. Hörnstein, P., Deaeration of brown stoc, Proc. 1988 Tappi Pulping conference, New Orleans, USA, October 30 – November 3, 1988, pp. 113-116

16. Perttula, T., Kaasun jakauma paineellisissa sulpunkäsittelylaitteissa, *diplomityö*, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, kemiantekniikan osasto, Lappeenranta, 2005

17. Sulzer pumps - MC Products, [verkkojulkaisu], Sulzer Pumps Ltd, 2011, [viitattu 3.5.2011] Saatavissa: http://www.sulzerpumps.com/DesktopDefault.aspx/tabid-366/661_read-1266/

18. Viheriälehto, T., Keskisakean puumassan sekoitus, *diplomityö*, Teknillinen korkeakoulu, prosessi- ja materiaalitekniikan osasto, Espoo, 1987

19. Bennington, C.P.J., Kerekes, R.J., Grace, J.R., Mixing in Pulp Bleaching, TAPPI Seminar Notes, Bleach Plant Operations, 1989, s. 518-529

20. Earl, P., Reeve, D., The impact of high intensity mixers on bleach plant performance, TAPPI Seminar Notes, Bleach Plant Operations, 1989, s. 131-138

21. Härkönen, E., Hydrodynaaminen sekoitus selluloosateollisuudessa, *Sekoitustekniikka puunjalostus- ja kemianteollisuudessa*, INSKO julkaisu 101–85, 1985, s. 1-13

22. Lehtola, S., Sekoitustarve, *Sekoitustekniikka puunjalostus- ja kemianteollisuudessa*, INSKO julkaisu 101-85, 1985, s. 3

23. Paterson, A.H.J., Kerekes, R.J., Fundamentals of mixing in pulp suspensions: Measurement of microscale mixing of chlorine, *CPPA 71st Annual Meeting Technical Section*, Book A, 1985, s. 37-42

24. Meredith, M.D., Application of swept area mixers, TAPPI Medium Consistency Mixing Seminar, 1985, s. 39-44

25. Bennington, C.P.J., Mixing and Mixers, *Pulp Bleaching – Principles and Practice*, Dence, C.W., Reeve, D.W., (Eds.), Tappi Press, 1996, s. 537-568

26. Henricson, K., MC Mixing, *Fiberline Operations*, luentomateriaali, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, kevät 2008

27. Henricson, K., MC Ozone, *Fiberline Operations*, luentomateriaali, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, kevät 2008

28. Reeve, D.W., Chlorine Dioxide in Bleaching Stages, *Pulp Bleaching – Principles and Practice*, Dence, C.W., Reeve, D.W., (Eds.), Tappi Press, 1996, s. 379-394

29. Bennington, C.P.J., Mixing gases into medium-consistency pulp suspension using rotary devices, *TAPPI Journal*, **76**(1993)7, s. 77-86

30. Bourne, J.R., Mixing on the molecular scale, *Chemical Engineerinc Science Journal*, **38**(1983)5, s. 1

31. Bennington, C.P.J., Kerekes, R.J., Power requirements for pulp suspension fluidization, *TAPPI Journal*, **79**(1994)2, s. 253-258

32. Ishkintana, L.K., Bennington, C.P.J., Bubble shape, gas flow and gas-liquid mass transfer in pulp fibre suspensions, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **88**(2010)3, s.322-328

33. Bennington, C.P.J., Mixing in the pulp and paper industry, *Handbook of industrial mixing – science and practice*, Paul, E.L., Atiemo-Obeng, V.A., Kresta, S.M., (Eds.), John Wiley & Sons Inc., 2004, s. 1187- 1246

34. Bennington, C.P.J., Owusu, G., Francis, D.W., Gas-Liquid Mass Transfer in Pulp Suspension Mixing Operations, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **75**(1997)1, s.53-61

35. Bouchard, J., Beck, S., Bennington, C.P.J., Berry, R., Determination of oxygen penetration rate in medium-consistency kraft pulps, *Appita Journal*, **58**(2005)6, s. 484-487

36. Laari, A., Gas-liquid mass transfer in bubbly flow: Estimation of mass transfer, bubble size and reactor performance in various applications, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 229, Lappeenranta, 2005. 86 s.

37. Prince, M.J., Blanch, H.W., Bubble coalescence and break-up in air sparged bubble columns, *AlChE Journal*, **36**(1990)10, s. 1485-1499

38. Colella, D., Vinci, D., Bagatin, R., Masi, M., Abu Bakr, E., A study on coalescence and breakage mechanisms in three different bubble columns, *Chemical Engineering Science*, **54**(1999)21, s. 4767-4777

39. Marucci, G., A Theory of coalescence, *Chemical Engineering Science*, **24**(1969), s.975-985

40. Garner, A.E., Heindel, T.J., The Effect of Fibre Type on Bubble Size, *Journal of Pulp and Paper Science*, **26**(2000)7, s. 266-269

41. Mutikainen, H., Dispersion karakterisointi laboratoriosekoittimessa, *diplomityö*, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Kemia, Lappeenranta, 2011

42. Rantala, J.P., Kuplakokojakauman hallinta happidelignifioinnissa, *diplomityö*, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Kemian laitos, Lappeenranta, 2010

43. Heindel, T.J., Garner, A.E., The effect of fiber consistency on bubble size, *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, **14**(1999)2, s. 171-178

44. Rautiainen, R., Sulpun kuvantaminen painelajittelussa, *diplomityö*, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, tietotekniikan osasto, Lappeenranta, 2007

LIITTELUETTELO

LIITE I Koeajosuunnitelma ja koeajopöytäkirja

LIITE II Kokeiden Tehon- ja energiankulutukset

LIITE III Kuvia Käytetyistä laitteistoista

LIITE IV Esimerkkejä laskentaan käytetyistä kuvista

Taulukko I Koesuunnitelma ja mittauspöytäkirja sekoittimen pesästä tehdyille kokeille eri pinta-aktiivisen aineen konsentraatioilla. Kaikissa kokeissa massan sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C ja ilmapitoisuus 20 %.

virtaama [l/s]	Nopeus [rpm]	Konsentraatio [ml/l]	Ajettu	Laskenta tehty
10	1000	0	X	
10	1000	0,05	X	
10	1000	0,1	X	X
10	1000	0,15	X	
10	1500	0	X	
10	1500	0,05	X	
10	1500	0,1	X	X
10	1500	0,15	X	
10	1800	0	X	
10	1800	0,05	X	
10	1800	0,1	X	X
10	1800	0,15	X	
20	1000	0	X	
20	1000	0,05	X	
20	1000	0,1	X	X
20	1000	0,15	X	
20	1500	0	X	X
20	1500	0,05	X	X
20	1500	0,1	X	X
20	1500	0,15	X	X
20	1800	0	X	
20	1800	0,05	X	
20	1800	0,1	X	X
20	1800	0,15	X	
30	1000	0	X	
30	1000	0,05	X	
30	1000	0,1	X	X
30	1000	0,15	X	
30	1500	0	X	
30	1500	0,05	X	
30	1500	0,1	X	X
30	1500	0,15	X	
30	1800	0	X	
30	1800	0,05	X	
30	1800	0,1	X	X
30	1800	0,15	X	

Taulukko II Koesuunnitelma ja mittauspöytäkirja 0,55 m sekoittimen jälkeen 0,168 m halkaisijaltaan olevassa putkessa tehdyille kokeille eri pinta-aktiivisen aineen konsentraatioilla. Kaikissa kokeissa massan sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C ja ilmapitoisuus 20 %.

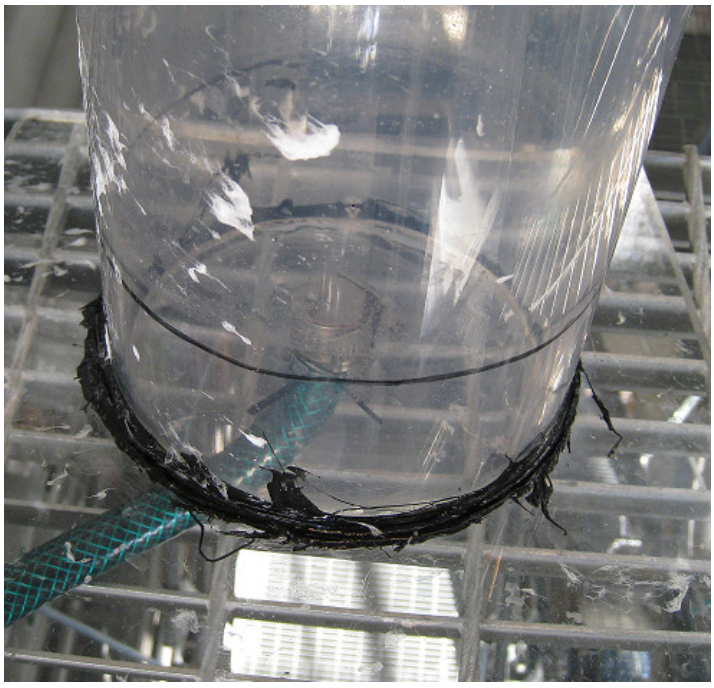
Virtaama [l/s]	Nopeus [rpm]	Konsentraatio [ml/l]	Ajettu	Laskenta tehty
10	1000	0	X	
10	1000	0,05	X	
10	1000	0,1	X	X
10	1000	0,15		
10	1500	0	X	
10	1500	0,05	X	
10	1500	0,1	X	X
10	1500	0,15		
10	1800	0	X	
10	1800	0,05	X	
10	1800	0,1	X	X
10	1800	0,15		
20	1000	0		
20	1000	0,05		
20	1000	0,1		
20	1000	0,15		
20	1500	0		
20	1500	0,05		
20	1500	0,1		
20	1500	0,15		
20	1800	0		
20	1800	0,05		
20	1800	0,1		
20	1800	0,15		
30	1000	0		
30	1000	0,05		
30	1000	0,1		
30	1000	0,15		
30	1500	0		
30	1500	0,05		
30	1500	0,1		
30	1500	0,15		
30	1800	0		
30	1800	0,05		
30	1800	0,1		
30	1800	0,15		

Taulukko III Koesuunnitelma ja mittauspöytäkirja 2,45 m sekoittimen jälkeen 0,168 m halkaisijaltaan olevassa putkessa tehdyille kokeille eri pinta-aktiivisen aineen konsentraatioilla. Kaikissa kokeissa massan sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C ja ilmapitoisuus 20 %.

Virtaama [l/s]	Nopeus [rpm]	Konsentraatio [ml/l]	Ajettu	Laskenta tehty
10	1000	0	X	
10	1000	0,05	X	
10	1000	0,1	X	X
10	1000	0,15	X	
10	1500	0	X	
10	1500	0,05	X	
10	1500	0,1	X	X
10	1500	0,15	X	
10	1800	0	X	
10	1800	0,05	X	
10	1800	0,1	X	X
10	1800	0,15	X	
20	1000	0	X	
20	1000	0,05	X	
20	1000	0,1	X	X
20	1000	0,15	X	
20	1500	0	X	X
20	1500	0,05	X	X
20	1500	0,1	X	X
20	1500	0,15	X	X
20	1800	0	X	X
20	1800	0,05	X	
20	1800	0,1	X	X
20	1800	0,15	X	X
30	1000	0	X	
30	1000	0,05	X	
30	1000	0,1	X	X
30	1000	0,15	X	
30	1500	0	X	
30	1500	0,05	X	
30	1500	0,1	X	X
30	1500	0,15	X	
30	1800	0	X	
30	1800	0,05	X	
30	1800	0,1	X	X
30	1800	0,15	X	

Taulukko IV Sekoituskokeiden tehonkulutukset eri virtaamilla ja sekoitusnopeuksilla, sekä sellutonnin sekoittamiseen käytetty energiamäärä. Kaikissa kokeissa massan sakeus 10,5 %, lämpötila 75 °C ja ilmapitoisuus 20 %.

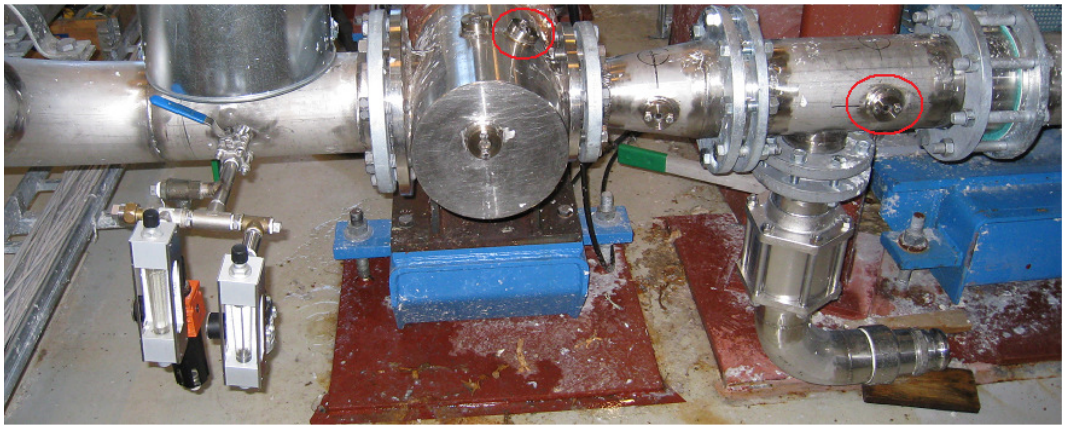
Virtaama [l/s]	Nopeus [rpm]	Tehonkulutus [kW]	Energiankulutus [MJ/t]
10	1000	2,7	270
10	1500	4,8	480
10	1800	6,2	620
20	1000	2,4	120
20	1500	5,7	285
20	1800	7,1	355
30	1000	3	100
30	1500	6	200
30	1800	7,95	265



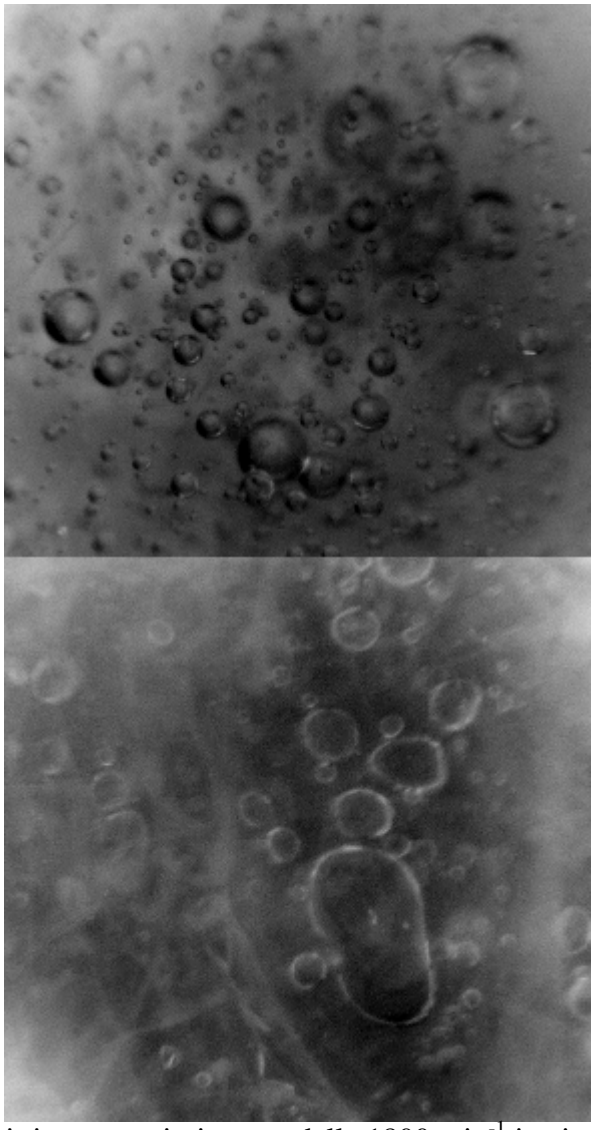
Kuva 1. Vaahtoutuskokeissa käytetyn laitteen pohja. Putken halkaisija 110 mm, korkeus 1 m ja pohjan läpituodun ilmaletkun halkaisija 11 mm.

Kuva 2. Mäntysuodoksen vaahtoaminen koelaitteessa.

Kuva 3. Koivusuodoksen vaahtoaminen koelaitteessa.

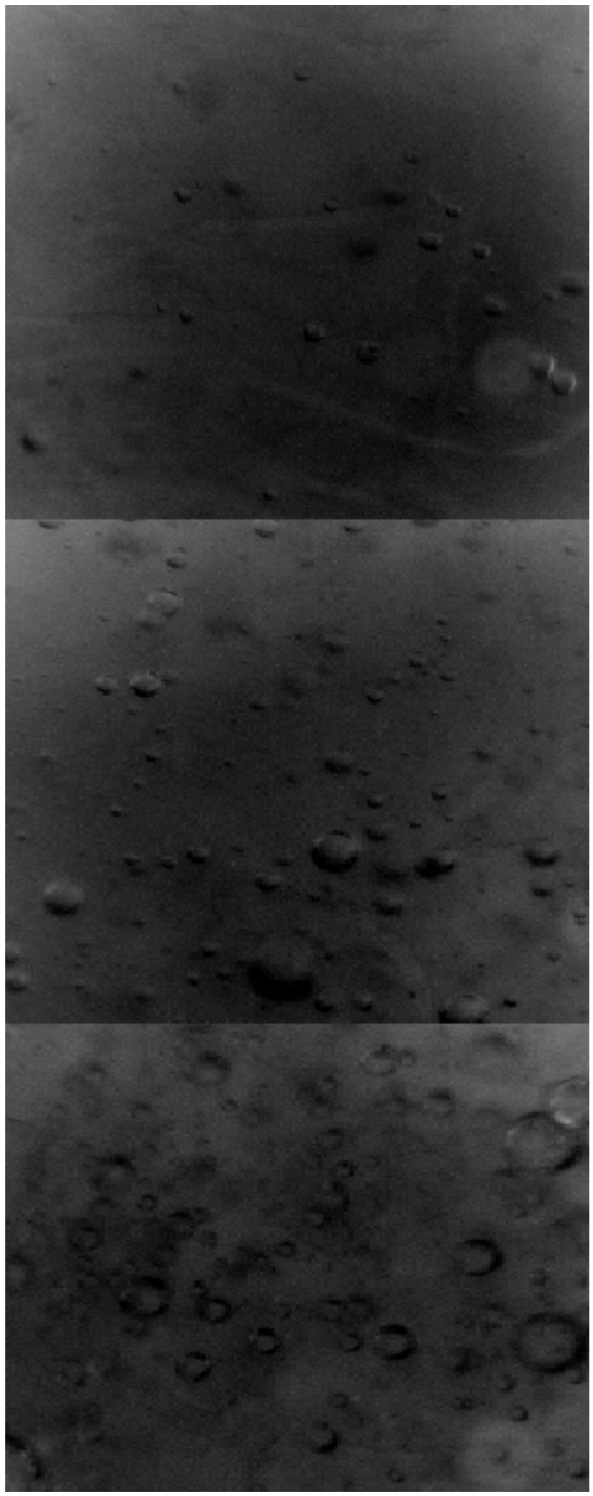


Kuva 4. Proto 10 sekoitin. Kuvaan on merkitty käytetyt kuvausyhteet. Kolmas kuvausyhde sitjaitsi kauempana putkistossa 2,45 m sekoittimen jälkeen. Kuvan vasemmassa alalaidassa näkyvät ilmapitoisuuden säätämiseen käytetyt rotametrit. Höyrynsyöttöputki näkyy kuvassa rotametrien yläpuolella.

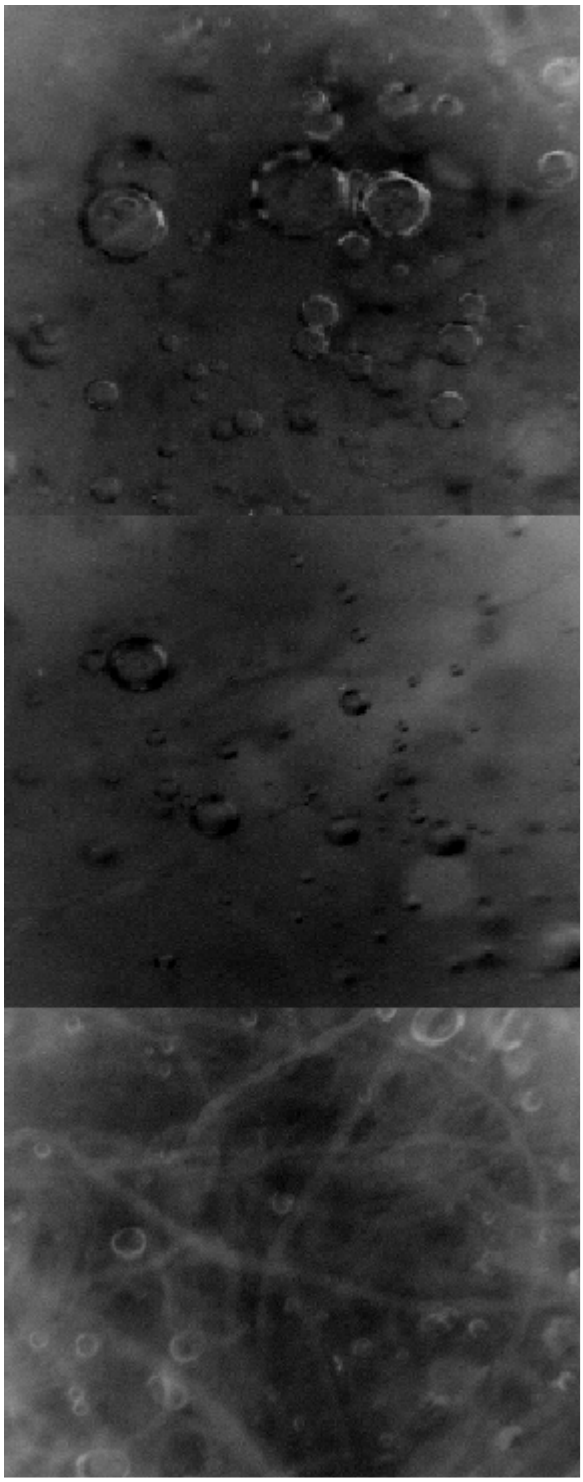


Kuva 5. Sekoittimen pyörimisnopeudella 1800 min^{-1} ja virtaamalla 10 l/s otetut kuvat. Ylempi kuva on otettu 2,45 m sekoittimen jälkeen ja alempi kuva sekoittimen pesästä.

Kuvasta 5 nähdään, että sekoittimen pesästä havaitut kuplamäärät olivat merkittävästi vähäisempiä, kuin putkistossa sekoittimen jälkeen havaitut kuplamäärät. Tämä kertoo siitä, että sekoittimesta otetut kuvat kuvaavat keskeneräistä sekoitustapahtumaa.



Kuva 6. Sekoitusintensiteetin vaikutus kuplamäärään 0,45 m sekoittimen jälkeen virtaamalla 10 l/s. Pyörimisnopeudet ylhäältä alaspäin 1000, 1500 ja 1800 min^{-1}.



Kuva 7. Virtaaman vaikutus sekoitustulokseen 2,45 m sekoittimen jälkeen sekoittimen pyörimisnopeudella 1500 min^{-1}. Virtaamat ylhäältä alaspäin 10, 20 ja 30 l/s.